

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

**STUDIO DI FATTIBILITA'**  
**DELLA PRIMA FASE DELLA PIATTAFORMA EUROPA**  
**DEL PORTO DI LIVORNO**

**RELAZIONE ILLUSTRATIVA**



**RELAZIONE "A6"**  
**ANALISI SOMMARIA DEGLI ASPETTI**  
**GEOLOGICI, GEOTECNICI IDROGEOLOGICI**

**INDICE**

1.	INTRODUZIONE	2
2.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	3
2.1	Evoluzione Paleogeografica e Storica dell'Areale in Studio	4
2.2	Informazioni Stratigrafiche dalla Pagina Storica dei Luoghi	10
2.3	Caratteri Geostrutturali Generali dell'Ambito di Studio	12
2.4	Lineamenti Geologici degli Affioramenti di Superficie	15
2.5	Brevi Lineamenti Geomorfologici della Zona	15
2.6	Elementi Lito-stratigrafici Generali della Piana di Livorno	19
3.	IDROGEOLOGIA	23
4.	CARATTERISTICHE STRATIGRAFICHE E GEOTECNICHE	27
4.1	Raccolta Bibliografica di Notizie e Dati Geognostici	27
4.2	Definizione della situazione lito-stratigrafica locale	30
4.3	Caratterizzazione sismica dei terreni.	37
4.4	Studio di amplificazione sismica locale	39
4.5	Verifica del potenziale di liquefazione	39
5.	PROBLEMATICHE GEOTECNICHE	41

APPENDICE: PROFILI STRATIGRAFICI

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

## 1. Introduzione

La presente relazione descrive le caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito nel quale dovranno essere realizzate le opere previste nel presente studio di fattibilità, e valuta la compatibilità degli interventi previsti con le problematiche geotecniche ad esse connesse.



<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

*“La Torre del Marzocco non è lontano che un colpo di fucile, il mare ritiratosi sensibilmente, non essendo gran tempo che essa era discosta un tiro di cannone. A partire dal terzo quarto del Cinquecento fino allora, infatti, l’avanzamento della costa era stato di circa 400 metri, da non molto tempo si era formata una stretta penisola o tombolo e la costa (riunendo alcuni precedenti isolotti), che lambiva la vecchia Torre Magnan e inglobava le Torracce. Parallelamente alla costa si sviluppavano – fra terreni bassi, sabbiosi e paludosi con alcune dune boschive, dove si aggiravano alcuni bufali al pascolo – il Fosso delle Chiatte (passante più in prossimità della spiaggia, attraverso le località dette Monte del Bersaglio e Testaja) ed il Canale dei Navicelli.”*

**Odoardo Warren, 1748**

Al fine di riconoscere l’origine e le principali caratteristiche dei terreni e per parametrizzarne le qualità è stata predisposto il presente studio che comprende ed illustra:

1. La situazione lito-stratigrafica locale con la definizione dell’origine e natura dei litotipi;
2. Le principali caratteristiche dei litotipi in particolare del loro stato di alterazione e fratturazione e della loro degradabilità;
3. I lineamenti geomorfologici della zona e gli eventuali processi morfologici ed i dissesti in atto o potenziali;
4. I caratteri geostrutturali generali, la geometria e le caratteristiche delle superfici di discontinuità;

Tali aspetti sono stati sviluppati sulla base dei risultati degli analoghi studi eseguiti in passato nell’area di interesse e/o in aree limitrofe ed in particolare di quelli sviluppati in occasione della progettazione delle due vasche di colmata del porto di Livorno.

Sotto il profilo squisitamente geografico l’area marina-litoranea dove è prevista la realizzazione delle opere in esame è limitata:

- Verso Ovest dal mare;
- Verso Nord con il mare e più a settentrione con il tratto Terminale dello Scolmatore d’Arno;
- Verso Est dalle banchine del Porto Industriale ed in particolare dalla Darsena Toscana;

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

-Verso Sud dalle due vasche di contenimento.

Al fine di delineare un quadro geologico più esauriente, in considerazione dei numerosi studi ed approfondimenti disponibili, è stato possibile inquadrare l'area in esame in un ambito più ampio estendendone i limiti geografici e fisiografici precedenti a:

- Verso Ovest fino almeno alla "Gabbia delle Melorie" di interesse per i risvolti in ordine ai movimenti eustatici marini;
- Verso Nord fino almeno al sistema dunale, di retro-duna e di piana costiera verso il Calambrone, Tirrenia fino alla foce dell'Arno;
- Verso Nord-Est fino alla Piana di Pisa ed alle sue ricariche permanenti dei Monti e delle Colline Pisane;
- Verso Est e verso Sud all'intera Piana di Livorno ed alle sue ricariche permanenti dei Monti e delle Colline Livornesi.

## 2.1 Evoluzione Paleogeografica e Storica dell'Areale in Studio

Tralasciando l'evoluzione paleogeografica nelle ere più remote gli studi hanno messo in luce che nel Miocene Superiore (10-5 MYA), l'area dei Monti Livornesi era circondata dal mare e nel Pliocene Inferiore il dominio marino raggiungeva la sua massima estensione, con le cime più elevate che dovevano costituire un arcipelago di piccole isole. A partire dal Pliocene Medio, con il graduale ritiro del mare, si sviluppa nel tempo una diffusa rete idrografica con spiccata tendenza erosiva. Per questo motivo, nella zona più montana non ci sono residui di strutture geomorfologiche superficiali più antiche di queste ere.

Dal Miocene Superiore, circa 10 MYA, cominciano a manifestarsi nella Toscana marittima fasi distensive con bacini in sprofondamento (la Piana di Livorno, la Piana di Pisa, il bacino del Tora-Fine), separati da aree più elevate (i Monti Livornesi).

Questa tettonica continua a fasi alterne per tutto il Pliocene (nel Pliocene Medio si ha una fase di lento sollevamento generale) ed è attiva fino al Pleistocene Inferiore, intorno a 1,5 MYA.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Fino ad allora la piana litoranea continua a fare parte di un bacino in subsidenza interessato da repentini ma limitati sprofondamenti. Con la fine del Pleistocene Inferiore, il modellamento geomorfologico non è più guidato dai movimenti lungo le faglie, mentre assumono una grande importanza le oscillazioni del livello del mare legate all'eustatismo glaciale; ciò almeno lungo la fascia costiera interessata dai terrazzi.

Durante il Pleistocene Medio, che inizia 0,7 MYA anni fa ed ha una durata di circa 0,6 MA, si registra un lentissimo sollevamento che si esaurisce intorno ai 100.000 anni fa.

In questo periodo vengono modellati i terrazzi che orlano verso mare i Monti Livornesi. La spianata più alta, il Terrazzo di Fattoria delle Pianacce, si è formato nell'interglaciale Mindel-Riss (0,25-0,4 MYA), questo terrazzo più interno e più elevato si trova tra le quote 60 e 120 m. l.m.m. ed occupa una fascia larga al massimo un paio di chilometri, orlando i direzione NNE-SSW i Monti Livornesi, dalle colline di Guasticce, a Nord, a Calafuria.

Per la Piana di Livorno non possono essersi conservate naturalmente morfologie più antiche dell'età dei vari terrazzi eustatici che la compongono. Qui la conformazione idrografica è certamente posteriore al Tirreniano (0,1 MYA), poiché le aste fluviali incidono il terrazzo riferibile a questo piano. La rete idrografica assume la conformazione attuale durante le glaciazioni del Wurm.

Si può ritenere comunque che, anche prima delle trasgressioni tirreniane, non esistesse un sistema di valli ben incise, che la morfologia fosse pianeggiante e che i fenomeni di deposizione successivi abbiano sepolto queste lievi ondulazioni, formando una piana in debolissima pendenza sulla quale i corsi d'acqua devono avere dilavato in superficie, con un potere erosivo piuttosto limitato. Migliori sono le attuali conoscenze sul Pleistocene superiore al limite meridionale del bacino versiliese-pisano, cioè sul cosiddetto Terrazzo di Livorno. Quest'ultimo indicato anche come Terrazzo II è stato ben definito dai lavori di Mazzanti e Federici come "policiclico". Infatti è formato da un ciclo sedimentario marino inferiore con fauna calda a *Strombus bubonius* (Tirreniano I), sormontato da un ciclo continentale Intratirreniano (con livelli ad associazioni polliniche e malacologiche, denotanti un clima freddo-umido), sormontato a sua volta da un secondo ciclo sedimentario marino (Tirreniano II), cui infine si sovrappongono depositi continentali con industrie del Paleolitico medio e quindi ancora rientranti nell'ambito del Pleistocene superiore.

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Facendo riferimento ad una situazione stratigrafica più generale Federici e Mazzanti hanno ritenuto di identificare il primo episodio trasgressivo del livornese (Tirreniano I) ed il secondo (Tirreniano II), i cui acmi vengono indicati a circa 125.000 e 110.000 anni or sono.

Questo Terrazzo morfologico si è modellato successivamente alla sua formazione sia per l'azione dei corsi d'acqua, sia per l'oscillazione del livello marino che è sempre stata discontinua e legata alle fasi glaciali ed interglaciali, e quindi all'interno di questi periodi, alle fasi interstadiali.



La scarpata del Terrazzo di Livorno nota come Gronda dei Lupi, attualmente ormai riconoscibile sia pur flebilmente (per le ricoperture e le modificazioni antropiche), si trova al margine e ben arretrata rispetto all'areale in studio; è quindi interessante constatare la presenza di un contatto di bordo morfologico tra il Terrazzo di Livorno e gli orizzonti stratigrafici dell'area SIN.

Va da sé che il Terrazzo di Livorno si caratterizza all'inizio del Pleistocene superiore attraverso una trasgressione glacio-eustatica, che ha riportato nuovamente il litorale in una posizione più ad Est di quella attuale, mentre la Piana di Livorno era sommersa dalle acque. Il trascorrere degli eventi paleogeografici è qui rappresentato temporalmente, almeno per gli spessori che abbiamo preso in considerazione, al più ai 100.000 anni fa. Rimane ormai testimoniato in numerose fonti bibliografiche che in un periodo, compreso tra gli eventi post-calabrianici e quelli tirreniani, legato alle fasi di riavvio e stasi glaciale, si dovettero susseguire fasi regressive alternate da fasi trasgressive.

Ancora nel Pleistocene superiore dovettero svilupparsi più episodi trasgressivo-regressivi collegati al glacio-eustatismo. È ben rintracciabile la fase sedimentaria e morfologica che nel Wurm II ha portato ad un'ampia regressione marina con deposizione dei Conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina, quando la Piana di Livorno doveva aver assunto l'aspetto di una collina, accentuato da una vegetazione oggi propria del piano montano, come conseguenza della fase glaciale del clima.

Dai rapporti di giacitura presenti nel Livornese essa risulta necessariamente posteriore al Tirreniano II, ma, per quanto presumibile in generale, molti Autori ritengono sia verosimilmente posteriore anche al Tirreniano III e corrispondente al grande

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

approfondimento del livello del mare, il quale denuncia il sopraggiungere dell'ultimo glaciale corrispondente a circa 75.000 anni fa.

L'ultima glaciazione (Wurm) che attualmente viene collocata in un arco cronologico compreso tra due stadi molto bassi di livello del mare di circa 75.000 e di circa 18.000 anni or sono, si è sviluppata in più fasi verosimilmente dipendenti da oscillazioni climatiche minori (periodi interstadiali o pulsazioni climatiche).

La fase Wurm II è caratterizzata dalla maggiore regressione glacio-eustatica marina con tracce di alvei fluviali fino alle attuali isobate di 100-110 m ben oltre le Secche della Meloria sulle quali è testimoniata la presenza di forme continentali (Cervidi ed Elefanti).

È in questa fase che l'Arno incide definitivamente la "Gronda dei Lupi", scarpata che delimita il Terrazzo di Livorno dalla Pianura di Pisa. L'attuale assetto del paesaggio è conseguenza delle mutazioni climatiche che segue la fine della glaciazione del Wurm e che si mantiene pur con vicende alterne con sufficiente costanza nelle linee generali durante tutto l'Olocene.

Il ristabilirsi di condizioni climatiche interglaciali ha comportato lo sviluppo della trasgressione versiliana con l'attestarsi della costa alla base del Terrazzo di Livorno. Nella Pianura di Pisa a queste variazioni trasgressive devono essere sommate le azioni derivate dall'apporto sedimentario specialmente dell'Arno e del Serchio. Dalla trasgressione versiliana fino ai tempi protostorici e storici, assistiamo in sostanza ad una regressione non marcata, ma soprattutto all'avanzamento della linea di costa dovuta in tempi protostorici alla formazione di "aree medie" tra il continentale ed il marino con transizioni graduate mare-lagune-paludi; mentre in tempi storici più recenti (dal tempo dei Romani), oltre alla parte evolutiva naturale cominciano ad essere determinanti le modifiche apportate dall'uomo, prima passivamente (realizzazione di porti ed opere marittime), fino all'esecuzione di veri e propri progetti di bonifica (si vedano i prossimi paragrafi).

La successione fluvio-palustre olocenica formata in prevalenza da limi, dall'esame pollinico rivela un trend evolutivo completo di una fase Atlantica del Querceto considerata compresa tra i 5.000 e 2.500 anni a.C. in numerosi sondaggi tra i -30,00 ed i -20,00 m. di profondità. Nei sondaggi a partire dai -13,00/-10,00 m. di quota verso la superficie sono rappresentati dai depositi marini dell'ultima trasgressione eustatica detta versiliana.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Nel contesto più generale della paleoclimatologia europea l'intervallo compreso tra circa 6.000 e circa 4.500 anni or sono viene indicato come "optimum" climatico, seguito alla deglaciazione, già sensibile nel Mediterraneo intorno a 15.000 anni fa, responsabile della trasgressione marina nota come "versiliana", o come posteriore all'ultimo "picco" glaciale di circa 18.000 anni or sono.

Pinna (1984) riferisce sulle conoscenze dello sviluppo paleoclimatico più recente che, per l'area europea e gli ultimi circa 3.000 anni, indica in un'oscillazione "fredda" fra 900 e 300 a.C., in una "calda" fra 800 e 1150-1200 d.C. e nella "piccola età glaciale" fra il 1590 e 1850 alla quale è seguita un'ultima fase "calda" da alcuni studiosi ritenuta terminare nel 1950.

Tutte le precedenti indicazioni confermano un andamento generale del livello marino in innalzamento negli ultimi 3.000 anni. Sicuro nei valori medi, può essere avvenuto con pause o lievi inversioni tuttavia non ancora registrate con sicurezza esatta da studi riferiti a situazioni locali.

È evidente la notevole progradazione del litorale versiliese-pisano in un periodo nel quale il livello del mare è risalito, mediamente, almeno di 2,00 m.

Quest'ultimo fatto e la chiara conformazione a delta della Bocca d'Arno fin dall'età basso-medievale rivelano che la progradazione del litorale è stata determinata dal forte incremento di materiali detritici trasportati dal fiume, malgrado quest'ultimo abbia perduto nel frattempo l'apporto delle acque del Serchio.

Il forte incremento del trasporto solido dell'Arno non è spiegabile con le variazioni climatiche che si sono succedute negli ultimi 3000 anni, che non hanno comunque provocato forti oscillazioni del livello del mare. Di conseguenza la spiegazione del fenomeno va ricercata, in netta prevalenza, nelle attività antropiche.

I bacini imbriferi dell'Arno, Serchio e Magra, i corsi d'acqua principali influenti sul litorale versiliese-pisano, sono stati oggetto di frequentazione antropica fin dal Paleolitico inferiore. Anche se non possiamo escludere un primo, debole, impatto sugli equilibri naturali dei cacciatori paleolitici dal momento che furono in grado di usare il fuoco a loro piacimento, è con le "scoperte" neolitiche dell'allevamento del bestiame e dell'agricoltura che le attività umane assumono una rilevanza del tutto particolare in questi equilibri.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Infatti nell'agricoltura primitiva fu diffusa la pratica del "debbio", o incendio degli appezzamenti da deforestare, con lo scopo non solo di eliminare gli alberi ma di fornire ceneri capaci di rendere i terreni fertili per alcuni anni.

E malgrado sembri che le popolazioni neolitiche non abbiano superato una densità di un abitante per km<sup>2</sup> e abbiano dissodato i terreni con il solo uso di zappe, le loro attività agricole si sono protratte per circa 4000 anni, ovviamente senza prevedere alcuna reintegrazione di fertilità e rigenerazione dei terreni sfruttati (abbandonati del tutto o lasciati a magri pascoli dopo il ciclo produttivo agricolo) per cui è impensabile non abbiano influito negli assetti dei territori.

Gli studi più recenti hanno rivelato che il popolamento neolitico in Toscana è stato piuttosto intenso soprattutto nelle valli alluvionali, con terreni più adatti alle attività agricole e conseguentemente deforestati per primi, e lungo la costa, in relazione all'inizio dei rapporti marittimi tra la regione e le isole del Tirreno. Quello che si è reso evidente è che la storia ci restituisce un'evoluzione rapida e recente sia sotto il profilo testimoniale degli eventi degli uomini, sia in funzione delle trasformazioni imposte dalla natura. Altro elemento di relativa certezza è che l'uomo pur avendo riconosciuto un interesse sostanziale per l'area in esame per gli sviluppi territoriali, ha cominciato ad insediare stabilmente le sue attività (industriali e portuali) solo a partire dagli anni '40 del secolo scorso. Per cui possiamo affermare che questa parte della città rimane un confine storico, un'area "di nessuno" sia pur con un limite amministrativo e politico ben delineati e fa parte di un "progetto permanente" di sviluppo del porto che tuttavia rimane nell'idea di uomini evoluti e moderni fino al secolo scorso.

In sintesi possiamo descrivere che la storia dei luoghi dall'epoca protoromana ci restituisce i seguenti passaggi significativi:

- Verosimilmente in epoca protostorica o etrusco-romana, si riscontra la massima estensione marina. Già nel Medioevo dovevano essersi formati dei lidi che delimitarono le lagune sfruttate come riparo dalla flotta Pisana fin dall'inizio del secolo XI°;
- I depositi palustri sono il risultato della sedimentazione avvenuta in tempi storici all'interno dei lidi formati per gli ingenti apporti dell'Arno e che si sono chiusi con le importanti colmate artificiali operate specialmente a partire dal 1830;

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

- Vi è la possibilità di ricostruire con buona approssimazione una sequenza di situazioni paleogeografiche recenti, già a partire dalla metà del secolo XVI°;
- Intorno alla metà del XVIII° secolo il Canale dei Navicelli comincia ad essere raffigurato nelle stampe;
- La rapida formazione dei lidi nel litorale tra Pisa e Livorno è legata all'ingente quantità di sedimenti che furono sottratti alla loro naturale destinazione verso l'area dell'antico delta dell'Arno e scaricati direttamente in mare da quando la foce fu ridotta artificialmente ad una sola bocca. Non è noto con precisione quando sia avvenuto questo, ma è verosimile che questi lavori destinati ad un miglioramento della salubrità dell'aria dell'agro pisano siano iniziati fin dalla remota fondazione di Pisa;
- Con la formazione di questi lidi, grandi aree furono sottratte al mare e ridotte a lagune e paduli. Si concretizzò un rapido avanzamento della linea di riva in un periodo caratterizzato invece da un lieve movimento eustatico positivo;



Il progredire verso Ovest della linea di riva è continuato in tempi recentissimi, anche in seguito a grandi opere marittime, tanto è vero che ad esempio la spiaggia nel 1974 si trovava circa 200-250 m verso mare rispetto alla linea precedente. Interessante constatare che, almeno dall'epoca romana (momento storico certo per la bibliografia) fino ai tempi attuali, l'area su cui si prevede la realizzazione della Piattaforma Europa è sempre stata in mare.

## 2.2 Informazioni Stratigrafiche dalla Pagina Storica dei Luoghi

Quando saranno in seguito affrontati i temi lito-stratigrafici, sarà possibile tracciare una disamina compiuta dell'evoluzione generale dell'areale in esame, tuttavia la parte evolutiva storica del paesaggio negli ultimi 2000 anni rende possibile una serie di interessanti conclusioni che vengono di seguito sintetizzate:

- All'esterno dell'area in studio, circa 2000 anni fa si trovava una sicura terraferma costituita dalla Piana di Livorno e quindi dall'espressione geomorfologia del Terrazzo più recente il cui bordo settentrionale ed occidentale determinava con buon grado di approssimazione il limite della costa. Questa linea morbida e sinuosa era in realtà una

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

fascia, un'area costituita da una sommità ed un piede che si è trovato storicamente più o meno sommerso. Questo bordo, noto in letteratura come "Gronda dei Lupi" è un segno importante poiché, almeno negli ultimi 2000 anni, rimane un elemento che muta le sue forme solo per l'incisione incessante che i corsi d'acqua provenienti dall'entroterra livornese continuano ad operare con alterne fasi di intensità. Questo limite, al di sopra del quale l'urbanistica si svilupperà ampiamente, rappresenterà, come meglio vedremo in seguito, una netta separazione tra l'impalcato costituito da cicli esclusivamente naturali regressivo - trasgressivi che hanno formato il Terrazzo di Livorno e la "produzione" di terreferme più moderna e governata spesso dall'azione dell'uomo.

- Nella massima espressione marina recente, il sito come abbiamo detto si trovava quasi del tutto sommerso: se verso meridione la Gronda era piuttosto netta ed aveva una forma di media falesia, verso occidente il bordo del Terrazzo era piuttosto basso. Sotto il profilo storico, il tratto di litorale in esame viene frequentemente interessato da spiaggiamento di grandi quantità di alghe, una testimonianza importante che permette di stabilire la presenza di abbondanti praterie di Posidonia oceanica prospicienti il sito e comunque un importante gioco di correnti in grado di ridistribuire e classare il materiale in trasporto gravitanti nel nostro tratto di costa significativo.
- Considerato che la base dell'Orizzonte 19 rappresenta, con le dovute approssimazioni, il fondo del mare in evoluzione recente, è interessante constatare che nel momento di massima acqua nell'area (Epoca Romana) sull'attuale linea di costa doveva trovarsi una colonna d'acqua di circa 16-18,00 m.
- Dall'epoca Romana, l'area più settentrionale di Livorno – limitata a Nord dallo Scolmatore d'Arno - si è andata progressivamente interrando avanzando quindi verso il mare. Questa conquista di terraferma è continuata fino a giungere alla conformazione geomorfologia attuale con una combinazione di varie azioni: "Una di tipo naturale" dovuta al trasporto e deposizione di materiali provenienti dai corsi d'acqua (Arno ed altri fiumi e torrenti) attraverso le correnti longitudinali di costa e quindi al *drift* litoraneo che ha ridistribuito i vari materiali assortiti organizzando l'avanzamento in barre parallele alla linea di costa del momento e creando i presupposti di

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

imprigionamenti di acque saline che poi via via sono divenute salmastre e si sono dolcificate per l'apporto di acque dalle colline retrostanti; "Una di tipo antropico" dovuta alle varie azioni di bonifica per recuperare terreferme da coltivo o da pascolo palustre. Il naturale avanzamento, anche se con qualche episodio di stasi, si è manifestato soprattutto dall'Epoca Romana fino al tardo Trecento, mentre, pur continuando l'azione naturale, ha cominciato ad essere importante l'azione di bonifica tentata dall'uomo dal Quattrocento fino all'Ottocento. In realtà si tratta di fanerogame ed in particolare di Posidonia oceanica.

- Le azioni di bonifica riconosciute storicamente possono essere sintetizzate nelle seguenti modalità: "Rettifiche, deviazioni e anastomizzazioni di corsi d'acqua" per poterli far sfociare in aree umide (marazzi, paludi, acquitrini) al fine di far depositare i materiali trasportati in un ambiente semi-protetto e far alzare il livello dei fondali (già comunque piuttosto bassi); "Realizzazione di vere e proprie scacchiere di canali" per drenare le acque di zone palustri anche mediante l'apporto di materiale in sospensione da un canale colmatore principale. In tempi più recenti sono stati utilizzati anche sistemi meccanici per sollevare ed eliminare le acque ferme (Idrovore, Stazioni di pompaggio); Specialmente nel corso del Settecento si ricorre anche alla bonifica delle aree palustri mediante colmatazione con le fanerogame che interrano le bocche del Porto, sono quindi previsti dei veri e propri dragaggi al di sotto del livello del mare ed all'interno delle aree più protette con il trasferimento di questi materiali in aree da riempire.

### 2.3 Caratteri Geostrutturali Generali dell'Ambito di Studio

L'area in esame sotto il profilo di appartenenza idrografica si colloca nella parte terminale del bacino dell'Arno che nel suo tragitto verso il mare, attraversa una successione di bacini sprofondati e di dorsali tettoniche relativamente più alte, tutti allungati in direzione appenninica NW-SE.

Infatti questo percorso prende origine dalle falde del crinale appenninico il cui sollevamento maggiore risale a non prima del Pliocene superiore (periodo di tempo compreso tra 3 e 1,7 MYA = milioni di anni fa), discende nel bacino del Casentino, che ha iniziato a formarsi a

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

partire dal Pleistocene inferiore (compreso tra 1,7 e 0,7 MYA), incide, presso la gola di Subbiano, la dorsale del Pratomagno e penetra nel bacino del Valdarno Superiore, che percorre fino a raggiungere il bacino di Firenze attraverso la gola di Pontassieve. Di questi ultimi due bacini, il primo ha iniziato a sprofondare durante il Pliocene inferiore (compreso tra 5 e 3 MYA) il secondo in corrispondenza del Pleistocene inferiore.

Dal bacino di Firenze l'Arno, superata la dorsale del Monte Albano attraverso la gola della Gola della Gonfolina, raggiunge il bacino del Pesa-Elsa, sprofondato a partire dal Miocene superiore (compreso tra 7,5 e 5 MYA) e, lambito il Monte Pisano (parte della antica e semi-demolita "Dorsale Medio-Toscana") in corrispondenza della soglia sepolta di Pontedera, entra nel bacino versiliese-pisano, che ha anch'esso iniziato a sprofondare nel Miocene superiore.

Quanto delineato ammette che lo sviluppo dei bacini di sprofondamento tettonico sui quali - a partire dalla grande regressione del Pliocene superiore - ha iniziato ad impostarsi il Bacino fluviale dell'Arno, è avvenuto da SW verso NE per aggiunta progressiva di sempre nuovi bacini di sprofondamento tettonico che si sono formati dal Miocene superiore al Pleistocene inferiore sul retro del movimento orogenetico appenninico. Questo si è spostato portando sempre più ad Oriente il crinale principale e lo spartiacque, cioè nello stesso senso dell'accrescimento del bacino fluviale dell'Arno, ma in senso contrario allo scorrimento delle acque di questo fiume.

Quest'ultima circostanza è di per sé favorevole alla formazione di ristagni d'acqua palustri e lacustri. Tuttavia più importante fu, per l'Arno, la coincidenza del suo bacino fluviale con un'alternanza in successione di bacini e di dorsali tettoniche.

Così i bacini del Casentino, del Valdarno Superiore e di Firenze, racchiusi rispettivamente tra le dorsali del Crinale Appenninico e del Pratomagno, di quest'ultimo e del Chianti, di Monte Morello e di Monte Albano, furono occupati da laghi per buona parte del Quaternario mentre il secondo di questi bacini ha risentito anche di un precedente episodio lacustre pliocenico.

L'evoluzione dei bacini tettonici che l'Arno incontra a valle della Gola della Gonfolina è stata più complessa di quella dei bacini a monte, sia perché i primi hanno iniziato a sprofondare precedentemente (con formazione di depositi lacustri del Miocene superiore), sia perché sono stati raggiunti da diversi cicli sedimentari marini ("Neoautoctono").

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Lo sprofondamento tettonico dei bacini ha richiamato la deposizione di successioni sedimentarie maggiori (fino a oltre 2.000 m di spessore) in quelli più occidentali, maggiormente vicini all'area di ampia distensione del Mare Tirreno e attivi fin dal Miocene superiore, e minori (nell'ordine di alcune centinaia di metri) in quelli man mano più orientali, cioè nel bacino di Firenze, nel Valdarno superiore e nel Casentino.

Le più recenti successioni stratigrafiche sicuramente documentanti sprofondamenti di natura tettonica risalgono al Pleistocene inferiore. Nell'ambito del bacino fluviale dell'Arno la deposizione di tutti i sedimenti posteriori è stata fortemente influenzata dalle importanti variazioni climatiche degli ultimi 0,7 MYA e, anche quando questi sedimenti sono sicuramente stati interessati da dislocazioni tettoniche, non è stato per ora possibile stabilire se furono soggetti a sprofondamenti oltre che a sollevamenti. Questi sono invece documentati nei dintorni di Livorno con sicurezza dalle quote raggiunte da alcuni terrazzi di eustatismo marino del Pleistocene medio (compreso tra 0,7 e 0,125 MA), quote alle quali non è possibile sia giunto il mare neppure negli episodi interglaciali di stazionamento più alto. Rimane comunque l'incertezza che nel sottosuolo della Pianura versiliese-pisana si trovino sedimenti del Pleistocene medio sprofondati a quote più basse di quelle di deposizione. L'apporto fluviale differenziato ha sicuramente determinato la formazione di una pianura a Sud del Serchio (Pianura di Pisa) più ampia di quella a Nord (Pianura della Versilia). Ma altri fattori sono entrati in gioco nel favorire il maggior accumulo di sedimenti nell'angolo SE del bacino di sprofondamento versiliese-pisano. Molto importante deve essere stata la presenza della dorsale della Meloria, sul tratto SW del bacino investito dal moto ondoso predominante di Libeccio. Questa dorsale oggi è sommersa dal mare ma ha corrisposto a un'area emersa nelle fasi di stazionamento basso del livello marino dei periodi glaciali. D'altra parte nei periodi di stazionamento alto del livello marino, corrispondenti agli interglaciali, come bassofondo sommerso deve avere influito sulla deriva litoranea diminuendo la dispersione dei sedimenti verso il largo e indirizzandone parzialmente il rientro verso costa, e, inoltre, rompendo l'energia delle onde con la fitta prateria di Posidonia che l'ammantava.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

## 2.4 Lineamenti Geologici degli Affioramenti di Superficie

Dall'analisi della Carta geologica dei comuni di Livorno e Collesalvetti (Mozzanti et altri, 1990) e dall'estratto di cartografia geologica del CAR.G. in un'area significativamente posta all'intorno dell'area in esame si rintracciano i seguenti affioramenti:

- Depositi di spiaggia attuale, regolata dai moti ondosi del mare, dalle correnti e dalle maree insieme alle dinamiche di trasporto del Canale dello Scolmatore d'Arno; si tratta di sabbie molto fini tendenzialmente ancora in accumulo;
- Depositi di alluvioni, affiorante in destra idraulica dello Scolmatore e che corrisponde con la fase di risalita del livello di base dei fiumi conseguente a quella trasgressione versiliana del livello del mare;
- Depositi dei sedimenti palustri, alluvionali e di colmata, spesso non facilmente riconoscibili l'uno dall'altro. Attualmente l'unica area palustre ancora non prosciugata rimane il Prato della Contessa a oriente della Fattoria di Suese in Collesalvetti;
- Depositi delle Sabbie d'Ardenza che sormontano le Calcareniti Sabbiose di Castiglioncello; sono sostanzialmente sabbie molto fini sempre di origine continentale e di accumulo eolico e di tipico colore arancio-rosso. Rappresentano per la zona una formazione tipica nell'ambito del cosiddetto Terrazzo di Livorno.

## 2.5 Brevi Lineamenti Geomorfologici della Zona

Il profilo geomorfologico dell'area in esame è definito sostanzialmente da un'intensa antropizzazione che ha determinato la quasi totale elisione di segni geomorfici naturali. Si riscontrano infatti alcune lievi forme relitte, anche queste intensamente trasformate dall'azione dell'uomo, come ad esempio un tratto del Canale dei Navicelli, il tratto finale dello Scolmatore d'Arno compresa la sua foce e la linea di riva attuale dove si trova una piccola striscia d'arenile continuamente modificato dai moti ondosi.

Più interessanti risultano i segni morfologici presenti nell'intorno significativo dell'area in esame e che sono da considerarsi interagenti a livello di sistema con l'area medesima e quindi capaci di influire sulla circolazione idrica sotterranea.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Verso Settentrione già a partire dalla prossimità dell'argine destro idraulico dello Scolmatore d'Arno in Loc. Calambrone e verso Tirrenia sono ancora ben presenti sistemi dunali e di retro duna, ovvero tutti i sistemi di cordoni litoranei paralleli alla linea di costa che si sono succeduti nel tempo formati dal trasporto e deposito delle correnti di *drift* litoraneo.

Interessante rilevare la presenza di tomboli in arretramento dalla linea di costa attuale in parte sormontati da dune in cui si rileva una importante ceduzione di pinete talvolta sfruttate per il legno in epoche passate.

È logico supporre che questi sistemi geomorfologici si sviluppessero anche nelle parti di territorio poste in sinistra idraulica dello Scolmatore d'Arno ed in fregio alla città di Livorno, ma nell'area del Sito di Interesse Nazionale, queste forme sono state tutte rielaborate ed eliminate in superficie; vedremo nella disamina stratigrafica che verso Occidente si riscontrano ancora – seppure saltuariamente – alcune parti relitte di radici di dune che sono stati conservati durante gli importanti lavori antropici che hanno trasformato il territorio.

Questi cordoni litoranei si andavano a raccordare verso Meridione e verso occidente con il bordo geomorfologico del terrazzo più recente di Livorno; queste forme, oltre ad essersi formate dalle dinamiche di trasporto e deposito marino, erano anche continuamente rielaborate dal vento per cui, verso Meridione, la protezione eolica dovuta alla presenza di una parete di falesia ed, in successione, della “quinta” costruita della città, ha sicuramente contribuito ad appiattare la morfologia.

Non è casuale che i luoghi degli antichi Porti fossero prossimi ad una protezione naturale, ciò li preservava anche dalle veloci dinamiche di interrimento che come vedremo hanno condizionato per secoli lo sviluppo degli specchi acquei.

Un altro importante segno che limita la parte più Meridionale e quella verso occidente dell'area in studio è rappresentato dal bordo del Terrazzo di Livorno e quindi verso l'entroterra dalla superficie di abrasione marina. Si tratta di formazioni del Pleistocene superiore che si trovano sul Terrazzo basso (Terrazzo di Livorno) molto ben conservato e disposto base contro base rispetto a quello alto e sono costituite dalle Calcareniti Sabbiose di Castiglioncello, dai Conglomerati di Santo Stefano e dalle Sabbie di Ardenza, con i coevi Conglomerati, Calcareniti sabbiose e sabbie di Rio Maggiore, che esprimono talora la fase

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

trasgressiva del ciclo eustatico dell'interglaciale Tirreniano ma, principalmente, episodi regressivi continentali da attribuirsi a diverse fasi del Wurm.

L'inizio del Pleistocene superiore è molto ben caratterizzato, al piede occidentale dei Monti Livornesi dai sedimenti dell'Eutirreniano a *Strombus bubonius* e dal Terrazzo di Livorno.

Questa trasgressione glacio-eustatica ha riportato nuovamente il litorale in una posizione più a Est di quella attuale con le piane di Livorno e di Rosignano sommerse dalle acque. Il Terrazzo di Livorno, almeno nel tratto prospiciente l'area cimiteriale, ha assunto in letteratura il termine di "Gronda dei Lupi", ovvero una specie di falesia medio - bassa che in certi periodi, almeno post-tirreniani, ha assunto anche il limite tra la terra salda e le parti sommerse dal mare o le aree di tipo palustre (ed in alcuni casi, localmente lagunari).

In realtà questa linea ben definibile, visto i vari sondaggi geognostici che sono stati eseguiti attorno, rappresenta la sommità, il bordo superiore di una falesia che non poteva affacciarsi nel complesso a picco sulla superficie marina, ma anzi era costituita da un piede più o meno sommerso nei vari periodi evolutivi paleogeografici post formazionali. Inoltre – interessante per lo scopo del presente Studio – questo specchio di scarpata più o meno ripido è stato continuamente elaborato dagli agenti esterni e naturalmente ha subito arricchimenti di materiali a granulometria compresa tra una ghiaia fine ed una sabbia grossolana per lo scarico locale dei vari corsi d'acqua che, oltre ad incidere ed alluvionare il piano del terrazzo hanno formato sistemi di conoidi di scarico oltre la Gronda. Considerato la complessa evoluzione dell'area con continue rielaborazioni del materiale eroso, trasportato e sedimentato, è legittimo pensare ad una discontinuità di questi "scarichi alluvionali".

#### Apparato idrografico di superficie

In sostanza si rilevano tre differenti macro-elementi informativi geomorfologici:

- corsi d'acqua naturali e che al limite hanno subito rettifiche, modifiche di tracciato o lavori di rivestimento;
- canali realizzati su antiche tracce di corsi d'acqua naturali mediante l'escavazione, il dragaggio o la formazione di banche fluviali con funzioni di regolamentazione e scolmature delle piene del Fiume Arno o con caratteristiche di navigabilità interna in collegamento con il mare;

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

- tracce di canali tendenzialmente antropici con tipiche forme a “scacchiera” o a “rastrello” con evidenti funzioni di drenaggio delle aree acquitrinose per l’imbonimento dei terreni mal saldi.

Appartengono al primo gruppo i torrenti ed i vari rii che provengono dalle spalle collinari della città di Livorno, che non attraversano l’area del Sito di Interesse Nazionale e che al più corrono parallelamente ai limiti del vincolo di delimitazione; tra questi elenchiamo il Torrente Ugione, il Rio dell’Acqua Puzzolente (affluente in sinistra idraulica del T. Ugione) ed il Rio Cigna. Sono ricompresi nel secondo gruppo quei corpi idraulici che hanno una direzione più perpendicolare all’attuale linea di costa con andamento pressappoco E-NE/W-SW, come ad esempio lo Scolmatore d’Arno che è stato realizzato per proteggere l’abitato di Pontedera e Pisa dalle piene del Fiume Arno. Proprio per la sua funzionalità idraulica lo Scolmatore, che nel tratto finale di più stretto interesse, è protetto in sinistra idraulica da una banca trapezoidale con una palancolata, non può essere definito un corso naturale ad ogni effetto anche perché manca l’affioramento di evidenti coltri di alluvionamento al suo intorno. Ciò avviene poiché siamo prossimi al suo estuario e perché lo Scolmatore è stato dimensionato per contenere precise quantità d’acqua che provengono dall’Arno. Proprio per le sue caratteristiche intrinseche, storicamente si sono verificati rari casi in cui lo Scolmatore d’Arno ha tracimato le acque con evidenti stati esordivi e, casomai, questo è accaduto per il grave problema, che è ad oggi ancora irrisolto, del suo costante interrimento, specialmente nel tratto terminale. Nato con una profondità variabile tra i 3,50 ed i 4,00 m. in certe zone oggi lo Scolmatore ha profondità minori al metro e talvolta con le continue riduzioni delle portate in periodi siccitosi affiorano isole di sabbia e limo, specialmente nel tratto compreso tra l’Aurelia e la foce.

Il livello di base di questo corso d’acqua ha un gradiente piuttosto basso e la presenza di una foce non protetta ai marosi più intensi sta creando importanti disagi alla sua navigabilità interna specialmente in foce, dove si formano continue lune di deposito transizionale fluviale - marino.

Oltre allo Scolmatore d’Arno, si rintracciano altri corpi idraulici che hanno caratteristiche di costruito, come ad esempio lo storico Canale dei Navicelli, ma anche il Canale Emissario di Bientina e la Fossa Chiara, il Fosso della Tora e l’Antifosso delle Acque Chiare.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Appartengono al terzo gruppo i segni delle bonifiche o degli imbonimenti che durante oltre 4 secoli sono stati condotti nell'area in esame. Si tratta talvolta di tracce piuttosto flebili che ancora si possono rintracciare sul territorio, magari linee di viabilità che si sono giustapposte ad apparati di bonifica talvolta molto complessi o altre tracce marcate dalla presenza di fosse camperecce che hanno mantenuto la loro funzionalità idraulica nei diversi anni. Certamente occorre attribuire una certa importanza a queste vere e proprie reti di drenaggio superficiale proprio in ordine alla organizzazione dei deflussi subcoticali che possono aver mantenuto una "memoria" sotto il profilo idrogeologico e possono costituire assi drenanti preferenziali nei primi spessori di terreno.

## 2.6 Elementi Lito-stratigrafici Generali della Piana di Livorno

Dai vari studi consultati riguardanti l'areale in esame viene ritenuto estremamente interessante il recente lavoro pubblicato sul Bollettino della Società Paleontologica Italiana da Dall'Antonia, Ciampalini, Michelucci, Zanchetta, Bossio e Bonadonna (2004) che illustra i principali risultati emersi da uno studio multidisciplinare condotto su 15 sondaggi guida effettuati nell'area di Livorno. Questo studio interessa un'area situata sul terrazzo eustatico di Livorno ed il settore più meridionale della Pianura di Pisa, che sono separati da una scarpata di origine erosiva nota nella letteratura come "Gronda dei Lupi" perciò risulta molto interessante per il nostro lavoro poiché sulla base di test paleontologici, di datazioni e di approfondimenti paleogeografici definisce, il succedersi di diverse Unità stratigrafiche con una certa precisione.

L'interpretazione stratigrafica dei sondaggi studiati nel lavoro scientifico ha permesso di riconoscere 7 principali unità litostratigrafiche, alcune delle quali possono essere correlate con formazioni affioranti nella Toscana Nord-Occidentale; qui di seguito vengono descritte sinteticamente le Unità stratigrafiche riconosciute nello studio:

### UNIT 1

Questa Unità stratigrafica che compare in prossimità del bordo della Gronda dei Lupi e, naturalmente verso l'interno della città di Livorno, comprende due sub-Unit: la 1A caratterizzata da sabbie limose e argille azzurre-grigie con limi argillosi e la 1B in cui sono

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

incluse alternanze di limi-sabbiosi, sabbie medie-fini ed argille con sabbie grossolane. Dalle associazioni di Ostracodi rilevati alla Sub-Unit 1A è stato conferita l'età del Pleistocene Inferiore, mentre le faune rintracciate nella Sub-Unit 1B suggeriscono il Pleistocene Inferiore. Le microfaune presenti indicano che i sedimenti della Sub-Unit 1A si sono depositi in un ambiente a normale salinità con locali influenze di *fresh-brackish waters*, mentre la Sub-Unit 1B è caratteristica di una non favorevole condizione paleo-ambientale riferibile probabilmente ad *brackish water setting*.

L'Unità 1 ha una certa corrispondenza – seppure non precisa - con quella studiata dal Mazzanti, Barsotti nel 1974 per lo Studio del bacino di carenaggio in cui si rilevava che a questo primo orizzonte appartengono i sedimenti del Calabriano costituiti in prevalenza da argille con sabbie e da conglomerati minuti.

#### UNIT 2

Anche questa Unità stratigrafica che compare dalla prossimità del bordo della Gronda in direzione della linea di costa, mentre non si rintraccia nella parte superiore del terrazzo, è caratterizzata da sabbie grossolane e ghiaie sparse con passaggi a sabbie più fini fino alle argille, questa Unità è normalmente sovrapposta ai depositi calcarenitici dell'Unità 3.

Il rintracciamento delle faune ad Ostracodi indicano una deposizione nel Pleistocene Inferiore; nel particolare sembrerebbero essere attribuibili al Siciliano. La paleogeografia di questo spessore evidenzia un caratteristico ambiente marino con caratteristiche di vicinanza della linea di costa con condizioni *euhaline*.

#### UNIT 3

Questa Unità è ben evidente e posta alla base del Terrazzo di Livorno ed è costituita da una sabbia spesso cementata in forma di calcarenite (panchina) con abbondanti conchiglie marine (molluschi).

L'Unità viene ritenuta appartenere ad un deposito trasgressivo del Pleistocene superiore ben riconosciuto nella fascia costiera di Livorno. Questo spessore di calcarenite si correla con il primo orizzonte di panchina rintracciato negli scavi della Torre del Fanale (datato circa 125.000 yr BP).

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

#### UNIT 4

Consiste in un'alternanza di limi-argillosi grigi-azzurri e sabbie. Il Radiocarbonio data alcuni frammenti di legno presenti nello spessore, intorno ai 40.700 yr BP, ma non viene escluso un rimaneggiamento di questi materiali. Questa Unità sembra essere posizionata tra il Terrazzo di Livorno e la Pianura di Pisa.

Dall'analisi paleontologica emerge che è più recente dell'Unità 6 e comunque sempre attribuibile al Pleistocene superiore.



#### UNIT 5

Questa Unità viene suddivisa in due Sub-Unit: la 5A, posta in basso comprende spessori di limo ed argilla sabbiosa con sparsi granuli di carbonati e spessori di ghiaie o sabbie grossolane. La Sub-Unit 5B posta in alto, è composta da sabbie e da sabbie limose con noduli di manganese millimetrici con vari livelli di sabbie più grossolane.

La Sub-Unit 5A è stata accumulata in un ambiente di piano alluvionale caratterizzato da paleo-canali con caratteristiche di trasporto di materiale anche grossolano. La Sub-Unit 5B mostra più una caratteristica di deposito in corrente.

#### UNIT 6

Questa Unità comprende limi sabbiosi e limi argillosi con sabbie. In alcuni sondaggi questa Unità è usualmente caratterizzata da molluschi di acqua fresca (e.g. Bithynia, Ancyclus e Pisidium) e da forme di terra (e.g. Carychium, Vertigo, Vallonia, Punctum, Limax e Testacella). Sono rappresentati anche in parte Ostracodi di acqua fresca come Ilyocypris e Candona, Pseudocandona compressa (Koch) e subordinatamente Cyclocypris laevis (Muller) e Pseudocandona spp. Nei livelli superiori sono ancora presenti forme terrestri rappresentate da Carychium, Vallonia, Discus e Monacha. Il solo mollusco di acqua fresca è rappresentato da Lymnea. In alcuni sondaggi si rintracciano anche gasteropodi di acqua fresca (Bithynia e Valvata) e land snails (Carychium e Limax). Il radiocarbonio data frammenti di legno presenti nello spessore intorno ai 50.300 yr BP; i caratteri stratigrafici indicano che l'Unità è più vecchia dei depositi olocenici, più recente dell'Unità 2 di età Siciana e probabilmente più giovane dell'Unità 3 e 4.

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

## UNIT 7

Questa Unità include due Sub-Unit: la 7A consiste in una sabbia grossolana con locali concentrazioni di ghiaia, mentre la più superficiale (Sub-Unit 7B) comprende alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose ricche in Posidonia oceanica con locali frammenti di conchiglie marine.

Il contenuto faunistico nella Sub-Unit superiore è piuttosto variabile, vi si rintracciano livelli con Posidonia oceanica ricchi anche in gasteropodi marini (e.g. Alvania, Calliostoma, Cerithium, Cerithiopsis, Crytospira, Cythara, Gibbula, Hinia, Jujubinus, Tricolia, Rissoa, Bittium, Turritella) e subordinatamente a bivalvi (e.g. Acanthocardia, Chlamys, Dosinia, Leda, Pectunculus, Venus, Venerupis, Nucula, Tellina).

La datazione al radiocarbonio eseguito nella Sub-Unit 7A evidenzia un'età di  $4.530 \pm 60$  yr BP ed è stata attribuita alla trasgressione versiliana, mentre la datazione della Sub-Unit 7B eseguita sui resti della Posidonia oceanica stabilisce un range tra  $930 \pm 45$  yr BP e  $1.100 \pm 100$  yr BP che indicherebbe una deposizione di tipo storico.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

### 3. Idrogeologia

I numerosi corpi sabbiosi e ghiaiosi depositi nei vari cicli sedimentari plioleistocenici che si sono succeduti nel riempire la struttura subsidente della Piana d'Arno, costituiscono altrettanti corpi acquiferi, spesso separati da livelli argillosi che li confinano.

La situazione idrogeologica è schematicamente indicata nella fig. 1 che riproduce la Sezione litostratigrafica interpretativa attraverso la Pianura Pisana tratta da "Struttura e piezometria del 1° acquifero artesiano in ghiaie della Pianura Pisana" BALDACCI F. (1999).

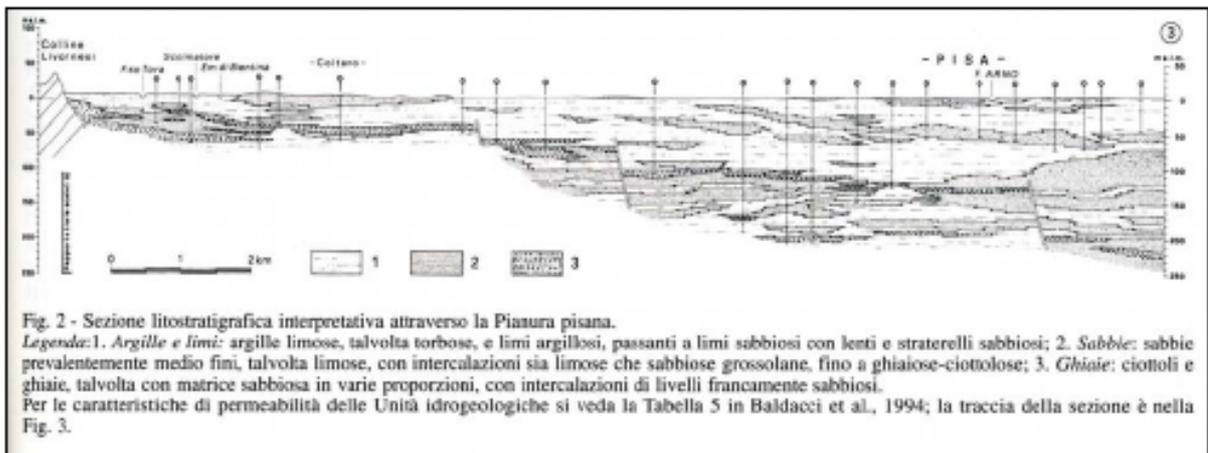


Fig.1 Sezione litostratigrafica interpretativa attraverso la Pianura Pisana tratta da "Struttura e piezometria del 1° acquifero artesiano in ghiaie della Pianura Pisana" di BALDACCI F. (1999).

La figura rivela la complessità della situazione idrogeologica che caratterizza il sottosuolo della pianura caratterizzata dalla presenza di numerose alternanze di lenti sabbioso-ghiaiose caratterizzate da frequenti soluzioni di continuità sia di natura stratigrafica che tettonica, imputabili queste ultime alla riattivazione post-würmiana di preesistenti faglie distensive (D'AMATO, AVANZI E NARDI, 1993). Al di là delle interpretazioni strutturali degli Autori, che potrebbero essere riviste dalle più recenti ricerche nell'area (SARTI G. ET ALII comunicazione personale; 2006), quello che rimane comunque valido è la presenza di livelli impermeabili od a minore permeabilità relativa a composizione argilloso-limosa intercalati ai livelli relativamente più permeabili sabbioso-ghiaiosi, sede delle più importanti falde idriche oggetto di sfruttamento mediante pozzi di captazione. Tale situazione mette in evidenza la

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

presenza di falde in pressione, solo parzialmente indipendenti tra loro, e tra le quali si verificano scambi idrici diretti o anche per fenomeni di drenanza in conseguenza di differenti gradienti idraulici che le caratterizzano.

I principali acquiferi presenti nel sottosuolo della piana e che sono oggetto di sfruttamento sono indicati in letteratura come 1° Acquifero artesiano in sabbia, più superficiale, e 1° Acquifero artesiano in ghiaia, che risulta sottoposto al precedente. Entrambi vanno a costituire quello che viene indicato come l'Acquifero multistrato confinato (Amc) (BALDACCI F. ET ALII, 1995).

Al di sopra di questi acquiferi principali si trova un unico livello non ulteriormente suddivisibile in corpi idrogeologicamente distinti, costituito da argille limose e talvolta torbose, limi argillosi e limi sabbiosi con intercalazioni di sottili livelli sabbiosi.

Si fa pertanto riferimento ad un unico acquifero freatico in quanto le numerose soluzioni di continuità dei livelli a bassa permeabilità o la mancanza di livelli impermeabili ben sviluppati e di spessore adeguato non garantiscono la completa separazione idraulica tra i vari livelli a maggiore permeabilità relativa, favorendo pertanto l'instaurarsi di molteplici interconnessioni e scambi reciproci anche importanti e comunque difficilmente quantificabili alla luce della attuali conoscenze idrogeologiche, in un rapporto di ricarica e di drenaggio che dipende dal particolare periodo dell'anno e dalla posizione relativa dei livelli piezometrici.

La profondità a cui si rinviene la superficie piezometrica della falda freatica superficiale varia progressivamente spostandosi da monte (Pontedera) verso la foce a mare risultando sempre più prossima alla superficie topografica. La superficie piezometrica tende ad essere subaffiorante nei settori di pianura a valle dell'abitato di Vicarello, dove le quote topografiche del piano campagna sono prossime al livello medio mare. Nelle varie zone di colmata di precedenti aree palustri, le cui quote assolute del piano campagna difficilmente superano il metro e spesso sono inferiori a livello del mare come nel caso della località Ex Padule di Stagno ad est di Coltano, la falda è affiorante e viene artificialmente depressa

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

mediante impianti idrovori che provvedono a mantenere i terreni asciutti e liberi dalle acque.

Nell'ambito dell'area in esame, costituisce elemento fisico di determinante importanza idrogeologica la linea di ingressione di acqua marina che, dal Canale Industriale, si sviluppa rettilinea secondo un andamento grosso modo Nord-Est/Sud-Ovest.



Tale linea separa due Domini: uno posto a occidente ed uno ad oriente, che presentano caratteristiche idrogeologiche nettamente distinte per quanto attiene alle condizioni di saturazione dei terreni da parte dell'acqua marina.

Il Dominio occidentale è completamente caratterizzato dalla presenza di acqua marina o fortemente salmastra, talché i terreni sotto il livello medio mare sono da considerarsi totalmente saturi di acqua salata-salmastra, con assenza di circolazione idrica sotterranea strutturata di acqua dolce.

Pertanto in questo Dominio non si può parlare di falda idrica; ciò fino alla profondità di almeno 30-35 metri (da piano campagna). Infatti l'unica falda idrica strutturata in condizioni di "completo sconfinamento" si trova al di sotto di tale profondità, non presentando alcuna connessione idraulica con il "sistema" a lei sovraciante. Peraltro, è da evidenziare che l'acqua di tale falda profonda è di fatto inutilizzata per consumi umani, zootecnici, irrigui o industriali, considerate le naturali pessime caratteristiche qualitative che possiede.

Il Dominio orientale è sicuramente interessato dal fenomeno di ingressione di acqua marina, che si sviluppa a partire dalla sponda Est del Canale Industriale e dalla sponda Sud del Canale Scolmatore d'Arno, ma è altresì interessato da fenomeni di ricarica di acqua dolce, talché tra le zone di infiltrazione e quelle di ingressione marina si rinvencono coltri di sedimento, a varia granulometria, dove si instaura una certa circolazione idrica sotterranea strutturata, anche se di limitate dimensioni e di scarsa importanza.

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Inoltre, una caratteristica comune alle diverse organizzazioni degli scorrimenti sotterranei è che, comunque, la velocità delle eventuali circolazioni risulta modesta, sia per le permeabilità molto basse del sedimento, sia per la sua eterogeneità, sia per le forme dei piani di sedimentazione che spesso presentano memorie di contropendenza in relazione a “forme di paesaggio retrodunale”.



<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

## 4. Caratteristiche stratigrafiche e geotecniche

### 4.1 Raccolta Bibliografica di Notizie e Dati Geognostici

Per la definizione delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dell'area dove è prevista la realizzazione della Piattaforma Europa ci si è avvalsi delle campagne di indagini e degli studi condotti in occasione della progettazione delle due vasche di contenimento dei materiali di risulta dei dragaggi realizzate/in corso di realizzazione a fianco della diga di sottoflutto del porto di Livorno (diga del Marzocco).

Nelle figure 2 e 3 sono sintetizzati i sondaggi e le indagini di campo eseguite nel corso delle seguenti campagne:

#### ***Campagna maggio-luglio 2001 (Indicazione negli elaborati con la sigla Sn):***

- n. 13 sondaggi a carotaggio continuo - sono stati eseguiti dalla Ditta Ichongeo ed impostati come di seguito: n. 5 ad una profondità di 30.00 m. da p.c. e n. 8 ad una profondità di 25.00 m. da p.c.;
- n. 9 sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti dalla Ditta Mecasol tutti in mare, n. 5 all'interno della vasca, n. 4 in mare aperto ed impostati come di seguito: n. 1 ad una profondità di 35.00 m. da l.m.m.; n. 4 ad una profondità di 30.00 m. l.m.m. e n. 4 ad una profondità di 25.00 m. l.m.m.

#### ***Campagna maggio 2003 (Indicazione negli elaborati con la sigla Sa; Sb; Sc):***

- n. 3 sondaggi a carotaggio continuo, eseguiti dalla Ditta Ichongeo ad una profondità di 30.00 da p.c.;

#### ***Campagna di indagini indirette di tipo geofisico ottobre-dicembre 2007***

- n. 28 Profili di indagini geoelettriche e sismostratigrafiche SBM (Sub Bottom Profiler) eseguite a mare;
- n. 2 ERT Profili di indagini geoelettriche a terra;
- n. 5 Punti di indagine MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) ubicati lungo le linee geoelettriche ERT;
- n. 43 Punti di indagine sismica passiva a singola stazione ubicati lungo le linee geoelettriche ERT.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

### **Campagna febbraio-giugno2008**

Sono stati eseguiti n° 10 sondaggi a carotaggio continuo di cui n. 8 (da S1 a S8) sono stati eseguiti lungo il perimetro della prima vasca di colmata fino a profondità variabili da 25 m a 51 m dal p.c. dalla Ditta ICHNOGEO di San Miniato dal febbraio al maggio 2008; i restanti 2 (S9 e S10) sono stati eseguiti a mare fino a profondità di -15 m s.l.m.m. dalla Ditta TETIDE di Fano nel giugno 2008.

### **Campagna geognostica 2010**

- n°9 Carotaggi in mare, eseguiti dalla GeoPolaris, mediante M/N Blue Dream e il carotiere "Self-sheathing Hydraulic Sampling Bottom Device" (S.H.S.B.D) lungo l'asse delle opere di delimitazione della seconda vasca di colmata (C1÷C9 - specchio costiero tra la foce del canale Scolmatore a nord e la prima vasca di colmata a sud);
- n.2 sondaggi geotecnici verticali, a rotazione e a carotaggio continuo, dislocati in punti particolarmente significativi sull'argine della prima vasca di colmata con prelievo di 13 campioni indisturbati (SERVIZI GEOTECNICI);
- n.6 prove CPTU

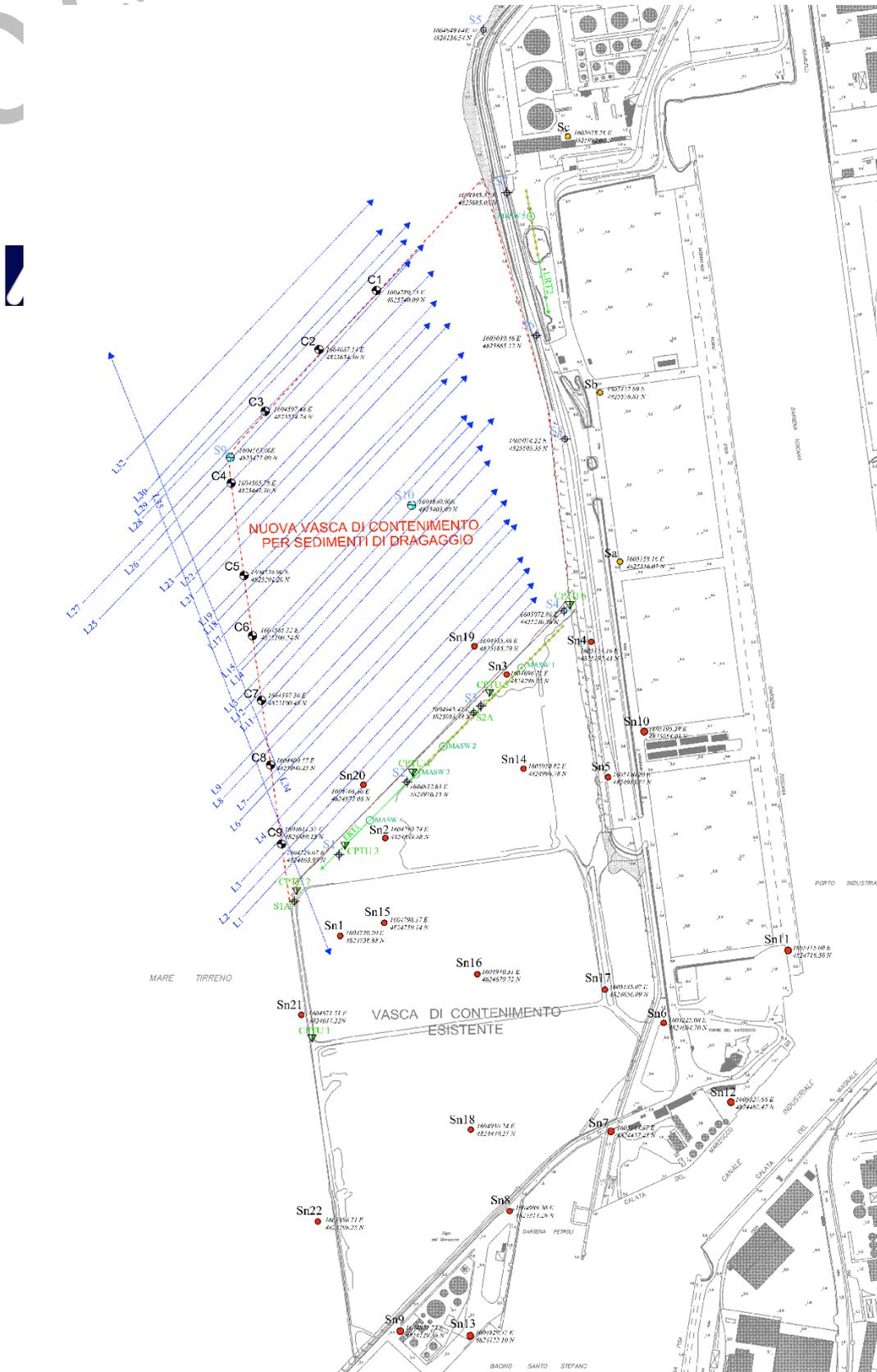
In tutte le campagne di indagini sono state inoltre eseguite prove di laboratorio sui campioni prelevati nel corso dei sondaggi.

La cosa più interessante delle campagne di indagini effettuate è costituita dal fatto che attraverso la conoscenza geognostica ottenuta dai sondaggi è stata effettuata una taratura delle informazioni dirette con quelle indirette. Più precisamente sulla scorta dei profili geoelettrici effettuati a terra sono stati proiettati e ubicati i sondaggi geognostici con la suddivisione litotecnica in Orizzonti.

In Appendice sono riportati alcuni profili stratigrafici tracciati sulla base delle indagini di campo descritte.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità</b> <b>della Prima Fase</b> <b>della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Figura 2 – Localizzazione campagne di indagini dirette ed indirette di riferimento



<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Figura 3 – Legenda pianta campagne di indagini dirette ed indirette di riferimento

<b>Campagna di indagini dirette</b> (sono indicate le coordinate UTM di ciascun punto d'indagine)	
	Sondaggi a mare eseguiti nel Gennaio 2010 (GEOPOLARIS)
	Sondaggi eseguiti nel Gennaio 2010 (SERVIZI GEOTECNICI)
	Prove penetrometriche statiche eseguite nel Gennaio 2010 (SERVIZI GEOTECNICI)
	Sondaggi a mare eseguiti nel Giugno 2008 (TEIIDDE)
	Sondaggi eseguiti nel periodo Gennaio-Febbraio 2008 (ICHTNOGEO)
	Sa, Sb, Sc Sondaggi eseguiti nel Maggio 2003 (ICHTNOGEO)
	Sn Sondaggi eseguiti nel periodo Maggio-Luglio 2001 a sostegno della realizzazione della prima vasca di colmata (ICHTNOGEO)
<b>Campagna di indagini indirette</b>	
	Profili delle indagini geoelettriche e sismo-stratigrafiche SBM (Sub Bottom Profiler) eseguite a mare (POLARIS)
	ERT → Profili delle indagini geoelettriche a terra (SOING)
	MASW ○ Punti di indagine MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) ubicati lungo le linee geoelettriche ERT (SOING)
	○ Punti di indagine sismica passiva a singola stazione ubicati lungo le linee geoelettriche ERT (SOING)

#### 4.2 Definizione della situazione lito-stratigrafica locale

Dall'analisi dei risultati delle suddette indagini di campo e di prove di laboratorio effettuate nella zona di interesse (v. profili stratigrafici riportati in appendice) è possibile riconoscere i seguenti orizzonti stratigrafici partendo da p.c.:

##### ORIZZONTE LITOLOGICO 0 (ZERO)

##### Spessore recente attività umana (100-200 anni)

Nei sondaggi effettuati sulla scogliera di paramento, che delimita a nord l'attuale vasca di contenimento, detto orizzonte è rappresentato da frammenti di natura cristallina (di natura calcarea). Lo spessore varia da 5,5 m (S4) a 9,1 m (S1). Per i sondaggi eseguiti sulla banchina (S6, S7, S8) questo orizzonte è rappresentato dalla pavimentazione della Darsena Toscana con massicciata stradale e materiale di riporto eterogeneo. Lo spessore è intorno a 3,0-4,0 m. Questo orizzonte non si rinviene sul sondaggio S5 in quanto realizzato direttamente sull'arenile alla foce del canale Scolmatore. La presenza di elementi di riporto al di fuori dei

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

recenti elementi antropici della scogliera è indubbiamente collegata con la storia e l'evoluzione della zona portuale di Livorno; in sostanza è possibile rintracciare terreni di riporto provenienti da lavorazioni passate o da attività esercitate all'interno di porzioni d'area in tempi più recenti (dopo la seconda guerra mondiale). Lo spessore del riporto per sua natura può essere soltanto descritto nelle sue linee generali in: spessori provenienti da azioni antropiche più locali, da demolizioni in area e/o materiali di risulta di attività trascorse più recenti; sono materiali più complessi e generalmente di positura più superficiale e di potenza inferiore ai 2,00 m. (anche se è possibile rintracciare vere e proprie sacche più profonde). In questo caso vi sono forti eterogeneità e colorazioni innaturali (talvolta descritte con tipiche fiammature di antiche lavorazioni) con granulometrie che possono avere un *range* molto aperto: dalla massicciata in stabilizzato granulare, fino alle terre esauste di antiche lavorazioni tendenzialmente più sabbiose. In questo caso i terreni conservano una loro attitudine all'umidità naturale con qualche raro livello evoluto pedogeneticamente.

**Tale orizzonte termina in corrispondenza dell'attuale linea di riva e quindi non viene considerato ai fini della definizione della successione stratigrafica dei terreni delle aree interessate dalla realizzazione delle opere della Piattaforma Europa.**

#### *ORIZZONTE LITOLOGICO 1*

Limi argillosi a tratti sabbiosi con presenza di materiale organico e resti conchigliari. Epoch Olocene, Stage Europe Versiliano

All'interno di questo orizzonte vengono accorpati due tipi di depositi:

- Sabbie medie e grossolane in variabile matrice limosa con ammassi di rizomi e talli di Posidonia oceanica (ed altre fanerogame) che a tratti formano dei livelli esclusivi. La colorazione risulta grigio-scura tendente al nero mentre la coesione è variabile in funzione della quantità di matrice limosa; l'addensamento della porzione sabbiosa risulta scarso; limo argilloso a tratti sabbioso di colore grigio variabile al grigio/verdastro con presenza di frammenti conchigliari e sporadici resti organici; intercalati a varie profondità si rilevano livelli ad elevata componente sabbioso-limosa; in base alle osservazioni emerse dall'interpretazione dei sondaggi a mare eseguiti nel

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

2010 e dall'analisi granulometrica del campione più superficiale rappresentativo dell'Orizzonte in questione (S8C1) si assume che, laddove tale litotipo affiora a diretto contatto con l'Orizzonte Zero (o sul fondo del mare), per i primi 2,0/2,5 m si rileva una componente sabbioso-limosa dominante. Corrisponde agli Orizzonti A e B individuati dai sondaggi eseguiti in mare nel gennaio 2010.

- Limo argilloso a tratti sabbioso grigio scuro con abbondante materiale organico (talli e frammenti di fanerogame) e resti conchigliari talvolta integri; all'interno di questo orizzonte si rilevano passate decimetriche a varie profondità ad elevato contenuto sabbioso.

Corrisponde all'Orizzonte C rilevato sui carotaggi eseguiti lungo l'allineamento della scogliera in progetto.

Questo orizzonte risulta estremamente indicativo perché rappresenta l'appoggio dello spessore antropico, rilevando in tutti i sondaggi eseguiti spessori e giaciture variabili dei due membri che lo costituiscono.

Lo strato superficiale di questo orizzonte (spessore medio 2 m) è costituito da sabbia medio fine ed è stato riscontrato, con potenza variabile, in tutti i 9 sondaggi eseguiti a mare nel 2010, per mezzo di "Vibrocorer" lungo l'asse di sviluppo degli argini Nord ed Ovest della nuova vasca, e nella maggior parte dei sondaggi eseguiti a mare da Mecasol s.r.l. nel 2001, in prossimità dell'esistente vasca di contenimento.

Si fa presente che detto orizzonte, come rilevato dai sondaggi eseguiti lungo i frangiflutti esistenti, nel caso delle nuove opere di difesa sarà compenetrato da inerti aridi di cava e di frantoio, utilizzati per costruire il nucleo ed il filtro delle nuove opere a scogliera oppure per costruire lo strato di fondazione delle opere a cassoni. In questo modo il beneficio apporto di materiale arido e litoide ridurrà oltremodo un eventuale rischio di liquefazione di questo modestissimo orizzonte (di spessore medio circa 2 m)

Le caratteristiche geotecniche medie di questo strato superficiale, definite sulla base dei risultati delle indagini di campo e di laboratorio disponibili, sono:

o Sabbia medio-fine grigio verde talvolta debolmente limosa priva di resti algali

o Peso di volume materiale saturo:  $\gamma_s = 19,0 \text{ kN/m}^3$

o Angolo di attrito interno:  $\phi' = 32^\circ$

o Angolo di dilatanza:  $\psi = 0^\circ$

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

- o Intercetta di coesione:  $c' = 0$  kPa
- o Modulo elastico di Young costante  $E$  pari a 30 MPa
- o Coefficiente di Permeabilità Orizzontale  $K_h = 5 \times 10^{-4}$  m/s - (CONDIZIONI DRENATE)
- o Coefficiente di Permeabilità Verticale  $K_v = 5 \times 10^{-4}$  m/s - (CONDIZIONI DRENATE)

Lo porzione inferiore di questo orizzonte è invece costituita prevalentemente da un alternanza di limo argilloso, limo sabbioso e sabbie limose con presenza di farenogame in spessori variabili tra 4 e 5 metri.

Detto strato presenta verso il basso, come rilevabile da in alcune verticali, lenti formate da sabbie cementate di cui si dovrà tener conto nelle fasi realizzative delle opere, a causa dei cedimenti differenziali che potranno causare. Questo orizzonte dunque è caratterizzato, data la presenza di una forte componente sabbiosa, da discreti valori dei parametri di resistenza, mentre in termini di rigidità è necessario tenere conto di discreta deformabilità dello strato causata dalla presenza di "farenogame", tipiche delle deposizioni costiere e quindi "impastate" con la matrice limo-sabbiosa.

Le caratteristiche geotecniche medie di questo strato, definite sulla base dei risultati delle indagini di campo e di laboratorio disponibili sono:

- o Limo argilloso sabbioso o limo con sabbia debolmente argilloso o sabbia limosa con resti organici (farenogame)
- o Peso di volume materiale saturo:  $\gamma_s = 18,5$  kN/m
- o Angolo di attrito interno:  $\phi' = 27^\circ$
- o Angolo di dilatanza:  $\psi = 0^\circ$
- o Intercetta di coesione:  $c' = 5$  kPa
- o Coesione non drenata:  $C_u = 55$  kPa
- o Modulo elastico  $E_{50}$  è il modulo secante misurato in corrispondenza del 50% della tensione deviatorica di rottura di un campione sottoposto ad un percorso di carico triassiale drenato standard con pressione di confinamento pari a 100 kPa : 4.0 MPa
- o Modulo elastico  $E_{ur}$  è il modulo di Young sotto percorso di carico/scarico triassiale drenato standard calcolato alla pressione di confinamento pari a 100 kPa : 15 MPa

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

o Modulo elastico  $E_{oed}$  è il modulo tangente misurato alla pressione verticale di 100 kPa per un campione sottoposto a percorso di carico primario drenato: 3.0 MPa

o Coefficiente di Permeabilità Orizzontale  $K_h$ :  $5 \times 10^{-7}$  m/s

o Coefficiente di Permeabilità Verticale  $K_v$  :  $5 \times 10^{-7}$  m/s

## ORIZZONTE LITOLOGICO 2

Sabbia limosa a tratti argillosa marrone ocra mediamente addensata con frammenti di calcarenite (Panchina) e/o Ghiaie eterometriche in matrice sabbiosa grigio piombo Epoch Pleistocene superiore, Stage Europe Tirreniano.

Costituito da sabbia da media a grossolana con ghiaia e ciottoli eterometrici (materiale derivante dalla disgregazione della Panchina) in variabile matrice limosa a tratti argillosa; la colorazione risulta tipicamente marrone - ocra.

Questo orizzonte si rinviene esclusivamente nei sondaggi S1, S2 ed S1A, con spessori esigui (2,7m su S1, 2,5m su S2 e 2,1m su S1A); ciò è giustificato dal fatto che l'area di indagine si colloca al limite tra due domini caratterizzati da meccanismi deposizionali, e quindi da sedimenti, decisamente differenti. Ci troviamo infatti nella fascia di transizione tra l'orlo meridionale della Pianura di Pisa, costituita da terreni riferibili ad episodi di colmata ed alluvionali e il dominio del "Terrazzo di Livorno", caratterizzato dalla presenza più o meno continua di un livello di Panchina dal variabile grado di cementazione su tutto il territorio di Livorno. In questi spessori non vengono rintracciati macro-fossili (conchiglie e/o fanerogame) e sembrano avere una genesi più legata sia alla redistribuzione di materiale tirreniano sia allo "scarico" dei corsi d'acqua anche di modesta portata. (presenza seppure non continua del livello di Sabbie grossolane con passaggi di ghiaie). E' altresì interessante ricordare quanto ebbero importanza le modeste variazioni dovute a periodi interglaciali con fiumi che poterono alluvionare le piane antistanti le coste basse ed i cui sedimenti furono redistribuiti per costituire veri e propri livelli di ghiaie sub arrotondate e poligeniche rintracciate con spessori importanti all'interno dell'Orizzonte.

**Tale orizzonte scompare procedendo verso mare e quindi non viene considerato ai fini della definizione della successione stratigrafica dei terreni delle aree interessate dalla realizzazione delle opere della Piattaforma Europa.**

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

### ORIZZONTE LITOLOGICO 3

Argilla limosa a tratti sabbiosa grigio piombo con sottili passate a componente limo-sabbiosa dominante Epoch Pleistocene medio, Stage Europe Pre-Tirreniano/Post-Calabriano.

Questo Orizzonte è caratterizzato da un litotipo predominante a componente argilloso limosa a tratti sabbiosa color grigio piombo nel quale si intercalano, a vari livelli, passate decimetriche ad elevata componente sabbioso-limosa. Si rileva la presenza di frammenti conchigliari e sporadici resti lignei ai primi stadi del processo di carbonizzazione.

Intercalati a questi due litotipi si ritrovano ulteriormente, a differenti profondità e di spessore variabile nei vari sondaggi eseguiti, passate di ghiaie poligeniche eterometriche e sub arrotondate in matrice sabbioso limosa grigio piombo; tali elementi appartengono al dominio ligure e toscano e derivano dai trasporti fluviali dell'Arno e dei vari corsi d'acqua dell'entroterra livornese-pisano. Può essere significativa questa alternanza che probabilmente si può tradurre in una variazione alternata di ambienti di near-shore in vicinanza con la linea di riva e con la presenza di energie di trasporto intense, con trasformazioni rapide in chiusure palustri o pseudo - lagunari con possibilità di deposito di materiale più fine (per la de-energizzazione degli ambienti deposizionali) e di intrappolamento di materiale ligneo (per la presenza di retro cordoni densamente boscati). Rappresenta la base dell'Orizzonte 2, dove quest'ultimo è presente, mentre negli altri sondaggi risulta a diretto contatto con l'Orizzonte 1.

Le caratteristiche geomeccaniche di questo orizzonte, che mediamente presenta uno spessore di circa 9 m, risultano essere variabili sia in termini di parametri di resistenza che in termini di deformabilità. Nei livelli a componente limosa si presenta di consistenza plastica mentre nei livelli più argillosi risulta essere leggermente sovraconsolidato con valori del rapporto di sovra consolidazione OCR, ricavati dall'interpretazione delle prove penetrometriche statiche con piezocono, sempre compresi tra 2 e 3

Le caratteristiche geotecniche medie di questo orizzonte, definite sulla base dei risultati delle indagini di campo e di laboratorio disponibili sono:

o Alternanza di argilla con limo e limo con argilla

o Peso di volume materiale saturo:  $\gamma_s = 18,5 \text{ kN/m}^3$

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

o Angolo di attrito interno:  $\phi' = 26^\circ$

o Angolo di dilatanza:  $\psi = 0^\circ$

o Intercetta di coesione:  $c' = 15$  kPa

o Coesione non drenata:  $C_u = 0.32 \sigma'_v$  kPa (min 70 kPa)

o Modulo elastico  $E_{50}$  è il modulo secante misurato in corrispondenza del 50% della tensione deviatorica di rottura di un campione sottoposto ad un percorso di carico triassiale drenato standard con pressione di confinamento pari a 100 kPa : 5.0 MPa

o Modulo elastico  $E_{ur}$  è il modulo di Young sotto percorso di carico/scarico triassiale drenato standard calcolato alla pressione di confinamento pari a 100 kPa : 10 MPa

o Modulo elastico  $E_{oed}$  è il modulo tangente misurato alla pressione verticale di 100 kPa per un campione sottoposto a percorso di carico primario drenato: 3.0 MPa

o OCR= 2

o Coefficiente di Permeabilità Orizzontale  $Kh$ :  $10 \times 10^{-9}$  m/s

o Coefficiente di Permeabilità Verticale  $Kv$  :  $10 \times 10^{-9}$  m/s

#### ORIZZONTE LITOLOGICO 4

Alternanza di sabbie limose marroni - grigie con sporadici livelli di ghiaie e spessori conchigliari. Epoca: Pleistocene medio, Stage Europe post-calabriano.

Si tratta di uno spessore plurimetrico di sabbie limose marroni/grigie con sporadica ghiaia e resti conchigliari, addensate, rinvenuto oltre la quota -21.00 m s.m.

La tessitura e la colorazione di questo deposito sono riferibili a fenomeni alluvionali legati alla presenza di paleo conoidi fluviali che sfociavano in corrispondenza dell'attuale limite nord-orientale della prima vasca di contenimento per sedimenti di dragaggio.

I parametri geotecnici di resistenza e di deformabilità utilizzati per detto orizzonte sono quelli tipici delle sabbie moderatamente addensate in condizioni drenate:

o Sabbia medio-fine grigio verde talvolta debolmente limosa priva di resti algali

o Peso di volume materiale saturo:  $\gamma_s = 19,5$  kN/m

o Angolo di attrito interno:  $\phi' = 34^\circ$

o Angolo di dilatanza:  $\psi = 0^\circ$

o Intercetta di coesione:  $c' = 0$  kPa

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

o Modulo elastico di Yuong costante  $E_{ref}$  pari a 30 MPa

#### 4.3 Caratterizzazione sismica dei terreni.

Il sistema di classificazione attualmente in vigore, secondo l'Ordinanza 3274/2003 e le più recenti "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC 2008), prevede la suddivisione nelle seguenti classi di depositi:

Classificazione dei terreni in base a:

- velocità delle onde di taglio  $V_{s30}$

o, in alternativa:

- resistenza alla penetrazione  $N_{spt}$
- coesione non drenata  $c_u$

##### Classe A:

Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/sec eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m;

##### Classe B:

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 360 e 800 m/sec (ovvero  $N_{spt} > 50$  e  $c_u > 250$  kPa);

##### Classe C:

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 e 360 m/sec ( $15 < N_{spt} < 50$  e  $70 < c_u < 250$  kPa);

##### Classe D:

Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori ai 30 m, caratterizzati da un graduale

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori  $V_{s30} < 180$  m/sec ( $N_{spt} < 15$ ,  $c_u < 70$  kPa);

Classe E:

Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con  $V_{s30} > 800$  m/sec);

Classe S1:

Depositi di terreni caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  inferiori a 100 m/sec (ovvero  $10 < c_u < 20$  kPa) che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche;

Classe S2:

Depositi di terreno soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabili nei tipi precedenti.

Le campagne di indagini disponibili, finalizzate alla caratterizzazione dei terreni in oggetto, sono state articolate sia in indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo sia sulla terraferma che a mare) che indirette (indagini geoelettriche, indagini sismiche a rifrazione, sismica passiva, MASW, subbottom profile).

L'attribuzione della categoria di sottosuolo in funzione della risposta sismica dei primi 30 m di terreno, è stata in primo luogo assegnata attraverso i risultati derivanti dalle indagini MASW condotte sugli allineamenti geoelettrici eseguiti in corrispondenza della scogliera che delimita a nord la vasca di colmata attualmente in esercizio.

I valori di  $V_{s30}$  che derivano da questo tipo di indagini, calcolati dal piano d'imposta della nuova opera (-4.50 m l.m.m.), corrispondono, secondo la classificazione O.P.C.M. 3274/2003 e NTC 2008, a categorie di sottosuolo di classe C.

A conferma e verifica della categoria di sottosuolo individuata, i valori di coesione non drenata risultano coerenti con la classificazione (O.P.C.M. 3274/2003, NTC 2008) in categoria C [ $70 < c_{u,30} < 250$ ].

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

#### 4.4 Studio di amplificazione sismica locale

Nel corso della progettazione della seconda vasca di colmata è stato condotto un apposito studio di amplificazione locale.

Lo studio, svolto con il metodo numerico, lineare equivalente monodimensionale attraverso il software EERA, ha fornito valori dell'accelerazione media di picco al suolo pari a 0,193 g per un'amplificazione di circa 1,71 rispetto alla PGA di normativa su suolo di categoria A con probabilità di eccedenza in 50 anni pari al 10% corrispondente ad un periodo di ritorno dell'azione sismica pari a 475 anni.



#### 4.5 Verifica del potenziale di liquefazione

I tipi di depositi maggiormente suscettibili al fenomeno della liquefazione sono rappresentati da terreni monogranulari (o comunque con un scarso assortimento granulometrico) incoerenti o con bassa percentuale di materiale fine, con densità relativa inferiore al 75%: bassa resistenza alla penetrazione valutabile tramite prove SPT.

Secondo la metodologia già proposta dal CNR e consigliata dal Gruppo Nazionale di Difesa dai Terremoti (GNDT) la liquefazione di un deposito sabbioso sotto falda è assente se:

- a) il valore di  $N_{SPT}$  normalizzato è  $>25$  con contenuto di materiale fine assente;
- b) il valore di  $N_{SPT}$  normalizzato è  $>20$  con contenuto di fine  $>10\%$ ;
- c) lo strato saturo si trova ad una profondità  $>15$  m dal p.c. (secondo Kishida  $>12$  m);
- d) il contenuto di fine argilloso (CF) è  $>20\%$ ;
- e) l'indice di plasticità (IP) è  $>10$ ;
- f) l'accelerazione massima al suolo è  $<0,15g$ ;
- g) gli strati sabbiosi non sono estesi e spessi.

Dall'interpretazione delle numerose indagini in situ ed in laboratorio eseguite a sostegno della progettazione esecutiva delle due vasche di colmata, e considerando le informazioni ricavate dalle indagini di riferimento a disposizione, è emersa una situazione litostratigrafica caratterizzata dall'affioramento di un litotipo a diretto contatto con il fondo del mare a

	Raggruppamento: Modimar s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Alberto Noli	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa	Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	10	010	FRI	06A	-1	GEO

componente sabbioso limosa dominante; questo livello è stato rilevato con uno spessore dell'ordine di 1,5/2,0 m..

Gli altri depositi che costituiscono la serie di Orizzonti individuati, presentano una componente limoso-argillosa dominante, con sottili intercalazioni sabbioso limose.

Pertanto, in riferimento alle condizioni d) e g) sopra esposte, si ritiene di poter considerare i terreni oggetto di studio come non rientranti nella casistica dei depositi soggetti alla liquefazione.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

## 5. Problematiche geotecniche

La ricostruzione geologica e stratigrafica delle aree a mare dove si sviluppano le opere della Piattaforma Europa ha evidenziato una discreta omogeneità stratigrafica che risulta coerente anche quella delle aree dove si sviluppa il porto esistente rispetto alla quale la differenza principale riguarda l'orizzonte 2 che procedendo verso mare si assottiglia progressivamente fino a scomparire lasciando le formazioni dell'orizzonte 1 a contatto con quelle dell'orizzonte 3.

Inoltre relativamente allo strato superficiale dell'orizzonte 1 nelle aree a mare nei primi 2.5÷2.0 m risulta dominante la frazione sabbiosa-limosa nella quale procedendo verso il largo (v. indagini di caratterizzazione ambientale Elab. 10 010 RR 17 -0 MAR "Studio sulla gestione dei materiali di dragaggio") aumenta la frazione grossolana e talora presenta anche una discreta componente ghiaiosa.

Le informazioni raccolte e la ricostruzione effettuata fa escludere, nell'area di studio, la presenza di problematiche geotecniche che possano condizionare la fattibilità/stabilità delle opere previste nello studio di fattibilità del Primo Stralcio della Piattaforma Europa e allo stesso tempo consente di far riferimento, per la definizione delle caratteristiche tecniche e dei costi delle nuove opera da realizzare, ai progetti di opere analoghe realizzate nel porto di Livorno.

A tale riguardo si fa presente che le condizioni stratigrafiche e geotecniche delle formazioni che caratterizzano l'area del porto di Livorno, fino ad oggi, non hanno posto particolari limitazioni nei riguardi della scelta della soluzione tecnica da adottare per la realizzazione delle opere portuali esistenti. Infatti per quanto riguarda le banchine all'interno del porto di Livorno si susseguono muri di banchina a gravità (cassoni, massi sovrapposti, cassoni autoaffondanti) con muri di banchina con strutture profonde (diaframmi di paratie di c.a., diaframmi di palancole) che in entrambi i casi, anche a distanza di decenni dalla loro costruzione, si trovano in un buono stato di conservazione e non presentano segni di dissesto, come ad esempio cedimenti e/o rotazioni/spostamenti, che evidenzino l'esistenza di problematiche di tipo geotecnico.

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

Analogamente per le opere di difesa, la cui realizzazione risale anche ad alcuni secoli fa (v. diga curvilinea), non si rilevano segni di cedimenti e/o dissesto e gli unici interventi di recupero strutturale eseguiti hanno riguardato il rifiorimento delle mantellate esterne.

Anche nei riguardi dei cedimenti dei terreni di fondazione delle opere, che peraltro nel tempo non hanno prodotto effetti rilevanti nelle opere portuali (banchine, opere foranee e piazzali) un recente studio effettuato in occasione della redazione del progetto esecutivo della seconda vasca di colmata del porto di Livorno, che vista la collocazione può essere preso a riferimento nelle considerazioni sulla fattibilità tecnica delle opere della Piattaforma Europa, ha dimostrato che sia l'entità che l'evoluzione praticamente non rappresentano un punto di criticità nella progettazione e costruzione delle opere programmate. Infatti nel suddetto studio per i terreni di fondazione della diga a scogliera che delimita la vasca è stato calcolato un cedimento massimo di circa 60 cm, mentre per quanto riguarda i tempi di consolidazione una importante aliquota (circa l'85%), riconducibile al consolidamento degli strati superficiali più compressibili caratterizzati da elevati valori della permeabilità (livello limoso con fanerogame dell'orizzonte litologico 1), si esaurisce durante la costruzione del manufatto senza il bisogno di interventi specifici (ad esempio dreni e/o rilevati di precarica). Tale determinazione è stata confermata anche dai risultati dello specifico piano di monitoraggio attuato durante le fasi di costruzione della seconda vasca di colmata e dalle esperienze maturate durante le fasi di costruzioni e di esercizio della prima vasca di colmata, ultimata nel 2001 e completamente riempita da tempo, per la quale non sono stati rilevati cedimenti significativi delle opere a scogliera che la delimitano.

Per quanto riguarda le soluzioni tecniche previste per la realizzazione delle opere della Piattaforma Europa occorre premettere che si tratta di opere che non presentano particolare complessità e che possono essere considerate di routine nel campo delle opere marittime.

Le opere di difesa infatti si sviluppano su di fondali che al massimo raggiungono profondità di 15.00 m e che per buona parte del loro sviluppo si mantengono al disotto dei 10 m. Analogamente per le nuove strutture di banchina le esperienze maturate recentemente per

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

la progettazione e costruzione delle banchine interne del porto di Livorno (Molo Italia con cassoni cellulari imbasati a quota -14.00 m s.m., Banchine Sponde Est e Ovest della Darsena Toscana con fondali a quota -13.00 m s.m.) e nel porto di Piombino (banchina Darsena Grande con fondali al piede a quota -15.00 m s.m., e banchina Darsena Piccola con fondali al piede a quota -13.00 m s.m.) costituiscono un valido riferimento nei riguardi della loro fattibilità tecnica ed economica.

Scendendo nel dettaglio per la realizzazione delle parti delle opere foranee che si sviluppano in corrispondenza di fondali naturali con profondità fino a circa 10 m (tratto iniziale della diga nord e nuova diga della Meloria), come indicato negli elaborati integrativi di Piano, si è optato per soluzioni a scogliera mentre per le opere poste in corrispondenza di fondali con profondità maggiori si è optato per soluzioni a cassoni con parete lato mare forata così da ridurre il potere riflettente delle opere. In entrambi i casi si tratta di tipologie costruttive già utilizzate con successo per la realizzazione delle opere di difesa del porto di Livorno e quindi ai fini dell'individuazione delle sezioni tipo delle opere e dei relativi costi si è potuto far riferimento ai rispettivi progetti.

Per le nuove banchine sono state invece individuate tre soluzioni tecniche alternative delle quali una a gravita (cassoni cellulari) e le altre 2 alla danese.

Nel caso delle soluzioni a cassoni è stato possibile far riferimento al progetto del molo Italia del porto di Livorno, mentre per le soluzioni alla danese si è fatto riferimento sia ai progetti di analoghe opere realizzate recentemente nel porto di Livorno (v. IV Lotto Sponda Est della darsena Toscana, Rescazione della calata del Marzocco) sia a progetti di opere simili realizzate recentemente in porti nei quali si riscontrano condizioni geotecniche simili a quelle del porto di Livorno (Banchine della darsena Grande e della darsena Piccola del porto di Piombino).

Le uniche problematiche geotecniche che si potranno potrebbero riguardare i dragaggi ed il riutilizzo dei materiali di risulta per la realizzazione dei nuovi rilevati della Piattaforma Europa.

In particolare dal punto di vista granulometrico dall'elaborazione dei risultati delle analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati nel corso delle suddette campagne di

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

caratterizzazione risulta che la distribuzione tessiturale dei fondali all'interno dell'area portuale risulta abbastanza omogenea, con sedimenti di natura prevalentemente sabbioso pelitica su quasi tutto lo spessore indagato. All'esterno delle opere foranee (diga Curvilinea e diga della Meloria), nelle aree dove è prevista la realizzazione della Piattaforma Europa e dove sono concentrati i maggiori volumi di scavo, risulta invece costituita da sedimenti prevalentemente sabbiosi, talora anche con una discreta componente più grossolana (sabbie ghiaiose).

Gli aspetti di primaria importanza ai fini delle valutazioni geotecniche sul sistema di dragaggio e di costruzione dei nuovi terrapieni sono le seguenti:

- i terreni da dragare;
- i terreni di fondazione dei nuovi terrapieni;
- i mezzi di escavo e di trasporto dei materiali dragati;
- i materiali per la realizzazione dei terrapieni;
- le opere di delimitazione/contenimento;
- i tempi di realizzazione e di utilizzo dei terrapieni.

Le indagini di campo disponibili sono state utilizzate anche per avanzare le prime ipotesi sul sistema di dragaggio più idoneo e per effettuare delle valutazioni preliminari sul comportamento geotecnico di tali materiali che dopo essere stati dragati potranno essere sversati a formazione di rilevati all'interno di aree delimitate in parte dalle nuove strutture di banchina ed in parte dalle opere a scogliera della nuova diga nord.

Per i terreni in esame, di natura prevalentemente sabbioso, i sistemi di dragaggio possibili sono:

- draga a secchie: non molto indicata, a causa dei bassi rendimenti e degli elevati costi;
- draga a cucchiaio: non molto indicata, a causa degli elevati volumi da dragare e dei conseguenti costi;
- draga aspirante a punto fisso: adatta allo scavo di terreni sabbiosi e in grado di refluire direttamente nella vasca di colmata;
- draga aspirante con disgregatore: adatta sia allo scavo di terreni sabbiosi che di formazioni rocciose (v. panchina livornese) e in grado, mediante aggiunta di stazioni di pompaggio in serie, di raggiungere recapiti distanti fino a 10 km;

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

- draga aspirante a testa raspante autocaricante semovente: sebbene adatta allo scavo di qualsiasi tipo di terreno, richiede molto spazio per spostarsi nel luogo in cui svuotare la stiva del terreno scavato e un varco per l'accesso alla vasca di colmata;

Nella scelta del sistema di dragaggio si dovrà tener conto della presenza dei livelli di calcarenite (panchina Livornese). La presenza di questi strati cementati pur non costituendo un problema ai fini della realizzazione delle opere portuali (vengono attraversati facilmente dalle palancole e dai pali e vengono scavate senza difficoltà dai mezzi impiegati per la realizzazione dei diaframmi/pali di c.a.) nei lavori di dragaggio può rappresentare una insidia che può produrre un incremento dei costi. Infatti nei sondaggi spesso viene frantumata e confusa con una formazione sciolta sabbiosa/ghiaiosa e quindi in passato, alcune volte, per questo motivo, sono state scelti dei mezzi effossori di potenza non adeguata e questo ha comportato fermi di cantiere e costi aggiuntivi per la sostituzione della draga.

Esistono differenze nella gestione logistica del cantiere tra dragaggio meccanico o idraulico, che dovranno essere tenute in considerazione nella scelta: i tempi di esecuzione; la continuità/discontinuità del processo; la facilità/difficoltà nella gestione del recapito a distanze anche elevate del materiale dragato.

Dal punto di vista geotecnico il principale aspetto che contraddistingue le due tipologie di dragaggio è lo stato del materiale che viene immesso nel sito di destinazione.

Nel caso di draga idraulica si ottiene un materiale che perde completamente la sua struttura iniziale ed è caratterizzato da un rapporto liquido:solido pari a circa 5:1 (variabile in base al tipo di draga); in base alla distribuzione granulometrica del materiale dragato e alle caratteristiche geometriche della vasca di destinazione, deve essere valutata la compatibilità tra la sedimentabilità del materiale (che viene determinata attraverso specifiche prove di laboratorio) e i tempi e volumi disponibili per la sedimentazione del solido e il successivo processo di consolidazione.

Nel caso di draga meccanica il materiale dragato mantiene gran parte delle caratteristiche strutturali originarie, presentando problematiche potenzialmente minori nei processi di sedimentazione e consolidazione.

L'immissione dei materiali dragati nella vasca di colmata dà luogo a fenomeni di consolidazione che coinvolgono sia i terreni di fondazione della vasca di colmata, già

<b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Studio di Fattibilità  della Prima Fase  della Piattaforma Europa</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
		Data: Aprile 2014					
		10	010	FRI	06A	-1	GEO

esaminati in precedenza, sia il materiale immesso che, a causa dello stato tensionale crescente provocato dalla deposizione del materiale sovrastante, è soggetto a progressiva diminuzione di volume.

Gli aspetti essenziali che riguardano il fenomeno della consolidazione sono:

- la variazione di volume/il cedimento totale finale: da tale entità dipende strettamente la quantità di materiale effettivamente necessaria per il riempimento



della vasca;

- il tempo necessario affinché il cedimento si sviluppi completamente: tale aspetto può influenzare pesantemente lo svolgimento delle fasi esecutive per la realizzazione e per l'utilizzo dei terrapieni.

Nel caso di utilizzo di draghe di tipo idraulico, che nel caso in esame sono sicuramente più idonee visti gli elevati volumi di sedimenti da rimuovere, la composizione delle colmate sarà condizionata dai fenomeni di sedimentazione della frazione solida della miscela acqua/sedimento che verrà immessa dalle draghe nell'area di colmata: nella zona più prossima ai punti di immissione sarà prevalente la frazione più grossolana (sabbie e ghiaia) mentre man mano che ci si allontana dal punto di immissione diventerà sempre più prevalente la frazione più fine (limo e argilla).

Ovviamente occorre distinguere gli interventi di consolidazione per la parte dove sarà prevalente la frazione limoso/argillosa da quella dove saranno prevalenti le sabbie.

In particolare nell'area dove si concentrerà la deposizione dei materiali più fini l'intervento di consolidazione potrà essere costituito da una serie di dreni verticali (ad es. dreni a nastro) disposti ad una distanza reciproca che in questa sede, facendo riferimento a interventi analoghi progettati recentemente in situazioni simili, è stata assunta pari 2.00 m e da un rilevato di precarica di altezza tale da riprodurre le condizioni di carico di esercizio dei futuri piazzali.

Nelle porzioni delle colmate che saranno costituite prevalentemente da sabbie è invece necessario prevedere un diverso tipo di intervento che, considerate le caratteristiche granulometriche dei materiali (sabbie), non è mirato ad una riduzione dei percorsi di filtrazione ma ad un miglioramento delle condizioni di addensamento che in questo caso potrà essere costituito da la realizzazione di una serie di pali in ghiaia a dislocamento che in

	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa		10	010	FRI	06A	-1	GEO

questa sede, facendo riferimento a interventi analoghi progettati recentemente in situazioni simili, è previsto che vengano disposti ad una distanza reciproca di 2.00 m ed all'applicazione di un rilevato di precarica di altezza tale da riprodurre le condizioni di carico di esercizio dei futuri piazzali.

Preme evidenziare che nel caso in esame i risultati delle campagne di caratterizzazione dei sedimenti svolte hanno evidenziato che buona parte del volume di sedimenti da dragare può essere classificato come "VERDE" è quindi, in analogia con analoghi progetti in siti di interesse nazionale recentemente approvati (v. Porto di Piombino) è possibile in questa fase prevedere il suo impiego per la realizzazione dei rilevati della Piattaforma Europa senza la necessità di prevedere strutture di conterminazione impermeabili. Tale aspetto produce effetti benefici sulla fattibilità degli interventi di consolidamento descritti sia dal punto di vista tecnico che economico. Infatti grazie all'assenza di contaminanti nei terreni di dragaggio non sarà necessario prevedere costosi interventi di trattamento delle acque di esubero che dovranno uscire durante le fasi di refluento dei sedimenti nella vasca e delle acque che dovranno essere emunte nel corso dello svolgimento degli interventi di consolidamento. Inoltre la presenza sul fondo naturale di uno strato sabbioso contribuirà a ridurre i tempi di consolidazione.

	Raggruppamento: Modimar s.r.l.	Titolo Elaborato: Analisi sommaria degli aspetti geologici idrogeologici geotecnici					
Autorità Portuale di Livorno	Alberto Noli	Data: Aprile 2014					
Studio di Fattibilità della Prima Fase della Piattaforma Europa	Technital s.p.a. Bureau Veritas Italia s.p.a. Acquatecno s.r.l.	10	010	FRI	06A	-1	GEO

**APPENDICE**  
**PROFILI STRATIGRAFICI**

