AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA
PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

SOCIETÀ DI PROGETTO: APM TERMINALS VADO LIGURE S.p.A.

MAERSK

CLF GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A.

IL RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATO N° :

MI0102-PV-G-G-R-009-00

TITOLO ELABORATO

ELABORATI GENERALI

GEOTECNICA

CAMPO PROVE E AREA DI VERIFICA MODALITÀ DI CO-STRUZIONE - RELAZIONE CONCLUSIVA

DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
Dicembre 2015	F. CARNEVALE	F.CARNEVALE	G. FIORINI

REVISIONE N°	DATA	DESCRIZIONE
00	Dicembre 2015	EMISSIONE PER APPROVAZIONE

NOME FILE

MI0102-PV-G-G-R-009-00.docx

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETO DI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHE PARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE

AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATI GENERALI

CAMPO PROVE E AREA DI VERIFICA MODALITÀ DI COSTRUZIONE - RELAZIONE CONCLUSIVA

INDICE

1. PREMESSA 6
2. OGGETTO E SCOPO 8
3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO 9
4. PROGETTO DEL CAMPO PROVA 10
   4.1. Generalità 10
   4.2. Descrizione delle fasi esecutive 10
   4.3. Comportamento atteso 12
5. ATTIVITÀ SVOLTE IN CAMPO 15
6. MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA 16
   6.1. Generalità 16
   6.2. Attività di monitoraggio 16
   6.3. Risultati del monitoraggio 17
      6.3.1. Rilievi multibeam 17
      6.3.2. Risultanze delle prove di calibrazione del vibroinfissore utilizzato per realizzare le inclusioni rigide VCC 17
      6.3.3. Diagrafie trasmesse dall'esecutore per ciascuna colonna eseguita riportante i principali parametri operativi misurati dalla macchina durante l'esecuzione delle VCC 18
      6.3.4. Letture dei cedimenti misurati con i profilometri installati sul bonifico 18
      6.3.5. Letture dei cedimenti misurati con mire topografiche materializzate sulla soletta di copertura dei cassoni 19
      6.3.6. Risultanze dei sondaggi eseguiti per l'installazione dei piezometri e degli estensimetri profondi 19
      6.3.7. Letture dei cedimenti misurati con gli estensimetri 20
      6.3.8. Letture delle variazioni di pressione neutra misurate dai piezometri 21
      6.3.9. Risultanze delle prove CPTU condotte prima e dopo la precarica 21
7. CONFRONTO TRA MONITORAGGIO E PREVISIONI DI PROGETTO 22
8. ANALISI A RITROSO DEL COMPORTAMENTO RISCONTRATO 23
9. MISURE DI MITIGAZIONE DA PREVEDERE NELLA FUTURA FASE DI PROGETTAZIONE ESECUTIVA 29
10. CONCLUSIONI 32

ELENCO FIGURE

Non è stata trovata alcuna voce dell'indice delle figure.

ELENCO TABELLE

Tab. 7.1 - Confronto tra cedimenti misurati e previsione di progetto 22
Tab. 9.1 - Confronto tra cedimenti adeguati con le raccomandazioni finali e previsione di progetto 31

1. PREMESSA

La futura Piastra Multifunzionale di Vado Ligure è costituita da due diverse tipologie costruttive: una prima area è realizzata tramite un rilevato in terra conterminato da cassoni reggispinta, una seconda area prevede, invece, la realizzazione di un impalcato in calcestruzzo armato poggiante su dei cassoni cellulari.

Per la funzionalità della piattaforma è necessario limitare i cedimenti che l'impalcato subirà a seguito dell'applicazione dei carichi di esercizio legati sostanzialmente al peso dei containers su di esso stoccati.

Il Progetto Definitivo prevedeva la realizzazione di una precarica, con intensità pari al massimo carico di esercizio applicato, dei cassoni costituenti l'area a giorno della piattaforma.

Nel tempo si è presentata l'opportunità esecutiva di realizzare una precarica solo parziale dei cassoni realizzando però, nel contempo, delle inclusioni rigide nel terreno di fondazione. La possibilità di eseguire una precarica solo parziale porta ad evidenti benefici esecutivi e ad una semplificazione delle modalità operative in corso d'opera.

Avendo ricevuto parere favorevole da parte dell'Autorità Portuale riguardo la possibilità di introdurre tale riduzione di precarica a fronte dell'esecuzione di un consolidamento del terreno di fondazione, si è provveduto, a progettare prima, e a realizzare poi, un campo prova avente come obiettivo la verifica dell'idoneità della nuova modalità operativa proposta nel limitare i cedimenti di esercizio dei cassoni.

Per la realizzazione delle inclusioni rigide si è scelto di appoggiarsi alla società Menard la quale vanta un'esperienza più che cinquantennale nel consolidamento dei terreni soffici con lavori eseguiti in tutto il mondo.

In particolare si è scelto di realizzare le inclusioni rigide sfruttando la tecnologia VCC (vibro concrete columns) brevettata da Menard stessa e applicata ormai su vasta scala

mondiale per limitare i cedimenti di opere su terreni soffici quali quelli presenti nell'area di Vado Ligure.

La progettazione ed il dimensionamento dell'intervento è stata eseguita direttamente da Menard la quale ha fornito anche una previsione di comportamento per i cassoni del campo prova.

Il campo prova è stato portato avanti da GLF, tuttavia, vista la peculiarità delle lavorazioni e la presenza di un brevetto, Menard ha eseguito essa stessa le inclusioni rigide nell'area del campo prova.

La stessa Menard, a completamento della attività di progettazione ed esecuzione delle inclusioni rigide ha provveduto a fornire l'interpretazione dell'effettivo comportamento deformazionale dei cassoni così come misurato durante le lavorazioni.

Il presente rapporto si affianca alle relazioni di Menard, riprendendone i concetti e contestualizzando le conclusioni proposte da Menard all'interno dell'intero iter progettuale della Piattaforma.

Sono pertanto di riferimento a questo rapporto tutti i documenti citati al successivo capitolo 3.

2. OGGETTO E SCOPO

Oggetto del presente rapporto è il campo prova per la verifica della modalità di costruzione della Piattaforma Multifunzionale di Vado Ligure.

Scopo è, partendo dal lavoro di previsione ed interpretazione svolto da Menard, sintetizzare e contestualizzare i risultati ottenuti col campo prova all'interno del più generale iter progettuale della Piattaforma.

3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Sono di riferimento al presente rapporto i seguenti documenti:

1. MI010P-PE-G-G-R-1001-C6, Campo prova e area verifica modalità di costruzione - Relazione tecnica, del Luglio 2013 redatto da TCH;
2. Elaborati grafici di supporto al Doc. Rif. 1 redatti da TCH con la seguente codifica:
   a. MI010P-PE-G-G-D-1111-C0
   b. MI010P-PE-G-G-D-1112-C0
   c. MI010P-PE-G-G-D-1113-C0
   d. MI010P-PE-G-G-D-1114-C0
   e. MI010P-PE-G-G-D-1115-C0
   f. MI010P-PE-G-G-D-1116-C0
   g. MI010P-PE-G-G-D-1117-C0
   h. MI010P-PE-G-G-D-1118-C0
   i. MI010P-PE-G-G-D-1119-C0
   j. MI010P-PE-G-G-D-1120-C1
   k. MI010P-PE-G-G-D-1121-C1
   l. MI010P-PE-G-G-D-1122-C1
   m. MI010P-PE-G-G-D-1123-C1
   n. MI010P-PE-G-G-D-1124-C1
   o. MI010P-PE-G-G-D-1125-C0
   p. MI010P-PE-G-G-D-1126-C0.
3. MI010P-PE-G-G-R-1301-C1, Geotechnical design report - Trial Area, del Luglio 2013 redatto da Menard con codifica MEN121105-GDR-Trial area-rev. C;
4. Diagrafie dei parametri operativi misurati durante l'esecuzione delle VCC.

4. PROGETTO DEL CAMPO PROVA

4.1. Generalità

Sono di riferimento i Doc. Rif. 1, 2 e 3, in particolare i primi due illustrano le modalità esecutive del campo prova, mentre il terzo fornisce la previsione di comportamento data da Menard.

Nel seguito si riassume il contenuto dei vari documenti richiamandone i vari paragrafi.

4.2. Descrizione delle fasi esecutive

Il Doc. Rif. 1 al capitolo 5 riassume quelle che sono le varie fasi esecutive del campo prova. A completamento il Doc. Rif. 2 contiene gli elaborati grafici di supporto che descrivono le varie fasi esecutive, le strumentazioni da installare e il programma di letture. In sintesi sono state previste 9 fasi a suo tempo così descritte:

– FASE 0:
  Verifica stratigrafica tramite monitoraggio dei parametri di penetrazione del vibroinfissore in corrispondenza delle verticali dei sondaggi S11 ed S12 della campagna geognostica del 2006.
– FASE 1:
  Posa del bonifico avente spessore 2 metri. Alla fine della posa del bonifico si esegue un rilievo multibeam dell' intera area.
– FASE 2:
  Esecuzione delle inclusioni rigide. Alla fine dell'esecuzione delle inclusioni si esegue di nuovo un rilievo multibeam dell'area.
– FASE 3:
  Messa in opera dei profilometri.
– FASE 4:
  Versamento dello strato di ghiaia con spessore minimo di 1 metro al di sopra del bonifico.
– FASE 5:

Messa in opera dello strato di imbasamento fino a formare un piano alla -16.30 m l.m.m. per tener conto dei futuri cedimenti dei cassoni che porteranno la quota di posa al valore nominale di -16.50.

Alla fine della fase 5 si esegue un rilievo multibeam dell'area.

– FASE 6:

Si affonda il cassone C2 il quale si trova ad avere uno scarico massimo in fondazione non superiore a 100 KPa. Si materializzano i capisaldi topografici in testa al cassone, in corrispondenza dei 4 spigoli, e si mettono in opera gli estensimetri profondi attraverso le predisposizioni realizzate nella carpenteria dei cassoni. Si realizzano i piezometri e si installano le centraline per l'acquisizione dati dei profilometri. I piezometri sono elettrici e vengono ubicati in asse ai due cassoni. Si prevedono 2 verticali piezometriche per cassone con 2 celle per ciascuna verticale. Le celle piezometriche monitoreranno le pressioni neutre in L1, L2, SL e G. Esse saranno collegate ad una centralina e leggeranno in continuo. A lato del cassone viene realizzata la CPTu 130.

Si esegue la lettura di zero dei capisaldi e delle basi estensimetriche e si scaricano le letture di piezometri e profilometri. Si affonda il cassone C3 e si ripetono le stesse operazioni descritte per il cassone C2, si installa la stessa strumentazione e si esegue la CPTu 131. Terminata la posa di C3 si effettua la lettura di tutti i capisaldi e si scaricano le letture di tutti i profilometri / piezometri / basi estensimetriche.

– FASE 7:

Si zavorrano i cassoni con acqua e sabbia fino a che entrambi raggiungono uno scarico in fondazione pari a 130 KPa. Si monitorano con cadenza giornaliera i capisaldi, i piezometri, i profilometri e gli estensimetri. Le misure sono protratte nel tempo fino al termine della consolidazione che si ritiene terminata qualora l'andamento della curva carico-cedimento sia equivalente a quella di calcolo oppure si sia raggiunta una velocità di cedimento dell'ordine di 1 mm/gg.

Si scarica il cassone C2 a 115 KPa e si esegue lo stesso monitoraggio ora esposto.

– FASE 8:

Si procede a caricare il cassone C3 a 175 KPa. Si monitorano con cadenza giornaliera i capisaldi, i piezometri, i profilometri e gli estensimetri. Le misure sono protratte nel tempo fino al termine della consolidazione che si ritiene terminata qualora

l'andamento della curva carico-cedimento sia equivalente a quella di calcolo oppure si sia raggiunta una velocità di cedimento dell'ordine di 1 mm/gg.
Al termine della fase si esegue un rilievo multibeam e 2 prove CPTU, una per cassone.

– FASE 9:
Si rimuove il cassone C3. Si esegue lo scarico della lettura dei piezometri e profilometri e dei capisaldi sul cassone C2. Si esegue una lettura / scarico al giorno. Le misure sono protratte nel tempo fino al termine della consolidazione che si ritiene terminata qualora l'andamento della curva carico-cedimento sia equivalente a quella di calcolo oppure si sia raggiunta una velocità di cedimento dell'ordine di 1 mm/gg. Esecuzione di un rilievo multibeam.

4.3. Comportamento atteso

Il Doc. Rif. 3, redatto direttamente da Menard, fornisce la previsione, in termini di cedimenti attesi, per le singole fasi di esecuzione del campo prova.
Il documento al capitolo 2 descrive il metodo proposto per il consolidamento dei terreni di fondazione, ovvero la tecnologia VCC, al capitolo 3 fornisce le indicazioni circa la geometria del campo prova e ai capitoli 4 e 5 sintetizza la stratigrafia ed i parametri geotecnici adottati nelle successive analisi numeriche.
Il capitolo 6 descrive brevemente i criteri di progetto che hanno portato a definire la maglia ed il diametro delle VCC da eseguire sotto i cassoni concludendo di adottare colonne con diametro 60 cm o 80 cm laddove i carichi trasmessi dalla piattaforma siano superiori con interasse 2.45m x 2.75 m al di sotto dei cassoni e 5.5 m x 4.80 m nelle aree tra cassoni. Nella modellazione si sono assunte le colonne ancorate per almeno 50 cm nel livello di ghiaia profonda "G" e si è considerato che il primo metro di colonna, all'interno del bonifico, abbia diametro 1 metro anziché 60 cm.
Sempre nel capitolo 6 vengono presentate le geometrie dei modelli assial-simmetrici e 2D utilizzati per simulare le varie fasi di esecuzione del campo prova e si elencano le fasi costruttive considerate nella modellazione che sono congruenti a quelle indicate nel precedente §4.2. Vengono anche riportati i carichi trasferiti in fondazione per i cassoni considerati nelle analisi.

Il capitolo 7 contiene la sintesi dei risultati ottenuti con i vari modelli eseguiti riportando un confronto, in termini di diagramma cedimenti-tempo, tra il caso di terreno non trattato e terreno trattato con le VCC previste nel progetto. Il rapporto di efficienza del trattamento, definito come rapporto tra cedimento del terreno non trattato e cedimento del terreno trattato, è di 6.6. Ovvero le VCC riducono di quasi 1/7 i cedimenti dei cassoni rispetto al caso di terreno senza inclusioni rigide.

Vengono riportati anche gli sforzi assiali agenti all'interno delle colonne, ma nel seguito ci si concentra sulla previsione dei cedimenti contenuta nella Figura 15 per quanto concerne il modello assial-simmetrico e nella tabella di pagina 35 per quanto riguarda il modello 2D.

Dal modello assial-simmetrico risulta:

– Cedimento di posa dello strati di ghiaia/scanno = 7 cm;
– Cedimento progressivo dovuto alla posa del cassone con carico a 130 KPa = 15 cm;
– Cedimento progressivo del cassone con carico a 175 KPa = 17 cm.

Ovvero si ha che:

– Il cassone zavorrato a 130 KPa cede 8 cm;
– Il cassone zavorrato a 175 KPa cede di ulteriori 2 cm.

Quindi il cedimento totale subito dal cassone a partire dalla sua posa all'applicazione del carico di 175 kPa è di **10 cm**.

Dal modello 2D risulta:

– Cedimento di posa dello strati di ghiaia/scanno = 6 cm;
– Cedimento progressivo dovuto alla posa del cassone con carico a 130 KPa = 12 cm;
– Cedimento progressivo del cassone con carico a 175 KPa = 14.5 cm.

Ovvero si ha che:

– Il cassone zavorrato a 130 KPa cede 6 cm;
– Il cassone zavorrato a 175 KPa cede di ulteriori 2.5 cm.

Quindi il cedimento totale subito dal cassone a partire dalla sua posa all'applicazione del carico di 175 kPa è di **8.5 cm**.

I risultati dei due modelli sono in buon accordo tra di loro e le differenze nei valori calcolati sono congruenti con le schematizzazioni assial-simmetrica e di deformazione piana.

Il modello bidimensionale mostra che il cedimento differenziale tra i due cassoni risulta essere di **1.8 cm**, in linea con i requisiti di progetto che prevedono un differenziale massimo di 2 cm.

5. ATTIVITÀ SVOLTE IN CAMPO

Il Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** contiene gli elaborati grafici che riassumono e descrivono tutte le attività svolte durante il campo prova.

Sostanzialmente le fasistiche indicate al capitolo 4.2 sono state rispettate fatta eccezione per i seguenti aspetti:

1. la strumentazione, ossia i piezometri e gli estensimetri profondi, è stata messa in opera una volta installati entrambi i cassoni;
2. la prima serie di prove CPTU sono state eseguite dopo l'installazione di entrambi i cassoni;
3. la lettura di zero dei profilometri è stata fatta una volta posati entrambi i cassoni.

Il cronogramma lavori è riportato nel Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, ed in particolare nella tavola 57 è indicata la storia di carico nel tempo sovrapposta a tutte le lavorazioni eseguite con indicazione di data di inizio e fine e loro durata.

Si rimanda a detto elaborato per tutti i dettagli sul cronogramma dei lavori svolti.

6. MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA

6.1. Generalità

Come già descritto al capitolo 4.2 il campo prova è stato soggetto ad una vasta attività di monitoraggio.
In particolare nel seguito si intende per monitoraggio non solo le misure ottenute dalla strumentazione di controllo messa in opera, ma anche i riscontri di lavorazioni eseguite come controllo qualità e usate come certificazione dell'esecuzione dei lavori a regola d'arte.

6.2. Attività di monitoraggio

Si includono all'interno delle attività di monitoraggio le risultanze delle seguenti lavorazioni:

1. Rilievi multibeam eseguiti in specifiche fasi di lavoro così come descritto al §4.2;
2. Risultanze delle prove di calibrazione del vibroinfissore utilizzato per realizzare le inclusioni rigide VCC;
3. Diagrafie trasmesse dall'esecutore per ciascuna colonna eseguita riportante i principali parametri operativi misurati dalla macchina durante l'esecuzione delle VCC;
4. Letture dei cedimenti misurati con i profilometri installati sul bonifico;
5. Letture dei cedimenti misurati con mire topografiche materializzate sulla soletta di copertura dei cassoni;
6. Risultanze dei sondaggi eseguiti per l'installazione dei piezometri e degli estensimetri profondi;
7. Letture dei cedimenti misurati con gli estensimetri;
8. Letture delle variazioni di pressione neutra misurate dai piezometri;
9. Risultanze delle prove CPTU condotte prima e dopo la precarica.

Nel paragrafo che segue si commentano i risultati ottenuti per tutti i punti ora elencati.
Si ricorda che tutte le risultanze delle attività di monitoraggio sono contenute nel Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** a cui si rimanda per tutti i dettagli del caso.

6.3. Risultati del monitoraggio

6.3.1. Rilievi multibeam

I rilievi multibeam sono stati eseguiti:

- Dopo la messa in opera del bonifico: lo scopo è stato quello di verificare che lo spessore del materiale messo in opera fosse quello indicato negli elaborati di progetto. In più è servito come rilievo di prima pianta da confrontare con il secondo rilievo multibeam eseguito dopo la realizzazione delle VCC;
- Dopo l'esecuzione delle colonne VCC: lo scopo è stato quello di verificare, raffrontandolo con il rilievo multibeam precedente, l'eventuale effetto prodotto in termini di cedimento dalla realizzazione delle VCC. I rilievi eseguiti prima e dopo l'esecuzione delle colonne sono praticamente coincidenti segno che l'esecuzione delle inclusioni rigide non ha portato ad evidenti segni di cedimento nel bonifico;
- Dopo la messa in opera dello strato di imbasamento: lo scopo è stato quello di verificare che si fosse raggiunta la quota prevista in progetto per la messa in opera dei cassoni (-16.5 m l.m.m.);
- Dopo il salpamento dei cassoni: lo scopo è stato quello di verificare la geometria dello strato di imbasamento a fine attività. Non ci sono stati evidenti fenomeni di modifica della geometria dello scanno di imbasamento in termini di pendenza delle scarpate o fuori sagoma. La differenza di quota con il rilievo precedente è mediamente pari al cedimento totale misurato per i due cassoni del campo prova (circa 50 cm in totale).

6.3.2. Risultanze delle prove di calibrazione del vibroinfissore utilizzato per realizzare le inclusioni rigide VCC

L'ubicazione delle prove di calibrazioni ed i risultati ottenuti sono contenuti nel Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** alle tavole 7 e 8. In particolare sulla base delle prove di calibrazione condotte è stato possibile definire il criterio per individuare la quota di ancoraggio delle inclusioni VCC.
Si è considerata raggiunta la quota di ancoraggio delle inclusioni VCC al verificarsi di entrambe le seguenti condizioni:

1. Intensità di corrente erogata dal vibroinfissore superiore a 125 Ampere;
2. Velocità di avanzamento del vibroinfissore al massimo amperaggio inferiore ai 30-40 m/ora per un tempo compreso tra 30 e 60 secondi.

Questi criteri sono stati poi applicati in fase di produzione delle inclusioni VCC per definire il raggiungimento della quota di punta colonna.

6.3.3. Diagrafie trasmesse dall'esecutore per ciascuna colonna eseguita riportante i principali parametri operativi misurati dalla macchina durante l'esecuzione delle VCC

La tavola 17 contenuta nel Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la planimetria con la numerazione di tutte le colonne VCC eseguite e la quota di ancoraggio raggiunta. La successiva tavola 18 mostra un esempio dei parametri monitorati durante l'esecuzione delle inclusioni rigide. Sono riportati i dati relativi a due sole VCC, ma l'impresa esecutrice ha trasmesso le diagrafie con i parametri esecutivi misurati per ciascuna VCC eseguita (vedasi il Doc. Rif. 4).

I parametri monitorati sono stati:

- Intensità di corrente trasmessa al vibroinfissore;
- Volume di calcestruzzo iniettato;
- Pressione di iniezione;
- Profilo teorico della colonna ottenuta.

Le diagrafie hanno permesso di individuare le geometrie delle singole VCC in termini di quota di ancoraggio e diametro teorico dell'inclusione, oltre a verificare l'effettivo volume di calcestruzzo iniettato per formare ciascuna colonna.

6.3.4. Letture dei cedimenti misurati con i profilometri installati sul bonifico

Le letture di cedimento nel tempo misurate dai profilometri sono riportate nelle tavole 59 e 60 contenute nel Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.

Sono riassunte le misure di cedimento relative al tetto del bonifico al di sotto di ciascun cassone e nelle zone tra cassoni.

Visto che la lettura di zero degli strumenti è stata eseguita dopo la posa dei cassoni, i profilometri hanno misurato la coda del cedimento di consolidazione dovuto alla posa cassoni e tutti i cedimenti relativi le successive fasi di carico-scarico dei cassoni.
Il cedimento massimo misurato per il cassone C2 caricato a 130 KPa e poi scaricato a 115 KPa è stato nell'ordine dei 20 cm, mentre per il cassone C3 caricato a 175 kPa il cedimento massimo misurato è stato di circa 31 cm. Si ricorda di nuovo che solo parte del cedimento di posa dei cassoni è stato misurato e quindi il reale cedimento sperimentato dai cassoni è stato superiore ai valori ora richiamati.

6.3.5. Letture dei cedimenti misurati con mire topografiche materializzate sulla soletta di copertura dei cassoni

Analogamente ai profilometri anche i risultati delle letture topografiche eseguite con le mire installate sulla soletta di copertura dei cassoni sono stati riassunti nelle nel Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, tavola 58.
Anche i capisaldi topografici hanno misurato solo la coda della consolidazione del cedimento di posa dei cassoni restituendo cedimenti di 26 cm per il cassone C2 e 32 cm per il cassone C3. In corrispondenza di un evento meteomarino eccezionale, avvenuto il 4/11/2014, con onde maggiori di 3 metri che hanno quindi sormontato i cassoni interagendo con le mire topografiche, si sono registrati cedimenti dell'ordine dei 10 cm, cedimenti non registrati dagli altri strumenti. Si ritiene pertanto siano dovuti al sormonto delle onde sulla soletta del cassone che hanno danneggiato le mire topografiche.

6.3.6. Risultanze dei sondaggi eseguiti per l'installazione dei piezometri e degli estensimetri profondi

I sondaggi eseguiti hanno consentito di individuare la stratigrafia puntuale nell'area del campo prova permettendo così di identificare correttamente le quote di messa in opera dei piezometri e delle celle estensimetriche.
Hanno inoltre riscontrato la presenza dello strato di ghiaia "G" propriamente detto ad una quota di circa -41.5 m l.m.m., mettendo in luce come la quota di ancoraggio di tutte le colonne VCC sia superiore mediamente di 5-6 metri al tetto della

ghiaia. Il requisito di progetto che prevedeva l'ammorsamento per almeno 50 cm delle colonne VCC nello strato "G" non è stato raggiunto.
Si vuole sottolineare che con la sola vibrazione non si sarebbero potute raggiungere profondità superiori a quelle effettivamente raggiunte, e che per rispettare i requisiti di progetto si sarebbe dovuto utilizzare un getto d'acqua o di aria in pressione.
In linea di principio i criteri per la definizione della quota di ancoraggio sono risultati essere sempre verificati per tutte le inclusioni VCC pertanto durante l'esecuzione delle colonne non è stata ravvisata nessuna criticità.
L'esecuzione dei sondaggi, e solo quella, ha permesso di rendersi conto dell'effettiva differenza tra lo strato di ancoraggio raggiunto dalle VCC e il tetto delle ghiaie, ma a quel punto era ormai troppo tardi per intervenire sulla lunghezza colonna.

6.3.7. Letture dei cedimenti misurati con gli estensimetri

I risultati delle letture degli estensimetri sono riportati nella tavola 61 del Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.
Gli estensimetri hanno consentito di misurare la distribuzione del cedimento con la profondità individuando il contributo di ciascuno strato al cedimento totale.
Le letture terminano in occasione dell'evento meteomarino eccezionale già citato per i capisaldi topografici, il quale ha causato il danneggiamento delle centraline di acquisizione dei dati degli estensimetri.
Con particolare riferimento al cassone C3, che è stato sottoposto al massimo carico di 175 kPa, risulta la seguente distribuzione dei cedimenti:

– Fase di carico da 95 kPa a 130 kPa:
  - Cedimento totale da capisaldi topografici = 85 mm;
  - Cedimento scanno = 5 mm (6%);
  - Cedimento bonifico = 20 mm (23%);
  - Cedimento livello L1 = 10 mm (12%);
  - Cedimento livello L2 = 12 mm (14%);
  - Cedimento del livello SL = 38 mm (45%).
– Fase di carico da 130 KPa a 175 kPa:

- Cedimento totale = 112 mm;
- Cedimento scanno = 5 mm (4%);
- Cedimento bonifico = 22 mm (19%);
- Cedimento livello L1 = 27 mm (24%);
- Cedimento livello L2 = 4 mm (3%);
- Cedimento del livello SL = 57 mm (50%).

Tra parentesi è indicata in termini di percentuale l'aliquota di cedimento di ciascuno strato rispetto al cedimento totale.

6.3.8. Letture delle variazioni di pressione neutra misurate dai piezometri

Le letture piezometriche nel tempo sono riportate nella tavole 62 del Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. Anch'esse terminano alla data dell'evento meteomarino eccezionale che ha provocato il danneggiamento delle centraline di acquisizione dei dati.
In generale i piezometri hanno sempre letto il livello idrostatico di marea non evidenziando particolare incrementi di pressioni neutre dovuti alle fasi di carico/scarico. Tale evidenza appare congruente al fatto che da una parte i piezometri sono realizzati nel terreno tra VCC che assorbe solo una parte del carico totale trasmesso e dall'altra i piezometri sono installati sul bordo dell'area di carico pertanto la pressione che finisce sul terreno tra VCC è ulteriormente ridotta.
In sostanza quindi l'incremento di pressione neutra non è stato apprezzabilmente misurabile in quanto è stato maggiore l'effetto di variazione delle pressioni neutre legato alle maree.

6.3.9. Risultanze delle prove CPTU condotte prima e dopo la precarica

Il profilo della resistenza alla punta con la profondità ha permesso di ricostruire in maniera puntale la stratigrafia nell'area del campo prova. Tale ricostruzione ha trovato ottimo riscontro con i sondaggi eseguiti.
Dal confronto tra resistenza alla punta prima e dopo la precarica non appare un'evidenza di incremento. Le prove di dissipazione eseguite hanno permesso di confermare le assunzioni di permeabilità fatte in fase di progetto.

7. CONFRONTO TRA MONITORAGGIO E PREVISIONI DI PROGETTO

Per il confronto tra previsione di progetto e misure ottenute dal monitoraggio ci si riferisce alla grandezza più immediata: il cedimento dei cassoni.

Si potrebbero confrontare anche altre grandezze, ma dal rapporto di Menard redatto in fase di progetto, Doc. Rif. 3, è immediato ricavare la previsione dei cedimenti, la cui riduzione sotto i carichi di esercizio è oltretutto lo scopo principale del lavoro.

In particolare quindi il confronto viene fatto tra i cedimenti previsti in progetto e riassunti al capitolo 4.3 e di cedimenti misurati dai capisaldi topografici.
I cedimenti sono sintetizzati e confrontati nella tabella che segue.

TAB. 7.1 - CONFRONTO TRA CEDIMENTI MISURATI E PREVISIONE DI PROGETTO

	AFFONDAMENTO E CARICO A 130 KPA cm		CARICO A 175 KPA cm		TOTALE cm	
CASSONE	PREVISIONE	MISURA (*)	PREVISIONE	MISURA	PREVISIONE	MISURA (*)
C2	8	25	/	/	8	25
C3	8	18	2	11	10	29

(*) la misura non comprende il cedimento immediato legato alla posa del cassone, ma solo la sua coda di consolidazione.

Poiché solo parte del cedimento di posa dei cassoni è stato misurato l'effettivo cedimento sperimentato dai cassoni è superiore a quanto indicato nella precedente Tab. 7.1.
Sulla base delle misure si ha che, per entrambi i cassoni, il cedimento misurato è superiore a 3 volte il cedimento previsto.

Di tale disaccordo si da giustificazione e se ne fa l'analisi nel Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** redatto da Menard che verrà commentato al capitolo seguente.

8. ANALISI A RITROSO DEL COMPORTAMENTO RISCONTRATO

Per tutti i dettagli circa la back-analysis si rimanda al Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** redatto da Menard, nel seguito si riprendono e si commentano le circostanze che portano a giustificare i cedimenti misurati. Nel capitolo successivo ci si occuperà delle azioni mitigatorie previste da Menard per il futuro progetto della Piattaforma.

Al capitolo 2.5 del Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si elencano quelle che Menard individua essere le cause dei maggiori cedimenti riscontrati, in particolare si parla di:

1. Influenza nei cedimenti misurati della compressibilità iniziale dello scanno di imbasamento il quale è stato messo in opera senza alcun tipo di accorgimento atto a diminuirne la compressibilità iniziale legata al riassestamento che i ciottoli in superficie subiscono sotto carico;
2. Cedimento aggiuntivo, non computato in fase di progetto, legato al fatto che le VCC non raggiungono lo strato di ghiaia “G”, ma si fermano all’interno del livello SL il quale manifesta, nella sua porzione inferiore, la presenza di sottolivelli a prevalente contenuto limoso e quindi a maggiore compressibilità.

Su questi due aspetti si fanno le seguenti considerazioni:

1. Anche nell’esecuzione del campo prova a terra bonifico e scanno sono stati messi in opera senza adottare alcun particolare accorgimento esecutivo atto a ridurne la compressibilità. In quella circostanza, però, al di sopra dello scanno è stato messo in opera il rilevato in tout-venant il quale, chiaramente, gestisce in maniera diversa, rispetto al cassone, l’eventuale riassestamento dello strato di imbasamento. È chiaro che nel campo prova a mare, dove al di sopra dello scanno viene posto direttamente il cassone con la sua struttura infinitamente rigida, l’assestamento dello scanno per effetto del carico trasferito dal cassone riveste una criticità maggiore che non nel caso del rilevato in tout-venant. Si può quindi dire che è la peculiarità dell’utilizzare il cassone in calcestruzzo cellulare che rende evidente e manifesta la criticità che l’addensamento iniziale dello scanno riveste nella valutazione dei cedimenti.

2. In effetti, come già commentato al §6.3.6, i sondaggi hanno messo in luce un duplice aspetto: da una parte hanno reso evidente come le inclusioni VCC eseguite, nonostante in fase di esecuzione siano stati rispettati i criteri per individuare lo strato di ancoraggio, sono di fatto più corte rispetto al previsto, ed in particolare anziché immorsarsi per 50 cm all'interno dello strato di ghiaia "G" si trovano a terminare 4-5 metri al di sopra di esso. Dall'altra parte hanno messo in evidenza come al passaggio tra il livello delle Sabbie Limose (SL) e lo strato di ghiaia (G) siano presenti dei sottolivelli di materiale a prevalente natura limosa avente una maggiore compressibilità rispetto alla sabbia propriamente detta. Di questo passaggio stratigrafico se ne era già a conoscenza, infatti non solo in sede di Progetto della Piattaforma, ma anche durante l'esecuzione del campo prova a terra si è sempre riscontrata la presenza dei sottolivelli e nella definizione della compressibilità del macro strato se ne era tenuto debito conto. Il fatto nuovo ed inaspettato che ha giocato a sfavore dei cedimenti misurati, incrementandoli, è stata la diversa mobilitazione che questi sottolivelli hanno subito legata proprio alla presenza delle VCC. Tanto nel caso dell'area a terra della piattaforma, del campo prova a terra o nel caso di cassoni poggianti su fondazione diretta come da PD, la distanza tra i detti sottolivelli ed il piano di fondazione è tale che questi giochino un effetto non rilevante sul valore del cedimento totale misurato poiché, alla profondità cui si trovano, gli sforzi trasmessi al piano di imposta della fondazione hanno potuto diffondersi. Nel caso delle VCC, poiché tali sottolivelli si vengono a trovare subito sotto la punta delle colonne, la quale porta in profondità i carichi applicati al piano fondazione senza alcun tipo di diffusione, la componente di cedimento legata alla presenza dei sottolivelli diventa significativa. In buona sostanza, al contrario di quello che succede per l'area del rilevato o nel caso di cassone su fondazione diretta, sono proprio le colonne VCC ed il modo in cui esse portano in profondità il carico a trasformare i sottolivelli limosi in un elemento di criticità.

Sulla base delle osservazioni fatte si può dire che l'aver accoppiato la struttura del cassone alle inclusioni VCC ha messo in evidenza elementi di criticità non osservati in precedenza.

Se il primo aspetto legato alla compressibilità dello scanno e bonifico incide per un'aliquota del 20÷30% sul cedimento totale finale lo stesso non si può dire per quanto riguarda i sottolivelli limosi che invece incidono per un 50% sul cedimento totale (si vedano le percentuali riportate al § 6.3.7).
Al fine di meglio individuare il diverso peso che i sottolivelli limosi hanno al variare della tipologia fondazionale si considerano 3 diversi modelli in cui si simula la presenza di uno strato spesso 2 metri di materiale soffice ad una distanza dal piano di fondazione simile a quella del campo prova (circa 20 m).

Il primo modello considera il cassone su fondazione diretta, il secondo con VCC che però si fermano subito sopra il sottolivello ed il terzo considera di intestare le VCC nel livello più rigido sottostante.

Le geometrie dei modelli sono indicate nella figura che segue.

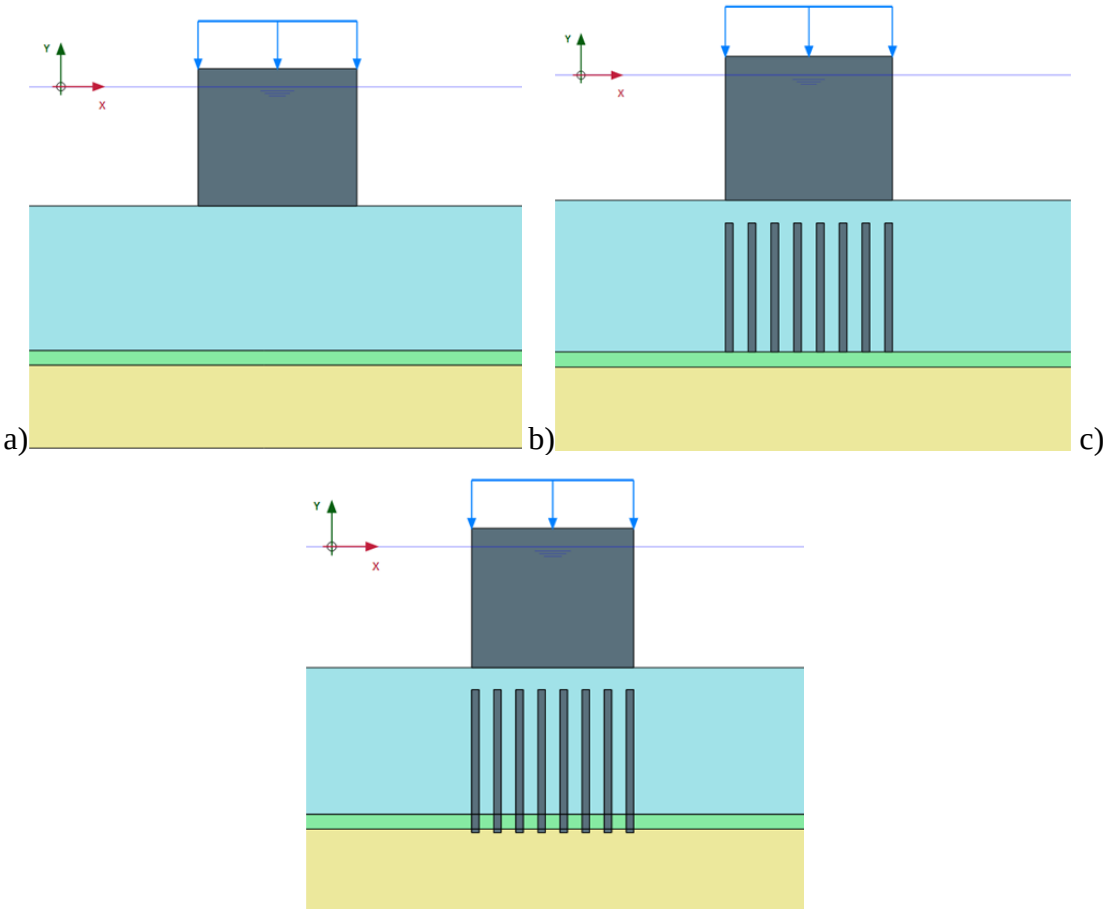


FIG. 8.1 - VALUTAZIONE DELL'INCIDENZA DEI SOTTOLIVELLI LIMOSI SUL CEDIMENTO TOTALE IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA FONDAZIONALE: A) FONDAZIONE DIRETTA, B) VCC CHE TERMINANO SUL SOTTOLIVELLO LIMOSO, C) VCC CHE SI INTESTANO SULLO STRATO RIGIDO

In termini distribuzione del cedimento con la profondità la Fig. 8.2 riporta il risultato del calcolo per i tre modelli eseguiti.

Ovviamente i valori di cedimento ottenuti sono puramente indicativi, l'obiettivo dell'analisi è individuare l'aliquota di cedimento totale che compete al sotto livello nelle tre diverse configurazioni.

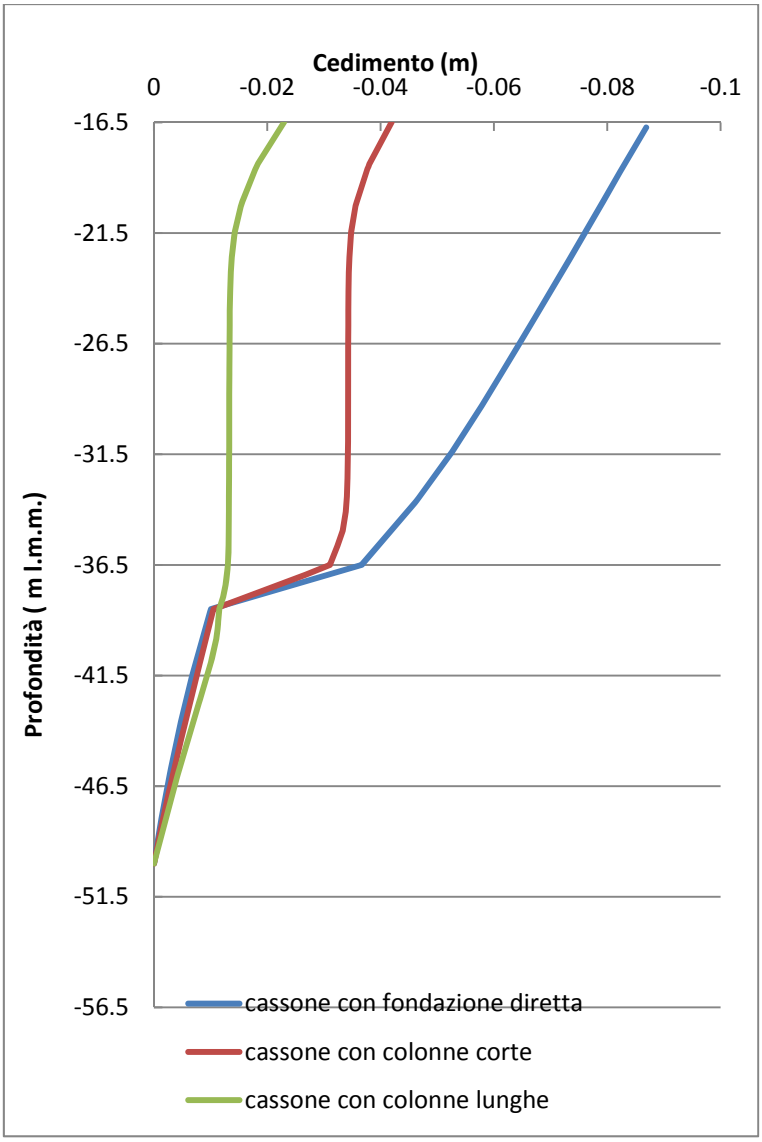


FIG. 8.2 - VALUTAZIONE DELL'INCIDENZA DEI SOTTOLIVELLI LIMOSI SUL CEDIMENTO TOTALE IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA FONDAZIONALE - ANDAMENTO DEL CEDIMENTO CON LA PROFONDITÀ

Il risultato che si ottiene è il seguente:

– Cassone su fondazione diretta: cedimento totale = 8.8 cm, cedimento del sottolivello = 2.5 cm, percentuale di influenza = 28%;
– Cassone su colonne che si intestano sul sottolivello: cedimento totale = 4.2 cm, cedimento del sottolivello = 2 cm, percentuale di influenza = 48%;

– Cassone su colonne che si intestano sul livello rigido: cedimento totale = 2.3 cm, cedimento del sottolivello = 0.08 cm, percentuale di influenza = 3%.

Come si osserva l'aliquota di cedimento rappresentata dal sottolivello passa da essere inferiore al 30% nel caso di fondazione diretta ad essere quasi il 50% del cedimento totale per fondazione con VCC corte ad essere praticamente trascurabile per VCC che si intestano nel livello rigido sottostante.

Il calcolo quindi dimostra come il caso di VCC corte sia quello cui compete la massima influenza del sottolivello limoso sul cedimento totale.

In questa configurazione la presenza del sottolivello può diventare significativa in quanto contribuisce per la metà del cedimento dato dall'intera stratigrafia.

Si riscontra quindi quanto sostenuto da Menard nelle sue considerazioni prima esposte.

9. MISURE DI MITIGAZIONE DA PREVEDERE NELLA FUTURA FASE DI PROGETTAZIONE ESECUTIVA

Il capitolo 7 del Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sintetizza le azioni correttive che Menard ritiene opportuno mettere in campo al fine di riportare l'effettivo comportamento deformativo dei cassoni all'interno delle previsioni iniziali di progetto.

In particolare si ritiene opportuno:

1. Prolungare le colonne VCC fino ad immorsarsi nello strato di ghiaia "G". A tale scopo, visti gli esiti del campo prova, si prevede l'utilizzo di getti d'acqua in pressione per raggiungere le profondità necessarie;
2. Eseguire una compattazione dello strato di imbasamento al fine di mitigarne gli effetti in termini di riassestamento dello strato sotto carico;
3. Rimodulare l'intensità della precarica prevedendo se necessario di precaricare al massimo carico di esercizio.

Si commenta subito il punto 3 ricordando quanto contenuto nelle premesse di questo rapporto, ovvero che l'approvazione da parte dell'Autorità Portuale all'impiego delle inclusioni rigide come consolidamento del terreno di fondazione è avvenuta a condizione di ridurre le entità delle precariche risolvendo così le criticità di ordine esecutivo e realizzativo delle lavorazioni così come messe in evidenza dall'Impresa. Pertanto non è accettabile la conclusione di Menard di cui al precedente punto 3. Resta quindi imperativo tenere le precariche parziali così come inizialmente previsto nel progetto del campo prova.

A tal proposito si illustra nel seguito come già l'adozione degli accorgimenti contenuti ai punti 1 e 2 siano sufficienti a riportare i cedimenti entro valori tollerabili.

Si riprende a tale proposito quanto illustrato al §6.3.7 in termini di distribuzione del cedimento con la profondità, ad esempio per la fase di carico da 95 kPa a 130 KPa:

– Cedimento totale da capisaldi topografici = 85 mm;

- Cedimento scanno = 5 mm (6%);
- Cedimento bonifico = 20 mm (23%);
- Cedimento livello L1 = 10 mm (12%);
- Cedimento livello L2 = 12 mm (14%);
- Cedimento del livello SL = 38 mm (45%).

Come dimostrato al capitolo 8 il prolungamento delle VCC fino allo strato di ghiaia porta il contributo di cedimento dei livelletti limosi dal 50% circa al 3% con quindi una riduzione del cedimento dello strato pari a quasi 17 volte.

Questo implica che il cedimento di SL passerebbe dai 38 mm misurati a 2.23 mm portando già così il cedimento totale a 49 mm anziché 85 mm.

Considerando anche quanto riportato nel punto 2 delle raccomandazioni prima riassunte la compattazione di scanno e bonifico porta ad una ulteriore riduzione dei cedimenti.

Supponendo di incrementare di almeno 5 volte il modulo elastico di partenza degli strati di imbasamento si avrebbe una riduzione del cedimento dai 25 mm misurati a 5 mm.

In questo caso, quindi, il cedimento totale scenderebbe a **29 mm**.

Per il successivo incremento di carico, da 130 kPa a 175 KPa, sempre con riferimento al §6.3.7 si otterrebbe, in analogia a quanto ora calcolato, un cedimento pari a **40 mm** anziché i 112 mm misurati.

Le azioni mitigatorie previste portano quindi i cedimenti a ridursi a una percentuale pari al 35% di quelli oggi misurati.

Riprendendo così la Tab. 7.1 di confronto tra valori misurati e calcolati, applicando per la parte di affondamento dei cassoni la percentuale di riduzione ora valutata sul cedimento effettivamente misurato, si avrebbe:

TAB. 9.1 - CONFRONTO TRA CEDIMENTI ADEGUATI CON LE RACCOMANDAZIONI FINALI E PREVISIONE DI PROGETTO

	AFFONDAMENTO E CARICO A 130 KPA cm		CARICO A 175 KPA cm		TOTALE cm	
CASSONE	PREVISIONE	ADEGUAMENTO (*)	PREVISIONE	ADEGUAMENTO	PREVISIONE	ADEGUAMENTO (*)
C2	8	8.75	/	/	8	8.75
C3	8	6.3	2	4	10	10.3

(*) il cedimento è calcolato come riduzione percentuale di quello misurato e non comprende il cedimento immediato di posa in opera dei cassoni.

Come si osserva, quindi, i valori di cedimento che corrispondono alla messa in essere delle azioni correttive di cui ai precedenti punti 1 e 2, sono già tali da raggiungere l'obiettivo di cedimento previsto inizialmente in progetto.

Anche in termini di differenziale tra cassoni, il valore che si otterrebbe sarebbe di 1.55 cm confrontabile con l'1.8 cm ottenuto nel progetto, vedasi il Doc. Rif. 3.

10. CONCLUSIONI

L'esecuzione del campo prova a mare ha consentito di mettere in luce alcune criticità presenti nella metodologia esecutiva prevista per l'esecuzione dell'area a giorno della Piattaforma.

Tali criticità sono peculiari delle lavorazioni realizzate nel campo prova tant'è che non sono emerse né nel precedente campo prova né durante l'esecuzione dell'area a terra della Piattaforma.

In particolare le criticità emerse riguardano:

1. La necessità di prevedere una compattazione dello strato di imbasamento dei cassoni onde evitare cedimenti parassiti legati al riassesto della struttura del materiale granulare sotto carico;
2. La necessità di ancorare le inclusioni VCC all'interno dello strato rigido di ghiaia "G" al fine di bypassare i sottolivelli a maggiore contenuto limoso presenti al passaggio tra il livello SL e G.

Il primo aspetto è una necessità legata al fatto di avere a che fare con una struttura rigida quale quella del cassone che soffre maggiormente per eventuali cedimenti di assestamento dello scanno di imbasamento rispetto alla soluzione con rilevato in tout-venant.

La parte di Piattaforma realizzata con il rilevato, infatti, riesce a gestire molto meglio detti cedimenti di assestamento che di fatto sono riassorbiti dalla struttura stessa del rilevato.

Per quanto concerne il secondo aspetto, legato alla lunghezza delle VCC, va detto che il fatto che la parte bassa dello strato SL contenesse sottolivelli limosi era già noto. L'aspetto inatteso è stata la modalità con cui tali sottolivelli hanno contribuito al cedimento totale dei cassoni. In particolare l'aliquota di cedimento misurata è stata quasi doppia rispetto al caso di una fondazione diretta quale quella del rilevato.

La breve distanza tra la punta delle VCC ed i livelli limosi e la modalità di trasferimento dei carichi in profondità legata alla presenza delle colonne hanno causato il maggiore cedimento misurato.

È stato numericamente dimostrato che l'unico modo per ridurre tale effetto parassita è allungare le colonne fino ad intestarle nel livello G.

Sulla base delle osservazioni fatte si può dire che aver accoppiato la struttura del cassone alle inclusioni VCC ha messo in evidenza elementi di criticità non osservati per la parte di piattaforma realizzata con rilevato in tout-venant. Va inoltre detto che tali elementi non sarebbero comunque nemmeno rilevabili in una soluzione con rilevato in tout-venant.

Le criticità evidenziate sono comunque eliminabili o quanto meno riducibili seguendo le indicazioni fornite da Menard e prima riepilogate.

Messe in atto dette migliorie si conferma la possibilità di ottenere le prestazioni necessarie in termini di cedimento eseguendo la precarica parziale dei cassoni così come sostenuto nelle fasi di progetto e di approvazione della metodologia VCC.