

La presente memoria tecnica si propone di illustrare il progetto di recupero della Concordia, con particolare riferimento alla progettazione delle piattaforme sottomarine.

Le piattaforme, oltre a costituire il fondale artificiale necessario a supportare il relitto dopo la rotazione, sono anche state utilizzate come struttura di ancoraggio dei cavi che, azionati da martinetti idraulici, hanno consentito di riportare il relitto in posizione verticale.

Alle stesse piattaforme è stato anche affidato il compito di contenere il riempimento sottomarino realizzato lato terra a completamento del piano di appoggio della nave e, da ultimo, quello di contribuire alla stabilizzazione del relitto nel periodo invernale quando le previsioni segnalavano la possibilità di mareggiate anche importanti che poi si sono puntualmente verificate.

*The aim of this technical document is to describe the plans for the recovery of the Concordia, with particular reference to the design of the underwater platforms.*

*The platforms make up the artificial seabed necessary to support the wreck following its rotation, and are also used as the structure for the anchorage of the cables which, controlled by a series of hydraulic jacks, returned the wreck to the vertical position.*

*The platforms also confine the shore side filling, whose purpose is to complete the formation of the supporting surface for the vessel, and help stabilise the wreck during the winter season, for which significant tidal storms at sea were forecast, and did indeed occur.*

## 1. PREMESSA

Il bando di gara internazionale, al quale sono state invitate a rispondere le più importanti società specializzate nel recupero di relitti,



Fig. 1 - La Concordia nelle fasi iniziali della rotazione (16 settembre 2013)

# Progetto di recupero della Concordia

## Piattaforme sottomarine

### *Concordia recovery plan* *Underwater platforms*

Tullio Balestra, Alexandro Dottore,  
Giulia Balestra

richiedeva che il progetto presentato rispondesse a tre requisiti fondamentali: che non fosse prevista alcuna demolizione, nemmeno parziale, sul posto, che le opere necessarie al recupero del relitto fossero eseguite nel massimo rispetto dell'ambiente e della comunità giligiese e che fosse garantito il ripristino integrale del sito nelle condizioni pre-esistenti.

Sulle modalità di esecuzione veniva lasciata ai partecipanti la più ampia libertà di proporre soluzioni tecniche e metodologie operative che ritenessero più idonee per realizzare una operazione di recupero che, date le dimensioni della nave e le particolari condizioni del sito, non aveva precedenti. La nave, parzialmente affondata a poche decine di metri dall'ingresso del porto del Giglio, si trovava infatti reclinata sul fianco destro di 65 gradi e supportata solo da due speroni di roccia tra loro distanti un centinaio di metri.

Il consorzio costituito dalla società statunitense Titan e dall'italiana Micoperi ha partecipato alla gara e si è aggiudicata il lavoro, presentando un progetto di recupero che è stato giudicato il più rispondente ai requisiti di gara.

## 2. IL PROGETTO DI RECUPERO

Il progetto di rimozione, presentato a Londra dal consorzio italo-americano, è nato in tempi strettissimi da un gruppo di lavoro costituito, oltre ai tecnici di Titan e Micoperi, dalla Tecon di Milano, società che da più di 30 anni si occupa di progettazione di strutture in mare, dalla Spline di Venezia, società di ingegneria navale, che, per questa sua specializzazione, si è da subito occupata della progettazione dei cassoni spinta, e dallo studio Ceccarelli di Ravenna, il quale, oltre a contribuire all'idea iniziale, ha poi coordinato le attività di ingegneria a valle dell'acquisizione del contratto.

Gli aspetti geotecnici, particolarmente impegnativi date le caratteristiche del sito, sono stati curati dalla Soil di Milano, mentre le verifiche di resistenza strutturale del relitto nelle varie fasi del recupero

sono state condotte dalla tedesca Overdick di Amburgo e da Cetena di Genova.

Le caratteristiche strutturali dello scafo, progettato per navigare con un'immersione di 8 m, hanno fin da subito escluso la possibilità di rigalleggiare il relitto semplicemente svuotando parzialmente lo scafo, appoggiato su due scogli a 30 metri di profondità. D'altra parte il peso del relitto rendeva non fattibile la sua rimozione senza averlo prima riportato in galleggiamento. Nemmeno l'impiego combinato dei più capaci mezzi oggi disponibili per effettuare sollevamenti in mare sarebbe infatti stata sufficiente a sollevare il relitto.

Da qui la necessità imprescindibile di prevedere la realizzazione di cassoni in numero e dimensioni tali che, una volta collegati alla nave, fossero in grado di fornire la spinta idrostatica necessaria a riportarla in galleggiamento.

La posizione della nave, reclinata come detto di 65 gradi sul fianco destro, e la conseguente impossibilità di inserire corpi galleggianti su quel lato, data la mancanza fisica di spazio tra il fianco della nave e il fondo marino, hanno portato alla conclusione che per prima cosa la nave dovesse essere ruotata in posizione verticale. Una volta ruotata, ci sarebbe stato lo spazio necessario per l'inserimento dei cassoni di spinta anche sul lato destro e quindi ci sarebbero state le condizioni per il rigalleggiamento.

Naturalmente per ruotare un relitto di 300 m di lunghezza con un peso in acqua di circa 35.000 t è necessario disporre sia di una grande capacità di tiro sia di un sistema di ritenuta in grado garantire la necessaria reazione al tiro stesso. Al completamento della rotazione la nave deve poi trovare un piano di appoggio in grado di sostenerla.

La soluzione progettuale vincente è stata ottenuta individuando, per ciascuna funzione necessaria al recupero, la migliore tecnologia disponibile e progettando i vari sistemi in modo che, messi in opera ed utilizzati in modo coordinato, fossero in grado di garantire il risultato voluto.

Le funzioni e i relativi sistemi che costituisco-

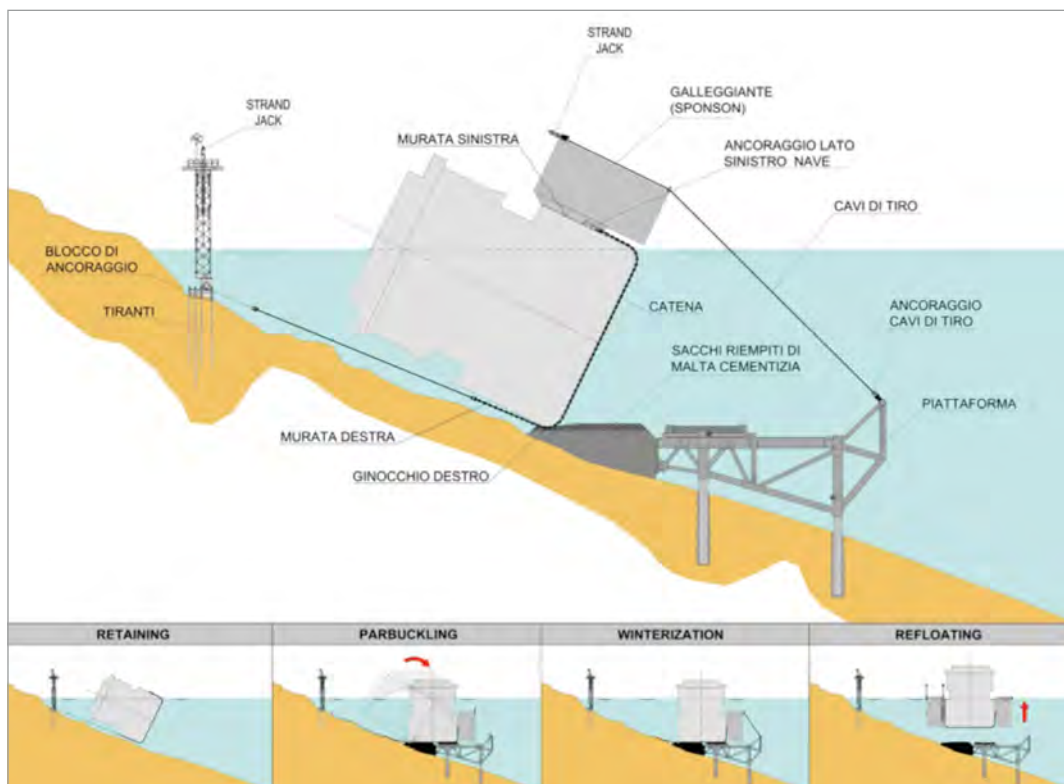


Fig. 2 - Componenti principali di progetto e sequenza delle operazioni

no il progetto per il recupero del relitto possono essere sintetizzati come segue:

- *Sistema di ritenuta*: è costituito da 22 catene collegate alla nave lungo la murata di sinistra e da 11 ancoraggi sottomarini posizionati lato terra. Le catene sono state fatte passare sotto la chiglia nella zona centrale dove il relitto non è a contatto col fondo.

- *Fondale artificiale*: è realizzato con sacchi riempiti di malta cementizia (*grout bags*) posizionati in modo da garantire un supporto uniforme e continuo al ginocchio destro della nave durante e dopo la rotazione.

- *Piattaforme sottomarine*: oltre alla funzione di supportare la nave dopo la rotazione, le piattaforme sono state anche progettate per fornire l'ancoraggio ai 36 cavi di tiro necessari per far ruotare il relitto. I cavi sono tensionati da martinetti idraulici posti in testa ai cassoni di sinistra

- *Galleggianti (sponsons)*: Si tratta di 30 cassoni di spinta (*sponsons*), 15 sul lato destro e 15 sul lato sinistro della nave, e di ulteriori 2 cassoni (*blisters*) posti in corrispondenza della prua. L'insieme dei galleggianti è in grado di fornire la spinta idrostatica necessaria al rigalleggiamento della nave.

La figura 2 mostra i componenti principali del progetto di recupero e la sequenza delle operazioni.

Per ciascuno dei principali componenti del progetto viene data qui di seguito una breve descrizione

## 2.1 Sistema di ritenuta

Il sistema di ritenuta è costituito da 11 blocchi di ancoraggio. Ciascun ancoraggio è fissato al fondo marino tramite tiranti, inseriti e poi cementati in fori pre-perforati in roccia. Una volta tensionati i tiranti di fondazione, ogni blocco di ancoraggio è in grado di fornire una resistenza ad un tiro orizzontale di più di 1000 t. I tiranti di fondazione sono stati realizzati da Trevi, attiva in tutto il mondo nella realizzazione di fondazioni speciali.

Ad ogni ancoraggio sono collegate due linee di ritenuta. Le linee partono dalla murata sinistra della nave, dove, nella zona fuori acqua, sono stati saldati opportuni golfari, e sono costituite, per un primo tratto, da catene da 130 mm di diametro con un carico di rottura di 1500 t. Alle catene sono poi collegati cavi di analoga portata che, passando attraverso i blocchi di ancoraggio, si colle-



Figg. 3a/3b - Torre di ancoraggio e vista murata di sinistra



Fig. 4 - Posa catene

gano a loro volta a dei martinetti idraulici a recupero di fune (strand jack), posizionati su torri collegate ai blocchi di ancoraggio in modo da rimanere fuori acqua. Le figure 3 e 4 mostrano alcune immagini dei componenti sopra descritti.

Gli strand jacks sono lo strumento utilizzato in tutte le fasi del recupero per tensionare cavi o catene e controllare il tiro. Ne sono stati utilizzati 22 per il sistema di ritenuta, 36 per ruotare la nave e ne saranno utilizzati 56 per il collegamento dei cassoni di spinta sul lato destro. Gli *strand jacks* sono stati forniti, installati e operati dalla Fagioli, società leader mondiale nel settore. La consuetudine di Tecon ad utilizzare queste attrezzature per la movimentazione di grosse strutture offshore e quindi la ampiamente sperimentata collaborazione con Fagioli sonostate

certamente un aspetto fondamentale nello sviluppo positivo del progetto.

Una parte del sistema di ritenuta è stata posta in essere fin dall'estate 2012, con lo scopo di prevenire qualsiasi ulteriore scivolamento del relitto verso mare che avrebbe finito col compromettere la fattibilità stessa dell'operazione. Una volta completato, il sistema di ritenuta ha una capacità globale di 11.000 tonnellate ed è stato quindi in grado di prevenire ogni movimento della nave dovuto ai tiri applicati nella fase di rotazione.

## 2.2 Fondale artificiale

Il supporto del relitto a valle della rotazione è costituito da un fondale artificiale realizzato per circa il 35% dai grout bags mentre per il 65% è costituito da 6 piattaforme sottomarine in acciaio. In figura 5 sono evidenziate

in giallo le aree della chiglia supportate dalle piattaforme, in blu quelle supportate dai grout bags e in rosso l'area di contatto con la roccia sottostante.

## 2.3 Sacchi riempiti di malta (Grout bags)

Per poter assicurare l'integrità strutturale dello scafo durante la rotazione era necessario garantire che il ginocchio destro fosse completamente supportato nella parte centrale, tra le due rocce sulle quali il relitto è rimasto appoggiato.

Dato lo spazio esiguo tra lo scafo e il fondo marino, variabile da 0 a 6-7 m, e le conseguenti difficoltà di accesso per mezzi navali di grosse dimensioni, si è deciso di realizzare questo riempimento con sacchi posizionati vuoti sul fondo, in cui iniettare successivamente malta di cemento in pressione. Questa procedura è stata mutuata dai sistemi di protezione dei sealine, per i quali spesso si fa ricorso alla posa di *grout bags*.

I sacchi sono stati tutti dotati di fasce e anelli di sollevamento per consentirne la completa rimozione al termine delle operazioni. Il volume complessivo di questo riempimento è di circa 12.000 m<sup>3</sup>.

## 2.4 Piattaforme

Si tratta di 6 strutture metalliche interamente prefabbricate a terra, costituite da un piano orizzontale supportato da colonne tubolari del diametro di 1600 mm con spessore 65 mm. Le colonne sono inserite in fori da 2 m

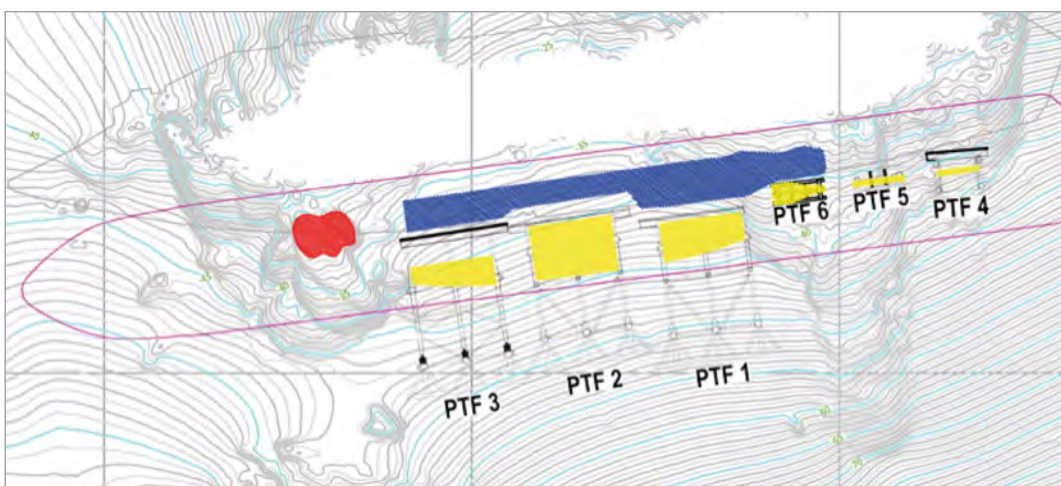


Fig. 5 - Vista dall'alto delle aree di supporto del relitto

di diametro pre-perforati nella roccia affiorante. Dopo il posizionamento, l'intercapedine tra colonna e parete del foro e buona parte del volume interno della colonna sono stati riempiti di malta cementizia, in modo da garantire il corretto trasferimento del carico dalla colonna stessa alla roccia. Al termine delle operazioni di recupero del relitto le piattaforme saranno interamente rimosse tagliando i pali di fondazione immediatamente sopra il fondo del mare.

Le 3 piattaforme più piccole, identificate come piattaforme 4, 5 e 6, sono mostrate in figura 6. Sono posizionate sotto la chiglia della nave nella zona di poppa. Come si evince dalla diversa configurazione strutturale, le piattaforme 5 e 6 hanno la sola funzione di supporto verticale mentre la 4 ha anche la funzione di contenimento della catasta di grout bags disposti in quella zona.

### 3. GALLEGGIANTI

#### 3.1 Cassoni di spinta (*sponsons*)

I cassoni di spinta disposti lungo i fianchi della nave sono dei parallelepipedi in acciaio con base 10,5 m x 11,5 m. Ve ne sono 12 più grandi alti 31,5 m, mentre gli altri 18 sono alti 21,5 m. Sono in grado di fornire una spinta netta totale di circa 70.000 t. Gli undici cassoni centrali di sinistra sono stati installati prima della rotazione (figura 7). Il collegamento dei cassoni alla murata della nave è stato realizzato per mezzo di telai in acciaio saldati al fianco interno del cassone e alla murata stessa della nave. Questi telai sono in grado di trasferire alla nave la spinta idrostatica generata dallo svuotamento dei cassoni che, nel caso dei cassoni più alti, supera le 2500 tonnellate per cassone.

I rimanenti 19 cassoni sono collegati al relitto a rotazione avvenuta utilizzando sistemi di collegamento che non prevedono saldatura. In particolare gli 11 cassoni centrali di destra sono collegati a catene ancorate sul lato sinistro della nave e fatte passare sotto la chiglia. Per buona parte sono le stesse catene già utilizzate come sistema di ritenuta per mettere in sicurezza il relitto e prevenire movimenti durante la rotazione.

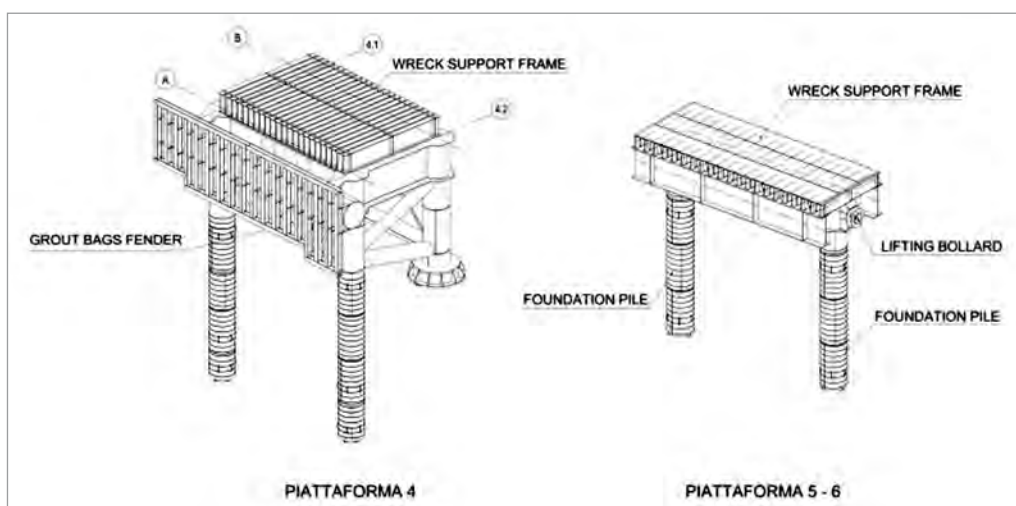


Fig. 6 - Piattaforme 4, 5 e 6

#### 3.2 Blisters

Al fine di ridurre le sollecitazioni nella parte anteriore di scafo sono stati collegati alla prua, prima della rotazione della nave, due ulteriori corpi di spinta gemelli, chiamati blisters, in grado di fornire una spinta idrostatica localizzata permanente di oltre 3000 t.

La progettazione e la costruzione dei blisters sono risultate particolarmente impegnative in quanto il trasferimento allo scafo di una spinta di tale entità ha richiesto di studiare e realizzare una forma che si adattasse perfettamente alla doppia curvatura delle pareti

della prua.

Anche la loro installazione è stata una delle operazioni più difficili dato lo spazio esiguo di manovra dovuto alla presenza del fondale che in certi punti non distava più di mezzo metro dal fondo del blister e le dimensioni dei blisters.

Il collegamento dei blisters alla nave è stato realizzato per mezzo di due operazioni distinte.

La prima operazione è consistita nell'inserimento di tre grossi tubi di ancoraggio del diametro di 2,5 metri (anchoring pipes) in

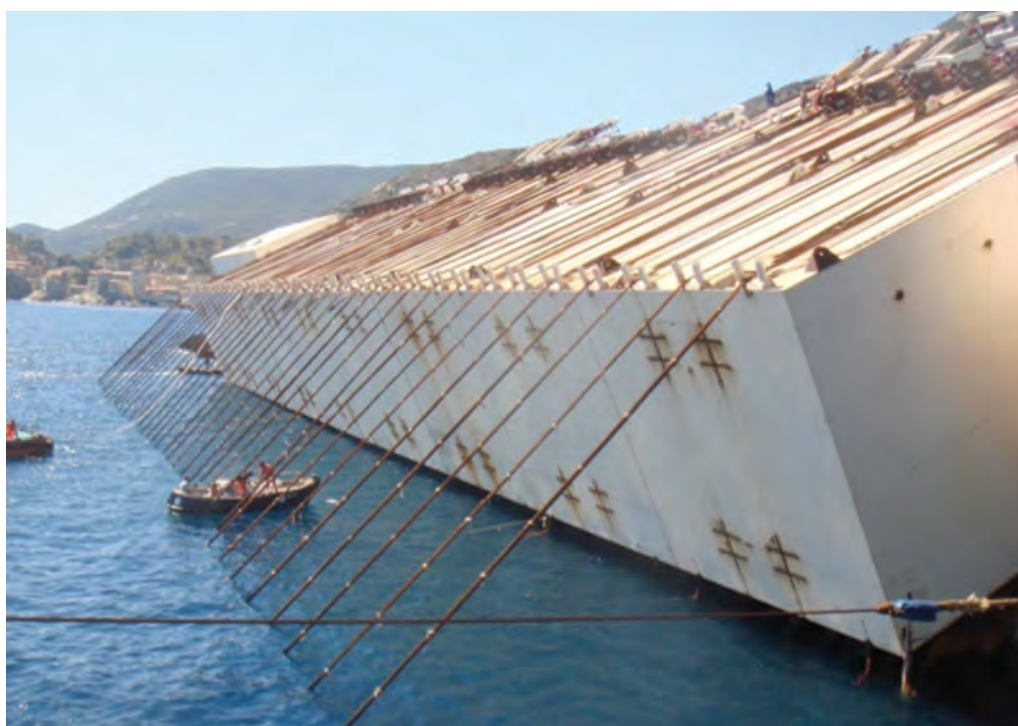


Fig. 7 - Cassoni di spinta e strand jacks

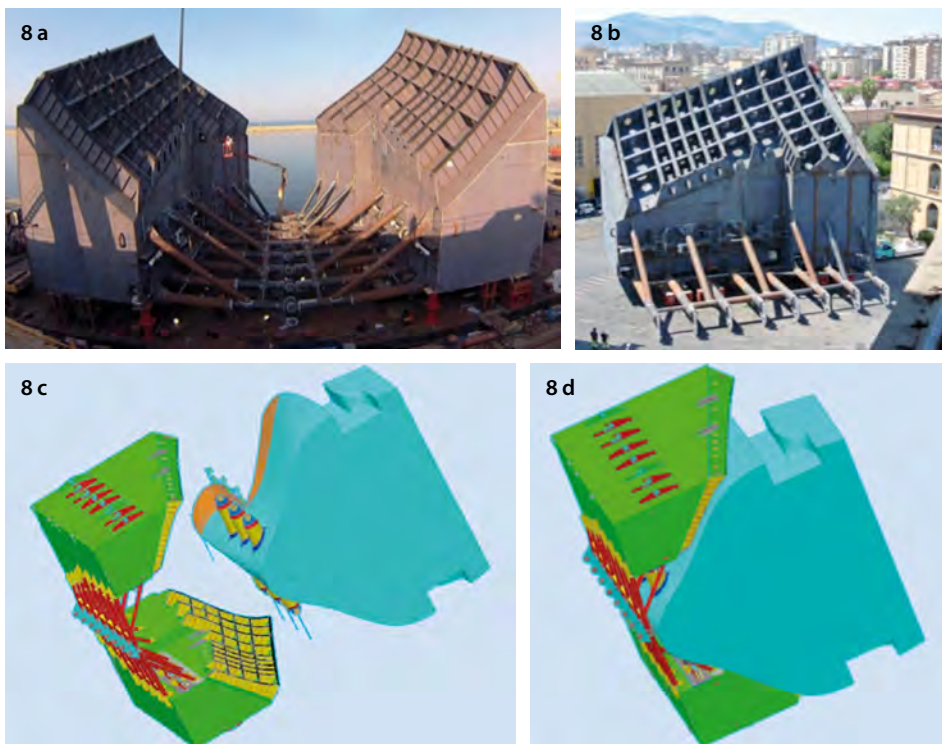


Fig. 8a/b/c/d - Blisters

corrispondenza dei tre tunnel all'interno dei quali erano alloggiate le eliche direzionali. Per il collegamento dei blisters, sono stati previsti alle estremità di ciascun tubo dei

golfari di grosse dimensioni in grado di trasferire ciascuno più di 1000 tonnellate. I blisters sono poi stati calati in acqua e collegati alla gru del pontone M30 della Micoperi

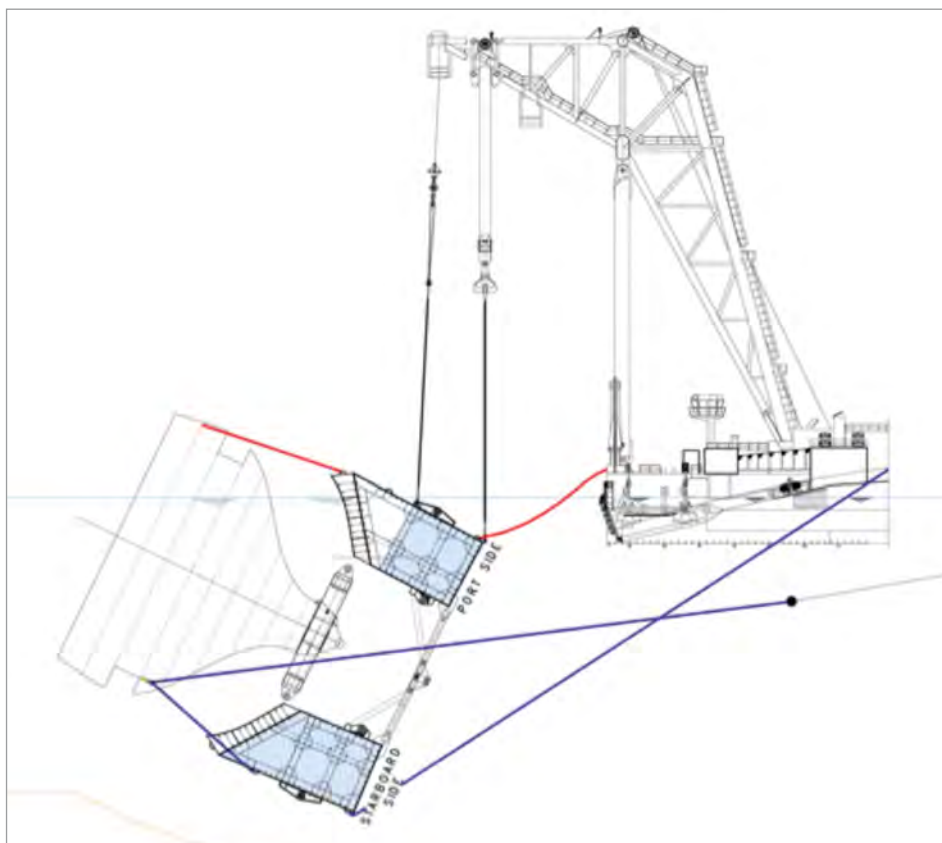


Fig. 9 - Installazione dei blisters

dotato di una capacità di sollevamento di 1300 t. Per consentire l'inserimento dei perni nei golfari il posizionamento dei blisters ha richiesto una grande precisione. La manovra è stata realizzata controllando l'angolo di assetto trasversale attraverso variazioni di zavorra nei compartimenti dei blisters mentre l'immersione veniva contemporaneamente controllata operando con la gru della M30.

Anche per i blisters, come per gli altri cassoni, la progettazione strutturale e funzionale dei volumi è stata eseguita da Spline mentre Tecon ha curato la progettazione strutturale dei telai di collegamento e l'ingegneria di installazione. La costruzione di tutti i corpi di spinta è stata affidata a Fincantieri compresi i blisters, con tolleranze di costruzione particolarmente stringenti.

#### 4. LE PIATTAFORME PRINCIPALI

Alle tre piattaforme principali, posizionate in corrispondenza della zona centrale della nave sono state affidate alcune delle funzioni essenziali per la riuscita della prima fase dell'operazione di recupero e cioè la rotazione della nave fino al raggiungimento di una posizione verticale stabile e adeguatamente supportata.

Le piattaforme sono state progettate da Tecon con il duplice scopo di sostenere, dopo la rotazione, il peso residuo della parte centrale del relitto che solo in parte minoritaria è sostenuto dai grout bags e fornire l'ancoraggio alle 36 linee di tiro previste per la rotazione della nave.

L'essere riusciti ad integrare in un'unica struttura queste due fondamentali funzioni è stato sicuramente un risultato che ha influito favorevolmente nella scelta di questo progetto per il recupero della Concordia.

Tra l'altro la tipologia strutturale proposta, sostanzialmente costituita da un telaio spaziale realizzato con elementi tubolari di grosso diametro, è tra le meno impattanti dal punto di vista ambientale in quanto è particolarmente trasparente e quindi non induce significativi trasporti di sedimenti che comporterebbero variazioni nella morfologia del fondale. Inoltre si tratta di strutture



Fig. 10 - Trasporto della piattaforma 2

totalmente removibili in quanto fondate su pali in acciaio che possono essere tagliati a fondo mare con tecniche di taglio ampiamente sperimentate nella rimozione delle piattaforme petrolifere off-shore.

Una ulteriore funzione affidata a queste piattaforme è quella di costituire il contenimento necessario a garantire la stabilità della catasta di grout bags posti a sostegno del ginocchio destro. Allo scopo le piattaforme sono state completate con un pannello frontale lato terra opportunamente sagomato in funzione dell'andamento del fondale.

Da ultimo le piattaforme sono anche utilizzate per contribuire alla stabilizzazione del relitto nel periodo invernale quando si devono fronteggiare mareggiate di notevole intensità. A questo scopo, dopo la rotazione, sono stati installati al posto delle linee di tiro una serie di elementi tubolari rigidi che collegando la testa dei cassoni con la barra di ancoraggio della piattaforma costituiscono un valido presidio nel prevenire eventuali movimenti del relitto originati dalle forze d'onda.

La complessità e la diversa natura delle forze che le piattaforme sono state chiamate a contrastare nelle diverse fasi del progetto, la varietà geo-morfologica del fondale e i vincoli dimensionali e di peso imposti dalle attrezzature disponibili per il trasporto e installazione, sono solo alcune delle variabili tenute in considerazione da Tecon nel processo iterativo di progettazione.

Il risultato sono tre strutture spaziali in acciaio, tra loro praticamente identiche, ciascuna del peso di circa 1000 t, inscrivibile in un volume di 40x33x21 m e supportate da 5 pali di fondazione.

Due piattaforme principali sono state costruite nel cantiere Rosetti di Ravenna mentre la terza è stata costruita da Cimolai nel cantiere di S. Giorgio di Nogaro. Il trasporto al Giglio e l'installazione sono state effettuate da Titan-Micoperi utilizzando come mezzo principale di sollevamento il pontone M30 della Micoperi equipaggiato con una gru della portata di 1300 t.

#### 4.1 Componenti strutturali della piattaforma

Gli elementi strutturali costitutivi della piattaforma sono identificabili come segue:

- *La struttura principale.* Funge da intermediario per il trasferimento dei carichi esterni ai pali di fondazione. Si tratta di una struttura reticolare spaziale in acciaio S355, costituita da tre telai principali, realizzati con elementi tubolari di diametro compreso tra 600 mm e 1200 mm, di lunghezza complessiva pari a 33 m, disposti parallelamente ad interasse costante di 11,60 m. I telai hanno forma trapezoidale per meglio adattarsi alla conformazione del fondale marino. Il corrente superiore è realizzato con una trave a cassone saldata di altezza 2000 mm. I tre telai principali sono collegati trasversalmente da altrettanti telai secondari aventi funzione di

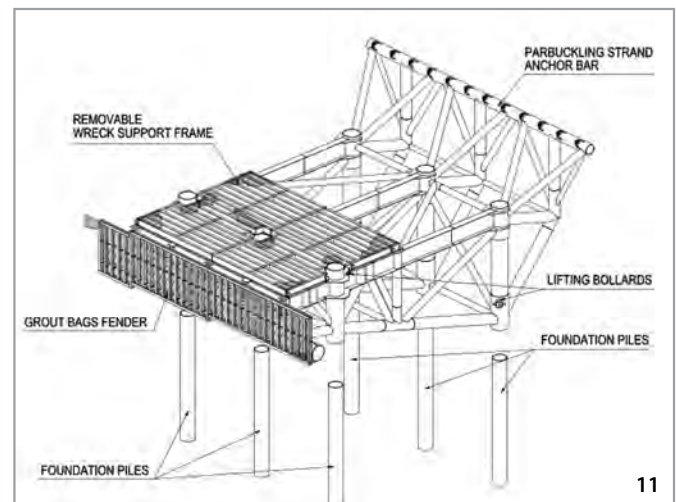
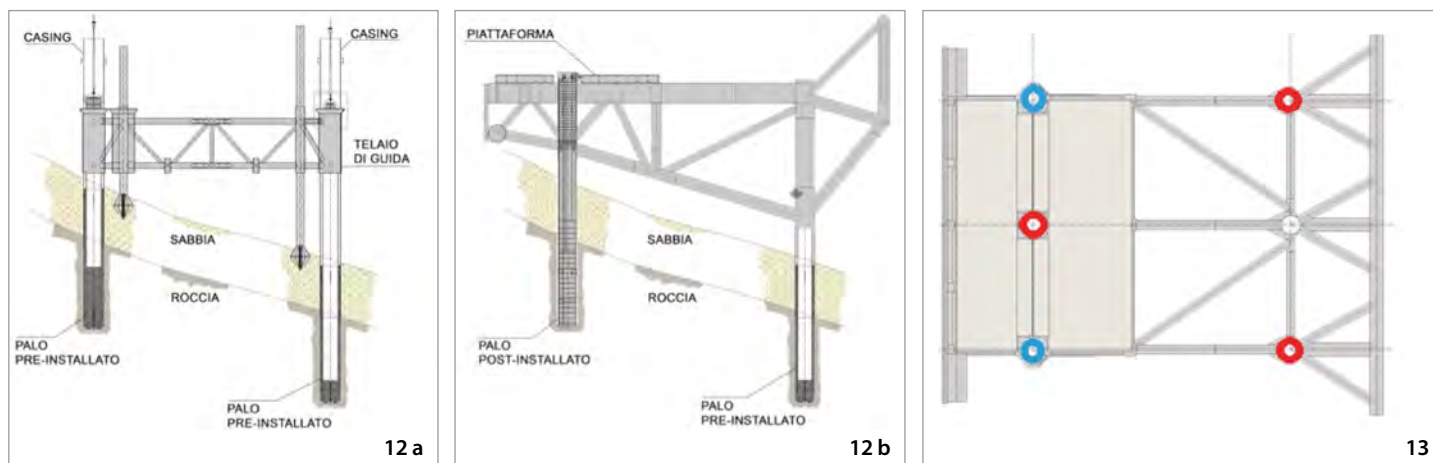


Fig. 11 - Schema generale della piattaforma 2

irrigidimento e ripartizione dei carichi. All'intersezione tra i telai trasversali e longitudinali sono posizionate le colonne anchesse tubolari con diametro interno costante pari a 1800 mm in modo da poter contenere la parte fuori terra dei pali di fondazione che hanno diametro esterno 1600 mm.

- *Il piano di supporto del relitto.* È costituito da due telai affiancati che formano un piano di appoggio di circa 400 m<sup>2</sup>. Strutturalmente sono realizzati con una lamiera piana supportata da travi HEA800. Sulla lamiera piana sono poi stati disposti dei materassi in sabbia in grado di compensare le irregolarità della chiglia. I telai sono semplicemente appoggiati alla struttura principale della piattaforma e vincolati lateralmente mediante apposite piastre di riscontro. Questo sistema di collegamento alla struttura primaria è stato scelto per consentire una eventuale rimozione dei telai anche separata dal resto della piattaforma. Il carico verticale di progetto è stato individuato in 6000 t. La piattaforma è però stata verificata, in condizioni limite, anche per un carico verticale di 9000 t, ammettendo in questa condizione deformazioni plastiche localizzate e ininfluenti sulla stabilità globale. Sui telai è anche applicato un carico orizzontale originato dalle forze di onda e corrente sul relitto trasmesse per attrito. Ai fini delle verifiche strutturali si considerato un carico di 2000 t in direzione trasversale (E-O) e un carico di 1000 t in direzione longitudinale (N-S). Questi telai trasferiscono anche



Figg. 12a/12b - Guide frame con pali pre-installati e vista laterale di una piattaforma principale con i pali installati. Fig. 13 - Pali pre e post-installati

alla struttura sottostante la quota parte di carico orizzontale a questi telai sono anche applicate per attrito le forze orizzontali originate dalle azioni di onda sul relitto.

- *La barra di ancoraggio delle linee di tiro:* A ciascuna delle 3 principali piattaforme sono collegate 12 linee di tiro. L'ancoraggio è costituito da una barra tubolare di diametro 1200 mm sulla quale sono stati predisposti 12 golfari a passo costante 2,9 m. La barra è posizionata all'esterno della piattaforma verso mare, è rialzata di circa 6 m dal piano di appoggio ed è collegata alla piattaforma da un'apposita struttura reticolare. La sua posizione è stata definita in modo da massimizzare il braccio di leva rispetto all'asse di rotazione del relitto che coincide sostanzialmente con il ginocchio destro. La piattaforma è stata verificata per un tiro complessivo di 3900 t corrispondente ad 325 t per ogni linea.

- *Il pannello di confinamento dei grout bags:* Si tratta di un pannello posizionato sul fronte interno della piattaforma con lo scopo di contrastare la spinta attiva che si genera quando sui grout bags grava il peso del relitto. La massima spinta che la piattaforma è chiamata a contrastare è stata valutata in 2300 t.

#### 4.2 Pali di fondazione

Il sito di installazione delle piattaforme è costituito da un vallone, di pendenza variabile tra i 30 e 40 gradi, confinato dalle due rocce che sostengono il relitto. Il terreno è carat-

terizzato da un ricoprimento di materiale sciolto di tipo sabbioso con spessore variabile da 10-12 m nella zona centrale fino ad azzerarsi nelle fasce laterali.

Più in profondità si trovano strati di granito sovrapposti di spessore variabile. E' da notare che al momento delle scelte iniziali di progetto erano fruibili solo informazioni del tutto sommarie relative al sottosuolo, in quanto non erano ancora stati resi disponibili i risultati delle indagini geognostiche, arrivati a progettazione ormai ampiamente avviata.

L'entità dei carichi in gioco nonché il tipo di terreno hanno portato ad adottare un sistema di fondazione costituito da pali in acciaio a punta aperta, del diametro esterno di 1600 mm e spessore di 65 mm, calati in fori pre-perforati del diametro di 2 m e poi cementati. Per ottenere le portate richieste è stato necessario estendere la perforazione in roccia per circa 9 m.

Naturalmente la pre-perforazione dei fori ha richiesto una particolare precisione sia in termini di posizionamento orizzontale sia in termini di verticalità dei fori.

È quindi stato necessario prevedere la costruzione di telai di guida sostenuti da colonne regolabili in altezza, in modo da compensare le variazioni di fondale.

L'esecuzione dei fori necessari ad alloggiare i pali di fondazione è stata realizzata attraverso la sequenza di operazioni illustrata qui di seguito. Essa si riferisce alla perforazione di un foro tipico.

- Preparazione del pontone Micoperi M30, installando un telaio guida fuori bordo e caricando sul ponte tutte le attrezzature necessarie alla perforazione
  - Posizionamento della struttura ausiliaria sul fondo marino e suo livellamento in modo da garantire la verticalità dei tubi guida
  - Inserimento attraverso il tubo guida del casing di perforazione. Si tratta di un tubo del diametro interno poco superiore ai 2 m. Il tubo viene infisso fino a quando raggiunge lo strato roccioso utilizzando battipali a vibrazione
  - Il casing viene prolungato aggiungendo un elemento di tubo dello stesso diametro in modo che la testa venga a trovarsi fuori acqua e sia guidata attraverso il telaio guida installato fuori bordo sulla M30. Naturalmente deve essere garantita la sua assoluta verticalità
  - Sulla testa del casing viene installata la trivella
  - All'interno del casing vengono calati in successione prima la testa di perforazione e poi gli elementi modulari che compongono l'asta di perforazione
  - La perforazione avviene imprimendo la rotazione in testa al casing da parte di una trivella posta fuori acqua. Il materiale di risulta della perforazione viene completamente recuperato e portato in superficie attraverso le stesse aste di perforazione
- Una volta completati i 5 fori, i casings vengono tagliati a livello del fondo marino e tutte le attrezzature di perforazione compresa la

struttura di guida vengono rimosse.

Dei 5 pali che costituiscono la fondazione di ciascuna delle tre piattaforme principali, 3 sono preinstallati (evidenziati in rosso in figura 12) e cementati nei fori di diametro 2 m. I rimanenti 2 (blu in figura) sono stati calati in posizione utilizzando come guida la piattaforma stessa.

Il trasferimento dei carichi dalla piattaforma ai pali è ottenuto cementando l'intercapedine tra palo e colonna. La resistenza a taglio del collegamento è stata aumentata per mezzo di anelli di saldatura (*weld beads*), disposti sulle pareti interne delle colonne e quelle esterne dei pali.

I pali di fondazione così realizzati hanno una portata assiale superiore a 4000 t e una laterale maggiore di 1000 t.

## 5. ANALISI STRUTTURALI E VERIFICHE

Le strutture delle piattaforme sono state verificate in accordo con le normative americane AISC e API che sono le normative più comunemente utilizzate a livello internazionale per la progettazione delle strutture offshore.

Tutte le analisi strutturali globali sono state eseguite in campo elastico lineare utilizzando il programma di analisi strutturale per strutture offshore SACS™, distribuito da Bentley®.

Il programma, orientato alla progettazione di strutture offshore, è in grado di generare automaticamente i carichi di onda e

corrente sulla struttura immersa e dispone di moduli di verifica con i quali si possono eseguire le verifiche strutturali di stabilità e di resistenza degli elementi monodimensionali e le verifiche locali delle giunzioni tubolari. Dispone inoltre di un modulo in grado di simulare correttamente il comportamento non-lineare del sistema palo-terreno utilizzando la tecnica delle sottostrutture. Nel nostro caso questa tecnica è stata utilizzata in modo estensivo essendo il profilo stratigrafico del terreno diverso per ogni singolo palo in quanto diverso è lo spessore dello strato superficiale di materiale sabbioso.

Le strutture sono state modellate mediante elementi prevalentemente monodimensionali.

Le verifiche strutturali sono state eseguite per le più sfavorevoli combinazioni dei carichi elementari di progetto sinteticamente elencati qui di seguito:

- Peso proprio della struttura (DEAD): è il peso strutturale del modello di calcolo opportunamente amplificato per tener conto di eventuali variazioni in corso d'opera.
- Massima spinta dei grout bags ( $F_{grout}$ ): applicata orizzontalmente in corrispondenza del pannello anteriore e valutata in 2300 t, (figura 13).
- Carico verticale operativo: distribuito sul piano di appoggio, corrisponde alla quota parte di peso residuo netto del relitto insistente sulla piattaforma. È valutato

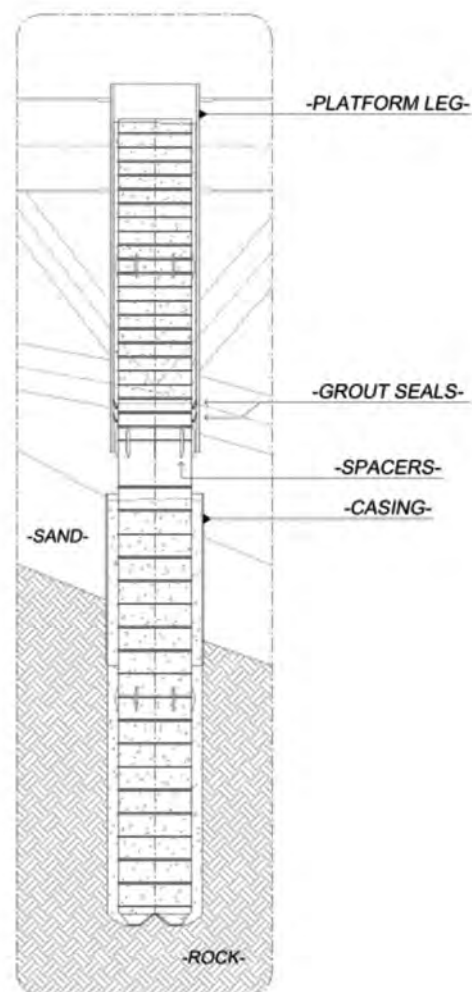


Fig. 14 - Palo di fondazione

in 6000 t ( $Q_{V,OP}$ ). Ciascuna piattaforma è stata inoltre verificata, in condizioni limite, anche per un carico verticale di 9000 t ( $Q_{V,EX}$ ), accettando in questo caso deformazioni plastiche localizzate ma comunque ininfluenti ai fini della stabilità globale, figura 13.

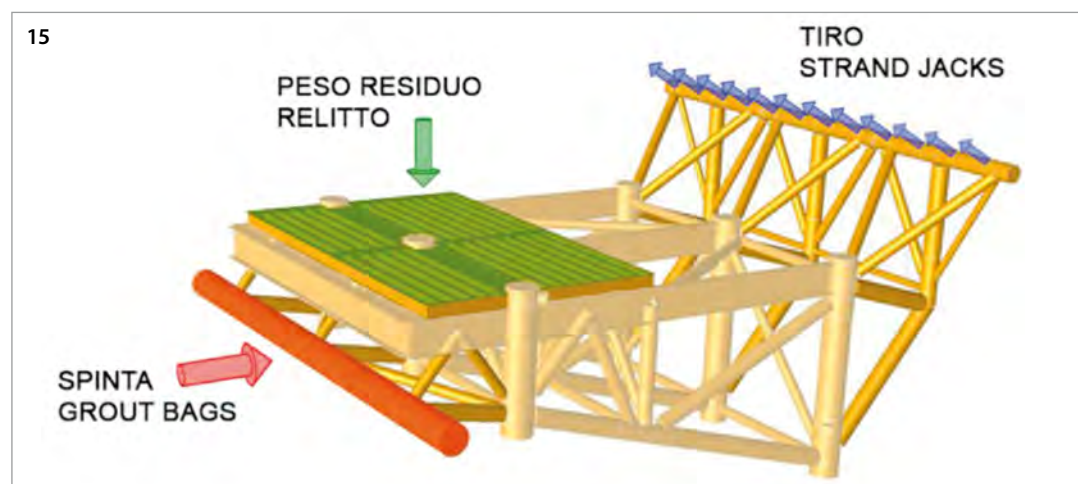


Fig. 15 - Carichi principali

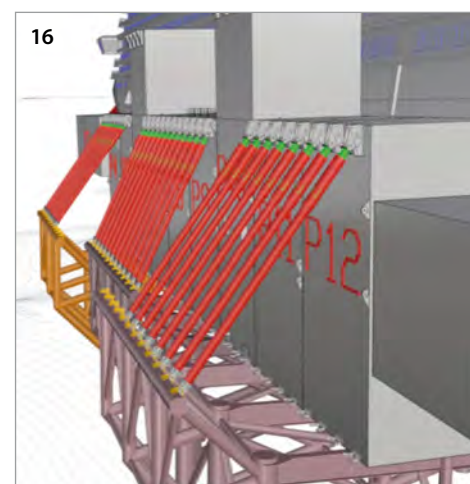


Fig. 16 - Barre di stabilizzazione



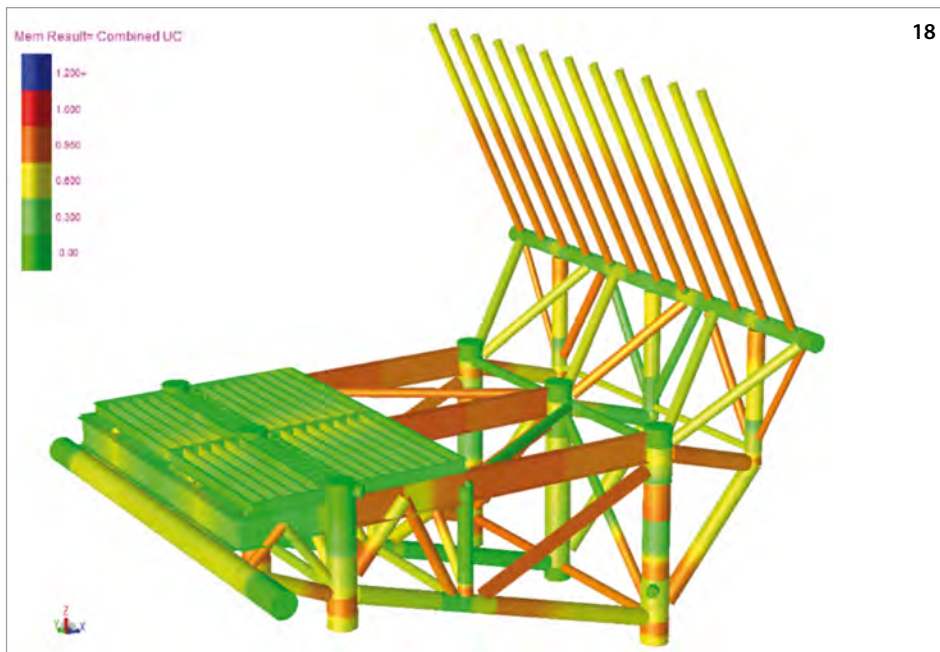
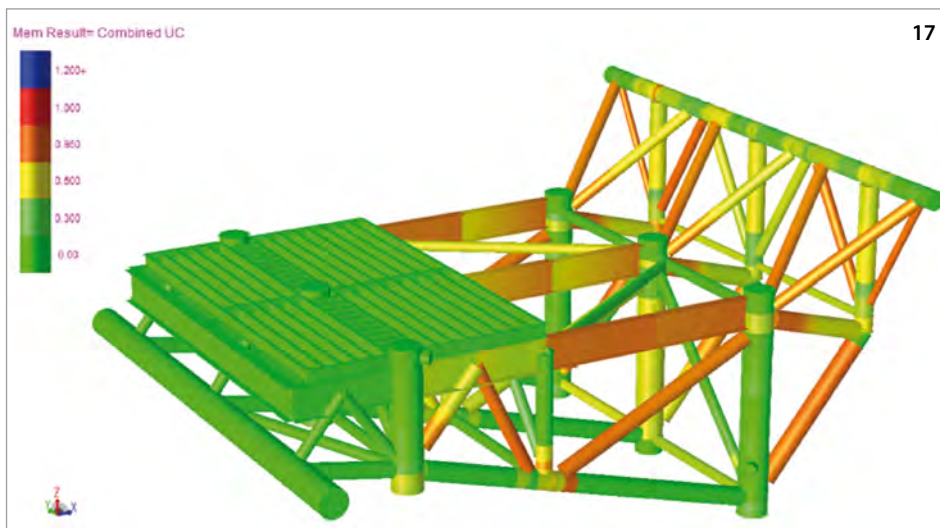


Fig. 17 - Combinazione corrispondente alla fase di inizio rotazione. Fig. 18 - Combinazione corrispondente alla massima spinta verso terra dovuta ad onda al traverso

- Forze di tiro: sono le 12 forze che le linee di tiro operate dagli strand jacks applicano alla barra di ancoraggio in corrispon-

denza dei golfari. Necessarie per attivare la fase iniziale della rotazione sono state stimate complessivamente in 3900 t to-

tali ( $F_{S,ax}$ ), ovvero 325 t per ciascuna linea di tiro.

Per tener conto del possibile disallineamento tra i golfari della piattaforma ed i loro corrispettivi installati sui cassoni è stato considerata anche una componente fuori piano pari al 5% del tiro, figura 13.

- Carico d'onda: derivante dall'azione delle onde sul relitto e sulla stessa piattaforma impattano sullo scafo e sulla piattaforma, calcolato considerando una altezza d'onda significativa pari a 2,50 m. Le forze d'onda impattanti la murata si trasferiscono alla struttura per attrito sul piano di appoggio ( $W_{E-O, sf}$ ) e attraverso le linee di tiro ( $W_{S, ax}$ ). Le forze massime trasferite per attrito sono di circa 2000 t in direzione trasversale (E-O) e 1000 t in direzione longitudinale (N-S), mentre la quota parte trasferita attraverso le linee di tiro è di circa 3600 t. Le forze idrodinamiche agenti sulla piattaforma sono calcolate applicando l'equazione di Morison utilizzando gli opportuni coefficienti di Drag e inerzia ( $W_{E-O, pt}$  e  $W_{N-S, pt}$ ).

Per stabilizzare la nave nel periodo invernale in cui l'altezza di onda significativa può superare i 2.5 m, le linee di tiro sono state sostituite da collegamenti rigidi realizzati con tubi in acciaio (figura 14). La forza trasmessa alla piattaforma da ciascun tubo è stata stimata in 300 t.

Ai fini delle verifiche, i carichi sopra descritti sono stati combinati in due gruppi di combinazioni di carico considerando separatamente i carichi derivanti dalla fase di rota-

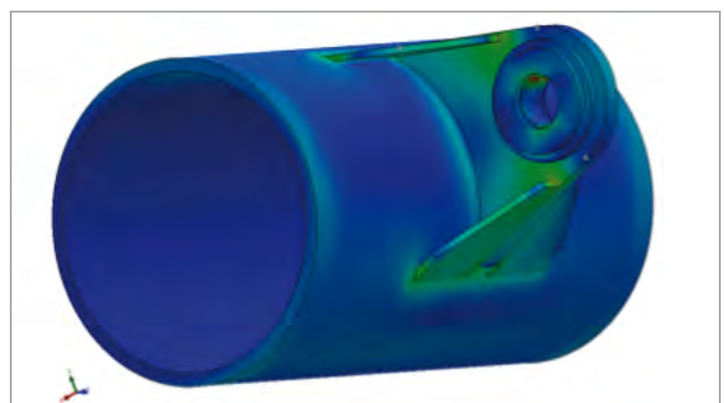
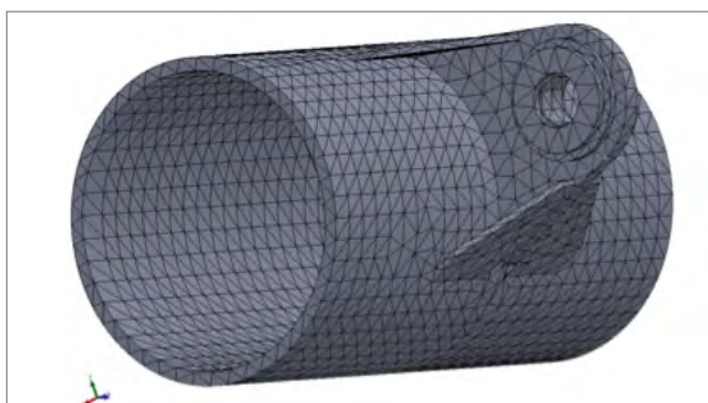


Fig. 19 - Verifica del golfare di collegamento

zione della nave e i carichi derivanti dalle condizioni meteomarine invernali.

La figura 17 mostra il livello di sollecitazione degli elementi strutturali della piattaforma per le combinazioni di carico relative alla rotazione.

In figura 18 sono evidenziati i livelli di sollecitazione degli elementi strutturali della piattaforma per le combinazioni di carico relative alla rotazione. Il modello utilizzato per le analisi e le verifiche strutturali relative alla fase di stabilizzazione invernale è stato implementato inserendo gli elementi tubolari rigidi di connessione tra piattaforma e cassoni di spinta.

Le strutture delle piattaforme sono state dimensionate per resistere non solo alle condizioni operative sopra descritte ma altresì per tutte quelle fasi temporanee tipiche delle costruzioni off-shore quali la movimentazione in cantiere, il caricamento sulla chiatta, il trasporto dal cantiere al sito di installazione, il sollevamento e l'installazione sui pali pre-installati.

Quest'ultima fase ha richiesto una particolare attenzione, data la necessità di mantenere la planarità della piattaforma durante l'abbassamento in acqua, in modo da consentire il corretto ingaggio sui pali. Il risultato è stato raggiunto attraverso una analisi di tipo iterativo per identificare quali elementi tubolari andassero allagati per garantire per mantenere invariata la posizione del centro di gravità anche con la piattaforma interamente immersa.

Le simulazioni della piattaforma nella fase di abbassamento in acqua con il progressivo allagamento degli elementi tubolari sono state eseguite utilizzando il programma Moses, anch'esso distribuito da Bentley®.

Ulteriori verifiche strutturali locali sono state eseguite su modelli a elementi finiti opportunamente predisposti. La figura 19 ne mostra un esempio che si riferisce alla verifica del golfare di collegamento delle linee di tiro utilizzate per la rotazione del relitto.

## 5. CONSUMI DI ACCIAIO

Nella tabella a lato si vuole dare una sinte-

CONSUMI DI ACCIAIO		
Cassoni di spinta ( <i>blisters</i> inclusi)	18000	t
N.6 Piattaforme	4000	t
Pali di fondazione piattaforme	1000	t
Strutture guida per la perforazione ( <i>casings</i> inclusi)	1500	t
Blocchi di ancoraggio e accessori ai sistemi di ritenuta	550	t
Miscellanea (catene incluse)	2500	t
<b>TOTALE</b>	<b>2500</b>	<b>t</b>

tica indicazione sui consumi di acciaio che questo progetto ha richiesto.

## 6. CONSIDERAZIONI FINALI

La partecipazione al progetto di recupero della Concordia è stata ed è per l'autore dell'articolo e per Tecon motivo di grande soddisfazione ed uno stimolo professionale davvero unico.

L'impegno profuso è stato enorme ma la positiva conclusione della rotazione del relitto ci ha ampiamente ripagati di ogni sacrificio.

Di questa opportunità che ci è stata data devo ringraziare prima di tutto i responsabili di progetto di Costa e di Titan-Micoperi che hanno facilitato sempre e senza riserve il lavoro del team di progettazione e poi tutti i colleghi con i quali stiamo condividendo

da più di due anni lo sviluppo del progetto. A Costa va poi anche il ringraziamento per aver autorizzato la pubblicazione di questa memoria.

Un'ultima parola di riconoscenza la devo riservare al gruppo di ingegneri e tecnici di Tecon che hanno seguito e stanno seguendo questo progetto. Molti di loro sono giovani che, con professionalità e passione, hanno contribuito in modo determinante a trasformare un'idea nel progetto vincente per il recupero della Concordia.

**dr. ing. Tullio Balestra,**

*Presidente TECON di Milano, responsabile di progetto*

In collaborazione con:

**dr. ing. Alexandro Dottore**

**dr. ing. Giulia Balestra**

COMBINAZIONI DI CARICO PER LE VERIFICHE RELATIVE ALLA FASE DI ROTAZIONE DELLA NAVE	DESCRIZIONE
$DEAD + F_{Sj,ax} + F_{Sj,opt}$ $DEAD + F_{Sj,ax} - F_{Sj,opt}$	<i>Pre-rotazione</i>
$DEAD + F_{grout} + F_{Sj,ax} + F_{Sj,opt}$ $DEAD + F_{grout} + F_{Sj,ax} + F_{Sj,opt}$	<i>Inizio rotazione</i>
$DEAD + F_{grout}$	<i>Superamento angolo di autorotazione</i>
$DEAD + F_{grout} + Q_{V,OP}$	<i>Termine fase rotazione (condizioni operative)</i>
$DEAD + F_{grout} + Q_{V,OP} + W_{E-O,sf} + W_{N-S,sf} + W_{E-O,pt} + W_{N-S,pt}$ $DEAD + F_{grout} + Q_{V,OP} + W_{E-O,sf} - W_{N-S,sf} + W_{E-O,pt} - W_{N-S,pt}$	<i>Nave ruotata soggetta a carichi meteomarine non invernali</i>

COMBINAZIONI DI CARICO PER LE VERIFICHE RELATIVE ALLE CONDIZIONI INVERNALI	DESCRIZIONE
$DEAD + 1.05 \times F_{grout} + 1.39 \times Q_{V,OP} + W_{E-O,sf} + 1.78 \times W_{E-O,pt} + W_{Sj,ax}$	<i>Massima spinta verso terra dovuta ad onda al traverso</i>
$DEAD + 1.24 \times F_{grout} + 0.63 \times Q_{V,OP} - W_{E-O,sf} - 1.78 \times W_{E-O,pt} - W_{Sj,ax}$	<i>Massima spinta verso mare dovuta ad onda al traverso</i>