

**LA MODULARIZZAZIONE NELL'INDUSTRIA
PETROLCHIMICA - IL PROGETTO STRUTTURALE: DALLE
FASI COSTRUTTIVE ALLE CONDIZIONI OPERATIVE**

**MODULAR SOLUTIONS IN PETROCHEMICAL
FACILITIES THE STRUCTURAL DESIGN FROM
CONSTRUCTION TO OPERATING CONDITIONS**

Francesco Songini, Riccardo De Col, Andrea Teodori
DCRPROGETTI srl
info@dcprogetti.it

ABSTRACT

The structural modularization is often necessary for the construction of industrial plants. This technique allows to build in difficult sites with sustainable cost. A untraditional design approach is applied to this structures to ensure the best performance in all the construction phases and in operating conditions. The need to guarantee the integrity of the equipment during the modules movements makes the transportation the most critical design condition. In this article some design experience are described focalizing the attention on the following phases: load-out, sea-transportation and load-in. The analysis techniques and the structural solution are here explained in order to give a description of the used design approaches.

SOMMARIO

Nell'ambito dell'ingegneria industriale si ricorre sempre più spesso alla "modularizzazione" delle strutture. La necessità di ridurre i costi e di realizzare impianti in località difficili da raggiungere, sia per difficoltà stradali, sia per esigenze di carattere climatico, che spesso limitano a poche settimane il tempo utile per il montaggio, porta alla prefabbricazione spinta di strutture e impianti. Ciò comporta un'analisi delle strutture in ogni loro fase di costruzione: dall'officina al sito di installazione. Elemento dominante diventa la "movimentazione" dell'impianto, che deve avvenire mantenendo integra non solo la struttura ma tutte le componenti impiantistiche contenute in essa. Il caso in esame si riferisce ad un modulo destinato all'industria petrolchimica, analizzato nelle diverse fasi costruttive e soprattutto di movimentazione: trasporto su terra, trasporto marittimo, posizionamento finale e condizioni operative.

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni la sempre maggior richiesta di risorse, ha indirizzato l'industria petrolchimica verso paesi ricchi di materie prime ma poveri di esperienza nel campo della progettazione e della costruzione di impianti e spesso caratterizzati da sistemi infrastrutturali insufficienti. In tali condizioni la tradizionale costruzione "in sito" appare economicamente poco sostenibile, pertanto è divenuto sempre più indispensabile ricorrere a soluzioni modulari prefabbricate. Tale tecnica permette infatti di ovviare a tutti quei problemi relativi al reperimento dei materiali, alla ricerca di manodopera specializzata, al controllo del completo ciclo costruttivo e quindi al raggiungimento degli standard di sicurezza oggi richiesti in un impianto industriale moderno.

L'impianto viene pertanto concepito come un insieme di macro-elementi (moduli), completi in ogni dettaglio, costituenti unità indipendenti e trasportabili.



Fig. 1. Esempio di impianto modulare preassemblato

La tipologia di struttura modulare richiede oltre ad un diverso approccio costruttivo soprattutto un diverso "approccio progettuale". La condizione operativa, che in genere rappresenta la condizione di riferimento per il dimensionamento di una struttura tradizionale, in questo caso diventa solo una, e spesso nemmeno la più gravosa, delle possibili condizioni strutturali in cui i moduli vengono a trovarsi nel periodo che intercorre tra la costruzione in officina, il trasporto e la fase di installazione nel sito finale di produzione.

La movimentazione dei moduli diviene in questa tipologia di strutture la fase dimensionante e spesso richiede la progettazione di tutta una serie di sottostrutture necessarie ad "accompagnare" i moduli durante il loro trasferimento su terra e su mare.

Il presente articolo presenta un caso reale e descrive i criteri e le soluzioni adottate nella progettazione, costruzione e movimentazione di un modulo prefabbricato destinato all'attività estrattiva.

2 LA MOVIMENTAZIONE DI STRUTTURE MODULARI

L'aspetto che differenzia il sistema modulare dal tradizionale è la "fase di trasporto". La movimentazione delle strutture richiede, visti i pesi e i volumi coinvolti, un'attrezzatura non convenzionale. E' probabilmente questa l'unica fase in cui la prefabbricazione pone le principali difficoltà se paragonata ad una realizzazione classica.

Il termine "movimentazione" in realtà raccoglie l'insieme delle fasi necessarie a portare le strutture dal sito di fabbricazione al sito di produzione. Tali fasi sono schematizzabili in quattro tipologie:

- fase di caricamento e installazione (definite anche come load-out / load-in);
- fase di trasporto marittimo (sea-transportation);
- fase di trasporto su terra (road-transportation);
- fase di sollevamento (condizione di lifting);

La loro combinazione dipende dal tipo di modulo e dal tipo di percorso che questo deve seguire per giungere al sito di produzione. L'elemento discriminante in questo caso è rappresentato dalle necessità di trasportare la struttura via mare o via terra. Tale richiesta è legata a tre fattori: le dimensioni della struttura, la posizione e la distanza del luogo di posizionamento.

Le fasi di caricamento e installazione (load-out e load-in) sono in genere legate ad una movimentazione che prevede un trasporto marittimo delle strutture. Rappresentano la prima e l'ultima fase di spostamento del modulo, su tratti relativamente brevi e con velocità molto basse, dovute alla precisione di posizionamento richiesta.

Si definisce "caricamento" (load-out) lo spostamento e il posizionamento della struttura dal sito di costruzione al ponte della bettolina per il successivo trasporto marittimo (sea-transportation).

Installazione (o fase di load-in) è la fase inversa in cui il modulo viene scaricato dalla bettolina e posizionato sul sistema di fondazioni predisposto nel sito di produzione. Gli spostamenti possono avvenire in due modi:

- tramite SPMT (Self Propelled Modular Transporters): rappresenta la metodologia più diffusa e avviene tramite carrelli semoventi in grado di sollevare e trasportare carichi eccezionali mantenendo il piano di supporto orizzontale e stabile anche in presenza di ostacoli o sconnessioni del terreno;
- tramite "skid system": in questo caso la struttura, tramite martinetti idraulici (strand jacks), viene fatta "slittare" direttamente, o tramite "skid shoes", su un sistema di "binari". La soluzione tramite skid system è la più indicata in caso di strutture molto pesanti e/o in caso di terreni con limitate capacità portanti.

La fase di trasporto marittimo (o fluviale) si rende necessaria in presenza di carichi di notevole peso e dimensione, o quando raggiungere i siti di installazione finale richiede percorsi troppo lunghi o troppo accidentati (traffico, ponti, mancanza di strutture viarie adeguate).

Il trasporto su terra rappresenta la metodologia più utilizzata nel caso in cui la struttura sia scomponibile in moduli di limitate dimensioni. In questo caso le distanze percorse possono essere anche notevoli e le velocità di spostamento possono determinare le condizioni più gravose per la struttura in esame.

La fase di sollevamento (lifting) in genere corrisponde alla fase finale di assemblaggio dei moduli di una struttura. In questo caso in fase progettuale particolare attenzione andrà riservata alla corretta geometria del sistema di funi e ai dettagli di aggancio tra queste e la struttura stessa (golfari).

3 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA E DELLE FASI COSTRUTTIVE

Si descrivono le fasi di progettazione relative alla realizzazione di un modulo prefabbricato destinato all'industria petrolchimica il cui sito finale di installazione e produzione corrisponde ad un'isola artificiale posizionata nel mar Caspio.



Fig. 2. Fasi di movimentazione: caricamento del modulo sulla bettolina

Il modulo rappresenta quella che in gergo viene definita una “well-head” ossia una “testa pozzo”. In questo caso l'impianto accoglie contemporaneamente 10 testate con tutti i relativi sistemi di lavorazione, gestione e controllo.

La struttura ha una lunghezza globale di 90.0m e una larghezza variabile compresa tra i 9.7m e i 15.0m del piano superiore, per un'altezza massima di 12.3m ed è composta da tre piani, di cui i primi due realizzati in grigliato e il terzo, il più alto, in lamiera bugnata. Lo schema strutturale prevede dodici telai trasversali controventati tramite controventi concentrici a V, e due allineamenti longitudinali controventati in corrispondenza di due “baie” mediante un sistema a X.

Il peso in condizioni di trasporto è pari a 1600 t, e raggiunge le 2690 t in condizioni operative (comprehensive dei carichi accidentali).

L'obiettivo del progetto è stato quello di realizzare un impianto “completo” in ogni sua parte (strutturale, impiantistica, meccanica, elettrica e strumentale), in grado di essere posizionato ed essere immediatamente operativo senza la necessità di alcuna aggiunta successiva. Tale obiettivo ha quindi richiesto una progettazione molto dettagliata, in cui ogni elemento è stato verificato nelle varie fasi di installazione.

La necessità di movimentare la struttura ha inoltre richiesto la progettazione e costruzione di una serie di sottostrutture accessorie, che verranno descritte di seguito in corrispondenza di ciascuna fase realizzativa.

Le principali configurazioni di analisi del modulo sono quattro: tre relative alla sua movimentazione e una relativa alla condizione operativa. In funzione della loro cronologia, possono essere descritte come:

- fase di “caricamento” (o di “load-out”);
- fase di “trasporto marittimo” (o “sea-transportation”);
- fase di “installazione” (o di “load-in”);
- condizione operativa.

4 FASE DI CARICAMENTO

La fase di “caricamento” ha analizzato la sequenza di operazioni necessarie al trasporto del modulo, tramite carrelli SPMT, sul ponte della bettolina per il successivo trasporto marittimo (sea-transport) dal sito di fabbricazione al sito di produzione.

La geometria trasversale del modulo che, per ragioni impiantistiche, presenta un primo piano ad una quota eccessiva per rappresentare un punto di appoggio per gli SPMT, e la scelta di effettuare l’installazione tramite un sistema di skidding hanno reso necessaria la costruzione di una struttura ausiliaria: la “load-out frame”. Una struttura di appoggio definibile come una sorta di “barella” per il modulo, e che ha rappresentato durante la movimentazione:

- la piattaforma di costruzione del modulo in fase costruttiva;
- l’interfaccia modulo-carrelli (SPMT) durante il caricamento;
- la base di appoggio durante il trasporto via mare;
- il binario di scorrimento nel primo tratto della fase di installazione.

La descrizione evidenzia come tale struttura, pur essendo solamente accessoria al modulo, ne rappresenti il supporto durante tutta la sua realizzazione ed evidenzia come la progettazione di strutture modulari debba sempre tener conto della dipendenza esistente tra le varie fasi di trasporto.

La necessità di far scorrere il modulo durante la fase finale di installazione ha richiesto il posizionamento di uno strato di PTFE (Teflon), in grado di garantire un valore basso del coefficiente di attrito μ , inferiore al valore di 0.3 usato nei calcoli.

Il caricamento rappresenta una condizione temporanea per la struttura, l’intera fase è completata in un periodo di circa sei ore. Un tempo così limitato consente di ridurre i valori di velocità del vento e quindi delle azioni agenti. La breve durata coincide anche con la bassa velocità con cui avviene lo spostamento, determinando valori trascurabili delle forze di inerzia agenti.

Le analisi di “caricamento” sono state condotte considerando due diverse configurazioni del problema:

- una prima configurazione considera la “sola” trave di load-out caricata con i valori derivanti dalle reazioni vincolari della struttura del modulo, analizzata separatamente e vincolata tramite cerniere sferiche;
- la seconda configurazione considera l’insieme costituito da modulo e load-out frame. La connessione tra le due strutture, divise dallo strato di Teflon, è costituita da elementi “non lineari” (NL) svincolati in modo tale da creare una cerniera sferica reagente verticalmente a sola compressione. La validità di tale condizione di vincolo è stata quindi validata, verificando che le azioni orizzontali risultassero inferiori alle forze di attrito generate dalla componente verticale dei NL per un coefficiente di attrito μ valutato pari a 0.25.

In entrambe le configurazioni i carrelli SPMT sono stati posizionati centrandonli sulla verticale del baricentro del sistema e simulandone il vincolo tramite due cerniere sferiche poste ad una distanza reciproca pari alla larghezza dei carrelli. Complessivamente il peso globale movimentato è pari a 1730 t., di cui 1600 t. del modulo e 130 t. relative alla load-out frame, ripartito su 42 punti di appoggio distribuiti su 5 carrelli SPMT, la cui massima reazione verticale è stata valutata in 70 t.

La Fig.3 rappresenta lo schema di carico:

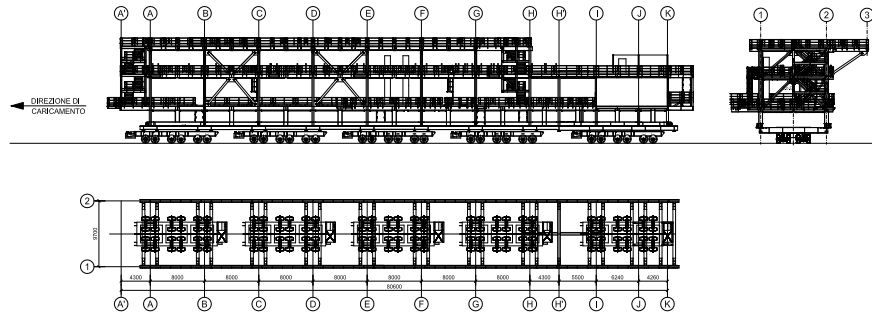


Fig. 3. Fase di caricamento: schema di sopportazione del modulo

La fase di load-out del modulo è stata verificata considerando la possibile “eccentricità trasversale” del carico gravitazionale rispetto alla verticale. Tale eccentricità è stata valutata per tener conto delle incertezze nella posizione dei carichi (macchinari, fasci tubieri, linee elettriche e strumentali) agenti sul modulo.



Fig. 4: Fasi di movimentazione del modulo

L’eccentricità trasversale globale del baricentro è stata quantificata con un valore massimo di ± 0.50 m, pari al 10% della larghezza della struttura. Alla condizione nominale si sono quindi aggiunte altre due condizioni di progetto, corrispondenti alle due diverse posizioni dei carrelli (SPMT) di sollevamento.

L’analisi verifica la struttura simulando eventuali distorsioni indotte dalla presenza di ostacoli lungo il percorso di carico o cedimenti dovuti al malfunzionamento del sistema oleodinamico degli SPMT.

Da un punto di vista operativo l’analisi è stata condotta rimuovendo, secondo una determinata successione, i vincoli tra la loadout frame e i 5 carrelli SPMT, sostituendo il vincolo con la corrispondente reazione vincolare incrementata e ridotta del 10%.

5 FASE DI TRASPORTO MARITTIMO

La fase di trasporto marittimo: rappresenta la fase di trasporto via mare del modulo dal sito di fabbricazione (yard) al sito di produzione.

L'analisi di trasporto marittimo verifica la struttura soggetta alle azioni verticali ed orizzontali dovute alle forze inerziali innescate dal moto ondoso, in particolare dalle accelerazioni di rollio (roll), beccheggio (pitch) e accelerazione verticale (heave) dipendenti dall'area geografica in cui avviene il trasporto e dalle dimensioni della bettolina utilizzata. I valori utilizzati nelle analisi sono riportati nella seguente Tabella 1:

Tabella 1. Valori di accelerazione durante la fase di trasporto

	Val. Angolari	Max. valori di accelerazione [g]		
		a_x	a_y	a_z
Rollio (roll) *	$\pm 25^\circ$		$\pm 0.30g$	$\pm 0.22g$
Beccheggio (pitch) *	$\pm 15^\circ$	$\pm 0.20g$		$\pm 0.33g$
Acc. Verticale (Heave)	--			$\pm 0.20g$

(*) i valori angolari di rollio e beccheggio corrispondono ad un periodo T di 10 sec.

La verifica non interessa solamente il modulo, ma anche le sottostrutture che consentono l'appoggio di questo al ponte (deck) dell'imbarcazione, in particolare la load-out frame e le strutture di collegamento quali le travi di sostegno ("grillage") e i sistemi di controventatura ("seafastening").

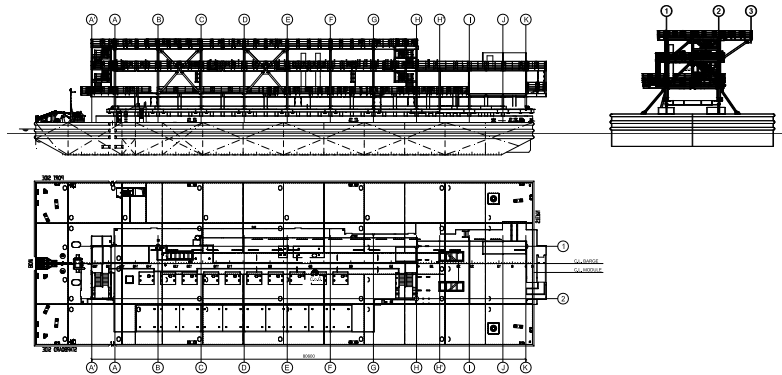


Fig. 5. Fase di trasporto marittimo: sistema di vincolo modulo-bettolina

La particolarità del trasporto marittimo del modulo nel caso in esame è dovuta alla fase successiva: come già descritto durante il caricamento tra il modulo e la load-out frame è stato inserito uno strato di teflon, necessario per facilitare la fase di installazione. La presenza di questo strato determina una condizione di vincolo "monolatero" lungo tutta la superficie di scorrimento.

Tale condizione ha richiesto un'analisi non lineare tramite elementi reagenti solamente a compressione in corrispondenza delle colonne del modulo.

Le dimensioni della bettolina necessarie ad accogliere il modulo, nell'ordine dei 100 m., hanno richiesto la verifica del modulo e delle sottostrutture anche nei confronti delle deformazioni indotte dalla bettolina stessa: deformazioni di "Hogging & Sagging". Le configurazioni rappresentano le due condizioni estreme in cui la massima onda di progetto interessa la mezzeria (hogging) o le estremità della bettolina (sagging).

6 FASE DI INSTALLAZIONE

La fase di installazione rappresenta la fase di scarico del modulo dalla bettolina e il suo posizionamento finale nel sito di produzione. La fase di installazione da un punto di vista strutturale è quella che determina le sollecitazioni massime nella struttura del modulo.

Nel caso in esame la possibilità di utilizzare gli SPMT per la discesa del modulo dalla bettolina è stata scartata in quanto il terreno, trovandosi su di un'isola artificiale, non presenta le caratteristiche meccaniche necessarie per sostenere la pressione delle ruote e le lavorazioni necessarie per ottenere una corretta compattazione risulterebbero troppo onerose. Per queste ragioni la fase di installazione è avvenuta tramite un'operazione di "skidding".

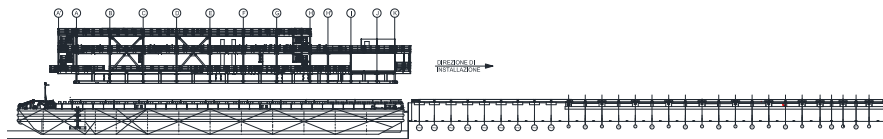


Fig. 6. Fase di installazione: schema di sopportazione del modulo

Il modulo viene quindi "tirato" tramite due martinetti idraulici (strand-jacks) ed è fatto "slittare" su un sistema di travi poste come binario e vincolate alle fondazioni fisse e temporanee predisposte sul sito di produzione. La fase di load-in ha quindi richiesto la progettazione del sistema di "binari" che, al contempo, rappresenta un sistema temporaneo necessario allo spostamento e, in corrispondenza delle colonne del modulo, rappresenta il sistema di piastre di base tra il modulo e le fondazioni permanenti.

La fase di installazione da un punto di vista strutturale è quella che individua il maggior numero di configurazioni statiche per il modulo e richiede la contemporanea verifica di tutte le sottostrutture costruite per la sua movimentazione: sistema di binari sulla terra ferma, load-out frame e travi di grillage sulla bettolina.

La definizione dei carichi trasmessi dal sistema di tiro (martinetti idraulici/strand-jacks) al modulo e dal modulo al "sistema-binario" richiede la considerazione in fase progettuale di più aspetti legati alla geometria del sistema e alle possibili incertezze in fase di installazione. In particolare si è tenuto conto:

- delle azioni di attrito tra il modulo e le strutture di sostegno; in questa fase si valuta un valore μ del coefficiente di attrito pari a 0.3, tipico per il contatto acciaio-acciaio;
- dell'eccentricità tra la linea di tiro dei martinetti e la superficie di scorrimento;
- delle azioni trasversali dovute all'effetto del vento e al contatto con le guide laterali posizionate sulla trave di scorrimento del modulo;
- le modalità di funzionamento dei martinetti; gli strand-jacks non operano "in continuo" durante l'installazione, ma alternano "fasi di tiro" con "fasi di richiamo" del martinetto steso.

Il carico derivante dal modulo e agente sul binario corrisponde ad un carico-mobile. In questo caso però le componenti mobili del carico sono 5: 3 corrispondenti alle reazioni (orizzontali e verticali) vincolari delle cerniere sferiche poste alla base dei telai trasversali del modulo e 2 corrispondenti ai momenti indotti dalla eccentricità tra gli assi della trave-pattino e della trave-binario.

Tali considerazioni hanno individuato due condizioni di carico relative a ciascuna fase di funzionamento del martinetto ("tiro" o "richiamo") e definite per ciascun telaio trasversale del modulo. Schematicamente tali condizioni sono rappresentate in Fig. 7:

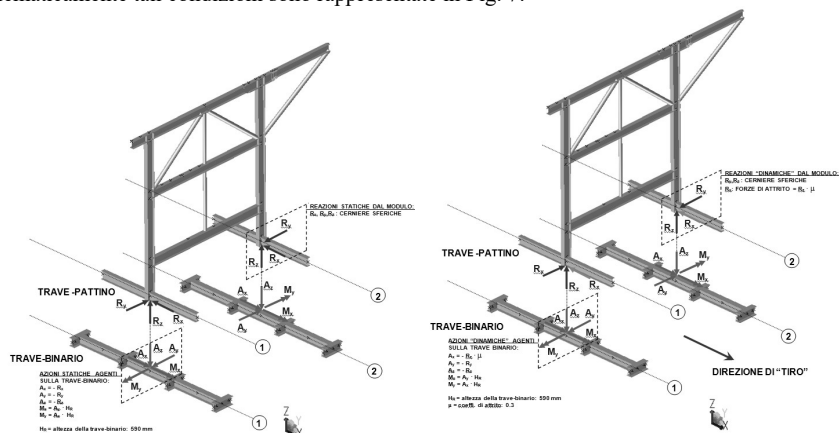


Fig. 7. Condizioni Statiche-Dinamiche durante l'installazione

Il peso globale del modulo, pari a 1600 t, nella condizione più sfavorevole (con una eccentricità trasversale di -0.5 m) individua una ripartizione di 930 e 670 t. sui due allineamenti longitudinali della struttura. Considerando un valore del coefficiente di attrito μ pari a 0.3, si ottengono valori di tiro "nominali" pari a 280 e 200 t per ciascun martinetto.

I valori così ottenuti sono stati utilizzati per dimensionare i golfari posto alle estremità della "trave-pattino" e per quantificare le azioni trasversali trasferite dal sistema di guida del modulo alla trave-binario.

Le analisi considerano sia la configurazione geometrica del sistema nel suo complesso, sia il tempo in cui tale operazione avviene, nell'ordine delle 24 ore. In particolare si è tenuto conto:

- del moto relativo tra la bettolina e la terra ferma, in modo da poter valutare un livello massimo ammissibile di altezza d'onda durante la fase di discesa del modulo, parametro necessario per individuare le corrette condizioni meteo-marine per iniziare l'operazione;
- delle imperfezioni di costruzione e montaggio della trave-binario. Imperfezioni che porterebbero ad uno scostamento notevole tra le condizioni di vincolo reali e quelle ideali;
- delle condizioni di tiro da parte dei martinetti idraulici: possibili scostamenti dei valori reali di tiro dai valori di progetto potrebbero determinare delle eccentricità del modulo sul sistema di scorrimento, pertanto si è reso necessario studiare un sistema di guide laterali capaci di vincolare trasversalmente il modulo al sistema di "travi binario".

7 CONCLUSIONI

La "modularizzazione" degli impianti mira ad ovviare molti dei problemi di una costruzione tradizionale ("stick-built), in particolare quelli relativi alla logistica di cantiere. Al contrario i costi e i tempi di progettazione tendono ad aumentare; in particolare la fase di movimentazione richiede uno studio più dettagliato. La differenza tra il maggior costo di progettazione e il risparmio in termini di organizzazione di cantiere e di tempi di montaggio, evidenzia la prefabbricazione di impianti come una valida ed economica soluzione.

RIFERIMENTI

- [1] GL Noble Denton: "Guidelines for load-outs", 0013/ND – Giugno 2013
- [2] GL Noble Denton: "Guidelines for marine transportations", 0030/ND – Giugno 2013
- [3] GL Noble Denton: "Guidelines for marine lifting & lowering operations", 0027/ND – Giugno 2013
- [4] "Advances in plant modularization: from the state of art to emerging challenges", Mauro Mancini - Pubblicazione ANIMP (2014)
- [5] Le immagini sono state ottenute dal video pubblicato alla pagina web: www.youtube.com/watch?v=hgXYIFemi2o

PAROLE CHIAVE

Prefabbricazione, load-out, load-in, road-transportations, sea-transportations, lifting, modulo.