

Paper n° 12

DA POTENZIALE RELITTO AD INFRASTRUTTURA: UNA SECONDA VITA PER LE CONDOTTE DISMESSE

Autori

Angelo Cabra¹, Ermanno Iocco², Marco Principi³, Luigi Eusebi⁴, Marco Buoncompagni⁵

¹ Snam Rete Gas S.p.A. - Senior Manager Lavori Impianti

² Saipem S.p.A. - Technical Manager per Progetti Offshore

³ Saipem S.p.A. - Technical Manager per Progetti Offshore

⁴ Techfem S.p.A. - Plants & Pipeline Process Services BU Director

⁵ Techfem S.p.A. - Plants & Pipeline Process Services Manager

1. INTRODUZIONE

Il progetto FSRU Ravenna riguarda le opere necessarie all'installazione di un mezzo navale tipo FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) in corrispondenza del pontile offshore Petra al largo di Punta Marina (Ravenna) e il collegamento a terra con la Rete Nazionale Gasdotti.

Nell'ambito del progetto, gli oleodotti sottomarini PIR dismessi, costituiti da due condotte parallele a doppio tubo pipe-in-pipe con diametro interno DN 550 ed esterno DN 700 (lunghezza di circa 8,5 km l'una ed installate negli anni '80), sono state riutilizzate come tubi portacavo per due cavi sottomarini, uno di controllo remoto in fibra ottica (TLC) e l'altro di alimentazione elettrica di media tensione (MT) a servizio del terminale marino (nella fig. 1 sono mostrate le opere a mare del progetto).

Il lavoro sopra descritto è uno dei tiri di cavi dentro condotti più lungo di sempre.

2. STORIA E DATI DELLE EX LINEE PIR

La piattaforma offshore PETRA, situata al largo della località Punta Marina di Ravenna, era collegata a terra mediante due condotte di scarico PIR aventi un diametro interno DN 550 (22") e diametro esterno DN 700 (28").

Le condotte furono posate nel 1985 da SAIPEM su progetto Snamprogetti.

Tale sistema di condotte sottomarine faceva parte di un impianto più complesso adibito allo scarico e trasporto di olio combustibile dalla piattaforma a mare, utilizzata per attracco delle petroliere, fino ai depositi della Società Oleodotti Nord-Est (SONE), nei pressi dell'area portuale di Ravenna.

L'impianto suddetto era composto da due condotte parallele, che costituivano un circuito ad anello chiuso, lato mare sull'isola di scarico e lato terra all'interno del deposito della Società Oleodotti Nord-Est.

Il circuito era tale da permettere sia il riscaldamento delle linee con olio leggero prima dello scarico, sia lo spiazzamento del prodotto pesante scaricato dalle petroliere.

L'anello chiuso consentiva il controllo e la pulizia delle tubazioni tramite pig inviati e ricevuti direttamente a terra.

Le condotte PIR sono composte da barre a doppio tubo formate da un tubo portante interno DN 550 (22") e da un tubo camicia esterno DN 700 (28"). Tali tubi sono assemblati concentricamente mediante applicazione alle estremità della barra di due raccordi speciali di connessione, chiamati comunemente giunti speciali (vedi fig. 2.1 a-b).

Le principali caratteristiche geometriche e dimensionali delle condotte PIR a mare sono qui di seguito elencate:

- | | |
|--|----------------------------------|
| • n° 2 condotte parallele a doppio tubo: | DN 22"/28" |
| • interasse delle linee interasse (da progetto): | 10 m |
| • lunghezza linee: | 2 x 8550 m |
| • rivestimento anticorrosivo: | 3LPE sul tubo camicia 28" (3 mm) |
| • protezione catodica: | mediante anodi sacrificali |
| • spessore appesantimento di gunita: | vedi Tab. 2.1 |

PK (m)	Lunghezza tratto appesantito (m)	Spessore calcestruzzo (mm)	Peso residuo in acqua (kg/m)	Peso medio in aria (kg/m)
0-2.6	2 x 2600	75	120	720
2.6 – 8.55	2 x 5950	65	90	690

Tabella 2.1 – Caratteristiche dell'appesantimento

Stato delle condotte al Momento dell'Inizio delle Operazioni di Installazione dei cavi sottomarini

Nell'ambito del progetto FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti, le condotte sottomarine sono state scollegate dalla piattaforma PETRA a mare, riempite d'acqua e chiuse.

Lato terra, le condotte sono state sezionate in corrispondenza della cosiddetta Area Ex-Sarom posta in prossimità della linea di costa a Punta Marina (RA) (fig. 4.11 e fig. 5.12)

3. CARATTERISTICHE CAVI MEDIA TENSIONE E FIBRE OTTICHE

Le caratteristiche dei cavi TLC e MT destinati a essere infilati all'interno rispettivamente nelle condotte PIR Nord e PIR Sud sono riassunte nella tab. 3.1. I cavi sono stati forniti e prodotti dalla ditta Tratos Cavi SpA.

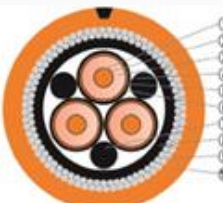
<u>Tipo di cavo</u>	 Tubetto acciaio INOX tamponato Guaina HD PE Nastratura antiriflesso Riempitivo HD PE Armatura fili acciaio galvanizzato Nastratura WB Guaina esterna HDPE	 1. CONDUTTORE TAMPONATO 2. SEMICONDUTTORE INTERNO 3. ISOLANTE 4. SEMICONDUTTORE ESTERNO 5. SCHERMO 6. GUAINA SEMICONDUTTIVA 7. RIEMPITIVO 8. GUAINA INTERNA HDPE 9. ARMATURA DOPPIO STRATO 10. GUAINA ESTERNA HDPE
	<u>Cavo Fibra ottica Sottomarino</u> <u>SM fiber. 48 fibre</u> <u>ITU-T G652D.</u> <u>Doppia armatura.</u>	<u>Cavo Media tensione Sottomarino</u> <u>(3 x 95mm² - 12/20 kV).</u> <u>Doppia armatura.</u>
<u>Diametro esterno (OD)</u>	<u>25 mm</u>	<u>102,4 mm</u>
<u>Lunghezza finale</u>	<u>8800 m circa</u>	<u>8800 m circa</u>
<u>Min. raggio di curvatura in fase di installazione</u>	<u>≥ 500 mm</u>	<u>≥ 730 mm</u>
<u>Tiro max. ammissibile per raggio di curvatura della condotta = 8,7m</u>	<u>≤ 10 Tons</u>	<u>≤ 95 Tons</u>
<u>Peso in aria (in acqua)</u>	<u>1,16 kg/m (0,66 kg/m)</u>	<u>19,66 kg/m (11,22 kg/m)</u>

Tabella 3.1 - Caratteristiche dei cavi installati

3. METODOLOGIA ESECUTIVA

In vista del futuro collegamento con cavo media tensione e cavo in fibra ottica della FSRU con le infrastrutture di terra, si è pensato fin da subito di cogliere l'opportunità di utilizzare le due linee esistenti PIR per ospitare i suddetti cavi ottenendo non solo un beneficio ambientale immediato evitandone la posa sul fondale marino, ma anche riqualificando le due tubazioni che sono state reinserite in un ciclo industriale virtuoso.

3.1 – Lancio della messaggera con pig

In previsione dell'installazione dei cavi MT e TLC all'interno delle condotte PIR, è stato valutato necessario effettuare il passaggio di un cavo messaggero, per tutta la lunghezza del tratto di condotta di 8,6 km, possibilmente in tratta unica, opportunamente dimensionato per le operazioni di tiro dei cavi.

3.2 – Tiro dei cavi

La sequenza di tiro a terra dei cavi è stata vincolata dal cronoprogramma di completamento delle attività di costruzione onshore e offshore e dalle caratteristiche dei macchinari disponibili sul mercato per riavvolgere le funi messaggera.

Si è quindi stabilito di recuperare da terra le funi messaggera tramite un argano a fune (cabestano) passante composto da due serie di pulegge impennate su due bozzelli ad asse verticale e azionati da motori idraulici (fig. 5.14).

L'infilaggio dei cavi nelle linee PIR doveva quindi avvenire dall'estremità opposta in prossimità della piattaforma PETRA: là avrebbe stazionato una nave di installazione equipaggiata con i macchinari atti a sbobinare in maniera controllata i reel recanti a bordo i cavi TLC e MT e assicurarne il varo in acqua in maniera controllata (fig. 5.17).

La progettazione dei componenti di collegamento tra funi messaggere e cavi (il cosiddetto “rigging di tiro”) ha conciliato la massimizzazione della capacità di tiro e la riduzione degli ingombri, dettata dal diametro interno della condotta guida. Infine, l’attenzione dei progettisti si è concentrata sulle misure di monitoraggio dei parametri di tiro e a stabilire un efficace protocollo di comunicazione e di coordinamento tra i team di installazione siti rispettivamente a terra e a mare. Una volta completato il tiro nelle condotte PIR, si è proceduto alle operazioni di pull-in in piattaforma e collegamento dei cavi agli impianti situati a terra e sulla piattaforma a mare.

4. TIRO DELLE MESSAGGERE

Sono state studiate due ipotesi sulla base dello stato delle condotte:

- a. in preservazione con aria o azoto si prevedeva l’avanzamento di un pig speciale trainante il cavo messaggero, spinto da aria compressa secca. Sul terminale opposto, un sistema di scarico dell’aria per evitare un aumento di pressione in fronte al pig;
- b. in preservazione con acqua: si prevedeva l’avanzamento di un pig speciale trainante il cavo messaggero, spinto da acqua. Sul terminale opposto, un sistema a loop chiuso, con bypass temporaneo lato mare tra le due condotte PIR per recupero dell’acqua spiazzata dal pig.

Con l’ipotesi a) si è cercato di migliorare l’attività e di renderla ulteriormente ecosostenibile andando a studiare dei pig con delle valvole di ritorno integrate nel loro corpo in modo da ridurre il volume d’acqua da collettare e smaltire. Questa soluzione considerava un avanzamento dei pig con aria compressa e a step. Ogni qualche centinaio di metri era prevista una fermata del pig con conseguente deflusso dell’acqua dal fronte pig al retro pig, mediante le valvole di ritegno contenute nel pig.

Tuttavia, per il timore di un possibile malfunzionamento delle valvole di ritegno installate sul corpo del pig a causa di eventuali impurità contenute all’interno della condotta, si è deciso di applicare l’ipotesi b).

Le condotte sono dunque state allagate ed è stato installato il bypass temporaneo, lato mare, tra le due.

Una piccola quantità d’acqua era stoccata in un serbatoio lato terra; delle pompe la prelevavano per far avanzare il pig lungo una delle due condotte. L’acqua spiazzata dal pig veniva convogliata nell’altra condotta grazie al bypass lato mare e poi trasferita nel medesimo serbatoio lato terra a cui erano collegate le pompe creando un loop.

4.1 Metodologia del tiro delle messaggere

La metodologia selezionata per il tiro della messaggera prevede che un pig, spinto ad acqua, appositamente progettato per lo scopo, traini il cavo da terra verso mare fino all’arrivo nell’estremità opposta della condotta. Questa operazione deve essere applicata ad entrambe le linee.

Lato mare le due condotte devono essere chiuse mediante speciali tappi (plug) da DN 550 (22”), pari al diametro interno delle condotte, e collegate da una manichetta DN 100 (4”) lunga ca. 22 m. Queste attività devono essere svolte da sommozzatori.

A terra sono installate le apparecchiature per spingere il pig e la messaggera: filtri, serbatoio di calma, pompe, tubazioni, manichette e strumentazione.

Si crea così un circuito chiuso attraverso il quale l’acqua pompata da terra per spingere il pig ricircola e non viene scaricata in mare. La fig. 4.1 mostra schematicamente il circuito per il traino della messaggera nella linea PIR SUD, il ricircolo dell’acqua attraverso la linea PIR NORD e anche il premistoppa dentro il quale scorre la messaggera.

4.2 - Selezione della messaggera

In previsione dell’installazione dei cavi MT e TLC all’interno delle condotte PIR è stato necessario effettuare il passaggio del cavo messaggero mediante lancio di pig spinti con acqua di mare. I pig sono stati progettati per essere in grado di trasportare delle funi messaggere sintetiche.

Queste ultime sono state selezionate sulla base di:

- miglior rapporto possibile tra carico di trazione a rottura e il peso lineare,
- possibilità di essere fornite in un unico spezzone di 8,8 km,
- una adeguata resistenza all’abrasione.

Per tali ragioni la scelta è ricaduta su funi in polietilene a elevatissimo peso molecolare (UHMPE) con rivestimento anti-abrasione in maglia di poliestere, che possono essere trainate dalla sola forza di tiro del pig grazie al loro peso neutro in acqua.

La fune per il tiro a terra del cavo TLC (Ø 20mm e MBL di 270 kN) è stata selezionata per avere un MBL (Minimo carico di rottura) almeno doppio rispetto al carico a rottura del cavo medesimo.

La taglia della fune per il tiro a terra del Cavo MT (Ø 42 mm e MBL di 1280 kN) è stata scelta in base alla dimensione delle gole delle pulegge del “cabestano” e al diametro minimo di avvolgimento della fune attorno ad esse.

Per entrambe le misure di funi sono stati acquistati anche spezzoni per effettuare prove di abrasione, di tenuta del premistoppa e di slittamento tra le pulegge “cabestano”.

4.3 - Dimensionamento e test dei pig, premistoppa, messaggera e tappi

Per il tiro della messaggera è stato selezionato un pig 22'' di tipo bi-direzionale con dischi in poliuretano ad alta tenuta e corpo in acciaio, equipaggiato con un disco di calibrazione intelligente per verificare che le linee PIR non abbiano difetti interni e un trasmettitore elettromagnetico per il suo rilevamento. Il disco di calibrazione intelligente funziona come un normale disco di calibrazione, ma è anche dotato di un filo di interruzione a conduzione elettrica che consente al trasmettitore collegato di monitorare lo stato del disco di calibrazione e di segnalarlo a distanza.

Il pig è stato dimensionato per resistere ad una forza di tiro massima (dovuta alla messaggera) di 10 tonnellate.

La fig. 4.2 mostra il pig con il grillo da 10.5 tons (elemento n. 6) sul quale deve essere fissata l'estremità della messaggera.

La fig. 4.3 illustra la flangia cieca 22'' da installare sulle teste di lancio del pig dotata di un premistoppa che deve essere dimensionato per una pressione minima di 4,3 barg corrispondente alla pressione dovuta alla forza di tiro massima della messaggera più le perdite di carico del pig e del circuito.

La fig. 4.3 riguarda la testa di lancio pig sulla quale deve essere installata la flangia con il premistoppa (fig. 4.3).

La fig. 4.4 mostra il tappo da installare nelle estremità a mare delle linee PIR. Il tappo è dotato di una valvola di isolamento e di un giunto a martello per il collegamento con la manichetta per chiudere il circuito. Esso deve essere infilato dentro la linea dai sommozzatori, con l'aiuto della gru della nave di supporto, e poi vanno azionate le morse sulla circonferenza per garantire la tenuta alla pressione.

Presso le sedi dei fornitori sono stati svolti i test di accettazione (Factory Acceptance Test) prima della consegna dei materiali.

I test condotti su pig, premistoppa e messaggera hanno avuto come obiettivi:

- 1- dimostrare che i pig fossero in grado di tirare la messaggera per almeno 8,5 km senza fermarsi e senza che la pressione massima di pompaggio causasse l'inversione dei dischi di tenuta (che avrebbe comportato la fermata del pig per bypass dell'acqua);
- 2- assicurarsi che il premistoppa installato sulla flangia cieca della testa di lancio garantisse una tenuta adeguata alla massima pressione di 4,3 barg corrispondente alla forza di tiro di 10 tonnellate;
- 3- valutare l'usura del premistoppa alla fine del tiro di 8,5 km di messaggera.

L'esito dei test è stato positivo. Nelle fig. 4.5 e 4.6 sono mostrati il banco di prova utilizzato e il pig, la configurazione finale del premistoppa (fig. 4.7) e il suo stato di usura dopo un tiro di 8,5 km (fig. 4.8).

I test condotti sui tappi di 22'' hanno avuto l'obiettivo di dimostrare la tenuta del tappo quando installato e attivato in un tubo da 22''. Le fig. 4.9 e 4.10 mostrano il tappo prima di essere infilato e durate il test di tenuta condotto a 15 barg per 15 minuti.

4.4 - Risultati delle attività di lancio della messaggera

Gli impianti temporanei per il tiro delle messaggere sono stati installati a Punta Marina nell'area Ex Sarom (area di cantiere a terra e zona di arrivo delle condotte a terra): nella fig. 4.11 si può osservare l'area fotografata dal drone.

Il lancio della messaggera nella linea PIR NORD (e ricircolo acqua attraverso la linea PIR SUD) si è svolto tra il 3 e 4 novembre 2024. La velocità media del pig è stata di 0,09 m/s (portata 77 m³/h), la pressione massima di pompaggio, raggiunta alla fine del tiro, è stata di 1,9 barg e l'acqua di mare aveva una temperatura di ca. 18°C.

Il lancio della messaggera nella linea PIR SUD (e ricircolo acqua attraverso la linea PIR NORD) si è svolto tra il 9 e 10 novembre 2024. La velocità media del pig è stata di 0,06 m/s (portata 51 m³/h), la pressione massima di pompaggio di 1,7 barg, raggiunta alla fine del tiro, l'acqua di mare aveva una temperatura di ca. 17°C.

L'arrivo del pig in fondo alle linee PIR è stato evidenziato, per entrambe, dall'azzeramento della portata e da un aumento repentino della pressione dovuto all'effetto "tappo" del pig. A questo punto il sommozzatore ha estratto il tappo e da terra è ripreso il pompaggio per spingere il pig appena fuori dalla linea; quindi, ha scollegato la messaggera dal pig e l'ha collegata al tappo che è stato di nuovo infilato nella linea.

Nella linea PIR SUD, si è provveduto a infilare la messaggera da Ø42 mm, adibita al tiro del cavo di MT, tirandola tramite la messaggera da Ø20 mm stesa nella condotta.

Alla fine delle operazioni entrambe le messaggere sono installate nelle linee PIR pronte per il tiro dei cavi.

Le figure 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 illustrano alcune fasi delle operazioni appena descritte.

5. TIRO DEI CAVI DI FIBRA OTTICA E DI MEDIA TENSIONE

5.1 - Determinazione delle forze di tiro ammissibili

Il primo obiettivo dell'analisi di installazione è stata la valutazione del tiro massimo applicabile dalla stazione di tiro a terra senza mettere a rischio l'integrità dei cavi, delle funi di tiro (messaggere) e degli elementi che li connettono. La rottura di un componente del cosiddetto "rigging" di tiro avrebbe infatti significato la perdita del cavo all'interno della

condotta guida, l'impossibilità di concludere l'installazione e il rischio di non poter più recuperare la lunghezza già infilata. Per il calcolo del tiro massimo applicabile sono stati utilizzati i fattori di sicurezza raccomandati dalla normativa DNV-ST-N001 di riferimento.

La limitazione più stringente era legata al passaggio attraverso le curve di risalita delle condotte nell'area Ex-Sarom. Per questo si è provveduto a sostituire le curve originali, di piccolo raggio e angolo molto pronunciato, con curve di raggio 8,7 m e angolo di 17°.

Si è poi determinato il limite legato alla resistenza meccanica dei componenti del rigging di tiro (fig. 5.1).

I valori ammissibili di tiro massimo istantaneo sono stati validati da prove di trazione: per ciascuna tipologia di cavo è stato distrutto un prototipo composto da uno spezzone di cavo impiombato in una testa di tiro identica a quella usata in campo.

5.2 Analisi di simulazione del tiro del cavo da terra

Le forze di tiro sono state calcolate partendo da un'analisi a elementi finiti con software commerciale ORCAFLEX. Tale metodologia di analisi prevede una prima fase di modellazione delle condotte tramite l'interpolazione dei punti rilevati tramite survey geofisica e i dati risalenti all'epoca della costruzione delle linee (c.d. libro tubi), ottenendo un andamento delle condotte con raggio di curvatura > 400 m (fig. 5.2).

Successivamente si è modellato il contatto del cavo sulle pareti del tubo e sono state effettuate le simulazioni di tiro lavorando sulla variazione di attrito e predisponendo le dovute sensitività

I valori di tiro ottenuti dalle simulazioni sono stati confrontati con quelli ammissibili di tiro massimo istantaneo, ridotto dall'applicazione dei coefficienti consigliato dalla normativa DNV ST N001. I valori nominali ammissibili così calcolati contengono un margine di sicurezza rispetto all'aumento della tensione di tiro in condizioni reali, causato da eventuali discontinuità localizzate nel tubo o ad altri fattori non adeguatamente valutati in fase di analisi.

5.2.1 Risultati analisi di simulazione

La simulazione del tiro a terra del cavo TLC ha considerato che la tensione al cabestano, al momento dell'arrivo della terminazione del cavo nell'area ex-Sarom, rimanesse sempre inferiore al valore nominale ammissibile anche con un coefficiente di attrito di 0,5. Tuttavia, per il cavo MT, la simulazione ha indicato che la tensione al cabestano avrebbe superato il valore nominale ammissibile per coefficienti di attrito tra cavo e condotta superiori a 0,3.

La mitigazione di questo rischio ha previsto l'approvvigionamento di galleggianti a bracciale, da allacciare al cavo MT per neutralizzarne parzialmente il peso sommerso e conseguentemente ridurre la forza di attrito.

Per monitorare in fase di installazione le tensioni di tiro è stato sviluppato un abaco contenente le curve calcolate per diverse combinazioni di fattori di attrito, per descrivere l'evoluzione delle tensioni in funzione della lunghezza di cavo MT inserito nella condotta PIR.

Questo strumento è concepito per supportare l'installatore nella decisione tempestiva dell'azione da intraprendere sull'eventuale montaggio dei galleggianti e ridurre il numero alla quantità strettamente necessaria. Infatti, il montaggio di un numero di galleggianti inutilmente elevato rallenterebbe eccessivamente le operazioni di tiro a terra e moltiplicherebbe il rischio di avere un galleggiante assemblato male che si andrebbe a slacciare e a rimanere incastrato nella condotta.

5.3 Test di attrito su spezzoni di tubo

Sono stati realizzati test preliminari per caratterizzare i coefficienti di attrito statico tra la condotta PIR e il cavo MT, anche considerando il caso in cui questo fosse stato equipaggiato con boe di alleggerimento. Le prove sono state effettuate utilizzando uno spezzone di condotta PIR rimosso dall'area della piattaforma PETRA in una fase iniziale del progetto.

Un tratto di condotta PIR di circa 10 metri è stato predisposto su un banco di prova (fig. 5.4). Le estremità della condotta sono state sigillate con piastre per consentire il parziale allagamento, simulando le reali condizioni di esercizio (fig. 5.5a e 5.5b). Per riprodurre il cavo MT è stato impiegato, come elemento mobile, un tubo in HDPE di 100 mm di diametro (fig. 5.6), sigillato alle estremità e collegato a una fune sintetica, senza e con galleggianti installati (fig. 5.3 e 5.7). Il sistema è stato trainato manualmente, con rilevazione del valore di tiro al primo movimento tramite dinamometro (fig. 5.5b).

Sono state identificate cinque configurazioni di prova del campione di tiro. Per ciascuna configurazione è stata inserita nel tubo una diversa quantità di sabbia, opportunamente calcolata per replicare il peso sommerso del cavo MT in assenza o in presenza delle boe di alleggerimento.

I risultati hanno evidenziato una variabilità del coefficiente di attrito statico tra 0,21 e 0,38, con un valore "best estimate" 0,33 (fig. 5.9).

5.4 – Survey geofisica e visive sulle condotte PIR

Pur rimanendo interrate le linee esistenti PIR, sono state eseguite alcune survey ispettive (MBES, SBP) e videoispezioni del fondale per verificare lo stato di interramento e di integrità delle condotte.

È stata analizzata la sezione di corridoio di condotte PIR, con un'estensione di circa 200 metri lineari, a sud delle adiacenti aree oggetto di dragaggio.

Le survey hanno confermato le profondità di posa e l'integrità delle condotte.

5.5 Analisi di simulazione del varo da parte della nave di installazione

Durante la fase di ingegneria si è ricorsi alla modellazione del varo tramite il software di simulazione dinamica Orcaflex, per ottimizzare la posizione e l'orientamento della nave di installazione dei cavi e per massimizzare le condizioni meteomarine accettabili per eseguire il varo senza rischi per l'integrità del cavo.

La simulazione ha ricevuto come dati input il modello dinamico del cavo e il modello idrodinamico della nave di installazione. Eccitando il sistema con i periodi e le ampiezze del moto ondoso e le correnti previste nell'area della piattaforma PETRA, sono state identificate condizioni meteomarine massime con cui si vanni a soddisfare contemporaneamente le seguenti condizioni:

- rispetto del raggio minimo di curvatura (MBR) in tutte le sezioni del cavo interessate al varo;
- tensione massima di rilascio entro il limite di slittamento del cavo dentro al tensionatore;
- catenaria associata alla tensione minima sufficientemente tesa per non interferire con altri oggetti già sul fondo e per limitare il tratto di cavo che striscia sul fondo col rischio di trascinare fango e detriti dentro la condotta guida;
- catenaria associata alla tensione massima che evita di piegare il cavo nel contatto con il quadrante superiore dell'imboccatura della condotta guida quando l'offset della nave rispetto alla posizione nominale è massimo.

Le simulazioni sono state ripetute per differenti distanze della nave di installazione rispetto all'imbocco della condotta guida e diversi angoli di provenienza delle onde e delle correnti (fig. 5.9).

5.5.1 Risultati dell'analisi di simulazione

Partendo dai dati meteomarini dell'area della piattaforma PETRA si è compreso che l'orientamento migliore della prua della nave posa cavi in relazione alle direzioni dei moti ondosi prevalenti è 120° N. La distanza ottimale tra l'uscita del cavo dallo scivolo di varo e il punto di imbocco nella condotta è di 90 m per il cavo MT e 55 m per il cavo TLC.

Sono state infine analizzate le posizioni di sicurezza in cui la nave di installazione avrebbe potuto disporsi durante il passaggio di una perturbazione riuscendo a mantenere il cavo collegato. Il taglio del cavo per abbandonare l'area avrebbe infatti significato il fallimento dell'operazione

5.6 Interventi su condotte PIR propedeutici al tiro dei cavi – lato terra

Le linee esistenti PIR sono state tagliate nell'area del cantiere Ex-Sarom in Punta Marina di Ravenna per sostituire le vecchie curve di risalita all'interno dell'impianto con nuovi tronchetti di collegamento. La finalità dell'intervento è stata ridurre i raggi di curvatura e direzionare l'uscita delle linee PIR verso le attrezzature di tiro riducendo i picchi di tensione al cabestano di tiro e rispettando gli spazi di cantiere disponibili. I nuovi spool di raccordo sono caratterizzati dall'avere curve con raggio e angolo il più ampio possibile. Per massimizzare la levigatezza, ridurre l'attrito localizzato e i rischi di abrasione delle funi durante il tiro, le pareti interne delle nuove curve sono state rivestite con coating epossidico rinforzato.

L'intervento si è articolato nelle seguenti fasi (si vedano le fig. 5.10, 5.11 e 5.12):

1. scavo effettuato nell'immediata prossimità e al di sotto del muro perimetrale dell'area Ex-Sarom (lato mare), finalizzato alla messa a giorno delle condotte PIR;
2. allestimento di un cantiere temporaneo finalizzato al taglio delle due condotte PIR e alla saldatura di nuove curve di risalita. La sicurezza dello scavo è stata garantita tramite l'utilizzo di well point e palancole;
3. escavazione di una rampa di tiro con inclinazione 1:6 di dimensioni approssimative di 6 m x 4 m x 4 m, per raccordare altimetricamente la bocca di uscita delle condotte PIR posta a circa 3 m (sopra top tubo) sotto il piano di calpestio;
4. taglio delle condotte alla radice delle curve di risalita presso il muro perimetrale e nuova intestatura dei tubi;
5. varo, posizionamento e saldatura di un nuovo spool di risalita in acciaio al carbonio per ciascuna condotta PIR, al fine di raccordarlo al profilo della rampa di tiro del cavo TLC e del cavo MT.

5.7 Interventi su condotte PIR propedeutici al tiro dei cavi – lato mare

Sulle condotte PIR lato mare, sono state inserite delle guide metalliche (bellmouth) per facilitare l'ingresso della testa dei cavi (fig. 5.13). In aggiunta, un geotessuto è stato installato all'uscita degli imbocchi delle linee PIR per evitare eccessive campate dei cavi.

5.8 Cantiere a terra

Il cantiere a terra è composto da un argano di tiro, un cabestano e delle rulliere adatte a facilitare il più possibile l'ingresso dei cavi nel cantiere. (fig. 5.12)

Nella fig. 5.14 in primo piano il cabestano per il tiro della messaggera. Sullo sfondo la bobina montata sull'argano idraulico per recuperare la fune e il cursore "lever winder" montato su sollevatore telescopico per guidare il riavvolgimento della fune. La fig. 5.15 mostra la rulliera verticale per guidare la risalita della fune di tiro. Sullo sfondo il cabestano e l'argano per il recupero della fune.

5.9 Dimensionamento e assetto nave offshore per tiro cavi

Saipem ha impiegato un Multi Service Vessel per la campagna di installazione offshore. Sulla sua coperta sono stati posizionati i dispositivi per rilasciare entrambi i cavi (fig. 5.17) da mare verso terra in maniera controllata:

- verricello per lo sbobinamento del cavo TLC (fig. 5.18b);
- Reel hub Drive per lo sbobinamento del Cavo MT. (fig. 5.18c);
- tensionatore per il rilascio controllato del cavo (fig. 5.18a);
- scivolo verticale di varo (overboarding chute) e scivolo orizzontale (deck arch) (fig. 5.20).

La buona pratica nell'installazione dei cavi consiglia di implementare un layout delle attrezzature sul ponte della nave che minimizzi i cambi di direzione del cavo, raccordati tramite curve quanto più possibile ampie e aperte.

Infatti, una sezione di cavo che viene tirata e curvata in successione secondo direzioni differenti è esposta al rischio di accumulare uno stress residuo di torsione. In un normale varo su fondale aperto, il cavo può rilasciare la torsione residua assumendo una giacitura debolmente ondulata. Il tiro in condotta invece non consente deformazioni trasversali, per cui si espone il cavo al rischio di incoccamento. Si tratta di un fenomeno di instabilità localizzata per cui il cavo si ritorce su sé stesso, causando danni potenzialmente catastrofici nel proseguo del tiro.

Il routing adottato sul ponte della nave posa cavi per guidare l'ingresso in acqua dei cavi ha previsto una curva orizzontale ("deck arch") e uno scivolo verticale ("overboarding chute"), entrambi a forma di arco di circonferenza. Le rampe delle due strutture sono state realizzate con rulli, riducendo lo stress concentrato che si sarebbe verificato strisciando il cavo contro una superficie in lamiera (fig. 5.16).

Monitoraggio del varo dei cavi

Una chiave del successo è stata il continuo monitoraggio dei seguenti fattori abilitanti dell'installazione:

- lato terra: tensione con cui la fune messaggera viene riavvolta dall'argano. Si è utilizzato un tensiometro "RLM - Running Line Monitor" (fig. 5.19), un dispositivo costituito da un telaio metallico che si appende alla fune di tiro con 2 pulegge folli e una puleggia strumentata. Una volta assicurato al suolo con delle cargo straps, il RLM misura la tensione della fune, la distanza e la velocità del suo scorrimento e li comunica via wi-fi all'unità di output collocata nel box di comando delle operazioni.
- Lato mare: la tensione di rilascio del cavo da parte del tensionatore è stata monitorata in due modalità indipendenti tra loro. Oltre alla lettura del valore mostrato sul display del tensionatore si è infatti osservato l'angolo di uscita del cavo dallo scivolo di varo (fig. 5.20), sulla cui sponda erano state dipinte 2 bande. Esse indicavano le catenarie corrispondenti alla tensione di varo minima e massima, determinate con le analisi di simulazione dinamica. Questo feedback ha permesso di aggiustare in tempo reale la forza di ritenuta che il tensionatore a bordo del mezzo posa cavi ha opposto alla forza di trazione proveniente da terra.
- Osservazione della sezione sommersa di cavo (fig. 5.21a, b). Si è ovviato ai problemi di torbidità del fondale tramite un ecoscandaglio capace di ricostruire la geometria tridimensionale della catenaria del cavo e degli oggetti presenti sul fondo. Inoltre, un ROV di osservazione ha presidiato il punto di ingresso del cavo all'interno della condotta. Entrambi gli strumenti sono stati dispiegati da un barchino di appoggio.
- Durante il tiro del cavo MT, la consultazione continuo dell'abaco (vedi par 5.2.1) ha consentito di effettuare una proiezione accurata delle tensioni che si sarebbero manifestate durante tutto l'avanzamento del cavo nella condotta in funzione dell'attrito effettivamente rilevato.
- Allestimento di un servizio puntuale di previsioni meteo per identificare una finestra meteo favorevole che garantisse condizioni stabili per una durata sufficiente per completare il tiro.
- Utilizzo di canali ridondanti (radio, telefono e internet) per la comunicazione tra i team a mare e a terra e lo streaming delle telecamere piazzate a presidiare i punti fondamentali della catena di tiro.

5.11 - Risultati delle attività di tiro del cavo TLC

Il tiro a terra del cavo TLC è stato effettuato tra il 25 e il 26 novembre 2024 per un tempo di esecuzione totale di 22 ore e 46 minuti. Sono stati varati circa 8500 m di cavo

I valori di tensione registrati a terra sono variati tra 5 kN e 25 kN (fig. 5.22). Un coefficiente di attrito di 0,2 è stato osservato per lo strisciamento all'interno della condotta PIR sia della fune sintetica sia del cavo TLC.

5.12 - Risultati delle attività di tiro del cavo MT

Il tiro a terra del cavo MT è stato effettuato tra il 13 e il 14 dicembre 2024 per un tempo di esecuzione totale di 21 ore e 12 minuti. Sono stati varati circa 8.500 m di cavo.

I valori di tensione registrati a terra sono variati tra un minimo di 75 kN e un massimo di 230 kN (fig. 5.23).

Un coefficiente di attrito di 0,3 è stato osservato per lo strisciamento all'interno della condotta PIR della fune sintetica. Si è riscontrato un valore leggermente inferiore per lo strisciamento del cavo MT. I valori misurati in campo si sono posti al limite inferiore dell'intervallo individuato durante i test effettuati con gli spezzoni di condotta PIR. Una possibile causa è l'effetto lubrificante di residui cerosi probabilmente presenti all'interno delle condotte allagate. Come conseguenza di ciò, non è risultato necessario installare alcun galleggiante di alleggerimento sul cavo MT.

6. CONCLUSIONI

La metodologia utilizzata per il varo dei cavi dentro le condotte esistenti ha dimostrato i seguenti benefici ambientali e vantaggi operativi:

Vantaggi operativi

- evitare di eseguire attività aggiuntive di scavo e protezione dei cavi lungo tutto il percorso ottimizzando le tempistiche realizzative e mezzi impiegati;
- riqualificare vecchie infrastrutture evitando di smantellarle con conseguenti attività di scavo a mare;
- garantire la protezione dei cavi in corrispondenza dell'approccio costiero e lungo tutto il tratto a mare.

Benefici ambientali

- evitare la posa sul fondale marino dei cavi e lo scavo di protezione (post-trenching) lungo tutto il percorso;
- evitare sversamenti a mare dell'acqua spiazzata durante il tiro delle messaggere con pig grazie al circuito chiuso formato dalle due linee PIR.

In conclusione, si desidera esprimere la profonda gratitudine per il supporto e il contributo dei vari team di progetto che si sono adoperati per la riuscita di quest'opera.

7. REFERENZE (in ordine alfabetico)

Parisi C. and A. Napolitano (2019). Rehabilitation project of a rigid crude oil pipeline near the Gela coast in Italy, *World Pipeline Magazine*, Volume 19, No.2. pp. 69-71.

8. FIGURE

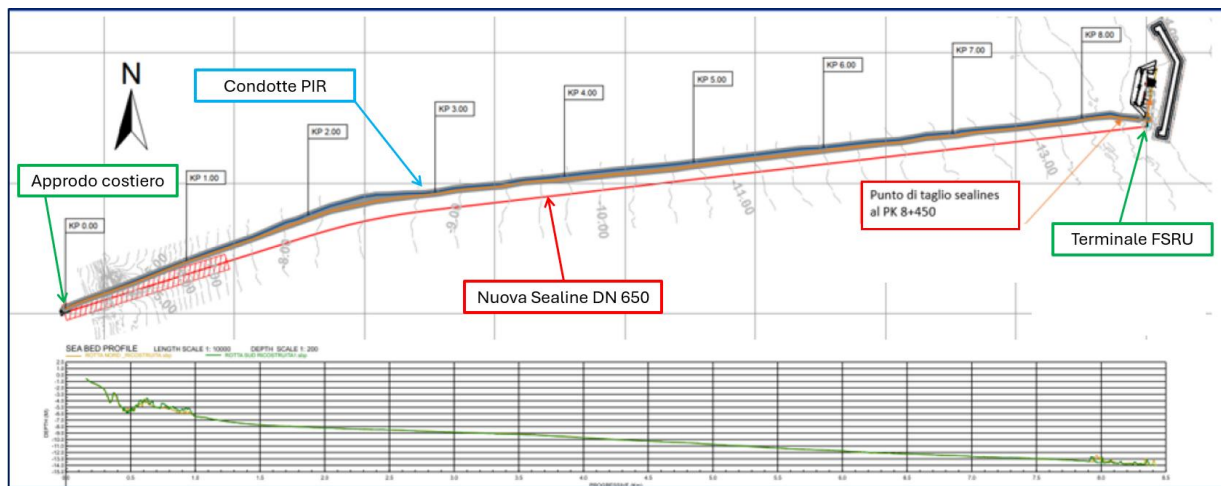


Figura 1 – Progetto FSRU Ravenna – opere offshore

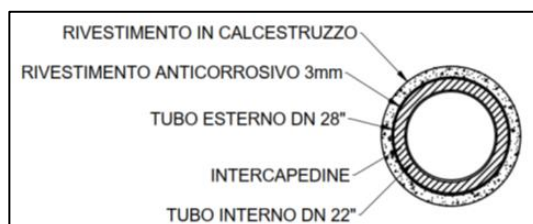


Figure 2.1 – Condotte PIR in sezione

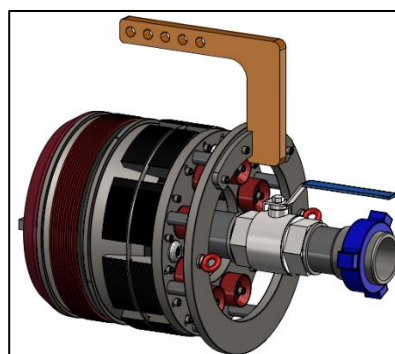
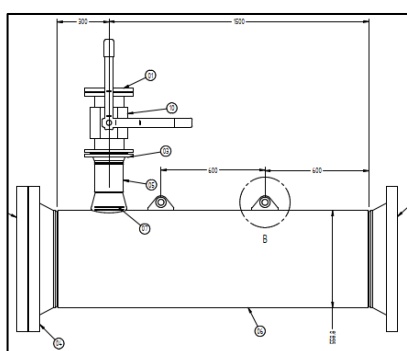
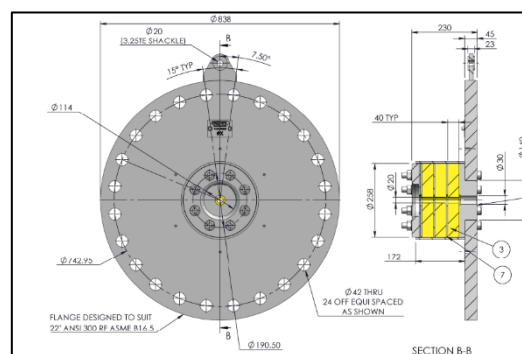
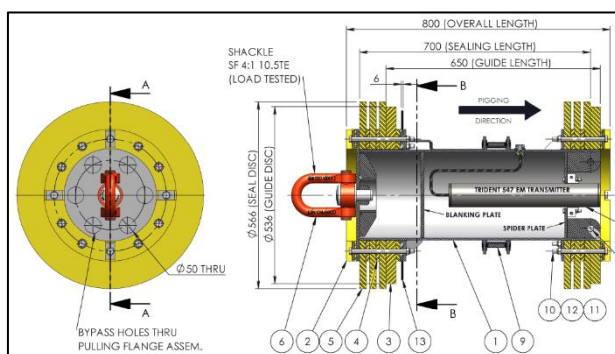
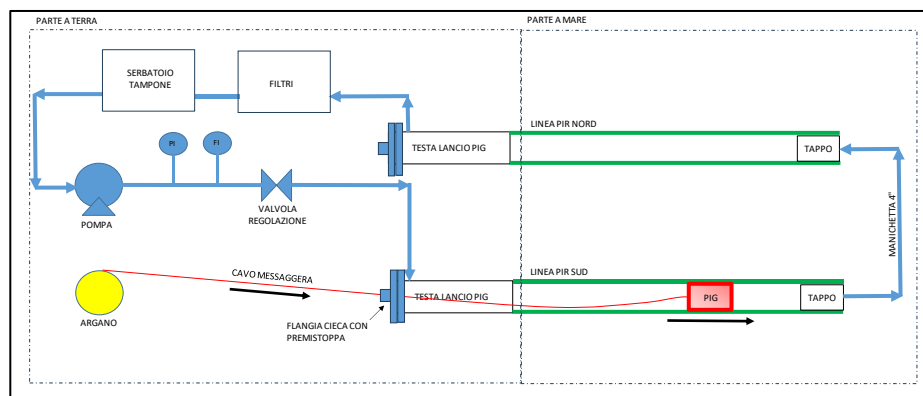
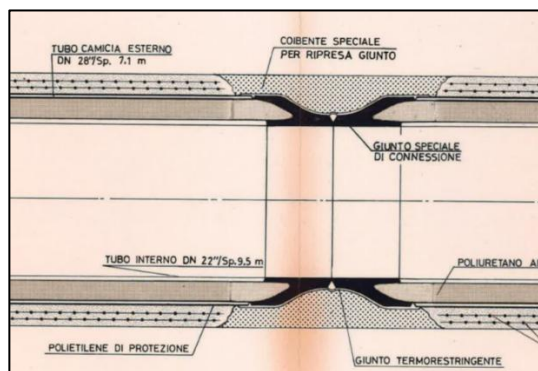




Figure 4.7 / 4.8 – Configurazione finale premistoppa / Usura premistoppa



Figure 4.9 / 4.10 – Tappo 22'' prima di essere infilato nel tubo / Tappo 22'' attivato durante prova di tenuta

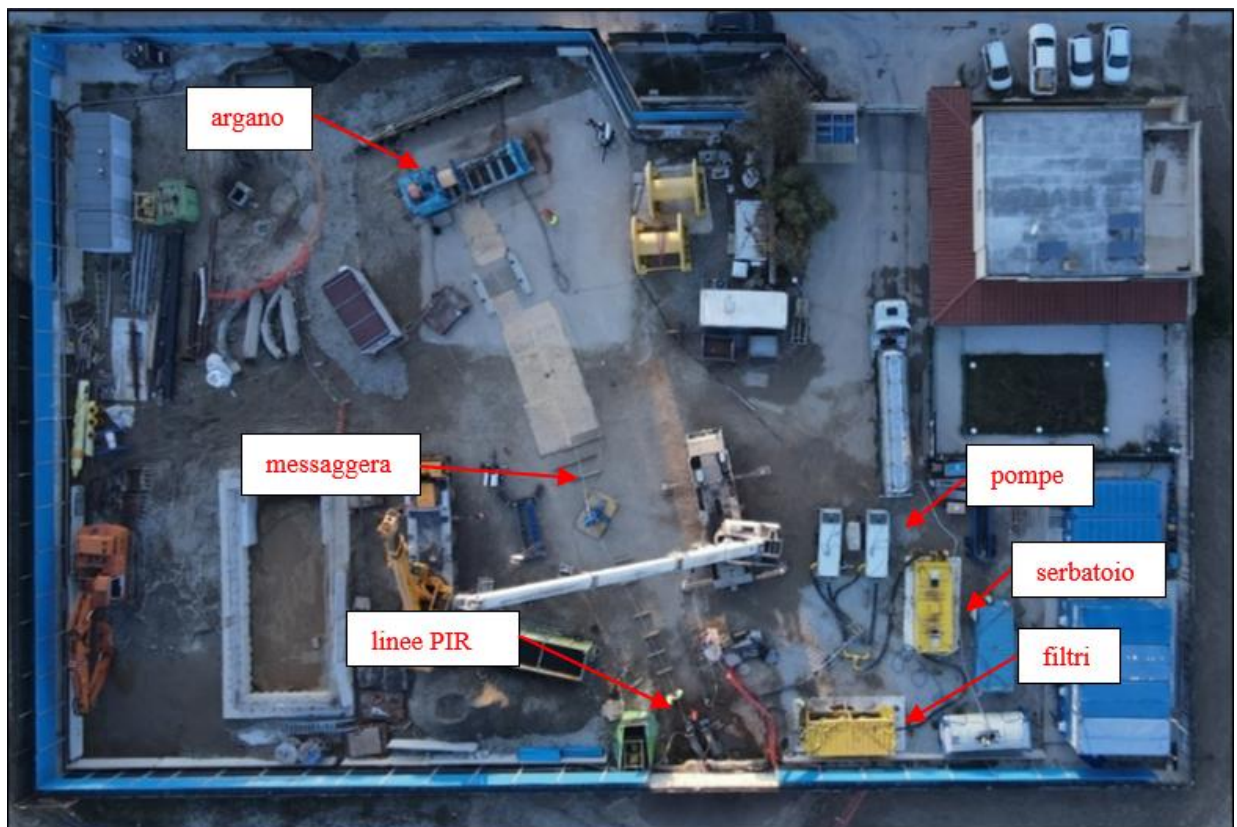


Figura 4.11 – Area Ex Sarom – Impianti temporanei per tiro messaggere



Figura 4.12 – Tiro PIR NORD



Figura 4.13 – Tiro PIR SUD



Figura 4.14 – Argano messaggera



Figure 4.15a / b – Funne messaggera connessa al pig di lancio (sinistra) e alla testa di tiro del Cavo TLC (destra). Si nota la terminazione con redancia metallica connessa ad un golfare “wide body”



Figura 5.1 - Rigging di tiro del cavo MT

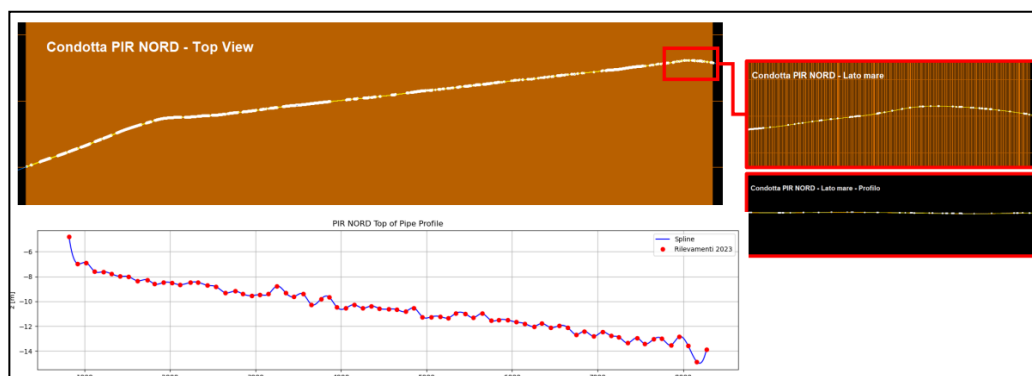


Figura 5.2 - Interpolazione punti modello ORCAFLEX

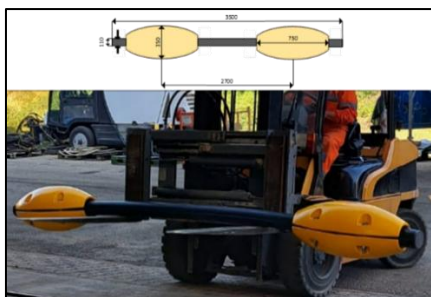


Figure 5.3 / 5.4 - Dettaglio assieme tubo HDPE + boe / Spezzone condotta PIR



Figure 5.5a / b - Dettaglio piastre saldate agli imbocchi / Dinamometro carrello in asse con la condotta PIR



Figure 5.6 / 5.7 - simulacro del cavo MT con e senza boe di alleggerimento per test di attrito

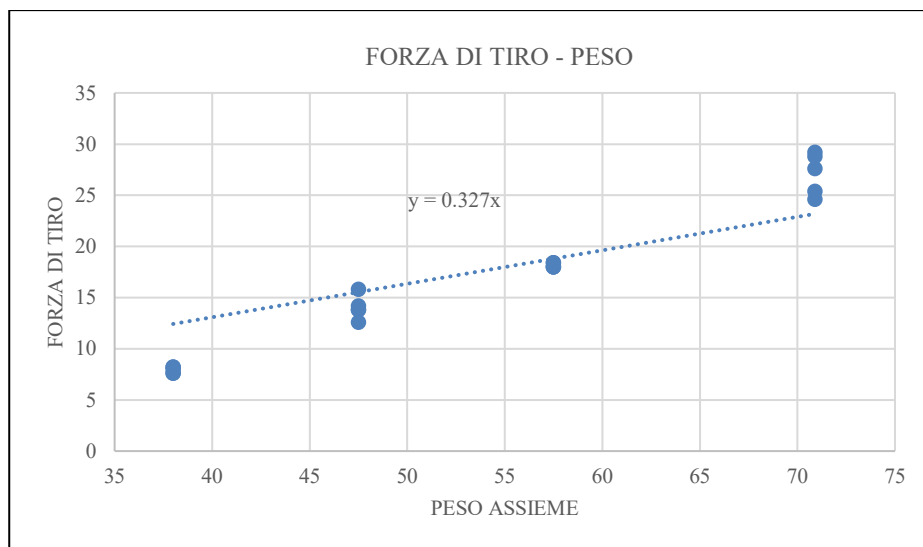


Figura 5.8 – Grafico dei risultati test di tiro con boe

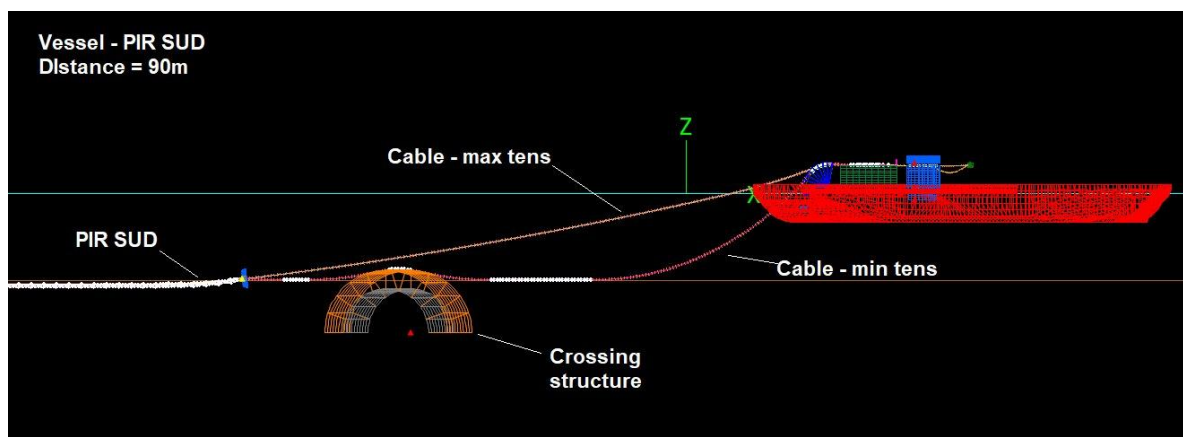


Figura 5.9 – Simulazione Orcaflex della interazione dinamica tra nave, cavo MT, fondale e imboccatura della condotta



Figura 5.10 - Varo dei nuovi spool di raccordo a cavallo del muro perimetrale del cantiere Ex Sarom



Figura 5.11 - Ingresso delle condotte PIR all'interno del Cantiere Ex-Sarom prima e dopo l'installazione dei nuovi spool di risalita

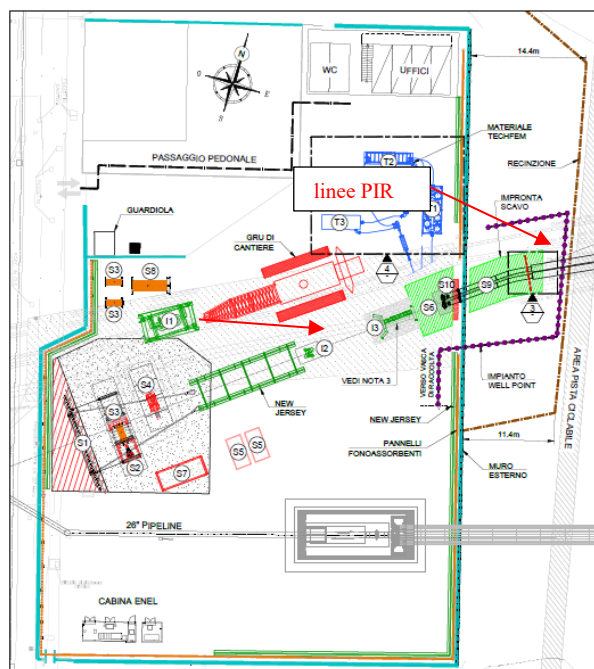


Figura 5.12 - Area di cantiere per tiro cavi

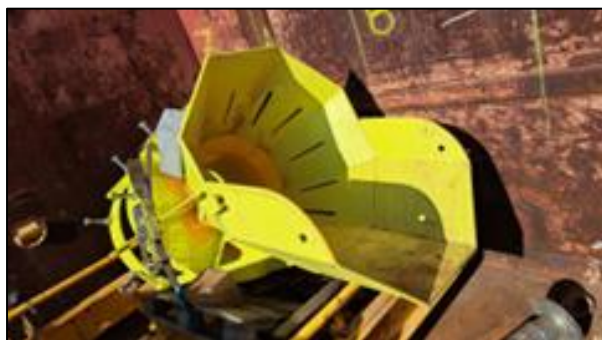


Figura 5.13 – Bellmoth installata a mare su condotta PIR



Figura 5.14 – Cabestano



Figura 5.15– Rulliera verticale

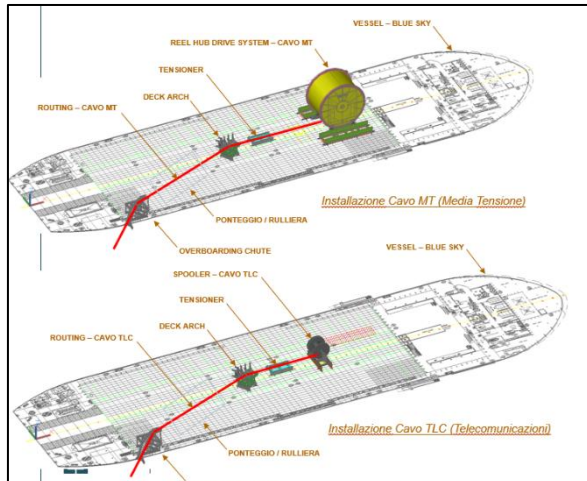


Figura 5.16 – Dispositivi rilascio cavi

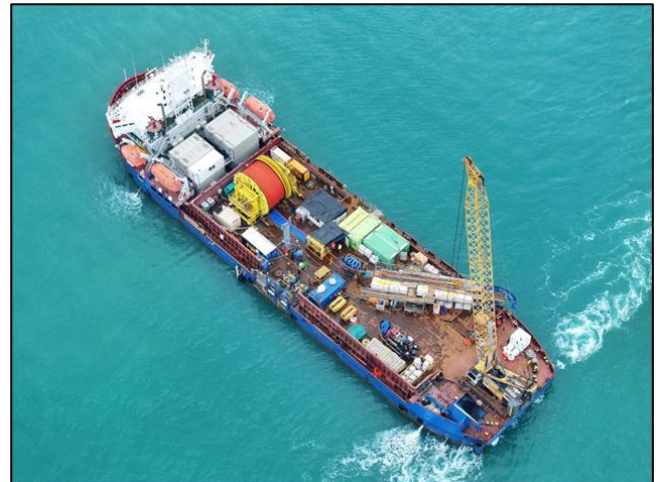


Figura 5.17 – Nave posa cavi

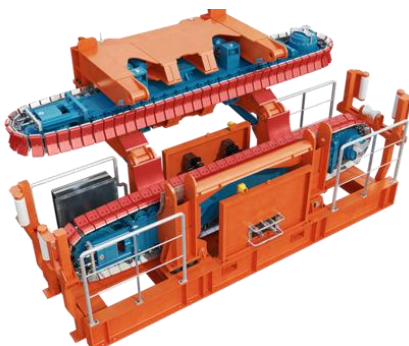


Figure 5.18a, b, c - Tensionatore, Spooling Winch con a bordo la bobina di cavo TLC, Reel hub drive con a bordo la bobina MT



Figura 5.19 – Tensionimetro RLM



Figura 5.20 – Scivolo di varo

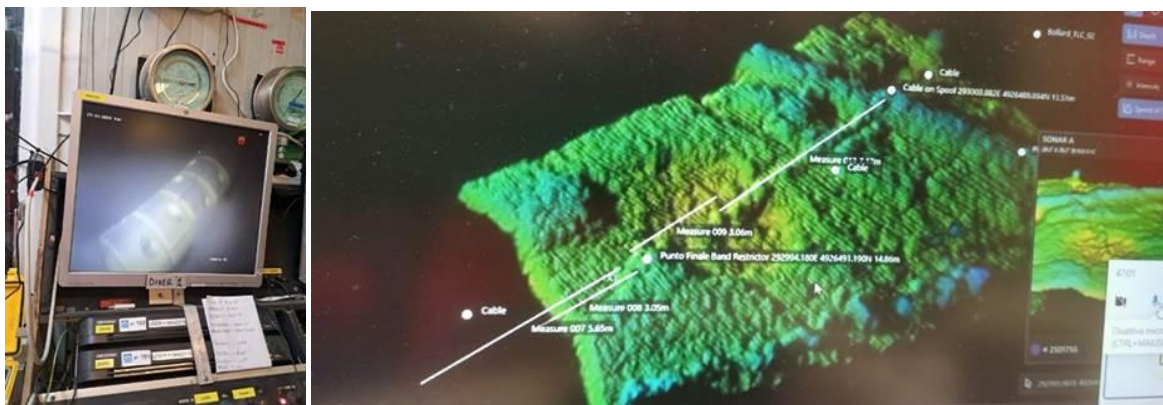


Figure 5.21a, b - Visualizzazione dei cavi tramite ROV di osservazione (a sx) e ecoscandaglio 3D (a dx)

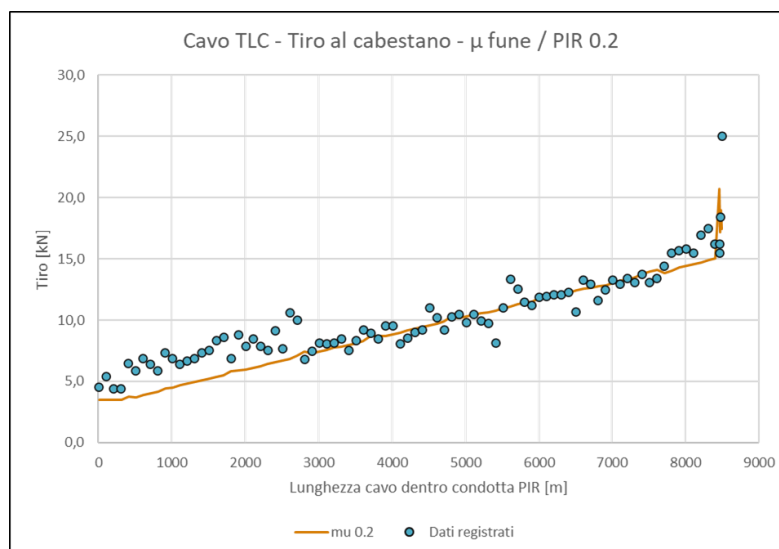


Figura 5.22 – Tiro al cabestano registrato durante il tiro a terra del cavo TLC

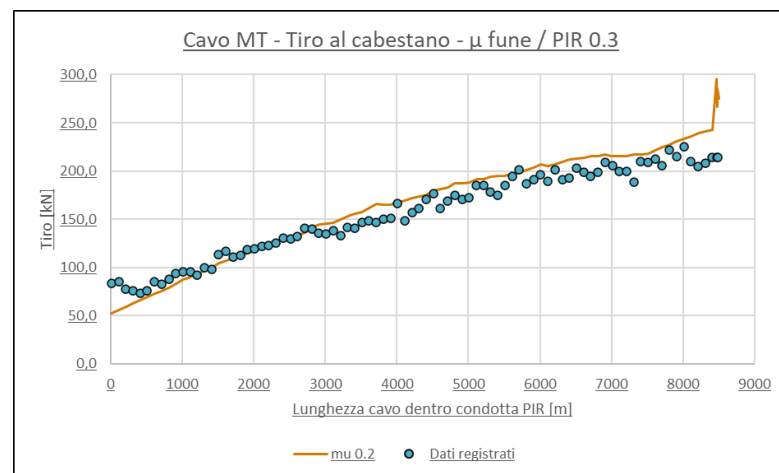


Figura 5.23 – Tiro al cabestano registrato durante il tiro a terra del cavo MT