

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

**STUDIO DI UN SISTEMA DI PROTEZIONE CATHODICA AD ANODI
GALVANICI PER TUBAZIONI METALLICHE IN AMBIENTE MARINO
NEL CASO DI APPRODO A TERRA**

STUDY OF A CATHODIC PROTECTION SYSTEM BY GALVANIC ANODES
FOR METALLIC PIPELINES IN MARINE ENVIRONMENT IN THE CASE
OF SHORE APPROACH

Relatore:

Dott. Tiziano Bellezze

Tesi di Laurea di:

Alessandro Marchetti

Correlatore:

Ing. Massimo Fratesi

A.A. 2018-2019

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
1.1. TECNICA DI TRIVELLAZIONE IN DIREZIONE ORIZZONTALE.....	1
1.2. SCOPO DELLA TESI.....	2
2. PRINCIPI E RIFERIMENTI NORMATIVI DELLA PROTEZIONE CATODICA	3
2.1. PROTEZIONE CATODICA	3
2.2. SETTORI DI APPLICAZIONE.....	4
2.3. CORROSIONE DEI METALLI	4
2.3.1. Corrosione elettrochimica in ambiente elettrolitico	5
2.3.2. Aspetti termodinamici	7
2.3.3. Cinetica dei processi di corrosione	9
2.4. PROTEZIONE CATODICA AD ANODI GALVANICI	10
2.4.1. Potenziale di protezione	10
2.4.2. Densità di corrente di protezione	11
2.4.3. Anodi sacrificali	12
2.5. NORMATIVE DI RIFERIMENTO.....	13
2.5.1. Parametri di riferimento e procedura empirica di progettazione	14
2.6. PROTEZIONE CATODICA DI UN HDD	14
2.7. LIMITAZIONI SULLA PROGETTAZIONE	15
2.7.1. Spaziatura fra gli anodi.....	15
2.7.2. Danneggiamento del rivestimento anticorrosivo	15
2.8. RIVESTIMENTO ANTICORROSIVO “COATING”	16
2.8.1. Fusion Bonded Epoxy (FBE).....	16
2.8.2. Three Layers Polyethylene/Polypropylene (3LPE - 3LPP).....	17
2.8.3. Multi-layer.....	17

2.8.4. Concrete.....	18
2.9. Necessità di un diverso approccio.....	18
3. CURVE DI POLARIZZAZIONE.....	19
3.1. INTRODUZIONE.....	19
3.2. RAPPRESENTAZIONE DELLA CURVA	19
3.3. POLARIZZAZIONE ANODI.....	20
3.4. POLARIZZAZIONE PIPELINE (CATODO)	20
3.5. METODI PER RICAVERE LE CURVE DI POLARIZZAZIONE	21
3.6. APPLICABILITÀ IN FASE DI DESIGN IN UN HDD	21
3.6.1. Scelta della curva	21
3.7. OFFSET CURVA DI POLARIZZAZIONE	22
3.8. APPROCCIO AL COATING BREAKDOWN FACTOR.....	23
4. RESISTIVITÀ DEI TERRENI	24
4.1. INTRODUZIONE.....	24
4.2. METODI DI MISURA DELLA RESISTIVITÀ.....	24
4.2.1. Indagini geoelettriche	25
4.2.2. Configurazione Wenner	26
4.2.3. Configurazione Schlumberger.....	27
4.2.4. Configurazione Dipolo-dipolo	27
4.3. METODI DI MISURA.....	28
4.3.1. Sondaggio elettrico verticale (SEV).....	28
4.3.2. Sondaggio elettrico orizzontale (SEO).....	28
4.3.3. Tomografia elettrica (ERT)	28
4.3.4. Caratterizzazione geologica	29
4.4. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DELLA RESISTIVITÀ	29
4.5. ANALISI DELLA RESISTIVITÀ DI APPRODI A MARE	30

4.5.1.	Brasile.....	31
4.5.2.	Messico	32
4.5.3.	Olbia, Italia	37
4.5.4.	Falconara, Italia.....	39
4.5.5.	Puglia, Italia.....	41
4.5.6.	Qatar	42
4.5.7.	Indonesia.....	44
5.	DEFINIZIONE DEL TIPO DI APPRODO	47
5.1.	INTRODUZIONE.....	47
5.2.	APPRODO MARE-SPIAGGIA	47
5.3.	APPRODO MARE-TERRA	48
5.4.	APPRODO SPIAGGIA-TERRA	49
5.5.	ESTENSIONE DELL'APPLICABILITÀ DEGLI HDD	49
6.	MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI.....	51
6.1.	INTRODUZIONE.....	51
6.2.	APPLICABILITÀ ALLA PROTEZIONE CATODICA.....	52
6.3.	EQUAZIONI DI CAMPO ELETTRICO	52
6.4.	TIPI DI DISTRIBUZIONE DI CORRENTE.....	54
6.4.1.	Distribuzione di corrente primaria.....	54
6.4.2.	Distribuzione di corrente secondaria.....	55
6.4.3.	Distribuzione di corrente terziaria	55
6.5.	CONDIZIONI AL CONTORNO	55
6.5.1.	Anodo.....	55
6.5.2.	Catodo.....	56
6.5.3.	Superfici al confine del modello.....	56
6.6.	DEFINIZIONE DELLA MESH	56

7. ILLUSTRAZIONE DEL MODELLO	58
7.1. INTRODUZIONE.....	58
7.2. COSTRUZIONE DEL MODELLO 3D.....	58
7.2.1. Discretizzazione dei terreni.....	58
7.2.2. Discretizzazione del terreno in esame.....	59
7.2.3. Importazione della geometria su Comsol.....	61
7.3. CONDIZIONI AL CONTORNO.....	64
7.3.1. Condizioni al contorno imposte all’anodo.....	64
7.3.2. Condizioni al contorno imposte al catodo.....	64
7.4. CONDUCEBILITÀ ELETTROLITA.....	67
7.5. REALIZZAZIONE DELLA MESH.....	68
7.6. ANALISI EFFETTUATE.....	70
7.7. FATTORI CHE INFLUENZANO L’EFFICACIA DELLA PROTEZIONE CATODICA.....	71
7.7.1. Numero di anodi.....	71
7.7.2. Densità di corrente di protezione.....	72
7.7.3. Estensione del modello 3D.....	72
7.7.4. Discretizzazione dei terreni.....	73
8. ANALISI DEI RISULTATI	74
8.1. INTRODUZIONE.....	74
8.2. PIPELINE 300M.....	74
8.2.1. Approdo mare-spiaggia.....	74
8.2.2. Approdo mare-terra.....	75
8.2.3. Approdo spiaggia-terra.....	75
8.3. PIPELINE 700M.....	77
8.3.1. Approdo mare-spiaggia.....	77
8.3.2. Approdo mare-terra.....	77

8.3.3.	Approdo spiaggia-terra	77
8.4.	PIPELINE 1100M	79
8.4.1.	Approdo mare-spiaggia.....	79
8.4.2.	Approdo mare-terra.....	79
8.4.3.	Approdo spiaggia-terra	79
8.5.	PIPELINE 1600M	81
8.5.1.	Approdo mare-terra.....	81
8.6.	RISULTATI OTTIMIZZATI.....	82
8.6.1.	Aumento del numero degli anodi	82
8.6.2.	Diminuzione della densità di corrente di protezione	84
8.7.	MODIFICA DELLA PROFONDITÀ DEL MODELLO 3D.....	88
8.8.	DISCUSSIONE DEI RISULTATI	89
9.	CONCLUSIONI	92
9.1.	CONSIDERAZIONI SUL LAVORO SVOLTO	92
9.2.	VANTAGGI E SVANTAGGI	93
9.3.	POSSIBILI SVILUPPI FUTURI	94
BIBLIOGRAFIA	95

1. Introduzione

1.1. TECNICA DI TRIVELLAZIONE IN DIREZIONE ORIZZONTALE

Negli ultimi 15 anni, nel settore dell'Oil and Gas e dell'impiantistica, sta prendendo piede l'utilizzo della tecnologia di installazione di tubazioni denominata HDD (Horizontal Directional Drilling). L'HDD è una tecnologia "trenchless", cioè senza il bisogno di effettuare scavi a cielo aperto, di installazione delle pipeline a basso impatto ambientale che consiste nell'esecuzione di un foro nel terreno tramite una trivella i cui spostamenti vengono comandati da remoto. La trivella crea un percorso sotterraneo stabilito in fase di progetto, in cui verrà poi inserita la tubazione di processo. In alcuni casi la tubazione di processo viene utilizzata come trivella stessa e quindi lasciata in opera una volta terminata la trivellazione.

Il successo di questa tecnologia, rispetto alle installazioni tradizionali basate su scavi a cielo aperto, è legato al limitato impatto sia sull'ambientale naturale (in particolar modo per zone protette, spiagge, fiumi, ...) che sull'ambiente artificiale (strade, ferrovie, edifici, ...). Nel settore dell'Oil and Gas questa tecnologia comporta vantaggi a livello economico, di tempistiche e di impatto ambientale, ma essendo ancora una tecnologia relativamente giovane, le normative internazionali che definiscono le linee guida per la progettazione dei sistemi di trasporto Oil & Gas non trattano specificatamente l'argomento. Uno degli aspetti attualmente poco approfondito riguarda la protezione della tubazione dalla corrosione, costituita generalmente dall'accoppiamento della protezione passiva (uso di rivestimenti anticorrosivi) e dalla protezione attiva (sistemi di protezione catodica). Mentre per la protezione anticorrosiva è possibile selezionare un appropriato sistema da adottare in considerazione alle consolidate caratteristiche dei tipi di rivestimento attualmente in commercio, per la protezione catodica è necessario fare valutazioni legate soprattutto alla opportunità e possibilità di adottare specifici sistemi e di monitorarne la funzionalità.

1.2. SCOPO DELLA TESI

L'installazione con il metodo HDD comporta, dal punto di vista della progettazione di un sistema anticorrosivo, una serie di vincoli (non si possono installare anodi lungo la linea) e indeterminanze (non è possibile monitorare l'efficacia della protezione attiva) che necessitano di scostarsi dai classici metodi di progettazione. Una tipica progettazione infatti si basa, fra le altre cose, sulla stima iniziale del danneggiamento del rivestimento (dovuto sia al metodo di installazione che al tipo di rivestimento) e sulla capacità del sistema anodico di proteggere tutta la lunghezza della linea (attenuazione del potenziale). Dato che attualmente le normative non stabiliscono delle linee guida dedicate, né il calcolo dell'attenuazione per linee interrate in ambiente marino, né il grado di danneggiamento per una posa in opera non convenzionale, si rende necessario un approccio diverso da quello tradizionale soprattutto per HDD adottati per gli approdi a terra di tubazioni provenienti da ambienti marini. Ad oggi la metodica utilizzata nel caso di un approdo a mare, prevede l'utilizzo di anodi sacrificali installati nel lato mare prima che la linea entri nel terreno ed eventualmente un sistema a corrente impressa o ad anodi sacrificali nel lato terra. I fattori che influenzano maggiormente la scelta del sistema sono la lunghezza del tratto considerato, la valutazione del danneggiamento del rivestimento e le diverse resistività di un terreno non omogeneo.

Attraverso il lavoro svolto si vuole tentare di trovare delle linee guida che permettano di selezionare un appropriato sistema di protezione catodica tramite lo sviluppo di una modellazione multi fisica delle condizioni al contorno. Questo metodo permette di simulare svariate casistiche in tempi relativamente brevi e attraverso l'analisi dei risultati, ottenere molteplici indicazioni sulle possibili soluzioni ingegneristiche adottabili. La possibilità di analizzare svariate casistiche che si possono venire a creare può costituire un vantaggio molto importante per un'azienda responsabile di ingegnerizzare un sistema di protezione dalla corrosione abbinato ad un HDD, sia nella fase di offerta che in quella di pre-ingegneria e ingegneria. Tale strumento infatti permette di fare scelte ingegneristiche mirate già in fase di offerta (evitando inutili sovradimensionamenti o sottodimensionamenti), di migliorare l'efficienza della progettazione (e quindi dei costi), di definire in tempi brevi eventuali azioni correttive necessarie a fronte di imprevisti cambiamenti in corso d'opera.

2. Principi e riferimenti normativi della protezione catodica

2.1. PROTEZIONE CATODICA

La protezione catodica è un sistema di protezione attiva dei manufatti metallici esposti in ambienti elettrolitici. Si tratta di una tecnica elettrochimica usata per arrestare o per rallentare a valori trascurabili la corrosione, abbassando il potenziale della superficie metallica.

Per fare ciò si fa circolare una corrente continua da un elettrodo esterno (anodo) a contatto con l'ambiente elettrolitico, verso la struttura metallica da proteggere (catodo). Anodo e catodo sono collegati tramite un conduttore metallico.

La circolazione di corrente è garantita da due tipologie di protezione catodica (Figura 2.1); la prima tipologia sfrutta un sistema ad anodi galvanici, mentre la seconda un sistema a corrente impressa.

In un sistema ad anodi galvanici l'abbassamento del potenziale è dato dall'accoppiamento della struttura in acciaio con un anodo costituito da un metallo più elettronegativo. Un altro nome per classificare questa metodologia è "protezione ad anodi sacrificali", infatti dal nome si intuisce che la protezione avviene a discapito dell'anodo che si degrada nel tempo.

La seconda metodica sfrutta una corrente continua prodotta da un generatore esterno; il polo negativo viene collegato alla struttura da proteggere mentre il polo positivo viene collegato ad un dispersore anodico, generalmente costituito da un metallo insolubile, per esempio da leghe in titanio attivato.

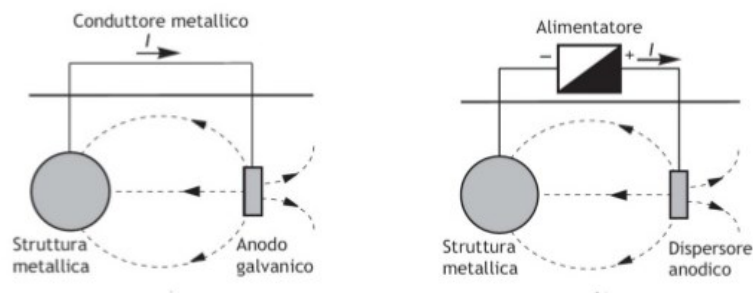


Figura 2.1: Sistemi di protezione catodica ad anodi galvanici e a corrente impressa

2.2. SETTORI DI APPLICAZIONE

La protezione catodica può essere utilizzata per proteggere un qualsivoglia metallo immerso in un ambiente elettrolitico. Le prime sperimentazioni furono effettuate nelle navi che subivano forti corrosioni in acqua di mare circa due secoli fa.

Il settore che più di tutti ha beneficiato dei vantaggi della protezione catodica è stato sicuramente il settore dell'Oil and Gas. Il trasporto e l'estrazione dei combustibili fossili è reso possibile tramite l'impiego di grandi strutture di acciaio, si può pensare alle piattaforme di estrazione o alle tubazioni lunghe migliaia di chilometri deputate al trasporto del materiale estratto. Queste strutture sono immerse in ambienti fortemente corrosivi come ad esempio l'acqua di mare (off-shore) o terreni conduttivi (on-shore), e andare ad utilizzare costose leghe inossidabili non è sicuramente la scelta più economica considerando le dimensioni di queste strutture. L'uso combinato di strutture in acciaio al carbonio, adeguati sistemi di rivestimento anticorrosivo e sistemi di protezione catodica ad oggi rimane la scelta più conveniente e sicura.

2.3. CORROSIONE DEI METALLI

La corrosione è un fenomeno che porta al graduale deterioramento di un materiale fino anche alla sua completa distruzione. Di solito si pensa alla corrosione come ad un processo che avviene esclusivamente su materiali metallici, ma in realtà anche altri materiali hanno la tendenza a corrodersi quando vengono a contatto con l'ambiente che li circonda, come ad esempio i materiali ceramici, plastici, ecc.

In ogni caso il fenomeno che avviene nella stragrande maggioranza dei casi e che interessa tantissimi settori è quello di degrado dei metalli in ambiente umido con meccanismo elettrochimico.

2.3.1. Corrosione elettrochimica in ambiente elettrolitico

La corrosione ad umido avviene quando un metallo è immerso in un ambiente elettrolitico. Il processo è quindi di tipo elettrochimico e procede attraverso una serie di reazioni complementari:

- Una reazione anodica data dal processo di ossidazione del metallo che rende disponibili gli elettroni;
- Una reazione catodica data dal processo di riduzione dell'ossigeno o dell'idrogeno, processo che consuma elettroni;
- Il passaggio di elettroni attraverso il conduttore metallico dalla regione anodica alla regione catodica
- Il passaggio di corrente nell'elettrolita

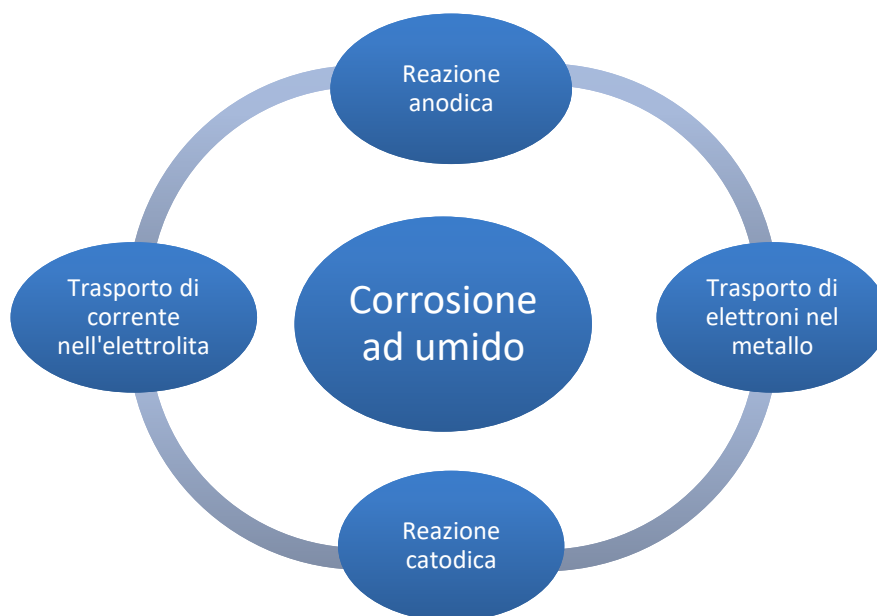


Figura 2.2: Schema del processo di corrosione elettrochimica

2.3.1.1. Reazione anodica

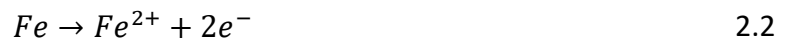
Il generico processo anodico di un metallo può essere rappresentato dalla reazione di ossidazione del metallo a un suo ione che passa in soluzione:



dove:

- M generico metallo;
- M^{z+} ione che passa in soluzione;
- z valenza del metallo;
- e^{-} elettrone.

Nel caso di manufatti in ferro si avrà la dissoluzione del ferro (Fe) che libera ioni (Fe^{2+}) ed elettroni (e^{-}):



Gli elettroni si trasferiscono attraverso il metallo verso un'altra zona (catodo) in cui sono presenti ossigeno o idrogeno pronti a ridursi.

2.3.1.2. Reazione catodica

Le reazioni dei processi catodici più importanti, possono essere rappresentate dalle seguenti relazioni di riduzione dello ione idrogeno e della molecola di ossigeno:



La (2.3) indica la riduzione dello ione idrogeno in soluzione acida, con produzione di idrogeno molecolare, la (2.4) indica la riduzione dell'ossigeno in ambiente neutro o basico, mentre la (2.5) indica la riduzione dell'ossigeno in ambiente acido.

2.3.2. Aspetti termodinamici

Nei processi di corrosione è di fondamentale importanza considerare il problema da un punto di vista termodinamico. La corrosione è una reazione spontanea che prevede una diminuzione di energia libera del sistema, la quale viene ceduta sotto forma di calore.

In natura i metalli, eccetto l'oro e il platino, non sono mai puri ma legati ad altri elementi per formare ossidi per raggiungere lo stato termodinamico più stabile. I materiali metallici si ricavano dagli ossidi estratti dal suolo attraverso i processi metallurgici, fornendogli una notevole quantità di energia. Da questo punto di vista, la corrosione può essere vista come un ritorno dei metalli allo stato naturale (ossidi).

La spontaneità del processo di corrosione può essere spiegato dal punto di vista termodinamico attraverso la variazione di energia libera di Gibbs:

- $\Delta G < 0 \rightarrow$ *Reazione spontanea;*
- $\Delta G > 0 \rightarrow$ *Reazione non spontanea (si deve fornire energia esterna).*

La variazione di energia libera può essere espressa come:

$$\Delta G = -zF\Delta E \quad 2.6$$

dove:

- z numero di elettroni;
- F costante di Faraday;
- ΔE differenza di potenziale tra il valore di potenziale della semi-reazione catodica (E_c) e il valore della semi-reazione anodica (E_a).

Quindi affinché il processo sia spontaneo deve risultare $\Delta G < 0$ e di conseguenza $\Delta E > 0$.

Si può scrivere la variazione dell'energia libera come:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \prod a_i^\gamma \quad 2.7$$

dove:

- ΔG° ΔG in condizioni standard;
- R costante;
- T temperatura;
- a_i concentrazione degli ioni metallici nell'elettrolita.
- γ coefficiente stechiometrico.

Introducendo il potenziale e combinando le (2.6) e (2.7) si definisce l'equazione di Nernst:

$$E_{eq} = E^\circ + \frac{RT}{zF} \ln \prod a_i^\gamma \quad 2.8$$

In una reazione chimica dove si considera la dissoluzione di un metallo in un elettrolita secondo la reazione $M \rightarrow M^{z+} + ze^-$, si può calcolare il potenziale di equilibrio come:

$$E_{eq} = E^\circ + \frac{RT}{zF} \ln a_{M^{z+}} \quad 2.9$$

La termodinamica afferma che un metallo si ossida a seconda del valore del potenziale, E , comparato al valore del potenziale di equilibrio, E_{eq} :

- Se $E > E_{eq}$, il metallo dissolve (comportamento anodico);
- Se $E < E_{eq}$, gli ioni si depositano (comportamento catodico).

Il potenziale si sposta dal valore di equilibrio quando una corrente è scambiata fra il metallo e l'elettrolita. La relazione tra il potenziale, E , e la densità di corrente, i , ha la seguente forma generale:

$$E = E_{eq} \pm f(i) \quad 2.10$$

dove $f(i)$ è solitamente una funzione logaritmica. Il segno positivo si riferisce al processo anodico, mentre il segno negativo si riferisce al processo catodico.

2.3.3. Cinetica dei processi di corrosione

La termodinamica stabilisce se una determinata reazione possa avvenire o meno, ma non è sufficiente a comprendere a pieno il fenomeno poiché non dà nessuna indicazione sulle velocità con cui la corrosione si sviluppa. Intervengono delle resistenze di reazione che condizionano la velocità di reazione fino anche a portarla a valori talmente bassi da essere considerati trascurabili. In definitiva, anche se a livello termodinamico è stato stabilito che un determinato processo si verificherà, non è detto che questo sia possibile apprezzarlo dal momento che la cinetica di reazione sarà estremamente lenta.

Quando si innesca un processo di corrosione, si verificano contemporaneamente sia la reazione anodica che la reazione catodica purché $E_{eq,c} > E_{eq,a}$. Gli elettroni prodotti dal processo anodico sono gli stessi che vengono consumati dal processo catodico, perciò entrambe le reazioni devono avvenire alla stessa velocità. La velocità di reazione è correlata alle densità di corrente dei due processi e dal momento che deve essere coincidente si verifica che:

$$i_a = i_c = i_{corr} \quad 2.11$$

i_a e i_c sono rispettivamente la densità di corrente del processo anodico e catodico; entrambe si portano ad un valore pari a i_{corr} , densità di corrente scambiata fra il processo anodico e catodico, che determina la velocità di corrosione. Entrambe le reazioni si portano ad un potenziale intermedio E_{corr} detto potenziale di libera corrosione.

Per rappresentare questo processo è utile far riferimento ai diagrammi di Evans (Figura 2.3). Tali diagrammi riportano in ascissa il logaritmo della densità di corrente ($\log i$) e in ordinata il potenziale elettrico (E) e rappresentano le curve caratteristiche di polarizzazione anodica e di polarizzazione catodica, ottenute per via sperimentale. Nel punto di intersezione si individuano il potenziale di libera corrosione e la densità di corrente di corrosione. Il potenziale di libera corrosione è il valore di potenziale a cui si porta il metallo durante il processo.

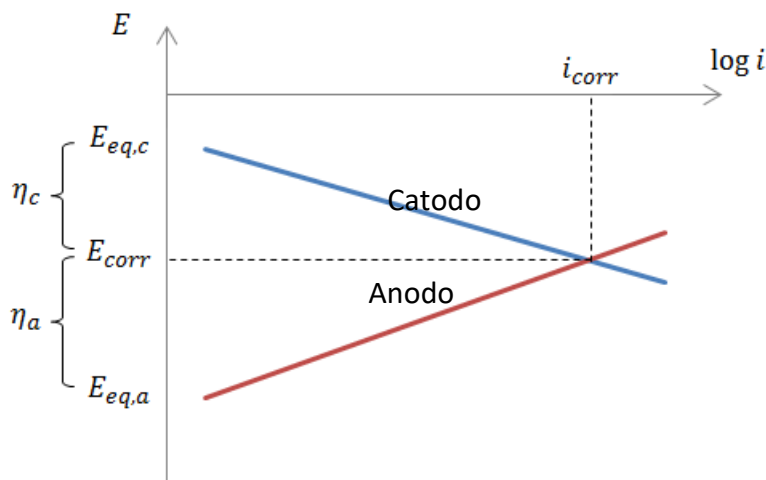


Figura 2.3: Diagramma di Evans

All'aumentare della corrente in senso anodico o catodico, il potenziale si discosta dal valore di equilibrio di una quantità detta sovratensione, η_c sovratensione catodica, η_a sovratensione anodica.

2.4. PROTEZIONE CATODICA AD ANODI GALVANICI

Il metodo di protezione ad anodi galvanici si realizza mettendo in contatto due metalli con diverso potenziale d'equilibrio in ambiente elettrolitico. Questa tecnica è largamente utilizzata in ambiente off-shore per la protezione di strutture in acciaio tramite anodi che solitamente sono composti da leghe di alluminio.

2.4.1. Potenziale di protezione

Accoppiando due metalli con diverso valore di potenziale si raggiunge un nuovo potenziale di equilibrio che è compreso tra i due potenziali considerati. Una struttura metallica può essere protetta quando è elettricamente collegata ad un anodo costituito da un metallo meno nobile. In questa situazione si possono verificare due condizioni:

- Se il potenziale del metallo viene portato ad un potenziale inferiore del potenziale di equilibrio ($E < E_{eq}$), il processo di corrosione (processo anodico) non può avvenire ed è favorito il processo opposto, cioè il processo di riduzione degli ioni sul metallo.
- Se l'abbassamento di potenziale non è sufficiente a portarlo sotto il potenziale di equilibrio del metallo nell'ambiente elettrolitico ($E_{corr} > E > E_{eq}$), la velocità di corrosione si riduce ma non viene arrestata. Questa condizione si verifica in molte situazioni pratiche dove si stabiliscono le cosiddette condizioni di quasi immunità per cui la velocità di corrosione è considerata trascurabile o accettabile.

2.4.2. Densità di corrente di protezione

Per abbassare il potenziale sotto al valore del potenziale di equilibrio e ottenere così la protezione catodica, è necessario fornire un'adeguata densità di corrente.

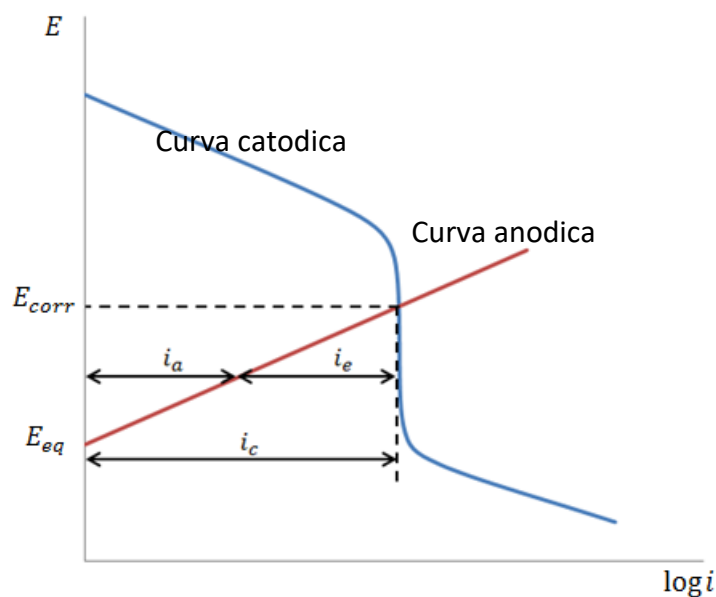


Figura 2.4: Rappresentazione della densità di corrente esterna che abbassa il potenziale anodico

Con riferimento alla Figura 2.4, si può definire la corrente esterna come la corrente fornita dall'anodo alla struttura. Poiché non c'è accumulo di carica, tutti gli elettroni forniti dalla corrente

anodica i_a devono essere consumati al catodo e in questo modo il potenziale del metallo è portato ad un valore che verifica il seguente equilibrio:

$$i_e = i_c - i_a \quad 2.12$$

Se si aumenta la corrente esterna i_e si ha una diminuzione della corrente anodica i_a e di conseguenza, la densità di corrente esterna che azzerà il processo anodico sarà la densità di corrente di protezione.

La corrente erogata da un anodo si può calcolare tramite la legge di Ohm:

$$I = \frac{\Delta E}{R} \quad 2.13$$

dove:

ΔE lavoro motore disponibile ($E_c - E_a$);

R resistenza totale del sistema.

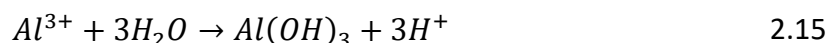
La resistenza totale del sistema è data dalla resistenza dell'elettrolita e la resistenza del conduttore metallico. Quest'ultimo termine di solito viene considerato trascurabile.

2.4.3. Anodi sacrificali

Nella situazione di collegamento fra anodo e struttura, le reazioni anodiche avvengono sugli anodi e posso variare in base al tipo di materiale di cui sono composti e dal tipo di ambiente elettrolitico in cui sono immersi. La reazione chimica sarà dunque quella di dissoluzione del metallo che nel caso di anodi in lega di alluminio sarà:



Seguita poi dalla reazione di idrolisi con conseguente acidificazione dell'ambiente:



La diminuzione del pH è molto importante perché evita la passivazione dell'anodo di alluminio rendendo inefficace la protezione dell'acciaio.

In sostanza quindi la caratteristica fondamentale che deve possedere un anodo è quella di avere il potenziale meno nobile (più negativo) rispetto al potenziale del metallo da proteggere e tanto maggiore sarà questa differenza, migliore sarà l'efficacia della protezione.

Un'altra proprietà fondamentale per un anodo è la capacità di erogare corrente in funzione della propria massa anodica (capacità elettrochimica misurata in [Ah/kg]). Tale parametro è legato al materiale stesso dell'anodo e il fatto che l'alluminio sia tra gli elementi chimici con la più elevata capacità elettrochimica lo rende di fatto il materiale fra i più idonei per gli ambienti off-shore.

2.5. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La progettazione di sistemi di protezione catodica in ambito ingegneristico è basata principalmente sulla consultazione di normative di riferimento che dettano gli standard e i procedimenti da seguire. A livello internazionale le principali società che dettano gli standard per la protezione catodica sono DNV e ISO, ma ogni compagnia petrolifera usa degli standard propri che hanno come base le linee guida delle norme internazionali successivamente aggiornate in base alle esigenze ed esperienze di ogni compagnia. Si possono citare come esempio:

- British petroleum – BS;
- Eni – UNI EN;
- Total – GS;
- Exxon – GP;
- Equinor – TP/NORSOK (fanno riferimento alla ISO);
- Saudi Aramco – SAES;

Per lo sviluppo di questa tesi sono state prese come riferimento le norme internazionali di DNV e ISO e in particolare per la progettazione della CP in ambiente off-shore:

- DNV-RP-B401 Recommended Practice Cathodic Protection Design;
- DNV-RP-F103 Recommended Practice Cathodic Protection of Submarine Pipelines;
- ISO 15589-2 Cathodic protection of pipeline transportation systems - Offshore pipelines.

2.5.1. Parametri di riferimento e procedura empirica di progettazione

La consultazione di queste norme durante la fase di progetto è di fondamentale importanza in quanto fornisce i parametri da utilizzare per la progettazione di un sistema di protezione catodica quali: valori di potenziale di protezione, densità di corrente, coating breakdown factor, capacità elettrochimica e distribuzione degli anodi, in funzione delle diverse situazioni ambientali che si possono trovare.

La procedura empirica che si utilizza per la progettazione di un sistema di protezione catodica per una pipeline in acqua di mare può essere così strutturata:

1. Raccolta di tutti i dati di input di progetto
2. Calcolo del coating breakdown factor
3. Calcolo della corrente richiesta per ricoprire tutta l'area della pipeline
4. Calcolo della massa anodica totale
5. Calcolo della corrente di output di un anodo
6. Calcolo del numero di anodi richiesto

2.6. PROTEZIONE CATODICA DI UN HDD

Per quanto riguarda gli HDD, non sono state ancora definite delle normative a cui fare riferimento ed essendo posizionati nella zona di transizione fra on-shore e off-shore, la sua appartenenza ad una zona o all'altra non è definita in maniera chiara.

Ad oggi la responsabilità della progettazione di sistema di protezione catodica per un HDD è assegnata a chi si occupa di off-shore. Questo è dovuto principalmente al fatto che in genere all'uscita a terra dell'HDD è installato un giunto dielettrico che divide elettricamente la parte on-shore da quella off-shore, rendendo di fatto i due sistemi di protezione (on-shore e off-shore) elettricamente isolati fra loro.

Anche se a livello di responsabilità di progetto questa zona è considerata off-shore, a causa di una serie di problematiche non è possibile applicare la procedura classica di progettazione di sistemi di protezione catodica in ambiente marino.

2.7. LIMITAZIONI SULLA PROGETTAZIONE

Le principali limitazioni sulla progettazione rispetto ad una tipica linea offshore sono dovute alle diverse condizioni di installazione della linea e alle diverse condizioni di funzionamento.

2.7.1. Spaziatura fra gli anodi

La raccomandazione sulla spaziatura massima di 300 metri tra gli anodi per linee interrato, che garantisce la protezione anche in caso di perdita di un anodo, non è applicabile principalmente per due motivi:

- 1) La resistività dei terreni per le pipeline interrato sotto il livello del mare è costante e possiede bassi valori (circa uguali alla resistività del mare), mentre la resistività del terreno sulla linea di costa è molto variabile da zona a zona e può presentare valori anche molto elevati. Siccome una spaziatura di 300 metri considerata sicura è stata calcolata per le condizioni sottomarine, questo non garantisce che lo stesso valga per un terreno sulla costa.
- 2) Per come è stata studiata la metodica di installazione di un HDD, non è possibile posizionare gli anodi lungo la linea nel tratto considerato. Infatti la trazione della tubazione all'interno dello scavo potrebbe danneggiare gli anodi con il rischio che questi si stacchino dalla struttura perdendo così il collegamento elettrico e vanificando il loro compito di protezione.

2.7.2. Danneggiamento del rivestimento anticorrosivo

Ci sono delle differenze anche sulla stima del danneggiamento del rivestimento anticorrosivo, dovuto principalmente dalle operazioni di posa, da considerare. I valori tabulati nelle norme sono stati tarati in funzione della modalità di posa di una condotta sottomarina "classica". Non è stato quindi considerata l'operazione di inserimento della linea nel percorso sotterraneo che crea forti stress sul coating dovuto ad azioni di abrasione fra la superficie del tubo e dello scavo.

2.8. RIVESTIMENTO ANTICORROSIVO “COATING”

Il rivestimento anticorrosivo delle tubazioni è il principale strumento che gli ingegneri hanno per proteggere le tubazioni dalla corrosione. La protezione catodica lavora in cooperazione con il rivestimento e diventa necessaria per proteggere quelle zone in cui quest'ultimo subisce danneggiamento o distacco.

Parlare di “Coating” è molto importante nel campo della progettazione delle pipeline in quanto, oltre all'importante ruolo di protezione che riveste, è determinante anche per quel che riguarda l'impatto che ha sui progetti a livello di costi, tempi e fattibilità.

Esistono svariate tipologie di rivestimento, ognuna con le proprie caratteristiche peculiari che si adattano alle diverse condizioni e vincoli che si vengono a trovare. I vincoli più importanti da rispettare sono la temperatura interna del fluido e i vincoli di installazione.

Di seguito vengono presentati i principali rivestimenti utilizzati per la protezione delle tubazioni metalliche.

2.8.1. Fusion Bonded Epoxy (FBE)

Si tratta di un rivestimento termoindurente di resina epossidica fusa applicata sulla la tubazione (Figura 2.5).

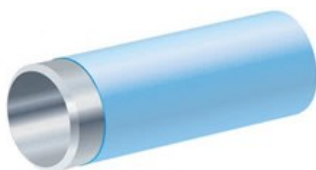


Figura 2.5: Rivestimento in FBE

Ha uno spessore di circa 0,5mm e funge da vera e propria barriera anticorrosiva. È un rivestimento economico ma anche facilmente danneggiabile. Questa sua fragilità non lo rende adatto ad una possibile applicazione come rivestimento per un HDD in quanto le forze abrasive che si sviluppano durante l'installazione lo danneggerebbero oltre ogni limite consentito.

2.8.2. Three Layers Polyethylene/Polypropylene (3LPE - 3LPP)

Sono due tipi di rivestimento a tre strati che presentano molte caratteristiche comuni fra loro a partire dallo spessore di circa 3,5mm (Figura 2.6).

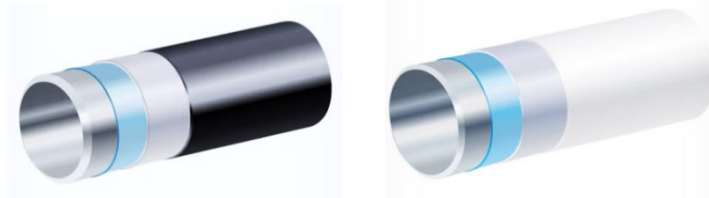


Figura 2.6: A sinistra il rivestimento in 3LPE e a destra in 3LPP

Lo strato a contatto con la tubazione è sempre costituito da resina epossidica fusa, segue uno strato intermedio adesivo e infine lo strato esterno termoplastico che nel primo caso è formato da polietilene mentre nel secondo da polipropilene. Lo strato interno funge da anticorrosivo, lo strato intermedio è impiegato esclusivamente come adesivo, mentre lo strato esterno ha come funzione principale quella di protezione da abrasioni, impatti, attacchi chimici, impermeabilizzazione ecc.

L'utilizzo dell'uno o dell'altro tipo di rivestimento è dato principalmente dalla temperatura di esercizio del fluido interno. Il polietilene è possibile utilizzarlo fino a temperature non superiori a 80°C mentre il polipropilene fino a 110°C. Sono i due tipi di rivestimenti maggiormente si prestano ad essere utilizzati nel caso di applicazioni per HDD grazie alla capacità di resistere alle abrasioni che si verificano in fase di installazione.

2.8.3. Multi-layer

Sono rivestimenti multistrato con uno spessore che può arrivare fino a 100mm (Figura 2.7)

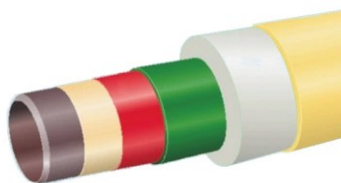


Figura 2.7: Rivestimento Multi-layer

La caratteristica principale che li contraddistingue è l'elevato spessore necessario per garantire un adeguato isolamento termico. Anche in questo caso lo strato interno è formato da FBE, seguito da strati intermedi adesivi e di isolamento termico e uno strato esterno di protezione da eventuali danni fisici.

2.8.4. Concrete

È un tipo di rivestimento formato da due strati che può raggiungere spessori di 100mm (Figura 2.8).

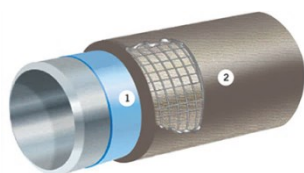


Figura 2.8: Rivestimento in concrete

Il primo strato è il solito FBE necessario per creare una barriera anticorrosiva ed esternamente è posto uno spesso strato di concrete in cui è immersa una gabbia metallica. Questo strato esterno ha due funzioni principali, la prima è di protezione da eventuali urti o abrasioni mentre la seconda funzione è quella di appesantire la tubazione in modo da limitarne i movimenti dovuti alle correnti marine o alle sollecitazioni che potrebbe subire durante la vita di esercizio.

2.9. NECESSITÀ DI UN DIVERSO APPROCCIO

Per tutti i motivi precedentemente elencati è necessario un tipo di approccio diverso che non faccia più riferimento ai valori pratici e alle indicazioni dati dalle normative. È particolarmente utile per questo scopo lo sviluppo di un modello agli elementi finiti applicato al problema elettrochimico.

3. Curve di polarizzazione

3.1. INTRODUZIONE

Le curve di polarizzazione sono delle rappresentazioni grafiche che mettono in relazione la densità di corrente e il potenziale d'elettrodo per una specifica combinazione di elettrodo e elettrolita. Rappresentano il comportamento cinetico delle reazioni elettrochimiche e sono utili per caratterizzare il comportamento di un metallo nelle diverse condizioni operative in cui viene posto.

3.2. RAPPRESENTAZIONE DELLA CURVA

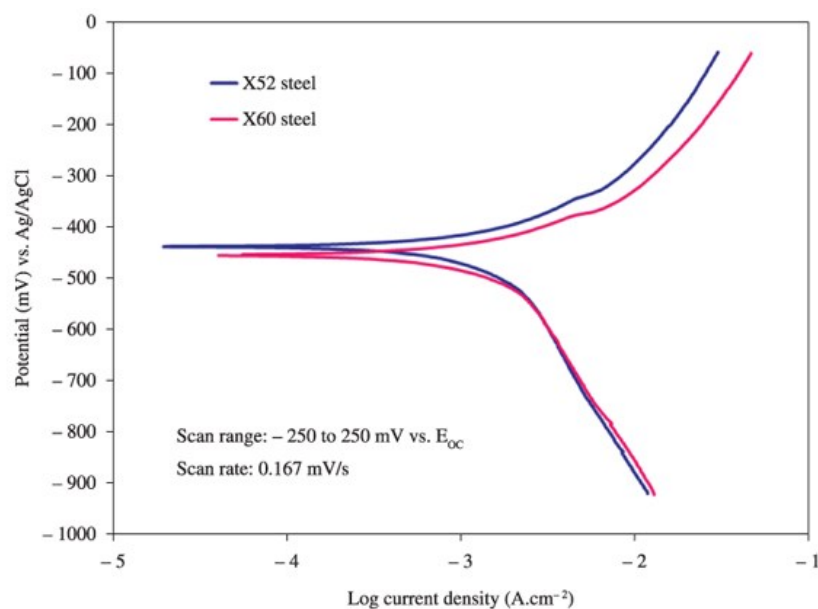


Figura 3.1: Tipica curva di polarizzazione di un acciaio

In Figura 3.1 sono rappresentate le curve di polarizzazione di 2 metalli immersi in acqua di mare; in ascissa è riportato il logaritmo della densità di corrente, mentre in ordinata il potenziale del metallo riferito all'elettrodo Ag/AgCl. Se non ci fosse nessun intervento esterno, la struttura metallica si porterebbe naturalmente ad un potenziale E_{corr} , detto potenziale di libera corrosione, il quale delimita due zone distinte della curva:

- Curva di polarizzazione anodica: è la parte superiore della curva e rappresenta il comportamento anodico del materiale. Si crea una sovratensione anodica e aumenta la densità di corrente fornita dal metallo;
- Curva di polarizzazione catodica: è la parte inferiore in cui si ha comportamento catodico, fornendo corrente dall'esterno, si crea una sovratensione catodica che abbassa il potenziale del metallo.

Affinché il fenomeno della corrosione cessi o rallenti a valori di velocità considerati trascurabili, è necessario portare il potenziale della struttura metallica ad un livello inferiore al potenziale di libera corrosione. Si avrà completa immunità se il potenziale viene portato ad un livello inferiore del potenziale d'equilibrio, mentre se questo non succede, le norme indicano valori di potenziale da raggiungere per i quali la velocità di corrosione sia comunque rallentata ad un valore tale da renderla trascurabile.

3.3. POLARIZZAZIONE ANODI

Gli anodi frequentemente usati in ambiente off-shore, composti da leghe di Alluminio-Zinco-Indio, sono pressoché non polarizzabili. Si può perciò considerare il loro potenziale costante e pari al potenziale di libera corrosione.

3.4. POLARIZZAZIONE PIPELINE (CATODO)

Affinché la pipeline sia protetta, tutta la struttura deve raggiungere un certo valore di potenziale. Per fare ciò è necessario che avvenga la polarizzazione della linea e quindi che scorra una densità di corrente adeguata. Si deve perciò descrivere la relazione tra densità di corrente e sovratensione catodica.

3.5. METODI PER RICAVARE LE CURVE DI POLARIZZAZIONE

Per poter ricavare le curve di polarizzazione di un metallo è necessario un sistema in grado di misurare contemporaneamente la corrente che passa attraverso un elettrodo e il suo potenziale.

È possibile usare un sistema a 3 elettrodi costituito da un elettrodo di lavoro (W) composto dal particolare metallo da analizzare, un elettrodo di riferimento (R) necessario a misurare il potenziale dell'elettrodo di lavoro e un contro elettrodo (C) formato da materiale inerte e necessario per garantire il flusso di corrente nella cella elettrochimica senza che questa circoli nell'elettrodo di riferimento.

Le curve di polarizzazione dovrebbero essere determinate solo dopo che il potenziale dell'elettrodo ha raggiunto un valore stazionario. Il tempo necessario per raggiungere lo stato stazionario dipende in modo significativo dalla natura del sistema.

I metodi di polarizzazione possono essere di tipo potenziodinamico o galvanodinamico: il metodo potenziodinamico consiste nel sottoporre un determinato materiale ad un potenziale variabile nel tempo e ricavarne la corrente, viceversa il metodo galvanodinamico consiste nel far variare la corrente circolante nel tempo e ricavare il potenziale.

3.6. APPLICABILITÀ IN FASE DI DESIGN IN UN HDD

A causa dell'assenza di una normativa che regola la progettazione di un sistema di protezione catodica per un HDD, si rende necessario un approccio più pragmatico.

3.6.1. Scelta della curva

Le curve di polarizzazione forniscono le condizioni al contorno da utilizzare nei modelli matematici per la progettazione di sistemi di protezione catodica delle pipeline e solitamente, in ambito lavorativo, si preferisce usare le curve sperimentali fornite dal manuale "Atlas of Polarization Diagrams for Naval Materials in Seawater" piuttosto che le equazioni di Butler-Volmer o di Tafel che legano potenziale e densità di corrente. La scelta è dovuta al fatto che queste curve sono

riconosciute come quelle che meglio rappresentano il comportamento dell'acciaio in ambiente marino.

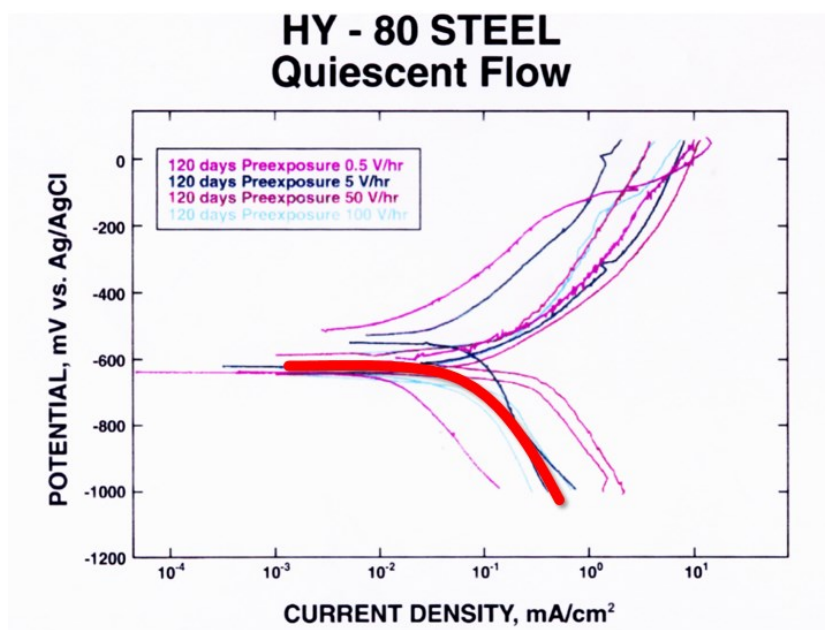


Figura 3.2: Curve di polarizzazione per acciai in ambiente marino

In figura la curva di polarizzazione che rappresenta meglio il comportamento dell'acciaio è quella evidenziata in rosso, ricavata a seguito di una pre-esposizione all'acqua di mare di 120 giorni. La curva si ricava manualmente identificando 5 o 6 coppie di punti che la interpolano.

3.7. OFFSET CURVA DI POLARIZZAZIONE

Solitamente in un approdo a mare si utilizzano le norme che regolamentano la protezione catodica in ambiente off-shore. In questo caso l'HDD può essere considerato come una tubazione interrata.

- Potenziale di protezione

La struttura è considerata protetta quando viene portata ad un potenziale E minore o uguale a -800mV vs Ag/AgCl in acqua di mare.

- **Densità di corrente**

Per una struttura completamente interrata, si richiede una densità di corrente di almeno 20 mA/m².

Viene perciò effettuato un offset della curva di interesse in modo da avere una densità di corrente di 20 mA/m² ad un potenziale di -800mV e scalando di conseguenza tutti gli altri valori che interpolano la curva.

3.8. APPROCCIO AL COATING BREAKDOWN FACTOR

Un altro parametro di difficile valutazione nella progettazione di un HDD è il Coating Breakdown Factor, cioè il valore di danneggiamento del rivestimento anticorrosivo. Le operazioni di trazione della struttura all'interno dello scavo possono creare danneggiamenti più o meno rilevanti al rivestimento ma, una volta installata la struttura, non c'è modo di verificarne l'entità.

Dato che l'operazione di messa in posa risulta essere molto stressante per il rivestimento, può essere conveniente valutare il tipo di coating considerando le proprietà di resistenza all'abrasione dei materiali usati. È infatti molto probabile che durante la trazione della tubazione all'interno del foro, il rivestimento strisci creando dei danni e portando a contatto con l'ambiente circostante il metallo nudo. Questo può aumentare considerevolmente il coating breakdown factor, e di conseguenza la corrente necessaria alla polarizzazione della struttura.

Per tenere in considerazione anche questo parametro si fa un'ulteriore scalatura della curva di polarizzazione, moltiplicando i punti di interpolazione della curva per la percentuale di danneggiamento considerato.

4. Resistività dei terreni

4.1. INTRODUZIONE

Un parametro fondamentale per il dimensionamento di un sistema di protezione catodica è la resistenza elettrica dell'ambiente che le correnti di protezione erogate dal sistema anodico devono attraversare. Data la grande disuniformità di tipologie di terreni in cui può essere installato un HDD, risulta di fondamentale importanza eseguire test di misura di resistività del terreno lungo il percorso della pipeline. La resistività influenza in maniera consistente le prestazioni di un sistema di protezione catodica e questo parametro diventa ancor più vincolante rispetto ad una classica metodologia di progettazione in acqua di mare. Infatti, consultando le normative normalmente utilizzate per la progettazione in ambiente marino, non è possibile sapere se la corrente proveniente dagli anodi riesce a raggiungere la superficie metallica da proteggere che si trova immersa in un ambiente con resistività elettrolitiche rilevanti come nel caso degli approdi a mare.

È necessario quindi adottare un sistema alternativo alla classica metodologia di progettazione in ambito off-shore in modo tale che la resistività dell'ambiente venga opportunamente considerata.

4.2. METODI DI MISURA DELLA RESISITIVITÀ

Una breve panoramica sui metodi di misura di resistività è necessaria per poter comprendere le motivazioni di certe scelte semplificative che verranno poi effettuate in fase di progetto, ma non si approfondirà in maniera dettagliata l'argomento in quanto uno studio più approfondito esula dallo scopo di questa tesi.

4.2.1. Indagini geoelettriche

Le indagini geoelettriche sono tra i metodi geofisici più utilizzati per lo studio del sottosuolo e per la determinazione sperimentale dei valori di resistività elettrica che lo caratterizzano. Si tratta di una tipologia di indagini non invasive in quanto non prevedono la distruzione del suolo attraverso scavi o perforazioni.

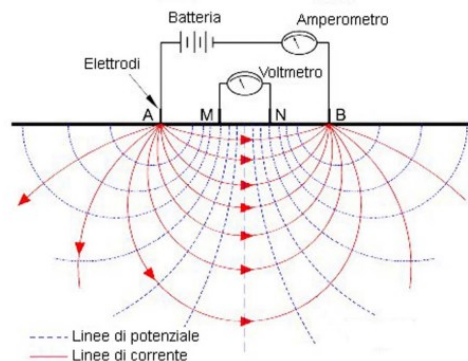


Figura 4.1: Apparato di misura della resistività di un terreno

Mediante utilizzo di una strumentazione adeguata (Figura 4.1) si fa passare corrente elettrica nel terreno con degli appositi elettrodi e si ricava il valore di caduta di potenziale dovuto alla resistenza del terreno al passaggio di questa corrente. Attraverso un'inversione dei dati acquisiti tramite software, si risale ai valori di resistività dei terreni. La relazione che lega questi dati è:

$$\rho_a = K \frac{V}{I} \quad 4.1$$

dove:

- ρ_a resistività apparente del terreno;
- K fattore geometrico che dipende dalla disposizione degli elettrodi;
- V valore misurato di potenziale;
- I corrente erogata.

Dai valori di resistività apparente misurati in vari punti, si stima il valore di resistività reale dei diversi strati di terreno.

La strumentazione di misura è fondamentalmente composta da:

- Un sistema per la generazione di corrente (batteria o generatore di corrente);
- Due elettrodi per l'immissione nel terreno della corrente prodotta;
- Due elettrodi per la misura della differenza di potenziale che si crea;
- Degli strumenti di misura dell'intensità di corrente immessa e della differenza di potenziale che si viene a creare.

Esistono 3 configurazioni di misura principali che si possono applicare, in funzione del tipo di misura che si deve andare ad effettuare.

4.2.2. Configurazione Wenner

È una configurazione di tipo simmetrico in cui gli elettrodi vengono posizionati in linea, equidistanti l'uno dall'altro (Figura 4.2).

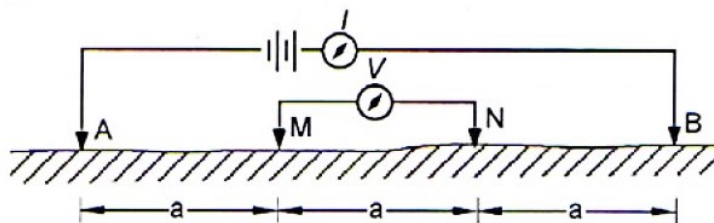


Figura 4.2: Configurazione Wenner

Si fa passare corrente fra gli elettrodi esterni A e B e si misura la differenza di potenziale fra gli elettrodi interni M e N. Aumentando la spaziatura fra gli elettrodi si aumenta la profondità di ispezione.

4.2.3. Configurazione Schlumberger

La configurazione può essere di tipo simmetrico o asimmetrico e gli elettrodi non sono più equidistanti come si può vedere dalla Figura 4.3.

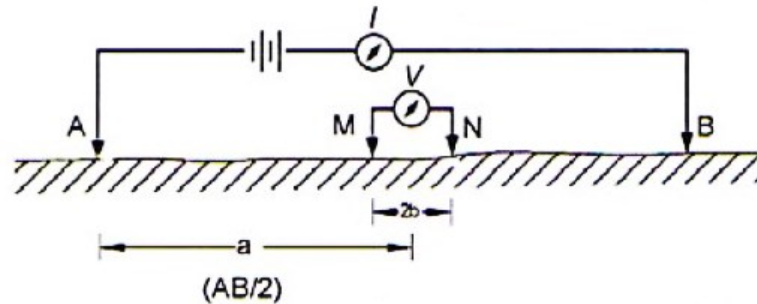


Figura 4.3: Configurazione Schlumberger

Anche in questo caso la corrente passa tra gli elettrodi A e B e la differenza di potenziale si misura tra M e N. Per aumentare la profondità di ispezione si aumenta la distanza fra gli elettrodi A e B mantenendo costante la distanza fra M e N entro certi limiti, superati i quali si dovrà aumentare anche la distanza fra M e N.

4.2.4. Configurazione Dipolo-dipolo

In questa particolare configurazione, in Figura 4.4, gli elettrodi formano coppie separate tra loro.

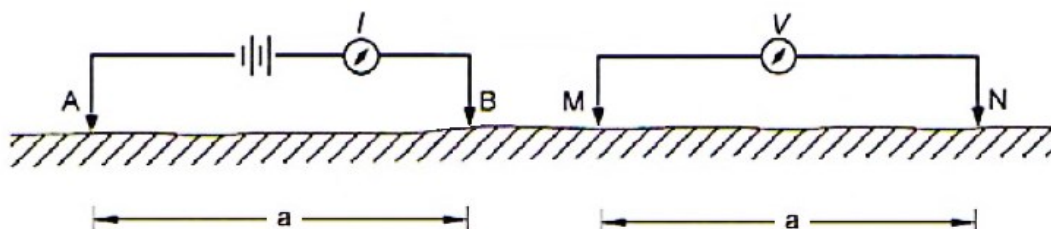


Figura 4.4: Configurazione dipolo-dipolo

Gli elettrodi di misura del potenziale M ed N sono al di fuori della linea che congiunge gli elettrodi di corrente A e B. Le diverse misurazioni si effettuano allontanando le coppie di elettrodi fra loro.

4.3. METODI DI MISURA

I metodi di misura utilizzati si differenziano in base al tipo di analisi che si vogliono eseguire e in base al tipo di tecnologie utilizzate.

4.3.1. Sondaggio elettrico verticale (SEV)

Il sondaggio elettrico verticale è un tipo di indagine che permette di apprezzare variazioni verticali di resistività e ottenere una stratificazione del terreno in funzione della profondità. La configurazione Wenner è particolarmente adatta per questo tipo di indagine e si realizza effettuando varie misurazioni di potenziale, aumentando la profondità di ispezione allontanando tra loro gli elettrodi. In questo modo il flusso di corrente penetra sempre più profondamente nel sottosuolo, in modo da poter ricavare i valori di resistività degli strati più profondi.

4.3.2. Sondaggio elettrico orizzontale (SEO)

È un tipo di indagine geoelettrica che evidenzia le variazioni di resistività laterali nel terreno. Si esegue mantenendo una spaziatura fissa tra gli elettrodi delle configurazioni precedentemente analizzate, eseguendo diverse misurazioni procedendo lungo un percorso rettilineo.

4.3.3. Tomografia elettrica (ERT)

Si tratta di una evoluzione tecnologica dei metodi di indagine precedentemente analizzati. Infatti anziché usare solo 4 elettrodi, si installano nel terreno un set di elettrodi (anche centinaia) che sono collegati ad un'unità di energizzazione e acquisizione dati e tutti possono funzionare alternativamente sia come elettrodi di corrente che come elettrodi di potenziale. Anche in questo caso le configurazioni possono essere di tipo Wenner, Schlumberger o dipolo-dipolo. Posizionando gli elettrodi lungo una linea retta si può ottenere un vero e proprio profilo di resistività bidimensionale come in Figura 4.5 (tomografia 2D), invece posizionandoli secondo geometrie variabili e tramite una complessa elaborazione software, si ottengono profili tridimensionali (tomografia 3D).

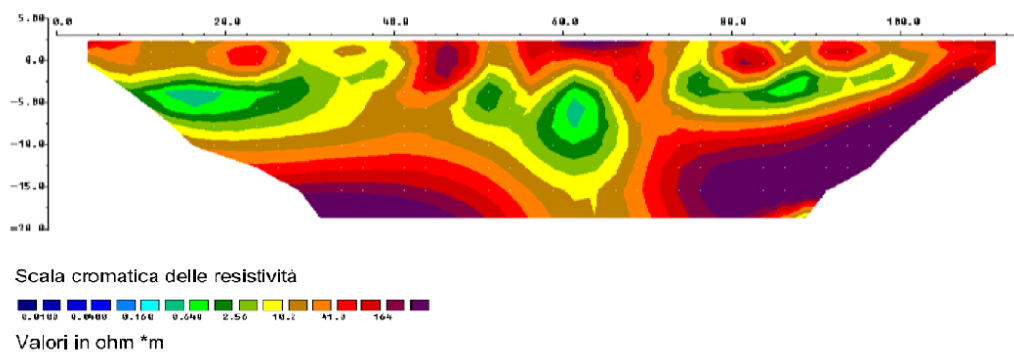


Figura 4.5: Output della tomografia elettrica 2D

4.3.4. Caratterizzazione geologica

Le indagini geoelettriche non forniscono un risultato veritiero al 100% ma sono sempre il frutto di molte semplificazioni. È perciò necessario affiancare a questo tipo di analisi delle misurazioni di tipo geologico attraverso prove in situ (carotaggi) per analizzare la struttura del terreno in modo da verificare l'attendibilità dei risultati ed eventualmente migliorarne l'accuratezza.

4.4. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DELLA RESISTIVITÀ

L'interpretazione dei valori di resistività deve essere condotta con la massima prudenza. La resistività del suolo dipende infatti da svariati fattori quali porosità, umidità, presenza di elettroliti, temperatura, presenza di sostanze organiche, etc. Si riportano ad esempio alcune classi di materiali con le relative resistività associate.

Come si può osservare dai valori riportati in Tabella 4.1, la resistività per ogni tipologia di materiale è fortemente variabile, anche di svariati ordini di grandezza.

Prendere in considerazione questo aspetto diventa fondamentale per la costruzione dei modelli virtuali che servono per svolgere le simulazioni al computer e in funzione delle casistiche, si renderà necessario effettuare semplificazioni più o meno complesse.

Tabella 4.1: Valori tipici di resistività di acque e terreni

Materiale	Resistività ρ [Ωm]
Acqua	10÷100
Acqua di mare	2÷3
Arenarie	60÷10 ⁴
Argille	1÷120
Calcari	300÷10 ⁴
Dolomie	50÷10 ³
Granito	100÷10 ⁶
Marmo	100÷10 ⁸
Sabbie e ghiaie	500÷10 ⁴

4.5. ANALISI DELLA RESISTIVITÀ DI APPRODI A MARE

Vengono ora presentati alcuni casi di studio di resistività di terreni dai quali si andranno poi ad estrapolare i dati per la costruzione dei modelli. Si tratta di studi di alcuni approdi a mare cioè la zona di installazione degli HDD, situati in zone geografiche lontane l'una dall'altra (Figura 4.6) in modo da rendere l'analisi il più eterogenea possibile ed eventualmente poter determinare similitudini nei vari contesti. Le zone geografiche di studio sono:

1. Brasile;
2. Messico;
3. Sardegna, Italia;
4. Marche, Italia;
5. Puglia, Italia;
6. Qatar;
7. Indonesia;

I dati disponibili sulla resistività di ogni terreno sono dipendenti dal tipo di analisi che sono state effettuate. Non sempre si hanno a disposizione report estremamente dettagliati e a seconda dei casi è necessario adattare semplificazioni più o meno grandi.



Figura 4.6: Localizzazione geografica dei casi di studio

4.5.1. Brasile

Il primo luogo ad essere analizzato è l'approdo in Brasile, nel quale è già stato realizzato un HDD. Viene fornito un profilo di resistività del terreno che si sviluppa per una lunghezza di circa 1200m ed una profondità di ispezione di 50 metri sotto il livello del mare.

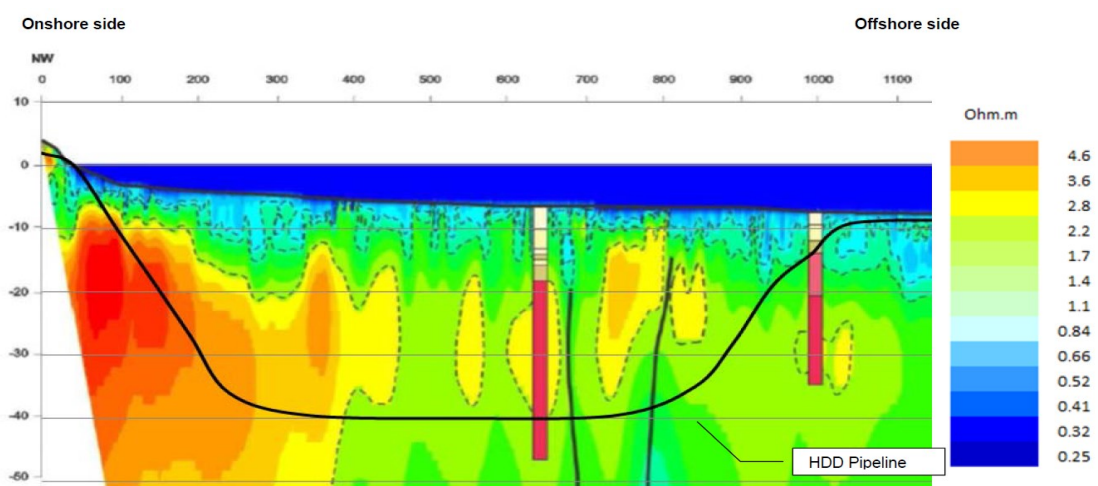


Figura 4.7: Valori di resistività compresi fra 0 e 5 Ω m

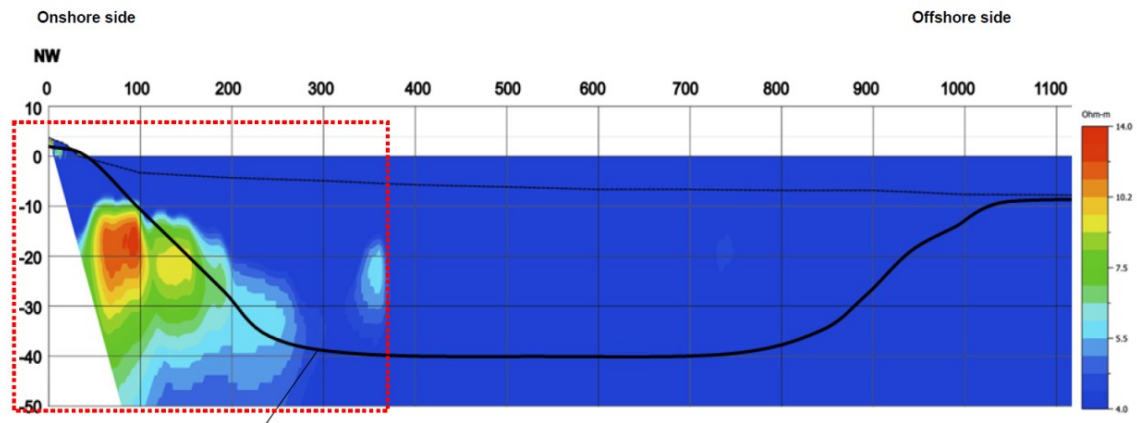


Figura 4.8: Valori di resistività compresi fra 4 e 14 Ωm

Le due immagini mettono in evidenza due range di resistività diversi dello stesso profilo, la Figura 4.7 evidenzia le differenze da 0 a 5 Ωm mentre la Figura 4.8 varia da 4 a 14 Ωm . In linea generale si può già affermare che questo tipo di terreno presenta dei valori di resistività piuttosto bassi considerando che il valore massimo registrato è 14 Ωm . Questo è un aspetto che contribuisce positivamente a garantire un ottimale funzionamento del sistema di protezione catodica.

Dalla prima immagine si può notare la netta separazione fra acqua marina che possiede valori di resistività molto bassi, dal terreno sottostante, il quale possiede un profilo di resistività molto costante eccetto per la parte verso terra in cui è presente una zona a resistività maggiore. Quest'ultima zona viene evidenziata in maniera netta nella seconda immagine e si tratta della parte iniziale sotto la linea di costa.

4.5.2. Messico

La seconda zona è situata nel golfo del Messico e data l'estensione della zona oggetto di studio, sono state eseguite diverse misurazioni che possono essere suddivise e schematizzate nel modo seguente:

- Zona 1 "interna" da 1600 a 1200 metri dalla costa;
- Zona 2 "intermedia" da 1200 metri fino alla costa;
- Zona 3 "mare" dalla costa fino a 1200m al largo.

Nella prima zona sono state fatte due tipologie di misurazioni la tomografia elettrica di resistività (ERT) e i sondaggi elettrici verticali (SEV). La prima analisi è stata svolta lungo 5 percorsi evidenziati in Figura 4.9, per una lunghezza di 400m e una profondità di ispezione di circa 30 metri.

Sono stati realizzati anche 10 sondaggi elettrici verticali svolti configurazione Schlumberger (Figura 4.11), i quali sono serviti per avere una maggior profondità di indagine (fino a 200m).

Entrambe le analisi (Figura 4.10 e Figura 4.12) mettono in risalto una zona superficiale, dal piano di campagna a circa 20 m di profondità, caratterizzata da altissime resistività con valori che si aggirano intorno ai 1000 Ωm , sovrapposto ad un secondo strato di circa 80 m avente valori di resistività di circa 25-50 Ωm e infine lo strato inferiore di circa 50 metri con una resistività media di 5-10 Ωm

Le analisi al di sotto dei 100 m di profondità non sono state prese in considerazione durante la prima fase di studio in quanto poco attendibili.

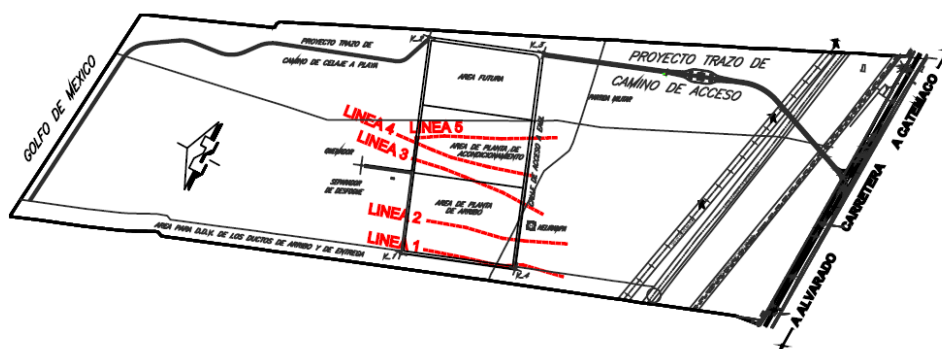


Figura 4.9: Vista in pianta della zona di ispezione

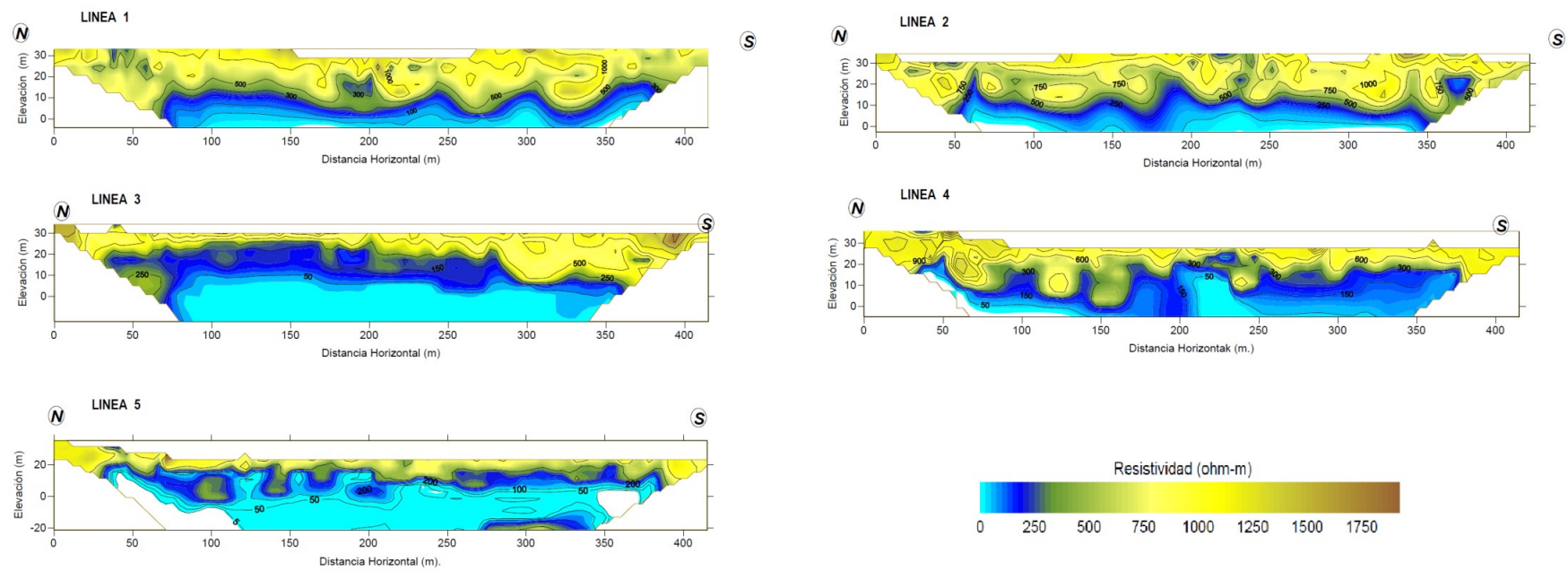


Figura 4.10: Mappe di resistività delle 5 linee di analisi

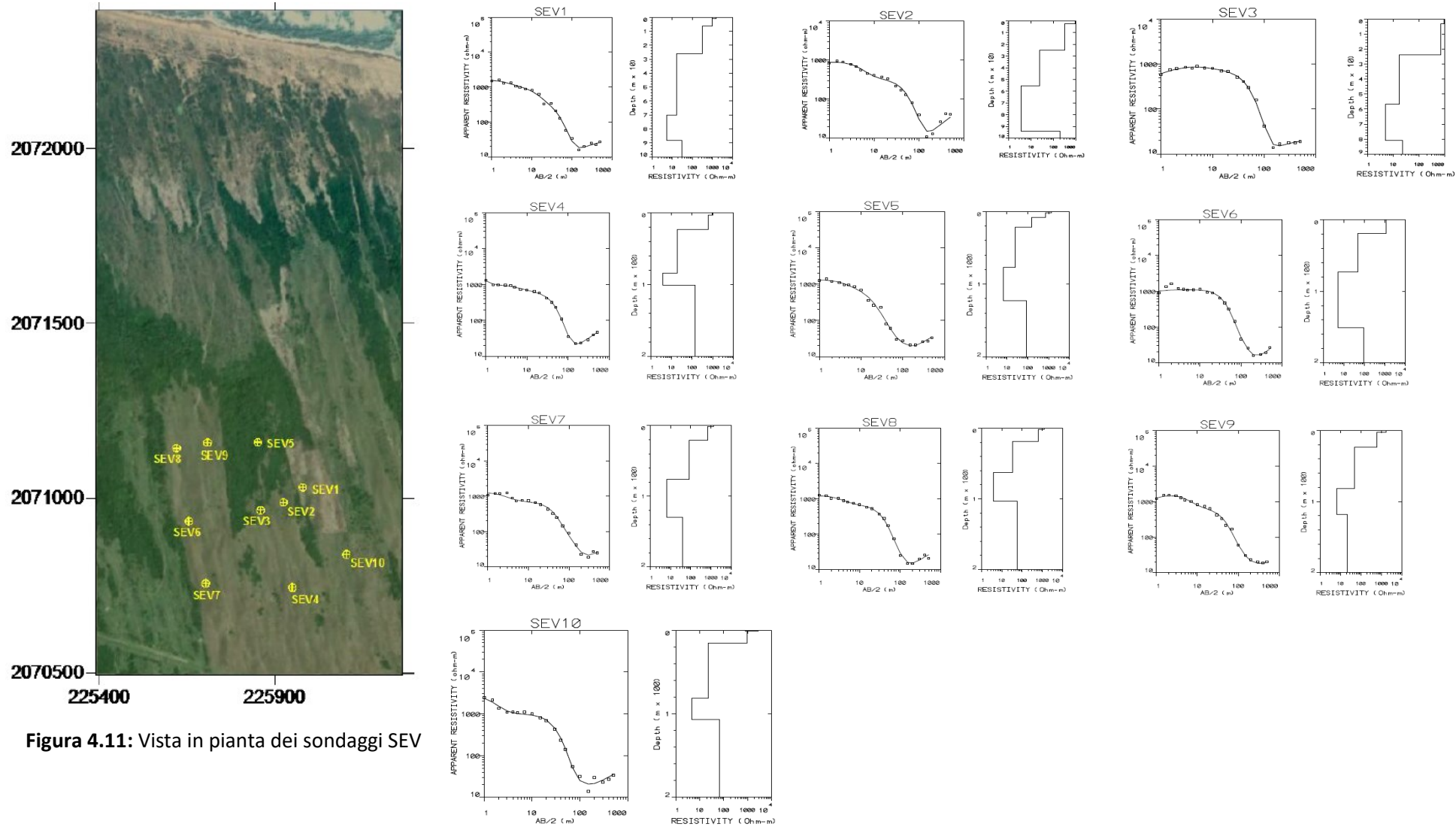


Figura 4.11: Vista in pianta dei sondaggi SEV

Figura 4.12: Sondaggi elettrici verticali (SEV)

La seconda zona è stata investigata tramite 3 tomografie elettriche di resistività di lunghezza di circa 1200m e tramite 5 pozzi di analisi geotecniche.

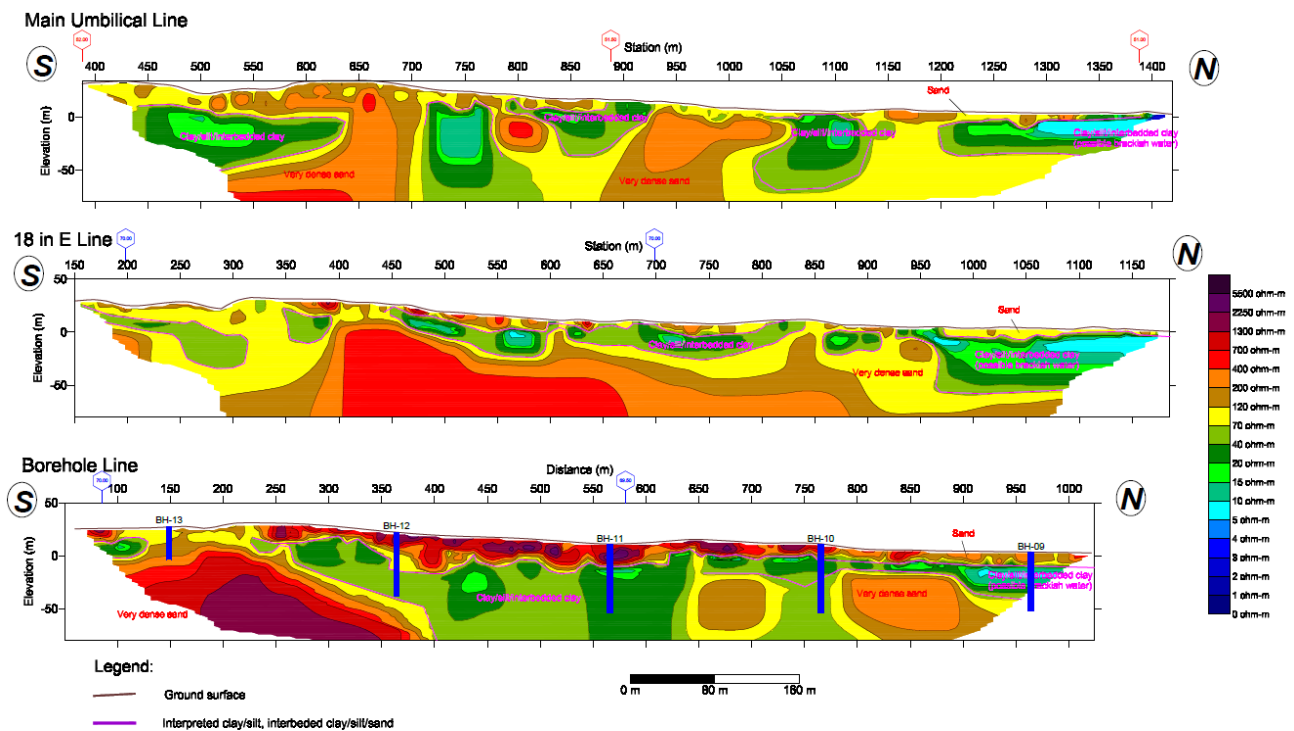


Figura 4.13: Profili di resistività della zona 2

Come si può evidenziare dai profili di resistività (Figura 4.13), il terreno è estremamente eterogeneo e presenta una vasta gamma di valori che vanno da 10 Ω m nei punti più vicini alla linea di costa fino anche a valori superiori a 2000 Ω m nelle zone più interne.

Si può notare che il terzo profilo è stato analizzato lungo la linea che collega i pozzi di analisi geotecniche e quindi si può considerare come il più rappresentativo della reale struttura del terreno sottostante in quanto i dati raccolti possono essere reinterpretati e ricalibrati in base alle analisi di composizione del terreno. Si può osservare una zona superficiale estremamente resistiva i cui valori si aggirano intorno ai 1000 Ω m, sotto la quale sono presenti zone più o meno vaste che variano da 40 a 220 Ω m. Nella parte più a sud invece è posizionata un'ulteriore zona ad altissima resistività (superiore a 1000 Ω m).

La terza zona va dalla linea di costa fino a 1200 m verso il mare. Anche in questo caso è stata eseguita una tomografia elettrica di resistività lungo la linea di congiunzione di 4 pozzi di analisi geotecniche (Figura 4.14).

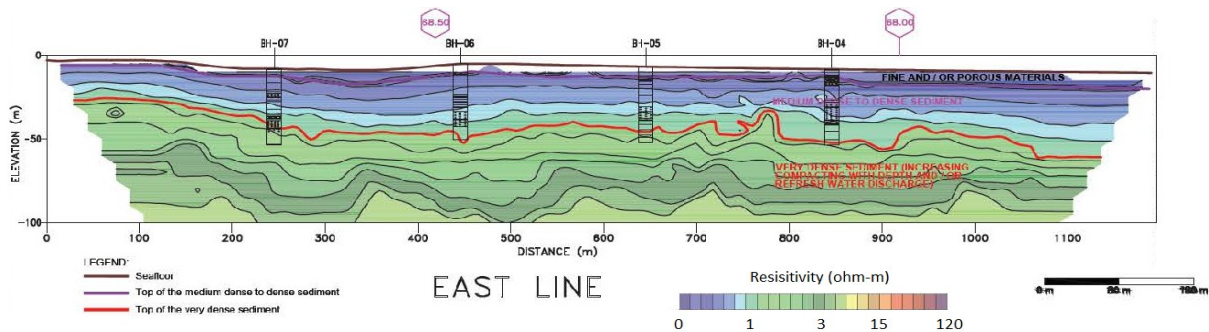


Figura 4.14: Profilo di resistività della zona a mare

Sotto il fondale marino sono presenti 3 classi di materiali. Il più superficiale, fino e poroso, ha una resistività molto bassa, nell'ordine di 0,2 Ω m; il secondo strato presenta sedimenti di media densità aventi resistività di circa 1 Ω m e per finire un terzo strato, molto denso e compatto, che presenta una densità di circa 3-4 Ω m.

Le 3 zone saranno successivamente unite in modo da considerare un unico profilo di resistività su cui poi si potrà sviluppare il modello geometrico per l'analisi software.

4.5.3. Olbia, Italia

Nell'approdo di Olbia in Sardegna, per l'installazione di un microtunnel, sono state effettuate 3 tomografie elettriche di resistività, una perpendicolare alla costa per una lunghezza di 500 m e circa 25 m di profondità (Figura 4.16) e le altre due parallelamente alla costa, intersecando la prima nei punti C e D (Figura 4.17) e aventi una lunghezza di 120m e una profondità anch'essa di 25 m.

Il terreno presenta, in linea di massima, una resistività che aumenta spostandosi verso l'interno con valori massimi intorno a 200 Ω m e diminuisce spostandosi verso il mare fino a valori di 1 Ω m. Inoltre è presente una zona ad altissima resistività superficiale nei primi metri dalla linea di costa ed anche ad una profondità di 15 metri.



Figura 4.15: Vista in pianta della zona di analisi

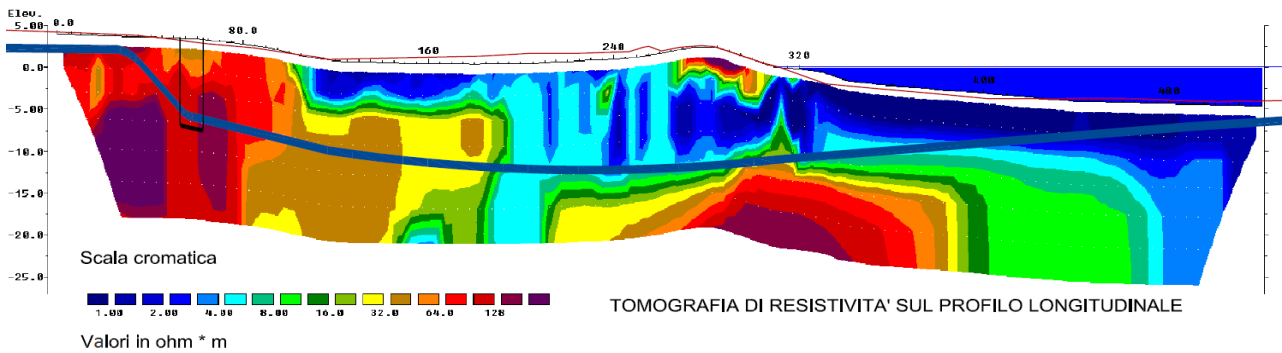


Figura 4.16: Profilo di resistività lungo la linea

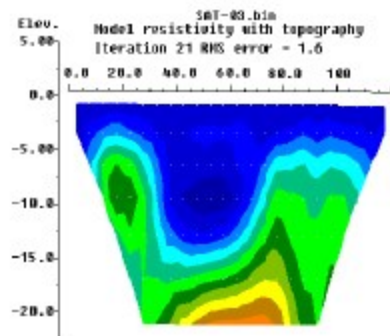
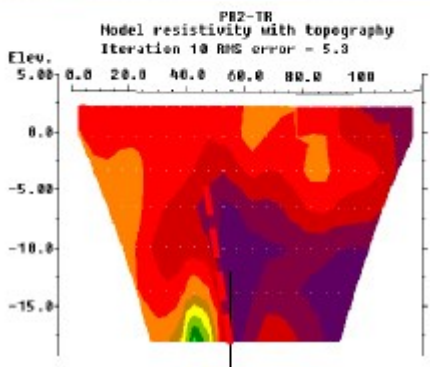
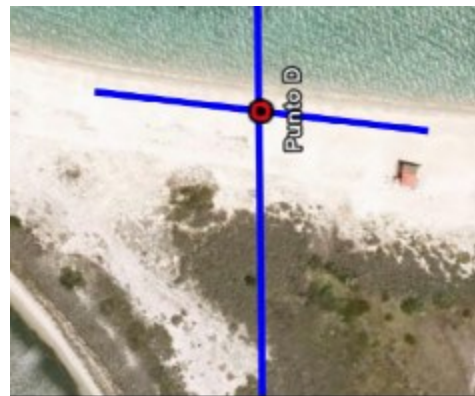
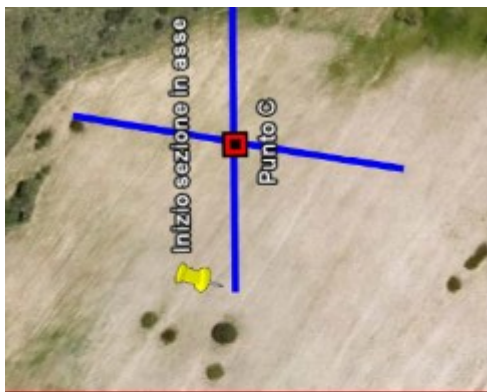


Figura 4.17: Profili di resistività delle sezioni trasversali

4.5.4. Falconara, Italia

È stata eseguita un'analisi di resistività nella costa di Falconara per la realizzazione di un microtunnel tra la zona imprese e l'area esterna della raffineria (Figura 4.18).



Figura 4.18: Vista dall'alto e in pianta della raffineria

Sono state fatte due ipotesi di approdo (Figura 4.19) e per ognuna è stata eseguita una tomografia elettrica di resistività. L'analisi è stata eseguita su due linee parallele di lunghezza pari a 500 m per una profondità di circa 20 m.

Come si può vedere dai profili di resistività ricavati (Figura 4.20), si hanno due situazioni molto simili. Nel fondale marino è presente una stratificazione orizzontale terreno che può essere suddiviso in 2; il primo strato formato principalmente da limi sabbiosi è a bassa resistività con valori inferiori a 1 Ωm , mentre il secondo strato formato da depositi ghiaiosi e sabbie litoranee è ad alta resistività con valori intorno a 200 Ωm .

Per la parte a terra invece si hanno valori di resistività intorno a 50-100 Ωm eccetto che per le zone in cui sono presenti delle infiltrazioni di acqua salata, in cui la resistività scende drasticamente intorno a 1-2 Ωm .

Da una prima analisi sembrerebbe che il profilo PR1/PR1-H abbia valori di resistività più bassi, soprattutto sotto il fondale marino, dove il secondo strato ad alta resistività è decisamente ridotto rispetto al profilo PR"/PR2-H.

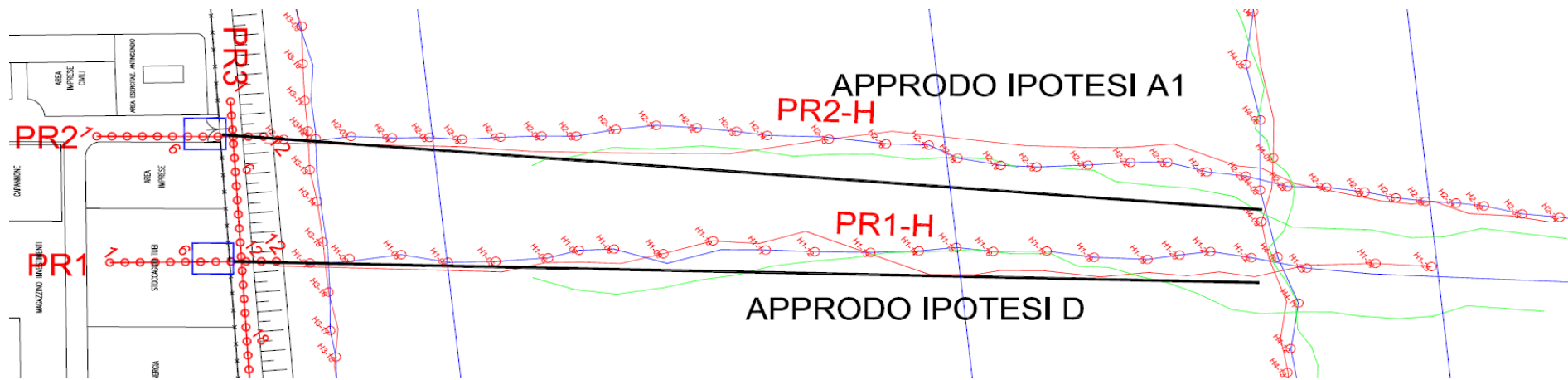


Figura 4.19: Diverse ipotesi di approdo a terra

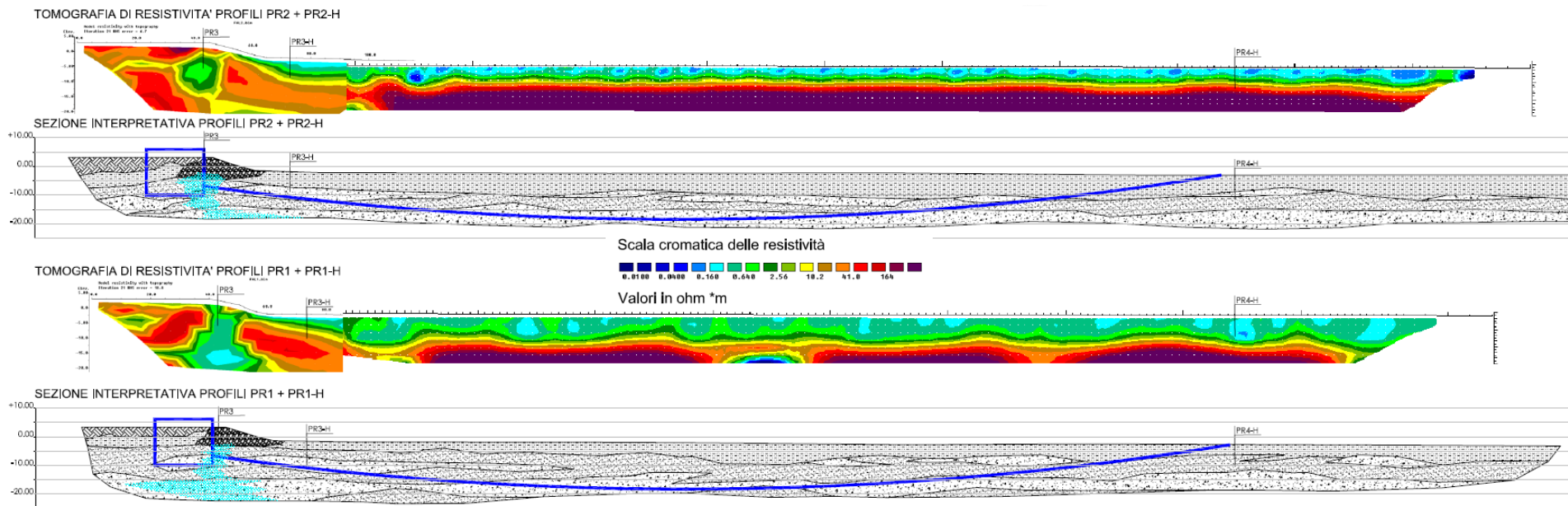


Figura 4.20: Profili di resistività delle due linee in analisi

4.5.5. Puglia, Italia

Sono state realizzati 3 profili TES (tomografia elettrica di superficie) per una lunghezza totale investigata di 680 m fino ad una profondità dal punto di campagna di 20 m.

I profili del terreno sono presentati da Est a Ovest, eccetto il Profilo 2, orientato NNO-SSW (Figura 4.21). I risultati indicano la presenza di un assetto geologico a stratificazione orizzontale, con:

- Uno strato superficiale di suolo di spessore variabile da 1-2 m a 5 m;
- Uno strato roccioso ad alta resistività ($150 \div 900 \Omega\text{m}$) di spessore fino a 5 m;
- Uno strato acquifero a bassa resistività ($< 150 \Omega\text{m}$)



Figura 4.21: Vista dall'alto della zona di analisi

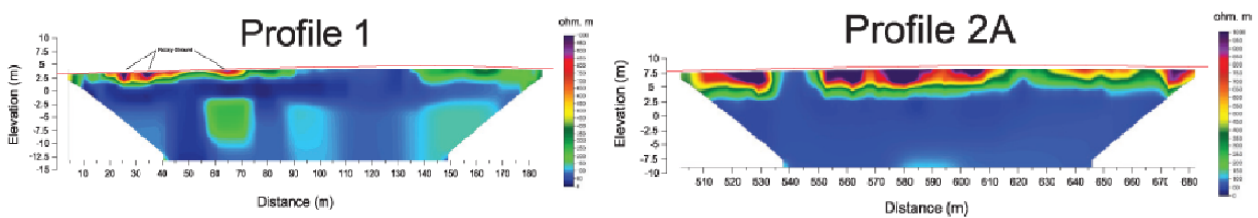


Figura 4.22: Profili 1 e 2A di resistività

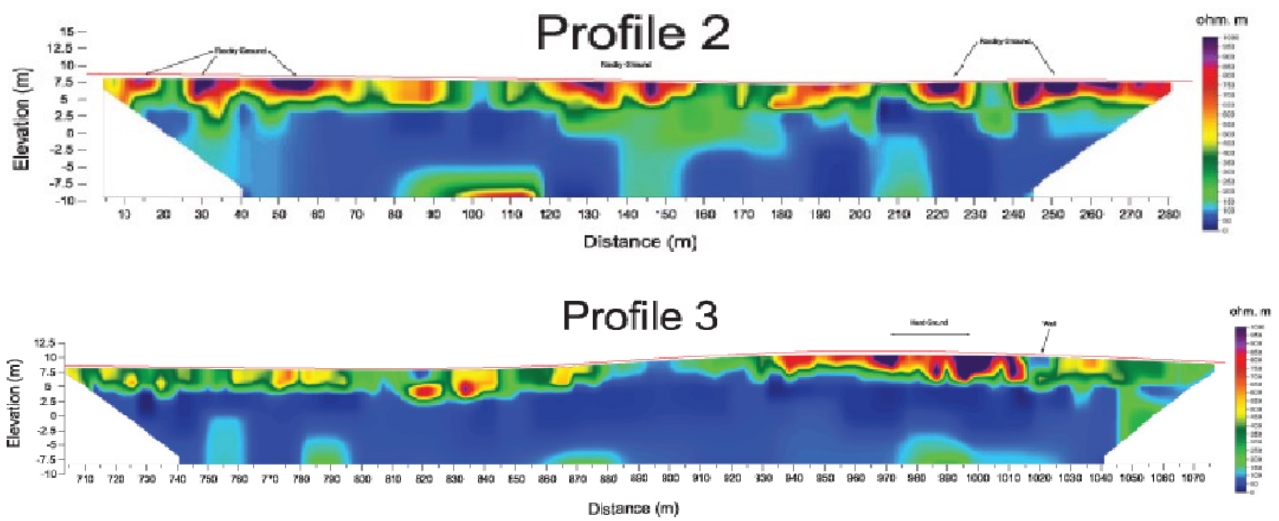


Figura 4.23: Profili 2 e 3 di resistività

4.5.6. Qatar

Sono state eseguite 4 misurazioni SEV con configurazione Wenner lungo una linea di circa 4500 m ad una profondità di 10 m (Figura 4.24). Le misurazioni hanno messo in luce un assetto geologico a stratificazione orizzontale:

- Uno strato superiore di circa 2 m con una resistività di 80 Ωm ;
- Un secondo strato di 2 m di profondità con resistività variabile da 40 a 300 Ωm ;
- Un ultimo strato di circa 8m a bassa resistività abbastanza costante e pari a 25 Ωm .

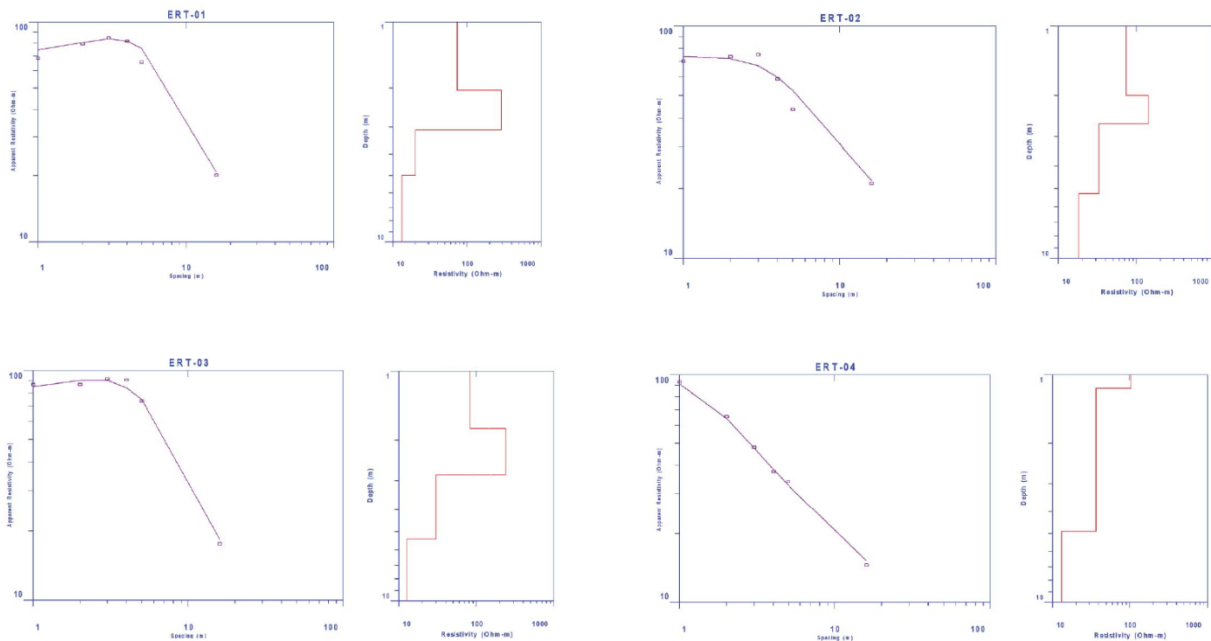


Figura 4.24: Sondaggi elettrici verticali

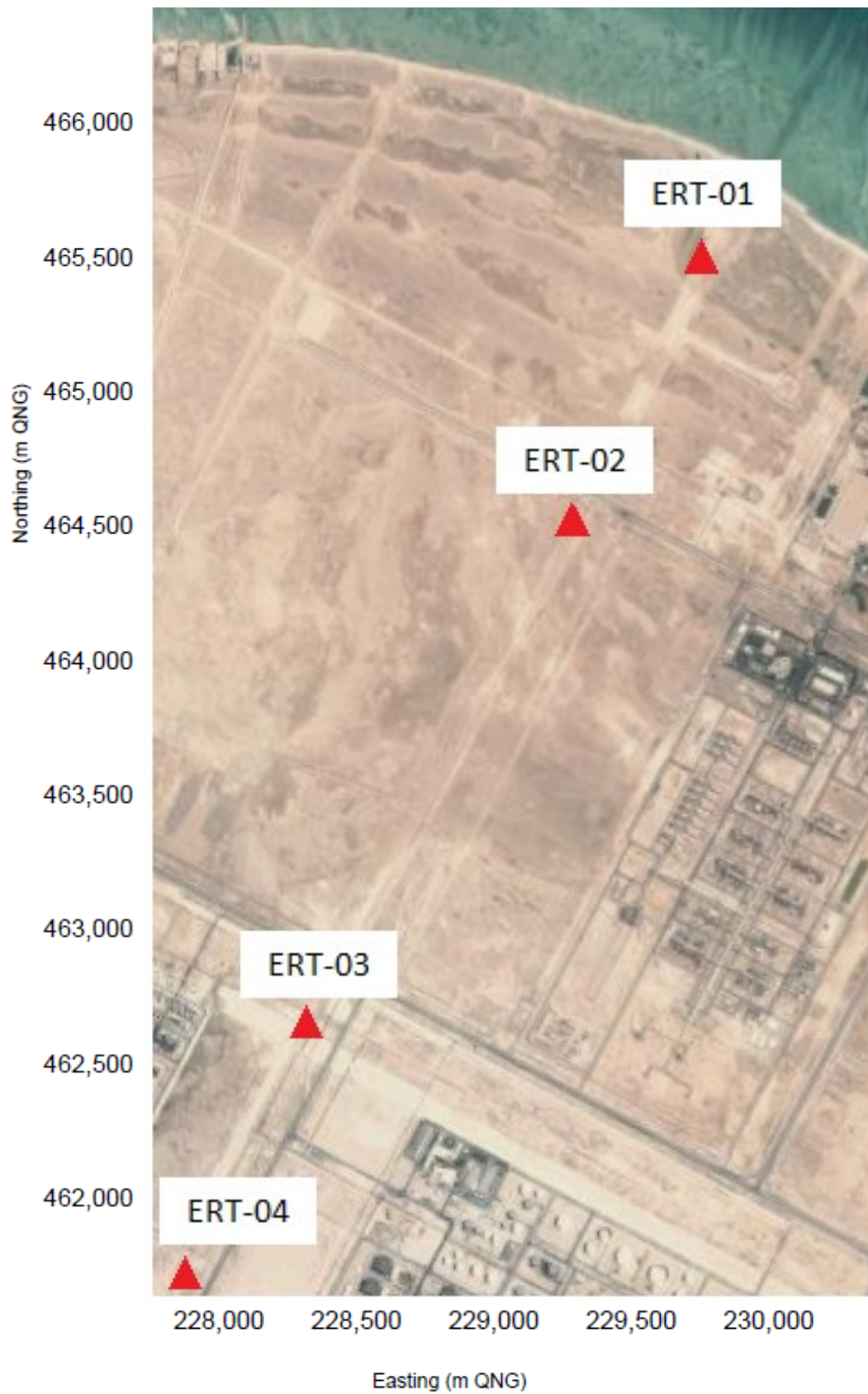


Figura 4.25: I 4 punto di analisi visti dall'alto

4.5.7. Indonesia

Anche in questo caso sono stati eseguiti dei Sondaggi Elettrici Verticali (SEV). Sono stati analizzati 3 punti A, B, C per una lunghezza complessiva di 200 metri, ognuno con una profondità di indagine di 10 metri (Figura 4.26). I 3 punti scelti sono a 3 diverse altitudini, il punto A si trova a 25 m s.l.m., il punto B a 7 m s.l.m. e infine il punto C a 2 m s.l.m.

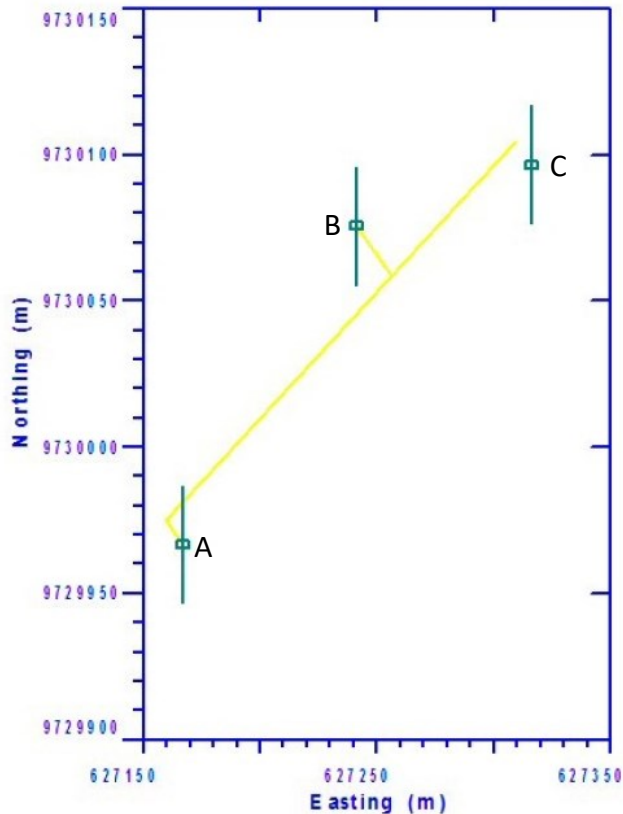


Figura 4.26: Coordinate dei punti di analisi

Dal momento che i punti di analisi sono così pochi si analizzeranno separatamente e infine si cercherà di realizzare una mappa di resistività molto semplificata.

- PUNTO A

Tabella 4.2: Caratteristiche del terreno nel punto A

ρ [Ωm]	Spessore	Profondità	Quota [s.l.m.]
1022.3	1.1821	1.1821	25.089
177.01	0.35418	1.5363	24.735
9.6383	-	-	-

Dalla Tabella 4.2 si nota che il primo metro di terreno è caratterizzato da un valore di resistività intorno a 1022 Ωm , a cui segue uno strato spesso circa mezzo metro con resistività di 177 Ωm ed infine l'ultimo strato presenta una resistività di circa 10 Ωm .

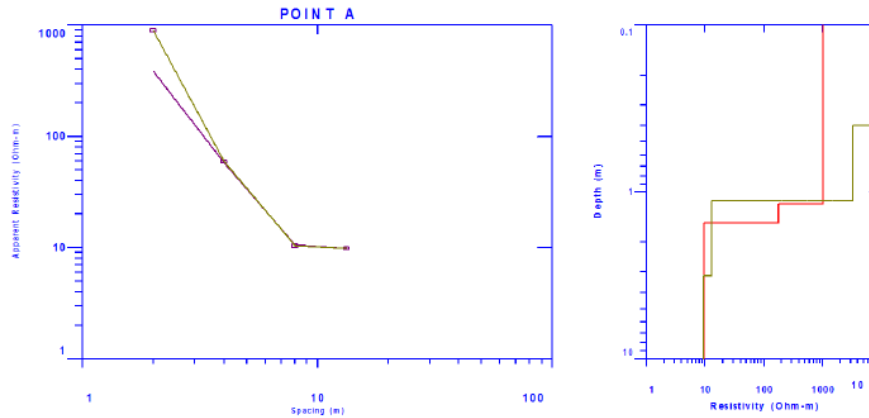


Figura 4.27: Sondaggio elettrico verticale nel punto A

- PUNTO B

Tabella 4.3: Caratteristiche del terreno nel punto B

ρ [Ωm]	Spessore	Profondità	Quota [s.l.m.]
41.007	1.1218	1.1218	7.6422
6.9304	1.8437	2.9655	5.7985
5.9121	-	-	-

Anche in questo caso (Tabella 4.3) è presente uno strato superficiale di terreno di spessore 1 m con resistività più alta degli strati inferiori, circa 40 Ωm . Un secondo strato sottostante di 2 metri di spessore con resistività di circa 7 Ωm e infine un ultimo strato di circa 6 Ωm .

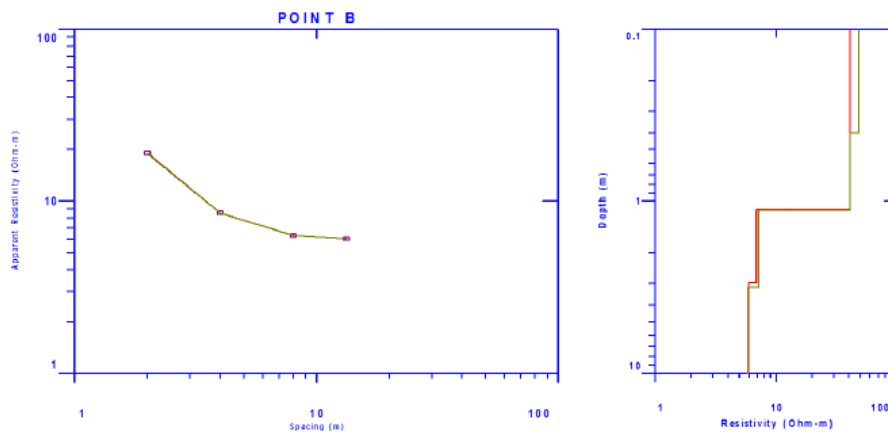


Figura 4.28: Sondaggio elettrico verticale nel punto B

- PUNTO C

Tabella 4.4: Caratteristiche del terreno nel punto C

ρ [Ωm]	Spessore	Profondità	Quota [s.l.m.]
196	0.82021	0.82021	1.8348
7.5579	0.62301	1.44328	1.211
5.2481	-	-	-

Per finire, nel punto C (Tabella 4.4) si hanno i soliti tre strati di terreno di cui il primo, con uno spessore di 1 m, ha una resistività di circa 200 Ωm , il secondo, con uno spessore di 0,6 m, possiede una resistività di 7,5 Ωm e infine l'ultimo strato ha una resistività di 5 Ωm .

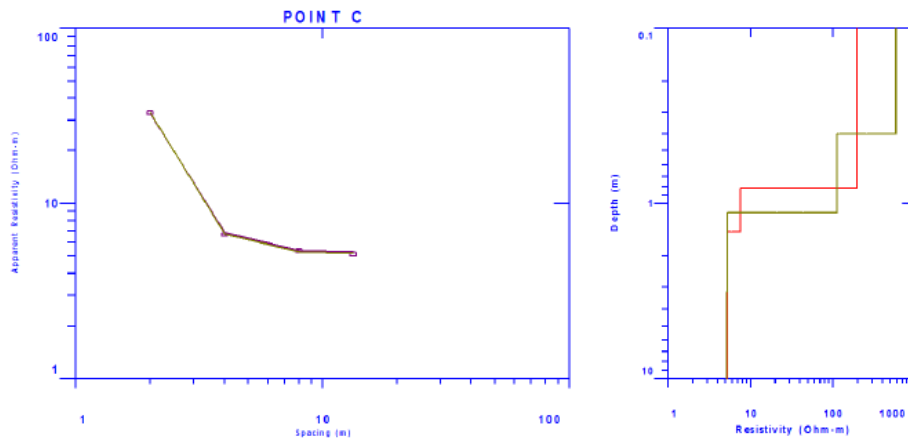


Figura 4.29: Sondaggio elettrico verticale nel punto C

Si può ricavare, in maniera molto approssimata un grafico del profilo delle resistività del terreno, in cui si cerca di collegare in maniera opportuna tutte le considerazioni fatte per i singoli punti di indagine (Figura 4.30).

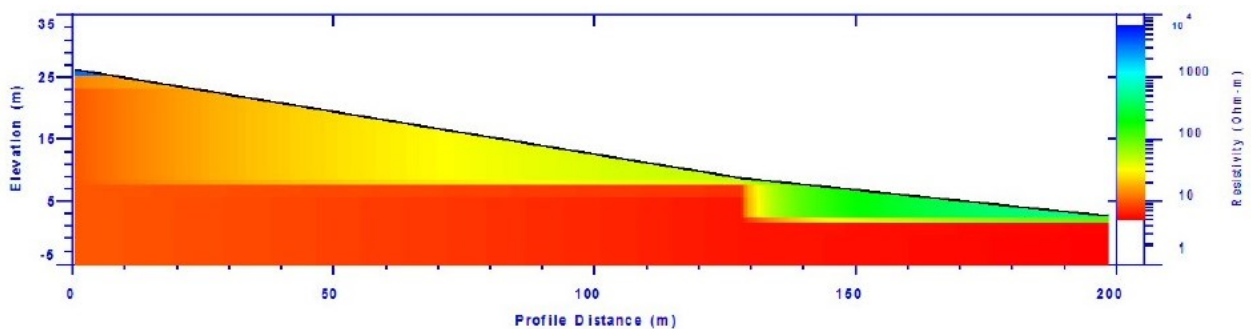


Figura 4.30: Ricostruzione di un profilo di resistività partendo dai precedenti sondaggi

5. Definizione del tipo di approdo

5.1. INTRODUZIONE

La definizione del tipo di approdo per la realizzazione di un HDD è un passaggio fondamentale che può determinare il successo o l'insuccesso del funzionamento della protezione catodica. Si parla di approdo a mare quando una pipeline passa da ambiente off-shore ad ambiente on-shore e si tratta quindi di una zona di transizione.

Lo studio effettuato è incentrato in questa particolare zona, in cui una tecnica innovativa sempre più frequentemente utilizzata per la posa di tubazioni è proprio la tecnica di trivellazione orizzontale, non contemplata nello specifico dalle normative internazionali data la sua relativa modernità. Proprio per questo diventa necessario fare delle distinzioni riguardo il tipo di approdo che può essere realizzato ed in maniera del tutto convenzionale si sono distinti 3 tipi di approdo a mare:

- Approdo Mare-Spiaggia;
- Approdo Mare-Terra;
- Approdo Spiaggia-Terra.

5.2. APPRODO MARE-SPIAGGIA

Il primo tipo di approdo considerato riguarda l'installazione di una pipeline prevalentemente in terreno sottomarino con uscita a terra direttamente sulla zona di spiaggia (Figura 5.1). Questo tipo di approdo si presta ad essere utilizzato se è necessario preservare l'ecosistema sottomarino in acque poco profonde come può essere la presenza di una barriera corallina, perché la particolare

metodica di installazione tramite trivellazione orizzontale permette di passare sotto l'ostacolo senza distruggerlo.

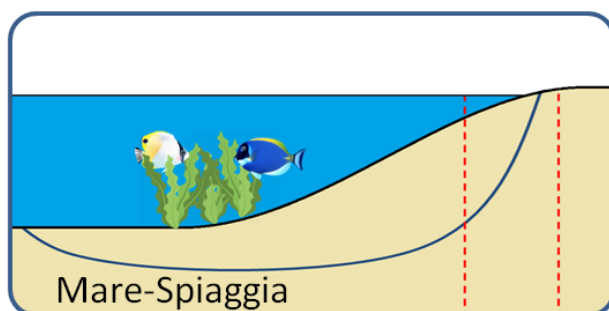


Figura 5.1: Rappresentazione di un approdo Mare-Spiaggia

Questa è la configurazione che più si avvicina al comportamento tipico delle tubazioni installate a mare.

5.3. APPRODO MARE-TERRA

Il secondo approdo considerato è l'approdo Mare-Terra (Figura 5.2) in cui circa il 50% della pipeline è installato in terreno sottomarino e il restante 50% è installato sotto terra.

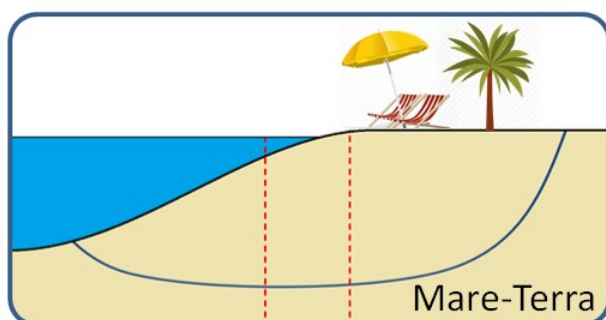


Figura 5.2: Rappresentazione di un approdo Mare-Terra

L'uscita a terra dell'HDD può essere posta anche a diverse centinaia di metri dalla linea di costa in modo tale da preservare la spiaggia. Questo potrebbe essere un fattore determinante per la scelta

del percorso della linea in quanto si potrebbero pensare a soluzioni con passaggio in una zona turistica o in una spiaggia protetta.

5.4. APPRODO SPIAGGIA-TERRA

L'ultimo caso da considerare riguarda un'installazione di una pipeline con approdo prevalentemente lato terra (Figura 5.3).

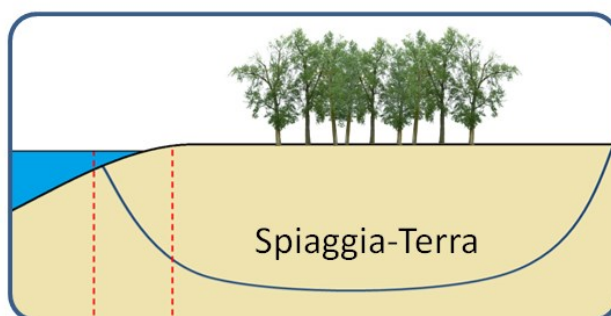


Figura 5.3: Raffigurazione di un approdo Spiaggia-Terra

Dal lato mare si entra nell'HDD a pochi metri dalla linea di costa e si esce anche a qualche chilometro di distanza. Questo tipo di approdo può essere necessario se si passa in una zona protetta con determinati habitat da dover preservare ed è la configurazione che più si avvicina al comportamento tipico delle tubazioni in ambiente on-shore.

5.5. ESTENSIONE DELL'APPLICABILITÀ DEGLI HDD

Oltre ai vari tipi di approdo precedentemente discussi, la tecnica di trivellazione in direzione orizzontale può essere usata con successo in altri contesti. Anche in questi casi la principale motivazione dell'utilizzo della tecnica è la possibilità di creare passaggi per le tubazioni senza dover ricorrere ai classici scavi a cielo aperto con tutta una serie di vantaggi che ne consegue a livello di sostenibilità ambientale, fattibilità e risparmio di tempo e denaro.

L'installazione di un HDD può ad esempio essere indicata nell'eventualità si debba attraversare un fiume. Infatti, tramite la trivellazione guidata da un operatore a distanza, è possibile creare un passaggio al di sotto del letto fluviale, senza quindi alterarne il naturale passaggio, limitando al minimo quelli che sono i danni ambientali e sul territorio.

Un'altra casistica interessante da prendere in considerazione è quella di un attraversamento ferroviario o stradale. In entrambi i casi una posa in opera delle tubazioni con tecniche tradizionali richiederebbe l'interruzione della circolazione nel tratto considerato per tutto il tempo necessario a svolgere i lavori con tutti i disagi che ne seguirebbero. Invece nel caso in cui si adottasse la tecnica dell'HDD, durante tutte le operazioni di installazione si riuscirebbe a garantire la normale circolazione del traffico.

Un ultimo caso da prendere in considerazione potrebbe essere la realizzazione di un HDD nelle vicinanze di una piattaforma di estrazione in mare. Se si dovesse rendere necessario creare un nuovo passaggio per una pipeline vicino ad una piattaforma, data l'elevata densità di tubazioni che sono presenti in quella zona, è molto probabile che quest'ultime ostacolino il passaggio della nuova tubazione. L'utilizzo di un HDD risolverebbe quindi questo problema, potendo creare un passaggio al di sotto del fondale marino così da evitare l'incrocio di più linee.

6. Modellazione agli elementi finiti

6.1. INTRODUZIONE

La progettazione di un sistema di protezione catodica fino a pochi anni fa è sempre stata realizzata facendo riferimento a criteri empirici basati sulle esperienze passate e sull'utilizzo di dati estremamente conservativi.

Negli ultimi decenni l'utilizzo dei computer come supporto alla progettazione in tutte le discipline dell'ingegneria è cresciuto in maniera esponenziale grazie alle possibilità offerte dai software di realizzare apposite simulazioni per verificare le potenzialità o i difetti di un tipo di design e apportarne i dovuti miglioramenti.

Anche per quel che riguarda la protezione catodica è possibile utilizzare il metodo agli elementi finiti per prevedere ed eventualmente migliorare le performance di un certo tipo di design, modellando le strutture considerate e l'ambiente in cui vengono poste. Attraverso le simulazioni infatti è possibile studiare svariate configurazioni andando a modificare di volta in volta determinati parametri e quindi riuscire a capire quanto effettivamente la modifica di questi parametri influisca sulla soluzione finale.

Anche il non trascurabile effetto di contenimento dei costi che si hanno effettuando simulazioni al computer piuttosto che tramite un apparato sperimentale da laboratorio o tramite prove in loco, risulta essere determinante nel crescente utilizzo di questa tecnica.

6.2. APPLICABILITÀ ALLA PROTEZIONE CATODICA

È possibile utilizzare l'analisi agli elementi finiti per interfacciarsi ai problemi relativi alla progettazione dei sistemi di protezione catodica anche per geometrie particolarmente complesse.

Uno dei software maggiormente utilizzati in questo ambito è Comsol Multiphysic, un software di simulazione multifisica che fornisce tutti gli strumenti per poter eseguire analisi e simulazioni con differenti moduli ognuno dei quali ha una fisica di base che può interagire con le altre. Uno dei moduli presenti è quello riguardante la corrosione; questo in pratica è un modulo elettrochimico che permette di studiare i fenomeni della corrosione e i sistemi di protezione come la protezione catodica.

6.3. EQUAZIONI DI CAMPO ELETTRICO

Per quanto riguarda la protezione catodica, l'analisi agli elementi finiti è utilizzata per la determinazione del campo elettrico all'interno dell'elettrolita. La legge che governa il processo deriva dall'equazione di Poisson-Laplace:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_y \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z \frac{\partial E}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad 6.1$$

In forma compatta:

$$\nabla(\kappa \nabla E) + Q = 0 \quad 6.2$$

dove:

- E : funzione potenziale;
- Q : flusso applicato;
- κ : proprietà del materiale lungo x, y, z .

In un conduttore metallico che può essere considerato puramente ohmico ($Q=0$), con resistività ρ , di forma qualsiasi e delimitato da una superficie isolante che scambia corrente con l'esterno, l'equazione di campo si riduce a quella di Laplace:

$$\nabla(\kappa\nabla E) + Q = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla^2 E = 0 \quad 6.3$$

Dall'equazione di Laplace si può ricavare la legge di Ohm:

$$i = -\kappa\nabla E = -\frac{1}{\rho}\nabla E = -\frac{1}{\rho}\text{grad } E = \frac{\Delta E}{\rho} \quad 6.4$$

Dove la grandezza derivata i assume il significato di densità di corrente.

Per quanto riguarda i sistemi elettrochimici, l'equazione di Laplace è un'approssimazione della realtà in quanto si dovrebbe tenere conto anche della variazione della concentrazione delle specie ioniche che contribuiscono al passaggio di corrente. In condizioni stazionarie l'equazione quasi armonica di Poisson-Laplace diventa:

$$\kappa\nabla^2 E + F \sum_k (Z_k D_k \nabla^2 C_k) = 0 \quad 6.5$$

dove:

- κ : conducibilità dell'elettrolita;
- F : costante di Faraday;
- Z_k : carica ionica;
- D_k : coefficiente di diffusione;
- C_k : concentrazione della k-esima specie ionica in soluzione.

Si può studiare la soluzione andando a dividere il dominio in due aree, la zona degli elettrodi (strati limite) e la zona dell'elettrolita (tutto il restante dominio). Si assume che l'elettrolita sia omogeneo e i gradienti di concentrazione siano nulli.

In corrispondenza degli elettrodi la distribuzione di campo elettrico è ottenuta sulla base dell'equazione (6.3) mentre nell'elettrolita è data da (6.5). Dal momento che le dimensioni degli

strati limite sono molto inferiori rispetto a quelle dell'elettrolita, si commette un errore trascurabile estendendo l'equazione di Laplace all'intero sistema:

$$\nabla^2 E_e = 0 \quad 6.6$$

Dove E_e è il potenziale nella soluzione all'interfaccia elettrodo/soluzione dipendente dalle sovratensioni d'elettrodo secondo la relazione:

$$E_e = E_m - \eta \quad 6.7$$

dove:

E_m : potenziale del metallo costante;
 η : sovratensione che dipende dalla densità di corrente scambiata $f(i)$.

6.4. TIPI DI DISTRIBUZIONE DI CORRENTE

La distribuzione di corrente può essere divisa in tre diversi tipi, in funzione della complessità del fenomeno da descrivere. Si possono distinguere quindi:

- Distribuzione di corrente primaria;
- Distribuzione di corrente secondaria;
- Distribuzione di corrente terziaria.

6.4.1. Distribuzione di corrente primaria

La distribuzione di corrente primaria si prende in considerazione quando le sovratensioni sono trascurabili ($\eta = 0$, $E_e = E_m$). Definisce il trasporto di carica ionica in un elettrolita uniforme, definito dalla legge di Ohm, in combinazione con il bilancio di carica dato dall'equazione di Laplace. È usato per determinare le cadute ohmiche in modelli a geometria semplice dove le sovratensioni d'elettrodo sono trascurabili.

6.4.2. Distribuzione di corrente secondaria

Nel caso della distribuzione di corrente secondaria le sovratensioni devono essere prese in considerazione ($\eta \neq 0$, $E_e \neq E_m$). La distribuzione quindi risulta essere dipendente dal rapporto tra le cadute ohmiche e le sovratensioni. La densità di corrente cambia nella superficie in funzione del potenziale all'interfaccia elettrodo-elettrolita.

Il contributo della sovratensione al catodo è dato dal processo di riduzione che avviene all'interfaccia. Se il processo è regolato dallo sviluppo di idrogeno le sovratensioni sono basse e la distribuzione non si discosta tanto da quella primaria, mentre se la reazione catodica dominante è quella di riduzione dell'ossigeno, come nel caso della protezione catodica in ambiente marino, le sovratensioni sono molto alte, anche per piccole variazioni di corrente, e prevalgono sugli effetti di caduta ohmica in quanto si lavora in condizioni di corrente limite di diffusione.

6.4.3. Distribuzione di corrente terziaria

La distribuzione di corrente non è funzione soltanto del potenziale ma prende in considerazione anche il trasporto di specie cariche nell'elettrolita tramite le equazioni di Nernst-Planck. Si riporta questa possibilità che offre il software per completezza, ma non verrà utilizzata per non appesantire in maniera eccessiva l'analisi.

6.5. CONDIZIONI AL CONTORNO

L'impostazione delle condizioni al contorno è una fase fondamentale per poter risolvere l'equazione di Laplace. Le relazioni delle condizioni al contorno legano il potenziale e la densità di corrente e si possono ricavare tramite test di laboratorio o tramite misurazioni in campo.

6.5.1. Anodo

Si è soliti considerare l'anodo impolarizzabile. Si tratta di condizioni al contorno semplificate che comunque non si discostano in maniera apprezzabile dalla realtà. Nei sistemi ad anodi galvanici si

assegna all'anodo un valore di potenziale che si assume costante, mentre nel caso di sistemi a corrente impressa (ICCP) si è soliti indicare il valore di densità di corrente erogata all'anodo stesso.

6.5.2. Catodo

Per descrivere correttamente il comportamento catodico è necessario essere molto più precisi nella determinazione delle condizioni al contorno. Si è scelto di far riferimento alle curve di polarizzazione dell'acciaio in acqua di mare per associare una densità di corrente in funzione della sovratensione al catodo. È possibile utilizzare relazioni matematiche come le equazioni di Tafel o di Butler-Volmer oppure interpolare le curve ricavate sperimentalmente.

6.5.3. Superfici al confine del modello

I confini del modello sono considerati isolanti e non permettono lo scambio di corrente con l'esterno. In Comsol è automaticamente impostata la seguente equazione di scambio nullo di corrente come condizione al contorno:

$$\mathbf{i}_k \cdot \mathbf{n} = 0 \quad 6.8$$

dove:

- \mathbf{i}_k : vettore della densità di corrente;
- \mathbf{n} : vettore normale alla superficie.

6.6. DEFINIZIONE DELLA MESH

La realizzazione della mesh è un passaggio fondamentale per poter eseguire un'analisi agli elementi finiti. Si tratta di discretizzare la geometria del modello continuo in piccoli elementi primitivi (triangoli e quadrilateri per domini 2D, tetraedri o esaedri per domini 3D) grazie ai quali è possibile eseguire un calcolo numerico.

In ambiente Comsol la mesh ha sempre forma tetraedrica per i volumi ed è possibile settarne la dimensione, i cui fattori più importanti da poter modificare sono la dimensione massima, minima, e il fattore di crescita. Realizzare la mesh è probabilmente l'operazione più delicata di tutto il processo in quanto può influenzare pesantemente l'analisi e può anche portare ad una serie di errori che non permettono la convergenza dei risultati. Infatti una mesh troppo grezza può portare ad errori e a risultati non corretti, mentre una mesh troppo dettagliata allungherebbe in maniera non accettabile i tempi di calcolo e diventa quindi necessario trovare il giusto compromesso fra complessità del modello e tempi di calcolo.

Il software permette di realizzare una mesh automatica del modello, ma nella maggior parte dei casi si tratta di una costruzione non adatta ad eseguire le simulazioni di una piccola superficie (nel caso specifico quella dell'anodo e della tubazione) immersa in un ambiente molto grande (il mare e la spiaggia). Non si tratta solo di assegnare mesh dettagliate nelle zone vicino all'anodo e al catodo e grossolane nell'ambiente, ma anche di trovare opportuni elementi di costruzione della mesh complessiva per evitare di allungare eccessivamente i tempi necessari a processare il modello e lo studio.

7. Illustrazione del modello

7.1. INTRODUZIONE

Per sviluppare la modellazione si deciso studiare i diversi tipi di approdo applicati ad un unico tipo di terreno scelto fra i modelli a disposizione. Il modello scelto è quello della zona del Messico sia per la maggior completezza dei dati, che per la presenza di tanti tipi di resistività. Nell'ambito della costruzione del modello è stato necessario discretizzare la configurazione dei terreni e ricavare sia le condizioni al contorno che la curva di polarizzazione del catodo. In seguito si sono definiti i dati da inserire nel software di analisi e si è passati a costruire il modello e lanciare le varie simulazioni.

7.2. COSTRUZIONE DEL MODELLO 3D

Per costruire il modello 3D si è deciso di utilizzare Excel per discretizzare il terreno e ricavare le coordinate dei punti dei poligoni che contengono zone a stessa resistività da utilizzare poi nel software. Nel caso specifico, si è proceduto esaminando le mappe di tomografia 2D o i sondaggi SEV, come visto nel capitolo 4. È stato successivamente sviluppato su Excel un foglio di calcolo per cercare di automatizzare il processo di discretizzazione, realizzando dei grafici che si sovrappongono alle mappe di resistività e andando a salvare, tramite una macro sviluppata appositamente, le coordinate dei punti in file di testo necessari all'importazione su Comsol.

7.2.1. Discretizzazione dei terreni

Come visto nel capitolo 4, gli studi di resistività forniscono delle mappe 2D in cui sono presenti due coordinate x e y, rispettivamente della lunghezza della zona in esame e della sua profondità. A

questo punto si ricercano zone confinanti a resistività simili e si raggruppano dividendo in questo modo il terreno in macro aree, ognuna di esse caratterizzata da un certo valore di resistività medio.

Il procedimento di discretizzazione può essere svolto mediante l'utilizzo di Excel. Si sovrappone alla mappa di resistività un grafico a linee spezzate, avendo cura di far combaciare lo zero degli assi con lo zero delle coordinate della mappa e facendo in modo che le coordinate x e y di mappa e grafico siano le stesse come in Figura 7.1. Si segnano i punti dei vertici dei poligoni che racchiudono zone a resistività comparabile e se ne tracciano i grafici che vanno a formare dei poligoni di varie forme e dimensioni.

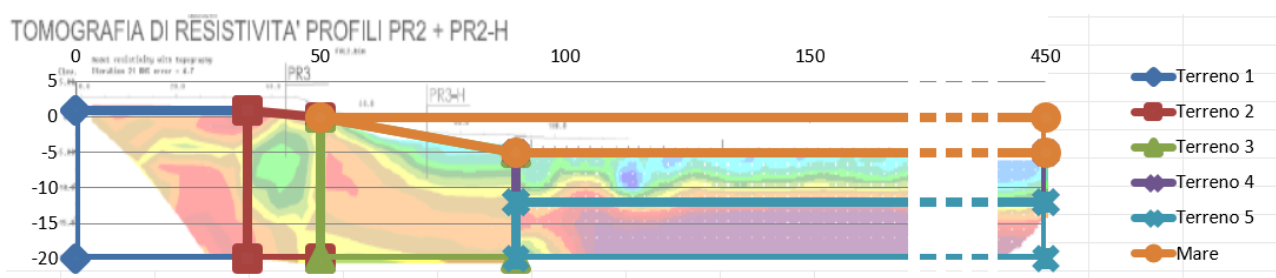


Figura 7.1: Sovrapposizione di un grafico a linee spezzate su una mappa di resistività

I valori delle coordinate dei poligoni vengono riportati in tabelle (Figura 7.2) per essere successivamente salvati in file di testo, i quali sono necessari all'importazione della geometria in Comsol.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Terreno 1		Terreno 2		Terreno 3		Terreno 4		Terreno 5		Mare	
2	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
3	0	1	35	1	50	0	90	-5	90	-12	50	0
4	35	1	50	0	90	-5	450	-5	450	-12	450	0
5	35	-20	50	-20	90	-20	450	-12	450	-20	450	-5
6	0	-20	35	-20	50	-20	90	-12	90	-20	90	-5
7												

Figura 7.2: Coordinate dei diversi terreni ricavati

7.2.2. Discretizzazione del terreno in esame

Come già detto, il terreno preso in esame riguarda una baia del Messico proprio perché si incontrano tante zone a diversa resistività che permettono di analizzare tante situazioni che si possono venire

a creare. Oltre alle mappe di resistività è utile prendere in considerazione anche le misurazioni SEV e fare una valutazione di tutti i valori disponibili. È stato posto lo zero del grafico sulla linea di costa, prendendo come positiva la direzione verso terra lungo l'asse delle ascisse e a seguito della divisione è stata ottenuta una geometria come in Figura 7.3.

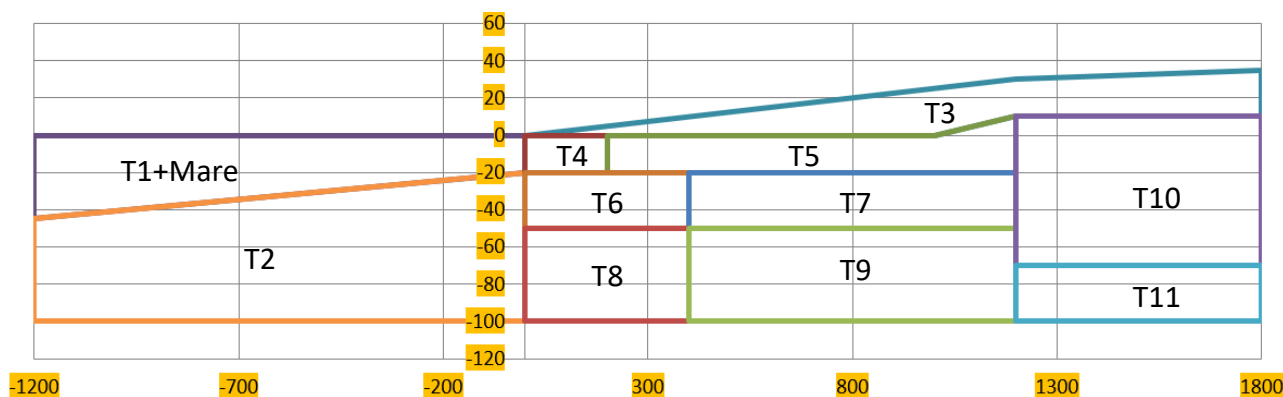


Figura 7.3: Geometria ottenuta dalla discretizzazione dei terreni

Successivamente alla discretizzazione, ad ogni poligono ottenuto si deve assegnare un valore di resistività rappresentativo della media dei valori che sono stati raggruppati.

Si può vedere dalla Figura 7.4, nella parte a sinistra la zona di mare divisa in due. La superiore ha una resistività molto bassa e comprende l'acqua di mare e il fondale sottostante, quella inferiore ha una resistività superiore ma comunque a valori confrontabili con i valori tipici delle zone off-shore.

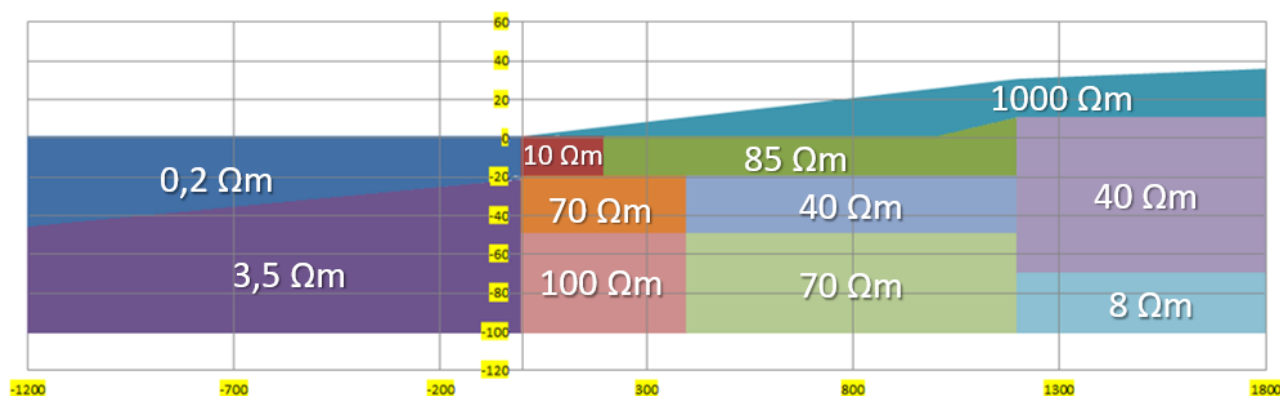


Figura 7.4: Valori di resistività per ogni macro area

Passando invece a considerare il terreno on-shore a destra della linea di costa, si nota una forte differenza di resistività da zona a zona. È presente uno strato superficiale ad altissima resistività, sotto il quale si estendono aree molto eterogenee. Una volta completata la suddivisione, si salvano le coordinate dei vertici dei poligoni, ognuno su un file di testo.

Ovviamente questo metodo di discretizzazione dei terreni è fortemente influenzato dall'operatore che lo svolge, ma considerando che si tratta di un modello semplificato e che i metodi comunemente usati per stimare la resistività dei terreni sono ancora più semplificativi, si può ragionevolmente pensare che sia un buon punto di partenza.

7.2.3. Importazione della geometria su Comsol

Le operazioni fin qui descritte potrebbero far pensare ad un inutile complicazione della fase di costruzione delle geometrie dal momento che nel software è presente il modulo di modellazione. Questo tempo investito inizialmente è risultato comunque giustificato per lo scopo dello studio dal momento che il modulo di modellazione presente in Comsol non è del tutto intuitivo e rende complicate alcune operazioni di costruzione del modello.

A questo punto si sono importate le coordinate dei vari poligoni salvati precedentemente sui file di testo, andando a costruire la sezione bidimensionale come mostrato in Figura 7.5.

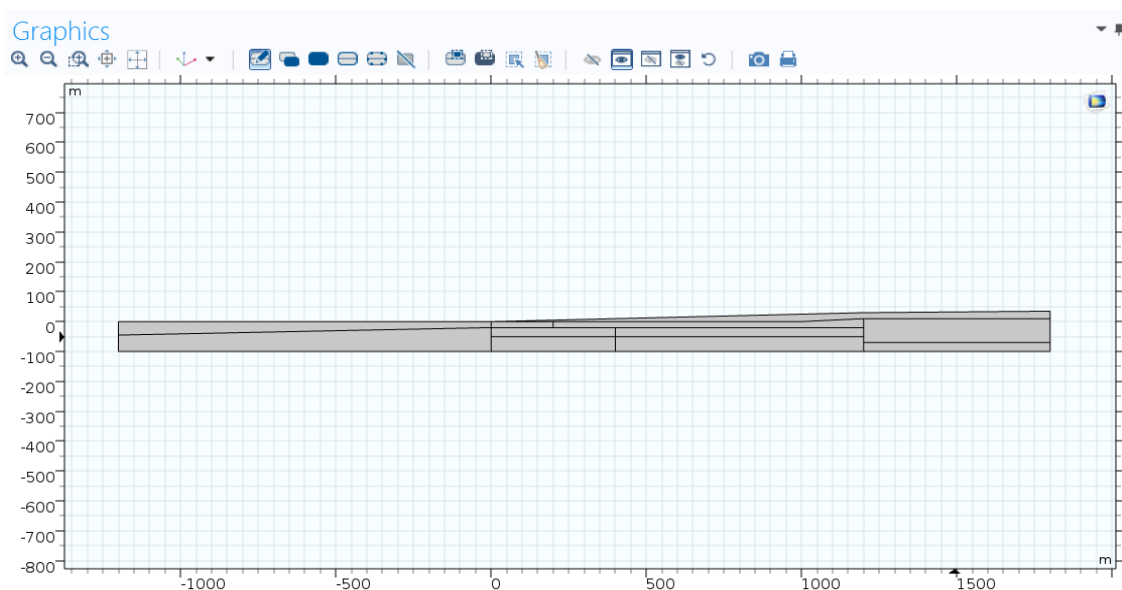


Figura 7.5: Costruzione della sezione di terreno sul software

Successivamente si è eseguita un'operazione di estrusione per ottenere così il modello 3D dell'ambiente in cui verranno posti in seguito la tubazione e gli anodi.

La scelta della dimensione di questo modello è molto importante perché coniuga la necessità di discretizzare una ampia zona (per rendere la modellazione più realistica) con la necessità di non appesantire il modello. Un buon compromesso che ha permesso di sfruttare al limite la capacità hardware e software a disposizione è stato quello di considerare un modello di 2800m di lunghezza, 1500m di larghezza e 100m di profondità.

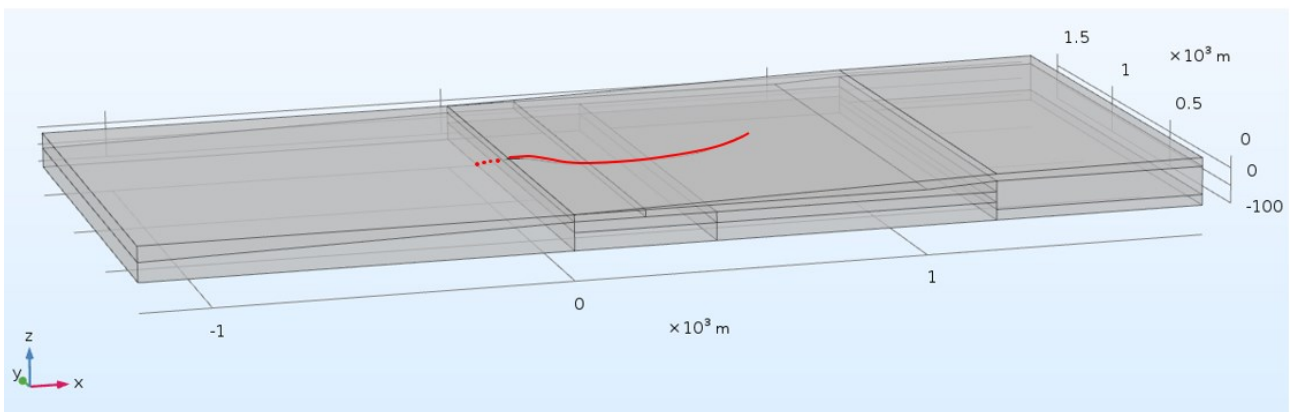


Figura 7.6: Panoramica del modello 3D costruito

In Figura 7.6 vengono evidenziati in rosso la pipeline e gli anodi al che, a causa delle dimensioni molto grandi del modello, non è facile poter apprezzare.

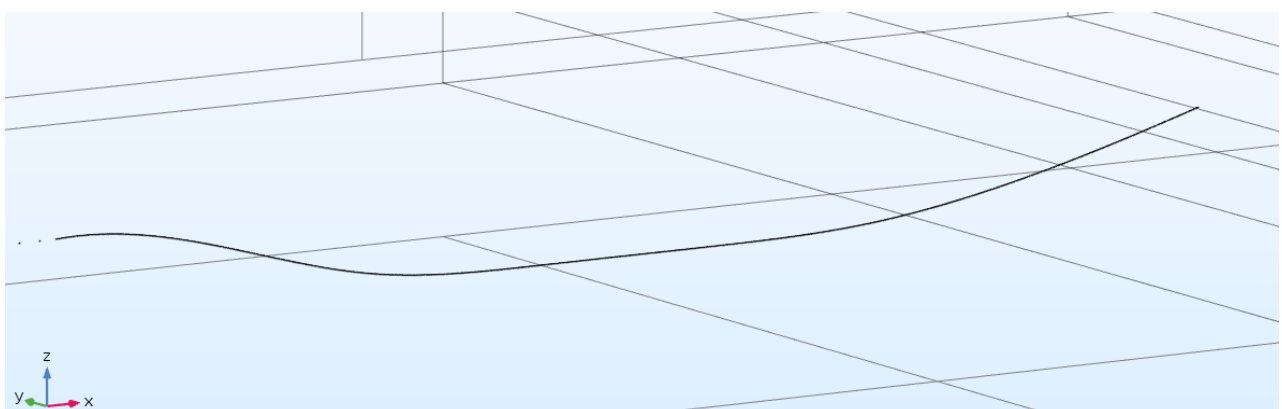


Figura 7.7: Tratto di pipeline oggetto di studio

In Figura 7.7 e in Figura 7.8 sono mostrati pipeline e anodi in maniera più dettagliata. Si può notare che nel modello, a differenza della realtà, non c'è nessun contatto fisico fra anodo e catodo e ciò è dovuto al fatto che il software li mette automaticamente in continuità elettrica semplificando in questo modo la modellazione.

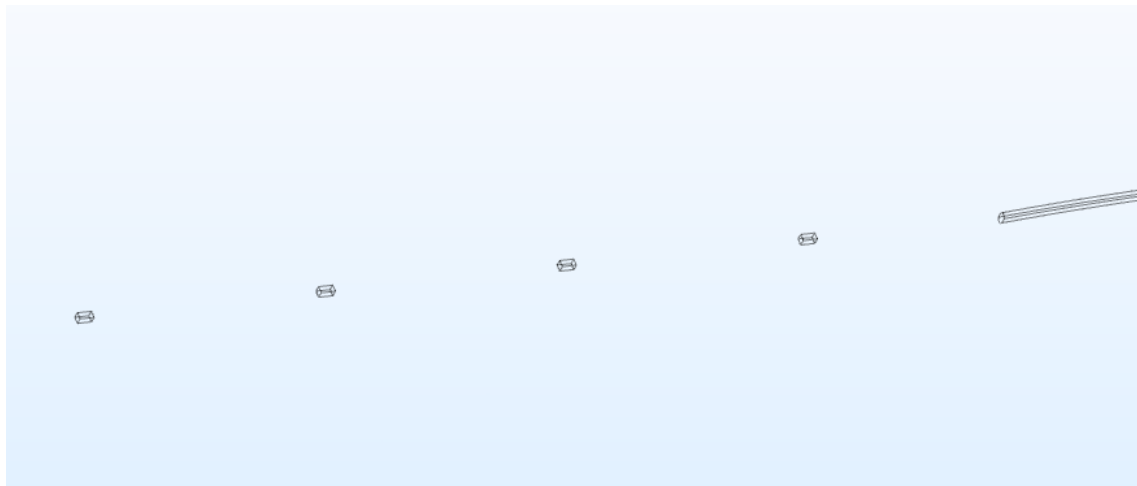


Figura 7.8: Successione di anodi al termine della pipeline

Inoltre come si può notare dalla Figura 7.9, gli anodi sono posizionati nella traiettoria di naturale prosecuzione della pipeline, infatti è necessario ricordare che questi sono anodi di tipo a bracciale e vengono installati direttamente sulla tubazione e saldati per essere messi in continuità elettrica con essa, ma per esigenze di semplificazione e alleggerimento dei calcoli non è stata modellata la parte di tubazione che dal mare arriva all'HDD anche perché la protezione di quel tratto di linea è già assicurata dal design di protezione catodica della zona off-shore.

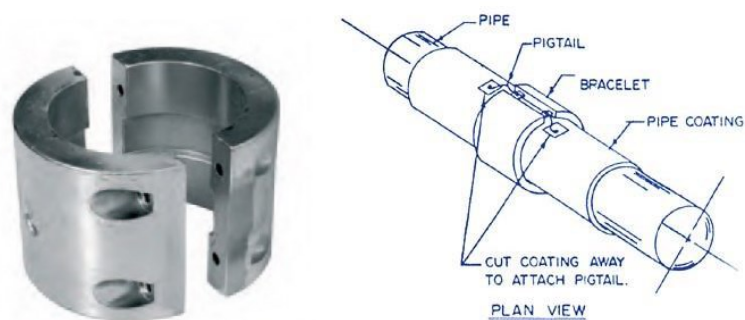


Figura 7.9: A sinistra è rappresentato un tipico anodo sacrificale di tipo a bracciale, a destra è schematizzato un anodo installato sulla tubazione

7.3. CONDIZIONI AL CONTORNO

La teoria delle condizioni al contorno è stata discussa nel capitolo 6, ora si andrà a vedere come queste condizioni vengono ricavate e importate sul software. Di particolare importanza è la curva di polarizzazione del catodo di cui si è ampiamente parlato nel capitolo 3.

7.3.1. Condizioni al contorno imposte all'anodo

Gli anodi tipicamente usati in acqua di mare sono composti da leghe di Alluminio, Zinco e Indio. Questa particolare composizione subisce una polarizzazione minima che a livello ingegneristico può essere considerata trascurabile. Per questo motivo gli anodi vengono definiti impolarizzabili.

Per le considerazioni fatte sopra, non si va a ricercare una curva di polarizzazione da assegnare all'anodo ma si assegna ad esso un valore di potenziale costante. Le norme suggeriscono per questa tipologia di anodi in acqua di mare un potenziale pari a $-1,05V$ vs Ag/AgCl.

7.3.2. Condizioni al contorno imposte al catodo

Per ciò che riguarda il catodo (pipeline) impostare le condizioni al contorno è decisamente più impegnativo. L'argomento è stato già introdotto nel capitolo 3 e in questo paragrafo se ne discuteranno le modalità operative di scelta e utilizzo delle curve.

Anche in questo caso diventa estremamente utile l'approccio al problema tramite il foglio di calcolo di Excel. Partendo dalla curva di polarizzazione del manuale "Atlas of Polarization Diagrams for Naval Materials in Seawater" di un acciaio per uso in ambiente marino, si seleziona la curva evidenziata in rosso in Figura 7.10.

Con un procedimento analogo a quello per ricavare le coordinate dei terreni discretizzati, si sovrappone alla figura un grafico e si fanno combaciare gli assi cartesiani. In maniera del tutto empirica si traccia sopra la curva un grafico dato dall'interpolazione di 6 punti che hanno come coordinate la densità di corrente e il relativo potenziale.

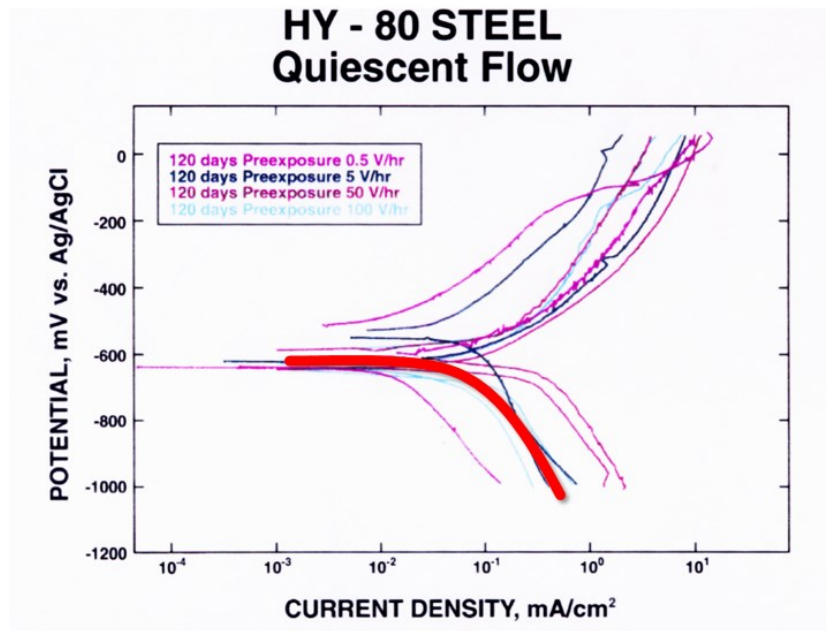


Figura 7.10: Curve di polarizzazione per acciaio marino con 120 giorni di preesposizione

La densità di corrente necessaria a raggiungere il potenziale di protezione è controllata dalla corrente limite di diffusione dell'ossigeno. Le condizioni sperimentali della prova presentano un'esposizione diretta all'acqua con un forte ricambio di ossigeno che comporta di avere una densità di corrente molto elevata affinché si raggiunga un determinato potenziale.

Nelle condizioni operative di un HDD invece, essendo la tubazione interrata si avrà bisogno di un quantitativo di corrente molto più basso per raggiungere la protezione. La velocità del processo durante una reazione di corrosione è data dalla densità di corrente nel punto in cui la curva anodica e catodica si incontrano perciò è sostanzialmente data dalla corrente limite di diffusione dell'ossigeno.

Come si può notare dal grafico in Figura 7.11, più la corrente limite di diffusione è alta ($i_{L,1} < i_{L,2} < i_{L,3}$), come nel caso dell'acqua di mare in presenza di forti correnti, più l'anodo deve fornire una quantità maggiore di corrente per bilanciare la reazione mentre più la corrente limite è bassa, come nel caso di terreni molto asciutti e poco permeabili, più la corrente proveniente dall'anodo necessaria a bilanciare la reazione sarà bassa.

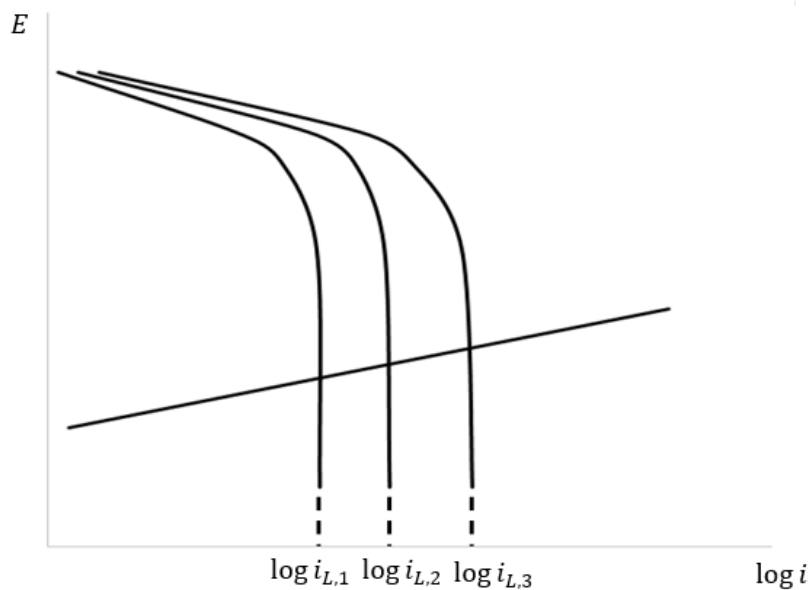


Figura 7.11: Differenti curve catodiche date dalla diversa corrente limite di diffusione dell'ossigeno

Quindi dal momento che nel terreno la presenza di ossigeno è più limitata che nell'acqua questo permette di avere densità di corrente di protezione molto più basse. Le normative suggeriscono di progettare sistemi di protezione catodica considerando che una densità di corrente di protezione pari a 20 mA/m^2 sia necessaria a far raggiungere il potenziale di protezione alle tubazioni interrato ($-800 \text{ mV vs Ag/AgCl}$ in acqua di mare).

Facendo riferimento a questi dati, seppur conservativi, è necessario scalare la curva di polarizzazione empiricamente costruita per ottenere una curva di polarizzazione dell'acciaio nei terreni. Tramite un opportuno fattore di scalatura si ricava la curva con le adeguate corrispondenze fra potenziale e densità di corrente non alterando la forma della curva stessa.

Un'ulteriore fattore che influenza la densità di corrente è la presenza del rivestimento anticorrosivo. La protezione catodica infatti interviene laddove ci sia un danneggiamento del rivestimento e non su tutta l'area della pipeline. Per considerare anche questo fattore è necessario scalare ulteriormente la curva di una quantità pari alla percentuale del danneggiamento ipotizzato (Figura 7.12). Questo tipo di semplificazione non rappresenta in maniera accurata un danno in uno specifico punto della tubazione, bensì spalma questo difetto su tutta l'area a disposizione creando così una approssimazione da tenere in considerazione.

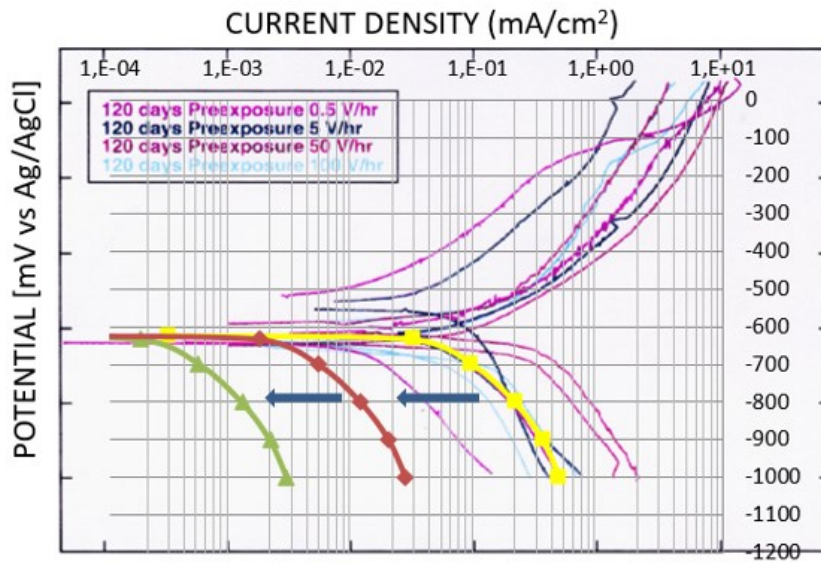


Figura 7.12: Scalatura della curva di polarizzazione

Trovate le curve di interesse non resta altro da fare che salvare le coordinate dei punti in un file di testo che verranno poi importate su Comsol.

7.4. CONDUCEBILITÀ ELETTROLITA

Ad ogni volume di terreno costruito è necessario assegnargli un valore di resistività, anche se Comsol non lavora con questa grandezza bensì con la conducibilità. La conducibilità non è altro che l'inverso della resistività perciò i valori sono presto ricavati tramite la seguente formula.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \left[\frac{S}{m} \right] \quad 7.1$$

La conducibilità di ogni terreno ricavata in Tabella 7.1 ostacolerà in maniera più o meno grande il passaggio di corrente creando così delle vie preferenziali in quelle zone ad alta conducibilità come ad esempio l'acqua di mare.

Tabella 7.1: Valori di resistività e conducibilità per ogni terreno ricavato

Terreni	Resistività [Ωm]	Conducibilità [S/m]
T1+Mare	0,2	5
T2	3,5	0,285714286
T3	1000	0,001
T4	10	0,1
T5	85	0,011764706
T6	70	0,014285714
T7	40	0,025
T8	100	0,01
T9	70	0,014285714
T10	40	0,025
T11	8	0,125

7.5. REALIZZAZIONE DELLA MESH

La realizzazione della mesh del modello è una fase di fondamentale importanza per riuscire a svolgere le varie simulazioni. Come già anticipato nel capitolo 6 infatti la costruzione di una buona mesh si basa sul compromesso di avere un buon dettaglio delle geometrie ma anche tempi di calcolo ragionevoli.

La mesh che realizza automaticamente il software non è adeguata al modello costruito a causa della sua complessità. Si deve realizzare una mesh dedicata per discretizzare geometrie molto piccole (pipeline e anodi) che devono interfacciarsi con mesh di geometrie molto grandi (terreni e mare).

Se si settassero i parametri per costruire mesh grossolane, queste non rappresenterebbero in maniera corretta la tubazione e gli anodi, ma se a tutta la geometria venisse assegnata una mesh molto raffinata si andrebbe incontro a tempi di calcolo non accettabili o addirittura all'impossibilità di fornire risultati da parte del software.

La strada corretta da seguire è quella di realizzare una mesh "mista", cioè ben dettagliata per la pipeline e gli anodi con un graduale aumento delle dimensioni degli elementi mano a mano che ci si sposta ai confini del modello.

Nelle Figure 7.13, 7.14 e 7.15 vengono mostrati i modelli delle mesh realizzate ad hoc per questo tipo di simulazioni.

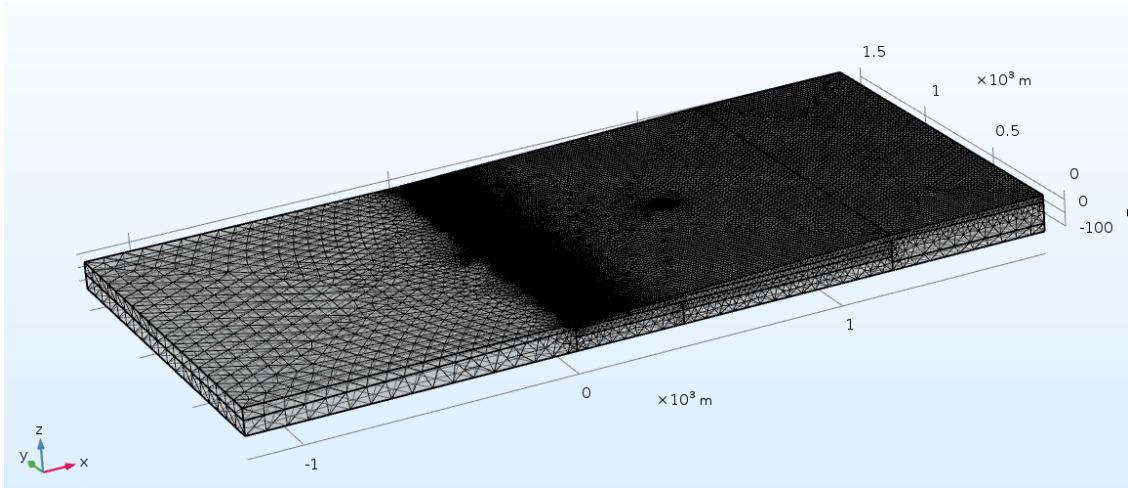


Figura 7.13: Panoramica della mesh del modello 3D

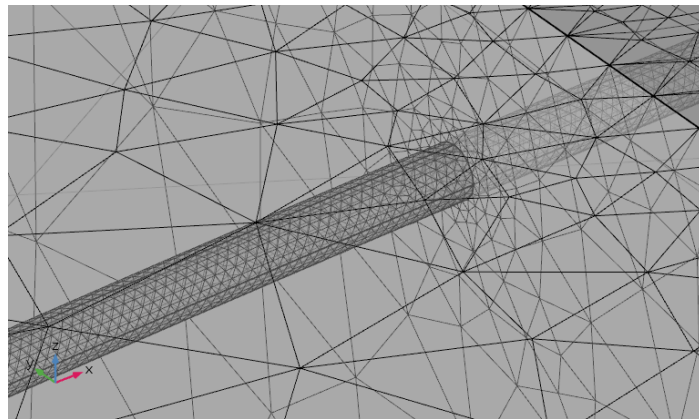


Figura 7.14: Vista in dettaglio della mesh della tubazione che attraversa due terreni a diversa conducibilità

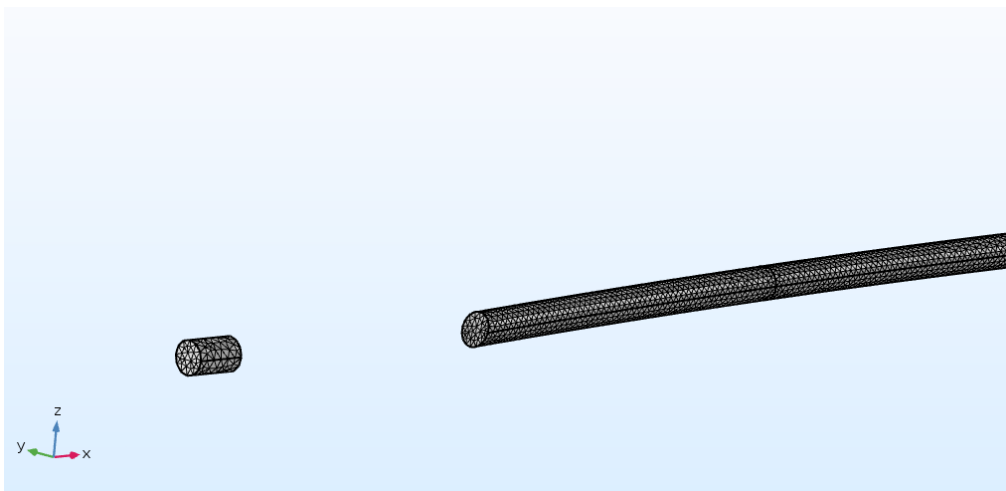


Figura 7.15: Vista in dettaglio della mesh di pipeline e del primo anodo

Nella seguente Tabella 7.2 vengono riportati i parametri utilizzati per la realizzazione della mesh.

Tabella 7.2: Parametri principali per la realizzazione della mesh

	Tipo di mesh	Min [m]	Max [m]	Max growth rate
Anodi	Free triangular	0.05	5.85	1.05
Pipeline	Free triangular	0.09	5.85	1.05
Elettrolita*	Free tetrahedral	0.09	20	1.05
		0.5	60	1.3
		0.5	80	1.4
* le zone in cui passano pipeline e anodi sono più raffinate mentre quelle più lontane sono più grossolane				

7.6. ANALISI EFFETTUATE

È stato deciso di realizzare più analisi con diverse configurazioni in modo da capire quali possano essere le migliori soluzioni di design. Il primo fattore da considerare è la lunghezza dell'HDD che influenza l'attenuazione del potenziale lungo la tubazione stessa. Infatti più la linea è lunga, maggiore sarà l'area da proteggere e inoltre la strada che deve percorrere la corrente per passare dall'anodo al catodo aumenterà e creerà maggiori cadute di potenziale a causa della resistività dei terreni.

Le caratteristiche delle pipeline scelte per le analisi sono riassunte in Tabella 7.3.

Tabella 7.3: Dati di input della pipeline

Dati pipeline	1° caso	2° caso	3° caso	4° caso
Materiale	C-steel	C-steel	C-steel	C-steel
Lunghezza	300m	700m	1100m	1600m
Diametro esterno	18''	18''	18''	18''
Danneggiamento rivestimento	5%	5%	5%	5%

La lunghezza della linea varia da 300m a 1600m comprendendo un range di lunghezze maggiormente utilizzate in questo tipo di installazioni. Il diametro della tubazione e la valutazione del danneggiamento del rivestimento anticorrosivo sono stati scelti considerando dei valori medi per non influenzare ulteriormente i risultati dal momento che non è lo scopo di questo lavoro la realizzazione di un design specifico.

Per ogni lunghezza considerata sono state eseguite 3 prove in funzione del tipo di approdo, discusso nel capitolo 5, che si va a considerare:

- Approdo Mare-Spiaggia;
- Approdo Mare-Terra;
- Approdo Spiaggia-Terra.

Come ultimo passaggio si è arbitrariamente deciso di partire per ogni prova effettuata con 4 anodi a bracciale installati ad una distanza di 12 metri l'uno dall'altro cioè uno per ogni tratto di tubazione.

7.7. FATTORI CHE INFLUENZANO L'EFFICACIA DELLA PROTEZIONE CATODICA

Ci sono svariati fattori che influenzano le prove effettuate, andando a determinare l'effettiva capacità di proteggere o meno l'HDD.

7.7.1. Numero di anodi

Il primo fattore da considerare è il numero di anodi, infatti aumentando la quantità di anodi, aumenta la superficie anodica esposta che partecipa alla reazione elettrochimica. In ogni caso non ci si aspetta miglioramenti di grande rilevanza, in particolar modo nelle zone ad alta resistività dal momento che la capacità di fornire corrente è comunque limitata a differenza ad esempio di un sistema a corrente impressa.

7.7.2. Densità di corrente di protezione

Un altro fattore che influenza l'analisi è la densità di corrente di protezione. Come già anticipato, le normative che regolamentano la protezione catodica in ambiente off-shore suggeriscono di considerare come minima densità di corrente di protezione un valore di 20mA/m². Questo valore però è stato fornito per le condizioni che si trovano nei fondali marini e risulta essere eccessivamente cautelativo per un approdo a terra se confrontato con le densità di corrente tipiche di una progettazione on-shore.

Ricordando che la cinetica del processo è regolata dalla corrente limite di diffusione dell'ossigeno, si può facilmente intuire che in un terreno sicuramente più asciutto e con meno probabilità di ricambio di ossigeno, la corrente limite di diffusione sarà più bassa e questo comporta una diminuzione della densità di corrente di protezione da raggiungere. Perciò, soprattutto per quanto riguarda gli approdi Mare-Terra e Spiaggia-Terra, si potrebbero prendere in considerazione valori di densità di corrente di protezione tipici dei design di protezione catodica on-shore.

7.7.3. Estensione del modello 3D

Il modello realizzato ha dei confini ben definiti e considerati dal software completamente isolanti. Questo significa che a differenza della realtà in cui il sistema è immerso in uno spazio aperto, qui i confini del modello possono alterare l'efficacia del sistema di protezione catodica.

Riprendendo le misure del volume di terreno considerato (2800x1500x100 metri) si nota che la dimensione più piccola è quella dell'altezza. Questo potrebbe creare un ostacolo al passaggio delle linee di corrente che nella realtà potrebbero scorrere anche più in profondità. L'altezza del modello è determinata dalla profondità di scansione delle misurazioni di resistività del terreno, ma queste possono essere eseguite con un buon livello di accuratezza soltanto per profondità limitate. Andare oltre i 100 metri di profondità infatti significa ottenere valori molto approssimativi che potrebbero discostarsi in maniera rilevante dalla realtà.

Per vedere quanto effettivamente l'altezza del modello 3D influisca sulla protezione catodica si è deciso di fare delle prove sia aumentando che diminuendo tale altezza. È stato possibile aumentare

l'estensione in altezza del modello grazie a dei sondaggi elettrici verticali eseguiti fino ad una profondità di 200m, tenendo sempre bene a mente l'approssimazione di tali valori.

7.7.4. Discretizzazione dei terreni

Un ultimo fattore da considerare è la discretizzazione arbitraria dei terreni. Questa operazione è infatti fortemente operatore-dipendente. Per motivi organizzativi non è stato possibile approfondire questa problematica che potrebbe essere oggetto di studio per lavori futuri.

8. Analisi dei risultati

8.1. INTRODUZIONE

Di seguito vengono presentati i risultati delle simulazioni effettuate. Il modo migliore per analizzare i risultati è attraverso l'analisi del grafico in cui viene rappresentato il valore del potenziale E in funzione della lunghezza della tubazione, per poterne apprezzare l'attenuazione mano a mano che ci si allontana dagli anodi.

Una prima analisi viene eseguita in condizioni standard, cioè senza modificare i dati di input di progetto, ma in seguito si vanno ad analizzare le possibili ottimizzazioni che possono essere effettuate e si vanno a ricercare tutti quei fattori che potrebbero nel bene o nel male influenzare le simulazioni.

I risultati ottenuti sono da considerare approssimati e a livello qualitativo. Non è possibile pretendere che l'analisi riporti i valori esatti di potenziale lungo la linea se si considera che sono fatte diverse semplificazioni per poterla svolgere. Si ricorda infatti che lo scopo della tesi è di definire delle linee guida per la progettazione e il design del sistema di protezione catodica di un HDD piuttosto che la progettazione specifica per un determinato progetto.

8.2. PIPELINE 300M

8.2.1. Approdo mare-spiaggia

Come ci si aspettava, la linea da 300 m con approdo mare-spiaggia è completamente protetta e si trova ad un potenziale molto basso, con un leggero aumento negli ultimi metri in cui la tubazione raggiunge la costa (Figura 8.1).

8.2.2. Approdo mare-terra

Il grafico del potenziale della linea con approdo mare-terra (Figura 8.2) evidenzia in maniera chiara la linea di costa a circa 150 m, passando da una zona a resistività di 3,5 Ωm ad una da 10 Ωm . In questo caso la tubazione non risulta protetta negli ultimi 4 metri in cui viene a contatto con la zona a resistività di 1000 Ωm .

8.2.3. Approdo spiaggia-terra

Dopo i primi 5 metri di tubazione esposta a mare, si possono notare le 3 zone che attraversa la pipeline (Figura 8.3). Infatti sono presenti delle forti variazioni sulla curva passando da un terreno caratterizzato da una resistività di 10 Ωm nei primi 200 m, di 85 Ωm nei 100 m successivi e infine negli ultimi 6 m dove il terreno ha una resistività di 1000 Ωm , la pipeline non è protetta.

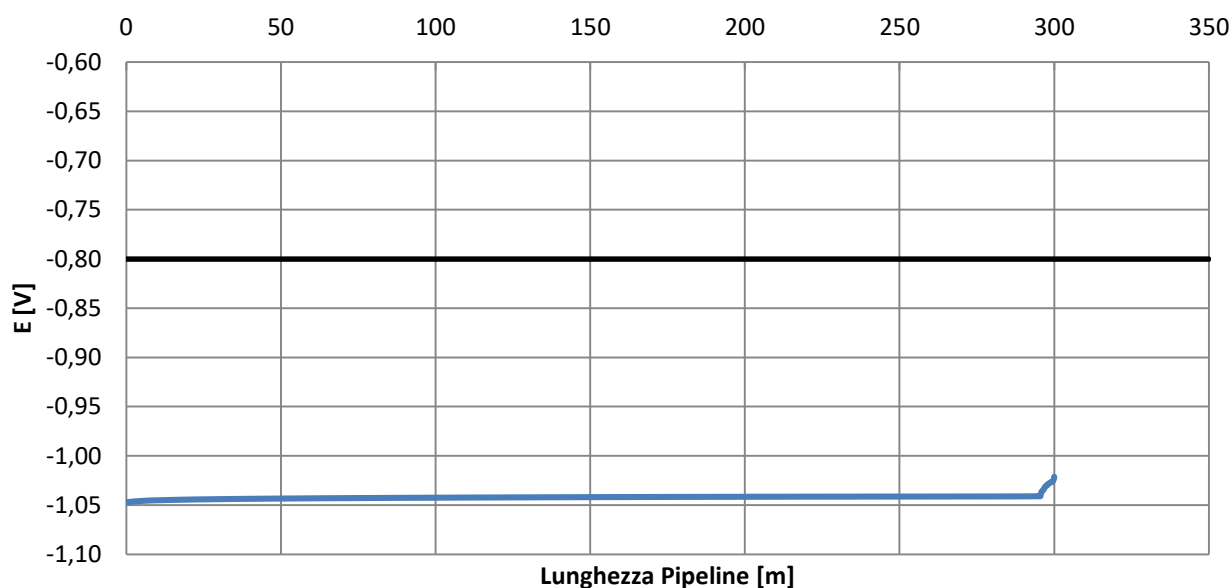


Figura 8.1: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 300m con approdo mare-spiaggia

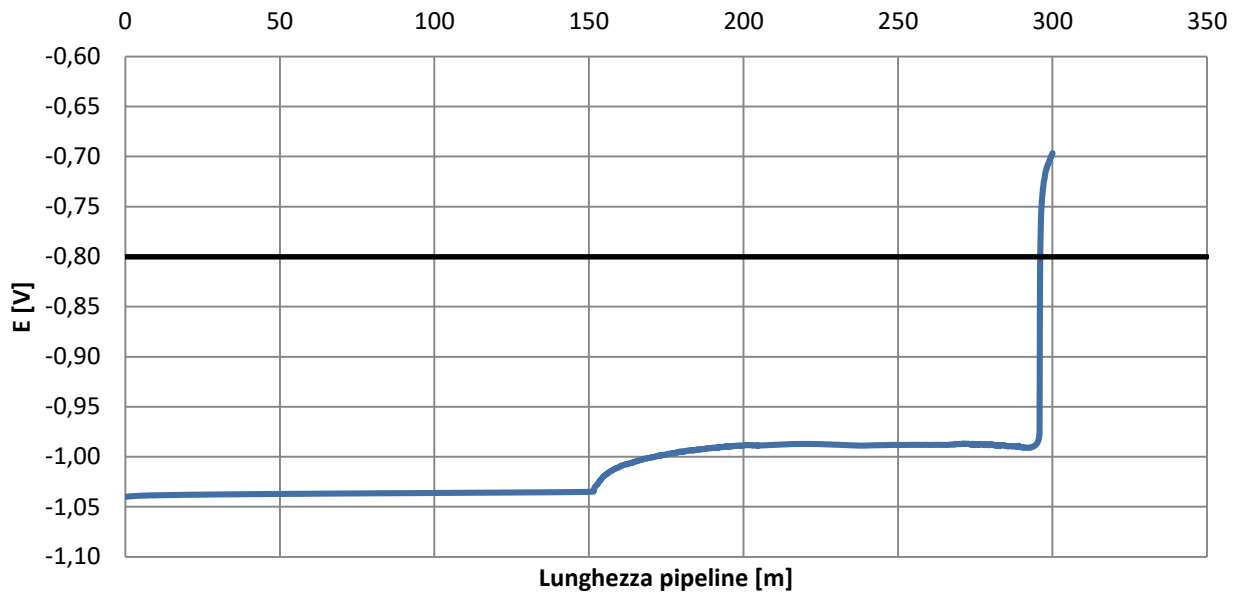


Figura 8.2: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 300m con approdo mare-terra

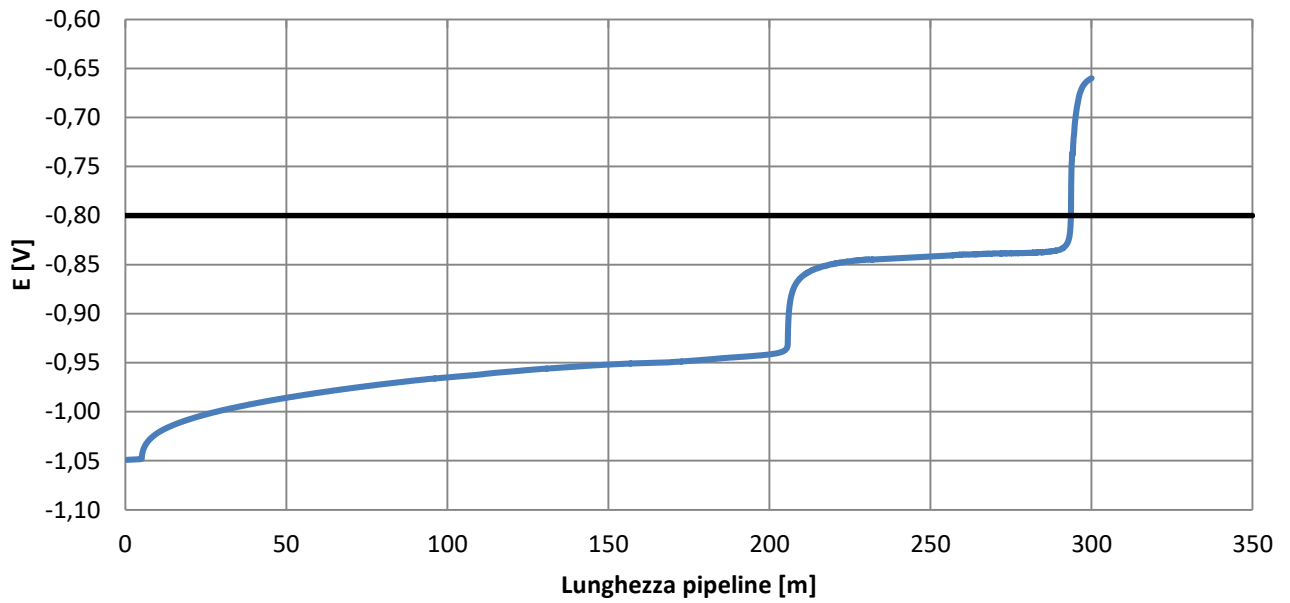


Figura 8.3: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 300m con approdo spiaggia-terra

8.3. PIPELINE 700M

8.3.1. Approdo mare-spiaggia

Come nel caso della pipeline di 300 m, anche qui nonostante la lunghezza sia più che raddoppiata, si ha una completa protezione della linea. Si può notare una forte variazione nella zona terminale della linea che entra in contatto con il terreno a 1000 Ωm (Figura 8.4). Questo comportamento in realtà non è realistico in quanto quei valori di resistività non si riscontrano mai nei primi metri di terra dalla linea di costa, ma per essere il più conservativi possibile si è deciso, a favore di sicurezza, di rimanere nel caso peggiore.

8.3.2. Approdo mare-terra

In questa configurazione si può apprezzare a 150 m circa il piccolo salto di potenziale dovuto al passaggio dal mare al terreno sottostante, in cui si passa da 0,2 Ωm a 3,5 Ωm (Figura 8.5). A 350 m si ha il passaggio sulla linea di costa, con successivo attraversamento di 3 terreni rispettivamente di resistività di 70 Ωm , 85 Ωm e infine 1000 Ωm . L'ultima zona, come già appurato nei casi precedenti, non risulta protetta.

8.3.3. Approdo spiaggia-terra

Dal grafico (Figura 8.6) si può notare la prima zona di circa 130 m che possiede una resistività di 10 Ωm , per poi passare alla seconda da 70 Ωm , in cui a circa 300 m il potenziale supera i -0,8 V. Da 300 a 400 metri circa la linea non risulta protetta, ma da 400 m in poi si ha un abbassamento della resistività a 40 Ωm e questo fa abbassare il potenziale della pipeline che torna a valori inferiori a -0,8 V per circa 170 m. Nelle ultime due zone, rispettivamente a 85 Ωm e 1000 Ωm , la linea risulta nuovamente non protetta.

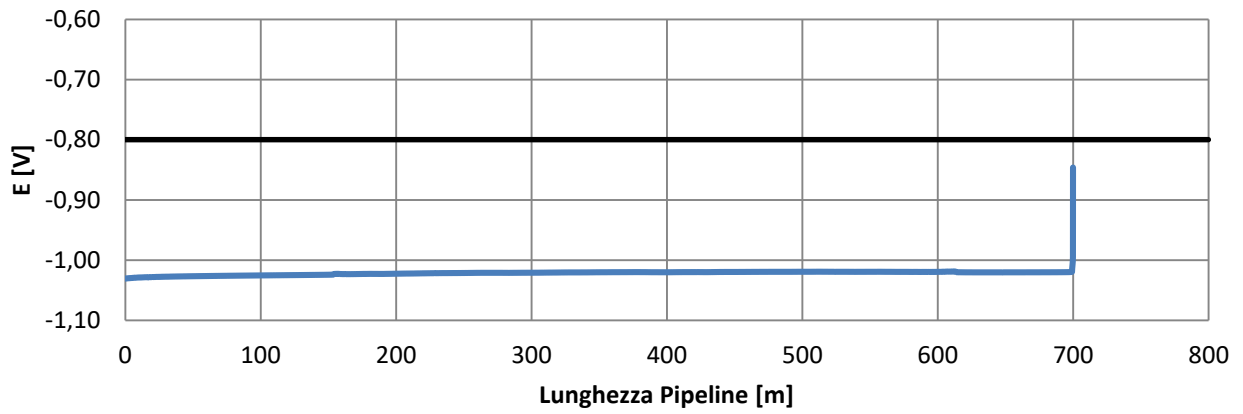


Figura 8.4: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 700m con approdo mare-spiaggia

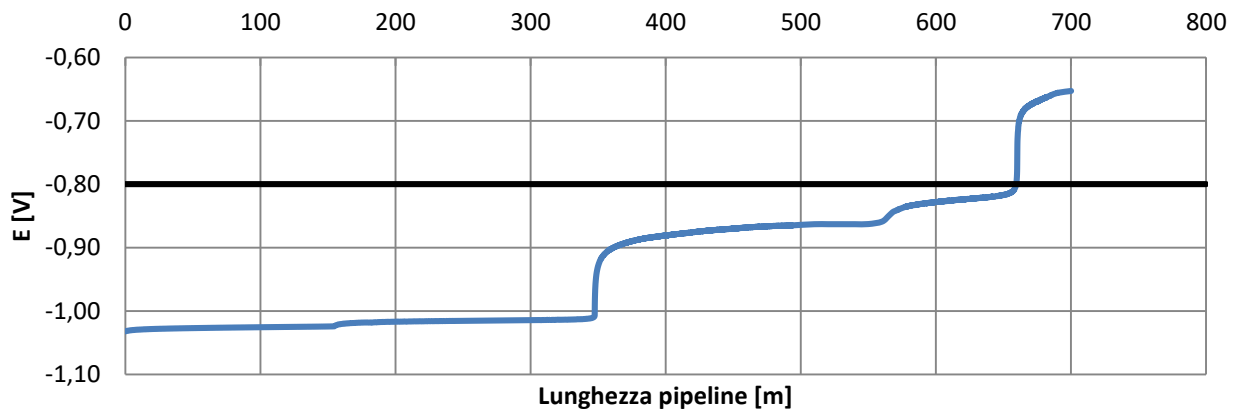


Figura 8.5: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 700m con approdo mare-terra

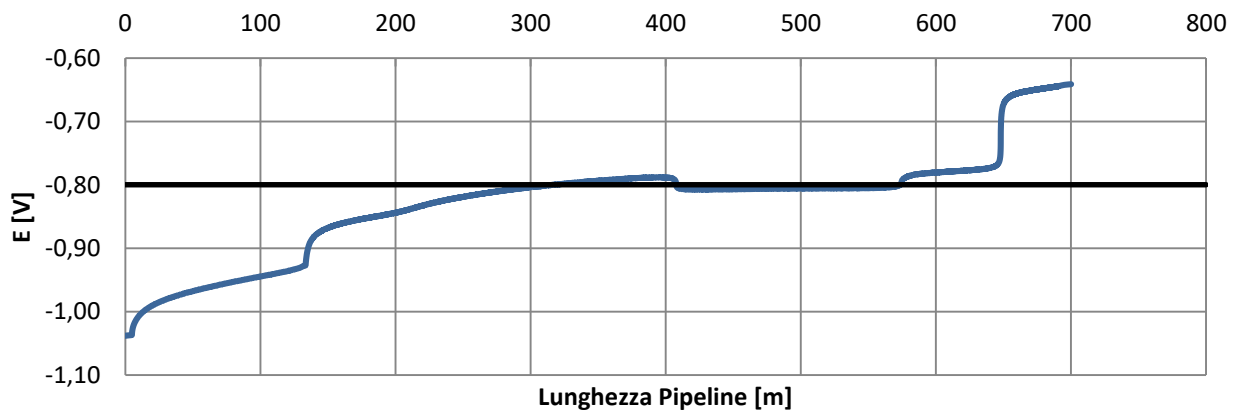


Figura 8.6: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 700m con approdo spiaggia-terra

8.4. PIPELINE 1100M

8.4.1. Approdo mare-spiaggia

I 1100 m di tubazione sono protetti in configurazione di approdo mare-spiaggia (Figura 8.7).

8.4.2. Approdo mare-terra

Si può rilevare un comportamento simile ai precedenti. Il potenziale ha un andamento quasi costante nella zona mare per poi aumentare superata la linea di costa (Figura 8.8). La protezione è garantita fino a circa 850 m, di cui 550 m nella zona a mare e i restanti 300 nella zona a terra. Gli ultimi 350 m non sono protetti.

8.4.3. Approdo spiaggia-terra

In questo caso, dopo i primi metri a mare, si hanno 5 attraversamenti in zone con diverse resistività (Figura 8.9). Come lecito aspettarsi quest'ultimo scenario risulta essere il peggiore, con 300 metri di pipeline protetta e i restanti 800 in cui non si riesce a garantire un potenziale inferiore a $-0,8$ V.

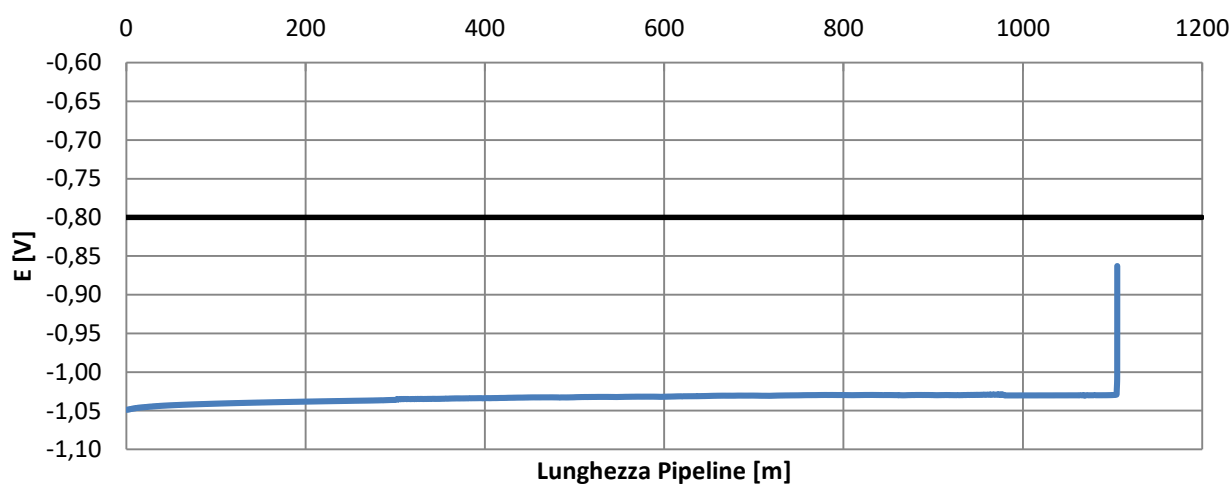


Figura 8.7: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 1100m con approdo mare-spiaggia

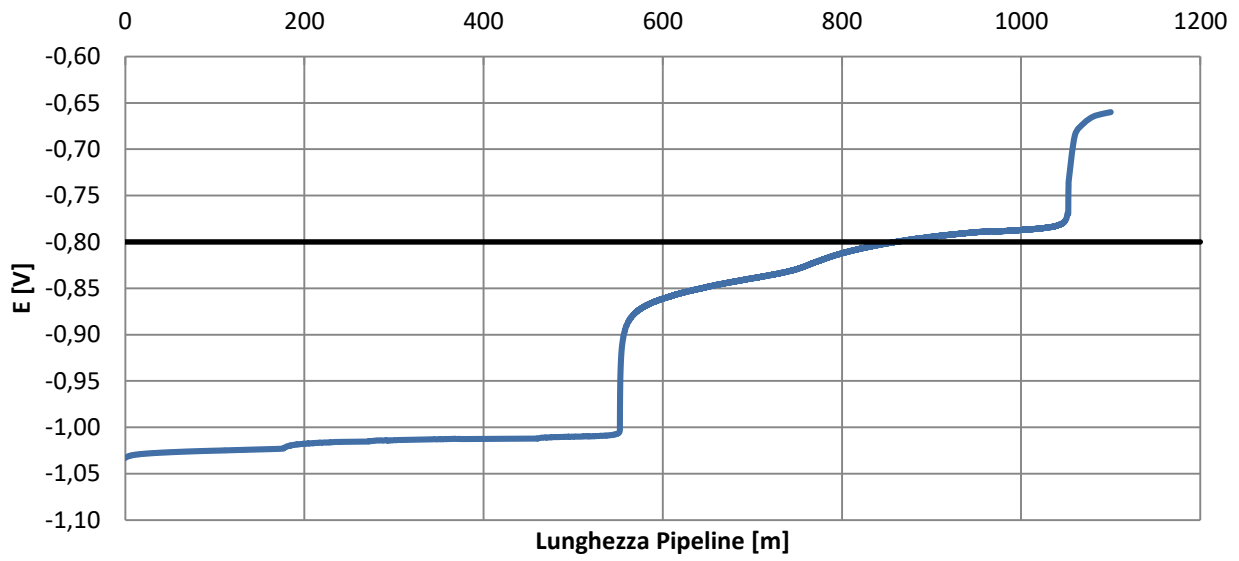


Figura 8.8: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 1100m con approdo mare-terra

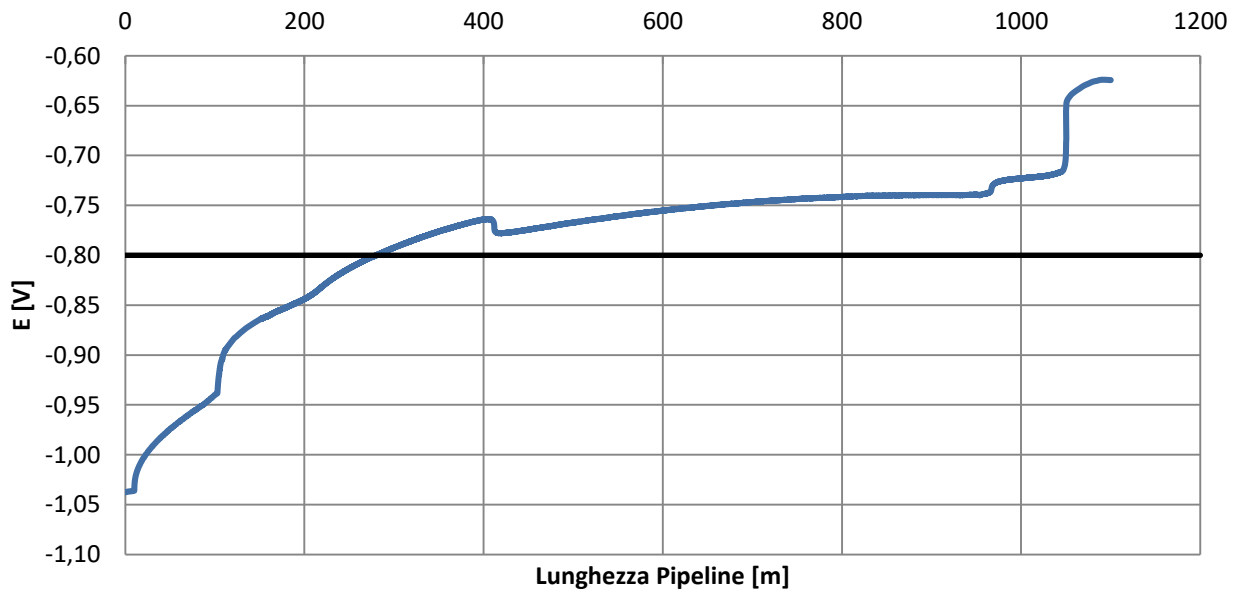


Figura 8.9: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 1100m con approdo spiaggia-terra

8.5. PIPELINE 1600M

8.5.1. Approdo mare-terra

È stata analizzata un'unica configurazione per la linea da 1600 m dal momento che installazioni così lunghe difficilmente sono effettuabili con gli altri due tipi di approdo ed inoltre una dimensione del genere mette in luce i limiti software e hardware per eseguire in maniera agevole le simulazioni.

Allo stato attuale non si è riusciti, in tempi ragionevoli, ad eseguire simulazioni per linee più lunghe 1600 m. In ogni caso, anche con questa configurazione si ha completa protezione della parte a mare lunga 801 m, mentre per la parte a terra si è protetti per 290 m, per un totale di 1091 m cioè il 68,2% della lunghezza totale (Figura 8.10).

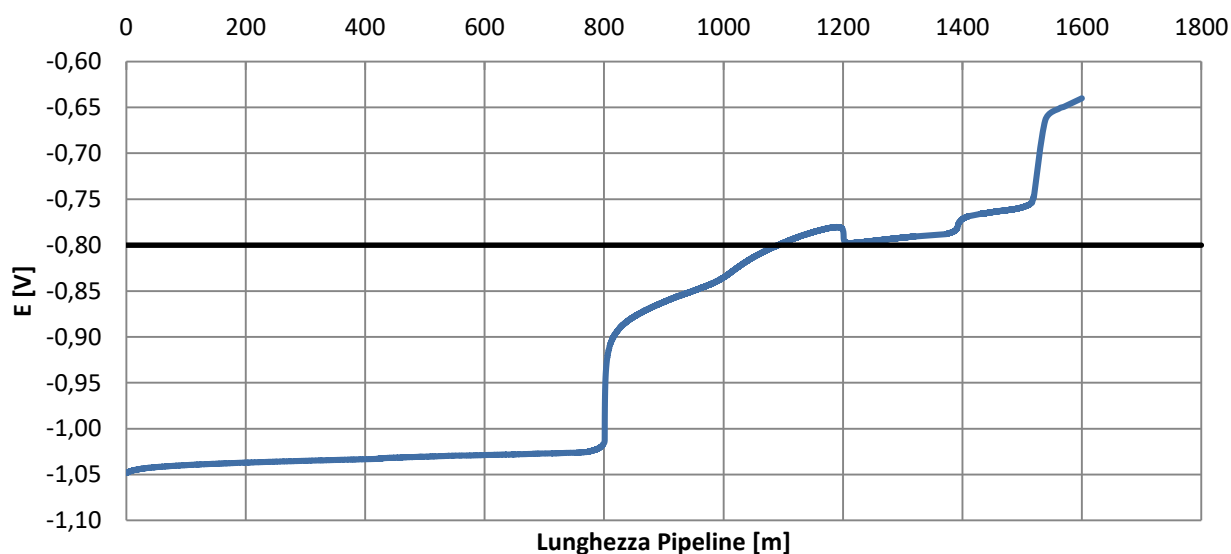


Figura 8.10: Andamento del potenziale lungo una pipeline da 1600m con approdo mare-terra

8.6. RISULTATI OTTIMIZZATI

Data la pesantezza dei modelli e le tempistiche necessarie per eseguire le simulazioni, sono state effettuate le necessarie ottimizzazioni solo in alcuni modelli considerati più interessanti per l'analisi. I casi con approdo mare-spiaggia non sono stati presi in considerazione in quanto già adeguatamente protetti. Le strategie utilizzate per migliorare l'efficacia del sistema di protezione catodica in questo caso possono essere molteplici:

1. Aumentare il numero di anodi in Alluminio;
2. Diminuire la densità di corrente necessaria alla protezione;

8.6.1. Aumento del numero degli anodi

La prima strategia utile per aumentare il raggio di azione della protezione è aumentare il numero di anodi. I casi con approdo tutto a mare non sono stati presi in considerazione in quanto già adeguatamente protetti, perciò si inizia ad analizzare la linea da 300m con approdo mare-terra. Si è proceduto aumentando il numero di anodi, passando da 4 a 16.

Pur avendo quadruplicato il numero di anodi, la situazione che si presenta non è molto diversa dall'originale (Figura 8.11). Lo scostamento medio della curva di potenziale è 7,5 mV e non si raggiunge la protezione negli ultimi 4 metri come nella configurazione a 4 anodi. I risultati vengono riassunti nella seguente Tabella 8.1.

Tabella 8.1: Confronto risultati per pipeline da 300m con approdo mare-terra tra 4 e 16 anodi

	L_tot [m]	L_protetta [m]	L_protetta %	ΔL [m]	ΔL %	ΔE [mV]
4 anodi 20mA	300	296	98.7%	/	/	/
16 anodi 20mA	300	296	98.7%	0	0.0%	7.5

Nel caso di approdo spiaggia-terra con pipeline di 700 m la situazione non cambia e addirittura risulta ancora meno impattante aumentare il numero di anodi per lunghezze crescenti della pipeline (Figura 8.12). Lo scostamento medio della curva, come mostrato in Tabella 8.2, risulta essere 5,1 mV e la porzione di pipeline protetta aumenta di 22 m cioè del 3,14% della lunghezza totale, passando da 316 m a 338 m.

Tabella 8.2: Confronto risultati per pipeline da 700m con approdo spiaggia-terra 4 e 16 anodi

	L_tot [m]	L_protetta [m]	L_protetta %	ΔL [m]	ΔL %	ΔE [mV]
4 anodi 20mA	700	315	45.1%	/	/	/
16 anodi 20mA	700	338	48.3%	22	3.2%	5.1

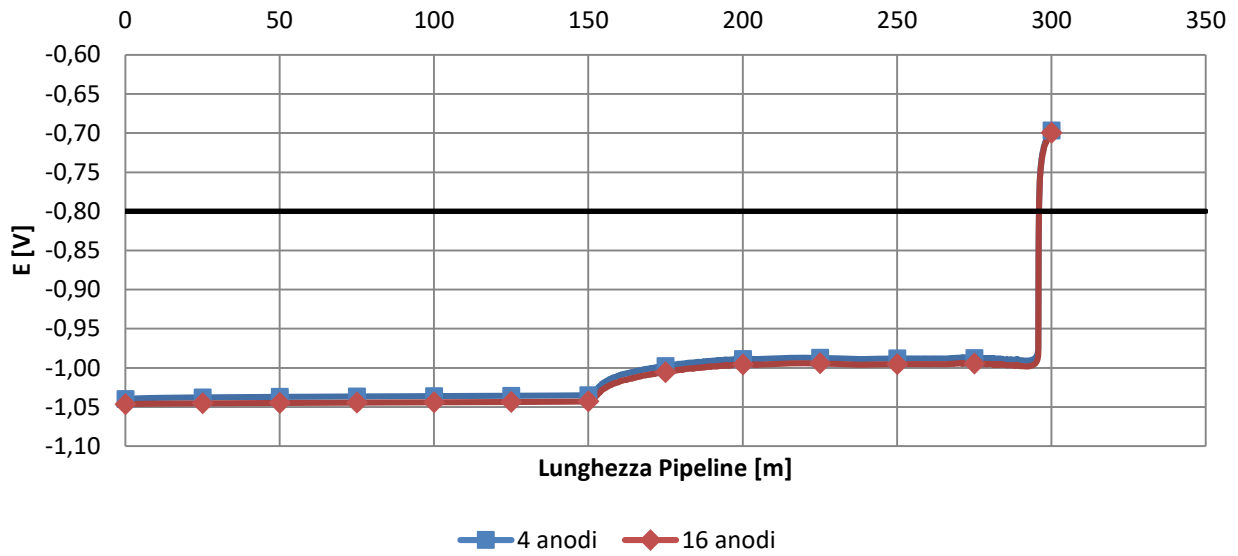


Figura 8.11: Confronto andamento del potenziale lungo una pipeline da 300m con approdo mare-terra tra 4 e 16 anodi

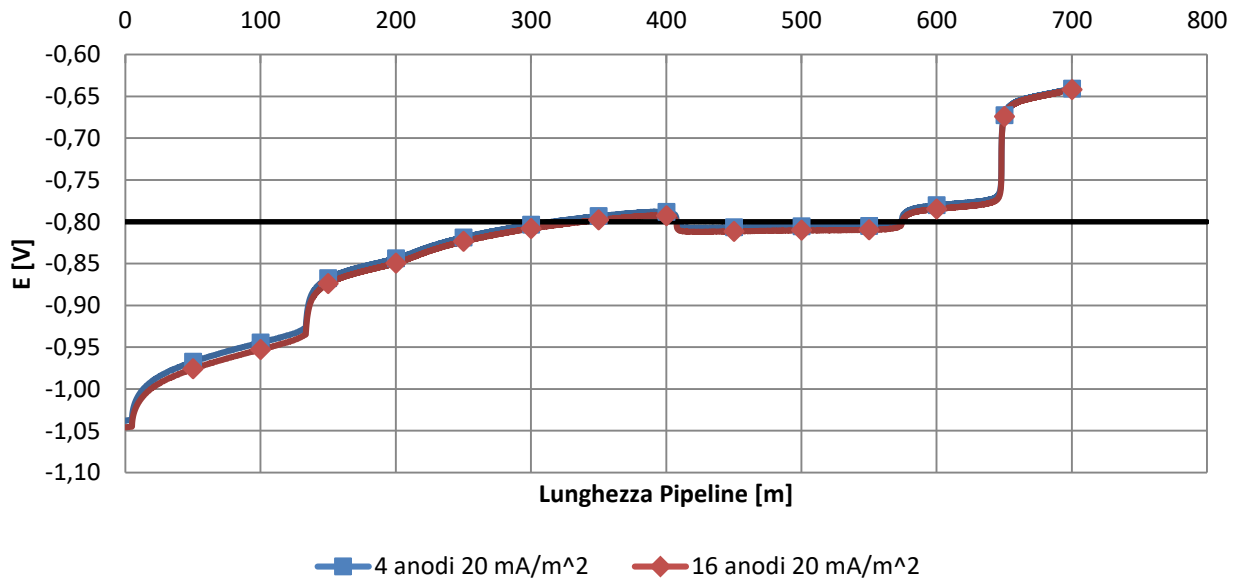


Figura 8.12: Confronto andamento del potenziale lungo una pipeline da 700m con approdo spiaggia-terra tra 4 e 16 anodi

8.6.2. Diminuzione della densità di corrente di protezione

Soprattutto negli approdi spiaggia-terra, considerare una densità di corrente di 20mA/m^2 risulta essere un approccio estremamente conservativo in quanto la corrente limite di diffusione dell'ossigeno è minore rispetto ad uno scenario off-shore. Per polarizzare la pipeline si possono considerare delle densità di corrente molto inferiori, precisamente 10mA/m^2 e 4mA/m^2 , valori tipicamente usati per la progettazione di strutture on-shore.

Si consideri la linea da 700 m con approdo spiaggia-terra.

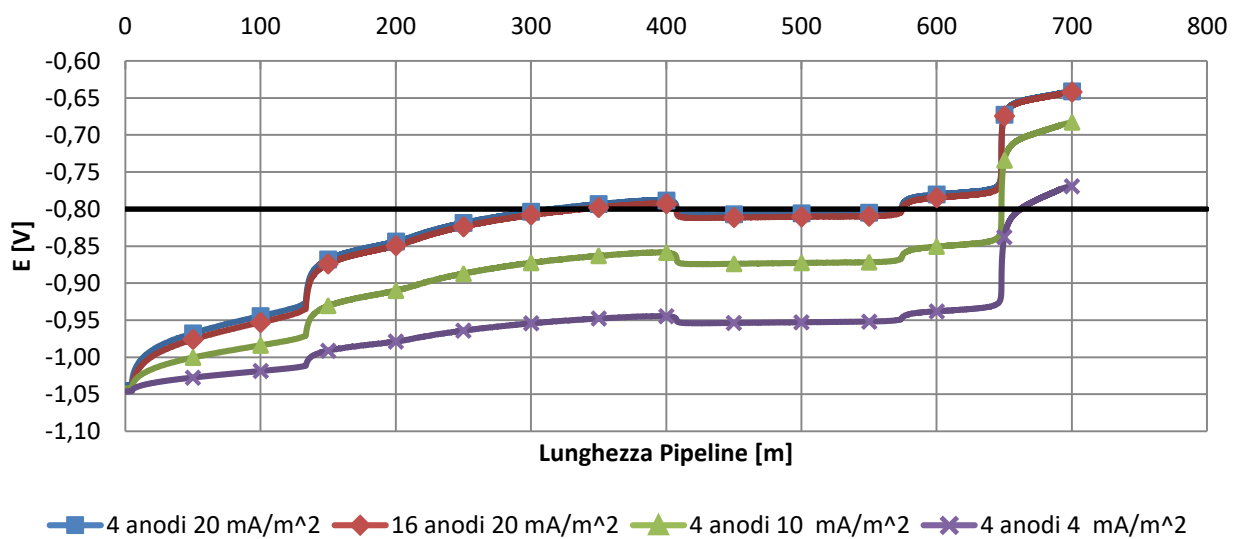


Figura 8.13: Confronto andamento del potenziale lungo una pipeline da 700m con approdo spiaggia-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

Viene riportata anche la curva con 16 anodi precedentemente discussa come riferimento. In Figura 8.13 si può notare come tutte le curve mantengano lo stesso tipo di andamento, evidenziando gli attraversamenti delle zone a diversa resistività.

Partendo dalla curva a 10mA/m^2 si riscontra un netto abbassamento del potenziale con uno scostamento medio rispetto alla curva a 20mA/m^2 di 59,6 mV. La parte di linea protetta aumenta di 333 m (47,4%) passando da 316 a 648 metri.

Andando ad analizzare la curva a 4mA/m^2 si riscontra un abbassamento medio del potenziale di 130,6 mV rispetto alla curva a 20mA/m^2 . Si ha un'adeguata protezione su 662 metri di linea aumentando la zona protetta di 347 metri (49,5%). Tutti i risultati sono riassunti in Tabella 8.3.

Tabella 8.3: Confronto risultati per pipeline da 700m con approdo spiaggia-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

	L_tot [m]	L_protetta [m]	L_protetta %	ΔL [m]	ΔL %	ΔE [mV]
4 anodi 20mA	700	315	45.1%	/	/	/
4 anodi 10mA	700	648	92.6%	333	47.5%	59.6
4 anodi 4mA	700	662	94.6%	347	49.5%	130.6

Nonostante il netto miglioramento, in nessuno dei due casi si riesce a garantire una completa protezione della linea. Infatti l'ultimo tratto che attraversa la zona a resistività di 1000 Ωm risulta completamente non protetto a 10 mA/m², mentre risulta protetto solo per i primi 14 metri e non protetto per i restanti 38 a 4 mA/m².

A questo punto diventa interessante verificare se è possibile raggiungere la protezione della linea di 1100 m con configurazione di approdo mare-terra, dal momento che, a differenza del caso precedente, la parte a terra che attraversa le zone più resistenti è minore (Figura 8.14).

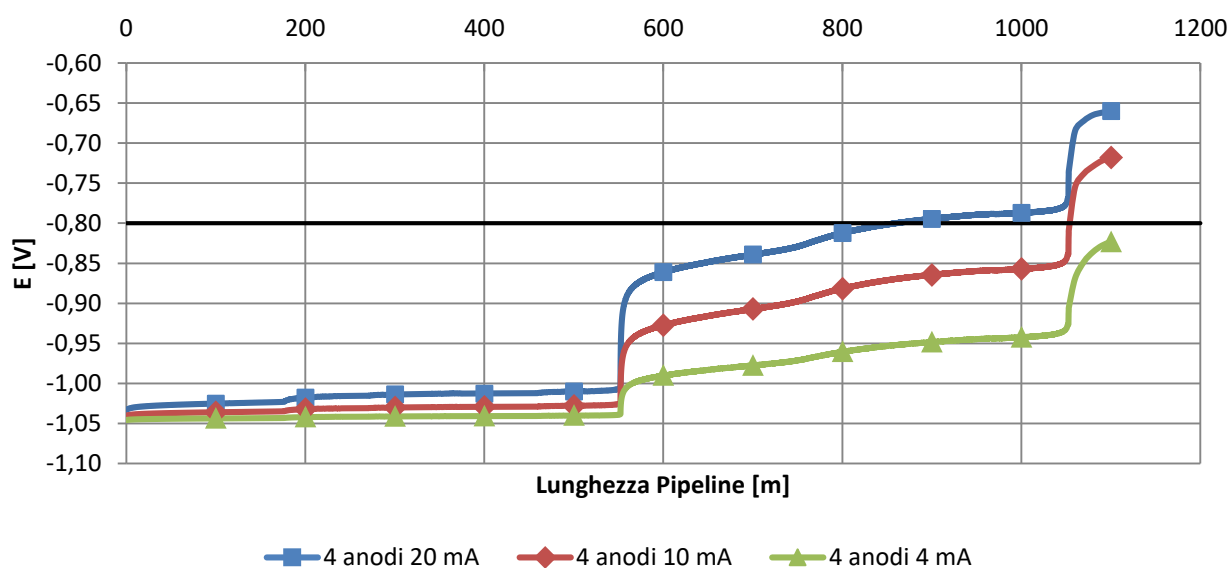


Figura 8.14: Confronto andamento del potenziale lungo una pipeline da 1100m con approdo mare-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

Prendendo in considerazione la curva di potenziale a 10 mA/m² si evidenzia, come in precedenza, un netto miglioramento della protezione con un abbassamento medio del potenziale di 44 mV e un aumento di protezione di 193 m (17,6%), passando da 860 a 1053 metri.

Analizzando la curva a 4 mA/m² si può subito notare che si riesce a garantire la protezione dell'intera pipeline, proteggendo completamente anche la zona a 1000 Ωm. L'abbassamento medio di potenziale è 90,4 mV e la distanza protetta aumenta del 21,8%.

Tabella 8.4: Confronto risultati per pipeline da 1100m con approdo mare-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

	L_tot [m]	L_protetta [m]	L_protetta %	ΔL [m]	ΔL %	ΔE [mV]
4 anodi 20mA	1100	860	78.2%	/	/	/
4 anodi 10mA	1100	1053	95.7%	193	17.6%	44.0
4 anodi 4mA	1100	1100	100.0%	240	21.8%	90.4

È stato preso in considerazione anche l'approdo spiaggia-terra per la linea di 1100m analizzando nuovamente le 3 casistiche che si verificano (Figura 8.15).

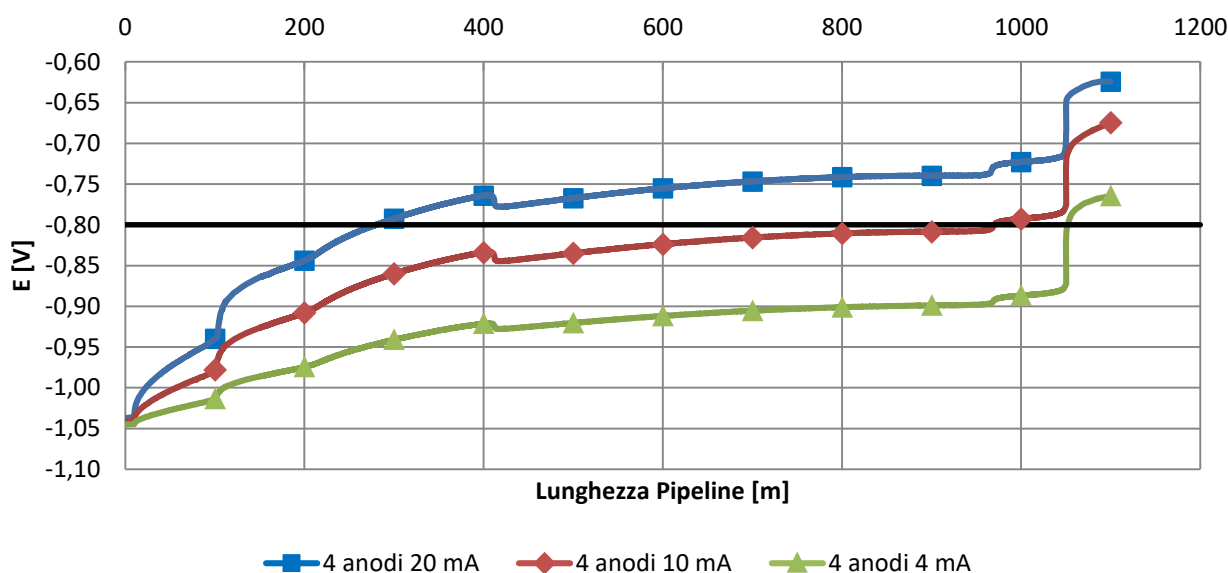


Figura 8.15: Confronto andamento del potenziale lungo una pipeline da 1100m con approdo spiaggia-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

Osservando la Tabella 8.5, nell'approdo spiaggia-terra, considerando la curva a 10 mA/m² si ha un abbassamento medio del potenziale di 63,7 mV passando da 280 a 970 metri di linea protetta, con un aumento di protezione di 690 m (62,7%).

Nel caso a 4 mA/m², la linea è protetta per 1070 m con un aumento rispetto al caso a 20 mA/m² di 790 m (71,8%) e con un abbassamento medio del potenziale di 142,7 mV.

Tabella 8.5: Confronto risultati per pipeline da 1100m con approdo spiaggia-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

	L_tot [m]	L_protetta [m]	L_protetta %	ΔL [m]	ΔL %	ΔE [mV]
4 anodi 20mA	1100	280	25.5%	/	/	/
4 anodi 10mA	1100	970	88.2%	690	62.7%	63.7
4 anodi 4mA	1100	1050	95.5%	770	70.0%	142.6

L'ultima simulazione effettuata variando la densità di corrente di protezione è stata sull'HDD da 1600m (Figura 8.16), caso con la lunghezza della tubazione massima che si è riusciti a studiare in tempi accettabili e senza instabilità da parte del software.

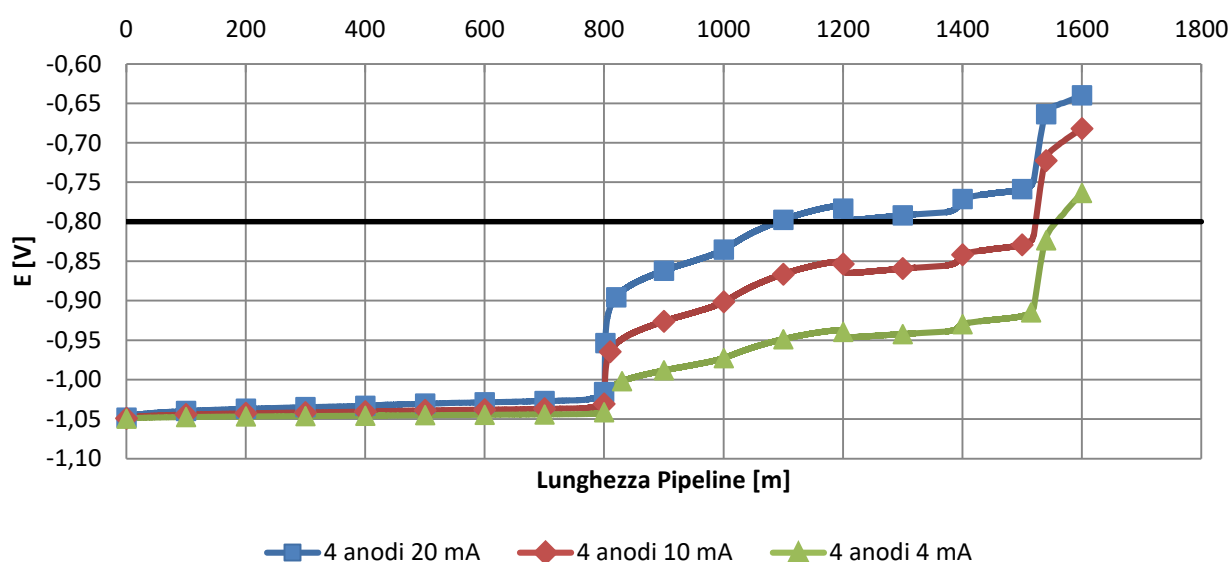


Figura 8.16: Confronto andamento del potenziale lungo una pipeline da 1600m con approdo spiaggia-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

Dalla Tabella 8.6 si può notare che a 10 mA/m² la linea è protetta per 1523 m (95.2%) con un incremento del 27,0% della lunghezza protetta; mentre a 4 mA/m² si ha una protezione di 1559 m con un incremento del 29.2% della protezione.

Tabella 8.6: Confronto risultati per pipeline da 1600m con approdo mare-terra tra 20, 10, 4 mA/m²

	L_tot [m]	L_protetta [m]	L_protetta %	ΔL [m]	ΔL %	ΔE [mV]
4 anodi 20mA	1600	1091	68.2%	/	/	/
4 anodi 10mA	1600	1523	95.2%	432	27.0%	34.0
4 anodi 4mA	1600	1559	97.4%	467	29.2%	71.2

8.7. MODIFICA DELLA PROFONDITÀ DEL MODELLO 3D

Volendo capire quanto le zone più profonde di terreno possano effettivamente influire sulla protezione, si è deciso di eliminare gli ultimi 50 metri più profondi di terreno e lanciare di nuovo l'analisi. Anche in questo caso ci sono state variazioni abbastanza rilevanti. La curva si discosta dalla curva standard in maniera evidente con una differenza massima di potenziale pari a 38,9 mV, perdendo 67 m di protezione.

Tabella 8.7: Confronto risultati per modelli a diverse profondità

	L_tot	L_protetta [m]	L_protetta %	ΔL [m]	ΔL %	ΔE [mV]
100m depth	700	315	45,00%			
50m depth	700	248	35,43%	67	9,57%	0,038934
200m depth	700	641	91,57%	326	46,57%	0,038733

Avendo appurato che rimuovendo una metà del terreno si verificano forti modificazioni della protezione catodica, ora può essere interessante verificare cosa succede raddoppiando la profondità portandola fino a 200 m. È stata fatta una media sulle analisi SEV disponibili (Tabella 8.8) che analizzano la resistività da 100 a 200 metri di profondità.

Tabella 8.8: Valori di resistività ad una profondità di indagine da 100 a 200 metri

SEV	ρ [Ωm]
SEV 4	150
SEV 5	80
SEV 6	100
SEV 7	40
SEV 8	60
SEV 9	20
SEV 10	70

È stato quindi assegnato a questo nuovo strato un valore di resistività medio di 74 Ωm ed è stata eseguita l'ultima simulazione. Come si può notare in Figura 8.17 si ha un abbassamento del potenziale massimo di 38,7 mV e un aumento della protezione a 641 m, guadagnando 326 metri senza dover modificare il design della protezione catodica.

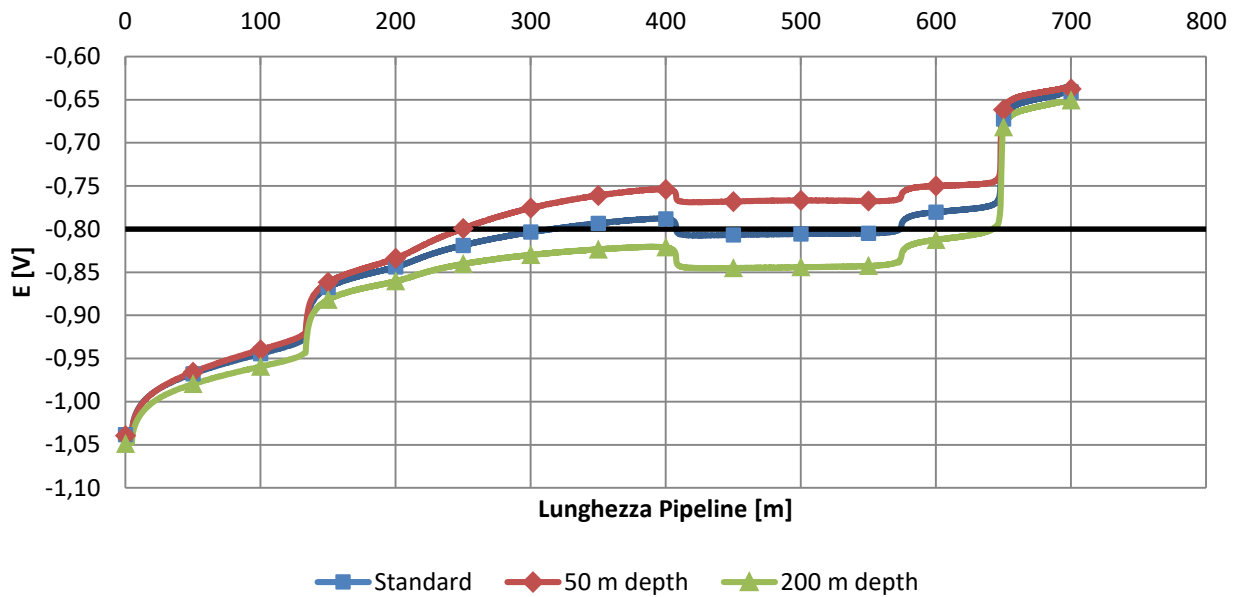


Figura 8.17: Confronto andamento del potenziale lungo una pipeline da 700m con approdo spiaggia-terra tra diverse profondità del terreno

8.8. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

A partire dai primi **risultati non ottimizzati** sono emerse importanti informazioni:

1. Negli approdi mare-spiaggia si ha sempre un'ottima protezione dell'intera linea. Questo è un importante risultato che può essere preso in considerazione ad esempio in zone in cui si possono trovare barriere coralline dove non è possibile alterare il fondale marino e diventa necessario uscire con un HDD anche a più di 1km al largo dalla costa.
2. Un altro risultato che si riscontra in tutti i modelli analizzati in cui si è utilizzata una densità di corrente di protezione di 20 mA/m^2 , è che indipendentemente dalla lunghezza della tubazione che attraversa la zona a mare a bassa resistività, una volta che si arriva a terra, nelle zone che hanno una resistività fino a $70 \Omega\text{m}$ si riescono a proteggere circa 300 m di tubazione.
3. Infine l'ultimo risultato mette in evidenza che nelle condizioni in cui sono state effettuate le simulazioni, gli anodi di alluminio non riescono in alcun caso a proteggere la pipeline quando questa attraversa il terreno con resistività pari a $1000 \Omega\text{m}$.

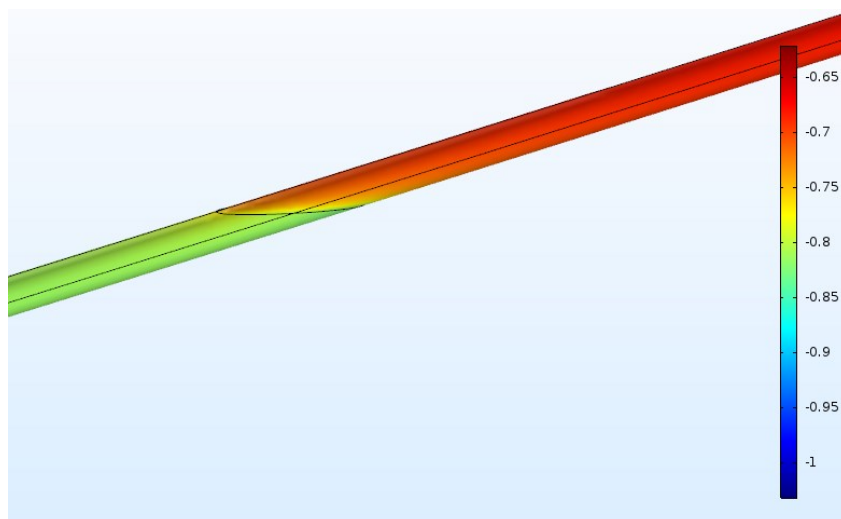


Figura 8.18: Passaggio dal terreno a 85 Ωm a 1000 Ωm

La Figura 8.18 correla il valore di potenziale lungo la pipeline con una scala cromatica in cui si hanno i valori più alti di potenziale indicati con il colore rosso e i più bassi indicati con in colore blu. Qui si può constatare il passaggio verso il terreno a 1000 Ωm , in cui si ha un salto netto del potenziale messo bene in evidenza dal cambio di colore dal verde (zona protetta sotto a -0,8 V) al rosso (zona non protetta sopra a -0,8 V).

Dalle prove in **configurazione ottimizzata** si possono fare ulteriori considerazioni:

1. Aumentare il numero di anodi contribuisce in maniera minima a migliorare la protezione (fino ad un 3% in più al massimo) nel caso di terreni che hanno valori di resistività intorno a 50-100 Ωm , mentre è completamente ininfluenza quando la resistività passa a 1000 Ωm . Non sembra perciò essere una strategia utile aumentare a dismisura il numero di anodi per quel che riguarda il potenziale di protezione da raggiungere. Queste considerazioni però non tengono conto del consumo degli anodi nel tempo, che potrebbero influire sulla scelta del loro numero in funzione della massa totale che deve essere garantita a fine vita.
2. Le principali normative di protezione catodica in ambiente off-shore concordano che la densità di corrente di protezione usata per strutture interrato (buried) in condizioni standard è pari 20 mA/m². Quando però si studia un HDD che è posizionato proprio dove finisce la zona off-shore e inizia la zona on-shore, il valore di densità di corrente considerato diventa estremamente conservativo e perciò si può pensare di utilizzare valori di densità di corrente

più bassi, senza andare ad inficiare la sicurezza. Come ci si aspettava, questo tipo di approccio ha evidenziato un netto miglioramento della protezione lungo la linea, soprattutto negli approdi spiaggia-terra arrivando a proteggere dal 27% fino al 70% di linea in più. In ogni caso, per tutti i modelli analizzati, a parte il caso della linea da 1100 m con approdo mare-spiaggia, non si riesce a garantire la protezione per la zona a 1000 Ωm .

Infine **variando la profondità del terreno** si può affermare che.

1. Dimezzando la profondità e quindi la superficie di passaggio di corrente, nonostante la zona eliminata sia ad alta resistività (100 Ωm) si ha un netto peggioramento della protezione della linea.
2. Al contrario, raddoppiandola si ottengono evidenti miglioramenti che nel caso analizzato hanno aumentato la protezione della pipeline raddoppiandola senza dover modificare il design di progetto.

Questo può essere un risultato importante che mette in discussione il modo di procedere nell'eseguire le modellazioni tramite Comsol che automaticamente considera isolati i confini del modello. Avendo a disposizione mappe di resistività con profondità di analisi limitata infatti si deve considerare che la superficie inferiore sarà isolata non permettendo il passaggio di corrente negli strati inferiori, quando nella realtà questo passaggio avviene e può determinare un diverso il risultato finale.

9. Conclusioni

9.1. CONSIDERAZIONI SUL LAVORO SVOLTO

Lo scopo principale di questo lavoro era quello di riuscire a trovare una strada che potesse proporre un'alternativa efficiente alla progettazione dei sistemi di protezione catodica ad anodi galvanici per tubazioni in ambiente marino nel caso di un approdo a terra realizzato tramite la tecnica di trivellazione in direzione orizzontale.

Questa particolare tecnica di installazione innovativa infatti porta con sé, oltre a tutti i vantaggi che l'hanno affermata sul panorama dell'oil&gas, dei vincoli e delle problematiche di installazione che rendono difficoltoso l'utilizzo delle procedure classiche di progettazione del sistema di protezione catodica, tantoché le principali normative internazionali non ne fanno esplicitamente riferimento.

L'approccio che si è scelto per affrontare questo problema è stato quello di una modellazione multi fisica agli elementi finiti grazie all'utilizzo del software Comsol Multyphysics.

Il lavoro è stato diviso in due fasi principali, una prima fase di studio sia della teoria della protezione catodica che dell'utilizzo del software per un utilizzo efficiente e ripetibile e una seconda fase in cui operativamente si è andati a svolgere diverse analisi e simulazioni per cercare di trovare delle linee guida solide e di mettere in luce pregi e difetti di questo tipo di approccio.

La prima fase di studio è stata necessaria per padroneggiare al meglio i principi della protezione catodica e per definire in maniera chiara tutti quelli che sono i dati di input necessari al programma per funzionare efficacemente, come ad esempio l'approccio alle curve di polarizzazione e la discretizzazione dei terreni in funzione della resistività. Grazie all'utilizzo in combinazione a Comsol del foglio di calcolo di Excel si è riusciti a snellire tutte le procedure di inserimento dei dati di input nel programma, sia per quel che riguarda la costruzione del modello 3D con la relativa

discretizzazione dei terreni sia per quanto riguarda l'impostazione del problema elettrochimico e in particolar modo l'utilizzo delle curve di polarizzazione ricavate ad hoc in funzione delle necessità.

Nella seconda fase invece è stato operativamente svolto un lavoro di progettazione della protezione catodica per HDD, scegliendo una configurazione racchiudesse diverse tipologie di situazioni che possono essere incontrate nella pratica. Si è infatti constatato che, nell'ambito della simulazione della protezione catodica per approdi a mare, i risultati della modellazione sono significativamente influenzati dalla presenza di un terreno con una ampia diversità di conducibilità elettrolitica; dai possibili tipi di approdo che possono rappresentare condizioni operative più tendenti ai casi off-shore oppure on-shore; e dalla lunghezza della tubazione in esame.

Sono poi state eseguite delle ottimizzazioni sul design per individuare quali potessero essere i parametri che maggiormente influiscono sulle prestazioni e quali potessero essere i limiti del software e del tipo di approccio utilizzato.

9.2. VANTAGGI E SVANTAGGI

Dai risultati ottenuti si possono mettere in luce i vantaggi e gli svantaggi di questo metodo.

I vantaggi principali riscontrati sono:

1. Si può stimare il potenziale in ogni punto della tubazione, questo diventa un ottimo supporto per il progettista dal momento che una volta installata, non è più possibile eseguire misurazioni in maniera agevole sul campo;
2. Si può fare un'ottimizzazione specifica del design della protezione catodica, dato che è possibile variare il singolo parametro per capire quanto questo possa effettivamente influenzare la soluzione;
3. Si può avere un ulteriore strumento di valutazione che contribuisca a superare i limiti della progettazione empirica basata più sull'esperienza che su una base teorica dei fenomeni;
4. Si supporta e motiva la possibilità concreta di installare anodi che possono proteggere anche distanze superiori ai 300m suggeriti dalle principali normative;
5. Si ha un output visivo dei risultati che in fase di discussione del progetto con un potenziale cliente riduce al minimo le incomprensioni.

Ci sono però anche degli aspetti negativi legati all'utilizzo di questo approccio fra cui:

1. Rimane in ogni caso un modello semplificato della realtà e anche qui sta all'operatore riuscire ad interpretare i risultati e comprenderne il grado di approssimazione;
2. La discretizzazione dei terreni e l'approccio alle curve di polarizzazione rimangono due passaggi fortemente operatore-dipendenti e da questo punto di vista non è stato ancora possibile trovare una soluzione per rendere ripetibile il processo indipendentemente da chi lo svolge;
3. Ci sono ancora dei limiti a livello software e hardware che non permettono di studiare in tempi ragionevoli modelli molto complessi.

9.3. POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

In conclusione, anche se il lavoro svolto è da considerarsi come una base da cui partire per l'utilizzo degli elementi finiti applicati al problema della protezione catodica, si può affermare che questa metodologia può concretamente trovare impiego nell'ambiente lavorativo.

Ci sono tanti aspetti che per motivi di tempo non sono stati presi in considerazione e dai cui si potrebbero impostare studi futuri. Si potrebbe costruire un modello adatto ad uno studio tempo variante che prenda in considerazione anche il consumo degli anodi nel tempo. Oppure si potrebbero investigare le possibilità di far cooperare gli anodi sacrificali a mare con gli anodi a terra, o con un sistema a corrente impressa per i casi più complessi. Infine proseguire con il migliorare la procedura di immissione dei dati in input già iniziata durante questo progetto per snellire il più possibile il lavoro e renderlo sempre più efficiente.

In generale riuscire a perfezionare tutto il processo di simulazione del problema elettrochimico permetterà di ottimizzare la distribuzione e il numero di anodi da utilizzare in relazione alle caratteristiche che si vengono a trovare. Questo può portare vantaggi a livello di competitività alle aziende che adotteranno questo tipo di approccio, riducendo tempi e costi di progettazione.

Bibliografia

Brunton, H. a. (s.d.). *What is Horizontal Directional Drilling*. Tratto da <https://www.hadleeandbrunton.co.nz>.

Catalano, M. (2008). *Prospezione geoelettrica per la ricerca di una presunta cavità*. Tratto da <http://www.mae-srl.it>

Cathodic Protection Design. (2010). *DNV-RP-B401*.

Cathodic protection of submarine pipelines. (2016). *DNVGL-RP-F103*.

Corrosion Module User's Guide. (2014). Comsol Multiphysics.

D. Festy, D. L. (2011). *ICP-DATA: In Situ Data Collection for Cathodic Protection Design*.

D. Machado, R. F. (2013). *Pipeline shore approach installation by horizontal directional drilling*.

Electrochemistry Module User's Guide. (2014). Comsol Multiphysics.

Fratesi, R. (s.d.). Dispense del corso di "Corrosione e protezione dei materiali metallici".

Hack, H. P. (1995). *Atlas of Polarization Diagrams for Naval Materials in Seawater*.

Introduction To Corrosion Module. (2014). Comsol Multiphysics.

L. D'Angelo, D. M. (2016). *Challenges on HDD Pipeline Shore Approach (DNV GL New Recommended Practice)*.

L. Lazzari, P. M. (2103). Modeling of Potential Distribution of Subsea Pipeline under Cathodic Protection by Finite Element Method.

L. Lazzari, P. P. (2006). *Protezione catodica*.

Lazzari, L. (s.d.). Aspetti generali della corrosione. In *Enciclopedia degli Idrocarburi*. Treccani.

Lubberger, M. (2018). *Offshore meets Onshore: Trenchless solutions for pipeline landfalls*.
Herrenknecht AG.

M. C. Bottacchi, F. M. (2009). *Principi di fisica per la geoelettrica*. Tratto da <https://www.fe.infn.it>

Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems —
Part 1. (2015). *ISO 15589-1*.

Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems —
Part 2. (2012). *ISO 15589-2*.

R. F. da Costa Pereira, E. S. (2015). *Corrosion of Galvanized Steel Under Different Soil Moisture
Contents*.

Rossi, C. (2006). *Linee guida per le indagini geofisiche - II parte*.

Stockton, C. (2017). *Technical guide: information and advice for the successful planning and
execution of horizontal directional drilling works*. Tratto da Stockton Drilling Services:
<http://stocktondrillingservices.com/>