

3 CORROSIONE E PROTEZIONE NEL TERRENO

3.1 FATTORI. TIPI DI CORROSIONE. RIVESTIMENTI. PROTEZIONE CATODICA.

Nel sottosuolo sono posati vari tipi di strutture metalliche:

- condotte in acciaio o ghisa per il trasporto di gas;
- condotte in acciaio, ghisa o cemento armato precompresso per il trasporto di acqua;
- cisterne in acciaio o acciaio inossidabile per lo stoccaggio di carburanti e prodotti chimici;
- pozzi acqua e per la produzione di idrocarburi;
- reti di terra, in rame o rame zincato.

A queste si devono aggiungere:

- cavi telefonici con guaine in piombo;
- fondazioni, palificazioni, gallerie in cemento armato.

Il terreno con cui queste strutture sono a contatto è un mezzo corrosivo: devono pertanto essere previsti sistemi adeguati di prevenzione in grado di assicurare la durabilità dell'opera per la sua vita di progetto. Anche nel caso di opere in cemento armato, che di per sé assicura la protezione dalla corrosione delle armature, possono intervenire problemi di corrosione.

Nelle condotte e cisterne interrate, che rappresentano la tipologia più numerosa, la corrosione determina perforazione delle pareti e fuoriuscita di prodotto, con possibili danni all'ambiente e alle persone, oltre a quelli diretti sul servizio cui la struttura è preposta.

3.2 IL TERRENO

Nell'ingegneria civile con il termine terreno si intende il materiale non cementato o debolmente cementato che ricopre lo strato roccioso superficiale della Terra, formatosi per disgregazione di numerosi e diversi tipi di rocce di origine.

In generale, un terreno è un mezzo *poroso* costituito da particelle solide, da acqua e specie chimiche in essa disciolti e da aria. Sulla dimensione delle particelle solide si basa la classificazione riportata in [Tabella 3.1](#).

Denominazione	diametro delle particelle			
argille	minori di 0,002 mm (2 μ m)			
limi	da	0,002	a	0,02 mm
sabbie fini	da	0,02	a	0,2 mm
sabbie grosse	da	0,2	a	2 mm
pietrisco	da	2	a	20 mm

Tabella 3.1. Classificazione dei terreni secondo la granulometria delle particelle.

I terreni dove prevale la presenza di particelle grossolane e quelli sabbiosi possiedono elevata capacità di drenaggio e quindi di basso grado di ritenzione dell'acqua. I terreni a granulometria

fine, come limi e soprattutto argille, hanno invece un'elevata capacità di trattenere l'acqua nei pori.

L'acqua nel terreno è presente come acqua libera, quella cioè della falda sotterranea, come acqua meteorica proveniente da precipitazioni atmosferiche, e come acqua capillare, trattenuta nei pori del terreno. La presenza di acqua libera dipende dal livello di falda nella posizione considerata, mentre l'acqua meteorica è di solito presente solo temporaneamente; il contenuto di acqua capillare, invece, è caratteristico del tipo di terreno. La natura porosa del terreno consente l'accumulo e il flusso di acqua all'interno degli spazi vuoti, che possono risultare completamente o solo in parte riempiti di acqua. L'acqua capillare risale dalla tavola d'acqua o è trattenuta da quella (meteorica) che percola attraverso il terreno.

Le particelle solide, l'acqua e l'aria hanno ciascuna una massa e un volume che sommati danno la massa, M , e il volume, V , dove: $V = V_{sol} + V_{aq} + V_{aria}$ e $M = M_{sol} + M_{aq}$, essendo V_{sol} il volume delle particelle solide, V_{aq} il volume dell'acqua nei pori e V_{aria} il volume dell'aria nei pori (Figura 3.1).

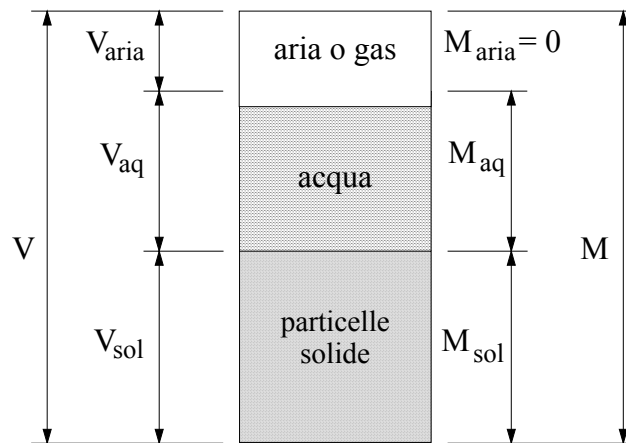


Figura 3.1. Solidi, acqua e gas in un terreno.

La porosità, p , è quindi data da: $p = \frac{V_{aq} + V_{aria}}{V}$.

3.2.1 Fattori di corrosione

Il terreno è un mezzo corrosivo solido, a struttura porosa e conducibilità ionica, nel quale sono presenti sia acqua, che aria, cioè ossigeno.

La presenza nei pori di acqua e di aria sono antagoniste: i terreni asciutti favoriscono il trasporto per diffusione di aria, e dell'ossigeno in esso disciolto: queste condizioni sono dette *aerobiche*. Viceversa, nei terreni bagnati, con elevato contenuto di acqua, la diffusione dell'ossigeno è molto rallentata e può avvenire solo attraverso la fase acquosa che riempie i pori; le condizioni di assenza di ossigeno sono dette *anaerobiche*.¹ Lo stesso effetto antagonista tra aria e acqua è caratteristico dei materiali porosi, e in particolare del calcestruzzo.

I principali fattori che regolano la corrosività di un terreno sono:

- la resistività;

¹ Quando la temperatura scende al di sotto dello zero e l'acqua contenuta nei pori ghiaccia, la corrosione si annulla, perché risultano impediti i movimenti degli ioni.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

- l'acidità;
- il contenuto di sali: cloruri, solfati, bicarbonati.

A questi si deve aggiungere la presenza di specie batteriche che come illustrato più avanti in questo capitolo sono in grado di intervenire sul meccanismo di corrosione.

3.2.1.1 Resistività

La resistività, espressa in ohm·m, è una misura congiunta del contenuto di acqua nel terreno e della sua salinità.

Nella fase di progettazione di una struttura metallica interrata viene misurata la resistività del terreno, localmente o lungo il tracciato nel caso di una condotta, sia per valutare le condizioni di corrosività, sia per progettare i sistemi di protezione catodica (vedi oltre). Tanto più la resistività di un terreno è bassa, tanto più elevata è la sua potenziale corrosività; la [Tabella 3.2](#) illustra questa relazione qualitativa.

Resistività (ohm·m)	Corrosività
< 5	molto severa
5 – 10	severa
10 – 30	moderata
30 – 100	leggera
100 – 250	scarsa
> 250	trascurabile

Tabella 3.2. Correlazione empirica tra resistività e corrosività dei terreni.

La previsione della effettiva corrosività di un terreno non può tuttavia essere basata sulla sola resistività, e deve tenere conto di tutti i meccanismi di corrosione effettivamente operanti.

La misura di resistività viene effettuata con il metodo di Wenner (1916). Si dispongono sulla superficie del terreno quattro elettrodi allineati ed equidistanti di una lunghezza a ; viene fatta circolare una corrente continua, I , tra i due elettrodi esterni, costituiti da picchetti infissi nel terreno, e si misura la caduta ohmica ΔV tra i due elettrodi interni, picchetti o elettrodi di riferimento ([Figura 3.2](#)). La misura viene eventualmente ripetuta invertendo il senso di circolazione della corrente.

La resistività, ρ , del terreno supposto omogeneo, riferito alla profondità a , è data dalla:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \Delta V}{I}$$

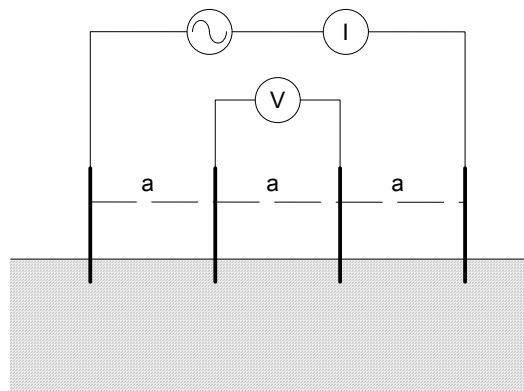


Figura 3.2. Dispositivo a quattro elettrodi per la misura della resistività del terreno.

3.2.1.2 Sali disciolti

Elevati tenori di sali nel terreno ne diminuiscono la resistività. Alcuni ioni, in particolare i cloruri, Cl^- , e i solfati, SO_4^{2-} , agiscono come depassivanti e antagonisti alla formazione di prodotti di corrosione protettivi.

Concentrazioni, riferite alla massa di terreno asciutto, pari a 200 ppm per gli ioni Cl^- , e a 1000 ppm per gli ioni SO_4^{2-} , sono i limiti indicativi al di sopra dei quali la corrosività di un terreno è considerata severa.

3.2.1.3 Acidità

Nei terreni acidi, con pH inferiori a 5,5, la corrosività aumenta al diminuire del pH, cioè al crescere dell'acidità, in relazione alla maggiore solubilità dei prodotti di corrosione.

Il pH può essere misurato direttamente mediante un elettrodo inserito in un foro nel terreno, o, in laboratorio, sull'estratto acquoso.

3.2.2 Meccanismi di corrosione nel terreno

3.2.2.1 Generalizzata

La corrosione dei metalli nel terreno avviene con meccanismo elettrochimico ed è causata dalla presenza dell'ossigeno disciolto nell'acqua.

Nel caso dell'acciaio, la corrosione generalizzata è la risultante di diversi processi:

semireazione anodica	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
semireazione catodica	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$
ossidazione di ioni ferrosi, Fe^{2+} , a ferritici, Fe^{3+}	$\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{4}\text{O}_2 + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$
precipitazione di prodotti di corrosione	$2\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+$ $\text{Fe}^{3+} + 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+$
precipitazione di carbonati	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

La massima velocità di corrosione generalizzata è uguale alla densità di corrente limite di diffusione dell'ossigeno, di solito compresa tra 10 e 100 mA/m², a cui corrisponde una velocità di corrosione di circa 0,010 – 0,10 mm/anno. La precipitazione di croste di carbonati e di prodotti di corrosione del ferro determinano tuttavia una progressiva diminuzione della corrosione nel tempo. La perdita di spessore, o penetrazione della corrosione, per molti materiali metallici, tra cui l'acciaio, segue un andamento parabolico:

$$P = k \cdot t^n$$

dove P è la perdita di spessore; k e n due costanti che dipendono dal materiale metallico e dal tipo di terreno; t è il tempo di esposizione. Valori di riferimento per l'acciaio sono: n=0,2-0,5 e k=2,8-25, con t in anni e P in mm. La velocità di corrosione è quindi data dalla relazione (vedi **Figura 3.3**):

$$v_{\text{corr}} = n \cdot k \cdot t^{n-1}$$

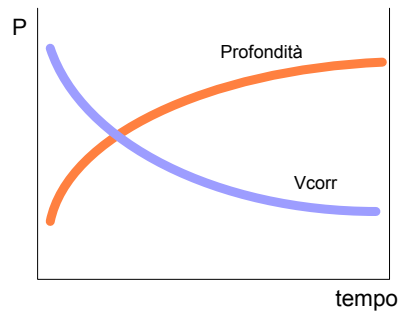


Figura 3.3. Andamento della velocità di corrosione generalizzata dell'acciaio nel terreno.

3.2.2.2 Localizzata

Gli stessi processi che sono alla base della progressiva diminuzione della velocità di corrosione generalizzata, cioè la precipitazione di prodotti di corrosione e di incrostazioni di carbonati, possono determinare delle differenziazioni locali sulla superficie metallica a contatto con il terreno, da cui si innescano attacchi localizzati con separazione tra area anodica, di corrosione, e area catodica circostante, di riduzione di ossigeno. Questi tipi di attacchi localizzati assumono una forma a cratere e sono dette anche *pustole di corrosione* (vedi Figura 3.4).

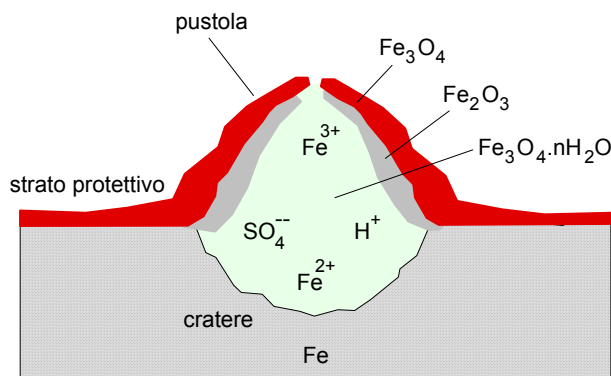


Figura 3.4. Corrosione localizzata dell'acciaio nel terreno con formazione di pustola di corrosione.

L'attacco procede con meccanismo auto-catalitico, con velocità di penetrazione locale nell'ordine di un millimetro all'anno, nettamente superiore ai valori caratteristici della corrosione generalizzata.

3.2.2.3 Aerazione differenziale

Le condizioni di corrosione per aerazione differenziale si instaurano quando la struttura metallica è a contatto con terreni aventi diversa permeabilità all'ossigeno. Un caso caratteristico è quello di una condotta di acciaio il cui tracciato attraversa terreni contigui argilloso e sabbioso (Figura 3.5): la superficie metallica a contatto con l'argilla, poco permeabile all'ossigeno, diventa anodica e quindi sede del processo di dissoluzione del metallo, mentre quella a contatto con la sabbia, permeabile all'ossigeno, diventa catodica, sede cioè del processo di riduzione dell'ossigeno. Questo sistema è anche designato *pila geologica*.

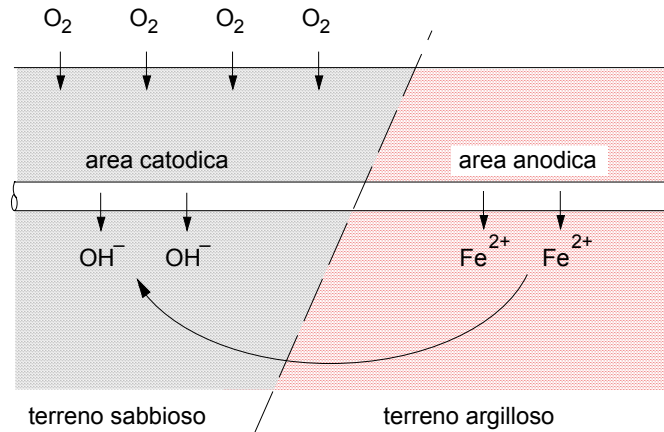


Figura 3.5. Corrosione per aerazione differenziale al passaggio tra terreni argilloso e sabbioso.

Altre situazioni tipiche di corrosione per aerazione differenziale nel terreno sono illustrate in **Figura 3.6**. Il primo caso (a) è quello di una palificazione, o di un pozzo, che attraversa la falda acquifera: la corrosione avviene al di sopra del livello di falda dove si incontrano l'acqua che risale per capillarità e l'ossigeno che diffonde attraverso lo strato superficiale di terreno. Il secondo invece è quello di una tubazione a contatto con un terreno dove sono presenti isole di argilla, le quali impediscono la diffusione dell'ossigeno dalla massa del terreno alla superficie metallica originando aree anodiche di corrosione.

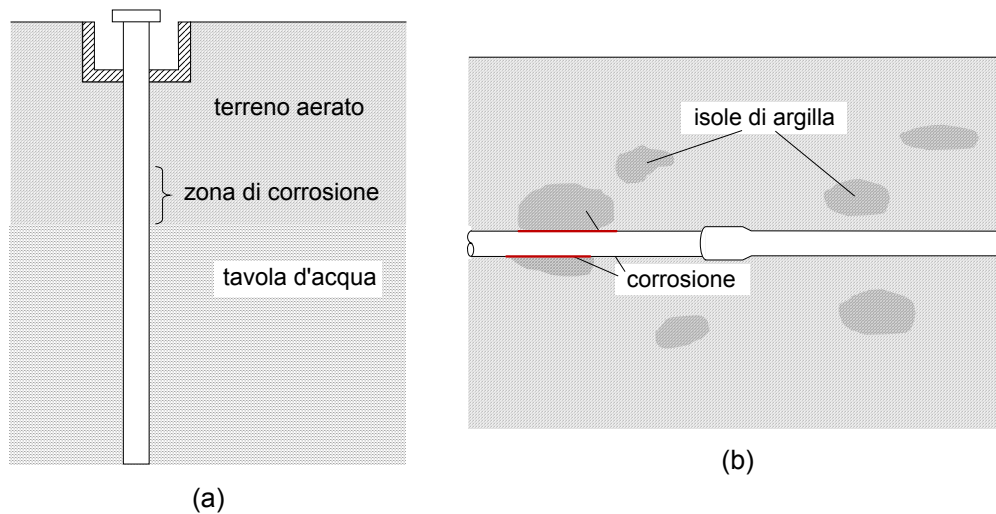


Figura 3.6. Corrosione per aerazione differenziale al di sopra della falda acquifera (a) e in corrispondenza di isole di argilla.

La velocità di corrosione è controllata da quella del processo catodico, ed è pari alla corrente limite di diffusione dell'ossigeno moltiplicata per il rapporto tra le superfici catodiche e anodiche. In presenza di ampie superfici disponibili per la riduzione di ossigeno si possono avere velocità di corrosione elevate: ad esempio, con una velocità del processo catodico di 20 mA/m^2 e un rapporto tra aree catodiche e anodiche di 10:1, la velocità di corrosione è di circa $0,2 \text{ mm/anno}$.

3.2.2.4 Contatto galvanico

Strutture realizzate con metalli diversi interrate e collegate elettricamente tra loro possono dare luogo a corrosione bimetallica, o per contatto galvanico.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

Gli effetti di accoppiamento galvanico aumentano al diminuire della resistività del terreno. La velocità di corrosione del metallo meno nobile assume valori molto elevati quando aree anodiche di piccole dimensioni sono accoppiate ad aree catodiche estese; viceversa, l'effetto di accoppiamento è trascurabile quando le aree catodiche sono piccole oppure se il reagente catodico è disponibile in quantità limitata.

In [Tabella 3.3](#) è riportata la serie dei potenziali misurati nei terreni dei materiali più comuni.

Materiale metallico	Potenziali (V vs. CSE)
anodi di magnesio	da -1,70 a -1,50
anodi di zinco	da -1,05 a -0,95
acciaio zincato	da -0,95 a -0,80
acciaio in calcestruzzo	da -0,80 a -0,60
acciaio rivestito	da -0,70 a -0,55
acciaio nudo	da -0,55 a -0,60
acciai inossidabile	da -0,200 a ≈ 0
rame	da -0,200 a ≈ 0

Tabella 3.3. Serie dei potenziali pratici nei terreni.

Il caso di corrosione per contatto galvanico più frequente nel terreno è quello tra reti di terra di rame nudo e strutture interrate in acciaio: l'attacco di corrosione si localizza in corrispondenza ai difetti nel rivestimento protettivo e in vicinanza della rete di terra. Nella [Figura 3.7](#) è illustrato il caso di accoppiamento galvanico tra una cisterna in acciaio rivestita e la rete di terra.

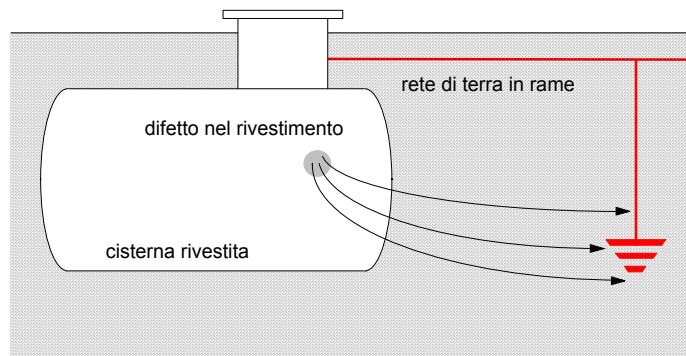


Figura 3.7. Corrosione per contatto galvanico di una cisterna di acciaio rivestita collegata elettricamente con rete di terra in rame.

3.2.2.5 Correnti disperse e interferenza

Il sottosuolo è spesso sede di correnti elettriche dette correnti *disperse*, di natura continua o alternata, che possono avere origine, ad esempio, da impianti ferroviari o tranviari, da impianti di protezione catodica, da messe a terra, da linee ad alta tensione. La corrente dispersa può investire le strutture metalliche interrate (tubazioni, serbatoi, strutture industriali e marine), alterandone lo stato elettrico; questa alterazione è definita *interferenza* (UNI 9783-90).

In Italia, i mezzi di trazione su rotaia, quali le linee ferroviarie, tranviarie e metropolitane, sono alimentate a corrente continua con impianti di norma costituiti da un conduttore aereo isolato collegato al polo positivo e da un circuito di ritorno al polo negativo costituito dalla rotaia.²

² In Italia, a differenza di gran parte dei Paesi europei, operano a corrente continua le normali linee ferroviarie. Funzionano invece a corrente alternata le linee alta velocità.

Durante il movimento di un convoglio, la corrente di alimentazione circola dal polo positivo della sottostazione, percorre il cavo aereo fino al treno, quindi attraverso le ruote (o i contatti a slitta) passa ai binari per rientrare al polo negativo della sottostazione. In questo ultimo tratto, la corrente può ritornare alla sottostazione attraverso le rotaie, che rappresentano il circuito principale, oppure attraverso il terreno, o attraverso entrambi.

La corrente di ritorno, che fuoriesce dalle rotaie per passare nel terreno investe le strutture metalliche situate in prossimità. Nel caso di una condotta interrata parallela alla linea ferroviaria, illustrato dalla **Figura 3.8**, la corrente dispersa nel terreno utilizza la condotta stessa come circuito di ritorno alla sottostazione. Le superfici metalliche dove la corrente circola dal terreno verso il metallo risultano polarizzate catodicamente e quindi in parte o completamente protette; viceversa quelle dove la corrente circola in senso opposto, dal metallo verso l'ambiente, sono polarizzate anodicamente e i processi di corrosione risultano accelerati.³

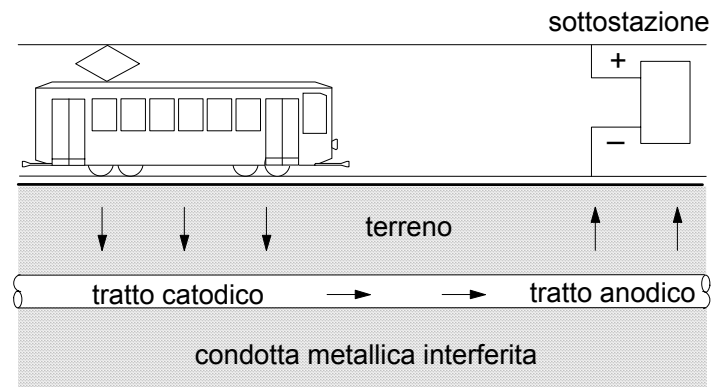


Figura 3.8. – Esempio di interferenza da correnti disperse continue non stazionarie.

Le zone anodiche della struttura interferita, dove avviene il danneggiamento, sono più facilmente quelle poste in prossimità della sottostazione (spesso in corrispondenza a difetti nel rivestimento che protegge la tubazione).

Le interferenze dovute ai sistemi ferroviari di trazione in corrente continua presentano in genere le seguenti caratteristiche:

- nel corso della giornata lo stato elettrico della struttura si modifica e cambiano l'estensione e la posizione delle zone interferite in relazione alla variazione di traffico ferroviario;
- i potenziali della struttura variano in funzione della posizione della motrice lungo la linea, della corrente che essa assorbe nell'istante considerato e della suddivisione del carico tra le sottostazioni che la alimentano.

Sebbene si adottino negli impianti moderni tutti gli accorgimenti possibili per rendere minima la dispersione nel terreno, la quota parte di dispersione supera il 50 % della corrente totale, almeno nel caso di treni e tram, le cui rotaie sono posate sul ballast. Si comprende, perciò, come una struttura metallica posta nelle vicinanze di una rotaia e soprattutto vicino alla sottostazione, sia facilmente interferita.

3.2.2.6 Interferenza da corrente alternata

La corrente alternata provoca effetti di corrosione molto minori rispetto a quella continua. Le strutture interrate, in particolare le condotte, possono essere interferite da correnti disperse ad

³ Sono le correnti disperse di tipo continuo che provocano effetti di corrosione significativi; quelle alternate danno luogo a corrosione unicamente per densità di corrente molto elevate, nell'ordine di alcune decine di ampere per metro quadrato.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

esempio da linee di trazione elettrificate con corrente alternata, come è il caso in Italia delle linee alta velocità, o indotte da elettrodotti. Alcune linee guida per la valutazione e previsione degli effetti della corrente alternata sono:⁴

- la corrosione aumenta all'aumentare della densità di corrente scambiata in corrispondenza dei difetti nel rivestimento: è trascurabile al di sotto di 20 A/m^2 ; incerta tra 20 e 100 A/m^2 ; prevista oltre 100 A/m^2 ;
- la normativa riporta per la tensione in corrente alternata una soglia di 15 V ; tuttavia, in relazione alla resistività del terreno, si può avere corrosione anche per tensioni più basse;
- in presenza di corrente alternata è più elevata la corrente di protezione catodica necessaria a mantenere il potenziale di protezione;
- al di sotto di 100 Hz , la corrosione aumenta al diminuire della frequenza.

3.2.2.7 Microbiologica

I microrganismi presenti nel terreno e nelle acque naturali possono intervenire, direttamente o attraverso le sostanze da essi prodotti, nel meccanismo di corrosione. Una percentuale elevata degli attacchi di corrosione riscontrati sulle tubazioni interrate è da attribuire a corrosione batterica o microbiologica (in inglese microbially induced corrosion, MIC)

La famiglia più pericolosa di microrganismi è costituita dai batteri solfato-riduttori, che vivono e si sviluppano solo in ambienti anaerobici. Pertanto le condizioni proprie dei terreni argillosi, neutri e senza ossigeno, ideali dal punto di vista elettrochimico per escludere processi di corrosione, sono in realtà quelle che favoriscono la crescita dei batteri solfato-riduttori.

Le principali caratteristiche di interesse per la corrosione dei batteri solfato riduttori sono passate in rassegna qui di seguito:

- richiedono, come già visto, un ambiente anaerobico; questa condizione si verifica in presenza di fluidi deaerati, ma anche in fluidi aerati sotto depositi (microambienti);
- riducono i solfati inorganici a solfuri, a concentrazione di H_2S fino a circa 3000 ppm ;
- ottengono energia da un substrato di composti organici, con formazione di acido acetico o CO_2 ;
- nelle condotte si incontrano nei tratti stagnanti o a bassa velocità;
- la crescita avviene nell'intervallo da 0 a circa $70 \text{ }^\circ\text{C}$; per i batteri solfato-riduttori l'intervallo di temperatura di massima crescita è tra 20 e $45 \text{ }^\circ\text{C}$;
- la crescita avviene per pH neutri compresi tra 4 e $10,5$; la crescita ottimale nell'intervallo da $6,5$ a $8,5$;
- la crescita diminuisce al di sopra di una salinità dell'acqua di $70 - 80 \text{ g/l}$ e diviene trascurabile sopra $130 - 140 \text{ g/l}$;
- sopravvivono anche a pressioni molto elevate;
- provocano corrosione dell'acciaio con formazione di solfuro di ferro come prodotto di corrosione;
- agiscono come depolarizzatori catodici e stabilizzano la propagazione di attacchi localizzati in condizioni anaerobiche;
- la velocità di corrosione può essere anche superiore a 1 mm/a .

Il meccanismo della corrosione microbiologica detto della *depolarizzazione catodica* prevede l'intervento diretto dei batteri solfato-riduttori nella reazione di riduzione dell'idrogeno, secondo la sequenza delle reazioni riportate qui di seguito.

⁴ R.A. Gummow, R.G. Wakelin, S.M. Segall, "AC Corrosion – A Challenge to Pipeline Integrity", Mat. Perf., Feb. 1999, Vol. 38, p. 24, 1999.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

reazione anodica	$4 \text{ Fe} \rightarrow 4\text{Fe}^{2+} + 8 \text{ e}^{-}$
dissociazione dell'acqua	$8 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 8 \text{ H}^{+} + 8 \text{ OH}^{-}$
reazione catodica	$8 \text{ H}^{+} + 8 \text{ e}^{-} \rightarrow 8 \text{ H}$
"depolarizzazione"	$\text{SO}_4^{2+} + 8 \text{ H} \rightarrow \text{S}^{2-} + 4 \text{ H}_2\text{O}$
prodotti di corrosione	$\text{Fe}^{2+} + \text{S}^{2-} \rightarrow \text{FeS}$
prodotti di corrosione	$3 \text{ Fe}^{2+} + 6 \text{ OH}^{-} \rightarrow 3 \text{ Fe(OH)}_2$
reazione globale	$4 \text{ Fe} + \text{SO}_4^{2+} + 4 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeS} + 3 \text{ Fe(OH)}_2 + 2 \text{ OH}^{-}$

3.3 PROTEZIONE MEDIANTE RIVESTIMENTI

L'applicazione di rivestimenti organici è la tecnica più antica e diffusa per proteggere dalla corrosione le strutture metalliche interrato; essa opera come una barriera fisica di separazione tra il metallo e l'ambiente e riduce inoltre l'estensione delle aree catodiche.

L'azione di barriera fisica viene tuttavia meno in corrispondenza dei *difetti* nel rivestimento, la cui presenza è pressoché inevitabile. I difetti possono essere già presenti nel rivestimento, ad esempio a causa di urti subiti dai tubi durante il trasporto, o formarsi all'atto della posa in opera. Nel corso dell'esercizio le cause più frequenti sono:

- l'azione di pietre o di sforzi esercitati dal terreno;
- la fragilità del rivestimento a basse temperature;
- il rammollimento a temperature elevate;
- la scarsa adesione, talvolta dovuta a non adeguata preparazione superficiale.

La combinazione di rivestimento e protezione catodica assicura la massima affidabilità al minor costo.

Un buon rivestimento deve possedere:

- ottime proprietà chimiche: resistenza agli agenti corrosivi e alla protezione catodica;
- buone caratteristiche meccaniche;
- basso costo, sia del materiale sia di applicazione;
- buona applicabilità e riparabilità.

I rivestimenti utilizzati nel terreno sono riconducibili ai seguenti tipi principali:

- catrame di carbone o bitume di petrolio, con armatura di rinforzo di velo, tessuto o composito di vetro;
- rivestimenti termoplastici di polietilene o di polipropilene: sono applicati a nastro, per estrusione o sinterizzazione; in due o tre strati sovrapposti;
- resine termoindurenti: polveri epossidiche; resine poliuretano, eventualmente combinate con catrame.

La selezione del rivestimento deve essere effettuata tenendo conto di vari fattori:

- la natura del terreno: caratteristiche meccaniche e fisico-chimiche;
- le condizioni operative della condotta, in particolare le temperature minime e massime di esercizio;
- le modalità di applicazione, se in fabbrica sui singoli tubi o prima della posa in trincea, e di trasporto;
- le sollecitazioni meccaniche trasmesse dal terreno: carichi mobili, statici e del terreno di copertura; la penetrazioni di radici;

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

- i costi.

Come sopra menzionato, il rivestimento può essere applicato dopo saldatura, immediatamente prima della posa nello scavo: è questo il caso dei rivestimenti a nastri, applicati a spirale con macchine apposite che assicurano un rivestimento continuo anche dei giunti saldati. Più comunemente, il rivestimento viene applicato da aziende specializzate sui tubi singoli. In questo secondo caso si deve provvedere in campo alla protezione dei tratti in corrispondenza delle saldature, utilizzando prodotti compatibili con il rivestimento del tubo; i principali materiali utilizzati sono nastri e materiali termo-restringenti o una combinazione dei due tipi.

3.3.1 Efficienza e resistenza di isolamento di un rivestimento

Le caratteristiche protettive di un rivestimento possono essere espresse mediante due grandezze complementari: l'efficienza, ξ , e la resistenza di isolamento, R_0 . La prima rappresenta la frazione di superficie effettivamente ricoperta dal rivestimento, e $1-\xi$ rappresenta la quota parte di superficie lasciata scoperta da pori, lacerazioni, imperfezioni del rivestimento. La resistenza di isolamento è la resistenza ohmica equivalente di un metro quadrato di superficie, ed è espressa in ohm.m^2 . Essa non dipende solo dalle proprietà dielettriche intrinseche del rivestimento, ma anche dall'ambiente con cui il rivestimento viene a contatto. In [Tabella 3.4](#) sono riportati i valori delle resistenze di isolamento per i più comuni rivestimenti.

Tipo di rivestimento	spessore (mm)	resistività propria (Ohm.m)	resistenza di isolamento (Ohm.m ²)
Bitumi rinforzati con lana di vetro	2-7	$> 10^{12}$	$\sim 10^3$
Polietilene, alta densità e nastri	2	$> 10^{16}$	$\sim 10^5$
Resine epossidiche			
- FBE	0,4	$> 10^{14}$	$\sim 10^4$
- poliammidi	0,4	$> 10^{11}$	$> 10^4$
PVC	1	$> 10^{13}$	$\sim 10^8$

Tabella 3.4. Valori delle resistenze di isolamento dei rivestimenti più comuni.

3.4 PROTEZIONE CATODICA

La protezione catodica è una tecnica elettrochimica di prevenzione della corrosione dei materiali metallici immersi in ambienti aggressivi aventi un' apprezzabile conducibilità elettrica, quali i terreni e le acque; non è invece applicabile alle strutture esposte all'atmosfera. Si attua facendo circolare una corrente continua fra un elettrodo (anodo) posto nell'ambiente e la superficie della struttura da proteggere (catodo): tale corrente provoca la diminuzione del potenziale del materiale metallico e riduce la velocità di corrosione fino al suo arresto.

La modalità con cui si realizza la circolazione di corrente definisce i due tipi di protezione catodica: a *corrente impressa* e ad *anodi galvanici* (o *sacrificiali*), illustrati nella [Figura 3.9](#), rispettivamente (a) e (b). Il primo utilizza una unità di alimentazione elettrica, il cui polo positivo è collegato a un anodo insolubile e quello negativo alla struttura da proteggere. Nel sistema ad anodi galvanici la struttura da proteggere viene collegata elettricamente ad un metallo meno nobile: ad esempio, per la protezione dell'acciaio vengono usati l'alluminio e lo zinco nell'acqua di mare, il magnesio nei terreni e nelle acque dolci.

Gli anodi galvanici sono impiegati negli ambienti aventi elevata conducibilità, ad esempio in acqua di mare; i sistemi a corrente impressa sono preferiti negli ambienti resistivi, come i terreni e il calcestruzzo, e per la protezione di strutture estese con un numero limitato di anodi.

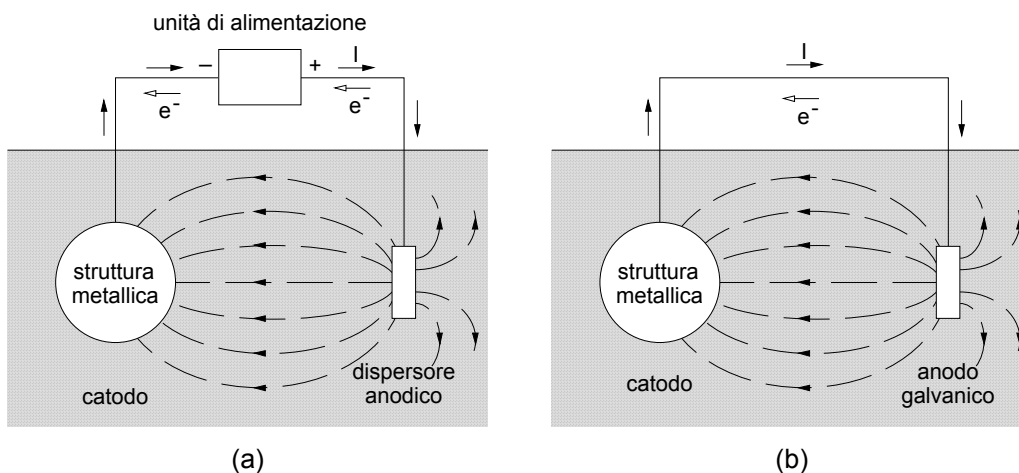


Figura 3.9. Principio della protezione catodica: a) a corrente impressa; b) ad anodi galvanici.

I sistemi ad anodi galvanici non richiedono alcuna fonte di energia esterna e, se correttamente progettati, assicurano protezione senza alcun onere di manutenzione. I sistemi a corrente impressa consentono di disporre di tensioni di alimentazione ben più alte rispetto agli anodi galvanici (sino a 50 V) e le condizioni di funzionamento possono essere regolate intervenendo sull'unità di alimentazione, adeguandole alle richieste della struttura da proteggere. Con un unico dispersore possono essere protette superfici molto estese, sino a lunghezze nell'ordine di decine di chilometri nel caso di condotte interrate; d'altra parte, la circolazione di correnti elevate può generare effetti negativi di interferenza elettrica e di sovraprotezione (vedi oltre).

3.4.1 Applicazioni

La protezione catodica è applicata estesamente per prevenire la corrosione di strutture metalliche, soprattutto di acciaio, interrate e immerse in acque naturali. Oggi rappresenta una tecnica consolidata: ad esempio, il suo uso è richiesto per legge per la protezione di condotte interrate per il trasporto di gas.⁵

Le diverse applicazioni sono contraddistinte dall'impiego in combinazione o meno con rivestimenti organici. In molti casi infatti, l'uso congiunto di rivestimento organico e protezione catodica rappresenta una soluzione ottimale: il rivestimento consente di conseguire la protezione con una corrente nettamente più bassa di quella richiesta per proteggere la stessa struttura nuda, con vantaggi importanti dal punto di vista soprattutto impiantistico; dall'altra parte, la protezione catodica, protegge il metallo in corrispondenza dei difetti del rivestimento, la cui presenza deve essere considerata ineliminabile.

Nella [Tabella 3.5](#) sono raccolte, per tipologia di struttura, le applicazioni più importanti, unitamente alle informazioni sull'impiego con o senza rivestimento e sul tipo di sistema, a corrente impressa o ad anodi galvanici.

⁵ Il D.P.R. 24/11/84 impone che le condotte metalliche per trasporto e distribuzione di gas siano provviste di protezione passiva e protezione catodica.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

Struttura	superfici		corrente impressa	anodi galvanici
	nude	rivestite		
piattaforme petrolifere offshore	×			×
condotte interrate		×	×	×
cisterne interrate		×	×	×
condotte a mare		×		×
pontili e installazioni portuali	(×)	×	×	
apparecchiature	×	×	×	×
pozzi petroliferi	×		×	
scafi di navi		×	×	×
serbatoi		×		×
strutture in cemento armato	×		×	

× Opzione preferita.

(×) Opzione adottata in casi limitati.

Tabella 3.5. Applicazioni principali della protezione catodica.

3.4.2 Potenziale di protezione

La protezione catodica agisce diminuendo il potenziale del metallo esposto all'ambiente corrosivo. La variazione di potenziale, dalle condizioni di libera corrosione ad un potenziale predefinito, detto *potenziale di protezione*, è misurabile in modo semplice con l'ausilio di un elettrodo di riferimento e di un voltmetro (vedi capitolo 1). La semplicità di questa misura, che è alla base di tutte le tecniche di controllo e monitoraggio dei sistemi di protezione catodica, spiega in buona parte la diffusione della protezione catodica stessa.

Si è visto infatti nel capitolo 1 che se il potenziale del metallo è inferiore a quello di equilibrio, cioè è verificata la disuguaglianza $E < E_{eq}$, il processo di ossidazione non può avvenire. In altre parole, il metallo non ha alcuna tendenza a passare alla forma ossidata e quindi a formare prodotti di corrosione: anzi, sono questi che, se presenti, tenderebbero a ridursi a metallo. Queste condizioni sono dette di *immunità termodinamica*.⁶

Le strutture in acciaio, interrate o in acqua di mare, sono protette catodicamente nel campo dei potenziali più negativi di -0,85 V CSE e operano pertanto in condizioni di immunità.

Esistono anche applicazioni, come ad esempio nella protezione di acciai inossidabili o delle armature di acciaio nel cemento armato, dove condizioni pratiche di protezione dalla corrosione si conseguono polarizzando il metallo nel campo di passività, senza cioè raggiungere condizioni di immunità. Questo criterio di protezione è detto *per passività perfetta*.

Oggi la normativa definisce per i principali materiali metallici e tipi di applicazione il corretto potenziale di protezione, al quale può corrispondere o la completa eliminazione della corrosione o una velocità di corrosione residua accettabile (vedi [Tabella 3.6](#)). Per alcuni materiali assumono il significato di potenziali di quasi immunità, per altri con comportamento attivo-passivo, di potenziale di protezione per passività perfetta.

⁶ Se l'abbassamento del potenziale rispetto a E_{cor} non è sufficiente per annullare il lavoro motore (cioè $E_{cor} > E > E_{eq}$) la velocità di corrosione viene ridotta, ma non annullata (condizioni di sottoprotezione). Dal punto di vista pratico, sono importanti le condizioni dette di *quasi immunità*, che si raggiungono quando il potenziale è portato a valori vicini a quelli di equilibrio tanto da rendere molto piccolo il lavoro motore e quindi trascurabile la velocità di corrosione.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

Materiale metallico	potenziale di protezione. V vs. CSE
Acciai al carbonio:	
– condizioni normali	-0,85
– condizioni anaerobiche	-0,95
– nel calcestruzzo	-0,75
Rame e sue leghe	-0,45 ÷ -0,60
Piombo	-0,50 ÷ -0,65
Zinco	-1,00
Alluminio	-0,80
Acciai inossidabile	-0,40

Tabella 3.6. Potenziali di protezione adottati nel terreno.

3.4.3 Corrente di protezione

Per realizzare le condizioni di protezione viene fatta circolare una adeguata corrente dall'ambiente alla superficie metallica della struttura da proteggere, detta *corrente di protezione*.

La corrente di protezione interagisce con le correnti anodiche e catodiche associate alle semireazioni rispettivamente di dissoluzione del metallo e di riduzione di ossigeno, con l'effetto di deprimere, sino ad annullarla, la semireazione anodica. Per interpretare correttamente l'interazione tra corrente di protezione, che designeremo *esterna*, proveniente cioè dal circuito esterno di protezione catodica, sia esso ad anodi galvanici o a corrente impressa, e le correnti anodiche e catodiche del processo di corrosione, è opportuno riferirsi al meccanismo elettrochimico delle reazioni di corrosione. Nel seguito le correnti sono trattate rispetto alla superficie unitarie e espresse pertanto come densità di corrente.

All'interfaccia metallo ambiente cambiano i portatori della carica elettrica della corrente di protezione: elettroni nel metallo e ioni nell'ambiente; il cambio di portatori di carica avviene attraverso una semireazione elettrochimica e la densità di corrente circolante è pari alla densità di corrente della semireazione. La curva caratteristica descrive la relazione tra densità di corrente e potenziale di elettrodo (**Figura 3.10 (a)**).

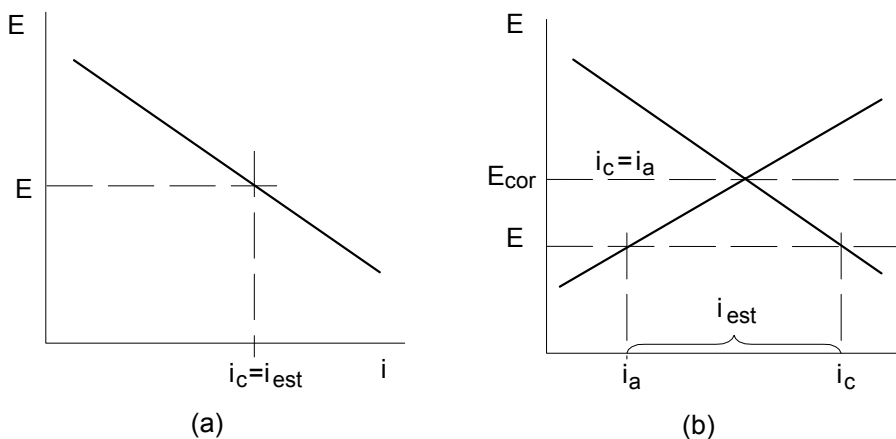


Figura 3.10. Schema di principio del meccanismo di corrosione e protezione (a). Potenziale e condizioni di lavoro in presenza di una corrente esterna.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

Quando all'interfaccia sono possibili più semireazioni, come è il caso di un metallo in condizioni di corrosione dove hanno luogo le semireazioni anodica e catodica come illustrato nella **Figura 3.10 (b)**, la densità di corrente netta circolante, i_{est} , al potenziale E , è pari alla differenza tra le densità di corrente delle singole semireazioni:

$$i_{est} = i_c - i_a$$

Più in generale, quando siano possibili più semireazioni elettrodiche e tenendo conto dei segni convenzionali delle correnti, positive quelle anodiche e negative quelle catodiche, si ha:

$$i_{est} = \sum_i i_i$$

Quando il potenziale scende al di sotto del potenziale di equilibrio della semireazione anodica, la densità di corrente della semireazione anodica si annulla e la corrente esterna, cioè la corrente di protezione, coincide con la densità di corrente della semireazione catodica:

$$i_{est} = i_c$$

In forma semplificata, il sistema di protezione catodica può essere immaginato come una *pompa di elettroni*, sospinti, attraverso il circuito di protezione, nel metallo da proteggere, come illustrato in **Figura 3.9** (si ricorda che il verso di circolazione convenzionale della corrente è opposto a quello degli elettroni). Gli elettroni così fatti circolare nel metallo sono disponibili all'interfaccia con l'ambiente per essere consumati dal processo di riduzione di ossigeno e si sostituiscono a quelli che, in condizioni di libera corrosione, sarebbero forniti dalla semireazione anodica di dissoluzione del ferro.

Negli ambienti naturali e tra questi il terreno, gli elettroni resi disponibili nel metallo dal sistema di protezione catodica consumano l'ossigeno che per diffusione raggiunge la superficie metallica; si realizzano così condizioni deaerate sulla superficie metallica e in assenza di reagente catodico la corrosione è nulla (*interpretazione chimica* della protezione catodica).

Quando il processo catodico è quello di riduzione dell'ossigeno (**Figura 3.11**), la densità di corrente di protezione è uguale alla densità di corrente limite dell'ossigeno e dipende da tutte le condizioni che definiscono la velocità limite di apporto di ossigeno e cioè dal tenore di ossigeno disciolto, dallo stato di agitazione dell'ambiente, dalla temperatura, dalla presenza di depositi o di rivestimenti.

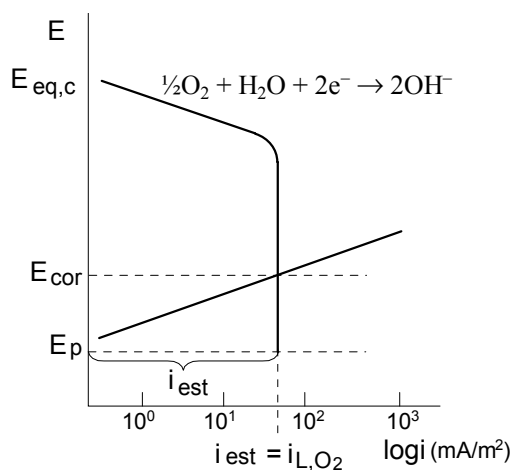


Figura 3.11. Corrente esterna, di protezione, in sistemi operanti sotto controllo di diffusione dell'ossigeno.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

In acqua di mare, ad esempio, la densità di corrente di protezione, al variare dell'agitazione, della temperatura e del tenore di ossigeno, può passare da 20 mA/m² richiesti per proteggere strutture immerse nel fango del fondo marino, a 1000 mA/m² e più per proteggere superfici esposte ad alta turbolenza come eliche di navi o interni di apparecchiature. In [Tabella 3.7](#) sono riportati i valori di densità di corrente impiegati nelle applicazioni industriali.

Un effetto benefico, che si riscontra sia nei terreni sia nelle acque naturali, è dato dalla precipitazione di carbonati e di prodotti di corrosione sulla superficie metallica, in seguito all'aumento di alcalinità locale. Un analogo effetto è esercitato dai rivestimenti protettivi, ad esempio pitture, strati bituminosi, calcestruzzo. In questi casi, la corrente di protezione risulta solo una piccola percentuale di quella richiesta dal metallo non rivestito, perché serve solo per la protezione delle parti rimaste scoperte.

ambiente	densità di corrente di protezione (mA/m ²)
	superfici nude
terreno, superfici nude	5 – 100
terreno, superfici rivestite	0,01 – 1
calcestruzzo secco (in aria)	5 – 15
calcestruzzo saturo d'acqua	0,2 – 2
acqua dolce	30 – 160
acqua calda	50 – 160
acqua di mare	50 – 550

Tabella 3.7. Valori indicativi delle densità di corrente di protezione in ambienti naturali.

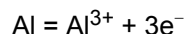
3.4.4 Applicazioni con anodi sacrificali

3.4.4.1 Materiali anodici

La protezione catodica viene realizzato collegando elettricamente la struttura in acciaio da proteggere ad un metallo meno nobile: si realizza così una situazione di contatto galvanico tra due metalli, con un effetto di corrosione accelerata del meno nobile e di protezione dell'altro.

I materiali impiegati industrialmente come anodi galvanici sono leghe di alluminio, di zinco e di magnesio. Si tratta come detto di leghe con caratteristiche di composizione chimica e microstrutturali ben definite. Gli elementi di lega sono aggiunti intenzionalmente per assicurare proprietà specifiche alla lega: ad esempio l'indio nelle leghe di alluminio svolge una funzione attivante, impedisce cioè l'instaurarsi di condizioni di passività che determinerebbero la mancata erogazione della corrente di protezione da parte dell'anodo. Allo stesso modo viene limitata la presenza di elementi nocivi, o impurezze: ad esempio rame e ferro, che determinano autocorrosione dell'anodo.

La principale reazione che ha luogo su un anodo è la dissoluzione del metallo di cui è costituito l'anodo: ad esempio nel caso dell'alluminio:



dove gli elettroni liberati sono quelli che, attraverso il cavo di collegamento, raggiungono il catodo dove si rendono disponibile per la riduzione di ossigeno. Alla reazione di dissoluzione dell'anodo sono legati i parametri che ne caratterizzano il comportamento: il *potenziale di lavoro* e il *consumo*. Il primo è il potenziale che l'anodo è in grado di mantenere nel tempo in condizioni di esercizio; la differenza tra il potenziale di protezione e il potenziale di lavoro dell'anodo determina, in un dato ambiente, la corrente erogata dall'anodo.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

Il consumo, espresso in kg/A·anno, è la massa di materiale anodico che passa in soluzione per unità di corrente e per unità di tempo. Si distingue tra consumo teorico, calcolato in base alla legge di Faraday, e consumo pratico; il secondo incorpora la massa di materiale anodico che passa in soluzione per autocorrosione, cioè per effetti di microcoppie locali. L'inverso del consumo è la *capacità di corrente*, espressa di norma nelle unità A·ora/kg; rappresenta la quantità di carica che un metallo è in grado di erogare per unità di massa. In [Tabella 3.8](#) sono raccolte le proprietà delle leghe più comuni.

Proprietà	leghe di Mg	leghe di Zn	leghe di Al
Peso atomico	Mg: 24,32	Zn: 65,38	Al: 26,97
densità (g/cm ³)	1,74	7,14	2,70
Consumo teorico (kg/A·anno)	3,98	10,69	2,94
Capacità teorica A·h/kg ^(*)	2200	820	2980
Potenziale E°(V vs SHE)	-2,363	-0,762	-1,662

(*) La capacità teorica è data dall'inverso del consumo teorico per 8760 (ore/anno).

Tabella 3.8. Proprietà fisiche ed elettrochimiche delle leghe di magnesio, zinco e alluminio.

3.4.4.2 Erogazione anodica

La corrente, I_A , erogata da un anodo viene calcolata applicando la legge di Ohm:

$$I_A = \frac{\Delta E}{R}$$

dove:

- ΔE è la differenza tra il potenziale di protezione e il potenziale di lavoro dell'anodo: esprime il lavoro motore disponibile per la circolazione della corrente dall'anodo al catodo attraverso l'ambiente, speso per vincere le cadute ohmiche;
- R è la resistenza del circuito.

La resistenza del circuito, R , può essere sostituita con buona approssimazione dalla resistenza anodica, R_A , cioè la resistenza localizzata nell'ambiente nell'intorno dell'anodo. La resistenza anodica, R_A , è calcolata con formule semi-empiriche in funzione della resistività dell'ambiente e della geometria dell'anodo. La più comune è la formula di Dwight, valida per anodi cilindrici di forma allungata:

$$R_A = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\ln \frac{8 \cdot L}{D} - 1 \right)$$

dove:

- ρ è la resistività dell'ambiente;
- D il diametro;
- L la lunghezza.

Ad esempio, per strutture in acciaio, il lavoro motore ΔE è pari a 250 mV con anodi di zinco e di alluminio e a 800 mV con anodi di magnesio.

A parità di configurazione geometrica e di materiale anodico, l'erogazione dipende dalla resistenza del circuito elettrico e in particolare dalla resistività dell'ambiente. In [Tabella 3.9](#) sono riportati i tipi di anodo da impiegare in funzione della resistività dell'ambiente.

Nei terreni, si cerca di modificare favorevolmente le caratteristiche ambientali nelle immediate vicinanze dell'anodo mediante un opportuno *letto di posa*, in modo da creare le condizioni

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

migliori per il suo buon funzionamento. In particolare, il letto di posa permette il raggiungimento di un potenziale più negativo e più stabile, poiché diminuisce le sovratensioni e impedisce l'insorgenza dei fenomeni di passivazione; inoltre aumenta l'efficienza degli anodi perché ne limita l'autocorrosione e ne favorisce una dissoluzione uniforme. Il letto di posa è di solito costituito da una miscela di gesso, bentonite e solfato di sodio, nel rapporto (in peso) di 70:20:10. Il gesso (CaSO_4) ha soprattutto la funzione di mantenere attivo l'anodo e di consentirne un consumo uniforme; la bentonite di assorbire l'umidità del terreno circostante e di conservarne una buona percentuale anche nei periodi di siccità; il solfato di sodio (Na_2SO_4) di diminuire la resistività.

Materiale anodico	Resistività	
	Acque	Terreni
Alluminio	fino a 1,5 ohm·m	non usato
Zinco	fino a 5 ohm·m	con letto di posa, fino a 15 ohm·m
Magnesio	oltre 5 ohm·m	non usato
Magnesio (-1,5V) con letto di posa	non usato	fino a 40 ohm·m
Magnesio (-1,7V) con letto di posa		fino 40 ÷ 60 ohm·m

Tabella 3.9. Anodi galvanici per acque e terreni al variare della resistività.

3.4.4.3 Calcolo del numero di anodi

Una volta determinata la corrente totale di protezione come prodotto della superficie totale da proteggere per la densità di corrente di protezione, il dimensionamento dei sistemi ad anodi galvanici consiste nella scelta del tipo di anodo (materiale, dimensioni e massa) e nel calcolo del numero di anodi.

In accordo a ciò, una volta fissato il tipo di materiale anodico, la progettazione si articola in due verifiche indipendenti:

- il calcolo della massa anodica necessaria per assicurare la protezione per una durata pari alla vita di progetto;
- il calcolo, per un anodo di date dimensioni, della corrente erogata e, in rapporto alla corrente totale di protezione, del numero di anodi richiesti.

Il primo calcolo è un'applicazione della legge di Faraday utilizzando il consumo anodico e l'eventuale fattore di utilizzo; la massa anodica, M_T , totale è data dalla:

$$M_T = \frac{I \cdot d \cdot C}{f_U}$$

dove:

- C, è il consumo anodico pratico (kg/A·anno)
- f_U , un fattore di utilizzo dell'anodo;
- I è la corrente di protezione (A)
- d, è la vita di progetto (anni)

Si effettua quindi il calcolo della corrente erogata da un anodo come descritto sopra e si determina il numero di anodi, N, come:

$$N = \frac{I}{I_A}$$

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

Si ripete eventualmente il calcolo variando il tipo di anodo, tra quelli commerciali disponibili, sino ad ottenere un numero ottimizzato di anodi la cui massa complessiva si avvicini alla massa totale, M_T , richiesta.

Esempio di calcolo. La struttura in esame è una cisterna interrata, di forma cilindrica, è realizzata in acciaio al carbonio e protetta con rivestimento di tipo bituminoso; il diametro è pari a 2,5 m e la lunghezza è di 8 m. La cisterna, posata in opera da 15 anni, è situata all'interno di uno stabilimento chimico ed è adibita allo stoccaggio di sostanze pericolose, in particolare solventi organici.

Nell'ambito di un programma di adeguamento alle normative vigenti, si decide di applicare la protezione catodica, utilizzando il sistema ad anodi galvanici (il sistema a corrente impressa viene escluso a priori trattandosi di una struttura singola). Vengono in particolare fissati i seguenti requisiti:

- vita di progetto: $d = 20$ anni.
- potenziale di protezione: $E_P = -0,85$ V vs. $\text{Cu}/\text{CuSO}_{4,\text{sat}}$.

La struttura è sezionata elettricamente mediante giunti isolanti sulle tubazioni di carico e scarico. Si dispone inoltre del dato di resistività del terreno nell'area dello stabilimento, pari a 40 ohm.m.

Si procede fissando una densità di corrente pari a 20 mA/m^2 (riferita a superficie nuda); si stima inoltre una efficienza del rivestimento, a 15 anni di distanza dalla posa, pari all'85 %. Si decide l'impiego di anodi in lega di magnesio, provvisti di letto di posa, aventi le seguenti caratteristiche:

- consumo pratico: $C = 8$ kg/A.anno.
- fattore di utilizzo: $f_U = 0,90$.
- potenziale di lavoro: $E_A = -1,50$ V vs $\text{Cu}/\text{CuSO}_{4,\text{sat}}$.
- dimensioni dell'anodo: diametro, $D = 0,140$ m; lunghezza, $L = 0,825$ m.
- massa e dimensioni anodo: $m_A = 22$ kg.

Sulla base dei dati sopra definiti si procede:

- al calcolo della superficie totale della cisterna, pari a: 73 m^2 ;
- al calcolo della superficie da proteggere (pari al 15 % della superficie totale): $10,9 \text{ m}^2$;
- al calcolo della corrente di protezione: $I_P = 0,22$ A;
- al calcolo della resistenza anodica, R_A , mediante la formula di Dwight:
$$R_A = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{D} - 1 \right) = 22,02 \text{ V} ;$$
- al calcolo del lavoro motore disponibile: $\Delta E = E_A - E_P = -1,5 - (-0,85) = 0,65$ V;
- al calcolo della corrente erogata da un anodo: $I_A = \Delta E / R_A = 0,0295$ A;
- al calcolo del numero di anodi: $N_A = I_P / I_A = 7,3$ arrotondato a 8 anodi;
- alla verifica della massa anodica richiesta: $M_T = I_P \times d \times C / f_U = 39,1$ kg;
- al confronto della massa anodica richiesta con la massa anodica installata: $m_A \times 8 > M_T$.

Gli 8 anodi vengono posati intorno alla cisterna, ad una profondità corrispondente alla mezzera della cisterna; ciascun cavo anodico viene portato in una cassetta di collegamento installata in prossimità della cisterna dove viene effettuato il collegamento elettrico tra i cavi anodici e un cavo collegato alla cisterna stessa. Il sistema viene completato con un elettrodo di riferimento permanente $\text{Cu}/\text{CuSO}_{4,\text{sat}}$ per il monitoraggio del potenziale.

3.4.5 Applicazioni a corrente impressa

I sistemi a corrente impressa sono i più usati per proteggere le strutture interrato e l'applicazione alle condotte per il trasporto di gas è quella principale.⁷

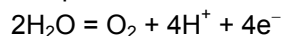
La struttura da proteggere, di norma un tratto di linea, nel caso di condotte di trasferimento, o una rete di linee nei sistemi di distribuzione, viene sezionata elettricamente mediante interposizione di *giunti isolanti*. Il giunto isolante del tipo monoblocco è un tronchetto di tubo realizzato con due pezzi elettricamente isolati tra loro in senso longitudinale mediante interposizione di materiali plastici. Il sezionamento elettrico mediante giunti isolanti di condotte interrate in presenza di correnti disperse è un metodo, in combinazione con la protezione catodica, per prevenire corrosione per interferenza elettrica. Nel caso di parallelismo tra condotta e linea ferroviaria, l'interposizione di giunti isolanti impedisce, o limita, la circolazione di corrente dispersa attraverso la sezione utile della tubazione.

La struttura è collegata al polo negativo dell'unità di alimentazione, di norma una macchina elettrica costituita da trasformatore (da 220 o 380 V alla tensione richiesta) e da raddrizzatore, da corrente alternata a corrente continua. Il polo positivo è collegato al dispersore anodico, costituito da più anodi e dal letto di posa; una serie di posti di misura completano il sistema di protezione.

3.4.5.1 Materiali anodici

A differenza degli anodi galvanici, i quali svolgono la loro funzione corrodendosi loro stessi, gli anodi nei sistemi a corrente impressa devono operare come elettrodi per quanto possibili inerti alla circolazione di corrente.

Le principali reazioni di elettrodo che nei sistemi a corrente impressa hanno luogo all'interfaccia anodo-ambiente sono: la riduzione di acqua con evoluzione di ossigeno:



e in ambienti contenente cloruri, come l'acqua di mare, la reazione di riduzione di ioni cloruro a cloro:



I materiali anodici più comuni sono: leghe ferro – silicio e ferro – silicio – cromo; titanio attivato con ossidi di metalli nobili; titanio platinato. Nei terreni, gli anodi sono posati in un letto di posa di polvere di carbone, che ha la funzione di diminuire la resistività nell'intorno dell'anodo e di limitarne il consumo. L'insieme di più anodi e del letto di posa in carbone è detto *dispersore* e a seconda della configurazione è detto orizzontale, verticale superficiale o verticale profondo.

3.4.5.2 Dimensionamento

Una volta calcolata la corrente di protezione, la progettazione del sistema a corrente impressa consiste primariamente nel dimensionamento del dispersore, e precisamente:

- scelta del tipo: verticale – superficiale o profondo – o orizzontale;
- posizione: è raccomandata una distanza minima di circa 100 m dalla struttura da proteggere per prevenire effetti di sovra-protezione;
- scelta del tipo di materiale anodico;
- calcolo del numero di anodi o il fabbisogno di corrente: viene effettuato fissando la resistenza desiderata del dispersore, ad esempio di 2 ohm, calcolando con le formule empiriche la resistenza di un anodo (nota la resistività del terreno e le dimensioni dell'anodo);
- verifica della durata degli anodi in base al consumo anodico.

⁷ UNI EN 12954, Protezione catodica di strutture metalliche interrate o immerse. Principi generali e applicazioni per condotte.

Cap. 3 – Corrosione e protezione nel terreno

Una ulteriore verifica richiesta nella protezione di condotte è quella detta dell'attenuazione del potenziale. Questo calcolo, di cui si omette qui la parte matematica, si basa sulla evidenza che la massima distanza che è possibile raggiungere da un singolo dispersore è determinata non dalle cadute ohmiche nel terreno, bensì dalla caduta ohmica lungo la tubazione attraverso la sezione metallica della stessa. Nonostante infatti la conducibilità del terreno sia di alcuni ordini di grandezza più bassa rispetto all'acciaio, la sezione utile che la corrente impegna nel terreno per circolare dal dispersore a superfici lontane della condotta è estremamente ampia, e tale da rendere di fatto trascurabile il termine di caduta ohmica; viceversa, la corrente di ritorno verso il polo negativo del dispersore che fluisce all'interno della condotta impegna una sezione relativamente modesta e quindi sensibili ai fini del relativo termine di caduta ohmica.

3.4.6 Monitoraggio

Le attività di verifica dello stato di protezione sono parte integrante di un sistema di protezione catodica a corrente impressa. Si attuano mediante misure periodiche dei parametri di funzionamento del sistema e in particolare del potenziale della struttura.⁸

Nelle strutture interrate protette a corrente impressa è buona norma prevedere nella fase di ingegneria una serie di posti di misura lungo il tracciato della struttura, costituiti da una cassetta (palina) nella quale viene riportato il cavo di collegamento alla struttura. La misura di potenziale viene effettuata periodicamente mediante un elettrodo di riferimento portatile; in alternativa viene interrato in posizione vicina alla condotta un elettrodo di riferimento permanente, il cui cavo viene anch'esso riportato nella cassetta del posto di misura.

Le misure sono acquisite nella modalità cosiddetta *on*, cioè con unità di alimentazione accesa, o più correttamente nella modalità detta di *instant off*, cioè immediatamente dopo lo spegnimento dell'alimentatore: così facendo si elimina dalla misura il contributo spurio di caduta ohmica nel terreno. Il potenziale misurato viene quindi confrontato con i limiti di protezione e di sovra-protezione.

In presenza di correnti disperse, come ad esempio avviene negli attraversamenti o parallelismi con linee ferroviarie elettrificate, alla misura di potenziale si sostituisce la sua registrazione per un periodo di norma pari a 24 ore: le condizioni di protezione sono assicurate se il potenziale viene sempre mantenuto al di sotto del limite di protezione.

Altri controlli vengono condotti mediante acquisizione del *profilo* del potenziale lungo il tracciato della linea: in pratica si rilevano, con spazature nell'ordine di pochi metri, i potenziali della condotta interrata rispetto ad un elettrodo portatile situato sulla verticale del tubo. Questo tipo di tecniche, oltre alla verifica dello stato di protezione, consentono di rilevare la presenza di difetti nel rivestimento.

In sistemi di protezione complessi, costituiti da più unità di alimentazione e posti di misura, il monitoraggio è integrato da sistemi di trasmissione remota dei dati, così da disporre in una posizione centralizzata (sala controllo) dei valori di funzionamento degli alimentatori e dei potenziali, con l'eventuale possibilità di regolare a distanza i sistemi stessi.

⁸ UNI EN 13509, Tecniche di misurazione per la protezione catodica.