



Università degli Studi di Napoli "*Parthenope*"

Dipartimento di Scienze e Tecnologie

Tecnologia delle costruzioni ed allestimento navale

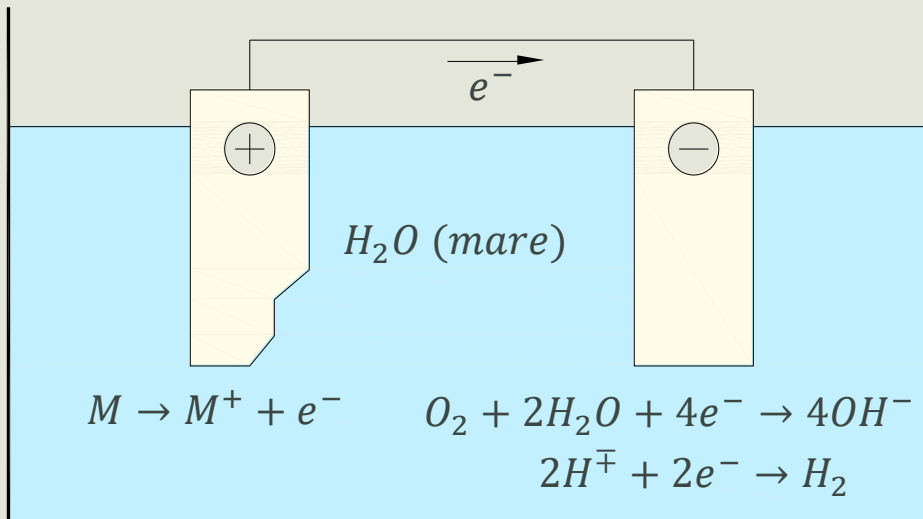
Vincenzo Piscopo

La corrosione dello scafo in acciaio – Parte I
Lezione 19 (38/48)

1.1 La cella galvanica

Si definisce corrosione il deterioramento di materiali metallici a causa di reazioni con sostanze presenti nell'ambiente circostante, in particolare ossigeno ed acqua, che danno luogo a composti detti prodotti della corrosione. Tale processo fisico si suddivide in due tipologie:

- **Corrosione a secco:** si svolge in presenza di atmosfere gassose per effetto di reazioni chimiche;
- **Corrosione in umido:** si svolge in presenza di soluzioni elettrolitiche per effetto di reazioni elettrochimiche.



Nel secondo caso, tipico della corrosione delle strutture navali, il fenomeno si spiega con la formazione di una **cella galvanica** all'interno della quale avviene una reazione di ossidoriduzione. I due elettrodi, dissimili tra loro, sono posti in contatto mediante un filo metallico e sono immersi in un elettrolita. In particolare avvengono le due seguenti reazioni:

- **Elettrodo positivo (anodo):** avviene la reazione di ossidazione, ovvero il materiale di cui è costituito l'elettrodo entra in soluzione sotto forma di ioni positivi, generando nel contempo elettroni che si dirigono dall'anodo al catodo tramite il circuito elettrico;
- **Elettrodo negativo (catodo):** avviene la reazione di riduzione, con la formazione di idrogeno e di ioni ossidrilici.

Pertanto l'anodo si consuma mentre il catodo si conserva.

1.2 Serie galvanica degli elementi in acqua di mare

Estremità catodica o nobile

Platino, oro

Argento

Titanio

Acciaio inossidabile (passivo)

Nichel (passivo)

Bronzo

Rame

Nichel (attivo)

Ossido di ferro

Ottone

Piombo, stagno

Acciaio inossidabile (attivo)

Ferro, ghisa, acciaio al carbonio

Leghe di alluminio

Alluminio

Zinco

Magnesio

Estremità anodica o ignobile

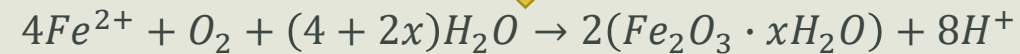
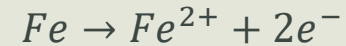
I ruoli assunti dai due elettrodi dipendono soprattutto dalla natura dei materiali a contatto. Il loro comportamento può essere previsto adoperando la **serie galvanica degli elementi in acqua di mare**, in cui i materiali sono ordinatamente disposti da quelli più nobili, cioè maggiormente resistenti alla corrosione, a quelli meno nobili. Il materiale più prossimo all'estremità catodica o nobile si comporta da catodo, mentre quello più prossimo all'estremità anodica o ignobile si comporta da anodo e dunque si corrode.

I materiali sono ordinati in funzione del loro **potenziale normale di riduzione** ovvero la tendenza di uno ione metallico ad acquistare elettroni. Dall'analisi delle serie galvanica degli elementi in acqua di mare si evince che il comportamento di un generico materiale non è univoco ma dipende dall'altro materiale con cui si chiude la cella.

In ambito navale tale circostanza si verifica quando l'acciaio dello scafo chiude la cella galvanica con il bronzo dell'elica o con sovrastrutture in lega leggera. La sovrapposizione di **anodi di sacrificio** normalmente in zinco consente la formazione di celle galvaniche in cui l'acciaio dello scafo tende a comportarsi da catodo riducendo in tal modo la sua esposizione al processo corrosivo.

1.3 La corrosione dell'acciaio

Si definisce **arrugginimento** il processo di corrosione dell'acciaio. La **ruggine** è un ossido ferrico idrato la cui composizione è del tipo $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ dal momento che la quantità di acqua è variabile. Ovviamente la ruggine si comporta allorquando l'acciaio funge da anodo ed è dunque sottoposto alle seguenti reazioni di ossidazione:



2.1 Tecniche di prevenzione della corrosione

La scelta dei materiali costituenti lo scafo non può avere l'obiettivo di evitare la corrosione perché tale scelta progettuale avrebbe delle ricadute economiche eccessive. L'unica strada percorribile è quella di adottare opportune tecniche di protezione che contengano la corrosione entro limiti tecnicamente accettabili ed economicamente sostenibili.

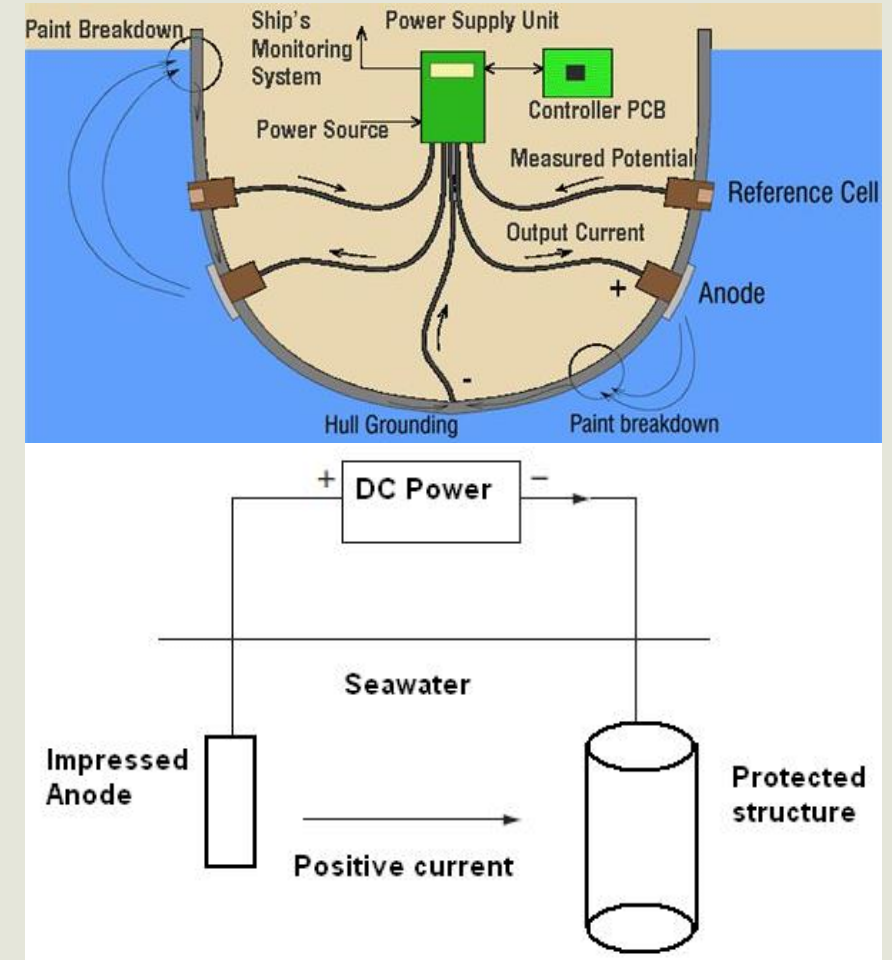
La **protezione catodica** rappresenta uno dei metodi più efficaci per ridurre la corrosione delle strutture navali. Tale tecnica consiste nel rendere negativo il potenziale del materiale da proteggere in modo da farlo diventare il catodo della cella elettrolitica. La protezione catodica può realizzarsi mediante:

- **anodi di sacrificio (protezione galvanica):** sono elementi costituiti da leghe di zinco o alluminio o magnesio, cioè materiali meno nobili dell'acciaio che, applicati allo scafo, fungono da anodi e dunque si sacrificano consumandosi. Per una protezione efficace gli anodi devono assicurare un flusso di elettroni e dunque una corrente compresa tra 60 e 120 mA/m²;



2.1 Tecniche di prevenzione della corrosione

- **correnti impresse:** il polo positivo di un circuito elettrico alimentato da un generatore a corrente continua (*power supply unit*) è collegato ad anodi scarsamente soggetti alla corrosione, normalmente in piombo. Lo scafo è collegato al polo negativo del circuito e su di esso sono fissati, direttamente a fasciame o in appositi recessi, almeno due elettrodi di zinco (*reference cell*) che sono assunti come riferimento per rilevare la differenza di potenziale tra gli elettrodi e lo scafo. Tale differenza viene inviata ad una centralina di controllo (*controller*) che regola il generatore di corrente in modo da mantenere la differenza di potenziale intorno a valori compresi tra 0.80 e 0.85 V, corrispondenti ad una corrente variabile tra 20 e 100 mA/m². In questo modo si forza lo scafo a fungere da elettrodo negativo o catodo riducendone in modo sensibile la corrosione. Tale tecnica ha ovviamente un costo nettamente superiore rispetto alla precedente a cui tuttavia è associata una migliore protezione delle strutture dello scafo.



2.2 Stima della massa totale di anodi sacrificali

La massa complessiva degli anodi sacrificali in kg M_a può essere determinata mediante la seguente formula di progetto reperibile nella Recommended Practice DNV-RP-B401 *Cathodic Protection Design*:

$$M_a = \frac{i_{cm} S t_f 8760}{u \varepsilon}$$

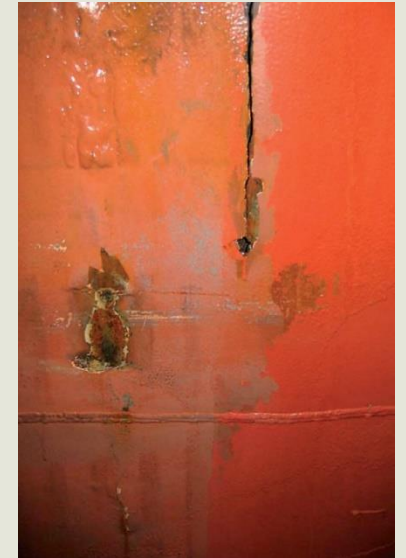
- i_{cm} è la densità di corrente circolante nella cella galvanica in A/m² dipendente dalla profondità degli elementi strutturali e dalla temperatura superficiale media dell'acqua di mare;
- S è la superficie bagnata di carena in m²;
- t_f è la vita degli anodi sacrificali in anni;
- u è il fattore di utilizzo degli anodi sacrificali, normalmente pari a 0.85;
- ε è la capacità elettrochimica in acqua di mare dell'anodo di sacrificio in Ah/kg pari a 2000 Ah/kg per anodi in zinco e a 780 Ah/kg per anodi in alluminio.

Depth (m)	i_{cm} (A/m ²)			
	Tropical (>20°C)	Sub-tropical (12-20°C)	Temperate (7-12°C)	Arctic (<7°C)
0-30	0.070	0.080	0.100	0.120
30-100	0.060	0.070	0.080	0.100
100-300	0.070	0.080	0.090	0.110
300	0.090	0.100	0.110	0.110

3.1 Modalità di corrosione delle strutture navali

In accordo alle linee guide fornite nelle Classification Notes 72.1 del Det Norske Veritas *Allowable thickness diminution for hull structures*, le modalità di corrosione delle strutture navali sono sostanzialmente di 4 tipi:

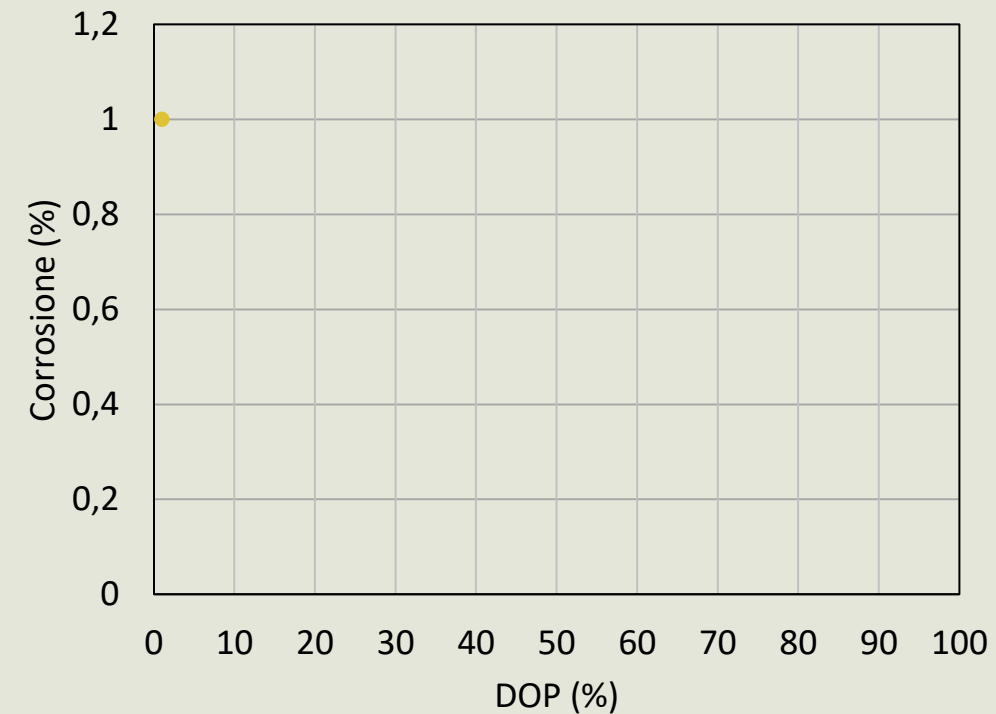
- **Corrosione uniforme (*general*):** le strutture sono caratterizzate da una riduzione uniforme dello spessore;
- **Corrosione a macchia di leopardo (*pitting*):** le strutture sono caratterizzate da una riduzione non omogenea dello spessore con aree particolarmente corrose ed aree pressoché integre;
- **Corrosione con indentature (*grooving*):** le strutture sono caratterizzate da riduzioni localizzate di spessore normalmente distribuite lungo una o più linee di intaglio, generalmente riscontrabili in prossimità dei collegamenti saldati;
- **Corrosione di bordo (*edges*):** è un fenomeno di corrosione localizzato in corrispondenza dei bordi liberi dei fasciami o dei rinforzi.



3.2 Criteri di sostituzione delle strutture corrose

I criteri di sostituzione delle strutture corrose dipendono normalmente dai regolamenti tecnici applicabili alla singola nave e, dunque, variano in linea di principio caso per caso. Tuttavia, è possibile delineare alcune linee guida di carattere generale in funzione del tipo di corrosione cui è interessato l'elemento strutturale in esame:

- **Corrosione uniforme:** normalmente è ritenuta accettabile una diminuzione fino al 20% dello spessore originale per i pannelli di fasciame e fino al 25% per i rinforzi.
- **Corrosione a macchia di leopardo (*pitting*):** dal momento che tale corrosione è localizzata in maniera non uniforme sul singolo elemento strutturale, i criteri di sostituzione si basano sull'introduzione di un parametro adimensionale detto *Degree of Pitting (DOP)* che misura la percentuale della superficie esposta a corrosione. Per strutture con un DOP fino al 20% la corrosione massima ammissibile è normalmente pari al 40% dello spessore iniziale. Tale parametro varia linearmente fino ad un DOP pari al 100% in corrispondenza del quale la corrosione ammissibile è pari al 20% dello spessore iniziale.



3.2 Criteri di sostituzione delle strutture corrose

- **Corrosione con indentature (*grooving*):** si accetta una corrosione massima del 30% dello spessore iniziale purché la larghezza dell'indentatura non superi il 15% della larghezza della struttura o comunque 100 mm.
- **Corrosione di bordo (*edges*):** la corrosione dell'elemento strutturale non deve di norma interessare più del 25% dell'altezza del rinforzo e lo spessore di bordo non deve essere inferiore al 33% dello spessore iniziale.

Si rammenta che tali indicazioni sono in ogni caso di massima e condizioni più o meno restrittive possono essere di volta in volta fornite dai singoli regolamenti in funzione del tipo di nave o dell'elemento strutturale in esame.

