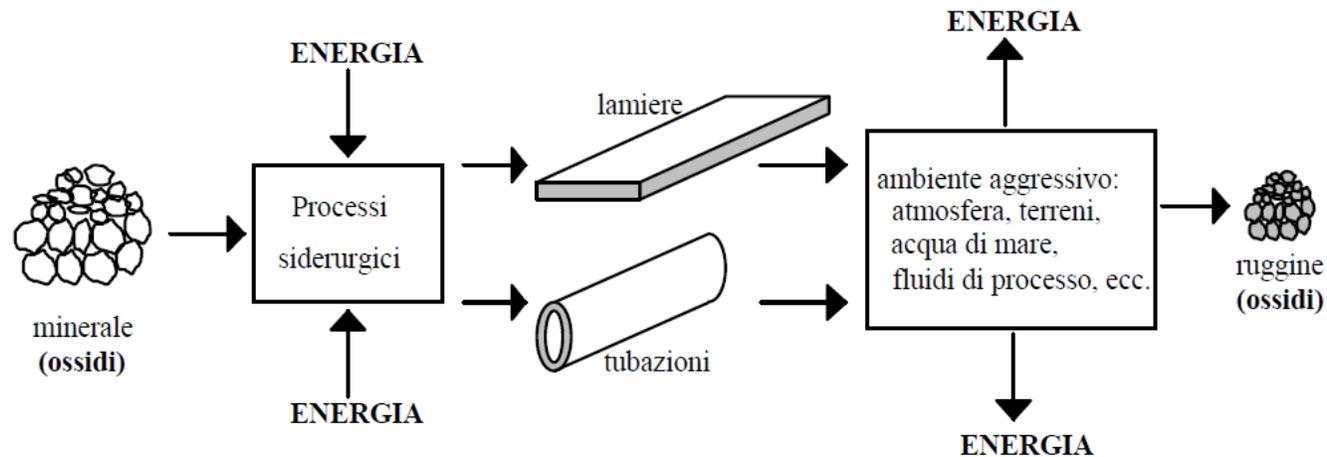


# Impiego dell'acciaio nelle strutture esistenti. Retrofit sismico e problemi di durabilità

Corrosione e protezione delle strutture metalliche

Ing. Fabio Scherillo

# GENERALITÀ SULLA CORROSIONE



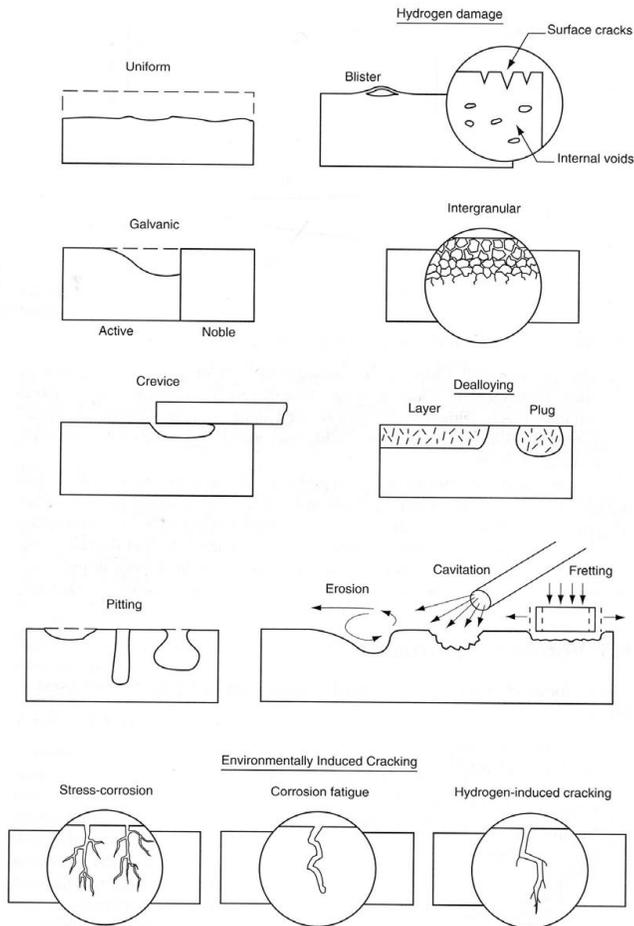
- Il materiali metallici, con l'eccezione dei metalli nobili, vengono prodotti attraverso vari processi metallurgici a partire dai loro ossidi. La corrosione, e non solo essa, è un fenomeno chimico-fisico che riporta i metalli nella loro condizione originale ossidata

# GENERALITÀ SULLA CORROSIONE

**Mentre tu leggi  
questo cartello nel mondo  
si corrodono più di  
10.000 kg di ferro**

- La corrosione ha un impatto notevole sulla durabilità delle strutture metalliche nei diversi ambiti: civile, industriale, navale, etc. I danni causati dalla corrosione e la messa in opera di sistemi atti a prevenirla o mitigarla sono normalmente ingenti e rappresentano una voce di spesa notevole per i paesi industrializzati

# GENERALITÀ SULLA CORROSIONE



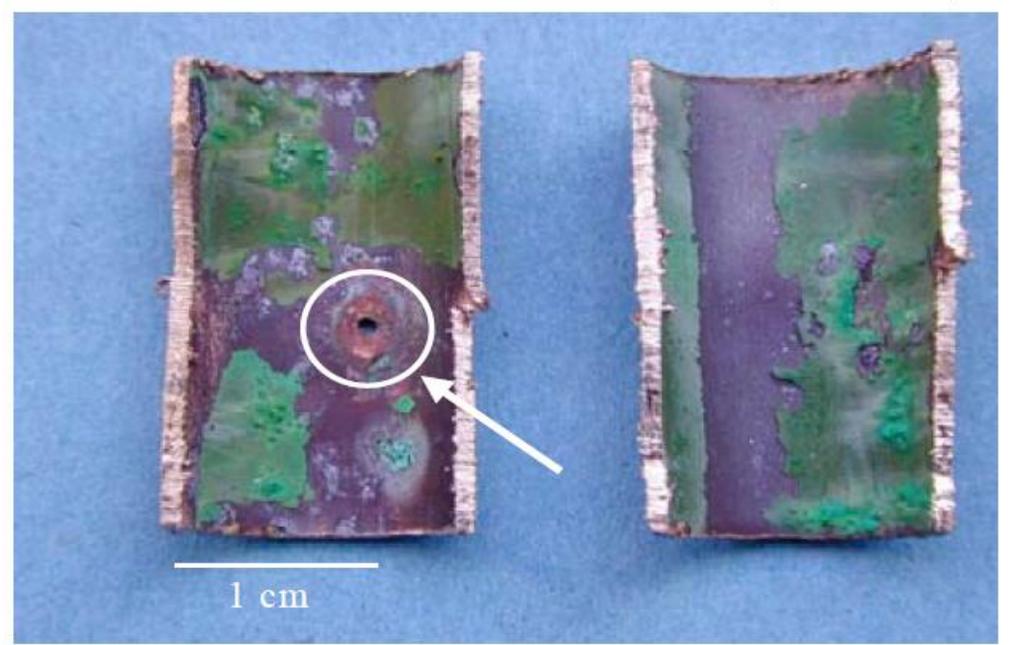
La corrosione può presentarsi in diverse forme e morfologie, alcune più evidenti altre subdole.

La corrosione uniforme interessa l'intera superficie di un oggetto, le diverse forme di corrosione localizzata riguardano zone specifiche della superficie metallica, spesso non sono facili da individuare.

## GENERALITÀ SULLA CORROSIONE



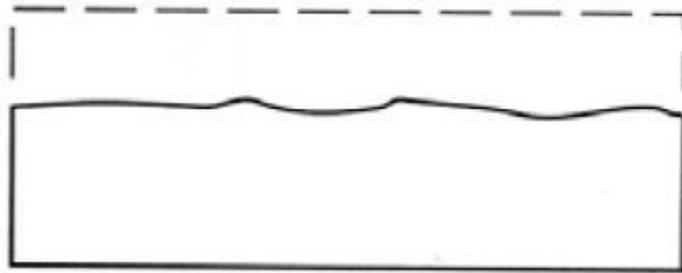
Corrosione generalizzata di un relitto navale



Corrosione localizzata di un tubo di rame

# FORME DI CORROSIONE

uniforme



Velocità di corrosione Comportamento	mm/anno
Eccezionale	<0,02
Ottimo	0,02-0,01
Buono	0,1-0,5
Così-così	0,5-1
Scarso	1-5
Inaccettabile	>5

Il danno provocato dalla corrosione uniforme, o generalizzata, è misurato in mm/anno, cioè come perdita di spessore che il manufatto subisce in un anno, questo tipo di misura non è applicabile però nel caso di corrosione localizzata.

# FORME DI CORROSIONE

La corrosione può essere di due tipi:

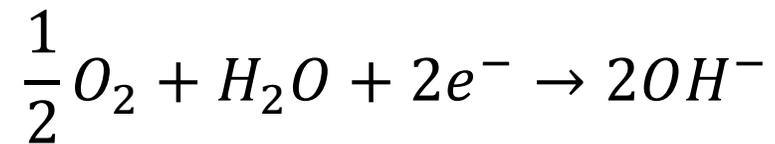
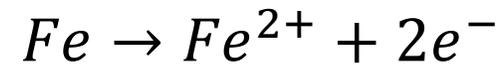
A secco, in cui l'ossidazione del materiale avviene per contatto diretto tra il metallo e l'atmosfera ossidante

A umido, in cui l'ossidazione del metallo avviene tramite una serie di reazioni elettrochimiche che necessitano di acqua liquida.

Tra i due meccanismi quello più importante è il secondo che può avvenire a temperatura ambiente, mentre la corrosione a secco necessita di alte temperature

## FORME DI CORROSIONE

Il meccanismo a umido, come già detto, avviene secondo una serie di reazioni elettrochimiche, prendiamo ad esempio la corrosione del ferro

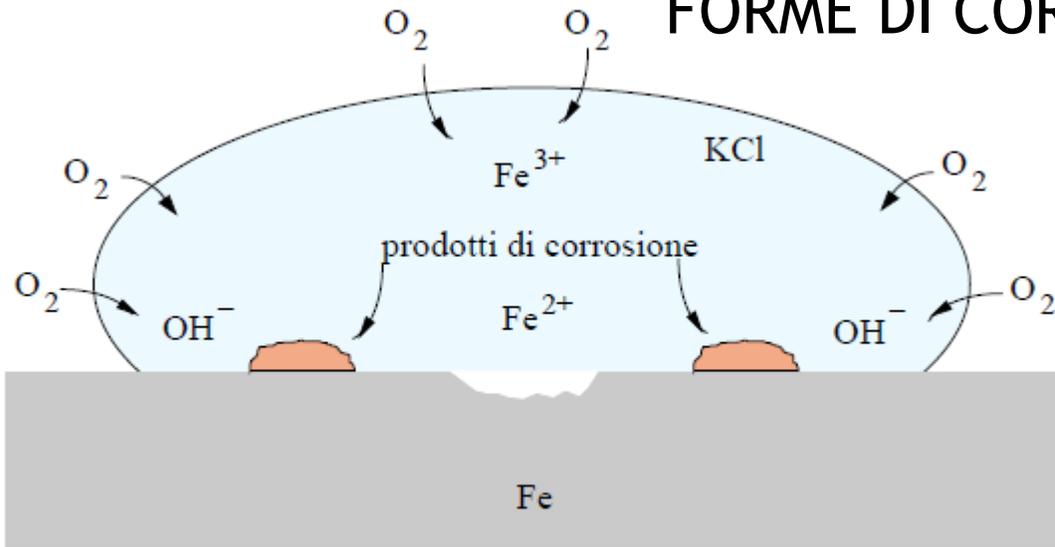


Il processo di corrosione avviene attraverso due semi-reazione:

La reazione anodica di ossidazione in cui il metallo si ossida e si producono elettroni.

La reazione catodica di riduzione in cui, in questo caso, l'ossigeno si riduce e si consumano elettroni. Perché il processo evolva spontaneamente, come in una pila, l'energia associata al processo catodico deve essere maggiore di quella associata al processo anodico.

## FORME DI CORROSIONE



Un classico esperimento che si fa per dimostrare quanto detto in precedenza è quello della goccia, in cui una goccia d'acqua contenete sali disciolti viene posta su una lamiera di ferro.

Si osserva che la corrosione avviene principalmente in corrispondenza del centro della goccia dove prevale il processo anodico, invece le zone della goccia in contatto con l'atmosfera sono ricche di ossigeno e qui prevale il processo catodico.

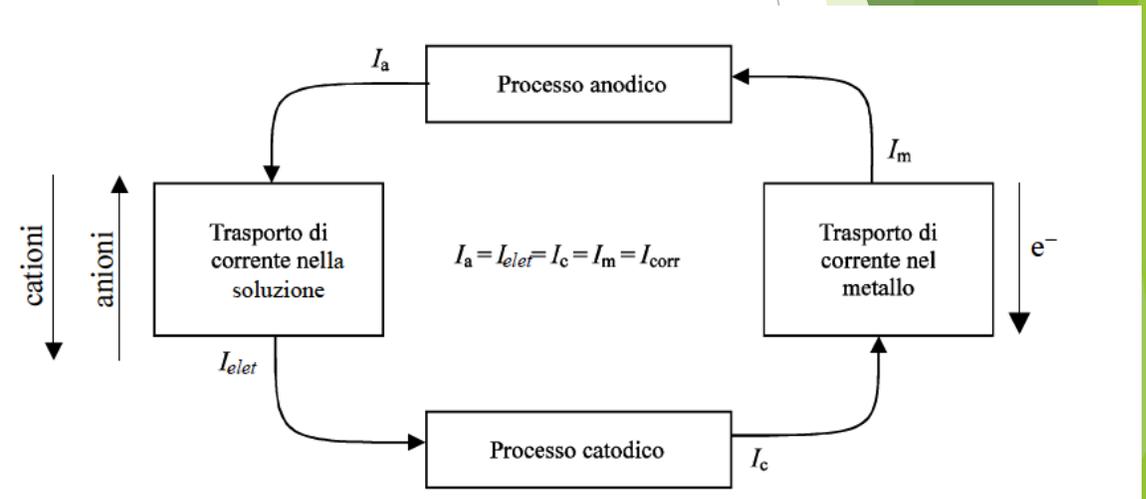
La ruggine, che è un miscuglio di  $Fe_2O_3$  e  $Fe(OH)_3$  si forma per successiva reazione degli ioni  $Fe^{2+}$  con l'ossigeno e l'acqua.

# FORME DI CORROSIONE

Perché un processo di corrosione possa evolvere c'è dunque bisogno di:

Un processo anodico in cui il metallo si ossida.  
Un processo catodico che fornisce energia.

Inoltre gli elettroni che si producono nel processo anodico e sono consumati da quello catodico passano nel metallo generando una corrente elettrica, tale corrente deve essere bilanciata da una uguale e contraria in seno alla soluzione. È condizione necessaria perché il processo di corrosione avvenga che la soluzione abbia una sufficiente conducibilità che può essere garantita dalla presenza di ioni disciolti che non necessariamente partecipano alle reazioni anodica e catodica.



## FORME DI CORROSIONE

Nel caso dell'alluminio le reazioni elettrochimiche di corrosione portano alla formazione dello ione  $\text{Al}^{3+}$ , che come nel caso del ferro, reagisce con ossigeno e acqua per formare una miscela di ossidi e idrossidi di alluminio.

A differenza però della ruggine questa miscela di ossidi e idrossidi forma sulla superficie metallica uno strato compatto che fa da barriera tra il metallo e l'ambiente impedendo o rallentando la corrosione.

Questa condizione per cui sulla superficie di un metallo si forma uno strato ossidato stabile che impedisce il contatto tra il metallo stesso e l'ambiente è detta passività.

Sono esempi di leghe metalliche passivabili, gli acciai inox, le leghe di alluminio, le leghe di titanio, etc...

Bisogna ricordare che la resistenza a corrosione non è una proprietà di un materiale, ma la conseguenza di un'interazione tra un materiale e un ambiente e questo vale anche per la passività. Il film ossidato può essere stabile e protettivo in certi ambienti e non in altri.

# FORME DI CORROSIONE

galvanica



A: meno resistente B: più resistente

Una particolare forma di corrosione è quella galvanica che si realizza quando metalli a 'nobiltà' diversa sono in contatto tra di loro in un determinato ambiente.

In questo caso il metallo meno nobile si corrode con maggiore velocità rispetto al caso in cui si trovasse da solo nello stesso ambiente. Anche quello di 'nobiltà' è un concetto che dipende dall'ambiente.

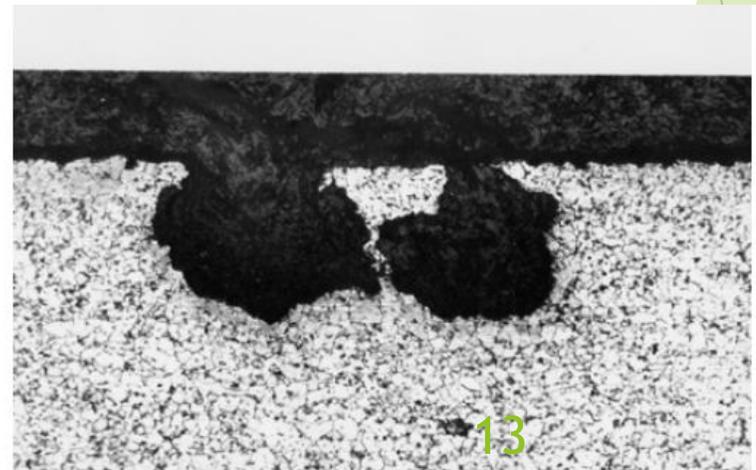
Tab. 7.2. SCALA DI NOBILTÀ "TERMODINAMICA" E "PRATICA" DI METALLI IN AMBIENTE ACQUOSO, IN PRESENZA DI OSSIGENO.

NOBILTÀ TERMODINAMICA	NOBILTÀ PRATICA
1 ORO	RODIO 1
2 IRIDIO	TANTALIO 2
3 PLATINO	ORO 3
4 RODIO	IRIDIO 4
5 PALLADIO	PLATINO 5
6 MERCURIO	TITANIO 6
7 ARGENTO	PALLADIO 7
8 RAME	MERCURIO 8
9 CARBONIO	ARGENTO 9
10 PIOMBO	STAGNO 10
11 NICHEL	RAME 11
12 COBALTO	ALLUMINIO 12
13 CADMIO	CROMO 13
14 FERRO	TUNGSTENO 14
15 STAGNO	FERRO 15
16 MOLIBDENO	NICHEL 16
17 TUNGSTENO	COBALTO 17
18 ZINCO	CARBONIO 18
19 TANTALIO	PIOMBO 19
20 CROMO	CADMIO 20
21 VANADIO	ZINCO 21
22 MANGANESE	MOLIBDENO 22
23 ALLUMINIO	VANADIO 23
24 TITANIO	MAGNESIO 24
25 MAGNESIO	MANGANESE 25

## FORME DI CORROSIONE

Una forma di corrosione particolarmente insidiosa che riguarda i metalli passivabili, come gli acciai inox e l'alluminio, è il pitting. Si tratta di una forma di corrosione localizzata che si manifesta come una serie di fori sulla superficie metallica.

Il pitting si genera perché alcune specie, come i cloruri, rompono localmente lo strato di passività che protegge il metallo portandolo direttamente a contatto con la soluzione corrosiva. Inoltre i pits hanno una geometria tale che al loro interno si creano condizioni particolarmente aggressive che accelerano il processo corrosivo.



## FORME DI CORROSIONE

Un'altra forma di corrosione di particolare rilievo per le strutture è la corrosione in fessura che si realizza negli interstizi che si possono creare negli accoppiamenti tra componenti, nei fissaggi realizzati con chiodatura o bullonatura, sotto le guarnizioni etc...

In queste zone, per capillarità, può facilmente penetrare acqua, inoltre nelle fessure si viene a creare un ambiente particolarmente aggressivo che accelera il processo corrosivo.



# CORROSIONE NEI TERRENI

I terreni vengono classificati in base alla loro granulometria, che influenza soprattutto la permeabilità nei confronti dell'acqua e dell'aria.

Perché in un terreno possa avvenire un processo corrosivo devono verificarsi alcune condizioni:

1. Il terreno deve essere umido.
2. Il terreno deve essere permeabile all'aria.
3. Il terreno deve contenere portatori di carica.

Gruppo	Denominazione	Diametro medio delle particelle
1	pietrisco	20 - 2 mm
2	sabbia	2 - 0,2 mm
3	sabbia fine	0,2 - 0,02 mm
4	limo	20 - 2 $\mu\text{m}$
5	argilla	< 2 $\mu\text{m}$

## CORROSIONE NEI TERRENI

Una prima modalità di corrosione per le strutture interrate è quello della aerazione differenziata che si verifica se una struttura, come una tubatura, attraversa terreni a differente granulometria.

La parte della tubatura che passa nelle sabbia, permeabile all'aria, è soggetta al processo catodico di riduzione dell'  $O_2$ , mentre la parte che passa nell'argilla, impermeabile all'aria, al processo catodico di ossidazione del metallo che quindi si corrode

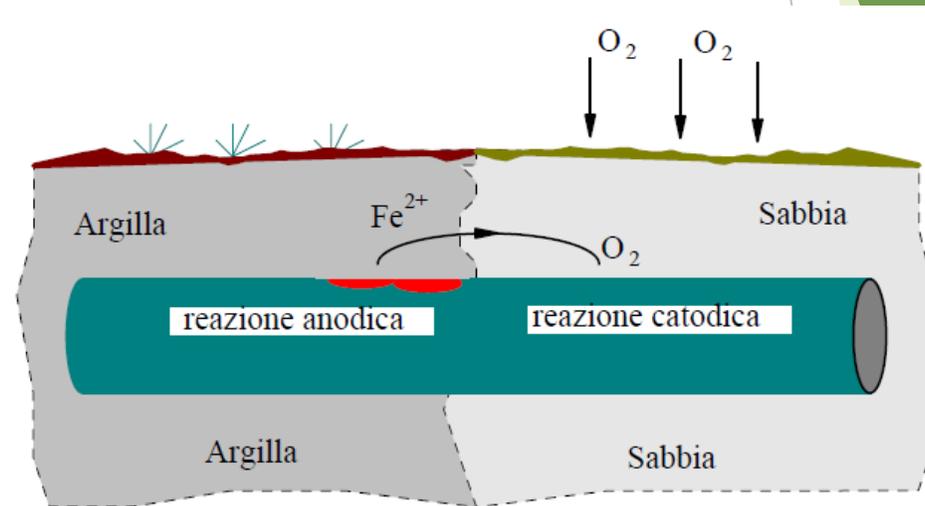
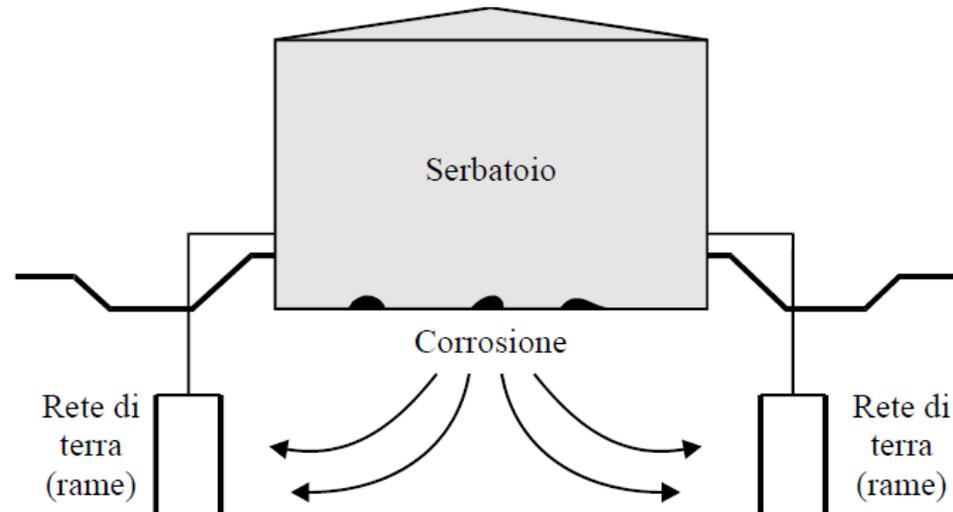


Fig. 29.2 Tipico caso di corrosione per aerazione differenziale

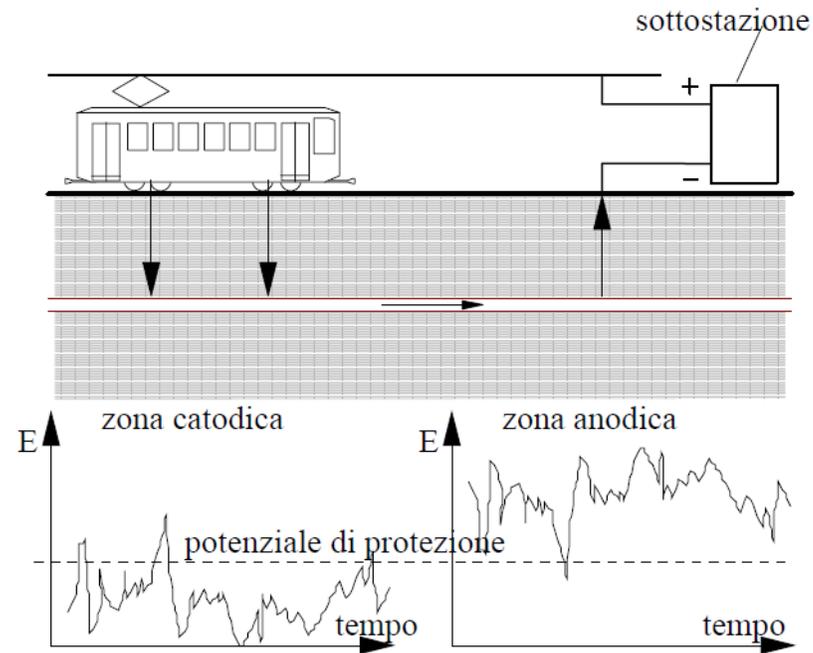
## CORROSIONE NEI TERRENI

Una seconda modalità è la corrosione galvanica tra il serbatoio in acciaio e la rete di messa a terra in rame (più nobile dell'acciaio)



## CORROSIONE NEI TERRENI

Un'altra forma di corrosione che riguarda le strutture interrate è quella dovuta alle correnti vaganti che si ha in particolare in prossimità di linee ferroviarie elettrificate. La corrente fornita dalla sottostazione passa attraverso il tram e ritorna alla sottostazione attraverso le rotaie. Tuttavia le rotaie hanno una messa a terra e il circuito si chiude in parte nel terreno o attraverso la tubazione, come riportato in figura. La tubazione si trova in condizioni catodiche (protetta) dove la corrente entra e in condizioni anodiche, e quindi di corrosione, dove la corrente esce per tornare alla sottostazione.



# ZINCATURA A CALDO

Esistono numerosissimi metodi per proteggere le strutture metalliche dalla corrosione, il primo metodo che è anche il più intuitivo è quello di proteggere il metallo con un film che faccia da barriera tra il metallo stesso e l'ambiente.

Esistono diversi tipi di ricoprimenti:

1. Ricoprimenti metallici come zincatura, nichelatura, ramatura etc...
2. Ricoprimenti non metallici di tipo organico

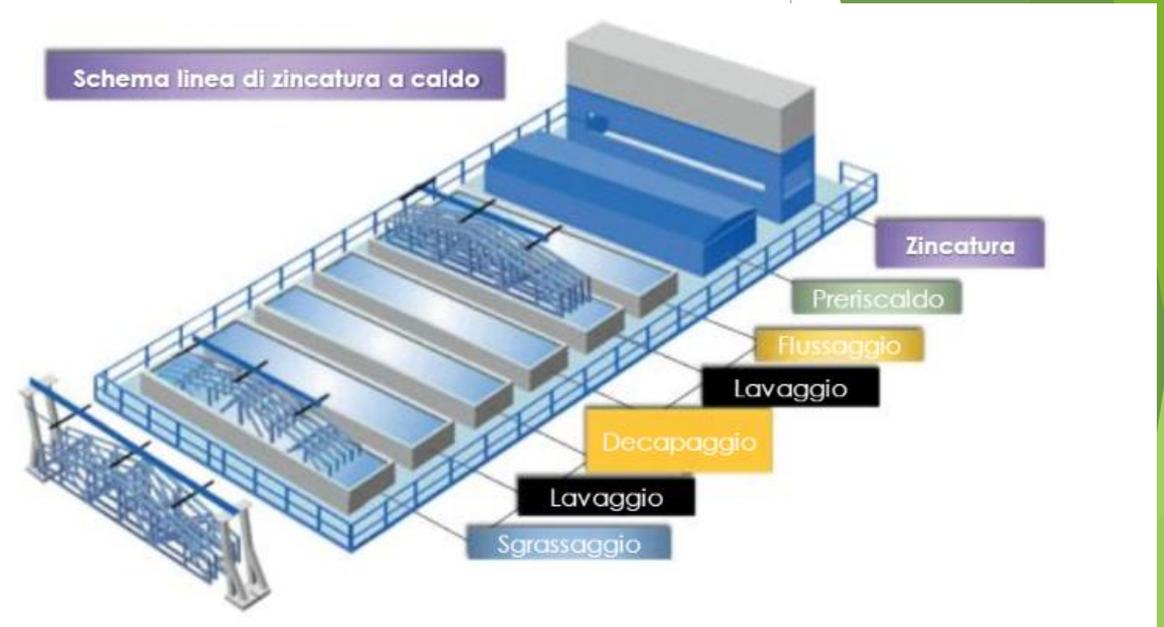
Tra i ricoprimenti metallici, uno dei più diffusi nel campo delle costruzioni è la zincatura realizzata immergendo componenti di acciaio al carbonio in un bagno di zinco fuso.

La zincatura a caldo è il principale metodo di protezione per componenti in acciaio esposti a corrosione di tipo atmosferico.

# ZINCATURA A CALDO

Le fasi di un processo di zincatura a caldo sono riassunte nello schema di impianto riportato in figura:

1. Lo sgrassaggio serve a eliminare oli e altre sostanze residue di lavorazioni precedenti.
2. Il decapaggio è un bagno in acidi forti come HCl, ed elimina dalla superficie metallica ossidi che non favoriscono l'adesione dello zinco sull'acciaio.
3. Durante il flussaggio la superficie metallica viene ricoperta da un sottile strato di sali inorganici che servono a evitare la formazione di ossidi termici durante la fase di preriscaldamento.
4. Immersione nel bagno di zinco fuso a circa 450 °C, i tempi di immersione variano da qualche minuto fino a circa 15 min per oggetti di grandi dimensioni.



# ZINCATURA A CALDO

Quando l'acciaio è immerso nello zinco fuso si realizza tra i due metalli una reazione metallurgica che porta alla formazione di un'interfaccia complessa caratterizzata dalla presenza di diverse fasi

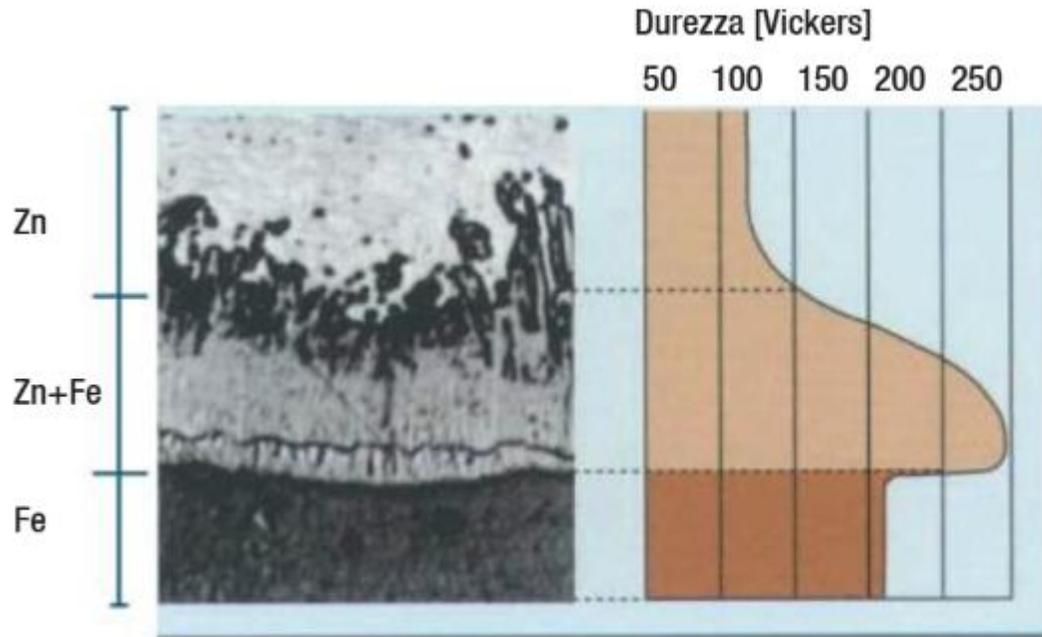


Fig. 6.4  
La durezza varia nello spessore dello zinco.

Lo strato di Fe-Zn è più duro dell'acciaio.

Lo strato superficiale, più morbido, attutisce eventuali urti.

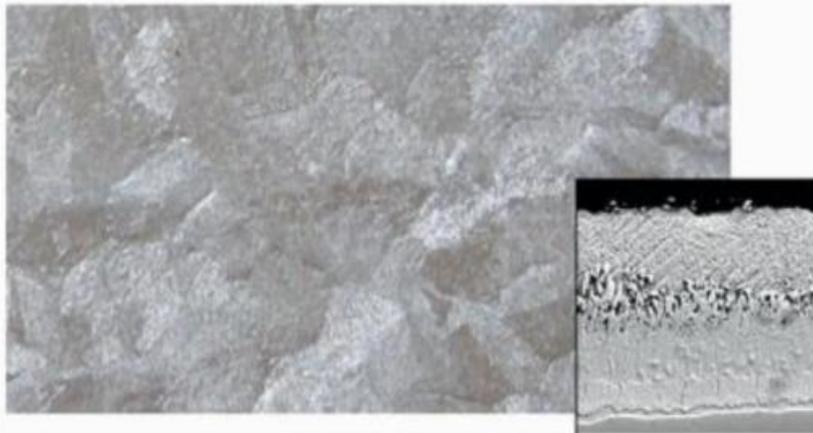
Lo strato superiore è costituito da zinco puro, il tenore di ferro aumenta spostandosi verso l'acciaio

# ZINCATURA A CALDO

Gli elementi che hanno maggiore influenza sul ricoprimento di zinco sono:

1. Alluminio, aggiunto al bagno di zincatura impedisce un'eccessiva formazione di ossido di zinco, inoltre conferisce brillantezza al ricoprimento. In tenori troppo elevati impedisce, però, la reazione metallurgica Zn-Fe
2. Fosforo e silicio in lega nell'acciaio, premesso che tutti gli acciai al carbonio sono adatti al processo di zincatura a caldo, la concentrazione di questi elementi influenza l'aspetto e lo spessore del ricoprimento.

$Si \leq 0,04\%$ ,  $P \leq 0,02\%$



$0.14\% < Si \leq 0.22\%$  e  $P < 0.02\%$



## ZINCATURA A CALDO

La protezione data dalla zincatura è dovuta al fatto che lo zinco è un metallo che, nelle condizioni tipiche di esposizione all'atmosfera, è ricoperto da uno strato ossidato compatto molto protettivo, ossia si trova in condizioni di passività.

Lo spessore e la durabilità di una zincatura dipendono fortemente dall'ambiente, in particolare dalla concentrazione nell'atmosfera di cloruri e ossidi di zolfo che tendono a rompere lo strato di passività

<b>Inquinante</b>	<b>Atmosfera</b>		
	<i>Industriale</i>	<i>Urbana</i>	<i>Rurale</i>
SO <sub>2</sub>	100-200	30-80	5-20
NO <sub>x</sub>	100-200	20-40	<10
HCl	10-20	1-5	<1
Fumo e ceneri	100-1000	20-50	<20
Spray marino	all'interno		Sulla costa
	aria 30		1000
	pioggia 5		50
Altre polveri	0,1-50		

## ZINCATURA A CALDO

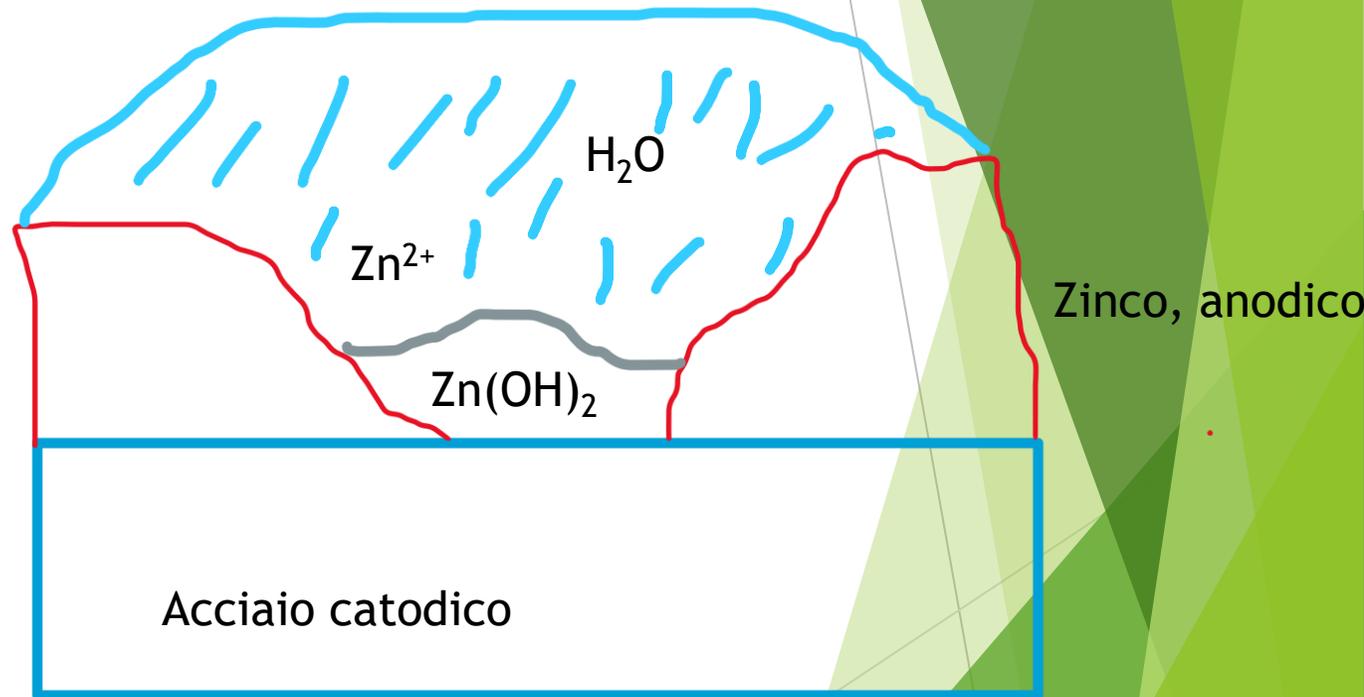
L'anidride solforosa è responsabile delle piogge acide, e lo strato di passività dello zinco non resiste a pH inferiori a 5.5.

L'azione dei cloruri è di tipo diverso.

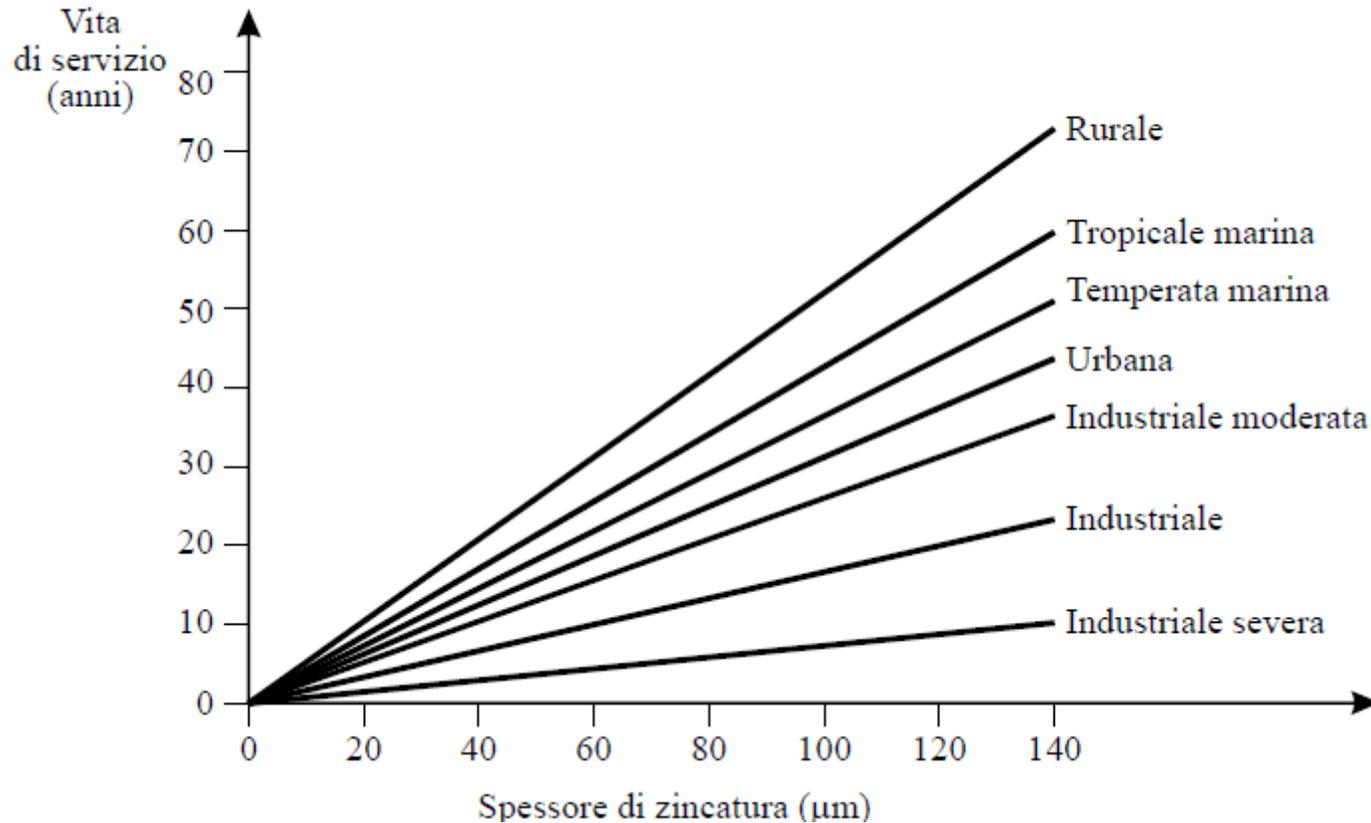
In assenza di cloruri se lo zinco metallico si trova esposto ad acqua neutra aerata, comincerà a corrodersi formando ioni  $Zn^{2+}$ , questi reagiscono con l'acqua formando idrossidi insolubili che ricostruiscono lo strato di passività.

In presenza di cloruri la precipitazione degli idrossidi non avviene in quanto il cloruro di zinco è solubile.

Inoltre se, per qualche evento, l'acciaio si trovasse esposto all'atmosfera, si creerebbe un accoppiamento galvanico tra acciaio e zinco in cui lo zinco è l'anodo e si corrode mentre l'acciaio risulta protetto



# ZINCATURA A CALDO



La normativa prevede, in funzione delle dimensioni del componente di acciaio, uno spessore minimo per il ricoprimento di zinco. Nel settore delle costruzioni, per una vita utile di circa venti anni, si usa uno spessore di 85  $\mu\text{m}$ . In caso di ambienti particolarmente aggressivi questo spessore può essere aumentato, nel caso ciò non bastasse si può ricorrere a sistemi di protezione aggiuntiva, come la verniciatura, o alla scelta di materiali e sistemi di protezione diversi.

# ZINCATURA A CALDO

Le normative di riferimento per la zincatura a caldo sono:

1. UNI EN ISO 1461:2009, questa norma stabilisce gli spessori di rivestimento minimi per le diverse tipologie di manufatti, vengono stabiliti i metodi di prova per valutare lo spessore, i tipi di difetti e la loro accettabilità. La norma stabilisce anche la qualità dello zinco usato nel bagno e i livelli massimi di contaminazione.
2. UNI EN ISO 14713, costituita da due parti per quel che riguarda la zincatura a caldo, nella prima parte fornisce indicazioni generali sui rivestimenti di zinco, sulla resistenza a corrosione e la durata prevista nei vari ambienti. Nella seconda parte sono fornite indicazioni progettuali per una buona zincatura ed è riportata una classificazione degli acciai in base alla loro reattività.

# ZINCATURA A CALDO

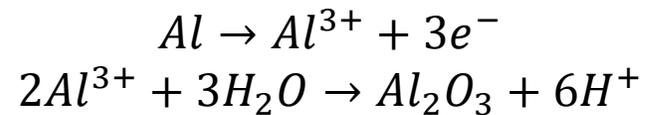


Telaio e travi di solaio in acciaio zincato a caldo.

# ANODIZZAZIONE

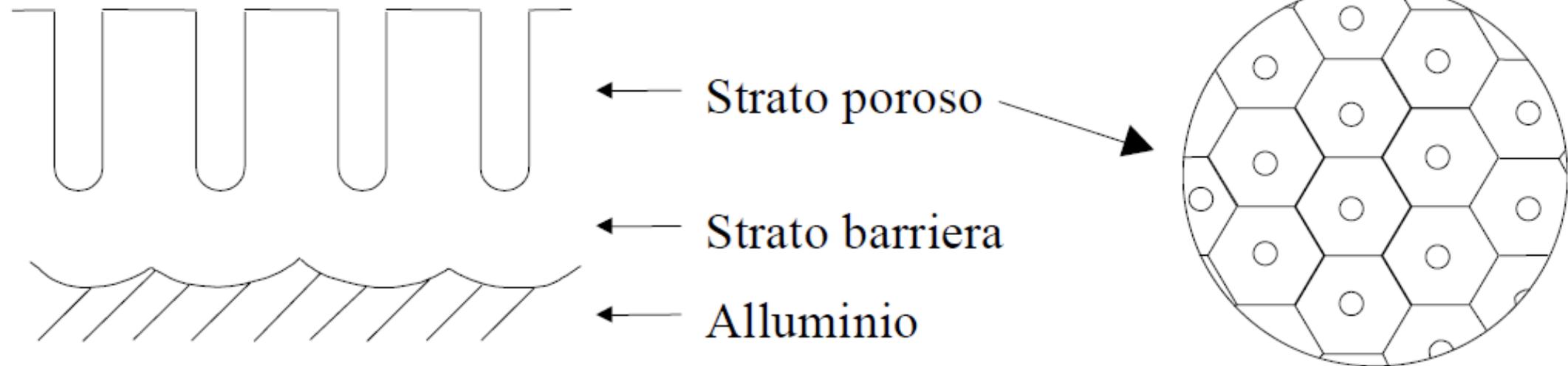
L'ossidazione anodica è un processo elettrolitico realizzato allo scopo di ispessire il film di ossido naturalmente presente sull'alluminio e su altri metalli in modo da migliorarne la resistenza alla corrosione e all'abrasione.

L'anodizzazione si realizza portando l'alluminio in condizioni fortemente ossidanti ed è descritta dalle seguenti reazioni:



Si forma così uno strato spesso (fino a 50  $\mu\text{m}$ ) di  $Al_2O_3$  che rafforza le condizioni di passività

## ANODIZZAZIONE



Quello che si forma è uno strato ossidato con la tipica morfologia riportata in figura, i pori sono sigillati in acqua surriscaldata attraverso un processo di idratazione dell'  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oppure utilizzando sali che precipitano nei pori. L'anodizzazione conferisce non solo elevata resistenza a corrosione ma anche resistenza all'abrasione essendo l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  particolarmente duro.

L'anodizzazione può essere utilizzata anche come substrato per successivi trattamenti come la verniciatura. Con opportuni additivi, nella fase di sigillatura, si possono ottenere colori diversi.

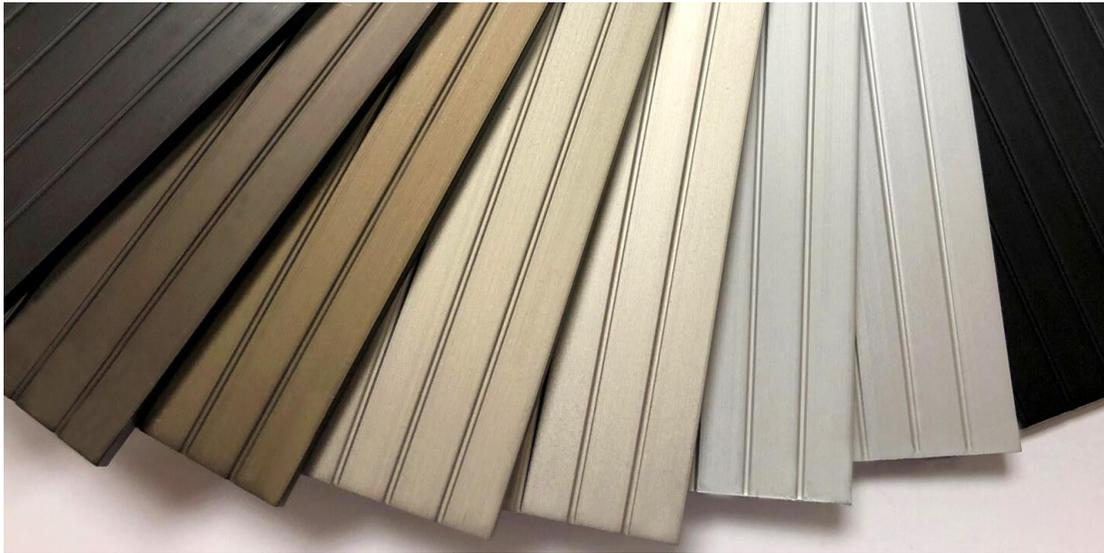
# ANODIZZAZIONE

UNI 10681:2010

Alluminio e leghe di alluminio - Caratteristiche generali degli strati di ossido anodico per uso decorativo e protettivo.

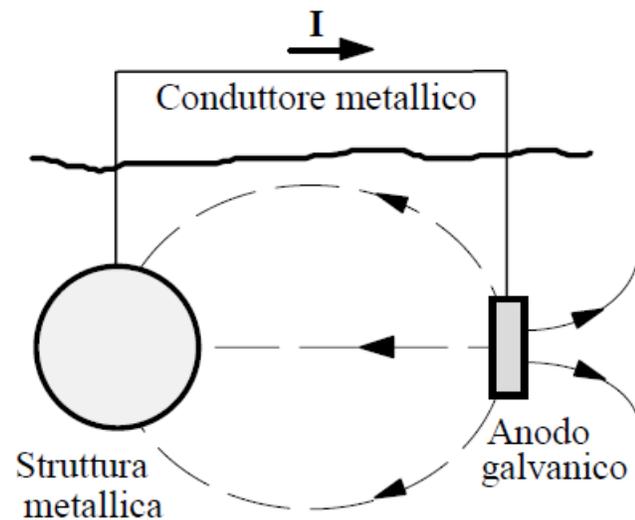
Stabilisce le caratteristiche generali degli strati di ossido dell'alluminio e delle sue leghe per uso decorativo e protettivo. Vengono definite le proprietà del rivestimento anodico, i relativi metodi di controllo e la descrizione dell'importanza dei trattamenti preliminari per assicurare l'aspetto o la finitura desiderata del manufatto.

# ANODIZZAZIONE



## PROTEZIONE CATODICA

Ultimo metodo che vediamo per proteggere le strutture metalliche è la protezione catodica che riguarda le strutture immerse. Ci sono due modi per realizzare la protezione catodica: mediante anodi sacrificabili e mediante correnti impresse



Nel metodo con anodi sacrificabili il materiale dell'anodo è molto meno nobile del materiale da proteggere, si realizza così una coppia galvanica in cui l'anodo si corrode (si sacrifica) mentre la struttura è protetta.

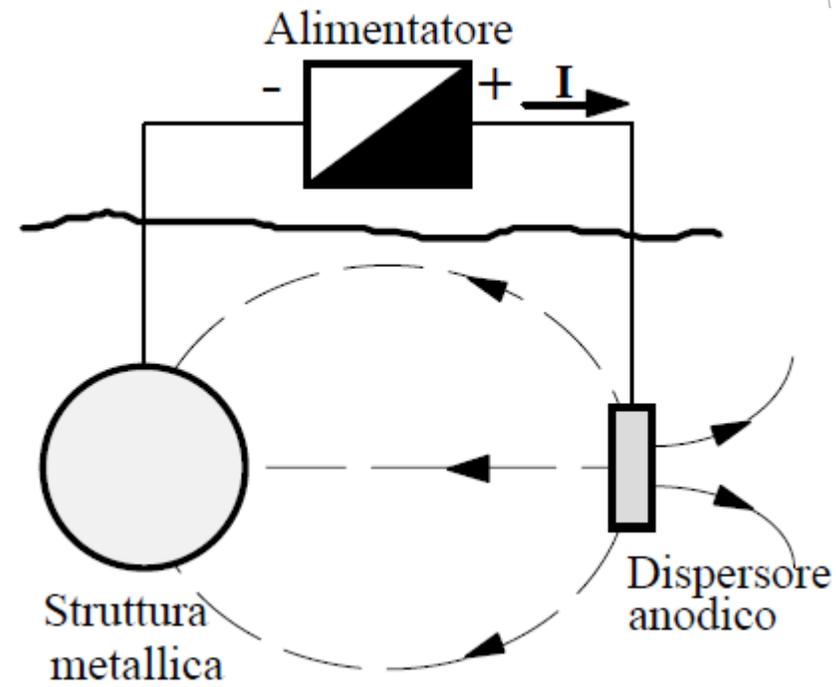
Materiali tipici per gli anodi sacrificabili sono magnesio, zinco e alluminio.

L'accoppiamento galvanico porta alla circolazione di corrente nel sistema che è detta corrente di protezione.

# PROTEZIONE CATODICA

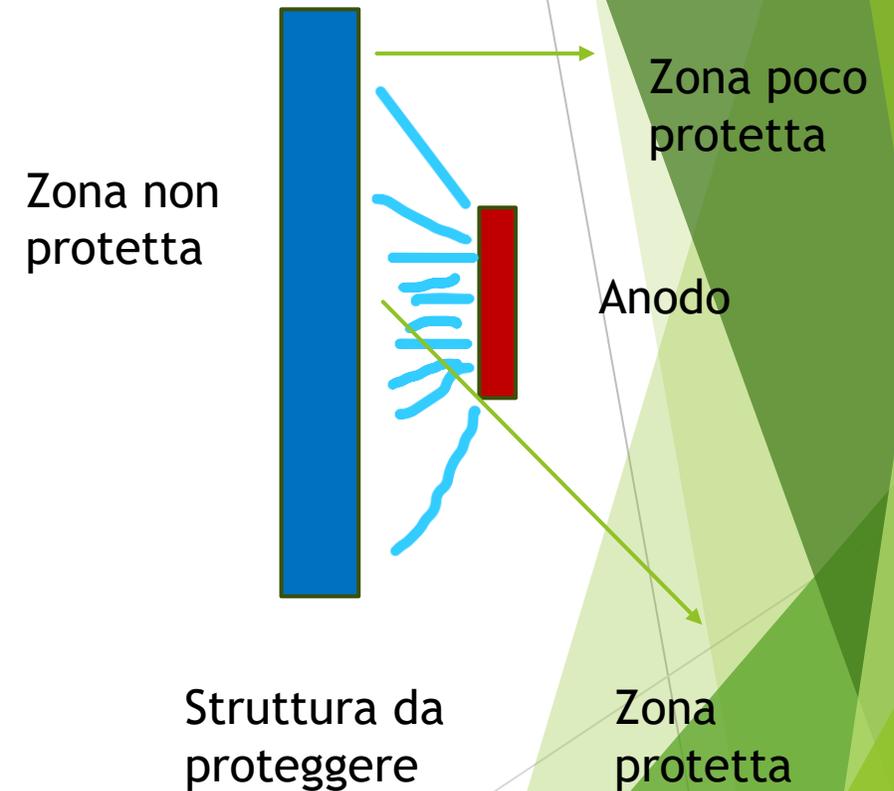
Nel sistema a correnti impresse la corrente di protezione è erogata da un generatore, gli anodi devono essere di materiale inerte e non corrodibile nell'ambiente in cui operano.

Ambiente	Densità di corrente di protezione (mA/m <sup>2</sup> )
<b>Metallo nudo</b>	
Terreno neutro aerato	20 - 30
Terreno bagnato	5 - 20
Terreno (tubazioni calde)	30 - 60
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 - 1000
Ambienti chimici (acidi)	50 - 1.500
<b>Metallo rivestito</b>	
Terreno	0,01 - 1
Acqua di mare	0,1 - 10



## PROTEZIONE CATODICA

Un aspetto molto importante nella protezione catodica è il numero di anodi da utilizzare, nella prima figura un singolo anodo non è in grado di proteggere tutta la struttura, anodi e struttura devono 'affacciarsi' in modo corretto dal punto di vista geometrico in modo da avere una distribuzione quanto più uniforme possibile della corrente di protezione. Dove le linee di corrente si addensano la densità di corrente è alta e la struttura è protetta. In altre zone la densità di corrente può essere troppo bassa e la struttura risulta poco o addirittura non protetta.



# GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Testi di riferimento:

Pietro Pedferri, Corrosione e protezione dei materiali metallici, volumi 1 e 2, seconda edizione, Polipress 2010. ISBN 97888-7398-061-2

Associazione Italiana Zincatura, Zincatura a caldo a cura di Lello Pernice,  
[https://issuu.com/zincatura/docs/zincatura\\_a\\_caldo\\_2020\\_web\\_def?fr=sNzQxNjMwNTAxNTE](https://issuu.com/zincatura/docs/zincatura_a_caldo_2020_web_def?fr=sNzQxNjMwNTAxNTE)