

# Biochemical corrosion and conservation of the internal surface of ferrous pipes for water wells and pipelines

## *Corrosione biochimica e conservazione della superficie interna di tubazioni in materiale ferroso per pozzi e condotte per acqua*

Diego Marsetti, Renato Marsetti

**Riassunto:** Vengono esaminati i principali inconvenienti dovuti a corrosione, che si possono verificare nelle tubazioni in materiale ferroso di pozzi e di condotte, in funzione della composizione chimico-fisica e batteriologica delle acque in esse convogliate. I problemi relativi alla corrosione delle superfici interne delle tubazioni sono stati affrontati sia mediante studi teorici ed indagini di laboratorio, sia mediante verifiche di comportamento di tubazioni in opera. Viene suggerita una soluzione ottimale per la conservazione della superficie interna delle tubazioni. Si cerca di presentare un estratto delle esperienze degli Autori sulla corrosione da parte delle acque nei confronti dei materiali ferrosi di pozzi per acqua, ma anche delle reti di acquedotti ed impianti industriali, con accenno su origine ed attività dei principali microrganismi, quali i ferrobatteri e solfo batteri, responsabili di fenomeni di corrosione.

**Abstract:** *The main problems due to corrosion, which can occur in the ferrous material pipes of wells and conduits, are examined, depending on the chemical-physical and bacteriological composition of the water conveyed in them. The problems related to the corrosion of the internal surfaces of the pipes were addressed both through theoretical studies and laboratory investigations, and through checks on the behavior of pipelines in place. An optimal solution is presented for the preservation of the internal surface of the pipes, as well as an extract of the Authors' experiences on corrosion by water against ferrous materials of water wells, but also of aqueduct networks and industrial plants, with reference to the origin and activity of the main microorganisms, such as iron bacteria and sulphur bacteria, responsible for corrosion phenomena.*

**Keywords:** *corrosion, iron bacteria, sulphur bacteria, biochemistry, MR injection desulfurizer.*

**Parole chiave:** *corrosione, ferrobatteri, solfobatteri, biochimica, desolfatore ad iniezione MR.*

Diego Marsetti 

Renato Marsetti

Ecogeo srl, Via F.lli Calvi n° 2, 24122 Bergamo (Italy).

Tel + 39 035 271155

info@ecogeo.net, www.ecogeo.net

Ricevuto/Received: 23 November 2020-Accettato/Accepted: 14 December 2020

Publicato online/Published online: 30 December 2020

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2020

### Introduzione

Il problema dell'influenza dei fattori biologici, chimico e fisici, nella corrosione dei metalli, non è una novità per gli specialisti. Infatti, sulla corrosione biochimica, i primi lavori sui ferrobatteri apparvero più di un secolo fa ed i primi studi sui batteri solfato-riduttori risalgono all'inizio del secolo. La conoscenza della corrosione chimica e la sua protezione sono divenuti classici, mentre la conoscenza biochimica ed i mezzi di lotta non sono ancora del tutto risolti. Si rammenta che il mondo batterico, molto diverso dal mondo vegetale ed animale, partecipa ad ogni livello della biosfera ad intense attività biochimiche.

Questi insiemi microbici contenuti nell'ecosistema sono conosciuti nella scienza ecologica sotto il nome di "Microbiocenosi".

È quindi normale che ove sono presenti i metalli sia naturali che quelli trasformati con l'intervento umano, i batteri agiscono come lo farebbero su altri substrati. È comunque necessario dire che in natura, in un ecosistema, i processi biochimici si svolgono in modo diverso da quelli osservati in laboratorio.

Le proprietà geochimiche delle acque sotterranee dipendono, in linea generale, dalla loro storia idrogeologica di alimentazione: composizione chimica delle precipitazioni atmosferiche, acque di superficie, acque marine, acque irrigue, acque nivali, oltre che a reazioni chimiche e biologiche che avvengono nel sottosuolo (G. Chiesa 2002). Durante il deflusso sotterraneo l'acqua, considerata, un solvente universale per la sua abilità di dissolvere almeno in parte quasi tutte le sostanze con cui viene in contatto, scioglie le sostanze minerali contenute nel terreno e nelle rocce, in quantità dipendenti dalla natura chimica del terreno, alterando il chimismo dell'acqua per effetto di una moltitudine di processi geochimici. L'acqua intercettata dal pozzo, può risultare pertanto incrostante, corrosiva o addirittura indurre contemporaneamente sia corrosione che incrostazione. Le proprietà fisiche dell'acqua sotterranea variano soprattutto con la temperatura e tali variazioni possono influenzare il comportamento idrodinamico dell'acqua. In particolare la temperatura risulta essere un parametro importante in quanto ci dà informazioni sulla circolazione delle acque e sulla profondità degli acquiferi e ne controlla l'azione solvente e perciò anche le caratteristiche chimiche. I fattori idrogeochimici più importanti che influenzano la corrosione sono: il pH, la conducibilità, la temperatura, i solidi sospesi, l'alcalinità e l'acidità, la durezza totale, l'ossigeno e gli altri gas disciolti nell'acqua, la velocità dell'acqua, la porosità, la permeabilità e i batteri (Ralph C. 1987).

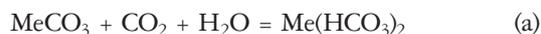
La relativa esperienza nel campo specifico, in particolare sulla corrosione biochimica da parte delle acque nei confronti dei materiali ferrosi, è stata acquisita in seguito a studi e indagini chimiche, fisiche e batteriologiche sull'acqua, con l'esecuzione di prove di laboratorio e pratiche, con l'installazione di impianti di neutralizzazione, di aerazione (acqua-aria) e di ossigenazione dell'acqua.

Le indicazioni sulle varie soluzioni di trattamento dell'acqua di autoprotezione della superficie interna dei tubi potranno essere utilizzate dai progettisti e dagli Enti preposti alla conduzione degli acquedotti e pozzi per acque, in modo che, consentendo un'adeguata conservazione della superficie interna stessa, venga assicurato un regolare funzionamento dell'impianto: ciò, naturalmente, nei casi in cui i provvedimenti citati sono necessari, anche per le acque potabili che, sempre più soggette a miscele tra diversi pozzi o sorgenti, possono condurre ad alterazioni significative della superficie interna delle tubazioni in acciaio di convogliamento.

### Prevenzione dalla corrosione

Lo studio teorico della prevenzione dalla corrosione da acque aggressive naturali, nei confronti dei materiali costituenti le condotte di convogliamento, viene eseguito previa conoscenza della costituzione chimico-fisico-batteriologica delle acque stesse. La natura e la quantità delle sostanze e dei composti presenti in un'acqua sono infatti molto varie e strettamente collegate agli ambienti attraversati durante il ciclo dell'acqua in natura. A seguito del raffreddamento di masse d'aria nell'atmosfera si ha condensazione di vapore, acqueo e precipitazione di acqua piovana satura dei gas disciolti dall'atmosfera medesima. Dopo aver raggiunto il suolo, l'acqua prende tre vie diverse e cioè una parte, evapora, una parte scorre in superficie (acque superficiali) e una parte s'infiltra nel sottosuolo (acque profonde), attraverso le discontinuità delle rocce e del suolo sino a raggiungere la zona satura, solubilizzando sali minerali vari. Uno dei gas principali che interessano dal punto di vista dell'aggressività di un'acqua è l'anidride carbonica.

La presenza di questo composto fa sì che l'acqua acquisti la proprietà di disciogliere le rocce calcaree e dolomitiche, con cui viene a contatto, secondo la reazione seguente:



Me = Ca, Mg

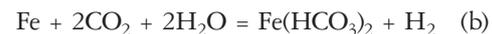
Con detta reazione si formano i bicarbonati di calcio e di magnesio che costituiscono la durezza temporanea o carbonatica ovvero, nella maggior parte dei casi, la prevalente quantità dei sali che si riscontra comunemente nelle acque naturali. Oltre ai bicarbonati, le acque contengono anche altri sali di calcio e magnesio quali i cloruri, i solfati, i nitrati ecc. che costituiscono la durezza permanente o non carbonatica. La somma delle durezza temporanea e permanente dà la durezza totale. Altri sali e composti chimici entrano nella composizione delle acque, ma, dato il loro scarso interesse per l'argomento trattato, non vengono citati. Si segnala, in merito, che il contenuto in sali e composti chimici dipende da

vari fattori, quali la qualità dei terreni e delle rocce dilavate, l'intensità dei processi microbiologici che avvengono nel sottosuolo ecc.

Relativamente al contenuto di anidride carbonica in un'acqua si debbono considerare tre casi

### **Acque con anidride carbonica in eccesso rispetto ai bicarbonati**

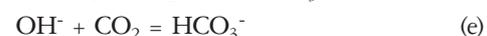
È questo il caso che si riscontra generalmente nelle acque di sorgente che contengono un liquido quantitativo di sali disciolti (acque dolci). L'anidride carbonica assorbita dall'atmosfera non ha avuto modo di disciogliersi dal terreno l'adeguato quantitativo di carbonato e pertanto l'equilibrio della reazione (a) riportata sopra sarà spostato verso destra e cioè mancherà nell'acqua la parte calcarea o dolomitica. L'anidride carbonica in eccesso o anidride carbonica aggressiva esplicherà azione corrosiva nei confronti dell'acciaio delle condotte (la stessa azione viene svolta sulla ghisa e sul cemento) in quanto questi tipi di acque hanno la tendenza a neutralizzarsi e raggiungere l'equilibrio calce-anidride carbonica; le reazioni di corrosione che avvengono possono essere riassunte come segue:



con la reazione (b) si ha dapprima formazione di bicarbonato ferroso che, per ossidazione da parte dell'ossigeno contenuto nell'acqua, viene trasformato con la reazione (c) in idrossido ferrico, composto facilmente riconoscibile per il suo caratteristico colore ocraceo (ruggine).

### **Acque con anidride carbonica in equilibrio con i bicarbonati**

Questo caso si riscontra generalmente nelle acque di pozzo che contengono un determinato quantitativo di sali disciolti (acque dure) ed è il più frequente in natura. L'anidride carbonica, sia la parte assorbita dall'atmosfera che quella eventualmente formatasi nel terreno a seguito di trasformazioni microbiologiche, ha avuto modo di disciogliersi il quantitativo di calcare necessario per raggiungere l'equilibrio. L'acqua non esplicherà azione aggressiva nei confronti dei materiali di origine ferrosa delle tubazioni, perché si avrà la formazione di uno strato protettivo di colore giallo chiaro, aderente, compatto, non poroso, costituito da, calcare frammisto ad ossido ferrico (ruggine) che isolerà la tubazione stessa dal fluido convogliato; le reazioni che comportano la formazione dello strato protettivo citato possono essere riassunte come segue:



con la reazione di ossidazione (d) si ottiene dapprima idrossido ferrico insolubile (ruggine) ed una certa alcalinità (ioni OH<sup>-</sup>) che porta poi alla formazione di bicarbonati con la reazione (e); con quest'ultima reazione viene sottratta dalla reazione (a), relativa all'equilibrio calce-anidride carbonica, una parte dell'anidride carbonica equilibrante con conseguente precipitazione di carbonato.

### **Acque con anidride carbonica in difetto rispetto ai bicarbonati**

Come il precedente, anche questo caso, pur essendo poco frequente, si riscontra generalmente nelle acque dure. L'equilibrio della reazione (a) sarà spostato verso sinistra, ossia si avrà tendenza alla decomposizione dei bicarbonati, con formazione all'interno della condotta di uno strato solido costituito generalmente da calcare.

Questi tipi di acqua, quando detta tendenza all'incrostazione non sia eccessiva e non s'incorra nell'inconveniente dell'intasamento delle condotte, presentano comunque, almeno in linea di massima, lo svantaggio della precipitazione di carbonati di natura friabile e fioccosa, tale da non poter permettere il formarsi di uno strato aderente e compatto e non poroso sulla parete della condotta e quindi il suo isolamento dal fluido convogliato.

Dei tre casi illustrati quello che si deve cercare di raggiungere, quando l'acqua necessita di condizionamento, è ovviamente quello delle acque con anidride carbonica in equilibrio con i bicarbonati. A questo riguardo si fa rilevare che, affinché si formi un deposito calcareo aderente e compatto, è necessario, come d'altra parte risulta dalla reazione (d), che l'acqua contenga un adeguato quantitativo in ossigeno. Studi eseguiti a tale riguardo avrebbero confermato che tale quantitativo di ossigeno dovrebbe essere non inferiore all'80% rispetto alla sua saturazione. D'altra parte la insufficienza del tenore in ossigeno è legata sovente ad ambiente asfittico e quindi riducente con formazione, in certi casi, di idrogeno solforato, uno dei composti più corrosivi per i materiali di origine ferrosa.

### **Acque aggressive da anidride carbonica**

Il condizionamento di un'acqua aggressiva per anidride carbonica non costituisce un problema difficile. Si può intervenire con metodi passivi e attivi. Nel caso di infrastrutture acquedottistiche di medie e piccole dimensioni, cioè con portata limitata d'acqua, è da preferire il metodo della filtrazione utilizzando litologie di tipo dolomitico-calcareo. Tale sistema consente infatti di realizzare una soluzione soddisfacente sia dal punto di vista tecnico che da quello economico.

Per i grandi acquedotti con portata d'acqua elevata non è conveniente ricorrere alla filtrazione dolomitico-calcareo, in quanto per garantire il necessario tempo di contatto acqua-calcare si deve installare un filtro di dimensioni inaccettabili. Nel campo dei metodi attivi si può usufruire in questi casi di reattivi neutralizzanti come per esempio l'idrato di calcio, di inibitori del tipo dei polifosfati ecc., da aggiungere all'acqua tramite adeguati dosatori.

La filtrazione dolomitico-calcareo è un metodo sicuro, dal punto di vista tecnico, in quanto riproduce la stessa reazione di solubilizzazione del calcare, da parte dell'anidride carbonica dell'acqua, che avviene nel terreno naturalmente.

### **Acque scarsamente aerate**

L'influenza dell'ossigeno sulla neutralizzazione dell'aggressività di acqua scarsamente aerata è stata sperimentata in pratica con esito positivo. Ad esempio su un sistema acquedottistico in provincia di Cuneo, soggetto a corrosioni passanti, le corrosioni sono scomparse dopo l'installazione di un adeguato impianto di aerazione. In un altro sistema in provincia di Asti convogliante acqua dura, scarsamente aerata e con un contenuto in ferro relativamente elevato, il trattamento di aerazione e di filtrazione su sabbia silicea ha comportato la dissoluzione nell'acqua di ossigeno nel quantitativo previsto e la deferrizzazione; inoltre si è riscontrata la formazione di depositi calcarei, aderenti, compatti non porosi all'interno delle tubazioni che preservano la tubazione dalla corrosione impedendo il contatto acqua-superficie metallica.

### **Acque con aggressività biochimica**

La corrosione di natura biochimica (Leefflang 1969) è dovuta, secondo alcuni autori, a vari gruppi di forme biologiche quali i batteri in grado di ossidare l'idrogeno, i ferrobatteri e i solfobatteri. Il ruolo dei batteri ossidanti l'idrogeno è di permettere un primo deposito di uno strato di ruggine sulla parete del tubo (Marsetti R, Romagnoli R 1989). A causa dell'attività dei ferrobatteri questo strato diviene sempre più spesso per il deposito successivo di ferrobatteri filamentosi e di altre sostanze insolubili quali carbonato di calcio, ossidi di ferro e di manganese, sostanze gelatinose ecc. Questo processo provoca la formazione di tubercoli nella cavità dei quali, divenuta anaerobica, può svilupparsi liberamente l'azione depolarizzante dei solfobatteri. In definitiva il processo, essendo impedita la diffusione di ossigeno attraverso la superficie del tubercolo, provoca l'originarsi di fenomeni di aerazione differenziale che conducono a volte a forme estremamente dannose di corrosioni del tipo crateriforme. Le sostanze citate (ruggine, ferrobatteri ecc.) possono creare anche altri inconvenienti nell'esercizio di una condotta per i fenomeni di arrossamento e di ingiallimento che possono provocare nell'acqua convogliata. Tali sostanze, invero, depositandosi lungo la tubazione e magari in punti preferenziali di questa, in relazione anche a certi fattori ambientali quali la temperatura, la pressione, la velocità dell'acqua ecc., possono essere asportate meccanicamente dalla vena liquida fluente all'atto dell'erogazione dell'acqua.

### **Ferrobatteri**

I ferrobatteri (batteri fissatori del ferro) sono un gruppo di microrganismi aerobi che ottengono carbonio dal biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) e ricavano l'energia per il proprio metabolismo dall'ossidazione, per via enzimatica, del ferro dallo stato ferroso (Fe<sup>2+</sup>) a quello allo stato ferrico (Fe<sup>3+</sup>). L'origine dei ferrobatteri è certamente da ricercare nei terreni con adatte condizioni biologiche. Un fatto da segnalare è che il loro sviluppo sembra obbedire ad un ciclo di vegetazione dipendente dalle stagioni e da certi fattori meteorologici.

Avviene che l'acqua asporta meccanicamente piccole quantità d'argilla ocrea e curiosamente rimane sempre liquida. All'inizio del loro percorso nelle tubazioni, i ferrobatteri si depositano, producono una bioviscosità e finiscono per estendere questa mucillagine su tutto il tracciato. I ferrobatteri sono preferibilmente presenti nei pozzi ove la velocità dell'acqua è elevata; il gruppo di pompaggio, le tubazioni di mandata e in particolare la zona dei filtri sono ambienti che favoriscono il loro proliferarsi (Fig. 1).

I batteri ferruginosi sono tipiche forme filamentose, aerobiche, autotrofe; la loro caratteristica comune è data dall'essere costituiti da un insieme di microrganismi unicellulari, bacilli, cocchi, spirilli che si sviluppano

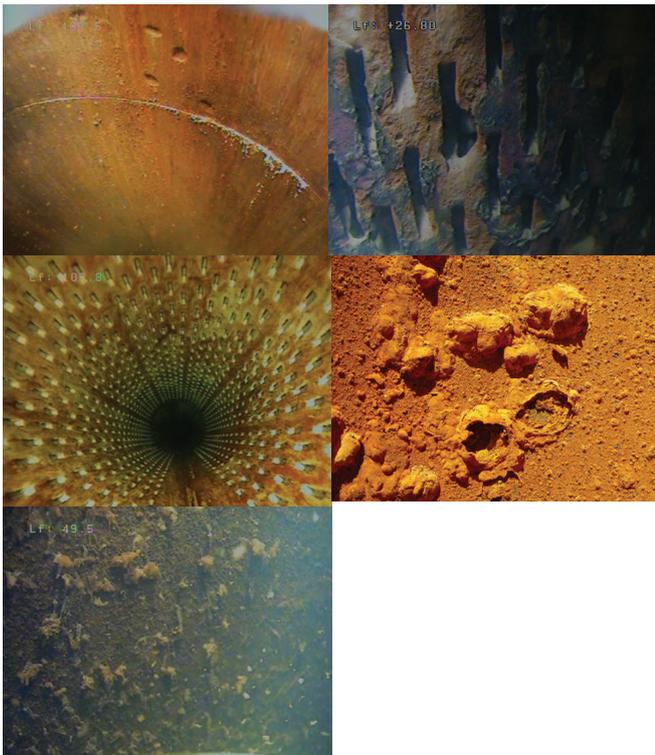


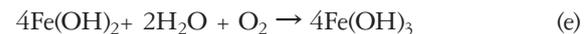
Fig. 1 - Presenza di ferrobatteri (tuberculizzazioni di corrosione) nei pozzi.

Fig. 1 - Presence of iron bacteria (corrosion tuberculation) and sulphur-bacteria (white mucilage) in wells.

gradualmente fino a formare filamenti piatti o tubolari, oppure raggruppamenti incapsulati da sostanza *zooglycea*. Altra caratteristica comune è data dalla colorazione bruno-ruggine, dovuto alla presenza di ossido-ferrico idrato. Tali batteri, oltre che formare depositi, possono esplicare anche un'azione distruttiva nei confronti dei prodotti tubolari ferrosi, nel senso che possono generare tuberculizzazioni e perforazioni delle stesse (Mettenheimer 1956).

Il meccanismo di corrosione è il seguente: (Fig. 2) quando si è formato un piccolo tenore di sale ferroso per attacco anodico, probabilmente nello stesso punto dove la concentrazione di ossigeno è bassa, i ferrobatteri trasformano i sali ferrosi in idrossido di ferro ed utilizzano l'energia prodotta per il loro metabolismo. Quanto più questo materiale proteggerà la superficie dall'ossigeno tanto più l'attacco diventerà vigoroso per la formazione di celle d'aerazione differenziate.

Questi batteri accelerano la reazione che avviene naturalmente tra ossigeno e ioni ferrosi presenti nell'acqua, o sulla superficie delle tubazioni metalliche, catturando l'energia rilasciata dal processo di ossidazione e utilizzandola per il proprio metabolismo:



Di seguito si descrive la struttura e riproduzione classica di due generi di batteri di ferro.

#### Gallionella

La sua morfologia è classica, si presenta sotto forma di nastro da  $0.5 \div 2 \mu\text{m}$  di larghezza e di lunghezza variabile fino a  $200 \mu\text{m}$ . Il nastro è formato da una sostanza mucillaginosa che fissa l'ossido di ferro. La Gallionella (Migula 1897) è sempre accompagnata da cocchi, quest'ultimi si uniscono due a due per formare una capsula; queste capsule si dispongono in fila: è la metamorfosi della Gallionella che infine si presenta come un nastro piatto attorcigliato dando la vegetazione classica (Fig. 3). L'attorcigliamento del nastro sarebbe dovuto, secondo Ellis, ad una irritabilità per contatto da corpuscoli o microrganismi. Non solo si possono osservare singoli nastri più o meno attorcigliati, ma si possono anche riscontrare delle vere e proprie trecce composte da due o più nastri avvolti gli uni con gli altri.

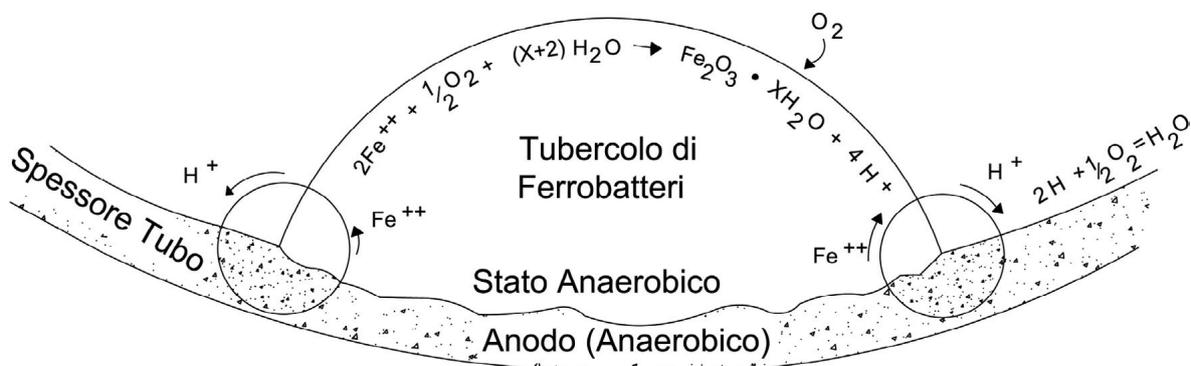


Fig. 2 - Schema diagrammatico mostrante il meccanismo di corrosione da parte dei ferrobatteri (Bogtstra 1961). Ridisegnato Marsetti M. (2020).

Fig. 2 - Diagrammatic outline showing the mechanism of corrosion by iron bacteria (Bogtstra 1961). Redrawn by Marsetti M. (2020).

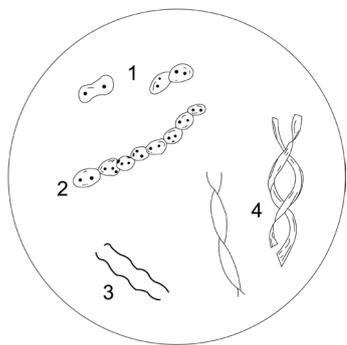


Fig. 3 - Evoluzione Gallionella: 1 - monocapsule o appaiate; 2 - le capsule costituite da cocchi si dispongono in fila; 3 - le capsule si saldano e le pareti terminali scompaiono; 4 - le cellule continuano ad allungarsi fino a formare un nastro piatto attorcigliato.

Fig. 3 - *Gallionella* evolution: 1 - Single-capsule or paired; 2 - Coccus capsules line up; 3 - Capsules weld together and terminal partitions disappear; 4 - Cells continue to stretch until they form a flat twisted ribbon.

### Leptothrix

Gallionella e Leptothrix (Ellis 1913) sono le forme più spesso riscontrate in natura. Leptothrix è costituita da un lungo filamento tubolare con spessore da  $3 \div 5 \mu\text{m}$  di lunghezza molto variabile e fino a  $600 \mu\text{m}$  e più; è delimitato da una fine membrana, nelle condizioni sfavorevoli la membrana resta sottile, in ambiente più ricco ed in adeguata presenza di ferro la stessa diventa più grossa e fissa l'ocra per formare una guaina intorno all'organismo. A temperatura relativamente elevata Leptothrix diventa estremamente mobile e si sposta velocemente. Quando Leptothrix si riproduce, avviene che le cellule figlie, bacilli, non si staccano e formano un treno di 4 - 5 - 8 cellule; possono restare così vicine perché le secrezioni mucillaginose, inglobando le cellule finiscono per saldarle insieme. Avviene anche che i giunti delle cellule spariscono e si formi allora un tubo interno inglobato da una guaina mucillaginosa di uguale dimensione. In questo caso i movimenti sono più lenti, interessando tutto il filamento che finisce generalmente per immobilizzarsi: è in questo momento che la precipitazione d'ocra è più intensa e costituisce l'aspetto più frequente di Leptothrix (Fig. 4).

Anche per la Leptothrix è certo che è l'affiancamento di una fila di cellule che dà finalmente la vegetazione classica.

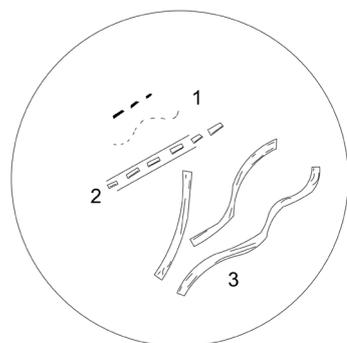


Fig. 4 - Evoluzione Leptothrix: 1 - cellule che si dividono in lunghezza; 2 - cellule uscenti dalla guaina; 3 - filamenti tubolari classici.

Fig. 4 - *Leptothrix* evolution: 1 - Cells divide in length; 2 - Cells come out from the sheath; 3 - Classical tubular fibre. 4 - Cells continue to stretch until they form a flat twisted ribbon.

### Classificazione dei ferrobatteri

La classificazione di riferimento per i ferrobatteri rimane forse ancora quella di Dorff P. (1934); detta classificazione non abbraccia solamente i batteri ferruginosi propriamente detti, ma anche tutti gli organismi ferruginosi che non disdegnano la presenza del ferro solubile o insolubile. In essa sono comunque presi in considerazione tutti gli organismi che precipitano il ferro, ed è una classificazione basata solamente sui caratteri morfologici.

**I. HAPLOBATTERI:** cellule isolate od in gruppo, senza guaina, senza forme filamentose.

a. COCCACEE: cellule rotonde a forma di cocco circondate da mucillagine contenente ferro = *Siderocapsa* (Redinger 1931)

*Polysiderocapsa* (diverse cellule nella mucillagine)

- *Coronata Plankton*: diametro della cellula  $1 \mu\text{m}$

- *Major Neuston*: foglie di piante acquatiche:  $0.7 \div 1.8 \mu\text{m}$

- *Treibii*: foglie di piante acquatiche:  $0.4 \div 0.6 \mu\text{m}$

*Monosianocapsa*

- *Monoica*: cellule senza mucillagine: precipitazione del ferro all'esterno della cellula = *Siderococcus*

◦ *Limoniticus*

◦ *Communis*

b. BACTERICEE: cellule a forma di bastoncino

*Ochrobium tectum*

*Bacillus manganicus*

*Sideroderma*

*Siderobacter*

*Naumantiella*

*Siderocystis*

c. SPIRILLACEE: cellule vere

*Gallionella*: ferruginea, minor, major, corneola

**II. TRILCHOBATTERI:** cellule in filamenti, più sovente con guaina, divise o meno

senza guaina: *Lieskeella*

*Sideromyces*

con guaina: *Mycobrix*

*Cladobrix*

*Sphaerobrix*

*Leptothrix* (*ochracea, discophora, epiphytica,*

*lopholea, major, pseudovaculata, sideroporus,*

*thermalis, trichogenes*)

*Crenobrix* (*polyspora, fusca, tenuis*)

**III. ACTINOMICETI:** cellule divise senza pareti trasversali

*Actinomyces* (*ferrugineus, verrucosus*)

Infine una quantità considerevole di organismi (Flagellati, Clorofillacei, Eumiceti, Licheni, Fanerogami) fissano facoltativamente il ferro. In difetto di questa classificazione, secondo Van Beneden, sarebbe quella di raggruppare una grande quantità di organismi diversi dai ferrobatteri in quanto il ferro non è indispensabile al loro metabolismo e sussistenza.

## Solfobatteri

Sono dei batteri ubichisti che si trovano nelle acque, nei fanghi e nei terreni, biotipi comunque contenenti frequentemente solfati. I solfobatteri sono per eccellenza causa di corrosione microbiologica; sono microrganismi sessili, facoltativamente autotrofi, anaerobi, con possibilità di svilupparsi anche in ambiente aerobico ma localmente anaerobico. I batteri solfato riduttori sono tra i più pericolosi nel campo della biocorrosione nei confronti dei materiali ferrosi convoglianti acqua. Relativamente alla partecipazione di questi microrganismi in un processo corrosivo sono state formulate tre ipotesi:

1. accelerazione della depolarizzazione dell'idrogeno catodico nella reazione di riduzione dei solfati a sulfuri;
2. produzione dell'enzima d'idrogenasi che catalizza l'ossidazione dell'idrogeno, stimolando, anche in questo caso, la depolarizzazione del catodo;
3. attacco dell'acciaio da parte dell'idrogeno solforato prodotto.

Nella Fig. 5 è illustrato un meccanismo di corrosione anaerobica. La parte essenziale di questo meccanismo lo postula l'attività d'idrogenasi che ammette l'utilizzazione del desulfovibrio di idrogeno elementare della parte catodica della cella di corrosione. L'azione dell'idrogenasi è quindi il riflesso di una catalisi biologica che permette all'idrogeno di ridurre i solfati. L'effetto finale è che l'ossigeno dei solfati è utilizzato per il processo catodico e la corrosione continua.

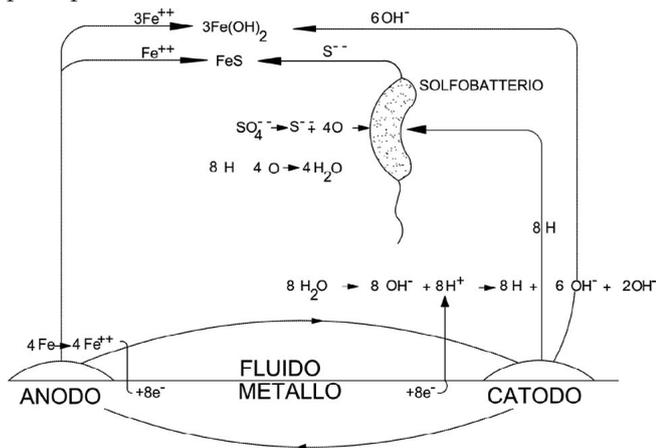


Fig. 5 - Schema diagrammatico mostrandone il meccanismo di corrosione da parte dei batteri solfato-riduttori (Olsen e Szybalski 1949). Ridisegnato Marsetti M (2020).

Fig. 5 - Diagrammatic outline showing the mechanism of corrosion by sulfate reducing bacteria (Olsen and Szybalski 1949). Redrawn by Marsetti M (2020).

La facoltà del "Desulfovibrio" a causare la corrosione in funzione dell'enzima d'idrogenasi, come precedentemente descritto, è ben accettata da molti autori, ma, secondo J.M. Sharpley, non dovrebbe essere considerata solamente la riduzione dei solfati, molti altri substrati possono essere il mezzo per la rimozione dell'idrogeno nei sistemi batteriologici. Per tale esigenza, ciascuno di questi substrati, prosegue l'autore, sono usati caratteristicamente dalle specie batteriche; sono conosciuti cinque sistemi in cui l'idrogenasi è presente

- *Clostridium acetivum*  
 $4H_2 + 2CO_2 \leftrightarrow CH_3COO + H_2O + H_3O^+ + \text{energia}$
- *Methanobacterium omelianskii*  
 $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + \text{energia}$
- *Micrococcus denitrificans*  
 $4H_2 + NO_3^- \rightarrow NH_3 + 2H_2O + OH^- + \text{energia}$
- *Hydrogenomonas facilis*  
 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{energia}$
- *Desulfovibrio desulfuricans*  
 $4H_2 + SO_4^{--} \rightarrow S^{--} + 4H_2O + \text{energia}$

Uno di questi meccanismi richiede ossigeno libero e soltanto specie aerobiche possono utilizzare questo meccanismo. La reazione illustrata con anidride carbonica può essere importante nella microbiologia del petrolio. Alcune specie di batteri, di solito aerobici in natura, sono spesso individuati in acque poverissime di ossigeno (< 0.2 mg/l). Queste acque contengono spesso anche anidride carbonica. Questi due fatti sono indubbiamente in correlazione. Un numero relativamente grande di microrganismi sono stati capacitati all'idrogenasi:

- *Desulfovibrio desulfuricans*
- *Proteus vulgaris*
- *Azobacter vinelandii*
- *Aerobacter aerogenes*
- *Aerobacter cloacae*
- *Micrococcus denitrificans*
- *Micrococcus phosphoreus*
- *Escherichia coli*
- *Clostridium acetivum*
- *Clostridium sporogenes*
- *Clostridium welchii*
- *Hydrogenomonas facilis*
- *Methanobacterium omelianskii*

## Esempio di corrosione biochimica manifestatasi sulla superficie interna di condotte in materiale ferroso di acquedotti e pozzi

### Esami e misurazioni

Per studiare le cause del fenomeno di corrosione della superficie interna delle tubazioni convoglianti l'acqua, si è proceduto ad eseguire quanto segue:

- misure ed indagini sul posto;
- prelievo dei depositi di mucillagine per il riconoscimento allo stereo microscopio in modalità multifocus;
- osservazione della superficie interna degli spezzoni di tubi prima e dopo decapaggio;
- analisi chimica percentuale, micrografica e corographometrica su spezzoni di tubo corrosivo per la rispondenza del materiale e caratterizzazione della corrosione;
- esame delle caratteristiche chimico-fisiche, microbiologiche e biochimiche effettuate sia sul posto che in laboratorio

### Osservazione della superficie interna dello spezzone di tubo

È stata effettuata un'indagine sulla superficie interna di uno spezzone di tubo tal quale al prelievo e dopo decapaggio prelevato in un insediamento produttivo nella provincia di Bergamo (Fig. 6 e 7).



Fig. 6 - Aspetto della superficie interna, sezione longitudinale di tubo tal quale in acciaio al carbonio DN 48 mm. Si rilevano accentuate tubercolizzazioni sulla superficie interna formate da prodotti di corrosione. Le abbondanti incrostazioni sono prevalentemente depositate sulla generatrice inferiore del tubo ove è avvenuta la corrosione passante.

Fig. 6 - Inner surface appearance, longitudinal section of the pipe as it is, carbon steel DN 48 mm. There are marked tuberculations on the inner surface formed by corrosion products. The abundant encrustations are mainly deposited on the lower generatrix of the tube, where the passing corrosion occurred.

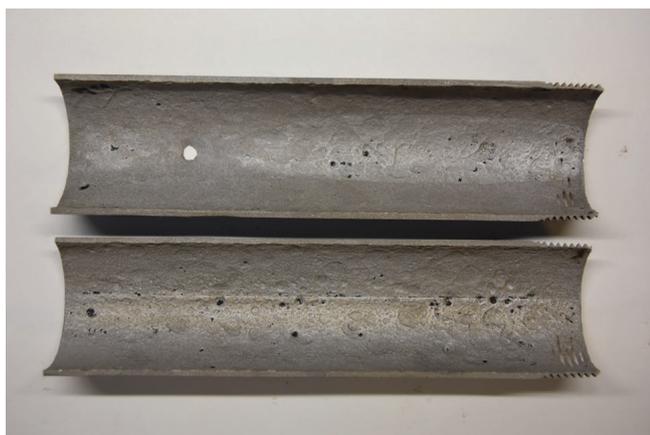


Fig. 7 - Aspetto della stessa superficie interna dopo decapaggio. Sotto i tubercoli sono evidenti i crateri di corrosione mostrante perforazioni di forma tronco-conica svasate verso l'interno.

Fig. 7 - Appearance of the same internal surface after pickling. Corrosion craters are evident under the tubercles, showing truncated-conical perforations opened inwards.

Si possono rilevare accentuate tubercolizzazioni sulla superficie formate da prodotti di corrosione dell'acciaio. L'osservazione dello stesso spezzone, dopo decapaggio, mette in evidenza la morfologia del fenomeno corrosivo che ha interessato la superficie interna del tubo. Infatti sotto i tubercoli sono evidenti i crateri di corrosione, in certe posizioni anche passanti. Questo esame indica chiaramente che è in atto un processo di corrosione dovuto alle caratteristiche dell'acqua convogliata con produzione di precipitato costituito

prevalentemente da ossido ferrico (prodotti della corrosione, Tab. 1).

Tab. 1 - Caratteristiche chimiche-percentuali dei depositi rilevati sulla superficie interna dello spezzone di tubo in acciaio al carbonio DN 48 mm.

Tab. 1 - Percentage chemical characteristics of the deposits detected on the inner surface of the carbon steel DN 48 mm pipeline.

DETERMINAZIONI	RISULTATI %
Silice (SiO <sub>2</sub> )	< 0.1
Ossido di ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	99.2
Ossido di calcio (CaO)	0.7
Ossido di magnesio (MgO)	0.1

### Requisiti per le acque ai fini anticorrosivi delle tubazioni in materiale ferroso

La letteratura (Van Beneden G., 1951; CEOCOR, 1976) e l'esperienza pratica (salvo che per i bollitori e per i generatori di vapore) indicano che, per prevenire eventuali fenomeni di corrosione nel coinvolgimento di acque con tubazioni in materiale ferroso è necessario che l'acqua possieda caratteristiche tali da depositare sulla tubazione stessa un leggero strato di carbonato di calcio protettivo frammisto ad ossido ferrico, compatto, aderente, non poroso e meccanicamente resistente.

I termini per creare le condizioni idonee per la formazione del suddetto strato, che risulterebbe praticamente un autorivestimento, è necessario che l'acqua possieda almeno le seguenti caratteristiche:

- sia il titolo calcico che alcalimetrico devono essere ciascuno a 100 mg/I affinché il carbonato di calcio possa depositarsi in quantità sufficiente;
- è essenziale, per la resistenza meccanica e l'aderenza del precipitato, che lo stesso sia calco-ferrico e cioè che sia presente un quantitativo di ossigeno, tenuto conto delle velocità pratiche di deflusso dell'acqua, di 7 ÷ 8 mg/I e che raggiunga almeno 80% della sua saturazione;
- il quantitativo di ioni di cloro (Cl<sup>-</sup>) e solforici (SO<sub>4</sub><sup>--</sup>) devono essere inferiori rispettivamente a 100 e 150 mg/I, altrimenti il precipitato calcareo rischierà di essere friabile;
- il quantitativo di ferro e manganese deve essere inferiore rispettivamente a circa 0.2 mg/I e 0.1 mg/I per non incorrere nel rischio di depositi incoerenti sulle pareti delle condotte, creando la possibilità di corrosione per fenomeni di aerazione differenziale;
- assenza di anidride carbonica aggressiva (o anidride carbonica in eccesso all'equilibrio calce anidride carbonica) in quanto ha una diretta azione di attacco sulle tubazioni;
- assenza di idrogeno solforato, è uno dei composti più corrosivi, è sufficiente la sua presenza in quantità anche minima per provocare fenomeni di corrosione;
- assenza di interazione biologica (ferrobatteri e solfobatteri) per non incorrere nel rischio di corrosioni di origine biochimica.

L'acqua non deve comunque essere troppo incrostante altrimenti, con una velocità di precipitazione troppo rapida, si avrà un precipitato inconsistente; la prova di trattamento in laboratorio con carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) indicherà questo requisito.

### Controllo delle caratteristiche dell'acqua convogliata a scopo anticorrosivo

#### Analisi chimico/fisiche e biochimiche

Dai risultati dell'analisi delle acque prelevate direttamente sulla testata del pozzo (Tab. 2) si può dedurre che trattasi di acqua molto dura, leggermente alcalina, con durezza prevalentemente carbonatica, e con leggera tendenza alla deposizione di strati calcarei (diminuzione della durezza e dell'alcalinità dopo trattamento dell'acqua in laboratorio con carbonato di calcio). Ci sono però degli elementi quali carenza di ossigeno, alto tenore di ferro, cloruri, idrogeno solforato ( $\text{H}_2\text{S}$ ), presenza di ferrobatteri e solfobatteri, che impartiscono all'acqua un carattere di corrosività.

Come precedentemente precisato è essenziale, per la resistenza meccanica e l'aderenza del precipitato, che lo stesso sia calco-ferrico e cioè che sia presente un quantitativo di ossigeno, tenuto conto delle velocità pratiche di deflusso dell'acqua, di  $7 \div 8$  mg/I e che raggiunga almeno il 80% della sua saturazione. In queste condizioni si avrebbe la formazione con l'acqua del tipo in esame di un deposito misto calcareo - idrossido ferrico aderente, compatto, non poroso meccanicamente resistente che assicurerebbe l'isolamento del fluido convogliato dal tubo e quindi l'assenza di fenomeni corrosivi. Il valore indicato nella tabella analitica, è tutt'altro che rispettato, nel nostro caso, poiché il quantitativo di ossigeno disciolto è di 6.10 mg/I corrispondente a una saturazione di 66.5 % con la conseguenza di avere un deposito calcareo friabile e non aderente a causa della presenza sulla parete del tubo di ossido ferroso solubile anziché di idrossido ferrico.

L'idrogeno solforato è uno dei composti più corrosivi dei tubi in materiale ferroso. Infatti la pellicola protettiva di solfuro ferroso, che si forma a seguito della reazione di corrosione, può essere rotta o asportata dal fluido convogliato, liberando così nuove aree metalliche che divengono anodiche rispetto alle aree circostanti, mantenendo nel tempo il continuo e severo attacco corrosivo. L'idrogeno solforato è stato riscontrato nell'acqua nella misura di 0.818 mg/I. Il quantitativo di ferro deve essere inferiore a 0.2 mg/I per non incorrere nel rischio di depositi sulle pareti delle condotte, creando la possibilità di corrosione di fenomeni di aerazione differenziata: il tenore di ferro nell'acqua in esame risulta essere elevato pari a 446.7 mg/I. Infine si nota anche una significativa quantità di cromo (118,6  $\mu\text{g/L}$ ) e di nichel (66,9  $\mu\text{g/L}$ ) probabilmente derivante dalla corrosione dei materiali in acciaio austenitico utilizzati per la costruzione del pozzo.

#### Analisi batteriologiche

La corrosione di natura elettrochimica può essere integrata da quella di natura biochimica e cioè provocata da varie forme biologiche, come precedentemente descritto, quali i batteri in grado di ossidare l'idrogeno (ferrobatteri e solfobatteri). Sui campioni d'acqua e di mucillagine prelevati è stata condotta la ricerca dei ferrobatteri e solfobatteri, si è riscontrata la presenza di *Gallionella ferruginea* (Fig. 8), *Leptothrix ochracea* (Fig. 9), *Siderocapsa treubii* (Fig. 10) e del *Sporovibrio desulfuricans* (Fig. 10). Questi batteri, simili alle alghe, sono tipiche forme vegetali acquatiche. La loro caratteristica comune è data dall'essere costituiti da un insieme di microrganismi unicellulari, i cocci (*Gallionella*) e i bacilli (*Leptothrix ochracea*), che si sviluppano gradualmente fino a formare un nastro più o meno piegato con lunghezza di circa 200 $\mu$  (*Gallionella*) oppure un filamento tubolare con lunghezza di circa 600 $\mu$  (*Leptothrix ochracea*); le due ultime configurazioni rappresentano i tipi di vegetazione classica

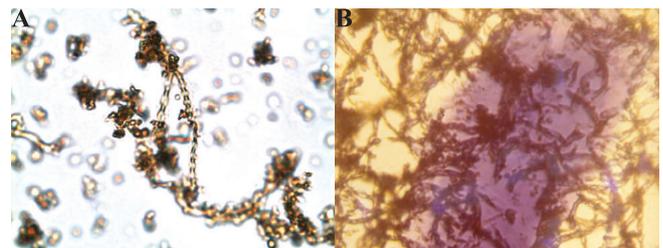


Fig. 8 - ( $\times 1100$ ) Nastri *Gallionella ferruginea* piatti attorcigliati di ferrobatteri incrostanti da idrato ferrico (A). *Gallionella major* con colorazione per riconoscimento microscopico (B).

Fig. 8 - ( $\times 1100$ ) *Iron-bacteria Gallionella ferruginea* flat twisted ribbons encrusted by ferric hydrate (A). *Gallionella major* colorized for microscopic identification (B).

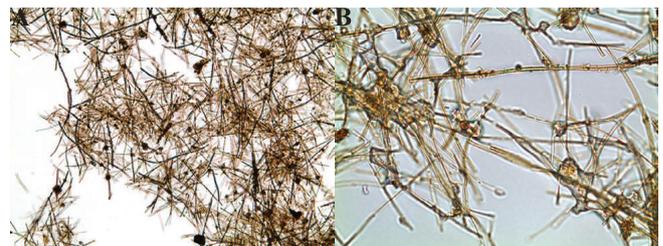


Fig. 9 - ( $\times 200$ A,  $\times 1000$ B) Filamenti tubolari di ferrobatteri, *Leptothrix ochracea*.

Fig. 9 - ( $\times 200$ A,  $\times 1000$ B) *Iron-bacteria tubular fibre, Leptothrix ochracea*.

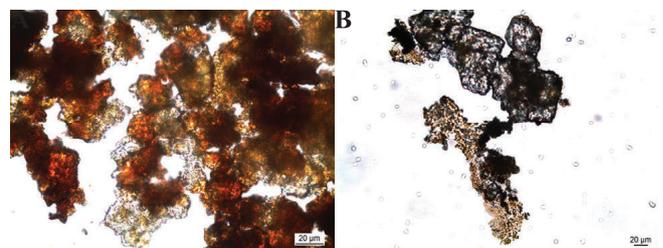


Fig. 10 - ( $\times 400$ A,  $\times 200$ B) Colonie multiple di ferrobatteri circondate da idrato ferrico, *Siderocapsa treubii*

Fig. 10 - ( $\times 400$ A,  $\times 200$ B) *Iron-bacteria multiple colonies surrounded by ferric hydrate, Siderocapsa treubii*.

Tab. 2 pagina a fianco - Caratteristiche chimico-fisiche e biochimiche, per lo studio della protezione dalla corrosione, di campione d'acqua prelevato dal pozzo realizzato in acciaio austenitico AISI 316/L.

Tab. 2 next page - Chemical-physical and biochemical characteristics for the study in corrosion protection, of a water sample taken from the well realized in austenitic steel AISI 316/L.

DETERMINAZIONI	U.M.	RISULTATI	METODICHE
<b>CARATTERISTICHE FISICHE</b>			
Temperatura al prelievo	°C	16.1	APAT CNR IRSA 2100 Man 29 2003
pH	Unità pH	7.98	APAT CNR IRSA 2060 Man 29 2003
Resistività	$\Omega \cdot \text{cm}$	758.7	APAT CNR IRSA 2030 Man 29 2003
Conducibilità elettrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1318	APAT CNR IRSA 2030 Man 29 2003
<b>CARATTERISTICHE CHIMICHE</b>			
Durezza totale	°F	23.8	APAT CNR IRSA 2040 B Man 29 2003
Alcalinità al metilarancio (m.o.)	mg/l	310	APAT CNR IRSA 2010 B Man 29 2003
Ossigeno	mg/l	6.10	APHA Std Methods ed 23 <sup>rd</sup> 2017
Saturazione in ossigeno	%	66.5	APHA Std Methods ed 23 <sup>rd</sup> 2017
Anidride carbonica aggressiva	mg/l	assente	MI 13 rev 0 2011
Solfuri (come H <sub>2</sub> S)	mg/l	0.818	ISO 10530:1992
Cloro attivo libero	mg/l	106.00	APAT CNR IRSA 4080 Man 29 2003
Cloruri (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	293.6	APAT CNR IRSA 4020 Man 29 2003
Solfati (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	mg/l	46.9	APAT CNR IRSA 4020 Man 29 2003
Ferro (Fe)	$\mu\text{g}/\text{l}$	446.7	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Manganese (Mn)	$\mu\text{g}/\text{l}$	185.2	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Rame (Cu)	$\mu\text{g}/\text{l}$	31.7	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Alluminio (Al)	$\mu\text{g}/\text{l}$	1943.3	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Arsenico (As)	$\mu\text{g}/\text{l}$	3.2	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Boro (B)	$\mu\text{g}/\text{l}$	18.1	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Bario (Ba)	$\mu\text{g}/\text{l}$	46.8	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Cadmio (Cd)	$\mu\text{g}/\text{l}$	< 4	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Cobalto (Co)	$\mu\text{g}/\text{l}$	< 4	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Cromo (Cr)	$\mu\text{g}/\text{l}$	118.6	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Nichel (Ni)	$\mu\text{g}/\text{l}$	66.9	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Piombo (Pb)	$\mu\text{g}/\text{l}$	4.3	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Antimonio (Sb)	$\mu\text{g}/\text{l}$	< 4	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Selenio (Se)	$\mu\text{g}/\text{l}$	< 4	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Silicio (Si)	$\mu\text{g}/\text{l}$	11.0	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Stagno (Sn)	$\mu\text{g}/\text{l}$	159.8	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Titanio (Ti)	$\mu\text{g}/\text{l}$	54.4	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Vanadio (V)	$\mu\text{g}/\text{l}$	5.1	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Zinco (Zn)	$\mu\text{g}/\text{l}$	107.6	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Calcio (Ca)	mg/l	115.9	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Magnesio (Mg)	mg/l	20.5	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
Sodio (Na)	mg/l	286.1	APAT CNR IRSA 3010 B + 3020 Man 29 2003
<b>BIOCHIMICA</b>			
Ricerca ferrobatteri in depositi acquosi		presenti	ASTM D932-20
Batteri solfato-riduttori in depositi acquosi		presenti	ASTM D4412-19
Ricerca ferrobatteri	UFC/100ml	1300	UNICHIM 1038/2:2002 Metodo B
Ricerca solfobatteri	UFC/100ml	40	UNICHIM 1038/2:2002 Metodo B
<b>EQUILIBRIO Calcio-Carbonico (TRATTAMENTO CaCO<sub>3</sub>)</b>			
Durezza totale	°F	24.4	APAT CNR IRSA 2040 B Man 29 2003
Alcalinità al metilarancio (m.o.)	mg/l	308	APAT CNR IRSA 2010 B Man 29 2003
pH	Unità pH	7.81	APAT CNR IRSA 2060 Man 29 2003

delle due specie di batteri. Altra caratteristica comune è data dalla presenza attorno al filamento di una guaina di diverso spessore, generalmente colorata in giallo ocra o bruno e da sostanza gelatinose impregnate di ferro e manganese.

In sintesi, il vistoso e grave fenomeno corrosivo riscontrato, è rappresentato dai tubercoli. L'ipotesi di sviluppo del loro meccanismo può essere inizialmente la formazione di uno strato di ruggine sulla superficie interna dei tubi per corrosione elettrochimica, stimolata dai batteri che ossidano l'idrogeno; inspessimento dello strato iniziale per l'attività dei batteri ferruginosi e rinforzo dello stesso con incrostazioni di filamenti di batteri e di altre sostanze insolubili quali calcare, silice, biossido di manganese, ecc.; infine eventuale sviluppo nella zona di contatto tubercolo-tubo, diventata anaerobica, di batteri solfato-riducenti con intensificazione del processo corrosivo iniziale e formazione di profonde corrosioni di tipo crateriforme anche passanti.

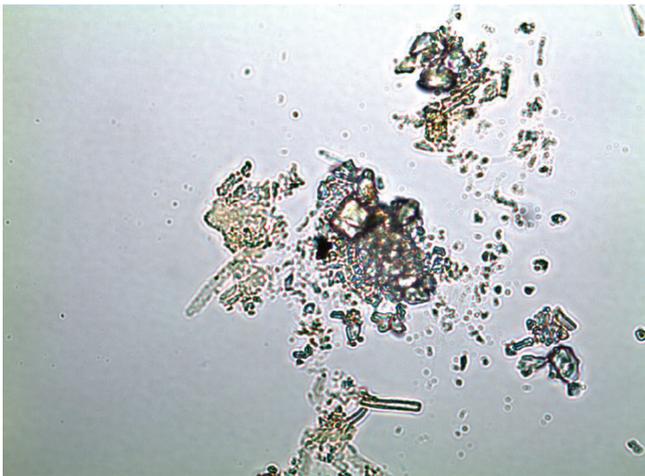


Fig. 11 - (x 1200) spirali di lunghe cellule ondulate e cellule curve di solfobatteri, *Sporovibrio desulfuricans*.

Fig. 11 - (x 1200) Sulfur-bacteria spirals of long wavy cells and curved cells, *Sporovibrio desulfuricans*.

## considerazioni conclusive

Da quanto esposto in precedenza risulta che l'acqua del pozzo è responsabile dei fenomeni di corrosione delle tubazioni in materiale ferroso, in quanto possiede uno scarso tenore in ossigeno, presenza di idrogeno solforato, di ferro, di cloruri, di ferrobatteri e solfobatteri; agenti questi fortemente corrosivi. Per togliere all'acqua il carattere di corrosività riscontrato, si è proceduto al trattamento di desolfurazione, ossigenazione, filtrazione e decontaminazione (Marsetti R 1965).

Di seguito breve descrizione della logica di funzionamento (Fig. 12).

L'acqua in arrivo dai pozzi viene convogliata, mediante un collettore, ai desolforatori dopo aver subito eventualmente una filtrazione. Indi cade a cascata nella prima vasca ove è collocato un ossigenatore sommerso con produzione di circa 2 Kg O<sub>2</sub>/ora; dalla vasca di ossigenazione l'acqua defluisce verso la vasca di reazione attraverso opportune feritoie sul fondo, ove avviene l'espulsione dell'H<sub>2</sub>S e, l'O<sub>2</sub> in eccesso con tutti gli elementi, entrano in equilibrio. Successivamente, per stramazzo, l'acqua arriva nella vasca di captazione ove viene prelevata tramite pompa per essere inviata a filtri speciali. Dopo la filtrazione l'acqua subisce una iniezione di prodotto sanitario formulato tramite misuratore elettromagnetico input, iniettore ed elettrodi di riferimento, visualizzato sul display analizzatore e dosato. Dopo la decontaminazione l'acqua subisce un determinato tempo di contatto in apposito reattore; infine viene inviata in rete.

## Descrizione del desolforatore aerativo ad iniezione

L'acqua arriva nel tubo convergente elicoidale con diametro del foro d'uscita molto più piccolo di quello del tubo di arrivo dell'acqua medesima (Figg. 13, 14) Il getto del liquido, a causa del sensibile aumento di velocità, subisce una depressione all'uscita del tubo convergente e l'ossigeno viene aspirato dall'aria atmosferica. Un supplemento di aria

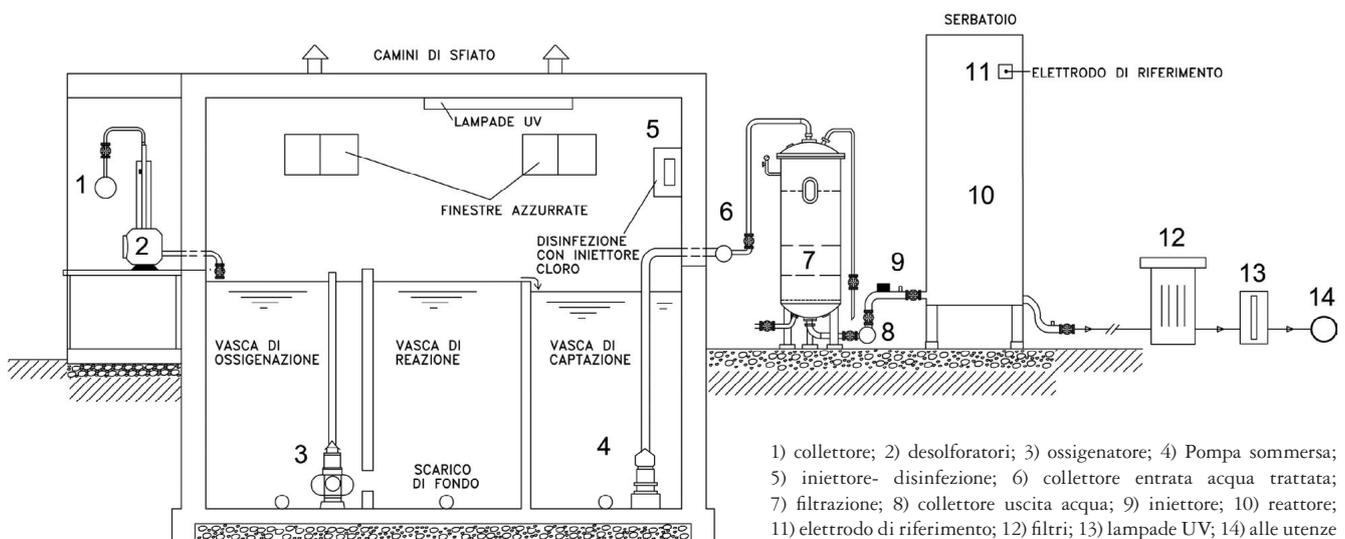


Fig. 12 - Schema tipo impianto anticorrosione (Marsetti D, Marsetti R 1992, Ecogeo, Bergamo).

Fig. 12 - Model diagram of anti-corrosion plant (Marsetti D, Marsetti R 1992, Ecogeo, Bergamo).

è aspirato dalle aperture del diffusore divergente. In tal modo si produce l'equilibrio componenziale degli elementi contenuti nell'acqua. La velocità del liquido viene in seguito diminuita nel miscelatore e nel diffusore. Il liquido passa poi nel tubo, esce dall'apertura e battendo sulle palette fa girare la turbina a grande velocità, ottenendo così una più intima miscelazione aria-acqua e quindi un'ulteriore dissoluzione dell'ossigeno nell'acqua. Inoltre il tasso di ossigeno disciolto viene ulteriormente elevato dalla sosta della miscela aria-acqua nell'ambiente in pressione della camera di nebulizzazione. Il concetto base di queste apparecchiature è l'utilizzo dell'azione emulsionante di un iniettore idraulico, potenziato dalla sovrapposizione provocata dall'aria non utilizzata dentro un'apposita camera di nebulizzazione, che rende possibile alle particelle liquide venire a contatto intimo con l'aria e che elimina eventuali gas presenti. Si tratta di un sistema aerativo (aeratore) ad iniezione per acqua comprendente: camera di nebulizzazione con tubi iniettori convergenti elicoidali con flangia di serraggio e tubazioni divergenti fluido acqua ingresso e uscita; tubazione di presa aria.

Gli esempi menzionati, relativi alla corrosione biochimica, risultano essere presenti nella maggioranza dei casi. Ci sono naturalmente altri tipi di acque aventi caratteristiche risultanti, per esempio, dalla combinazione di due o più dei fattori; inoltre ci potranno essere altri problemi dovuti alla natura chimica, fisica e batteriologica dell'acqua, alla costituzione, geometrica dell'impianto, alla pressione, alla temperatura e alla velocità di esercizio che devono essere comunque esaminati, studiati e risolti di volta in volta.

Si può pertanto e con ragione affermare che il problema della conservazione della superficie interna di tubazioni delle condotte d'acqua in materiale ferroso è stato risolto: infatti molteplici e soddisfacenti dal punto di vista tecnico sono i



Fig. 14 - Immagine storica di impianto ancora presente presso insediamento produttivo in territorio Bergamasco (Progetto R. Marsetti 1987).

*Fig. 14 - Historic image of a still-existing plant situated in a productive plant in Bergamo territory (Project by R. Marsetti 1987).*

sistemi d'intervento, sia per quanto riguarda l'utilizzazione di tubi con semplice bitumatura interna oppure grezzi all'interno ed il relativo trattamento, dell'acqua, sia relativamente all'uso di tubi rivestiti internamente ed eventualmente protetti catodicamente, quando il fluido convogliato possiede caratteristiche aggressive non neutralizzabili in modo tecnico-economico soddisfacente. Sarà però necessaria, per ogni singolo caso, una stretta collaborazione fra tecnico progettista, tecnologo della corrosione e geologo per la ricerca della soluzione, più conveniente. Detta collaborazione deve avvenire in fase di progettazione in modo che, dopo aver eseguito le analisi chimico-fisico-batteriologiche dell'acqua da convogliare e riscontrata la sua eventuale aggressività, si possano prevedere preliminarmente le opere necessarie per la neutralizzazione della corrosione.

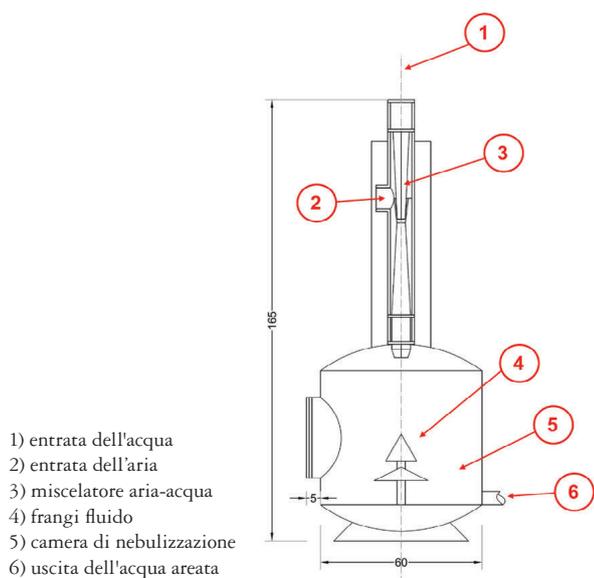


Fig. 13 - Schema "desolfuratore ad iniezione MR" in acciaio INOX AISI 316/L brevettato PED 2014/68/UE.

*Fig. 13 - Diagram of "MR injection desulfurizer" made in INOX AISI 316/L steel, patented PED 2014/68/UE.*



**BIBLIOGRAFIA**

- Bogtstra J.F. (1961): Microbiological corrosion in waterfloods
- CEOCOR Commission 3° (1976) Regles de bonne pratique pour lutter contre la corrosion interne des conduites d'eau en metal ferreux nues inteurieurement "Good practice rules to combat internal corrosion of ferrous metal water pipes inside blanks"- Rev. Centre Beige d'Elude et de Do cumentation des Eaux. n. 386
- Chiesa G (2002) Idrogeochimica, Manuali e Metodi "Hydrogeochemistry, Manuals Methods of applications 3rd", Edition Geo-Graph, Segrate
- Dorff P (1934) Die Eisenoakterien. Pflanzenforschung H "The iron bacteria. Plant Research H.". 16 Hrsg v. R. Kolkwitz, G. Fischer, Jena
- Dorff P (1934) Taxonomy and Morphology of the Iron Organisms. In Pari 16 - Botanica/ Research Kolkwitz, Verlag Gustav Fischer, Jena. Ger
- Ellis D (1913) On the identity of Leptothrix Meyeri (Ellis) and of Megalothrix discrhora (Schwers) with Cre- nothrix polypora (Cehnn) - Zbl Bakt (2 Abt) 38: 449
- Leefflang KVR (1969) La corrosion biochimique des conduites en metal ferreux "Biochemical corrosion of ferrous metal pipes". CEBEDOC, Liege.
- Marsetti R (1965) Neutralizzazione dell'aggressività di acque potabili scarsamente ossigenate mediante sistema aerativo con iniettore "Neutralization of the aggressiveness of poorly oxygenated drinking water by means of an aeration system with injector" - Rassegna Tecnica Dalmine, n. 30
- Marsetti R, Romagnoli R (1989) Biochemical corrosion control on the inside of steel piping - CEOCOR, 29 Colloquio internazionale della corrosione, Napoli 17÷19
- Mettenheimer C (1956) Uber Leptothrix ochracea u. ihre Beziehungen zu Gallionella ferruginea "Leptothrix ochracea and its relationship with Gallionella ferruginea" - Abh., Senckenberg. Naturf. Ges., Frankfurt 2-58.
- Migula W (1897) Uber Gallionella ferruginea "Gallionella ferruginea" Ehanbg. Ber. dtsh. bot. Ges 15: 321
- Olsen E and Szybalski W (1949) Aerobic microbiological corrosion of water pipes. I-II, Acta Chem. Scand., 1094.
- Ralph C Heat (1987) Basic ground-water hydrology. Department of the interior Donald Paul Hodel, Secretary. U.S. Geological Survey Dallas L. Peck, Director. USGS Science for a changing world.
- Redinger K (1931) Siderocapsa coronata (Redinger), eine neue Eisenbakterie aus dem Lunzer Obersee "Siderocapsa coronata (Redinger), a new iron bacterium from the Lunzer Obersee", Arch. Hydrobiol. 22, Hft. 3
- Van Beneden G (1951): Hydrobiologie, Acte Hydrobiologica, glimnologica et Protirtologica "Hydrobiology, act Hydrobiologica, glimnologica and Protirtologica" - Contribution nouvelle à l'étude des ferrobactériacées - Voi. 3 - n. 1 Première partie