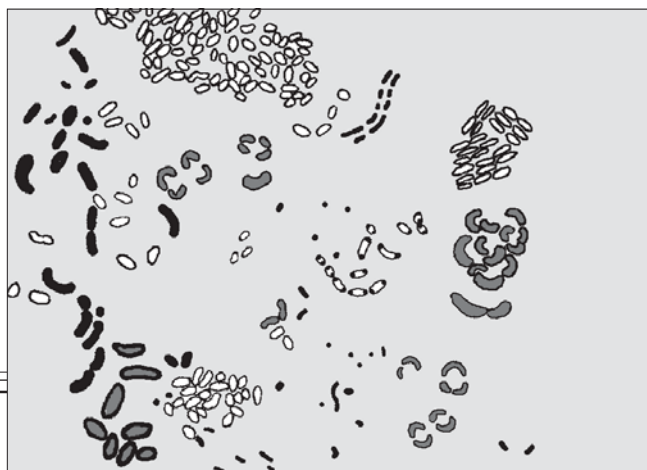


BIOCORROSIONE



I BATTERI IMPLICATI NEI FENOMENI DI CORROSIONE

Nadia Fontani^(*) e Manuela Pedroni^(**)

La biocorrosione è dovuta allo sviluppo di una popolazione microbica molto eterogenea che comprende forme chemiotrofe capaci di trarre energia per il loro metabolismo dal cambiamento dello stato di ossidazione di elementi quali ferro, manganese e zolfo, nonché più generici batteri eterotrofi inclusi nella cosiddetta "Carica Batterica Totale".

I primi colonizzatori delle superfici interne delle condotte idriche sono i batteri Gram negativi copiotrofi quali *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, ecc., in quanto necessitano di un substrato ricco di nutrienti; solo successivamente subentrano anche i microrganismi oligotrofi (*Caulobacter*, *Saprospira*, ecc.) che riescono a sopravvivere in una situazione nutritiva meno vantaggiosa. I batteri filamentosi rappresentano la maggior parte della popolazione di un biofilm maturo, in quanto la peculiare morfologia consente loro di adattarsi meglio all'habitat della condotta, estendendosi nel lume del tubo per

assorbire nutrienti ed ossigeno, ormai carenti sulla superficie interna dello stesso.

In tabella 1 sono riportati i principali microrganismi rinvenibili nelle pellicole biologiche che si instaurano nelle condotte.

FERROBATTERI

I Ferrobatteri possono essere definiti come microrganismi in grado di catturare e di ossidare gli ioni ferrosi presenti nell'acqua e di depositarli sotto forma di idrossido ferrico idratato.

I prodotti di ossidazione possono essere immagazzinati all'interno della cellula, rivestire la struttura cellulare o accumularsi sotto forma di depositi di colorazione rossastra come matrici extracellulari.

Questi batteri accelerano la reazione che avviene naturalmente fra l'ossigeno e gli ioni ferrosi presenti nell'acqua catturando l'energia rilasciata dal processo di ossidazione ed utilizzandola per il proprio metabolismo; l'idrossido ferrico compare quale catabolita sulle loro secrezioni mucillaginose.

Anche il manganese, soprattutto se presente in

^(*) AGAC - Reggio Emilia

^(**) ASM - Mantova

Tab.1
Principali batteri implicati nei fenomeni di corrosione

Batteri ferroprecipitanti

Pedunculati (o dotati di glicocalice)

- *Gallionella* sp.
- *Siderocapsa* sp.

Prostecati

- *Hyphomicrobium* sp.
- *Pedomicrobium* sp.
- *Prosthecomicrobium* sp.

Filamentosi guainati

- *Sphaerotilus* sp.
- *Leptothrix* sp.
- *Crenothrix* sp.
- *Clonothrix* sp.
- *Toxothrix* sp.

Spirilliformi

- *Leptospirillum* sp.

Batteri unicellulari non filamentosi

- *Siderocapsa* sp.
- *Naumaniella* sp.
- *Siderococcus* sp.

Batteri ferroriducenti

- *Shewanella (Alteromonas) putrefaciens*
- *Bacillus* sp.
- *Clostridium* sp.
- *Escherichia coli*
- *Enterobacter aerogenes*
- *Klebsiella oxytoca*
- *Klebsiella pneumoniae*
- *Pseudomonas aeruginosa*
- *Pseudomonas cepacia*
- *Pseudomonas fluorescens*
- *Listeria* sp.
- *Vibrio* sp.

Batteri solfossidanti

- *Thiobacillus thiooxidans*
- *Thiobacillus ferrooxidans*
- *Thiobacillus thioparus*
- *Thiospira* sp.

Batteri solfossidanti denitrificanti

- *Thiobacillus thioparus*
- *Thiobacillus neapolitanus*
- *Thiobacillus tepidarius*
- *Thiomicrospira denitrificans*

Batteri solfatoriduttori

Non sporigeni

- *Desulfovibrio vulgaris*
- *Desulfovibrio* sp.

Sporigeni

- *Desulfatamaculum* sp.

Batteri solfitoriduttori

- *Clostridium* sp.
- *Clostridium acetochilylicum*
- *Clostridium limosum*

Solfobatteri filamentosi

- *Beggiatoa* sp.
- *Thioploca* sp.

Batteri manganeseprecipitanti

- *Pedomicrobium manganicum*
- *Metallogenium* sp.

Batteri eterotrofi

- *Acinetobacter* sp.
- *Alcaligenes* sp.
- *Bacillus* sp.
- *Chromobacterium* sp.
- *Corynebacterium* sp.
- *Flavobacterium* sp.
- *Kjurthia* sp.
- *Methylobacterium* sp.
- *Micrococcus* sp.
- *Moraxella* sp.
- *Mycobacterium* sp.
- *Pseudomonas* sp.
- *Staphylococcus* sp.

Attinomiceti solfatoriducenti

- *Nocardia* sp.
- *Actinomyces* sp.
- *Streptomyces* sp.

(Segue)

(Segue tab. 1)

Miceti ferroriducenti

- *Acremonium* sp.
- *Penicillium* sp.
- *Rhizopus* sp.
- *Fusarium* sp.
- *Aspergillus* sp.
- *Mucor* sp.
- *Alternaria* sp.
- *Epicoccum* sp.
- *Scopulariopsis brevicaulis*
- *Cladosporium herbarum*
- *Trichosporon* sp.
- *Hormoconis resiniae*
- *Cephalosporium* sp.
- *Rhinochrysiella* sp.
- *Verticillium* sp.
- *Sporocjbe* sp.
- *Trichoderma* sp.
- *Exophila* sp.
- *Paecilomyces* sp.
- *Phialophora* sp.

Lieviti ferroriducenti

- *Rhodotorula* sp.
- *Sporobolomyces* sp.
- *Candida* sp.
- *Cryptococcus* sp.

elevate concentrazioni e con un basso stato di ossidazione, può essere ossidato da questi microrganismi.

I ferrobatteri filamentosi sono inoltre in grado di concentrare ioni cloruro ed i loro depositi risultano ricchi di cloruri di ferro e manganese che agiscono come acido cloridrico diluito esplicando una azione corrosiva sui metalli.

Batteri ferroprecipitanti pedunculati

Si tratta di microrganismi pedunculati o dotati di glicocalice che apparentemente metabolizzano i composti contenenti ferro e manganese.

Di questi, *Gallionella* preferisce habitat con bassi contenuti di sostanza organica, mentre *Siderocapsa* prevale in ambienti con più alto titolo di carbonio organico, che spesso si trovano in microaerofilia.

Gallionella

Gram negativo e strettamente aerobio, *Gallionella* è un batterio costituito da una cellula apicale ed un coda filamentosa elicoidale, composta di fibrille avvolte da idrossido di ferro. La cellula è a forma di rene con diametro di 0,5-0,7 µm e una lunghezza di 0,8-1,8 µm.

Spesso i nastri osservati non mostrano cellule visibili quali singole entità che costituiscono il filamento.

Il filamento nastriforme convoglia i flussi dell'acqua con un meccanismo "spiral down" (a spirale verso il basso) usando lo stesso principio d'azione della coclea di Archimede. Questo meccanismo promuove la disponibilità di ossigeno disciolto e nutrienti in prossimità della cellula, conferendole un vantaggio rispetto alle cellule presenti nel biofilm dotate di altre strutture morfologiche.

Il filamento si allunga con la crescita e l'accumulo di polimeri e di ferro ossidato, fino a quando le forze di taglio, imposte dalla corrente dell'acqua, non ne provocano la rottura.

Una volta tagliato, il filamento diventa una particella sospesa inanimata nell'acqua.

Questo significa che frammenti di filamenti entrano nella fase acquosa e possono essere facilmente riconosciuti ed identificati al microscopio. Una volta che il filamento è stato tagliato, la cellula può secernere un filamento sostitutivo e beneficiare del vantaggio ecologico prodotto da questa particolare struttura. L'ossido e l'idrossido di Fe e/o Mn conferiscono una maggiore resistenza strutturale al filamento.

La temperatura ottimale per la crescita è compresa tra 8 e 16 °C.

Strettamente autotrofa cresce a bassi livelli di ossigeno (<0,1-0,2 mg/L) mentre viene inibita da concentrazioni superiori a 2,75 mg/L. Ciò gli permette di fissare la CO₂ (tramite la via Ribulosio-bifosfato carbossilasi) e conseguentemente di ossidare il ferro-ferroso.

Si sviluppa in condizioni di pH vicino alla neutralità e a basse concentrazioni di carbonio organico disciolto (DOC).

Habitat: largamente diffusa in acque contenenti elevate concentrazioni di sali di ferro.

Siderocapsa

La reazione alla colorazione di Gram non è nota;

aerobio, microaerobio:

Cellule di forma sferica od ovoidale attorniate completamente o parzialmente da una comune capsula incrostata di ossido di ferro e manganese.

La morfologia delle cellule comunque è molto variabile ed è spesso mascherata dall'incrostazione di ferro e manganese che può essere rimossa pretrattando il campione con soluzioni diluite di ac. ossalico, ac. cloridrico o EDTA.

Le cellule funzionano infatti da nuclei di precipitazione di questi ossidi.

Batteri autotrofi o facoltativi, vivono liberi o attaccati alla superficie di supporti immersi nell'ambiente acquoso.

Habitat: questi batteri si rinvencono prevalentemente in acque fredde.

Batteri ferroprecipitanti prostecati

Si tratta di organismi prevalentemente oligotrofi.

Sono caratterizzati dalla presenza di strutture simili alle ife (prostecche), all'estremità delle quali si sviluppa una cellula mobile flagellata che si separa dall'organismo di partenza.

Hyphomicrobium

Gram negativo; aerobio.

Cellule sferiche od ovoidali di 0,3-1,2 x 1,0-1,3 µm con prosteca di diametro variabile tra 0,2 e 0,3 µm.

Le ife non sono settate ma possono mostrare vere ramificazioni. Sono rare invece le ramificazioni secondarie. Sono organismi mesofili e crescono a pH ottimale di 7,0.

Pedomicrobium

Gram negativo; aerobio.

Cellule ovoidali o sferiche di 0,4-2,0 x 0,4-2,5 µm.

Possono presentare 5 o più ife di diametro 0,15-0,3 µm, di cui almeno una origina lateralmente, mentre le altre sono ai poli della cellula madre.

I composti ossidati del ferro e del manganese vengono depositati sia sulla cellula madre che sulle ife.

Prosthecomicrobium

Gram negativo; aerobio.

Batterio unicellulare di diametro 0,8-1,2 µm con

numerose prostecche che si dipartono da tutta la superficie cellulare.

Batteri ferroprecipitanti filamentosi guainati

I batteri filamentosi ferroprecipitanti sono disposti in lunghe catene di singole cellule tenute insieme da una guaina che spesso è incrostata da Fe(OH)₃ e MnO₂.

Questi batteri sono facilmente riconoscibili per la formazione di aggregati flocculanti che li portano ad aderire alle superfici di ciò che è a contatto con l'acqua.

Habitat: di questi microrganismi, *Sphaerotilus natans* è presente in acque più ricche di carbonio organico rispetto a *Leptothrix* sp., che preferisce acque molto pulite, ma in cui siano disponibili ferro e manganese.

Sphaerotilus

Gram negativo; aerobio. Neisser negativo.

Ha cellule di larghezza 1,2-2,5 µm e di lunghezza 2-10 µm, generalmente disposte in catena singola all'interno della guaina ed uniformemente distribuite. Le guaine possono essere attaccate alle superfici in modo tenace.

Le dimensioni della guaina dipendono dalle condizioni nutrizionali; la guaina è formata da complessi peptido-lipidici e polisaccaridici.

Questo organismo può crescere a basse concentrazioni di ossigeno disciolto (< 0,1 mg/L) e a temperature comprese tra 10 e 37 °C. La temperatura ottimale comunque è compresa tra 20 e 30 °C.

Il pH di crescita va da 6,5 a 7,5. Non viene mai utilizzata la fermentazione.

Come fonte di carbonio può usare alcool, parecchi acidi organici e zuccheri.

Le cellule durante gli spostamenti utilizzano i flagelli subpolari (ai margini delle zone polari).

I filamenti evidenziano delle false ramificazioni.

Leptothrix

Gram negativo; aerobio.

Le cellule hanno dimensioni di 0,6-1,4 x 1-1,2 µm disposte a catena all'interno della guaina formata da complessi di lipidi, peptidi, polisaccaridi e acido esopolisaccaridico; il filamento non è mai ramificato.

Le cellule libere sono mobili grazie a un flagello polare.

Come fonte di carbonio utilizza zuccheri (inclusi fruttosio e glucosio), acidi organici (compresi lattico, malico) e glicerolo.

Non ha metabolismo fermentativo. Si sviluppa a basse concentrazioni di DOC.

Il pH ottimale di crescita è compreso tra 6,5 e 7,5 e la temperatura vicina ai 25 °C.

Habitat: rinvenuto in acque fredde e molto ricche di ferro.

Crenothrix

Gram negativo; aerobio.

Cellule cilindriche o a forma di disco con diametro di 0,6-5 µm che si trovano all'interno di una guaina nettamente visibile che dà origine a un filamento lungo anche 1 cm.

Spesso lo si trova fortemente attaccato al biofilm. I filamenti sono ramificati ma occasionalmente si possono vedere false ramificazioni.

Le parti terminali dei filamenti contengono cellule sferiche (macrogonidi) che possono anche essere liberate. Le cellule libere non hanno flagelli.

Habitat: organismi largamente rinvenuti in acque condottate contenenti ferro e materia organica.

Clonothrix

La reazione alla colorazione di Gram non è nota; aerobio.

Filamenti di lunghezza di 1,5 cm e di larghezza 3-7 µm, attaccati alla superficie o liberi in ambiente acquoso, rivestiti di una guaina che può essere incrostante di ossido di ferro o di manganese di colore marrone giallastro. Filamento affusolato più largo alla base che può essere singolo o presentare false ramificazioni. Il filamento è formato da cellule cilindriche di 2-2,5 x 12-18 µm.

Habitat: largamente distribuito in acque stagnanti e correnti contenenti composti del ferro e del manganese.

Toxothrix

La reazione alla colorazione di Gram non è nota

È formato da cellule a bastoncino di 0,5-0,75 x 3-6 µm che costituiscono filamenti di oltre 400 µm di lunghezza.

Producono filamenti a forma di U che ruotano lentamente verso l'apice seguendo un moto circolare.

La sostanza mucoide viene secreta in parecchi punti e viene depositata in un doppio solco ognuno di 0,2 µm. Il tricoma è all'interno di una guaina. Può presentare false ramificazioni.

L'ossido di ferro può essere depositato insieme ad una sostanza mucoide che fa assumere all'organismo una colorazione marrone giallastra.

I filamenti sono estremamente fragili: durante l'esame in laboratorio e dopo un certo periodo di visualizzazione microscopica se ne può osservare la disintegrazione.

Cresce attaccato alla superficie di tubi o materiali di supporto in un ambiente con pH 5,1-7,7 e bassa tensione di ossigeno.

Habitat: organismi rinvenuti in acque fredde contenenti ioni ferro.

Batteri ferroprecipitanti spirilliformi

Leptospirillum

Gram negativo; aerobio.

Vibrioni o cellule spirilliformi motili per la presenza di un solo flagello polare.

Questi microrganismi utilizzano Fe²⁺ come fonte di energia e, sintroficamente con i tiobacilli, possono utilizzare i solfuri.

Ferrobatteri unicellulari non filamentosi

Si tratta di un gruppo di batteri con la caratteristica di possedere una capsula extracellulare, composta di materiale gelatinoso escreto, la cui composizione chimica non è ancora nota (HANERT, 1981).

Questi batteri, incapsulati in gelatina, hanno la capacità di formare grandi masse di idrato ferrico che impregna le loro capsule.

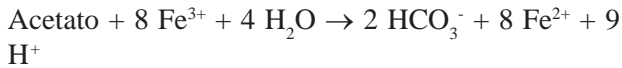
Tali microrganismi sono stati studiati solo da un punto di vista morfologico con l'esame al microscopio ottico dei sedimenti ricavati da acquedotti.

Batteri ferroriducenti

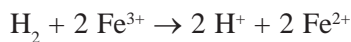
Accanto a *Sewanella putrefaciens* appartengono a questo gruppo anche germi a metabolismo fermentativo includenti *E. Coli*, *Clostridium pasteuria-*

num, *Clostridium sporogenes*, *Lactobacillus lactis*, *Bacillus polymyxa*, ecc.

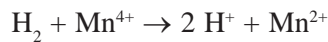
S. putrefaciens utilizza Fe^{3+} ed Mn^{4+} in copresenza con acidi organici, ossidando i secondi e riducendo i primi, mediante la seguente reazione:



Per questa caratteristica funzionale *S. putrefaciens*, ma anche altri batteri che rientrano in questo gruppo come, ad esempio, *Pseudomonas* sp., sono definibili come batteri idrogenossidanti ferroriduttori (ed anche manganeseriduttori) secondo le reazioni generiche:



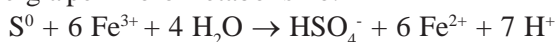
oppure:



BATTERI SOLFOSSIDANTI

Thiobacillus thiooxidans, *T. thioparus*, *Thiospira*

La principale caratteristica di questo gruppo di batteri è quella di ossidare zolfo inorganico ottenendo energia per il loro metabolismo:



Sono batteri Gram negativi strettamente aerobi, autotrofi e con la capacità di sviluppo nell'intervallo di pH tra 2,0 e 4,4 con valore ottimale di crescita uguale a 3; la temperatura ottimale di crescita è di 30-35 °C.

L'azione corrosiva è favorita dalla loro capacità di abbassare il pH e quindi di aumentare la velocità delle reazioni con il successivo aumento di sostanze ad azione corrosiva (ac. solforico).

Al microscopio si riconoscono dai lunghi filamenti (> 100 μm) che tendono a disgregarsi durante gli ultimi stadi di crescita, trasformandosi in piccoli filamenti a cellule bastoncellari (0,5 per 1,0 μm) mobili che appaiono disposte in coppie, in corte catene o singolarmente.

Il movimento avviene grazie a un singolo flagello posto nella zona polare.

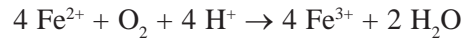
Habitat: Questo particolare gruppo di batteri si ritrova comunemente nel suolo, nell'acqua e nei sedimenti.

Thiobacillus ferrooxidans

Gram negativo; aerobio ed anaerobio.

Batterio filamentoso, acidofilo, solfoossidante e fer-

rossidante, obbligatoriamente litotrofo che viene classificato come *Thiobacillus* per la sua capacità di metabolizzare lo zolfo piuttosto che per quella di ricavare energia dall'ossidazione del ferro secondo la reazione:



T. ferrooxidans è aerobio in una prima fase di coltura e successivamente anaerobio.

Habitat: acque acide contenenti ferro.

BATTERI

SOLFOSSIDANTI DENITRIFICANTI

A questo gruppo appartengono forme bastoncellari (ad eccezione di *Thiomicrospira* che è spiraliforme) in grado di ossidare lo zolfo a spese dello ione nitrato che viene ridotto a nitrito.

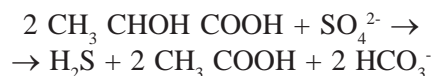
Tutte le specie appartenenti al genere *Thiobacillus* sono aerobie ad eccezione di *T. denitrificans* che è microaerofilo.

Habitat: ampiamente diffusi nel suolo, nelle acque e nei sedimenti.

BATTERI SOLFATORIDUTTORI

Si tratta di organismi con meccanismo respiratorio in grado di utilizzare solfati o composti contenenti zolfo come accettori terminali di elettroni, riducendoli parzialmente ad H_2S .

Molte specie ossidano composti organici, quali ad esempio il lattato, trasformandolo in acetato che non è più ulteriormente degradato, secondo la reazione:



Desulfovibrio

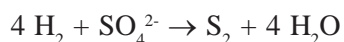
Gram negativo; anaerobio obbligato.

Vibrioni leggermente incurvati con lunghezza variabile da 0,5-1,5 a 2,5-10 μm.

Si presenta come cellula singola o come una corta catena dalla forma di spirillo, estremamente mobile grazie ad un singolo o ad un ciuffo di flagelli polari.

La temperatura ottimale di crescita è compresa tra i 25 ed i 35 °C.

L'idrogeno è il suo più importante donatore di elettroni:



Alcuni stipiti di *Desulfovibrio desulfuricans* sono anche ferroriduttori trasformando Fe^{3+} in Fe^{2+}

Habitat: lo si ritrova nelle acque, comprese quelle marine, e nel suolo.

Desulfatamaculum

Gram negativo; anaerobio obbligato.

Ha la forma di bastoncino diritto o curvo di dimensioni 0,3-1,5 x 3-9 μm ; è mobile grazie ai flagelli peritrichi della zona polare.

Produce spore ovali che formano lievi rigonfiamenti sulle cellule. Solfati, solfiti e zolfo sono gli accettori di elettroni che vengono attaccati e ridotti a H_2S .

La temperatura ottimale per il loro accrescimento va dai 35 ai 55 °C; alcuni ceppi crescono anche a 25-30 °C.

BATTERI SOLFITORIDUTTORI

Si tratta di batteri molto diffusi nell'ambiente che riducono solfiti e solfuri. Contemporaneamente riducono Fe^{3+} a Fe^{2+} e quindi possono rientrare anche nel gruppo funzionale dei batteri ferroriduttori.

Molti batteri solfitoriduttori appartengono a specie strettamente anaerobie o aerotolleranti. La loro enumerazione completa dovrebbe quindi essere condotta in anaerobiosi.

Rientra in questo gruppo il genere *Clostridium*.

SOLFOBATTERI FILAMENTOSI

Si tratta di batteri ampiamente diffusi in ambienti in cui è disponibile una discreta concentrazione di H_2S e le condizioni non siano strettamente anossiche.

I filamenti di questi batteri sono dotati di movimenti oscillanti.

Beggiatoa

Gram negativo; aerobio o microaerofilo. Neisser negativo (può presentare granuli Neisser positivi).

Cellule incolori di 1-50 μm x 2-10 μm .

Le cellule possono presentarsi singole o in filamenti non inguainati.

Le cellule possono inoltre presentare inclusioni di globuli di zolfo, polifosfati o poli-b- idrossibutirrato

(PHB).

Habitat: organismi spesso presenti in sedimenti nell'interfaccia tra la zona anossica e quella ossigenata.

Thioploca

I tricomi sono analoghi a quelli di *Beggiatoa*, ma contenuti in una guaina viscosa all'interno della quale hanno capacità di movimento. Il numero di filamenti nella guaina è variabile.

I filamenti più lunghi hanno un diametro uniforme e possono terminare arrotondati od affusolati.

Sono spesso presenti inclusioni di zolfo.

Habitat: acque fredde contenenti idrogeno solforato e carbonato di calcio.

BATTERI MANGANESEPRECIPITANTI

Batteri filamentosi bastoncellari o spiraliformi che concorrono alla deposizione di manganese, il quale attribuisce un colore brunastro alle acque.

Metallogenium

Cellule coccoidi di 0,2-1,5 μm di diametro, spesso rinvenute in clusters e fortemente incrostate di biossido di manganese.

La temperatura ottimale per la loro crescita è di 28 °C mentre il pH è tra 6,8 e 7,2.

Habitat: ampiamente presenti nel plankton di acque di lago, sedimenti e nel suolo.

Pedomicrobium manganicum

Gram negativo; aerobio.

Cellule sferiche ad ovali di 0,4-2,0 x 0,4-2,5 μm . Presentano 5 o più ife con funzione riproduttiva di 0,15-0,30 μm .

BATTERI ETERTROFI

Nello studio della biocorrosione oltre ai batteri fin qui descritti, si devono considerare altri microrganismi con caratteristiche molto diverse tra loro, ma accomunati dal fatto di essere rilevati frequentemente in reti di acque potabili con problemi di corrosione.

I batteri eterotrofi possono depositare il ferro nello stesso modo dei caratteristici batteri ferro-ossidanti.

I batteri che producono polimeri extracellulari aci-

di, in condizioni moderatamente acide o neutre, possono assorbire in modo non specifico idrossidi di ferro caricati positivamente.

Un importante ruolo nella corrosione biologica è svolto dai batteri del genere *Pseudomonas*, cui appartengono specie note per essere tra le prime colonizzatrici del biofilm.

In particolare sono stati compiuti studi in laboratorio sulla irregolarità del biofilm costituito da *Pseudomonas aeruginosa*. Il risultato di questa osservazione rivela che la superficie del biofilm è rugosa e indica il distacco di biomassa formata da particelle multicellulari.

Sono stati condotti, inoltre, ulteriori studi sulla particolare resistenza di *Pseudomonas aeruginosa* allo iodio, dai quali si evince che la matrice del glicocalice accumulata rappresenta la barriera di protezione.

Pseudomonas, *Alcaligenes* e *Moraxella* sono in grado di utilizzare complessi organici di ferro ammonio citrato e in molti casi di ferro malonato e/o galattosato.

In tutti i casi il ferro viene precipitato in forma di flocculati rossi.

È di notevole importanza ricordare che il ruolo svolto da *Pseudomonas* è quello di batterio ferroriducente; è in grado inoltre di metabolizzare l'azoto nitrico utilizzato come inibitore dei fenomeni corrosivi, riducendolo a N₂ gassoso.

Il genere *Bacillus* annovera batteri anaerobi ed aerobi facoltativi largamente diffusi in natura e con la capacità di produrre spore, grazie alle quali riescono a sopravvivere per lunghi periodi in condizioni ambientali avverse.

Bacillus pumilus è capace di utilizzare il carbonio presente in complessi di ferro, lasciando quest'ultimo fissato in capsule e creando problemi di precipitazioni di ferro.

Flavobacterium e *Pseudomonas vescicularis* sono stati ritrovati in campioni di materiale flocculato e da quelli prelevati dalla superficie delle condutture.

Arthrobacter è stato ritrovato nei tubercoli e nel sedimento dove si evidenziava anche la presenza di coliformi.

I coliformi non sembrano uniformemente associati al biofilm anche se alcuni Autori hanno isolato

Klebsiella sp. ed *Escherichia coli* in campioni di fanghiglia.

ATTINOMICETI

Nel batterioplancton di acque potabili si possono riscontrare titoli di attinomiceti compresi tra 1 e 1000 UFC/100 mL.

È molto probabile quindi che questi valori siano notevolmente superiori sulle superfici interne dei tubi, nel biofilm e nei sedimenti che si formano in condotta.

Agli attinomiceti è attribuito il ruolo di degradatori di materiali polimerici naturali e di sintesi usati per la fabbricazione di guarnizioni e giunti soprattutto a livello degli impianti domestici.

La loro colonizzazione si associa spesso alla produzione di odori sgradevoli legati a molecole quali geosmina e metilisoborneolo percepibili dall'utenza anche a basse concentrazioni.

Il genere *Streptomyces* è caratterizzato da micelio recante catene di 5-50 spore. Si differenzia dal genere *Nocardia* che ha tipiche ife frammentate e dal genere *Micromonospora* con micelio dotato di spore singole.

Habitat: Sono stati isolati in raccordi ed altre parti idrauliche delle condotte, anche se realizzate in gomma.

MUFFE E LIEVITI

La popolazione dei lieviti che si moltiplicano in rete comprende varie specie di *Candida* (*C. parapsilosis*, *C. stellatoidea*, *C. tropicalis*, *C. zeylandoidea*, *C. lusitana*), *Cryptococcus albidus*, *Rhodotorula glutinis* e *Sporobolomyces* sp.

Nell'ambito della carica batterica totale di un'acqua potabile i lieviti possono costituire l'1-2% con titoli che variano da 1 a 100 UFC/mL.

Tra i miceti ferroriducenti sono compresi i generi *Acremonium*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Fusarium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Trichosporon* e le specie *Scoptariopsis brevicaulis*, *Cladosporium herbarum*, *Hormoconis resinae*.

Altri funghi filamentosi ritrovati in acque potabili appartengono ai generi *Alternaria*, *Epicoccum*, *Cephalosporium*, *Verticillium*, *Trochoderma*, *Exophiala*, *Paecilomyces* e *Phialophora*.

Questa lista non deve considerarsi esaustiva. Infatti ai funghi appartengono specie con ampia valenza biodegradativa.

I titoli registrati nel biofilm possono giungere a 100-1.000 UFC/cm².

Habitat: Isolati in acque superficiali e profonde, acque potabilizzate, sulla superficie di serbatoi e condotte. Sono spesso presenti nei tubercoli poiché sono ricchi di nutrienti e li proteggono dall'azione dei disinfettanti.



L'accertamento della presenza di microrganismi adesi alle superfici interne delle condotte aiuta a comprendere la natura del fenomeno corrosivo in atto ed il suo stato di avanzamento.

Le indagini microbiologiche possono essere effettuate su una o più matrici: sul biofilm, che rappresenta lo stadio preliminare del processo corrosivo; sulle formazioni tubercolari, che ne rappresentano quello finale; sulle fanghiglie e sedimenti raccolti durante le operazioni di lavaggio della rete; sull'acqua circolante nella condotta stessa previa opportuna concentrazione di grossi volumi di campione.

Mediante osservazione microscopica diretta del campione e dopo opportune tecniche di colorazione, è possibile identificare la maggior parte di batteri filamentosi, peraltro difficilmente isolabili su terreni colturali.

Le analisi che si basano invece su sistemi di arricchimento su substrati specifici risultano idonee per la ricerca dei batteri eterotrofi, i non filamentosi in genere, le muffe ed i lieviti.

Bibliografia essenziale

AULICINO A. et al. - 1989. Corrosione batterica nelle reti.

In "Microbiologia delle acque potabili", 6: 109-115.

BERGEY'S "Manual of systematic bacteriology", 1990, William e Wilkins, Baltimore.

CHANTEREAU J. - 1980. Corrosion Bactérienne: Bactéries de la corrosion. Technique et Documentation.