

Prof. Vito ALUNNO ROSSETTI - Ing. Antonella FERRARO

Nota Tecnica



Fenomeni di degrado su manufatti in cemento armato – La reazione AMD (Acid Mine Drainage o Drenaggio Acido di Miniera)

Effects of Acid Mine Drainage (AMD) reaction on reinforced concrete structures – A case study

Riassunto – Il Drenaggio Acido di Miniera (AMD) rappresenta un importante pericolo per l'ambiente, dovunque vi siano rifiuti di miniera contenenti solfuri, a cominciare dalla Pirite. L'ossidazione dei solfuri operata da batteri, produce acido solforico che causa anche forte degradazione del calcestruzzo. In questa nota si riporta una descrizione chimica del fenomeno e i risultati di un'indagine effettuata su manufatti stradali allo scopo di riconoscimento, conferma sperimentale, effetto sul calcestruzzo e sull'armatura, valutazione del potenziale sviluppo di acido in sito.

Summary – The Acid Mine Draining (AMD) is an important danger for the environment, any time there are mine wastes exposing sulphides to the ambient and *Thiobacillus ferrooxidans*. The oxidation of the minerals produces sulphuric acid that attacks quickly the concrete. In this note is given a chemical description of the AMD effect on concrete and a case study, referring to some concrete structures of a road in central Italy. An experimental assessment of the AMD presence is described, with its effect on concrete and reinforcement. An evaluation is also given of the potential production of sulphuric acid by the site soil.

Nota Tecnica

Fenomeni di degrado su manufatti in cemento armato – La reazione AMD (Acid Mine Drainage o Drenaggio Acido di Miniera)

*Effects of Acid Mine Drainage (AMD) reaction on reinforced concrete structures –
A case study*

1. Premessa

La presente relazione, che gli scriventi hanno elaborato a seguito dell'incarico ricevuto dall'Impresa esecutrice, riguarda i fenomeni di degrado che si stanno verificando su manufatti di cemento armato e strutture metalliche di una strada nell'Italia centrale (di qui in avanti designata "Strada"). Per la realizzazione dei rilevati sono stati utilizzati sterili provenienti da una Miniera.

I numerosi dati raccolti nel corso dell'indagine non sono riportati nella nota.

1.1 I difetti osservati

Nei seguenti paragrafi vengono descritti i principali difetti rilevati nella tratta in oggetto.

1.1.1 Manufatti in cemento armato

Sono interessati dai fenomeni tutti i tipi di manufatti che costituiscono la struttura indagata; in particolare:

- pannelli prefabbricati in cemento armato (si veda la foto 1): i difetti sono prevalentemente localizzati in corrispondenza della giunzioni di pannelli diversi: il percolamento del liquido che attraversa il rilevato, aggredisce il calcestruzzo formando depositi salini bianco giallastro, rossicci, a volte coerenti ma in certi casi friabili e polverulenti.

Nella maggior parte dei casi i difetti osservati consistono quasi esclusivamente nella formazione dei depositi e di una modesta aggressione del calcestruzzo (si veda figura 2).

- muri che costituiscono le spalle di cavalcavia (si veda la foto 3). In questo caso l'acqua che attraversa il rilevato, forma a volte depositi incoerenti, a volte genera colorazioni rossicce su superfici estese.

- tombini (si veda la foto 4), i difetti osservati sono paragonabili a quelli presenti sui muri.



Figura 1 - Aspetto dei pannelli prefabbricati con i fenomeni in evidenza



Figura 2 - Vista ravvicinata dei depositi sui pannelli



Figura 3 - Spalla



Figura 4 - Tombino calcestruzzo

1.1.2 Strutture metalliche

Si osservano danni a carico di:

- tombini in acciaio (si veda la foto 5), in questo caso i danni, consistenti nella corrosione profonda del metallo, sono concentrati in corrispondenza dei giunti dove è più facile l'accesso dell'acqua proveniente dal rilevato e dal terreno circostante.

- elementi dei guardrails: foto 6. Si osservano fenomeni di corrosione localizzati nei punti in cui si realizza il contatto con l'acqua proveniente dal terreno.



Figura 5 - Tombino Armco



Figura 6 - Guard rail

1.2 Caratteristiche dei calcestruzzi

I pannelli prefabbricati, sono stati realizzati con un calcestruzzo Rck 40 aventi le seguenti caratteristiche:

- Cem I 52.5, 350 kg/m³; a/c = 0.34.

La platea dei pannelli è stata realizzata in opera con un calcestruzzo Rck 25 e per la parte del bolzone di tubo di acciaio del tirante si è usata una malta tixotropica premiscelata.

Le spalle invece sono state realizzate con un calcestruzzo Rck 25.

1.3 Documentazione disponibile

La documentazione in nostro possesso è costituita essenzialmente da corrispondenza tra Ente proprietario ed Impresa inclusi vari ordini di servizio, nella quale l'Ente, a seguito di ispezioni sui manufatti, richiede interventi per individuare l'origine dei fenomeni e di definire eventuali attività di bonifica necessarie.

Si dispone inoltre di una Relazione Tecnica a cura di un Consulente, relativa al riutilizzo del materiale proveniente dai cantieri minerari per costruzione di rilevati stradali, volta essenzialmente all'inquadramento normativo.

1.4 Oggetto dell'incarico

A seguito di incontri e colloqui con i Tecnici dell'Impresa, si è definito l'incarico affidatoci:

- ipotizzare, dalla fenomenologia dei dissesti e dalla conoscenza dei materiali in loco (costituenti il rilevato, le strutture e sovrastrutture stradali), le possibili cause dell'aggressione chimica al calcestruzzo e al ferro,
- formulare un piano di prove atte a confermare le cause ipotizzate,
- affidare a uno o più laboratori specializzati il compito di eseguire le opportune analisi,

- confermare il riconoscimento dei fenomeni chimico fisici che producono il degrado osservato,
- valutare una possibile evoluzione quali/quantitativa dei fenomeni e del danno prodotto sui manufatti.

2. Ipotesi in merito all'origine dei fenomeni

Le informazioni di carattere geologico contenute nella relazione del Consulente, anche se non conclusive in merito alla natura dei fenomeni, sono risultate determinanti per formulare un modello della loro interpretazione.

2.1 Relazione del Consulente

Il materiale che costituisce il rilevato della Strada, è uno scarto di attività minerarie. Nella relazione si legge infatti:

... la Società produttrice richiedeva all'Assessorato Industria l'autorizzazione alla cessione degli sterili risultanti dalla propria attività estrattiva nella concessione mineraria per una quantità di materiale pari a circa 300.000 m³, da destinare quale sottofondo per la realizzazione della Strada.

Detti sterili peraltro risultano costituiti oltre che da rocce incassanti non mineralizzate, anche da minerali contenenti zolfo, in particolare **Pirite FeS₂**, **Calcopirite CuFeS₂**, **Enargite Cu₃AsS₄**, i quali risultano tutt'altro che inerti.

Il Consulente dà una spiegazione incompleta di quanto effettivamente si è verificato:

L'uso del materiale e la conseguente lisciviazione con la formazione di acque acide ha comportato sempre nella stessa area manifestazioni di percolazioni giallastre tra i singoli elementi dei muri di contenimento. Seguendo complesse reazioni chimiche, tali processi portano alla formazione di sali, efflorescenze e gesso.

Nella relazione si interpretano i fenomeni in base a " lisciviazione con formazione di acque acide". Si introduce anche un riferimento al fenomeno denominato DEF (Delayed Ettringite Formation) che in questo caso sembra decisamente fuori luogo.

2.2 Ipotesi sulla presenza dell'AMD; natura del fenomeno, aspetti chimici

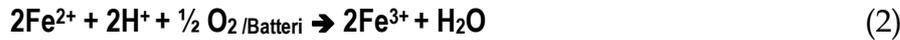
I fenomeni legati all'ossidazione degli scarti di miniera contenenti solfuri e in particolare pirite (designati nel complesso AMD o Acid Mine Drainage), sono noti e studiati da diversi decenni; si può senz'altro affermare che l'AMD è correntemente il maggiore e più difficile problema ambientale a lungo termine associato alla produzione di minerali, a livello mondiale.

Conoscendo la composizione del rilevato (presenza di solfuri), è quindi immediato associare i difetti osservati alla reazione AMD, che oltre al solfuro che si ossida, richiede la presenza di ossigeno O₂ ed avviene in ambiente umido, richiedendo quindi la presenza d'acqua.

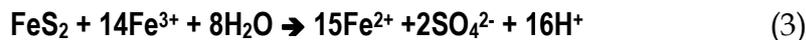
Schematicamente¹, con la Pirite FeS₂ hanno luogo le reazioni seguenti:



A questo primo stadio ne segue un secondo, al quale partecipano batteri Thiobacillus Ferroxidans, che traggono l'energia per il loro metabolismo dalla reazione:



Gli ioni Fe³⁺ in parte formano idrossido di ferro Fe(OH)₃ di color rosso/giallastro, in parte producono un'ulteriore ossidazione della Pirite secondo la reazione:



Lo ione ferroso Fe²⁺ generato nella reazione (3) si ossida a ferrico secondo la (2); in tal modo si genera un ciclo con formazione di H⁺ e SO₄²⁻, ovvero acido solforico, finché è disponibile solfuro e ossigeno.

Sia Fe²⁺ che Fe³⁺ precipitano formando idrossidi, ossidi idrati e ossidi di ferro di varia composizione, che assumono caratteristiche colorazioni giallastro e rossicce.

L'ossidazione della Pirite è la reazione più comune e più facile da verificarsi; tuttavia anche altri solfuri (Sfalerite ZnS, Galena PbS, Calcopirite CuFeS₂, Millerite NiS, Covellite CuS) possono decomporsi in ambiente acido e successivamente trasformarsi in idrossidi con formazione di acido, in ogni caso con formazione di solfato.

Si osserva che tra i prodotti della reazione sono presenti:

- *ione idrogeno H⁺, che conferisce il carattere acido all'acqua di contatto e la rende capace di agire sulla pasta di cemento sciogliendo i suoi composti e in pratica disgregando il calcestruzzo; H⁺ reagisce inoltre con il carbonato di calcio, eventualmente presente nel materiale del rilevato;*
- *ione solfato SO₄²⁻ che in presenza di ione calcio Ca²⁺, anche in ambiente acido può precipitare gesso biidrato CaSO₄·2H₂O, e può interagire con gli alluminati della pasta di cemento con formazione del composto espansivo ettringite C₃A·3CaSO₄·32H₂O.*

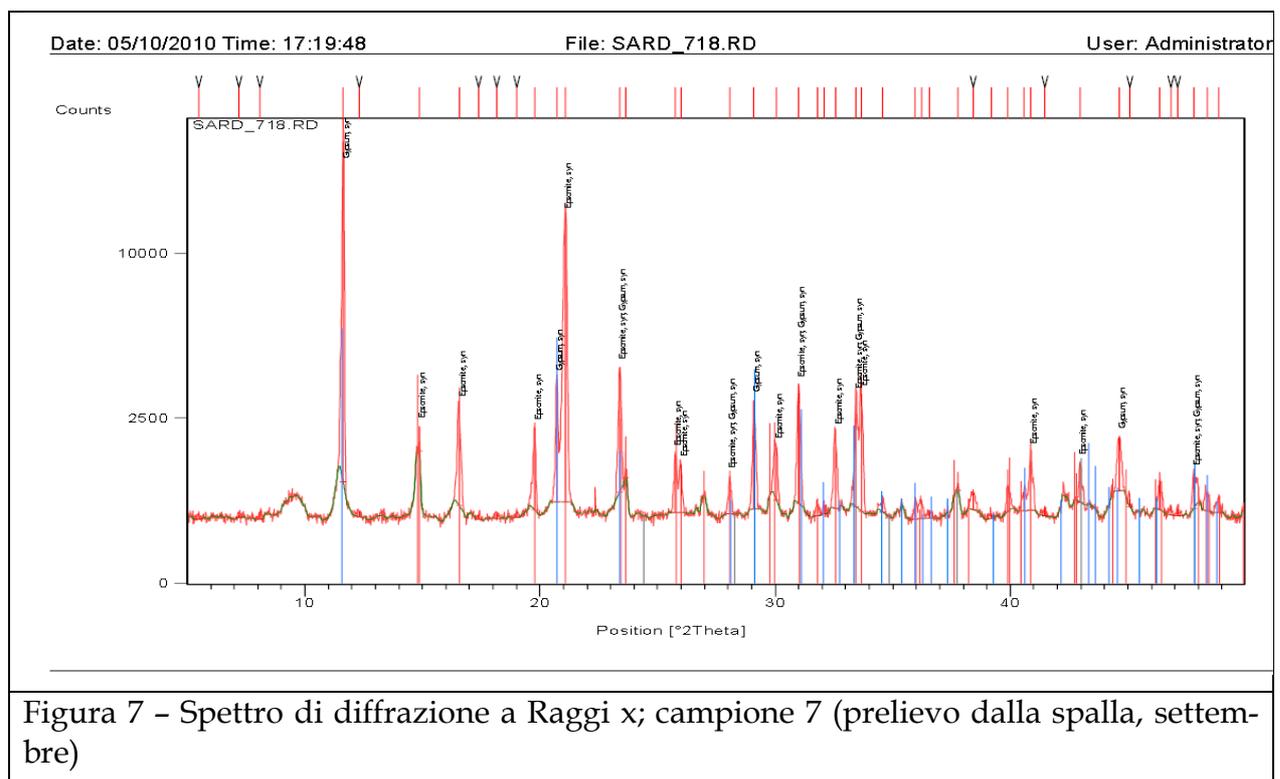
¹ Christine Costello "Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies" For U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office Washington, DC - October 2003

2.3 Sopralluogo in sito: indizi a conferma dell'AMD

Si è eseguito un sopralluogo in sito, con tecnici dell'Impresa e dell'Ente proprietario, ispezionando un Sovrappasso, dove sono stati prelevati 9 campioni di depositi formati in corrispondenza dei fori dei tiranti della cassaforma della spalla), e i Muri di sotto-scarpa dove è stato eseguito un carotaggio a secco.

Diversi indizi orientano verso la presenza della AMD, in particolare la sicura presenza di pirite nel rilevato, l'effluente molto acido (sono stati misurati pH anche inferiori a 1), la presenza di precipitati rossi e gialli dovuti agli ossidi e idrossidi di ferro.

Gli scriventi hanno inoltre eseguito esami mediante Diffrazione di Raggi X (XRD) su alcuni dei campioni suddetti. Lo spettro XRD di uno di tali campioni, riportato nella figura 7, indica che i depositi sono costituiti da gesso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ accompagnato da epsomite $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Si tratta quindi del prodotto di reazione dell'acido solforico con i diversi composti di calcio e di magnesio della miscela di cemento e aggregati.



In base alle precedenti osservazioni e conoscendo l'origine del materiale del rilevato, si è proceduto alla redazione di un piano di indagine volto a confermare la natura dei fenomeni e ad ipotizzare uno sviluppo temporale del degrado.

2.4 Sopralluogo del Novembre 2010

Successivamente sono stati eseguiti carotaggi, pull-out e anche ispezioni a tergo dei pannelli prefabbricati per l'osservazione delle condizioni dei tiranti e del calcestruzzo all'intradosso:

Si è riscontrato che lo stato del calcestruzzo e della malta premiscelata a tergo del pannello è sostanzialmente integro, l'alterazione sembra interessare al massimo 1-2 mm di profondità. Sono stati eseguiti numerosi tentativi di estrarre schegge di calcestruzzo emalta con forti colpi di martello e con aste con punta metallica ma lo stato superficiale (eccezione fatta per 1-2 mm) era molto duro e non alterato. Solo facendo leva sugli spigoli e con ripetute battute di mazza da 10 kg si è riusciti a scalfire il calcestruzzo.

La carota della Figura 8 mostra un modesto spessore di calcestruzzo (circa 2 mm) che presenta un'alterazione attribuibile all'attacco chimico da parte del materiale del rilevato. Osservazioni analoghe sono state effettuate anche nella zona dove l'acqua filtra attraverso le commessure dei pannelli, rimuovendo i depositi di solfati all'estradosso.



Figura 8 - Carota da pannello. Lo spessore del calcestruzzo alterato è di circa 2 mm.

3. Indagine

In considerazione della tipologia delle strutture e sulla base degli elementi emersi durante il sopralluogo del 14 settembre u.s. e dei carotaggi effettuati in tale data, si è stabilito di provvedere ad una campagna di prelievi e analisi volta:

- alla verifica del meccanismo del fenomeno (AMD o Acid Mine Draining)
- alla previsione del suo decorso,
- alla valutazione delle possibili strategie di intervento.

Le indagini che si è ritenuto necessario eseguire, sono le seguenti:

1. Indagini prevalentemente di carattere chimico volte alla conferma e caratterizzazione del fenomeno AMD;
2. indagine sullo stato delle strutture in cemento armato;
3. indagine preliminare sullo stato degli elementi in acciaio di sostegno dei pannelli .

3.1 Piano dell'indagine

Per gli aspetti più attinenti alla conferma dell'ipotesi proposta (punto 1 precedente,, si è pianificata un'indagine sul materiale del rilevato, allo scopo di ottenere conferme circa il meccanismo di degradazione e valutarne il potenziale residuo di aggressione: esecuzione di prelievi dal piano stradale in profondità per la successiva determinazione dei parametri più significativi.

3.1.1 Prove da eseguire e loro significato

Come si è detto le prove da eseguire sono le seguenti: contenuto in pirite (mediante diffrazione RX), pH, solfuri totali, presenza di Thiobacillus Ferroxidans. Si è anche stabilito di effettuare prove di corrosione dell'armatura, seppure in numero limitato.

- La prova per la determinazione quantitativa della pirite mediante XRD consente di valutare la potenziale quantità di H_2SO_4 che può essere generato a seguito della reazione.
- La presenza di Thiobacillus Ferroxidans conferma l'idoneità dell'ambiente del rilevato alla proliferazione del bacillo e quindi al proseguire dell'ossidazione della pirite e dello sviluppo di acido solforico.
- Il valore del pH è utile per verificare che la reazione AMD sia attualmente in atto.
- I solfuri totali per una valutazione orientativa del potenziale complessivo di formazione di acido e solfato.
- La determinazione del potenziale di corrosione, che può consentire la valutazione di un'eventuale influenza dell'ambiente acido sul fenomeno.

3.1.2 Localizzazione dei prelievi

La figura seguente mostra lo schema di prelievo dei campioni; in tutto sono stati prelevati 25 campioni.

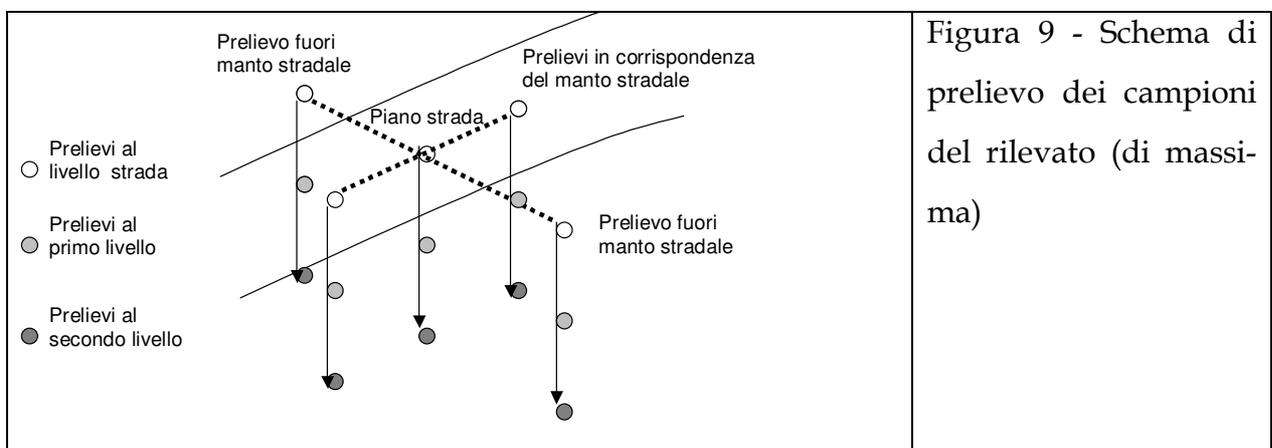


Figura 9 - Schema di prelievo dei campioni del rilevato (di massima)

3.2 Risultati ottenuti

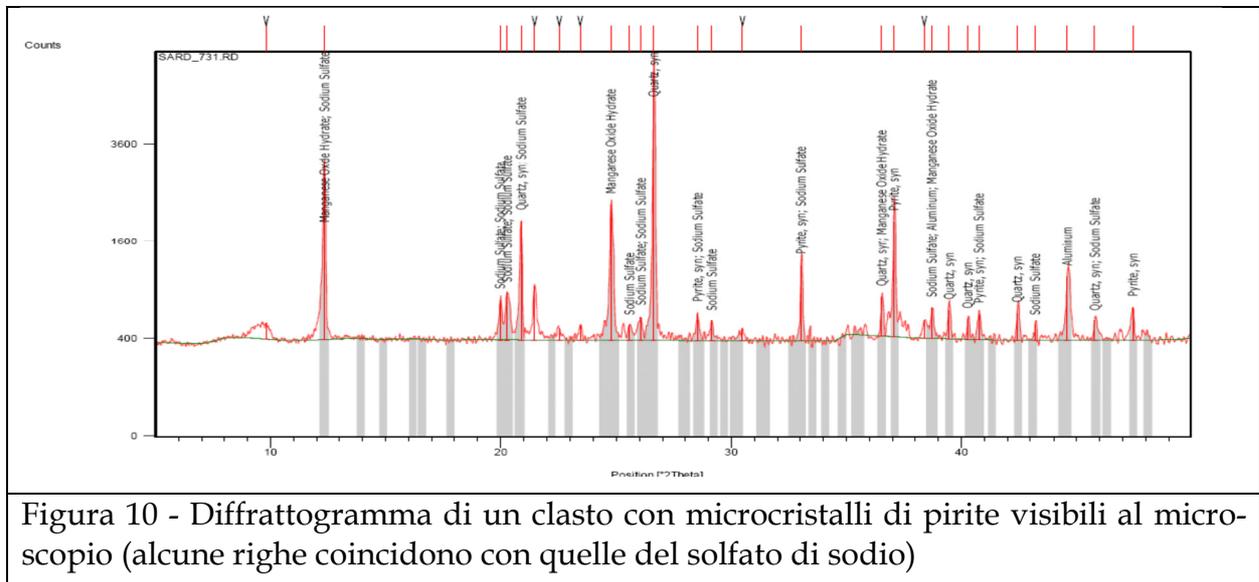
3.2.1 Analisi della Pirite

Sono stati esaminati 12 campioni del rilevato per la determinazione del tenore di pirite, mediante analisi diffrattometrica quantitativa con tecnica Rietveld.

L'esame dei valori ottenuti mostra la presenza di Pirite in tutti i campioni, in percentuale alquanto variabile. I valori relativi alla frazione 0 - 1 mm, superano il 9% di Pirite, con un valore medio del 5%; tenendo conto della percentuale di detta frazione nel campione completo, si può calcolare la concentrazione di Pirite in ciascun campione, variabile da 0.2 a 1.7%, **con un valor medio di poco meno dello 0.9%**. Si è proceduto in questo modo allo scopo di facilitare il riconoscimento e la determinazione quantitativa della pirite selezionando la frazione fine, qualora fosse contenuta in percentuali esigue.

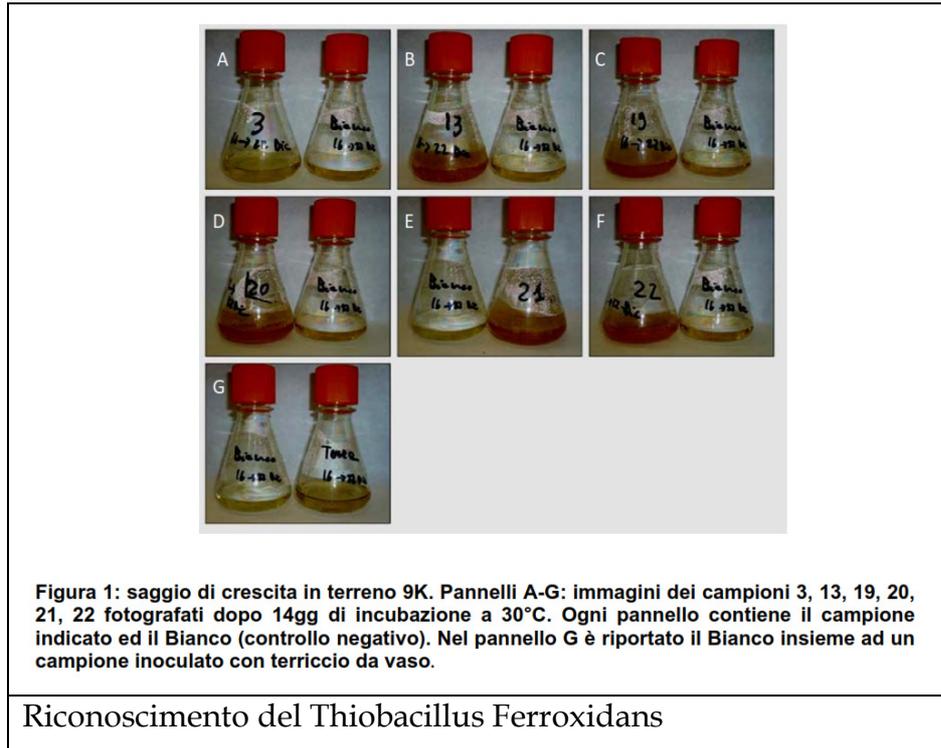
Lo 0.9% è senza dubbio una quantità ragguardevole, come si vedrà in seguito.

Si deve altresì considerare che il materiale trattenuto al vaglio da 1 mm non è certamente costituito solo da roccia incassante; gli scriventi hanno esaminato clasti di pezzatura centimetrica, osservando al microscopio su alcuni di essi minuscoli cristalli di pirite ben formati e facilmente riconoscibili: lo spettro XRD ha poi confermato la presenza del minerale (figura 10). Se ne può dedurre che il valore medio complessivo della concentrazione è senz'altro superiore a quello riportato.



3.2.2 Presenza e attività del Thiobacillus Ferroxidans

Cinque campioni dei sei esaminati da un Laboratorio di Biologia Universitario mostrano la presenza del Thiobacillus Ferroxidans: le colonie di batteri osservate appaiono molto numerose. I campioni risultati positivi provengono dai rilevati realizzati con materiale della cava; il sesto campione proveniente da altro sito, è stato utilizzato a scopo di confronto.



3.2.3 Solfuri totali

I dati ottenuti con disgregazione ossidativa indicano valori molto elevati già discussi.

3.2.4 pH

I valori di pH, misurati con un Metodo Ufficiale Scienza del Suolo, danno per tutti i campioni valori inferiori alla neutralità ed alcuni mostrano valori decisamente acidi, fino a pH 1.9.

3.2.5 Potenziale e velocità di corrosione

I risultati di questa indagine eseguita dagli scriventi (v. foto seguente), a carattere come si è detto orientativo, sono commentati nel seguito.



4. Analisi e interpretazione dei risultati

A partire dai risultati ottenuti con l'attività sperimentale, nei seguenti paragrafi vengono svolte alcune considerazioni in merito alla situazione dei manufatti indagati.

4.1 Presenza della pirite e attività del fenomeno AMD

La presenza del fenomeno di trasformazione della Pirite con la partecipazione del Thiobacillus è dimostrata a di là di ogni dubbio.

Le percentuali in massa della Pirite nella frazione fine, passante a 1 mm, sono elevate, raggiungendo il 10%.

È altresì dimostrata la presenza di abbondanti colonie del Thiobacillus su cinque campioni dei sei esaminati.

È quindi evidente che è in corso un copioso sviluppo dei prodotti della reazione AMD più aggressivi nei confronti del calcestruzzo e dell'armatura:

- acido solforico H_2SO_4 , che conferisce pH anche bassissimi (1 - 2) all'effluente e interagisce con la pasta di cemento ed eventualmente depassiva le barre dell'armatura (è noto che il pH che favorisce la passività è >10).
- Ione solfato SO_4^{2-} , che causa la formazione di cristalli di gesso, epsomite e altri composti in prossimità del calcestruzzo, con effetto localmente distruttivo (sviluppo della pressione di cristallizzazione), reagendo inoltre con gli alluminati della pasta cementizia, con formazione di ettringite accompagnata da effetto espansivo distruttivo.

Come si è detto in precedenza, la Pirite è il materiale più reattivo dal punto di vista dell'AMD. Tuttavia anche gli altri solfuri presenti possono contribuire alla formazione di acido e solfato, anche se l'entità del loro contributo è a priori difficilmente valutabile. I risultati dell'analisi indicano che il contenuto di zolfo da solfuri totale (incluso cioè quello contenuto nella pirite) è elevato, rendendo più severa la situazione effettiva.

4.2 Correlazioni

Con i dati ottenuti nel corso della sperimentazione, si è cercato di correlare le varie caratteristiche (contenuto di Pirite, popolazione dei batteri, pH), tenendo conto anche di valutazioni del grado di umidità: tale tentativo non ha dato esito positivo.

Questo risultato non deve sorprendere: il fenomeno nel suo complesso dipende in modo pronunciato da fattori non controllati, in particolare l'effettiva presenza d'acqua e la possibilità di accesso di ossigeno nel rilevato, che possono variare di molto da un punto di prelievo ad un altro.

Si ritiene quindi opportuno, per valutare la situazione, riferire i risultati ad un valutazione media del contenuto di Pirite nel rilevato.

4.3 Potenziale sviluppo di acido solforico

Il contenuto medio attuale di Pirite nella frazione passante a 1 mm nel rilevato è prossimo al 5% in peso (dati dell'analisi diffrattometrica). Da questo valore, ipotizzando la

trasformazione completa, è possibile determinare un ordine di grandezza della quantità di acido solforico che verrà prodotta. Naturalmente non è possibile proporre una valutazione della cinetica di trasformazione (che dipende dalla disponibilità di acqua e dall'accesso di ossigeno), né si può prevedere quale parte dei solfuri non-pirite si potrà ossidare.

Con riferimento all'equazione (1) precedente, si osserva che da 14 moli di FeS_2 si formano 14 moli di acido solforico H_2SO_4 , e che per ossidazione da parte del thiobacillus e reazione della forma ossidata Fe^{3+} con una ulteriore mole di Pirite (3) si generano altre otto moli di acido.

Secondo questo schema pertanto, da 15 moli di FeS_2 si generano 22 moli di acido solforico². Traducendo in pesi di materiali, si può scrivere:



1,800 kg 2,158 kg

Supponendo che la massa volumica apparente del rilevato sia di 1800 kg/m³, e con riferimento alla percentuale media in massa di Pirite dello 0,9%, (pari a 14,4 kg/m³), si ricava la quantità potenziale di acido dalla proporzione:

$$x \text{ kg di H}_2\text{SO}_4 \text{ da } 1 \text{ m}^3 \text{ di rilevato} : 14,4 \text{ kg Pirite per un m}^3 \text{ di rilevato} = 2,158 : 1,800$$

L'acido che può essere prodotto è pari a circa 19,4 kg/m³ di rilevato.

Si ribadisce trattarsi solo di un ordine di grandezza (per difetto).

Una valutazione degli aspetti cinetici è possibile, ma richiede un approccio del tutto diverso, di carattere sperimentale più approfondito.

4.4 Aspetti corrosionistici

Gli scriventi, hanno eseguito un numero limitato di prove in sito per la determinazione della velocità e il potenziale di corrosione. Occorre precisare che, data la numerosità delle letture, tali prove hanno un valore statistico limitato.

I risultati ottenuti hanno indicato:

- Condizioni di corrosione in atto sull'armatura localizzata allo spigolo verticale dei pannelli interessati dall'aggressione acida,
- un effetto modesto o insignificante della natura del rilevato (con sterili o senza),
- una condizione della spalla quale ci si poteva attendere in un manufatto dell'età e del tipo indicato (Rck 25).

² Si tenga presente che il ferro tende solo in parte a formare FeSO_4 poiché in parte forma ossidi idrati di ferro. Inoltre, per semplicità, si considera solo la prima fase della reazione (3).

5. Conclusioni

I fenomeni di degrado rilevati su alcuni manufatti strada, realizzati circa 10 anni orsono dall'Impresa, sono dovuti ad un fenomeno designato AMD (Acid Mine Drainage) conosciuto e studiato almeno dagli anni '70, originato dalla presenza di solfuri naturali (in particolare Pirite FeS_2). Le reazioni ossidative in presenza del *Thiobacillus Ferroxidans* di questi minerali producono fra l'altro acido solforico e solfati.

La presenza del fenomeno e i meccanismi della reazione sono stati confermati mediante appropriate indagini, le quali hanno anche consentito la valutazione di un ordine di grandezza della quantità di acido che potenzialmente potrebbe formarsi, senza peraltro informazioni sugli aspetti cinetici.

I prodotti della reazione sono sostanze fortemente aggressive per i manufatti in calcestruzzo e in acciaio, che mostrano nei punti colpiti (in particolare dove si verifica percolazione d'acqua verso l'esterno delle strutture) sia vistosi depositi di solfati, sia gli effetti, dell'attacco chimico al calcestruzzo, sia quelli più gravi sui manufatti in acciaio.

Le osservazioni dello spessore di calcestruzzo alterato all'intradosso e all'estradosso dei pannelli, indicano peraltro che la profondità dell'attacco chimico al calcestruzzo è ad oggi limitata; ciò si deve con ogni probabilità sia al fatto che la fase liquida aggressiva trova dei percorsi preferenziali nella massa del rilevato e fuoriesce verso l'esterno, sia al fatto che il ristagno di liquido in prossimità dell'intradosso dei pannelli ma nella parte centrale, quindi lontana dai giunti, ne causa un esaurimento della capacità aggressiva, sia infine al fatto che le concrezioni di solfato poco solubile sono capaci di un'azione protettiva nelle zone di calcestruzzo danneggiato.

Pertanto la potenziale capacità aggressiva dei prodotti di reazione viene mitigata dai meccanismi appena descritti e quindi si può ritenere che la vita nominale dell'opera rimanga sostanzialmente invariata.

Un'indagine di portata limitata sulle condizioni dell'armatura di alcuni manufatti, ha mostrato condizioni di corrosione in atto in prossimità dei giunti e sulla spalla di un cavalcavia, ma non un effetto generalizzato associabile alla presenza della reazione AMD nel rilevato.

Interventi correttivi sono possibili e il loro studio potrebbe costituire lo sviluppo di questa indagine.

La responsabilità di quanto si è verificato va attribuita all'Ente che ha proposto e autorizzato lo scarto della Miniera per la realizzazione del rilevato.