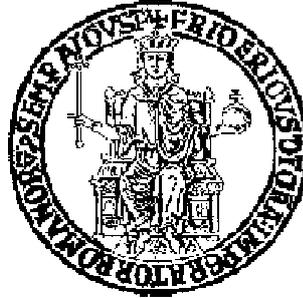


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
“FEDERICO II”



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

CORSO DI STUDIO MAGISTRALE IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

TESI DI LAUREA

Modellazione matematica dei processi di Corrosione del Calcestruzzo
Influenzata Microbiologicamente (MICC)

Relatori

Prof. Berardino D'Acunto

Ing. Luigi Frunzo

Candidata

Federica Adele Fusciello

matricola M67/083

Anno Accademico 2013 – 2014

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi è volto all'implementazione di un codice di calcolo numerico finalizzato all'analisi del fenomeno di biocorrosione.

Per biocorrosione, o più propriamente Corrosione Influenzata Microbiologicamente (MIC), si intende il fenomeno fisico di corrosione dei materiali dovuto allo sviluppo di colonie batteriche sulla superficie dei materiali stessi.

Negli ultimi decenni, numerose sono le strutture in cemento armato che hanno mostrato gravi problemi di durabilità, principalmente dovuti all'esposizione ad ambienti acquosi aggressivi che ne hanno causato la corrosione. Tali problemi sono ben visibili soprattutto nei sistemi fognari, nelle strutture sotterranee ed idrauliche, negli impianti chimici, nelle strutture industriali, agricole e in quelle situate in ambienti marini. Il problema della biocorrosione va ad incidere, quindi, su una vasta classe di sistemi e per questo si sta puntando ad una sempre più ampia conoscenza del fenomeno e dei microrganismi coinvolti, al fine di giungere ad un'analisi completa che porterebbe all'efficientamento ingegneristico dei sistemi suddetti, quindi la prevenzione della corrosione, ed in definitiva ad un risparmio economico.

Di grande interesse è quello che succede nelle condotte fognarie in calcestruzzo in cui l'acido solforico prodotto dai microrganismi presenti è stato identificato come il principale agente corrosivo.

Gli studi sull'argomento hanno portato a definire due principali categorie di batteri responsabili della MICC (Corrosione del Calcestruzzo Influenzata Microbiologicamente), i batteri-solfato-riduttori (SRB) e i batteri-zolfo-ossidanti (SOB).

Gli SRB utilizzano lo ione solfato SO_4^{2-} , onnipresente nelle acque reflue, come fonte di ossigeno per l'assimilazione della materia organica, portando al rilascio di solfuro di idrogeno disciolto $H_2S_{(aq)}$ come sottoprodotto del metabolismo microbico all'interno dell'acqua. In condizioni di turbolenza o aerazione, le acque reflue rilasciano il gas disciolto come H_2S libero. Una volta che l'idrogeno solforato gassoso diffonde nello spazio aerea al di sopra dell'acqua di scarico, gli SOB, principalmente del genere *Thiobacillus*, metabolizzano l'idrogeno solforato ossidandolo ad acido solforico H_2SO_4 . Sarà proprio l'acido solforico che reagendo con il calcestruzzo, porterà alla conversione del materiale cementizio in gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

Analizzato l'aspetto chimico del fenomeno, è stata posta l'attenzione sul secondo step del processo sopra esplicitato, ovvero l'azione della seconda famiglia microbica in quanto produce l'agente corrosivo che genera il deterioramento del materiale.

Dal punto di vista matematico, il fenomeno della biocorrosione si traduce in un problema a doppia frontiera mobile. Le due frontiere mobili alle quali si fa riferimento sono, da una parte quella dovuta alla crescita dei biofilm sulla superficie di calcestruzzo e dall'altra quella di arretramento della superficie di calcestruzzo convertita in gesso per azione della corrosione.

Nel presente elaborato di tesi, sono state innanzitutto definite le equazioni che governano lo spostamento del fronte corrosivo. Il biofilm è stato supposto in condizioni di stazionarietà e il modello che ne è derivato è stato trattato come un problema a singola frontiera libera.

È stato poi sviluppato un software di calcolo tramite la piattaforma MatLab® per l'integrazione numerica del modello. Infine, sono state sviluppate delle simulazioni numeriche al fine di predire quella che viene detta "velocità di corrosione", cioè la variazione dell'interfaccia calcestruzzo/gesso nel tempo, obiettivo fondamentale per gli sviluppi dei sistemi di prevenzione.

A partire da questi modelli e dalla conoscenza sui fenomeni che interessano i biofilm è stato possibile definire un sistema di equazioni alle derivate parziali in grado di valutare il tasso di corrosione. Innanzitutto è stato inquadrato il dominio del problema, ovvero uno spazio fisico costituito da uno strato di biofilm, uno strato di gesso e infine il calcestruzzo. Per ogni compartimento sono state definite le equazioni che matematicamente rappresentano i fenomeni chimici, fisici e biologici che interessano le specie chimiche in gioco. Per quanto riguarda il biofilm la reazione di ossidazione porta al consumo di H_2S e O_2 e alla produzione di H_2SO_4 , questo induce una variazione della concentrazione di tali elementi all'interno del biofilm stesso, con la conseguenza di innescare anche un fenomeno diffusivo, per cui per le tre specie chimiche si fa riferimento ad equazioni diffusivo-reattive. La parte reattiva dell'equazione è definita dalla legge di Michaelis-Menten che valuta il tasso di consumo di un substrato ad opera dell'azione di sintesi microbica. L'acido solforico qui prodotto è poi soggetto alla diffusione all'interno del gesso per giungere all'interfaccia con il calcestruzzo dove si avvia la reazione di corrosione definita da una condizione al bordo, che può essere ritenuta una sorta di condizione di Stefan, in quanto da la possibilità di valutare lo spostamento del fronte corrosivo nel tempo.

Definite le equazioni, una parte molto importante di questo lavoro è stata quella della ricerca del metodo di calcolo più idoneo per la risoluzione del sistema. Si è optato per un metodo alle differenze finite con numero di punti variabile. La risoluzione con le differenze

finite, infatti, prevede la discretizzazione del dominio in un numero finito di punti in cui andare a valutare numericamente il valore di una funzione, poiché in questo modello il dominio varia, per lo spostamento della frontiera, esso verrà suddiviso dal software in un numero di punti sempre crescente, al variare dello spessore di gesso, mantenendo invece costante il passo spaziale.

Un'altra problematica affrontata in questo studio è stata quella della definizione numerica di tutti i parametri, quali i coefficienti di diffusione e le costanti cinetiche, coinvolti nell'equazioni del modello. I valori numerici sono stati trovati tramite una calibrazione manuale a valle di un confronto con delle misurazioni, fatte a 40, 80, 180 e 365 giorni, dello spessore dello strato di gesso valutate in uno studio francese preso come riferimento.

Una volta noti tutti i parametri è stato possibile avviare delle simulazioni che hanno portato alla definizione di un tasso di corrosione pari a 6.7 mm/anno , in accordo con i valori riscontrati in letteratura. I risultati delle simulazioni sono mostrati nelle figure da 1 a 4.

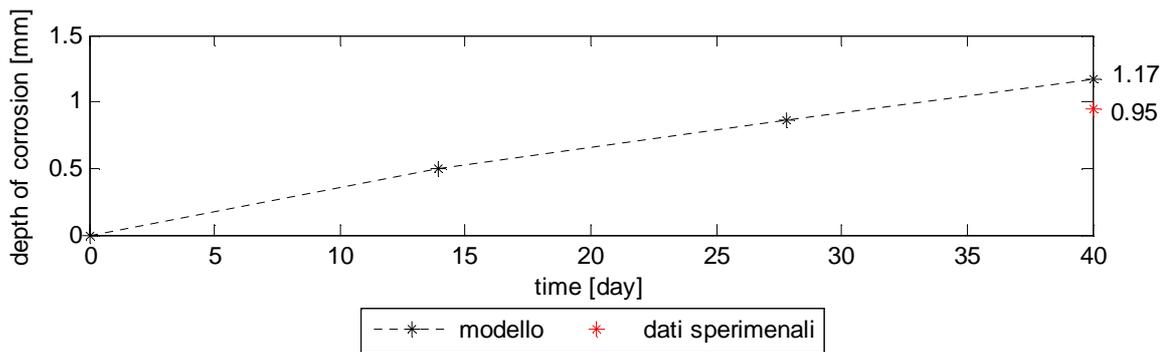


Fig. 1. Variazione del fronte corrosivo a 40 giorni.

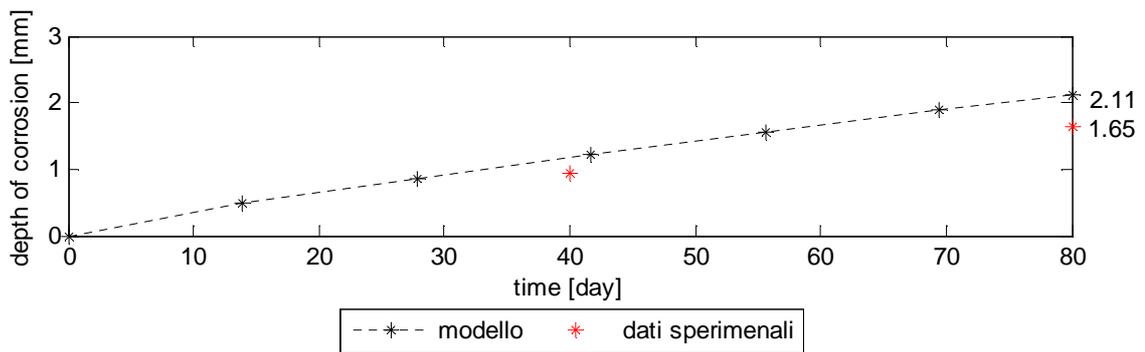


Fig. 2. Variazione del fronte corrosivo a 80 giorni.

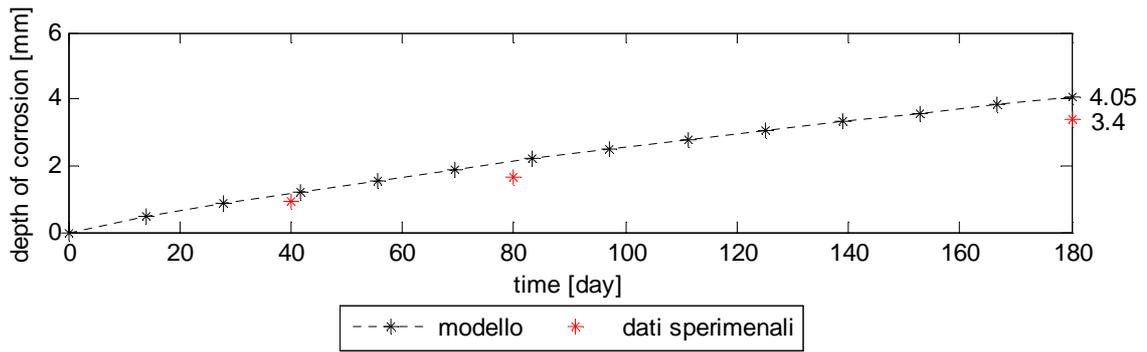


Fig. 3. Variazione del fronte corrosivo a 180 giorni.

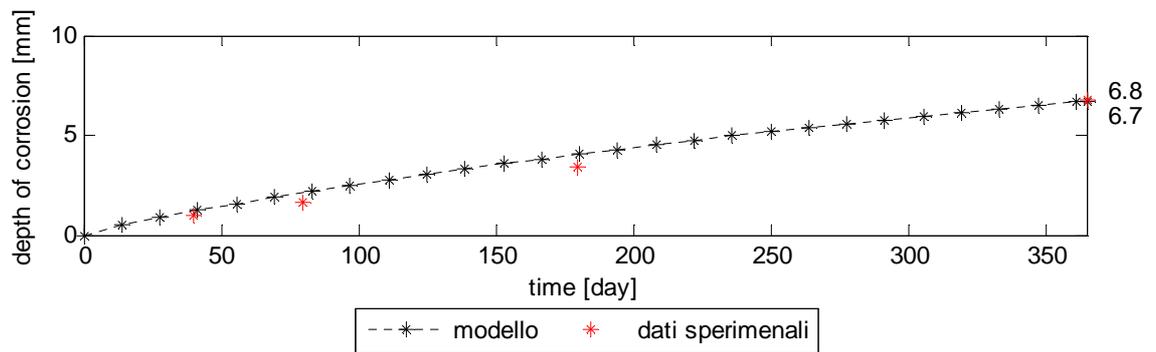


Fig. 4. Variazione del fronte corrosivo a 365 giorni.

Quindi, in conclusione, si può affermare che l'obiettivo proposto dal lavoro è stato raggiunto. Inoltre a partire da questi valori sono state effettuate anche simulazioni per un tempo di osservazione di 10 anni, Fig. 5, al fine di comprendere l'evoluzione del fenomeno a lungo termine, in quanto con una sperimentazione di laboratorio tali dati non possono essere valutati. Le simulazioni a lungo termine diventano uno strumento necessario soprattutto ai fini della prevenzione e quindi della manutenzione delle opere ingegneristiche che sono soggette al fenomeno della corrosione da acido solforico biogenico.

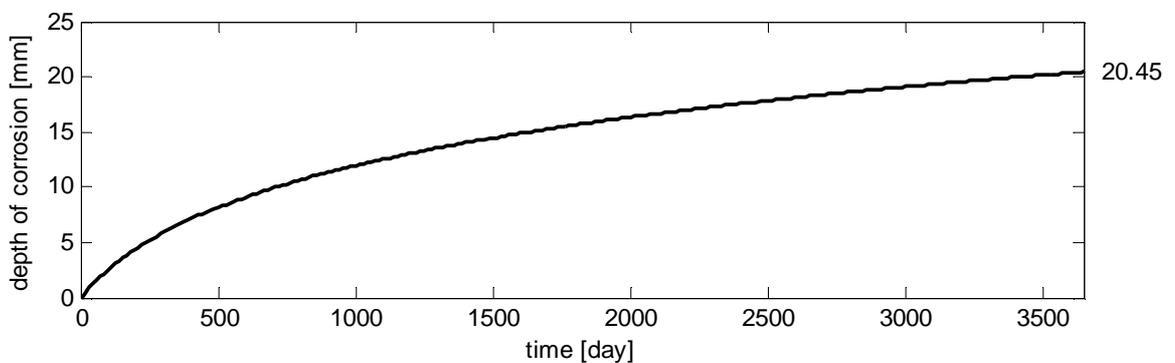


Fig. 5. Variazione del fronte corrosivo a 10 anni.