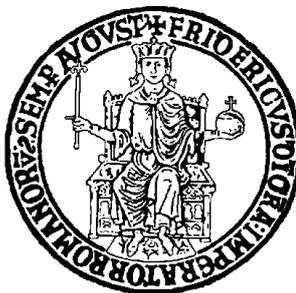


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI *FEDERICO II***



Corso di Laurea Specialistica in

**INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,**

**EDILE E AMBIENTALE**

SINTESI DELL'ELABORATO DI LAUREA

**INDAGINI SPERIMENTALI SUGLI EFFETTI DELL'ACQUA DI FALDA  
SUI MATERIALI COSTITUENTI I MANUFATTI INTERRATI DELLA  
LINEA 6 DELLA METROPOLITANA DI NAPOLI**

*RELATORE*

*Ch.mo Prof. Ing. Francesco Pirozzi*

*CORRELATORI*

*Dott. Ing. Antonio Di Luccio*

*Dott. Ing. Panico*

*CANDIDATA*

*Alessandra Corleto*

*Matr. 324/268*

ANNO ACCADEMICO 2012/2013

## *Abstract*

La costruzione di una galleria in un terreno sede di falda acquifera richiede particolari precauzioni al fine di escludere il verificarsi di fenomeni di degrado dei materiali utilizzati per la realizzazione ed il mantenimento in esercizio dell'opera, attribuibili al contatto tra essa e l'acqua presente nel sottosuolo.

Tali fenomeni, che possono interessare tanto la matrice di calcestruzzo quanto le barre di armatura, sono molteplici e la loro entità dipende in gran parte dalle caratteristiche dei materiali utilizzati e dalla presenza e relativa concentrazione di determinate sostanze aggressive disciolte in acqua. Il degrado dei materiali può essere conseguenza sia di processi di tipo fisico, quali cicli gelo-disgelo, alte temperature, ritiro e fessurazione, etc, che di tipo chimico, quali attacco da solfati, cloruri e anidride carbonica o reazione alcali-aggregati, etc.

Seppur contraddistinte da una minor frequenza di accadimento, tra le cause di degrado si annoverano anche lo stress di tipo meccanico e difetti nella procedura di confezionamento dei materiali.

Nel lavoro di tesi è stato affrontato, avvalendosi dei risultati conseguiti da prove sperimentali all'uopo eseguite, il problema del decadimento delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche del calcestruzzo adoperato per la realizzazione della galleria ferroviaria della tratta Mergellina-Piazza Municipio della Linea 6 della Metropolitana di Napoli (Figura 1), per effetto di un'eventuale aggressione chimica compiuta dall'acqua della falda in cui essa è immersa.

Contestualmente è stata stimata la velocità media annua di corrosione dei cavi di rame, anch'essi immersi in falda al pari della galleria, ed utilizzati come dispersori di corrente nel sottosuolo.



Figura 1 – Tratta Mergellina-Municipio della Linea 6 della Metropolitana di Napoli

L'esecuzione delle attività sperimentali è stata preceduta da una duplice campagna di campionamenti d'acqua di falda in diversi punti del percorso lungo il quale si sviluppa la galleria e dal prelievo di provini di calcestruzzo all'interno della galleria stessa.

A seguito di una caratterizzazione chimica dell'acqua di falda volta a determinare il contenuto di quei sali (cloruri, solfati, silicati e solfuri) che, in accordo con la letteratura tecnica, più di altri sono responsabili del degrado chimico del calcestruzzo, i provini sono stati posti per un periodo di circa cinque mesi all'interno di contenitori in grado di riprodurre le reali condizioni di pressione a cui la galleria è sottoposta, riempiti con i diversi campioni d'acqua prelevati in falda (Figura 2).



Figura 2 – Contenitori in PVC

Settimanalmente, da ciascun contenitore, è stata prelevata dell'acqua destinata ad essere analizzata chimicamente. La lettura dell'andamento assunto nel tempo dalle concentrazioni dei diversi sali disciolti in acqua ha consentito uno studio delle conseguenze di un contatto prolungato tra il calcestruzzo e l'acqua di falda.

Per completezza, sono stati misurati anche i contenuti di calcio, magnesio, ferro e rame, sia nei campioni d'acqua indisturbati, sia in quelli sottoposti al contatto con il calcestruzzo, alla fine del periodo di osservazione.

Analisi condotte sulla superficie esterna ed interna dei provini in calcestruzzo, che per cinque mesi sono stati immersi in acqua, sono servite a valutare l'entità dei possibili danni che l'acqua di falda può arrecare al calcestruzzo.

Infine, prove di natura elettrochimica eseguite sui cavi in rame hanno permesso di effettuare una stima della velocità di corrosione a cui essi sono soggetti quando sono immersi in acqua di falda e percorsi da corrente.

Le analisi dell'acqua effettuate settimanalmente durante l'intero periodo di osservazione hanno evidenziato concentrazioni costanti di silicati e solfuri, un leggero aumento del pH ed un adsorbimento superficiale di sostanze quali cloruri e solfati nelle prime settimane, a cui ha fatto seguito una stabilizzazione dei valori (nella Figura 3 sono riportati gli andamenti rilevati nelle acque emunte dal Pozzo 1).

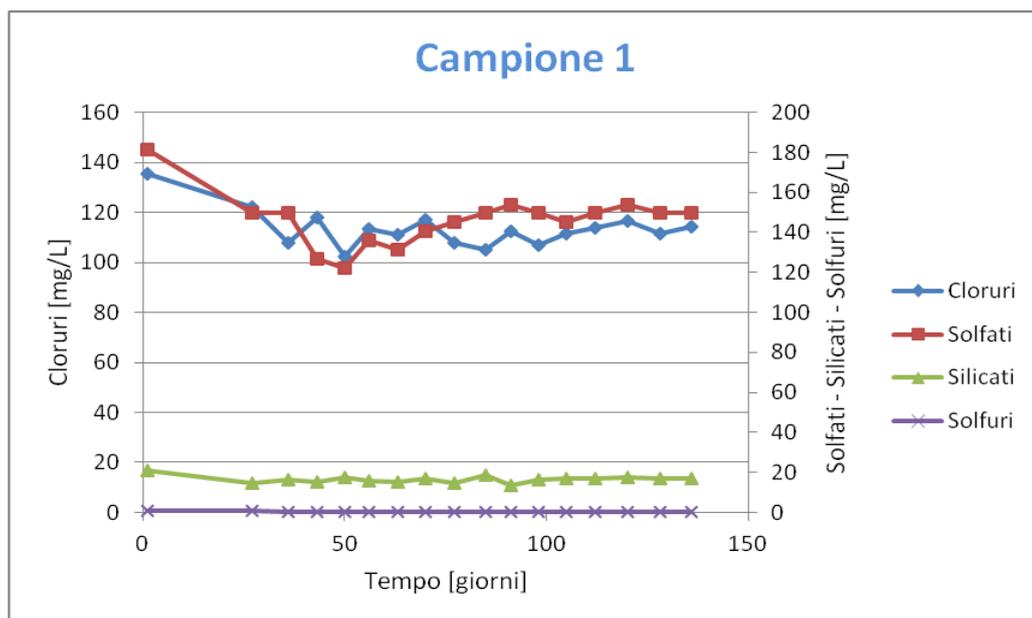


Figura 3 – Variazione della concentrazione di cloruri, solfati, silicati e solfuri nel tempo nel Campione 1

L'unica eccezione ha riguardato il provino di calcestruzzo immerso nel campione di acqua numero 7, che nei primi giorni di contatto ha rilasciato un modesto, ma non trascurabile, quantitativo di ioni  $\text{Cl}^-$ , con ogni probabilità provenienti dagli inerti.

Per quanto riguarda i metalli, le concentrazioni di magnesio hanno subito variazioni molto limitate a valle del contatto con i provini in calcestruzzo, mentre più significative sono state le variazioni del contenuto di calcio. In particolare, hanno avuto luogo fenomeni di precipitazione con il carbonato nelle acque con un contenuto iniziale di calcio maggiore; viceversa, si è verificato un rilascio dal calcestruzzo all'acqua laddove inizialmente il calcio era presente in quantità minori.

Le concentrazioni finali di ferro appaiono decisamente inferiori rispetto a quelle iniziali; questo fenomeno si spiega con la precipitazione del ferro che è passato dal suo stato ferroso (solubile) a quello ferrico (insolubile) una volta che l'acqua di falda è venuta a contatto con l'atmosfera e, quindi, con l'ossigeno in essa contenuto.

In tutti i campioni analizzati, infine, la concentrazione di rame misurata è risultata nulla.

L'esito delle prove eseguite sui provini di calcestruzzo ha confermato i risultati dedotti dalle analisi chimiche svolte sui campioni di acqua:

- la prova colorimetrica con fluoresceina e nitrato d'argento ha evidenziato il solo adsorbimento superficiale degli ioni cloruri, escludendone la penetrazione all'interno del provino in calcestruzzo;
- la prova per diffrazione a raggi X ha avvalorato l'assenza di attacco solfatico, non rilevando la presenza di ettringite e gesso;
- con un'attenta analisi visiva, è stata accertata l'assenza di fessurazioni e rigonfiamenti sui provini, dovuti alla reazione tra alcali ed aggregati;
- la contenuta variazione di peso ha consentito l'esclusione del fenomeno del dilavamento.

In conclusione, a valle delle indagini sperimentali, si può affermare che i provini di calcestruzzo rispondono uniformemente alle prove a cui sono stati sottoposti, e che, quindi, risultano avere caratteristiche estremamente simili tra loro. Il calcestruzzo risulta, inoltre, caratterizzato oltre che da un'efficace impermeabilità, che evita la penetrazione di acqua di falda e con essa di sostanze aggressive negli strati interni, anche da una soddisfacente resistenza all'aggressione chimica.

Per testare la resistenza alla corrosione del rame utilizzato per la realizzazione di dispersori sotterranei che verranno installati in galleria, sono state effettuate misure di polarizzazione potenziodinamica, che hanno consentito l'individuazione di una velocità di corrosione media, dalla quale è stato possibile desumere una durata approssimata di tali elementi. I risultati delle prove elettrochimiche hanno evidenziato l'esistenza di una correlazione tra la velocità di corrosione media ed il contenuto dei principali ioni nell'acqua di falda.

Dai valori di velocità ricavati dalle indagini effettuate, si può concludere che, ipotizzando che ci sia un sufficiente apporto di ossigeno ed ipotizzando un consumo uniforme del metallo, in corrispondenza della velocità di corrosione minima, la vita utile del dispersore è di circa 200 anni, mentre in corrispondenza della velocità di corrosione massima, la vita utile del dispersore si riduce a circa 40 anni. Tali valori rappresentano sicuramente una stima a vantaggio di sicurezza, essendo stati ricavati per i singoli fili di rame e non per l'intero cavo da essi formato.

Va precisato, però, che quest'intervallo temporale tiene conto della sola corrosione del rame, dovuta al contatto con l'acqua. trascurando che, con la formazioni di ossidi sulla superficie del cavo, la resistenza al passaggio della corrente andrà via via aumentando. Diminuirà, quindi, l'intensità di corrente che il dispersore riuscirà a dissipare. Non può escludersi, quindi, che possa essere questo il fattore che renderà effettivamente inadeguato il cavo dopo un certo periodo di esercizio: tale ipotesi potrà essere confermata solo mediante indagini più approfondite.