

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

XXII CONVEGNO NAZIONALE
DI GEOTECNICA

Palermo 22-24 settembre 2004

VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI
DI SICUREZZA E ADEGUAMENTO
DELLE OPERE ESISTENTI

Estratto

PATRON EDITORE
BOLOGNA

ANALISI DELL'INFLUENZA DELLE PRESSIONI AMBIENTALI SULLA DEGRADAZIONE IN SITO DI STRUTTURE DI FONDAZIONE IN CEMENTO ARMATO.

Di Francesco R.

GEO&GEO Instruments, Corso Cerulli, 59 – Teramo (TE)

SOMMARIO

In Italia sono prodotti ogni anno 120 milioni di metri cubi di calcestruzzo: in un paese in cui la predominanza nell'utilizzo di tale risorsa è così evidente ci si aspetterebbe di ritrovare nelle opere realizzate con tale tecnologia un livello qualitativo medio, in termini di caratteristiche prestazionali e di durabilità, decisamente elevato, fatto che non trova corrispondenza nella realtà del costruito. Con il presente lavoro vengono analizzati campioni di calcestruzzo provenienti da strutture in esercizio e talora risultate gravemente ammalorate, cercando di individuare la patologia responsabile dei vari casi di degrado, eventuali difetti esecutivi ed infine risalire, laddove possibile, alle pressioni ambientali che l'hanno determinata. Il lavoro viene completato con la comparazione tra le analisi dei moderni calcestruzzi e quelle delle malte costituenti le fondazioni del Teatro Galli di Rimini (XVII sec.) ed infine con un'analisi numerica ad elementi finiti applicata agli interventi di consolidamento di quest'ultime, utilizzando un modello di "invecchiamento" implementato nel software commerciale Z_SOIL.PC 2003.

Parole chiave: calcestruzzo, degradazione, analisi strumentale, modelli numerici

1 INTRODUZIONE

La presente nota è riferita ad uno studio delle patologie più comuni che affliggono le opere realizzate in calcestruzzo armato per effetto dell'interazione struttura-suolo-aria.

I calcestruzzi analizzati sono stati prelevati dalle fondazioni di opere ingegneristiche in esercizio e consistenti in 2 ponti ad arco (anni '50-'60), il teatro Galli di Rimini (XVII sec.) e la calotta di rivestimento dei "Laboratori di Fisica Nucleare del Gran Sasso" considerati come una popolazione di dati statisticamente rappresentativa di condizioni di pressioni ambientali anche molto diverse tra loro. Ad esclusione dell'ultima struttura, le analisi eseguite hanno mostrato ovunque seri fenomeni di degrado che dimostrano, ancora una volta, come la progettazione dell'opera deve tenere conto non solo delle caratteristiche meccaniche (classe di resistenza), ma anche delle possibili interazioni con l'ambiente al quale l'opera è destinata ad essere esposta (classe di pressione ambientale).

Considerando che sostanzialmente i calcestruzzi possono essere equiparati a "pietre artificiali", si è voluto offrire uno spunto di indagine mediante tecniche strumentali sofisticate, capaci di fornire un "quadro

clinico" volto alla ricostruzione delle vicissitudini delle strutture di derivazione a partire dal momento del confezionamento dei conglomerati cementizi e relativa posa in opera fino ai giorni nostri, attraverso le trasformazioni subite a causa delle pressioni ambientali alle quali sono stati sottoposti.

Il lavoro è stato completato con un'analisi numerica ad elementi finiti applicata alle metodologie di consolidamento delle fondazioni del Teatro Galli, previa valutazione della compatibilità chimica dei leganti moderni con le malte antiche, e capace di rappresentare le proprietà meccaniche tempo-dipendenti come il comportamento reologico del calcestruzzo in funzione dell'indurimento e dell'invecchiamento.

2 DATI DEI CAMPIONI ANALIZZATI

2.1 Sito "A"

Si tratta di un ponte ad arco a tutto sesto di luce di 25 m, costruito sul tratto iniziale del Fiume Tordino (quota 870 m.s.l.m.), alle pendici dei Monti della Laga (TE) e risalente a metà degli anni '60. La fondazione è costituita da plinti rettangolari, il cui piano di appoggio è

rappresentato da un substrato roccioso arenaceo (Formazione della Laga – Messiniano, 5,5÷5 MA), interessato da due sistemi di fratturazione tettonica nonché da una intensa alterazione meteorica spinta fino alla profondità di circa 150 centimetri. I problemi riscontrati sono sostanzialmente di tre tipi, di cui due di ordine costruttivo ed uno di tipo manutentivo:

1 – in condizioni di piena, anche non eccezionali, i plinti vengono lambiti dalle acque fluviali “pure”, derivanti dallo scioglimento dei nevai; ovvero acque tipicamente povere in sali e di conseguenza notevolmente degradanti e disgreganti;

2 – la “salatura” a cui il ponte è sottoposto nella stagione invernale mediante uso di cloruri di sodio e di calcio;

3 – la scarsa cura utilizzata nella esecuzione dei getti, con una totale mancanza di vibratura ed uno spessore insufficiente dei copriferri.

Il campione è stato prelevato dal plinto di fondazione della sponda destra.

2.2 Sito “B”

Ponte ad arco con le medesime caratteristiche costruttive del sito “A” ma di dimensioni doppie, costruito negli anni ‘50 a cavallo del Fiume Salinello (quota 385 m.s.l.m.), alle pendici dei Monti Gemelli (TE). La fondazione è a plinti rettangolari anche in tale caso interagenti con strati arenacei appartenenti alla Formazione della Laga. La struttura nel suo insieme presenta un pessimo stato di conservazione generale, dipendente da:

1 – la “salatura” a cui il ponte è sottoposto, anche se in misura inferiore al sito “A”;

2 – il confezionamento del conglomerato con aggregati presumibilmente prelevati in situ e con tracce di elementi organici;

3 – spessore insufficiente o addirittura quasi inesistente dei copriferri.

Il campione proviene dal plinto di fondazione in sponda sinistra.

2.3 Sito “C”

Fondazioni del Teatro Galli di Rimini (RN), risalente al XVII secolo. Sono stati prelevati tre campioni poiché è stata accertata la presenza di un acquifero prossimo al piano di campagna. Il campione “C₁” è stato prelevato ad una profondità di 1 m dal piano di campagna e si presenta molto friabile e costituito da frammenti cristallini e litici immersi in matrice calcitica; il campione “C₂”, proveniente da una profondità di 2 m si presenta compatto e costituito da soli frammenti cristallini; infine il campione “C₃” prelevato a quota -2.5 m presenta le medesime caratteristiche del campione più superficiale.

2.4 Sito “D”

Il campione è rappresentato da una carota passante l'intero spessore della calotta di rivestimento delle sale del “Laboratorio di Fisica Nucleare del Gran Sasso”, con diametro di 100 mm e lunghezza di circa 400 millimetri.

Ad osservazioni preliminari si presenta integro e ben confezionato.

3 METODOLOGIA DI INDAGINE

3.1 Misura della profondità di carbonatazione

La patologia più diffusa è la carbonatazione, $[Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O]$ dovuta ad un attacco della calce libera, originariamente presente nella pasta cementizia per processi di idratazione dei silicati bi-tricalcici, da parte dell'anidride carbonica presente sia nell'atmosfera che in acque aggressive. I campioni sono stati preventivamente sottoposti a relativa analisi, dal momento che il particolare tipo di degrado pur non risultando direttamente deleterio ai fini della durabilità, determina un aumento della porosità del conglomerato con penetrazione di acqua e cloruri (Rio A., 1987) e successiva ossidazione dei ferri di armatura, con conseguenze globali notevolmente dannose per la statica delle strutture. Il metodo di prova consiste nel determinare, per mezzo di un indicatore, la profondità dello strato carbonatato rispetto alla superficie di calcestruzzo indurito. Come indicatore è stata utilizzata una soluzione all'1% di Fenolftaleina in 70% di alcool etilico (Finzi F., 1988), con un punto di viraggio al rosso pari ad un pH = 9.2, mentre la carbonatazione determina un abbassamento del pH di passivazione dei ferri di armatura ben al di sotto di tale valore.

3.2 Analisi per diffrazione ai raggi X (XRD).

L'analisi XRD permette di identificare le sostanze cristalline presenti nel campione polverizzato. La strumentazione utilizzata è dotata di un monocromatore a cristallo di grafite e un anticatodo di rame. Le condizioni tipiche di misura, scelte per facilitare il confronto diretto tra diversi spettri, prevedono un intervallo di diffrazione compreso tra $2\theta = 3^\circ$ e $2\theta = 70^\circ$ ed un passo di 0.010. L'interpretazione dei diffrattogrammi è stata effettuata manualmente a partire dalla conversione della posizione misurata di ciascun picco rilevato (gradi e centesimi di grado) in valori di equidistanza d (in Å - angstrom) tra i piani reticolari cristallini, risolvendo l'equazione dei Bragg per la λ (lunghezza d'onda dei raggi X) usata.

3.3 Analisi Termica Differenziale (DTA).

L'apparecchio utilizzato misura le variazioni di proprietà fisiche di una sostanza indotte da un cambiamento di temperatura, registrando la differenza termica che esiste tra il campione incognito ed un materiale termicamente inerte scelto come riferimento (generalmente allumina). Le differenze termiche registrate si traducono, in pratica, in un assorbimento (ΔT negativo) o in una emissione (ΔT positivo) di energia (calore) a seconda che le trasformazioni stesse siano endotermiche o esotermiche, fornendo così informazioni sul tipo di processo avvenuto.

3.4 Analisi Termogravimetrica Differenziale (TG).

Questo tipo di analisi, simultaneo con la DTA, rappresenta la derivata prima della perdita di peso in funzione del tempo di riscaldamento. Esso fornisce una coppia di curve, di cui l'una (TG) dall'andamento a scalini e l'altra (DTG) consistente in picchi acuti che consentono una lettura più agevole delle temperature alle quali si verificano forti variazioni di peso. In particolare gli scalini della curva TG permettono di effettuare valutazioni quantitative espresse in percentuale di perdita di peso.

3.5 Microscopia elettronica a scansione (SEM).

L'osservazione microscopica per scansione consiste nell'oscillare un fascio elettronico primario agendo su bobine, che variano il campo magnetico e quindi l'orientazione del fascio, in modo da farlo colpire in tempi successivi il campione secondo più linee parallele che nell'insieme compongono un'area. Sommando gli effetti di riflessione su uno schermo elettronico si ottiene così un'immagine ben definita di un'area sufficientemente vasta del campione. Il SEM però può anche mettere in evidenza variazioni composizionali della superficie riflettente, in quanto il potere riflettente di una sostanza dipende dal suo numero atomico medio.

3.5 Osservazioni microscopiche:

A completamento delle analisi strumentali ed al fine di ottenere un contributo decisivo all'interpretazione delle medesime sono state studiate sezioni sottili ricavate dai campioni tramite microscopio polarizzatore a luce trasmessa. La loro visione diretta fornisce informazioni utili riguardo: a) la composizione mineralogica della matrice, rappresentata sia dai prodotti di idratazione del cemento originario che dai prodotti di trasformazione e/o neoformazione; b) la composizione degli inerti utilizzati per il confezionamento delle malte; c) la presenza di eventuali pori, bordi di reazione nonché di fenomeni di dissoluzione e ricristallizzazione.

4 INTERPRETAZIONE DELLE ANALISI STRUMENTALI

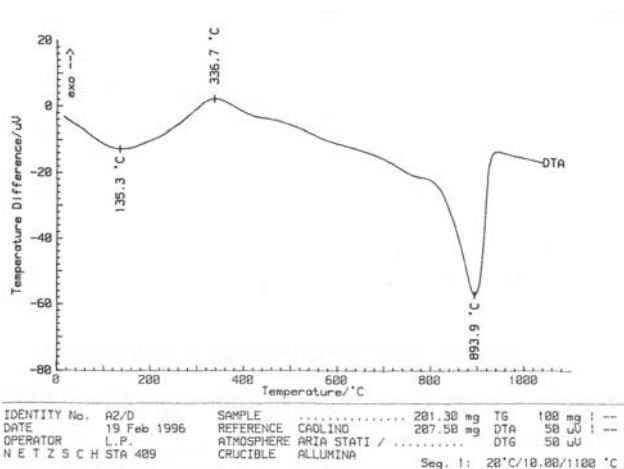


Figura 1. Curva DTA relativa al campione "A"

4.1 Campione A.

Alla misura della carbonatazione è risultato quasi totalmente degradato, con conseguente deposizione da parte dei ferri di armatura di uno strato di ossidi e/o idrossidi. La curva DTA (Fig. 1) rileva la presenza di tre picchi caratteristici: A) picco endotermico a 135,3°C attribuibile alla disidratazione del gesso, il quale, aggiunto durante la macinazione del clinker di Portland in piccola quantità (2÷5%), è utilizzato come ritardatore di presa; di fatti, attraverso la reazione con l'alluminato tricalcico (componente fondamentale) il gesso genera ettringite, la quale avvolgendo i granelli di cemento con un film protettivo, ritarda i processi di idratazione e quindi di presa; B) picco esotermico a 336,7°C, attribuibile alla decarbonatazione di idromagnesite o dolomite, ipotesi suffragata dalla decarbonatazione precoce di calcio, come dimostrato dalla "spalla" a 760°C, dal momento che la decomposizione del carbonato di magnesio interferisce con quella della calcite (Chiari et al., 1992). C) picco endotermico a 893,9°C relativo alla decarbonatazione totale della calcite. Lo spettro XRD mostra la presenza di calcite, quarzo, gesso, ettringite e feldspato. La curva TG presenta due punti di flesso significativi, dei quali il primo corrispondente alla perdita di peso per disidratazione del gesso e di acqua di igroscopicità ed il secondo alla perdita di peso per decarbonatazione. In quest'ultimo caso da un valore di -31,2% di CO₂ persa è possibile calcolare una quantità stechiometrica di CaCO₃ pari al 70,91%. Il quantitativo del gesso, calcolato nel tratto più ripido della curva (-1,39%) è del 5,6%. Lo studio delle sezioni sottili ha mostrato come gli inerti, calcitici, presentino orli di reazione con la pasta di fondo, nonché una diffusa macroporosità particolarmente sviluppata sui bordi degli aggregati, con fenomeni di distacco tra questi ed il legante.

4.2 Campione B.

Totalmente carbonatato, con relativa ossidazione dei ferri di armatura. La curva DTA presenta tre picchi: A) a 108,1°C, endotermico e dovuto alla decarbonatazione di idromagnesite o dolomite; B) "spalla" a 725,2°C; C) a 878,8°C, endotermico, con un comportamento globale simile a quello del campione "A". La quantità stechiometrica dei carbonati, è pari al 60,23%, mentre il gesso corrisponde ad un 4% circa. Lo spettro XRD (Fig. 2) indica la presenza di calcite, quarzo, ettringite, gesso e feldspato. Caratteristico è l'aumento del picco di 3,33 Å relativo al quarzo: per la sua interpretazione occorre tenere in considerazione che i silicati idraulici di calcio contenuti nei cementi, reagiscono lentamente con l'anidride carbonica (carbonatazione) fornendo carbonato di calcio, mentre la silice e l'allumina si separano allo stato amorfo (Goodbrake et al., 1979). La carbonatazione è ulteriormente provata dalla scomparsa dell'idrossido di calcio. Le analisi al microscopio mineralogico hanno evidenziato la tendenza degli aggregati a reagire con la pasta di fondo lasciando presumere che al degrado per carbonatazione possa essersi sovrapposto un debole processo di reazione Alkali-Aggregato (Turriziani R., 1987).

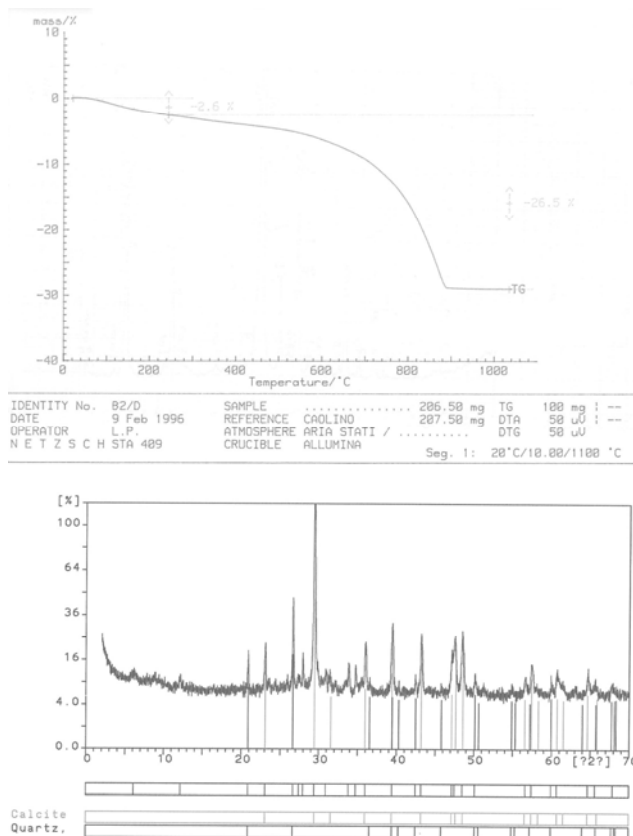


Figura 2. Curva TG e spettro XRD relativi al campione "B".

4.3 Campioni C.

Il campione C_1 presenta una carbonatazione disomogenea, mentre i campioni C_2 e C_3 risultano totalmente carbonatati. L'indagine XRD indica la presenza costante nei tre campioni di calcite e quarzo, in quantità abbondante e preponderante, oltre a minerali argillosi appartenenti al gruppo dei fillosilicati di tipo T-O (caolinite) e T-O-T (gruppi delle smectiti e delle miche), feldspati calco-sodici, gesso, ettringite e thaumasite. La calcite mostra una concentrazione variabile nei tre campioni e rispettivamente del 45,78% nel C_1 , del 40,98% nel C_2 e del 53,21% nel C_3 . Le microanalisi (SEM) hanno evidenziato la presenza di una matrice finissima costituita da calcite e silicato di calcio microcristallina nel C_1 e C_3 , mentre i frammenti cristallini risultano essere cristalli di calcite e quarzo, di dimensioni millimetriche. Nel campione C_2 la quantità di carbonato di calcio è subordinata rispetto al quarzo.

In definitiva le analisi indicano un utilizzo di una malta aerea miscelata con sabbia prevalentemente silicea. La presenza, in quantità subordinate, sia di minerali originari, quali feldspati e fillosilicati che di minerali di neoformazione, quali solfato di calcio (gesso), allumino-solfato tricalcico idrato (ettringite) e silico-solfato-carbonato di calcio idrato (thaumasite), sono dovuti all'introduzione di cloruri e solfati provenienti dalle acque di falda. Nel dettaglio, gli ioni CO_2^{-2} presenti in acqua marina reagiscono con la calce per formare un rivestimento di calcite ed aragonite sulla struttura (carbonatazione). In presenza di anidride carbonica e

silice attiva, l'ettringite si trasforma in thaumasite fibrosa ($\text{CaCO}_3 * \text{CaSO}_4 * \text{CaSiO}_3 * 15\text{H}_2\text{O}$) che non manifesta proprietà leganti. Infine lo sviluppo di reazioni alcali-aggregati, la cui evoluzione nel tempo è dettata dalla presenza nella sabbia di impasto di feldspati e miche, è un altro aspetto delicato della stabilità fisico-chimica dei cementi, dal momento che ad esse si accompagna una sorprendente quantità di lavoro meccanico.

4.4 Campione D.

Totale assenza di carbonatazione. La curva DTA presenta tre picchi: A) picco endotermico a 119,5°C relativo al gesso; B) picco esotermico a 336,3°C relativo a idromagnesite o dolomite; C) picco endotermico a 856,1°C relativo ai carbonati. La curva TG mostra un tenore in gesso del 4% circa ed in carbonati dell'83,64%. In sezione sottile sono stati individuati inerti calcitici e talora dolomitici, quarzo ed una bassa porosità.

5 MODELLO NUMERICO DEL PROCESSO DI INVECCHIAMENTO

Le analisi delle malte costituenti le fondazioni del Teatro Galli di Rimini (XVII sec.) hanno evidenziato la necessità di estendere a quest'ultime gli interventi di consolidamento al fine di raggiungere un corretto adeguamento strutturale. La metodologia di intervento è stata articolata nella realizzazione di iniezioni a pressione con malte chimicamente compatibili a partire dalla esecuzione di perforazioni del diametro di cm 25 cm e lunghezza di 300 cm, disposte ad un interasse di 75 cm.

Nella definizione dell'intervento, in considerazione dello stato di degrado palesato dalle malte analizzate nonché delle prescrizioni di Capitolato in merito alla totale compatibilità chimico-fisica, è stato necessario tenere in debito conto anche il calore di idratazione, il quale ha una significativa influenza sugli sforzi e sulle deformazioni termicamente indotti. Di conseguenza, al fine di valutare tutti gli aspetti del problema e di costruire un quadro clinico di riferimento per interventi analoghi, è stata eseguita un'analisi numerica ad elementi finiti formulando il problema come un processo termo-meccanico disaccoppiato, in condizioni di deformazione piana. Inizialmente è stato risolto il problema di diffusione termica transitoria come una sorgente interna (legata all'emissione di calore di idratazione delle malte iniettate), per il campo di temperatura $T = T(\mathbf{x}, t)$, nel dominio (Ω) occupato sia dalle fondazioni esistenti che dal terreno circostante.

Gli incrementi di deformazioni termicamente indotte, le quali sono state utilizzate come dato di ingresso nella successiva analisi meccanica, sono funzione di:

$$\Delta \varepsilon_{0ij} = \alpha \Delta T(x, t) \delta_{ij} \quad (1)$$

dove α è il coefficiente di dilatazione termica e δ il simbolo di Kronecker. Il campo di temperatura è descritto dall'equazione di Fourier per un corpo isotropo (ZACE, 2003):

$$(\lambda(T_{,i}))_{,i} + \frac{\partial H}{\partial t} = c^* \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad t > 0 \quad (2)$$

dove T [kJ/m³] è la temperatura, H la sorgente termica, λ [kJ/(m°Kgiorno)] la conducibilità termica, c^* [kJ/(m³°K)] la capacità termica. La sorgente termica, la quale esprime gli effetti relativi all'emissione di calore di idratazione in funzione del tempo t e della temperatura T , è data nella seguente forma (Roelfstra et al., 1994):

$$H = H_\infty \frac{\alpha M}{1 + \alpha M} \quad (3)$$

$$M(t, T) = \int_{t_d}^t \exp\left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T}\right)\right] dt \quad (4)$$

dove H_∞ [kJ/m³] è il valore complessivo di calore prodotto dall'idratazione di 1 m³ di malta; M [giorni] lo stadio di maturazione; α [1/giorni] un parametro relativo alla sorgente termica; Q/R [°K] il rapporto tra l'energia di attivazione e la costante universale dei gas; T_f [°K] la temperatura di riferimento; t_d [giorni] il periodo di inattività. La misura dello stadio di maturazione M è introdotta per essere usata successivamente nel modello reologico dell'invecchiamento delle malte iniettate.

Nella seguente tabella 1 sono riportati i parametri "termici" assunti per le malte ed il terreno:

Tabella 1. Parametri utilizzati per l'analisi termica

	λ [kJ/(m°Kh)]	c^* [kJ/(m ³ °K)]	H_∞	a [1/h]	Q/R [°K]
malte	8.0	2000	105000	0.0625	4000
terreno	4.0	1000	-	-	-

Per quanto riguarda la formulazione del problema meccanico, esso è stato basato su di un approccio incrementale nel tempo, al fine di tenere conto sia della risposta tempo-dipendente del mezzo, così come nel caso della formulazione termica, e sia della possibile non-linearità degli effetti reologici. Ad ogni passo di calcolo $n+1$, gli incrementi di spostamento sono ricercati soddisfacendo le equazioni di compatibilità, di equilibrio e le leggi costitutive:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = 1/2(\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i}) \quad (5.1)$$

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \Phi(\sigma_{ij}^n, \Delta \varepsilon_{ij}^{eff}, t) \quad (5.2)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{eff} = \Delta \varepsilon_{ij} - \Delta \varepsilon_{0ij} = \Delta \varepsilon_{ij} - \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{ij}^{n+1}, j + b_i = 0 \quad (5.4)$$

Il modello utilizzato per l'analisi del comportamento delle malte di iniezione, denominato "Aging concrete" (Fig. 3 e tabelle 2 e 3), è basato su un insieme di molle di

Maxwell collegate in serie, dove ogni unità è descritta da un modulo di Young dipendente dallo stadio di maturazione (ZACE, 2003):

$$E_k(M_i) = M_{ik} E \quad (6)$$

e da un tempo di ritardo:

$$\tau_k = E_k / \eta_k \quad (7)$$

Il contributo di ogni unità dipende dalla misura dello stadio di maturazione M mediante la selezione del fattore ponderale:

$$M_{ik}, \sum_k M_{ik} = 1 \quad (8)$$

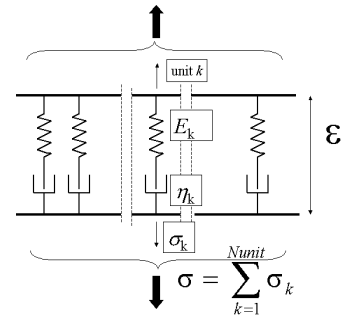


Figura 3. Modello reologico "Aging concrete" (ZACE, 2003)

I dati adottati per la modellazione delle malte iniettate ed esistenti sono riportati nella seguenti tabelle 2 e 3.

Tabelle 2 e 3. Parametri utilizzati per la modellazione rispettivamente delle malte iniettate ed esistenti (da ZACE, 2003)

linea: i	M [h]	E(M) [KPa]	M _{i1}	M _{i2}	M _{i3}	M _{i4}	M _{i5}	f _i (M) [KPa]
1	0	5.0e ⁵	0.10	0.10	0.10	0.70	0	100
2	10	5.0e ⁶	0.10	0.10	0.10	0.70	0	280
3	18	1.0e ⁷	0.03	0.09	0.22	0.66	0	1070
4	24	3.0e ⁷	0.03	0.11	0.14	0.60	0.11	3360
5	48	3.15e ⁷	0.05	0.09	0.15	0.33	0.37	3710
6	72	3.35e ⁵	0.06	0.06	0.17	0.29	0.42	3990
7	168	3.40e ⁷	0.05	0.08	0.15	0.15	0.56	4550
8	672	3.45e ⁷	0.03	0.06	0.10	0.15	0.66	4470
9	10000	3.50e ⁷	0.03	0.03	0.05	0.09	0.80	4790
Tempo di ritardo [h]			1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	-

linea: i	M [h]	E(M) [KPa]	M _{i1}	M _{i2}	M _{i3}	M _{i4}	M _{i5}	f _i (M) [KPa]
1	0	10.0e ⁴	0.10	0.10	0.10	0.70	0	100
2	10	20.0e ⁴	0.10	0.10	0.10	0.70	0	280
3	18	8.35e ⁶	0.03	0.09	0.22	0.66	0	1070
4	24	1.08e ⁷	0.03	0.11	0.15	0.60	0.11	3360
5	48	15.3e ⁷	0.05	0.09	0.15	0.33	0.37	3710
6	100	19.6e ⁵	0.06	0.07	0.17	0.15	0.55	3990
7	10000	27.9e ⁷	0.06	0.07	0.16	0.16	0.56	4550
Tempo di ritardo [h]			1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	-

Il terreno, costituito da sabbia limosa, è stato modellato come un mezzo elastico non lineare – perfettamente plastico ($E'=15$ MPa, $\nu=0.33$), caratterizzato dalla superficie di snervamento di Drucker-Prager ($c'=10$ KPa, $\phi'=32^\circ$) e da una regola di flusso deviatorico ($\psi=0$), con criterio di rottura (Nova R., 2002):

$$\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 - \sigma_1'\sigma_2' - \sigma_1'\sigma_3' - \sigma_2'\sigma_3' - [\mu(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') + K]^2 = 0 \quad (9)$$

che consente di superare la presenza di punti di singolarità matematica propri del più appropriato modello di Mohr-Coulomb (fig. 4).

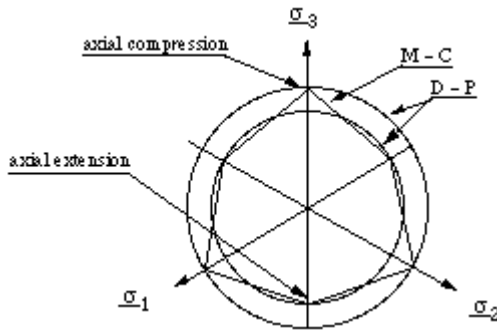


Figura 4. Condizioni di rottura secondo Drucker-Prager e Mohr-Coulomb nel piano ottaedrale.

La formulazione della non-linearità del problema meccanico è stata risolta mediante l'adozione dello schema iterativo di Newton-Raphson modificato il quale, rispetto allo schema iniziale di Newton-Raphson, consente un onere computazionale minore. Di fatti, l'utilizzo nella linearizzazione della funzione della stessa pendenza per ogni iterazione permette di evitare di dover ricostruire la matrice dello Jacobiano e di operare la sua fattorizzazione ad ogni passo. La procedura seguita è stata la seguente:

1. inizializzazione vettore soluzione X
2. valutazione dello Jacobiano
3. decomposizione dello Jacobiano
4. ciclo di Newton-Raphson modificato (n volte)
5. convergenza raggiunta entro le iterazioni previste?
 - a. SI termine operazioni
 - b. NO torna al passo 2

Per la valutazione della convergenza del sistema è stato impostato il controllo della norma euclidea, della norma relativa all'incremento di energia e della norma relativa all'energia totale, secondo il seguente schema:

$$\frac{\|F_{n+1}^{ext} - F_{n+1}^{int(i+1)}\|}{\|F_{n+1}^{ext} - F_n^{int}\|} \leq 10^{-2} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta E_{n+1}^{S(i+1)} - \Delta E_{n+1}^{S(i)}}{\Delta E_{n+1}^{S(i=2)}} \leq 10^{-3} \quad (11.1)$$

$$\frac{\Delta E_{n+1}^{F(i+1)} - \Delta E_{n+1}^{F(i)}}{\Delta E_{n+1}^{F(i=2)}} \leq 10^{-3} \quad (11.2)$$

$$\frac{\Delta E_{n+1}^{S(i+1)} - \Delta E_{n+1}^{S(i)}}{\Delta E_n^S} \leq 10^{-3} \quad (12.1)$$

$$\frac{\Delta E_{n+1}^{F(i+1)} - \Delta E_{n+1}^{F(i)}}{\Delta E_n^F} \leq 10^{-3} \quad (12.2)$$

dove F è la fase fluida ed S quella solida.

L'analisi termica è stata preceduta dall'applicazione della temperatura ambientale ($T_a = 10^\circ\text{C}$), mentre quella meccanica dalla determinazione dello stato tensionale geostatico, da utilizzare come stati di riferimenti (non deformati) per i calcoli successivi.

L'analisi termica ha avuto inizio al tempo zero, corrispondente alle fasi di iniezione delle malte, mentre la sorgente termica è stata attivata al tempo $t_d=12\text{h}$. L'analisi meccanica a sua volta ha avuto inizio al tempo 24h, corrispondente al tempo necessario per l'inizio delle fasi di presa della malta la quale può quindi essere trattata come un corpo solido. Dall'analisi termica, con una simulazione della durata di 300h, è emersa una distribuzione disuniforme della temperatura, con un valore di $T_{max} = 22,86^\circ\text{C}$ dopo circa 26h dall'esecuzione delle iniezioni di malta ed una tendenza al riequilibrio termico del sistema a $t \cong 150\text{h}$ (Figg. 5 e 6).

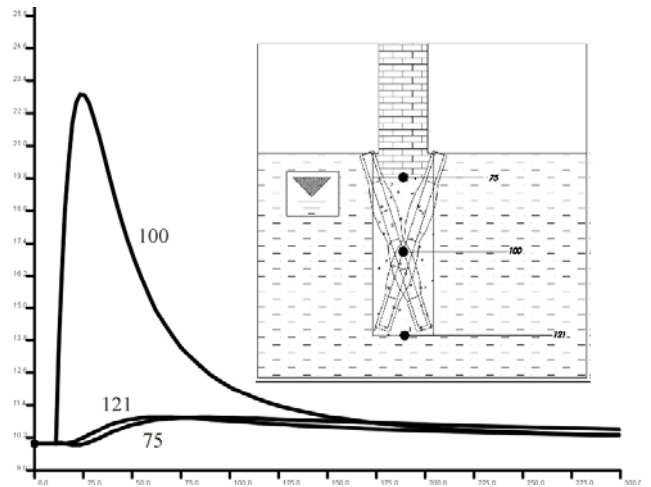
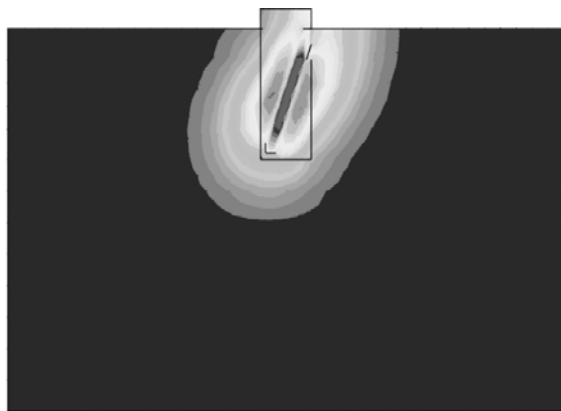


Figura 5. Evoluzione nel tempo della temperatura
 $T_{max}: 22,86^\circ\text{C}$ (25,8h)

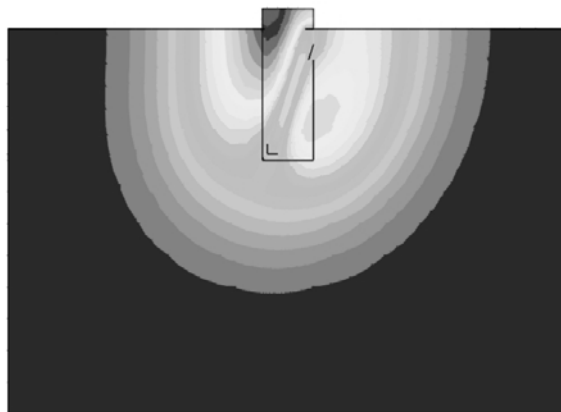
La deformazione, ricavata dall'analisi meccanica (Fig. 7), rivela fenomeni distorsionali della fondazione e di scorrimento tra quest'ultima ed il terreno circostante, con valori massimi comunque inferiori al millimetro.

Le tensioni risultanti dall'analisi meccanica mostrano che il settore laddove gli sforzi di trazione termicamente indotti raggiungono il massimo valore è ubicato nella porzione inferiore della fondazione, lungo l'asse di iniezione, approssimativamente compreso tra i nodi 100 e 121 di cui alla Figura 5. In ogni caso essi risultano costantemente inferiori alla resistenza a trazione (ft)

sviluppata dalle malte durante il processo di presa ed indurimento (Fig. 8), con una differenza tale da impedire lo sviluppo e la propagazione di eventuali fessurazioni tanto nelle malte utilizzate per il consolidamento, quanto, soprattutto, nelle malte antiche costituenti la fondazione.



(A)



(B)

Figura 6. Distribuzione spaziale della temperatura:

(A): $t = 100\text{h} \rightarrow T_{\text{max}} = 12,07^\circ\text{C}$

(B): $t = 300\text{h} \rightarrow T_{\text{max}} = 10,59^\circ\text{C}$

6 CONCLUSIONI

Le analisi eseguite sui campioni raccolti hanno mostrato quasi ovunque seri fenomeni di degrado che dimostrano come la progettazione di un'opera deve tenere conto non solo delle caratteristiche meccaniche (classi di resistenza), ma anche delle possibili interazioni con l'ambiente (classe di esposizione ambientale). Nel caso di utilizzo di cemento Portland, oramai il più diffuso, occorre considerare che la pasta idratata è costituita da una miscela di tobermorite, idrossido di calcio, alluminati, solfoalluminati e alluminoferriti di calcio idrato. La presenza dell'idrossido di calcio fa sì che le opere cementizie resistano male all'azione di acque dilavanti, come nel caso del sito A. Il carbonato di calcio formatosi per reazione dell'idrossido di calcio con l'anidride

carbonica atmosferica, tende a reagire con la CO_2 presente nell'acqua per formare bicarbonato di calcio, solubile in acqua. L'asportazione crea una serie di micropori che indeboliscono la resistenza meccanica del calcestruzzo.

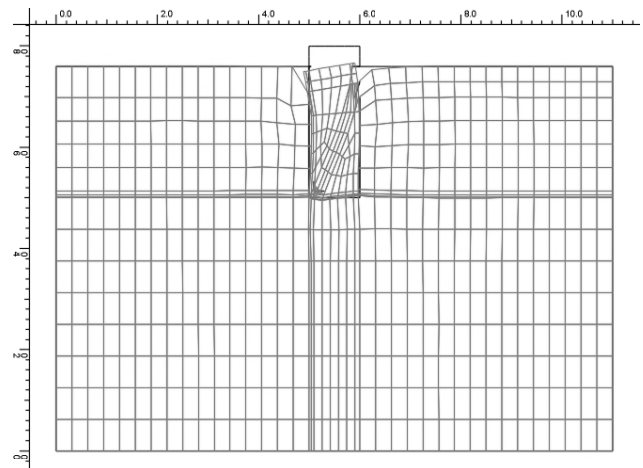


Figura 7. Deformata residua a $t = 300\text{h}$.

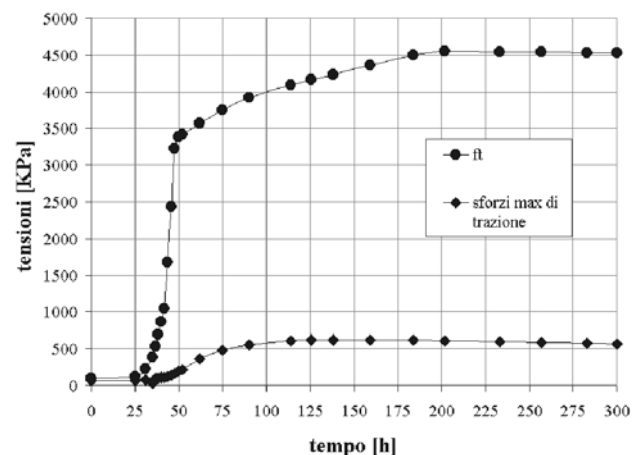


Figura 8. Evoluzione degli sforzi di trazione vs lo sviluppo della resistenza a trazione (f_t) nel tempo, durante le fasi di presa ed indurimento delle malte iniettate.

La carbonatazione, inoltre, abbassando il pH di passivazione dei ferri di armatura, favorisce l'instaurarsi di processi corrosivi da parte dell'ossigeno, dell'umidità e dei cloruri utilizzati come sali disgelanti nella stagione invernale. Ciò porta alla deposizione di uno strato di ossidi ed idrossidi di ferro (siti A e B) con conseguente diminuzione della sezione resistente. L'aumento di volume derivante da tali trasformazioni genera all'interno dei calcestruzzi un campo di tensioni accompagnato dalla conseguente fessurazione della sezione interessata. I cloruri, che in tal modo penetrano in profondità, possono dare origine a reazioni con gli alcali contenuti nei calcestruzzi originando ossicloruri di calcio idrato ($3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$), con conseguente distacco tra gli aggregati e la matrice cementizia (sito A).

Per quanto concerne le fondazioni dal Teatro Galli di Rimini (sito C), le analisi hanno evidenziato un utilizzo di malte aeree e la presenza di un livello piezometrico prossimo al piano di campagna. E' probabile che l'acqua sotterranea fluisca verso il mare o che la sua progressione sia limitata dall'invasione marina (corrente inversa di acqua salata) determinando la costituzione di una mixing zone caratterizzata da acque salmastre ricche di cloruri e solfati, fortemente aggressive. I minerali di neoformazione quali gesso, ettringite e thaumasite dimostrano l'introduzione nelle miscele originarie di cloruri e solfati provenienti dalle acque di falda. La presenza di feldspati e miche nella sabbia di impasto ha consentito lo sviluppo, nel tempo, di reazioni alcali-aggregati che rappresenta un aspetto delicato nella stabilità fisico-chimica dei materiali dal momento che ad esse si accompagna una sorprendente quantità di lavoro meccanico.

Nel caso dei siti A e B, la scelta di un tipo di cemento diverso dal Portland, come il cemento pozzolanico, a basso contenuto di calce libera, avrebbe migliorato la durabilità dei calcestruzzi, eliminando un errore umano involontario. A ciò occorre però aggiungere gli errori definibili "volontari", quali: 1) un elevato rapporto Acqua/Cemento (sito A), in grado di garantire una adeguata lavorabilità dopo un trasporto su lunghe distanze, dal momento che all'aumento del rapporto A/C corrisponde un aumento della porosità e della permeabilità del calcestruzzo; 2) uno spessore dei copriferri insufficienti (siti A e B); 3) una vibratura dei getti scarsa o addirittura inesistente.

Un altro aspetto delicato che talora occorre considerare è legato all'emissione di calore di idratazione da parte dei cementi utilizzati nel confezionamento dei calcestruzzi e delle malte idrauliche in genere. Anche se tale problema potrebbe apparire secondario in interventi come il consolidamento delle fondazioni del citato Teatro Galli, occorre riferirsi in ogni caso all'elevato stato di degrado palesato dalle malte utilizzate storicamente. L'applicazione al problema in questione di analisi numeriche relative alla formulazione di un processo termo-meccanico disaccoppiato, ha consentito di prevedere lo sviluppo nel tempo del campo di temperatura e degli associati sforzi di trazione termicamente indotti, valutando di conseguenza gli effetti legati alle iniezioni di malte di consolidamento.

Diverso e ben maggiore risulta essere il problema termico nel caso di strutture in calcestruzzo di notevoli dimensioni, come nel caso di dighe o di platee ad elevato spessore ed estensione areale.

In definitiva, la progettazione strutturale e geotecnica non può essere limitata al dimensionamento delle sezioni reagenti e/o alla valutazione dell'interazione terreno-struttura, ma deve tenere conto anche di un serie di ulteriori fattori, in genere ambientali, che possono modificare la resistenza dei materiali nel tempo e di conseguenza inficiare il comportamento delle strutture.

RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia il Dott. Sean Christian Wheeler del Dipartimento di Scienze della Terra di Perugia (PG) per l'esecuzione delle analisi strumentali.

BIBLIOGRAFIA

- Chiari G., Santarelli M.L., Torraca G., 1992. *Caratterizzazione delle malte antiche mediante l'analisi di campioni non frazionati*. Materiali e strutture: problemi di conservazione, n. 3, 116-136.
- Collepari M., 1992. *Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato*. Industria italiana del cemento, n. 671, 707-726.
- Finzi F., 1988. *Progettazione e durabilità del c.a.* SAIE.
- Goodbrake C.J., Yuong J.F., Berger R.L., 1979. *Reaction of hydraulic calcium silicates with carbon dioxide and water*. Journal American ceramic Society, n. 62, 488-491.
- Nova R., 2002. *Fondamenti di meccanica delle terre*. The McGraw-Hill Companies s.r.l.
- Rio A., 1987. *Effetti della carbonatazione e della penetrazione dei cloruri sulla durabilità dei conglomerati cementizi armati*. Atti delle giornate di studio su: materiali per l'ingegneria, vita in servizio e durabilità, 19-48.
- Roelfstra P.E., Salet T.A.M., Kuiks J.E., 1994. *Defining and application of stress-analysis-based temperature difference limits to prevent early-age cracking in concrete structures*. In Thermal cracking in Concrete at Early Ages, R. Springensmid Ed. E&F Spon Publ., London.
- Turrisiani R., 1987. *Degradazione del calcestruzzo per reazione alcali-aggregato*. Atti delle giornate di studio su: materiali per l'ingegneria, vita in servizio e durabilità, 49-65.
- ZACE (2003). *Z_SOIL.PC Theoretical Manual*. Elmeppress International, Zace Services Ltd, Lousanne.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE ENVIRONMENTAL PRESSURES ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WEAR.

Keywords: concrete, degradation, instrumental analysis, FE models

In Italy, every year are produced 120 millions cubic meters of concrete: In a country in which is so preponderant the use of such resource, it would be expected to find in the realized buildings with this technology, a medium quality level, in terms of performances and durability definitely high. This fact does not find correspondence in buildings. With this work are analysed concrete samples coming from utilized infrastructures which are heavily ammalorated, trying to individualize the pathology responsible of the several wear cases, possible defects in the execution with the objective to discover, when possible, the environmental pressures that determined them. This work is completed with the comparison between the analysis of modern concretes and the mortar constituting the foundation of the Galli theatre in Rimini (XVII sec.). Finally with a finished elements numeric analysis applied to consolidation intervention, using an ageing model implemented in the commercial software Z_SOIL.PC 2003.