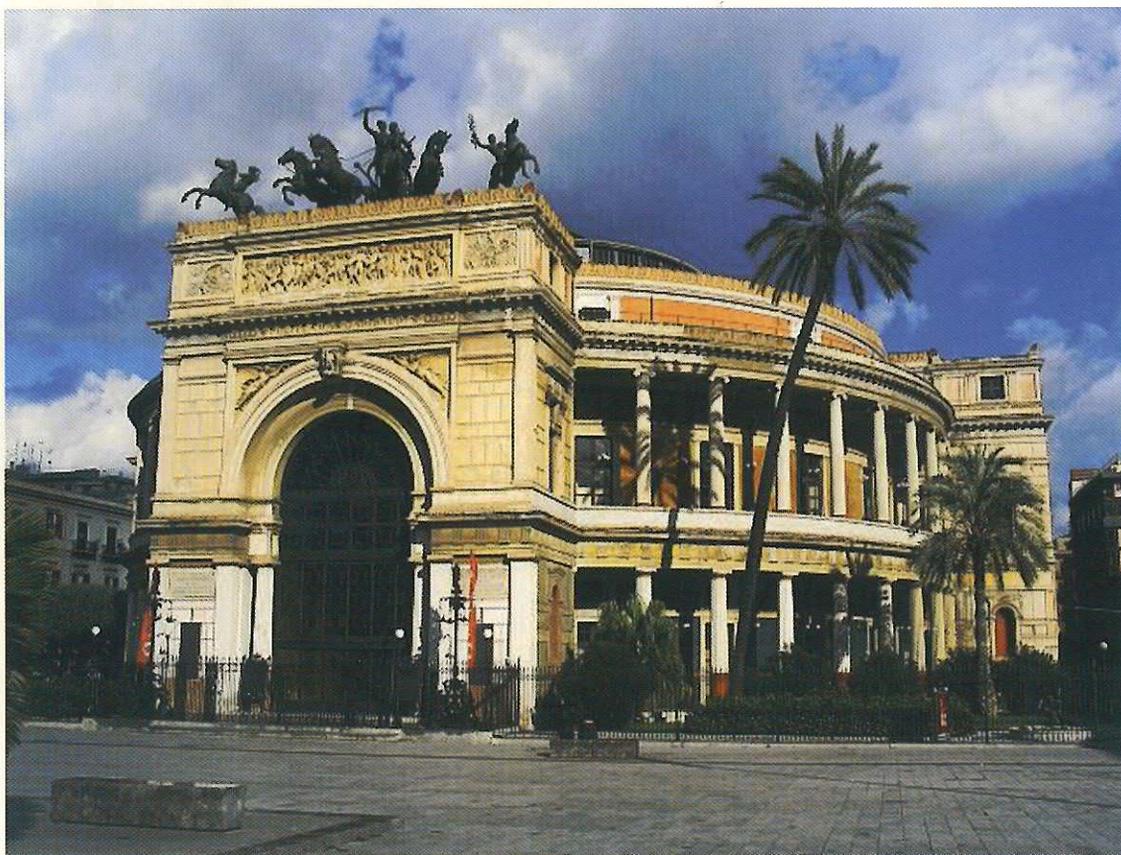


ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

**XXII CONVEGNO NAZIONALE
DI GEOTECNICA**

Palermo 22-24 settembre 2004



**VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI
DI SICUREZZA E ADEGUAMENTO
DELLE OPERE ESISTENTI**

**PÀTRON EDITORE
BOLOGNA**

Studio per una corretta analisi dei recenti fenomeni di dissesto degli edifici a Bologna dovuti a crisi del sistema delle fondazioni.

Franceschini M.
TELEIOS srl

Carbonella R., Zanna A.
GEOTEA srl

SOMMARIO

La presente memoria ha lo scopo di analizzare la causa dei fenomeni di dissesto statico alle strutture di edifici posti nell'area di Bologna dovuti a cedimenti delle fondazioni; a tale scopo è stata utilizzata una procedura di analisi che permetta di comprendere con chiarezza le cause di tali dissesti. Dopo un breve ragguaglio sulla litologia superficiale del territorio interessato, con qualche cenno sui dati pluviometrici, vengono approfonditi due lavori sviluppati dagli autori nei quali verranno descritte le procedure di analisi seguite e le conclusioni a cui si può pervenire. Tale metodologia consiste nella esecuzione di prove statiche e di laboratorio mirate a porre in evidenza l'effettivo comportamento dei primissimi strati del sottosuolo, spesso di non facile comprensione. Ulteriore importante ausilio per una corretta comprensione del fenomeno risulta essere il monitoraggio mirato dell'edificio attraverso stazioni crepemetrie per comprendere con maggior chiarezza lo stato evolutivo del processo "cedimento della fondazione – stato fessurativo" con il procedere delle stagioni. Qualche cenno finale verrà fatto su come utilizzare tali dati nel progetto di nuove costruzioni.

Parole chiave: cedimento fondazioni, variazioni climatiche, contenuto in acqua, essiccamento, stazioni crepemetrie.

1 PREFERENZA

In determinate zone del territorio di Bologna alcuni edifici, solitamente in muratura portante e di costruzione databile tra gli anni '60 e '70, ma anche più recenti, hanno manifestato negli ultimi anni fenomeni, spesso rapidamente progressivi, di fessurazione delle pareti e dei solai; tali eventi si verificano spesso in modo inaspettato dopo anni che l'edificio non ha subito nessun tipo di crisi.

Si può quindi parlare, come si vedrà nel capitolo 3, di un accentuarsi negli ultimi anni, di fenomeni di dissesto di strutture a seguito di cedimenti di fondazioni.

Le zone di Bologna ove si verificano tali fenomeni saranno sede di approfondimento litologico e verranno caratterizzate nel capitolo successivo; esse saranno inoltre oggetto di analisi di carattere ambientale con particolare riguardo alle precipitazioni ed ai meccanismi di interazione con i terreni di fondazione.

Le aree interessate riguardano l'intero territorio bolognese e limitrofo, ma si evidenzia un elevata frequenza di casi nella fascia posta tra il margine collinare e la pianura.

Spesso anche ad una prima sommaria ispezione si nota che i fenomeni di dissesto partono da un cedimento di parti delle fondazioni, esse si presentano il più delle volte come estremamente superficiali anche se di larghezza adeguata a portare i carichi previsti.

Questo fatto si può dedurre da una stima approssimata della capacità portante sulla base di dati geotecnici che si possono rilevare con una semplice prova penetrometrica effettuata in luogo.

Si vedrà però successivamente come le sole informazioni fornite da tali prove possono non fornire tutte le indicazioni necessarie ed utili ad una corretta comprensione del fenomeno nelle zone sede di dissesti.

Per tali motivi la metodologia di diagnostica che si considera ottimale nell'affrontare tali problemi, che permette di trarre tutte le informazioni necessarie e che si vuole presentare, consiste nella esecuzione di prove geotecniche in situ e di laboratorio e nel contemporaneo inizio di operazioni di monitoraggio della sovrastruttura con l'installazione di stazioni crepemetrie. Quest'ultima operazione viene fatta al fine di porre in evidenza il decorso fessurativo delle lesioni in rapporto con la situazione litologica e le stagioni, quindi con le mutate condizioni del primo sottosuolo nei vari periodi dell'anno.

Si vuole evidenziare che uno studio oggettivo, come quello condotto con prova geotecnica e monitoraggio, e che non sia sottoposto a soggettività interpretative, permette di valutare i processi di alterazione strutturale nel tempo. D'altronde la variabilità delle caratteristiche dei terreni e spesso anche dei materiali e le difficoltà connesse ad una corretta interpretazione dei dati aumenterebbero la tendenza a ridurre al minimo la individualità interpretativa per conseguire la massima oggettività.

Pur non escludendo concause nel verificarsi di tali fenomeni di cedimento, come la suzione degli alberi che, tra il momento della costruzione dell'edificio e il momento dei cedimenti, sviluppano radici di notevole importanza, oppure la perdita di condutture che modifica l'umidità dello strato fondale anche per zone limitate o altre, si vuole porre in evidenza come il fenomeno trattato nella presente memoria tende ad assumere rilevanza fondamentale;

E' nostra opinione che esso debba essere considerato ulteriore parametro progettuale anche nel caso di nuove opere pensate con fondazioni superficiali nel territorio di Bologna, ovvero nelle zone dove si sono evidenziati e studiati tali fenomeni.

Tutta l'analisi verrà condotta rapportandosi a due studi svolti dai sottoscritti e ritenuti particolarmente significativi per la presente memoria. Trattasi di edifici costruiti tra gli anni '50 e '70, con strutture in muratura e con fondazioni estremamente superficiali costituite sostanzialmente da una prosecuzione della parete per poche decine di centimetri nel terreno e con cordolo terminale, caso molto frequente nel territorio investigato.

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA DI BOLOGNA.

La pianura bolognese è caratterizzata da depositi alluvionali di origine continentale che si impilano sulle successioni marine affioranti nelle aree collinari pedeappenniniche; tali successioni sono dislocate in profondità da un sistema di faglie poste in direzione est-ovest all'incirca in corrispondenza del margine collinare.

La geomorfologia dell'area risente sensibilmente della presenza delle conoidi dei due fiumi principali: il Reno a ovest e il Savena a est.

Nella parte centrale del territorio urbano sono presenti conoidi di altri corsi d'acqua di minore importanza; esse sono molto meno pronunciate, presentando tuttavia degli apparati la cui geometria è ancora oggi sufficientemente ricostruibile anche se in larga parte obliterata dalla intensa urbanizzazione.

Il sottosuolo della città è comunque caratterizzato da un esteso corpo ghiaioso formatosi per coalescenza delle varie conoidi, la cui profondità ed il suo spessore sono assai variabili a seconda dei punti considerati.

Più lontano dal margine collinare cominciano gli sfrangiamenti laterali del corpo ghiaioso che danno origine a lobi di affioramento che diventano particolarmente evidenti all'altezza della via Emilia.

I terreni che affiorano nel primo strato del sottosuolo (entro i primi 3-5 m dalla superficie) del Comune sono essenzialmente argille, limi, sabbie e ghiaie. I limiti tra i diversi litotipi non sono sempre nettamente distinguibili a causa dei complessi meccanismi sedimentari che li hanno depositi e a causa delle difficoltà che la presenza del tessuto urbanizzato della città determina nella risoluzione dei passaggi litologici orizzontali.

Dal punto di vista idrogeologico, nel sottosuolo di Bologna sono state riconosciute varie falde acquifere

organizzate in un sistema multifalda. Di queste solamente quella più prossima alla superficie è interessante per gli scopi di questo studio, ed è costituita da corpi semipermeabili sabbioso limosi.

La sua quota dalla superficie è molto variabile e risponde alla complessa conformazione dei corpi semipermeabili che la contengono.

In generale, per gli scopi del presente lavoro, assume particolare importanza la fascia di terreno superficiale nella quale non è presente una falda stabile, ma solo piccoli acquiferi con tempi di persistenza molto brevi.

Come detto, i casi oggetto di studio si inseriscono prevalentemente nella fascia pedecollinare del territorio bolognese che si sviluppa tra il comune di San Lazzaro, la zona dei colli di Bologna e la zona pedecollinare di Casalecchio di Reno. L'area è caratterizzata da depositi sabbioso-limosi, e subordinatamente argillosi, dove la falda acquifera è posta ad una profondità tale che non interagisce con i depositi superficiali sede delle strutture fondali degli edifici esaminati.

3 IMPORTANZA DELLE VARIAZIONI CLIMATICHE NELL'AREA PADANA CENTRALE

La constatazione che i dissesti sugli edifici esaminati dagli scriventi si sono verificati solo negli ultimi anni, in particolare dal 1995 in poi, ha fatto nascere l'esigenza di capire quali sono le variabili, anche di carattere meteorologico, che, mutando, hanno determinato l'insorgere del fenomeno.

Un'analisi dei dati pluviometrici e di temperatura, eseguita su un periodo di riferimento degli ultimi 40 anni (Cacciamani C., 2003), riferito all'area Padana Centrale, ha messo in evidenza alcune anomalie climatiche che si sono verificate negli ultimi anni.

In generale la piovosità è diminuita negli ultimi 3 anni anche se non ci sono evidenze di una vera e propria tendenza negativa delle precipitazioni; questo è stato riscontrato anche da un'analisi di tipo regressiva fatta dagli autori.

Per quanto concerne, invece i valori di temperatura, si assiste ad un aumento, negli ultimi anni, sia dei valori minimi sia di quelli massimi su l'intero arco annuale.

In particolare dal 1990 in poi si registrano aumenti delle temperature massime medie annuali in tutto il territorio considerato ed i valori delle minime presentano un'anomalia positiva particolarmente pronunciata nei periodi estivi.

Il terreno, essendo un sistema multifase costituito da uno scheletro solido e da pori che a loro volta sono riempiti di liquido o gas, è quindi strettamente legato all'evoluzione delle condizioni climatiche dell'area.

In particolare, nel caso degli edifici esaminati, questo sistema è rimasto costante fino agli inizi degli anni 90 e le strutture in elevazione non hanno mai subito alterazioni a causa di crisi fondazionali.

Questo in quanto il primo sottosuolo ha presumibilmente mantenuto la sua stabilità di

caratteristiche fisiche meccaniche entro un intervallo accettabile per l'opera in elevazione.

Negli ultimi anni, invece, il verificarsi di variazioni climatiche più estreme ha determinato nuove condizioni di equilibrio del sistema "terreno - condizioni esterne" non compatibili con la tolleranza di deformabilità, peraltro piuttosto ridotta nelle muratura, delle opere esaminate.

4 PROVE GEOTECNICHE, PARAMETRI SIGNIFICATIVI E MONITORAGGIO PER UNA CORRETTA ANALISI DEL PROBLEMA.

La metodologia diagnostica nell'analisi dei terreni sede di edifici e strutture che riscontrano problematiche di campi fessurativi, cedimenti o comunque di dissesti, consiste nella esecuzione di analisi mirate a porre in evidenza le caratteristiche geotecniche del sottosuolo.

Viene pianificata una campagna geognostica che prevede una caratterizzazione dei terreni ponendo particolare attenzione alla possibilità che siano in atto e in evoluzione fenomeni significativi per la fruibilità della sovrastruttura.

Un primo approccio di carattere generale per valutare e caratterizzare il terreno di fondazione consiste nell'esecuzione di una serie di prove penetrometriche intorno all'edificio e, se vi è la possibilità, anche nel suo interno.

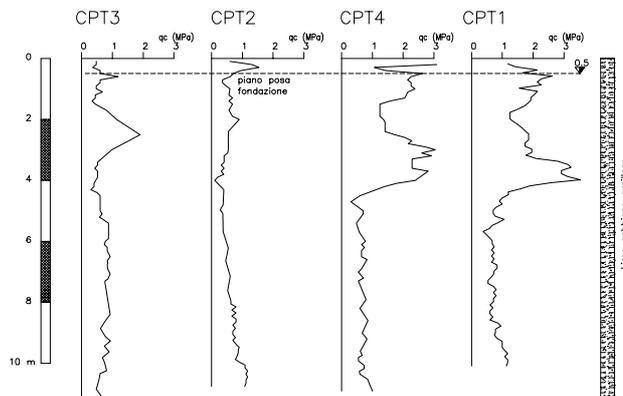
Nella maggioranza dei casi, dall'analisi delle prove CPT eseguite in prossimità di punti sede di dissesto, è stato notato un marcato aumento della resistenza alla punta (qc).

In questo capitolo, finalizzato alla ricerca di primi e comunque non esaustivi parametri, viene fatto riferimento a indagini eseguite su un edificio di configurazione regolare posto in Via della Beverara, Bologna (fig. 1), dove si presentavano fenomeni di dissesto solo su una parte dell'edificio.

Anche in questo caso è stato eseguito un primo approccio con prove CPT e la loro analisi ha evidenziato una differenziazione del terreno di fondazione individuata da volumi di sedimenti maggiormente resistenti (si vedrà più avanti che trattasi di sovraconsolidazioni) posti sempre in corrispondenza di zone dell'edificio dove si sono manifestati fenomeni di cedimento della struttura, come si può rilevare dalla figura 1 seguente.

Nell'ottica di eseguire un'indagine completa, come prima citato, e per avere un riscontro sui risultati dedotti dalle CPT, sono stati prelevati una serie di campioni di terreno, in corrispondenza del piano di posa delle fondazioni, sui quali sono state eseguite analisi di laboratorio.

Si pone in evidenza che tutto l'arco fondale dell'edificio, posto a -0.50 m dal piano di campagna, presenta la stessa litologia, definibile come limi-sabbiosi-argillosi (tabella 1).



Ubicazione delle indagini

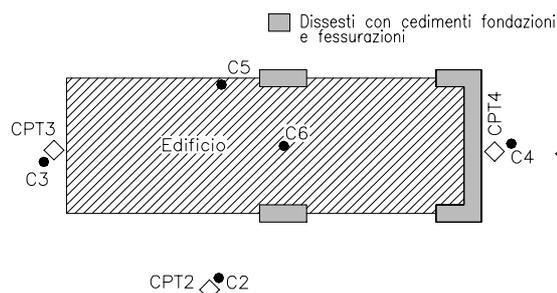


Figura 1 Prove penetrometriche eseguite presso l'edificio posto in Bologna, Via della Beverara, edificio interessato da fenomeni di dissesto.

Le resistenze alla punta (qc) estremamente diverse (fig.1) con valori che variano da 0.5 a 2.7 MPa sempre con i valori maggiori in corrispondenza del lato sede del dissesto sono quelli che, dalle analisi di laboratorio, riscontrano una diminuzione del contenuto in acqua.

Tabella 1. Risultati delle analisi eseguite sui campioni dell'edificio in figura 1. Per una maggiore comprensione dei dati, i campioni vengono elencati, in analogia alle prove CPT, dalla sinistra alla destra dell'edificio.

Id camp.	profondità	CNR -UNI	% Sabbia	% limo	% argilla
C3	0.80 – 1.10	A6	31.45	44.58	23.39
C2	0.60 – 0.90	A6	30.66	44.98	24.18
C5	0.50 – 0.80	A6	27.16	47.46	25.15
C6	0.50 – 0.80	A6	30.80	44.68	24.08
C4	0.80 – 1.10	A6	21.83	56.74	21.36
C1	0.50 – 0.80	A6	24.68	54.32	20.83

Nonostante la composizione granulometrica sia costituita prevalentemente da limi e sabbie (circa 75-80%) e subordinatamente da argille (20-25 %), si deduce che, in generale, l'argilla presente è in grado di condizionare il comportamento dell'intero sedimento, e quindi dell'assetto strutturale dell'edificio, in relazione alla variazione di volume che può manifestare.

Come si può notare dalla tabella 2, il contenuto in acqua dei campioni C1 e C4, localizzati in corrispondenza del massimo dissesto, è minore rispetto agli altri campioni e si pone sotto il limite di ritiro del campione stesso.

Tabella 2 Limiti di Atterberg e contenuto in acqua dei campioni del sottosuolo dell'edificio di figura 1 (dove LL = limite liquido; LP = limite plastico; Ip = indice plastico).

Id campione	w	LR	LL	LP	IP
C3	22.34	17	33	19	14
C2	23.67	15	33	18	15
C5	18.83	15	30	18	12
C6	18.66	16	32	18	14
C4	12.42	19	32	20	12
C1	11.75	18	31	20	11

Questo lo si interpreta come un indice della maggiore perdita di acqua del terreno in quella zona rispetto alle altre.

Queste aree corrispondono alla parte di edificio dove il terreno di fondazione ha un contenuto in argilla minore.

Si deduce che, una piccola variazione del contenuto in argilla, dell'ordine del 3-4% tra una parte e l'altra dell'edificio, ha generato un'anisotropia di comportamento del terreno di fondazione.

Siccome è lecito affermare che le caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione sono, come vedremo meglio nel capitolo successivo, in relazione con le variazioni delle condizioni climatiche stagionali, nel caso specifico si nota una velocità di propagazione del fenomeno di essiccamento più accentuata nelle zone meno argillose, ovvero a porosità più elevata.

Diventa importante, a questo punto, per un'esatta interpretazione dei parametri ed una corretta descrizione e comprensione del fenomeno, ricercare ulteriori dati in modo da acquisire elementi che possano indicare il potenziale di evoluzione del fenomeno.

Un approccio che ha carattere di oggettività utile per valutare lo stato di essiccamento del terreno fondale è il confronto tra il contenuto in acqua (w) ed il limite di ritiro (LR) dei terreni che costituiscono il sedime su cui insiste l'edificio.

Il limite di ritiro infatti rappresenta la massima deformazione ed ogni variazione del contenuto in acqua al di sotto di questo limite non produce ulteriori variazioni di volume del terreno.

Assunto che, a parità di litologia, l'aumento di q_c è inversamente proporzionale al contenuto in acqua, l'analisi delle resistenze alla punta con la profondità permette di stimare la quota fino alla quale si spinge tale fenomeno che può essere causa di dissesto.

Nel caso in esame l'aumento di resistenza alla punta e quindi l'essiccamento si sviluppa fino ad una profondità di 4-5 dal piano di campagna (fig.1).

Accostando quindi i dati delle prove di laboratorio con le prove penetrometriche e studiando il contenuto in acqua

si definisce un volume di terreno al di sotto dell'edificio in cui si sono manifestati fenomeni di essiccamento e conseguente ritiro volumetrico.

Tali zone sopra citate tendenzialmente tendono ad esaurirsi sia verticalmente che orizzontalmente verso l'interno dell'edificio e hanno il massimo sviluppo in corrispondenza delle fondazioni perimetrali dello stesso.

Si nota infatti una maggiore difficoltà delle zone di terreno interne all'edificio di interagire con le variazioni climatiche esterne venendosi a formare un sistema "quasi chiuso" che mantiene la sua stabilità in termini di contenuto di acqua nel tempo.

Un'ulteriore variabile nel processo di essiccamento che presuppone un approfondimento dello studio, non solo dal versante geotecnico, è rappresentata dal gradiente di temperatura e di piovosità che interviene nello sviluppo del fenomeno.

Come già citato, il fenomeno di essiccamento si può sviluppare sia in superficie che in profondità e l'estensione dello stesso nelle due direzioni, fino al raggiungimento di un suo equilibrio, è correlato, a parità di litologie, alle variazioni di apporti idrici e temperatura nel tempo.

Al fine di creare una corretta interfaccia tra lo studio del fenomeno geotecnico e l'analisi per il successivo consolidamento, che dovrà essere fatta al fine di restituire alla struttura i dovuti requisiti prestazionali di fruibilità ed esercizio richiesto, è necessario porsi il problema delle conseguenze che i cedimenti fondali danno e possono dare alla sovrastruttura.

Partendo dal presupposto che è di difficile se non improbabile analisi teorica l'indagine delle sollecitazioni che possono crearsi in strutture con un livello di degrado medio come quello in esame e volendo trovare uno strumento che comunque fornisca ulteriori informazioni, se pur indirette, sui fenomeni investigati e fino ad ora descritti è utile installare una serie di stazioni crepemetriche finalizzate al monitoraggio delle fessure più significative.

Da tali stazioni si valuta l'evoluzione dei dissesti e conseguentemente il comportamento del terreno di fondazione nel tempo.

Il crepometro utilizzato a questi fini è composto da uno strumento di misura basato su di un comparatore centesimale (escursione massima 10 mm) al quale sono collegate due punte coniche (tastatori) che vengono poste dentro le forature situate sulle placchette testimone (figura 2) ancorate alla muratura lesionata.

Il monitoraggio delle lesioni permette di ottenere informazioni importanti che chiariscono sia l'entità dei movimenti in atto, sia le relazioni che legano tali fenomeni con l'andamento nel tempo e climatico dell'area.

In generale in tutti i casi studiati e in particolare anche nei due presentati nella memoria, si è notato uno stretto legame tra le variazioni climatiche stagionali ed i movimenti misurati sulle stazioni crepemetriche.

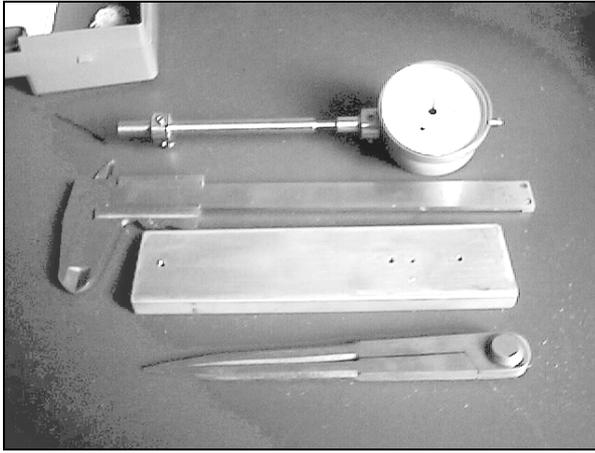


Figura 2 Strumentazione crepemetrica

Allo scopo di ottenere una buona rappresentazione dei movimenti reciproci fra le due porzioni delle lesioni oggetto del monitoraggio, è stata impiegata una disposizione dei testimoni secondo i vertici di un triangolo approssimativamente equilatero, con lato pari a circa 100 mm. Con questa tecnica si riescono ad ottenere due letture piuttosto ravvicinate della stessa fessura in modo da comprendere l'evoluzione della stessa in tutte le direzioni del piano della parete.

Nella figura 3 sono riportati entrambi gli andamenti delle variazioni di lunghezza tra i vertici della base fissa ed il vertice mobile di una stazione crepemetrica. Si evidenzia una progressiva chiusura delle lesioni nel periodo Novembre-Maggio ed una riapertura delle stesse nel periodo Giugno-Ottobre.

Le variazioni delle deformazioni corrispondono all'equilibrio energetico che s'innesci tra fattori climatici presenti ed il terreno di fondazione.

Il terreno recepisce dall'esterno le variazioni climatiche e muta il suo stato fisico di equilibrio; le fondazioni se poste in zona sensibile a queste variazioni risentono delle modifiche e le recepiscono come stato sollecitativo di natura coattivo.

E' evidente che fondazioni non adeguate, oppure non integre, non sono in grado di adattarsi da sole alla nuova condizione ma chiamano i causa la sovrastruttura che, in virtù della sua notevole rigidità e della possibile, già presente, alterazione locale, reagisce dissipando energia in modo puntuale come, per esempio, nei quadri fessurativi.

Si può supporre che la nascita delle fessure investigate possa essere avvenuta per stati coattivi di particolare rilevanza e singolari o con sovrapposizione di altri stati di sollecitazione, in quanto nei periodi di monitoraggio eseguiti il decorso fessurativo fa notare (fig.3) dei cicli di apertura e chiusura con un ritorno piuttosto evidente ma non completo. Tali cicli potrebbero essere identificati come cicli di passaggio, comunque importanti alla luce delle considerazioni del cap.4, e non come un ciclo di sviluppo iniziale delle fessure.

Risulta evidente che l'apertura delle fessure nel periodo estivo è da mettere in relazione con una perdita del contenuto in acqua del terreno per essiccamento e

viceversa nel periodo invernale devono innescarsi dei fenomeni di rigonfiamento dello stesso tali da giustificare una tendenza alla chiusura delle lesioni.

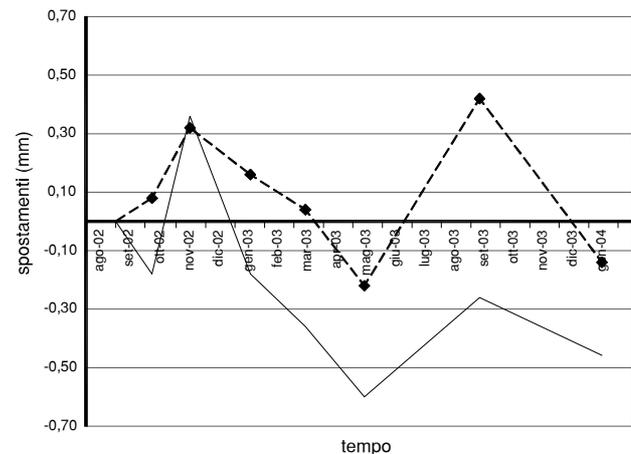


Figura 3 Movimenti misurati nell'arco di un anno su una stazione crepemetrica nello stabile di San Lazzaro di Savena.

A questo punto risulta necessario chiedersi quali sono le variazioni delle caratteristiche geotecniche del terreno per riscontrare il comportamento delle fessure del tipo sopra descritto.

Per fare ciò risultano importanti le considerazioni eseguite dopo prove fatte in tempi diversi, argomento del capitolo successivo.

5 VARIAZIONE DELLE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI INVESTIGATI IN RELAZIONE ALLA STAGIONALITA'.

Come detto in prefazione e al termine del capitolo precedente, attraverso un secondo caso di dissesto, riferito ad uno stabile posto nel Comune di San Lazzaro di Savena in Via Piave, si vuole dedurre un ulteriore meccanismo che permetta di studiare con maggior completezza l'evoluzione del fenomeno.

Per fini di studio, le indagini in situ e di laboratorio nel cantiere sopra citato sono state eseguite due volte, ognuna nei periodi d'inversione delle deformazioni visti in precedenza. Le prime prove sono state realizzate in Luglio del 2001, le seconde in Febbraio 2003. Durante il periodo intercorso l'edificio è stato monitorato con l'installazione di una serie di stazioni crepemetriche in corrispondenza delle lesioni più significative.

Le letture in situ effettuate hanno evidenziato il protrarsi del fenomeno e le deformazioni misurate mostrano un evidente andamento sinusoidale (vedi figura 3) che si sviluppa nel tempo, con una riapertura delle lesioni nel periodo estivo ed una chiusura delle stesse durante l'inverno.

Dal punto di vista stratigrafico l'area è costituita da limi sabbiosi argillosi fino alla profondità di 5 metri e limi

argillosi oltre tale quota.

Particolare interesse riveste l'analisi delle CPT, eseguite a distanza di 18 mesi tra loro (figura 4), che pongono a confronto le resistenze alla punta (qc).

Tali prove sono state eseguite in corrispondenza di uno spigolo dell'edificio ritenuto significativo.

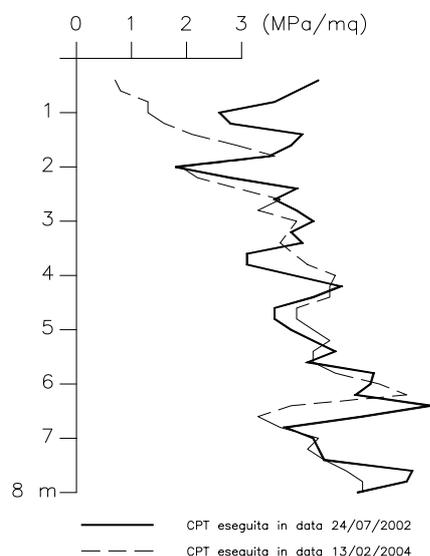


Figura 4. Confronto tra le prove penetrometriche statiche eseguite nello stabile di via Piave, s. Lazzaro di Savena (BO)

Si può notare l'evidente diminuzione della resistenza alla punta nella seconda prova (invernale) fino alla profondità di 2 m dal piano campagna. Tale differenza diminuisce con la profondità a testimonianza che il fenomeno dell'essiccamento nel tempo ha massimo sviluppo nelle zone superficiali.

Dopo la quota di - 2.0 m dal piano campagna non si evidenziano variazioni importanti e si nota una generale similitudine tra le due prove.

L'analisi dei parametri rilevati in situ nelle due prove, ha permesso di individuare una diminuzione delle resistenze alla punta qc avvenuta tra il periodo estivo ed il successivo periodo invernale corrispondente ad un aumento del contenuto in acqua del terreno di fondazione in questo tratto. Tale aumento, si esplica tramite un rigonfiamento del terreno che giustifica la tendenza alla chiusura delle lesioni nel periodo invernale.

Lo spessore della fascia di terreno interessata dai fenomeni di essiccamento e rigonfiamento non è da ritenersi un dato assoluto; nel nostro caso, tuttavia, le prove sono state eseguite nei presumibili periodi di estremo delle deformazioni, quindi sono da ritenersi abbastanza prossimi alla massima potenzialità di sviluppo del fenomeno. Questo è stato possibile per merito della lettura dei crepemetri, che hanno permesso di evidenziare le situazioni di minimo e massimo dei quadri fessurativi. Con questo importante ausilio le prove diventano significative per i comportamenti limite del terreno.

La sola esecuzione di prove penetrometriche statiche nella seconda fase di studio presenta il limite legato al basso grado di precisione nella determinazione degli spessori di terreno dove effettivamente si manifestano i fenomeni di essiccamento in relazione alle caratteristiche stratigrafiche.

I fenomeni sopra menzionati, determinanti nello sviluppo e nell'evoluzione del dissesto, sono meglio comprensibili con le prove di laboratorio.

In ogni caso i campioni prelevati nella seconda fase possono essere finalizzati alla ricerca dei soli parametri condizionati dalle variazioni climatiche, in particolare modo il contenuto in acqua. Si sono quindi posti a confronto tali variazioni in funzione della profondità tramite due sondaggi eseguiti nelle due campagne geognostiche.

La determinazione del contenuto in acqua è stata eseguita ogni 20 cm sulle carote dell'intero sondaggio. I sondaggi sono stati eseguiti a percussione che prevede il prelievo continuo di campioni senza l'uso di fluidi al fine di evitare contaminazioni di acqua proveniente dall'esterno, inoltre questo metodo evita la perdita di acqua delle carote causato dal riscaldamento generato dall'attrito tra la rotazione del carotiere ed il terreno, tipico dei metodi a rotazione.

Per ottenere gli stessi risultati con un sondaggio geognostico eseguito con gli usuali metodi occorrerebbe un prelievo continuo di campioni indisturbati con l'inevitabile conseguenza di un notevole aumento dei costi d'indagine.

Per porre in evidenza gli aspetti dei meccanismi che condizionano il comportamento del terreno con il variare degli apporti idrici, ovvero dello spessore essicato, è necessario eseguire il confronto sul "sistema terreno" nei due momenti indagati attraverso l'analisi dei rispettivi contenuti in acqua.

Il tutto ovviamente riferito anche al contesto geologico in essere, come è stato fatto nella fig. 6 seguente dove si pongono in evidenza alcuni aspetti del meccanismo evolutivo.

Analizzando la figura si nota che, nel primo tratto, dal piano campagna fino a 2.6 m di profondità (strato A), si evidenzia, nella seconda prova, un aumento del contenuto in acqua con conseguente scadimento delle caratteristiche di resistenza del terreno, il tutto in accordo con quanto evidenziato dalle prove penetrometriche eseguite.

Tra quota 2.6 e 3.4 m (strato B), si nota invece una diminuzione del contenuto in acqua nel secondo sondaggio effettuato. Si può dedurre che, successivamente alla prima fase d'indagine, si è manifestato un ulteriore essiccamento del terreno che si è protratto oltre Luglio 2002. Questo fatto nelle CPT è difficilmente riscontrabile; a posteriori si può notare, nello stesso tratto, un costante ma appena accennato aumento della qc, la cui non immediata evidenza il più delle volte fa sì che questo fenomeno non venga colto nella consueta pratica progettuale.

Per quanto concerne il tratto compreso tra quota 3.4 e 5.0 m (strato C), occorre premettere che durante la prima fase d'indagine il foro del sondaggio è stato strumentato

con un piezometro tipo Norton che non ha mai evidenziato la presenza di una falda fino alla profondità di 7 m dal piano campagna. Durante l'esecuzione del secondo sondaggio, in data 20/01/2004, successivo ad un evento piovoso durato oltre 24 ore, è stata eseguita una lettura d'esercizio del piezometro che ha manifestato la presenza d'acqua alla profondità di 3.5 m dal piano campagna. Una lettura successiva, eseguita in data 24/01/04, mostrava l'assenza di acqua nel piezometro sopraccitato.

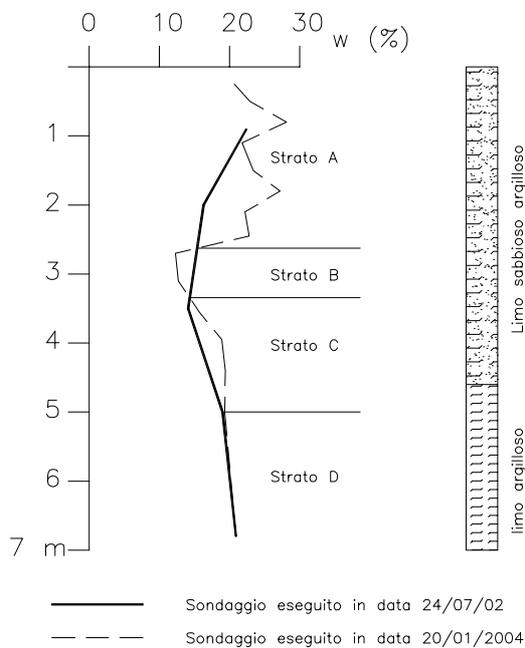


Figura 6. Variazione del contenuto in acqua con la profondità nei due sondaggi eseguiti in corrispondenza dello stesso spigolo.

Da quanto sopra esposto si deduce che lo strato C, durante gli eventi piovosi, è sede di una piccola falda effimera che ha un tempo di permanenza molto breve, ma comunque capace di far aumentare il contenuto in acqua della fascia di terreno interessata.

Da quota 5.0 m in poi (strato D) si nota un allineamento dei valori di contenuto in acqua tra i due periodi d'indagine. Nel caso specifico, tale profondità indica il ragionevole limite massimo di sviluppo del fenomeno in relazione alle diverse condizioni climatiche manifestate.

Da quanto descritto si possono dedurre alcuni meccanismi attraverso i quali si sviluppa il fenomeno nel tempo, meccanismi che possono avere carattere di generalità che va oltre il caso specifico.

Durante gli eventi piovosi si manifesta una fase di rammollimento dei terreni con un fronte che procede dall'alto verso il basso ed interessa terreni sempre più profondi in relazione all'intensità dell'evento ed alla permeabilità dei terreni interessati.

Il periodo estivo invece rappresenta il momento di perdita del contenuto in acqua; tale perdita si sviluppa, nel nostro caso, dal piano campagna fino ad una profondità di 3.4 m.

E' da notare che dalle prove penetrometriche si riesce ad apprezzare una profondità di solo 2.00 m e questo, oltre a

fornire considerazioni errate, potrebbe condurre ad un non corretto progetto di consolidamento.

Il caso in esame pone in evidenza, come considerazione di carattere generale, come l'assetto geologico e la disposizione dei vari strati con caratteristiche di permeabilità differenti condizionino i meccanismi di interazione acqua-terreno.

Nello specifico, il limite di permeabilità posto a quota di - 5 m dal piano campagna, determina, anche se per periodi brevi, lo stazionamento dell'acqua in questa zona con il conseguente inumidimento e relativo rigonfiamento del terreno. Questa situazione può mascherare un eventuale essiccamento che si potrebbe manifestare oltre il limite dei 3.40 m sopra citato. E' stato, inoltre, possibile determinare una profondità limite di 5 m oltre la quale non si manifestano fenomeni di ritiro e rigonfiamenti. Il tratto successivo ai 5 m presenta, nelle due fasi d'indagine, dei valori di contenuto in acqua costanti. In generale, per i terreni dell'area in esame, le quote sopra citate nello specifico hanno una ricorrenza frequente; infatti gli spessori di terreno che manifestano fenomeni di ritiro e rigonfiamento sono compresi in un intervallo che si sviluppa fino a profondità dell'ordine di 4-5 m. Dalle osservazioni sopra esposte, si deduce la notevole importanza che assume una corretta pianificazione delle indagini e dei parametri geotecnici necessari per l'interpretazione dei fenomeni descritti. Ne consegue che un corretto consolidamento dell'edificio, quando sono in atto fenomeni di ritiro e rigonfiamenti, sia imprescindibile dalla verifica delle caratteristiche fisico-volumetriche dei terreni di fondazioni e dal monitoraggio del quadro fessurativo.

6 CONCLUSIONI

Nella presente nota si sono analizzati i fenomeni di dissesto degli edifici causati da cedimento di fondazione in una certa area del territorio di Bologna, che è stata definita dal punto di vista geografico.

Dopo che è stata fornita giustificazione, rispetto alla climatologia, dell'accentuarsi dei fenomeni negli ultimi anni, è stata analizzata la fenomenologia illustrando una metodica di indagine che si ritiene adeguata allo scopo. Il procedimento consiste nella esecuzione di prove penetrometriche statiche, prove di laboratorio e monitoraggio della sovrastruttura attraverso crepemetri.

Il metodo consente, mediante l'interpretazione delle prove e il loro confronto, di individuare le caratteristiche stratigrafiche del terreno di fondazione, le deformazioni della sovrastruttura e la fascia di terreno nella quale si sviluppano nel tempo fenomeni di ritiro e di rigonfiamento in funzione delle variazioni climatiche esterne. I dissesti che si verificano sono funzione di un'anisotropia di comportamento del terreno di fondazione che genera dei cedimenti differenziali non tollerati dalla struttura.

Le cause sono molteplici e spesso concomitanti, ma in generale sono da ricercare in tutti quei fattori che possono modificare o alterare l'equilibrio del sistema ritiro-rigonfiamento del terreno nelle varie zone dell'edificio.

In generale un primo fatto che si riscontra è che i fenomeni citati nell'articolo non si verificano in presenza di terreni con falda superficiale stabile, prossima al piano campagna.

Il fenomeno si sviluppa in terreni che hanno una componente argillosa non dominante; infatti terreni di natura prevalentemente limosa-sabbiosa contenenti piccole percentuali di argilla sono sede tipica delle situazioni di dissesto citate. Un'utile strumento che permette di verificare lo stato di essiccamento del terreno è l'analisi del contenuto in acqua, che consente di individuare volumi di terreno a diverse condizioni di sovraconsolidamento.

In un secondo caso sono state eseguite due campagne geognostiche, entrambe attraverso prove combinate, in corrispondenza dei presunti valori massimi e minimi delle deformazioni, valutati questi con l'importante ausilio del monitoraggio creepometrico. Si è potuto indagare sulla estensione in profondità del fenomeno e le variazioni fisico – volumetriche del terreno nel periodo in esame; questi ultimi sono risultati parametri di notevole utilità al fine di un conseguente progetto di consolidamento.

Si è notato che la estrema variabilità delle qc nel tempo nella prima fascia di terreno fa sì che non si possano considerare subito attendibili tali valori al fine di eseguire valutazioni legate ad un progetto ingegneristico di consolidamento; pertanto si dovrà fare o affidamento su strati più profondi che hanno una stabilità nel tempo, oppure si dovrà procedere ad una valutazione molto ponderata dei parametri caratteristici del primo sottosuolo che dovranno essere esaminati nelle condizioni di minimo e massimo stagionale.

Si vuole evidenziare che i temi e i concetti qui sviluppati con riferimento all'analisi di edifici esistenti che hanno manifestato dissesti, possono essere visti, e di conseguenza interpretati, anche come parametri progettuali di controllo nel caso di erigende costruzioni nel territorio bolognese citato, ovvero in zone che presentassero le stesse caratteristiche litologiche ed idrogeologiche.

E' evidente quindi che in un'analisi del primo sottosuolo, al fine di eseguire il progetto di una fondazione di carattere superficiale, non ci si deve limitare al controllo di una pressione massima ammissibile e alla valutazione dei cedimenti dedotti da una litologia interpretata da una CPT, in quanto è proprio nei primi strati di terreno che entrano in gioco fattori che possono modificare sensibilmente l'interpretazione di tali prove.

Le analisi qui descritte, anche condotte in un solo tempo, possono quindi essere di ausilio per comprendere se esiste una fenomenologia come quella presentata in atto al fine di adottare le dovute cautele in fase progettuale.

7 BIBLIOGRAFIA

- Cacciamani C., 2003. *Cambiamenti climatici, lo stato globale e l'evoluzione a scala regionale*. inarcos 641, pp. 512-519
- Cafaro F., Cotecchia F., 2002 *Influenza di struttura e storia tensionale sul comportamento all'essiccamento*

di terreni a grana fine. Incontro annuale dei ricercatori di geotecnica 2002 – IARG 2002, Napoli 19-21 Giugno 2002.

Lambe T.W., Whitman R.V., 1979. *Meccanica dei Terreni*. John Wiley & Sons, New York

Cestari F., 1990. *Prove Geotecniche in sito*. Geo-Graph snc, Segrate.

Viel G., Tommasetti M., Monteaguti M., Frassinetti G., 1997. *Pianificazione ambientale delle aree metropolitane: il Bolognese, primi risultati*. Convegno di Geologia delle grandi aree urbane, Bologna 4-5 Novembre 1997, pp.24-48

ABSTRACT

STUDY FOR A CORRECT ANALYSIS OF THE RECENT ENVIRONMENTAL UPHEAVAL PHENOMENON OF THE BUILDINGS IN BOLOGNA, DUE TO A CRISIS OF THE FOUNDATIONS SYSTEM.

Keywords: foundation settlement, weather changing, water content, drying, crack monitor comparator stations.

The increase of the superstructure's upheaval phenomenon in the preceding years, which caused the foundation problems (mainly in walled buildings), should be identified as a consequence of changing meteorological conditions. In fact, the anomalies occurred due to a negative precipitation trend along with an increase of the average annual temperature. The area of Bologna, that has the problem with sinking foundations, contains silt, sand and a lower percentage of clay.

The investigated structures often have very superficial foundation of modest width. The best diagnostic methodology to analyse this phenomenon (in order to classify the soil both in terms of further progressive development and reinforcing intervention) consists of carrying out penetrometric and laboratory testing along with monitoring of the fissures.

The soils checked put in evidence volume changes in the time due to the clay element. These volumetric variation generate settlement that cause building damage. By comparing these tests, we can determine the soil volume under the building where the phenomenon of volumetric shrinkage occurred which created the unstable equilibrium over time. By monitoring the cracks, it is possible to observe the strains occurred through times, showing an obvious cyclic progress, with opening phases during summer with dry soil, and closing during winter.

The strains detected between summer and winter indicate an incomplete return to the original conditions that progressively increases the crack created. By carrying out laboratory and in situ testing, while the opening of the fissures are at their minimum/maximum, we can discover useful information regarding the soil change and identify this phenomenon more accurately. So this article has thrown the bases for a right exam of subsoil with the presence of the described phenomenons.