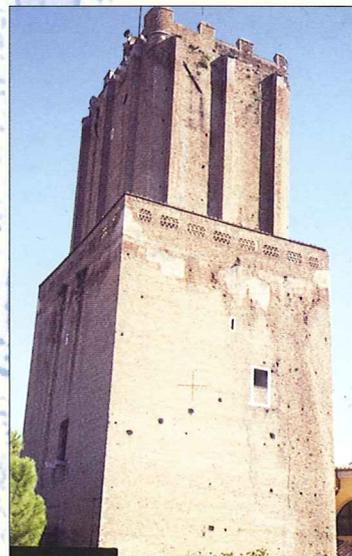


# Monitoraggio strutturale Tecnologie laser per la Torre delle Milizie a Roma

DI FABRIZIO BERNARDINI E RENZO CARLUCCI



*Il monitoraggio strutturale è il focus de facto di questo numero in linea con l'articolo che lo precede. In questo articolo viene presentato un sistema completamente progettato ex-novo per il monitoraggio di un famoso manufatto storico a Roma.*

*La singolarità del sistema è quella di impiegare un pendolo laser e un sensore a matrice attiva che ne registra in maniera continua le microoscillazioni, simulando un vero e proprio pendolo, così come per altra via già veniva fatto nel lontano 1932.*

La Torre delle Milizie a Roma localizzata nei Mercati Traianei è di origine romana ed è inclinata in maniera vistosa tale da incutere preoccupazioni all'osservatore che non sia al corrente della sua storia.

Presenta oggi una inclinazione pari a 1,36° gradi sessadecimali sulla verticale dello spigolo esterno in direzione Nord-Est. Tale misura è stata derivata da restituzione fotogrammetrica su appoggio topografico di precisione effettuato il 24 Febbraio 1998. L'incremento di inclinazione che la torre subisce è di ca 2 decimi di secondi all'anno. Se questa inclinazione si fosse mantenuta costante nel tempo (assumendo una inclinazione media di ca 0.0015° all'anno) sin dalla sua costruzione sarebbero occorsi ca. 600 anni per arrivare nel 1698 all'inclinazione di 0,9° e ulteriori 300 anni per arrivare all'inclinazione attuale di 1,36°. Tali valori non sono trascurabili, ma non destano particolari preoccupazioni attualmente per la stabilità del complesso.

Se la torre continuasse con tale velocità occorrerebbero ulteriori 600 anni per incrementare di 1° l'inclinazione attuale. E' da ritenere che la causa della inclinazione della Torre sia ascrivibile a disomogeneità del terreno fondale e già dalla sua costruzione abbia iniziato il lento processo di rotazione ancora in atto.

Anno 1698	Anni 1932-1964	Anni 1992-1996	Anno 1998
Iscrizione interna alla Torre: misura assoluta <b>0,9°</b>	Pendoli apposti dal Governatore: misura relativa <b>0,11° Est</b> in 32 anni	Rilevazioni Geosonda: misura relativa: 0,00010° Est in 5 anni	Rilevazione fotogrammetrica: misura assoluta <b>1,36° Est</b>

Le notizie certe sull'inclinazione della Torre nel tempo

Periodo	Incremento	Incremento/anno
1698-1998	0.4500	0.0015
1992-1997	0.0010	0.0002
1932-1963	0.1138	0.0037

L'incremento medio annuale stimabile

Particolari avvenimenti avranno senza dubbio apportato variazioni di velocità di inclinazione, come ad esempio la costruzione nel 1600 della vicina chiesa di S. Caterina.

E' pertanto ipotizzabile un' accelerazione di inclinazione dal 1600 fino ai lavori di sottofondazione del 1911 con successivo aumento dovuto all'assestamento iniziale e conseguente decremento dal 1970 ca ad oggi, proporzionale all'assestamento successivo e alla progressiva entrata in funzione della nuova sottofondazione. Oggi il movimento sembra essere quasi giunto a valori abbastanza contenuti.

La Torre è fondata su terreno disomogeneo. Il lato Sud-Ovest poggia su costruzioni di epoca romana, mentre il lato Nord-Est su argille compatte.

I sondaggi realizzati nel 1911 hanno rivelato la presenza di costruzioni di epoca romana e l'appoggio di parte della fondazione su una strada romana di basalto e travertino.

La causa dell'inclinazione è pertanto di natura fisiologica imputabile con certezza a questa disomogeneità fondale. Non è lontana l'ipotesi che la torre si sia inclinata subito dopo la costruzione e che i vari eventi sismici, antropici e costruttivi abbiano contribuito in seguito all'aumento dell'inclinazione.

Nel Settembre 1914 sono stati disposti lavori di sottofondazione della Torre così descritti:

- 1° - Consolidare i quattro lati della fondazione della Torre con muratura di mattoni, anche con malta di cemento, a piccoli tratti, con cura speciale nelle inzeppature.
- 2° - Sistemare al più presto lo scolo delle pluviali, allontanandole dai cavi.
- 3° - Nel coretto ove si sono verificati i maggiori danni si propone di isolare la chiesa dallo spigolo della Torre, a cominciare dal principio dello sperone fino al piano del pavimento del coretto, ed anche più in giù fino a dove sarà possibile.
- 4° - Mantenere una sorveglianza continua..."

Il sistema di misurazione con pendoli installato durante i lavori di sottofondazione è ancora ben visibile, funzionante e all'uopo riutilizzabile. In fig. 1 si nota la piastra di travertino murata sopra la copertura della Torre, alla base del tavolino in pietra di recente realizzazione. All'estremità superiore di tale piastra si trova una placca in ottone incisa a V ove è previsto l'appoggio del cavo del filo a piombo. Sulla esatta verticale, al livello +11.50 (ingresso attuale della torre), è disposto un cippo marmoreo con scolpiti assi cartesiani e la posizione che il piombo ha assunto negli anni 1932 e 1963 (fig. 2). Analoghi cippi marmorei e appoggi vincolati sono disposti sui tre vertici Sud, Est e Nord al piano del primo camminamento.



Fig. 1 - L'appoggio vincolato del filo a piombo in copertura

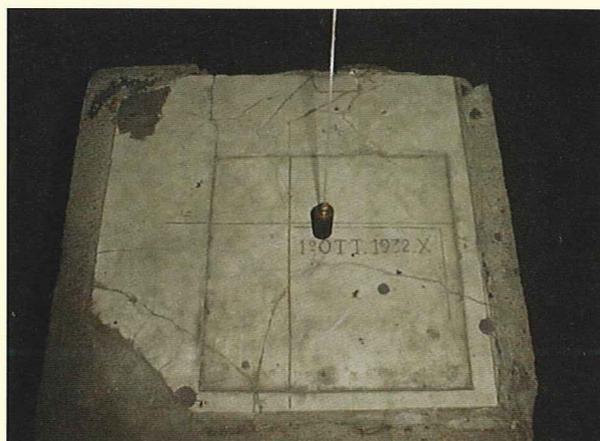


Fig. 2 Cippo marmoreo con assi cartesiani al piano di ingresso

La successiva realizzazione è documentata sui libretti delle misure e su alcuni disegni.

Il piano fondale viene allargato di ca 1,5 - 2 m con sottofondazione profonda fino a 2 m (q. - 8.00) dal piano fondale originale.

L'analisi dei disegni, schizzi e libretti dei lavori mette in luce un'imponente e ardua realizzazione che con sistema a scarpa ha sottofondato la torre con maggiorazione di superficie fondale derivata da ca 1,5/2.0 metri di allargamento lungo i fl del perimetro con inzeppamento e inserimento di muratura fino a oltre 2 metri all'interno del perimetro fondale.

La realizzazione non è stata senza inconvenienti, data la sua arduità, infatti movimenti preoccupanti ed improvvisi provocati da assestamento hanno destato all'epoca non poche preoccupazioni.

Per misurare il movimento vengono realizzati dei punti fissi di misura con pendolo tramite appoggio vincolato all'estremità superiore e cippo marmoreo in basso per il riporto della misura.

Nel 1932 il Governatorato dispone ulteriori controlli riportando la nuova posizione dei pendoli apposti nel 1915 e apponendo nuove biffe forniscono esaurienti informazioni dell'assestamento che seguì tale lavoro fino al 1962, anno in cui viene riportata ancora la posizione dei pendoli. Negli anni '70 i movimenti vengono osservati dall'Istituto di Topografia e Geodesia della Fa-

coltà di Ingegneria di Roma (ad opera del prof. U. Giannoni).

Dal 1992 al 1996 il Comune affida alla Geosonda l'incarico di monitoraggio continuo della Torre. I movimenti rilevati in quest'ultimo periodo rientrano tutti nell'ambito di incertezza della sensibilità degli strumenti utilizzati.

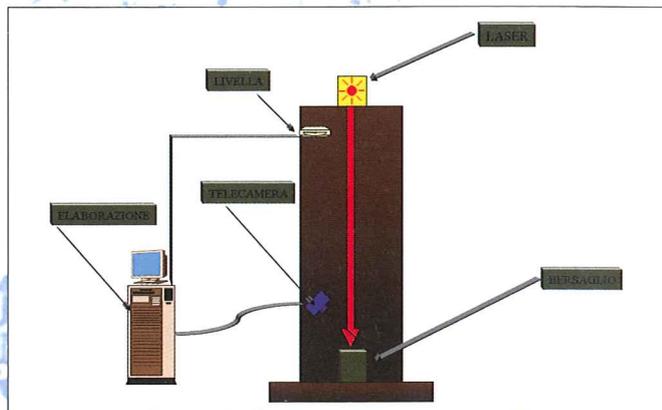
Il quadro sembra pertanto esaustivo:

*I lavori di sottofondazione del 1911-16 hanno diminuito la pressione sul terreno fino a ca. 4,5 Kg/cm<sup>2</sup> e i piccoli movimenti attuali potrebbero essere ancora dovuti agli strascichi dell'assestamento successivo a tali lavori.*

### L'intervento attuale

Il recente intervento di consolidamento realizzato per conto del Comune di Roma durante gli interventi straordinari per il Giubileo del 2000, ha previsto l'attuazione di opere di monitoraggio tra le quali un pendolo laser la cui immagine, proiettata sul cippo marmoreo preesistente, viene ripresa ed analizzata da un sistema computerizzato.

L'intero complesso di sistemi di monitoraggio è comunque variegato e rispondente alla necessità di verificare gli esiti del consolidamento fondale realizzato nel 1911 che ha subito un lungo assestamento. Solo da pochi anni l'opera è finalmente andata a regime e le misure di monitoraggio sono state predisposte con le seguenti modalità:



Schema funzionale del sistema

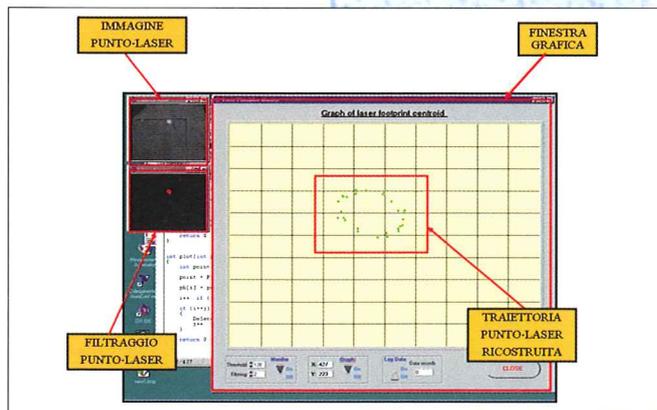


Immagine video dell'acquisizione dell'immagine dei punti laser

- Esecuzione di misure di livellazione per il controllo della variazione di inclinazione del piano fondale.
- Controllo della piezometrica e dell'inclinazione degli strati di terreno fondale fino a q -30,00.
- Prelievi di campioni di argilla a cadenza stagionale correlata alle misure piezometriche ed inclinometriche
- Realizzazione di idoneo sistema di monitoraggio permanente della verticalità.

Tra queste particolare interesse desta il sistema di monitoraggio permanente della verticalità per il quale si è voluto realizzare un sistema ad analisi di immagine di un pendolo laser in sostituzione di un pendolo tradizionale in modo da poter fornire informazioni usando sistemi tradizionali asserviti da nuove tecnologie.

I principali componenti sono:

1. Pendolo Laser libero di oscillare (o bloccabile) sulla sommità della Torre (ove anticamente veniva collegata la corda del pendolo)
2. Livelle analogiche riprese da videocamera in due posizioni (basso e alto)
3. Sistema di analisi con videocamera del punto laser proiettato sul cippo marmoreo di base.
4. Sistema computerizzato di controllo e gestione dei dati
5. Sistema modem per trasmissione dati a distanza.

**Specifiche del sistema di monitoraggio strutturale permanente**

1. Sistema di controllo di verticalità tramite emettitore laser nadirale autolivellante, visualizzazione del fascio luminoso (d= 2 mm) sulla pietra di base esistente, analisi di immagine tramite sensore a scansione ottica e rilevazione movimento automatica con risoluzione pari a 0.2 mm. Il sistema sarà composto dai seguenti elementi: E1 - Emettitore laser autolivellante basato su piastra ancorata alla volta superiore a q. +40.000 m con regolazione posizione su tre viti calanti, possibilità di osservazione del punto mirato tramite oculare dotato di sistema diottrico per la centratura, completo di cavi per l'alimentazione. S1 - Sensore CCD con risoluzione pari a 0,2 mm per la rilevazione della variazione di posizione del punto luminoso proiettato da E1 sulla piastra base, completo di cavi per il segnale e alimentazione. Da posizionare a q. +13.00 su parete Est mirato sulla piastra di base esistente R1.
2. Sistema di controllo di variazione di inclinazione parietale su due assi tramite misura angolare da posizionare su parete EST a q +40.00m. Il sistema sarà composto dai seguenti elementi: S2 - Sistema di misurazione angolare a due assi con risoluzione +/- 0,0001 mrad (0,2"). Valori misurati restituiti in forma digitale (RS485) per l'elaborazione e registrazione tramite computer. Temperatura di esercizio: da -20° C a +50°C. Completa di cavi e piastra di appoggio parietale.
3. Sistema di controllo piezometrico dell'andamento di falda a quota prevista -30 m dal p.c. posizionati su due vertici SE e NO della torre: il sistema sarà composto dai seguenti elementi: P1-P2 Piezometro con misurazione continua dell'altezza di falda digitale per la registrazione su computer. Numero 2 (da P1 a P2).

4. Sistema di controllo inclinometrico del terreno fondale fino quota prevista -30 m dal p.c. posizionati su due vertici SO e NE della torre: Il sistema sarà composto dai seguenti elementi: I1-I2 Inclinometro con misurazione continua dei movimenti digitale per la registrazione su computer. Numero 2 (da I1 a I2)
5. Centrale di acquisizione dati posizionata nel locale a q. 0.00., composizione: C1 - Sistema computerizzato per l'acquisizione dei dati da otto porte seriali del tipo RS232 / RS485. Sistema di archiviazione dati su disco rigido con backup , floppy disk e unità di alimentazione e spegnimento automatico in caso di mancanza di tensione. Sistema di visualizzazione abilitabile su due unità video dotate di tastiera facilitata per i comandi principali. Software: sistema di gestione porte seriali e archiviazione con backup di sicurezza dati. Sistema di prelievo dati per trasporto. Sistema per analisi di immagine e computo movimenti da camera CCD. Sistema per la visualizzazione grafica dei movimenti registrati dai sensori.
6. Sistema per la visualizzazione dei grafici dei movimenti registrati tramite unità video-tastiera atta all'uso del pubblico: Caratteristiche: V1 - Video grafico 15" risoluzione almeno 0.28 pitch. Tastiera semplificata (10 tasti funzione per la scelta dei menu).
7. Sistema di alimentazione sensori a corrente continua Caratteristiche: A1 . Alimentatore in corrente continua 12 volts 1 Ampere per l'alimentazione dei sensori S1, S2 e dell'emettitore E1. Comprensivo di cavi e installazione.



*Interno del laser di sommità*

**Autori**

**FABRIZIO BERNARDINI**  
A&C 2000 S.r.l, Roma - fb@aec2000.it

**RENZO CARLUCCI**  
A&C 2000 S.r.l - rcarlucci@aec2000.it