

MADLab-ER – LEZIONI DAL SISMA 2012

The days of the earthquake. Lessons from the tragedy.
L'esperienza del terremoto dell'Emilia, dopo l'ora più buia

LEZIONE 4 | MODENA - Giovedì 9 Aprile 2026

ATTUALITÀ E PROSPETTIVE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO INTEGRATO DEL SITO

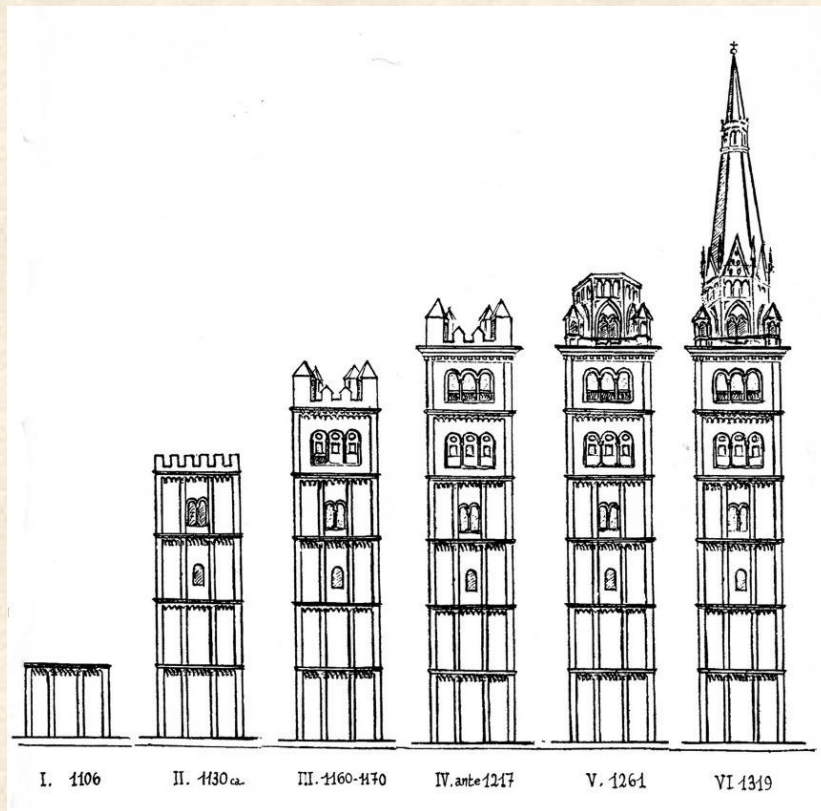
Relatore: Giuseppe Mucci (Comune di Modena)

Importanza del monitoraggio

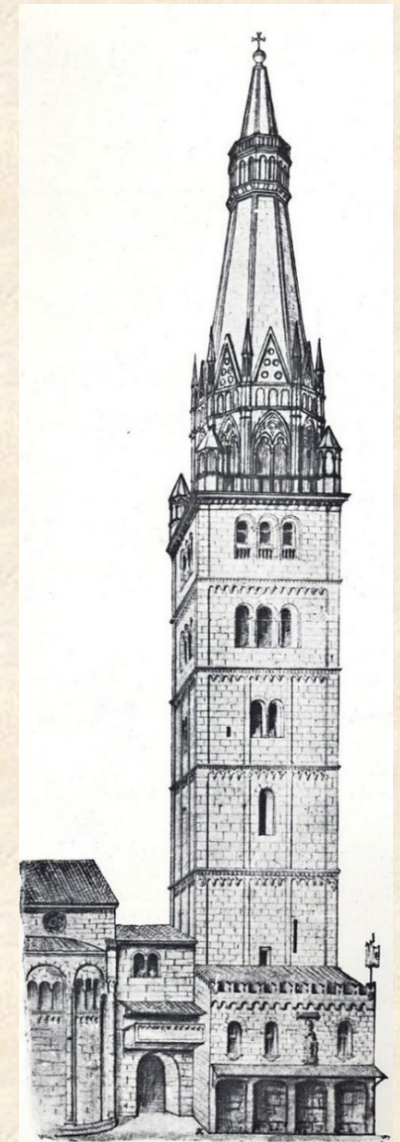
- Torri e campanili, per la propria morfologia strutturale, sono edifici che non solo presentano un'elevata vulnerabilità alle azioni sismiche, ma manifestano anche *movimenti lenti e ciclici nel tempo*, dovuti a diverse cause, che a lungo andare, possono modificarne significativamente le condizioni di equilibrio.
- È pertanto necessaria una attenta sorveglianza per poter individuare, col necessario anticipo, ogni minimo segnale di anomalia nel fisiologico decorso dell'assetto geometrico-deformativo del monumento.

L'attenzione verrà posta principalmente sulla torre, dato il maggiore livello di rischiosità, e secondariamente sulla Cattedrale, in quanto edificio altamente interagente.

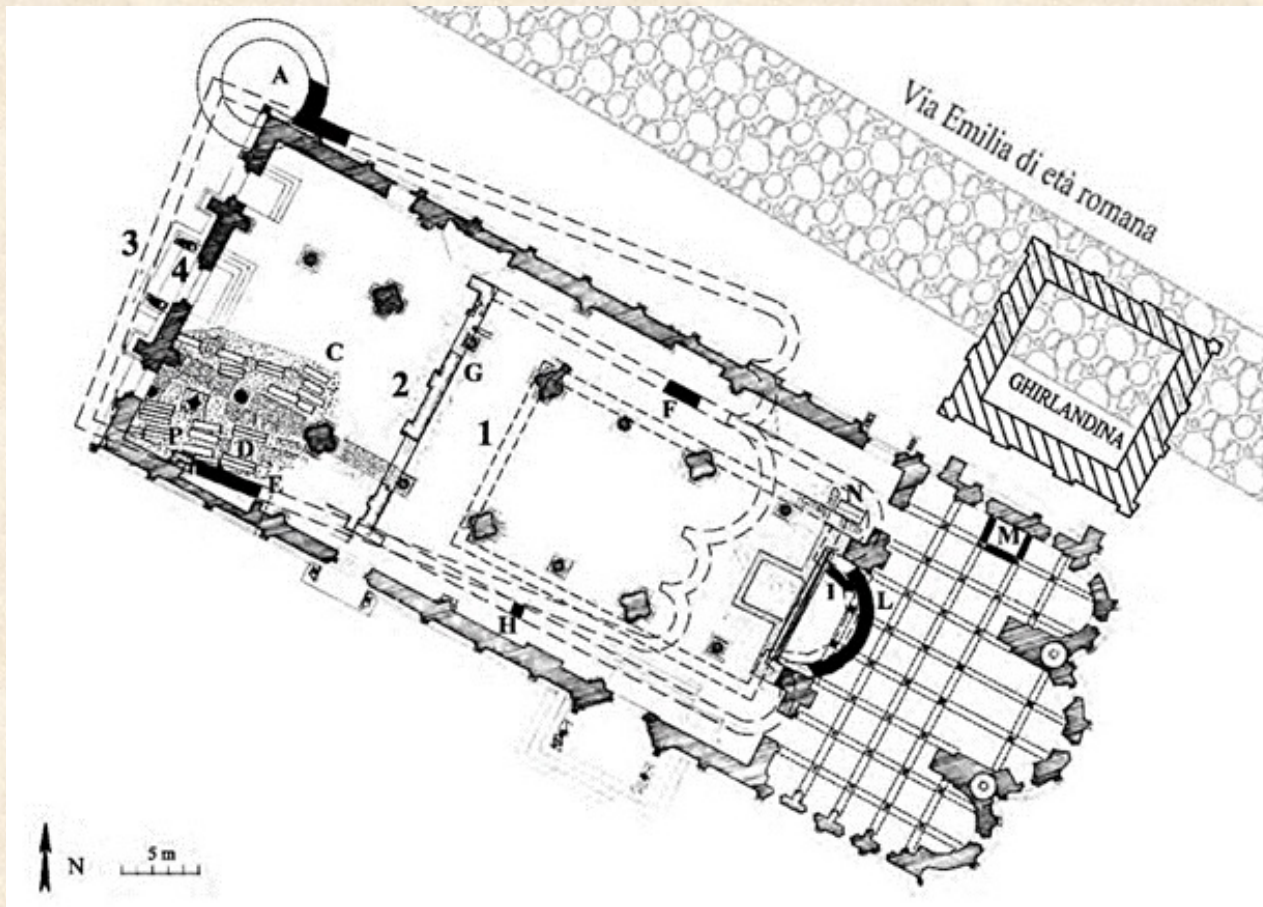
Cenni storici e fasi costruttive



- La torre è stata costruita in oltre 2 secoli a partire dal 1100 (fase Lanfranchiana) fino al 1300 (fase Campionese) con la costruzione della parte ottagonale (tamburo e cuspide)
- Nel 1338 la torre fu collegata al Duomo tramite muri su arcate (su cui vennero edificate una piccola sagrestia e un passaggio tra i due edifici)

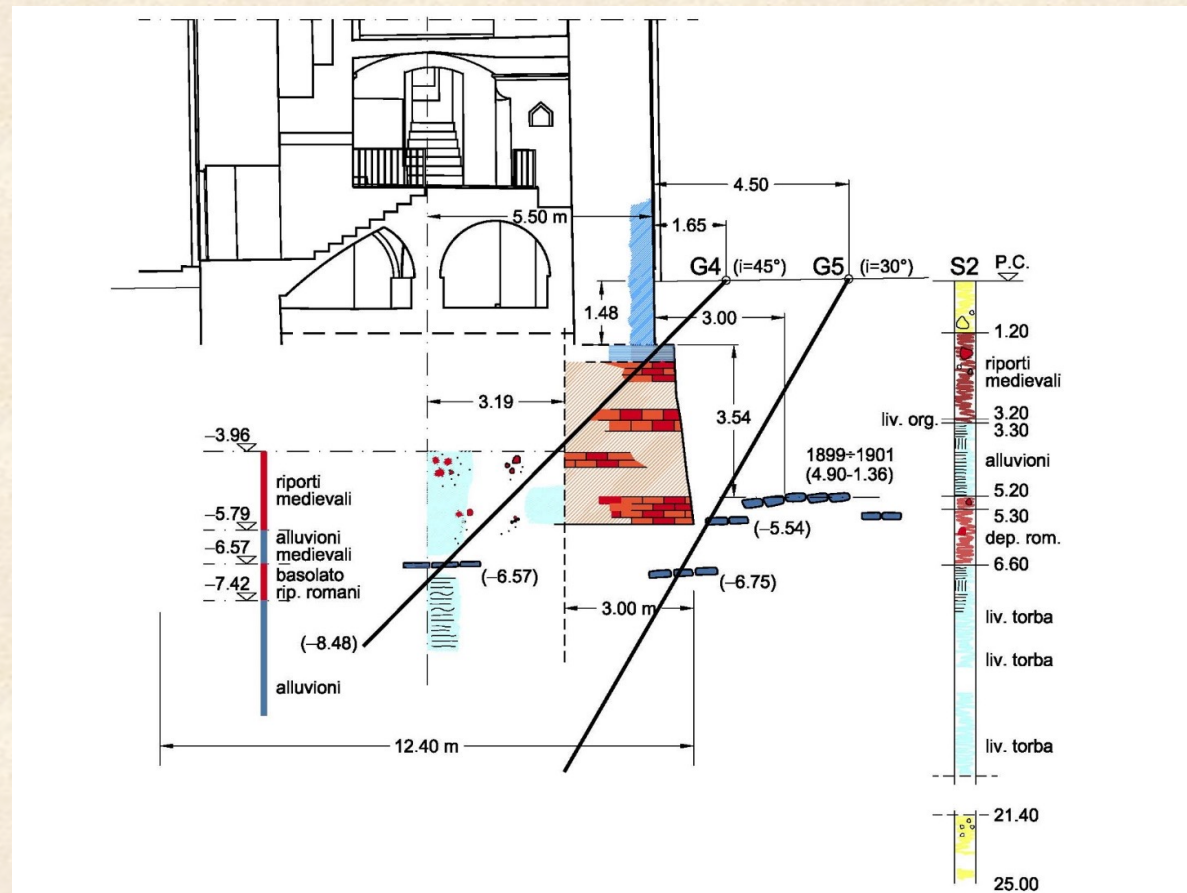


Cattedrale – fasi costruttive



- 1) Basilica ad corpus (v sec.)
- 2) Cattedrale longobarda (VIII secolo)
- 3) Cattedrale prelanfranchiana (XI secolo)
- 4) Cattedrale lanfranchiana (fine XI-XII secolo)

Sondaggi del 2003 (prof. R. Lancellotta)

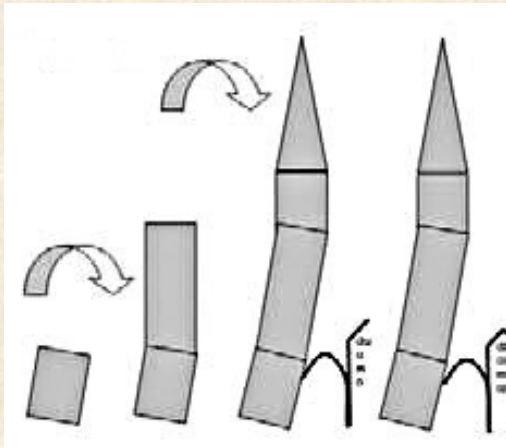


Le fondazioni non sono molto profonde in quanto oggi arrivano a una profondità di circa 5 metri, ma circa due sono di sprofondamento.

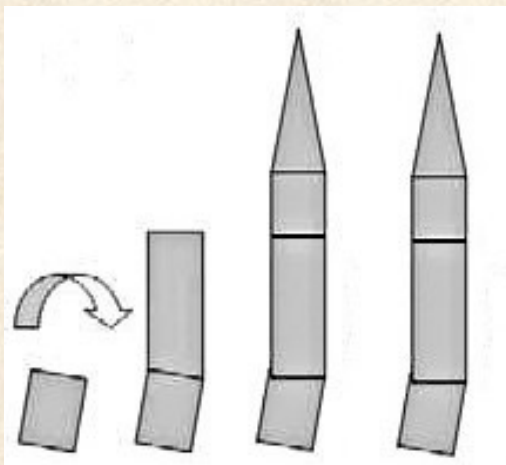
La torre aveva pertanto una fondazione profonda poco più di tre metri, impostata su un terreno alluvionale già alterato dall'uomo.

Il terreno non risulta consolidato né con palificazioni né con altri mezzi.

Analisi del rilievo geometrico



Direzione sud

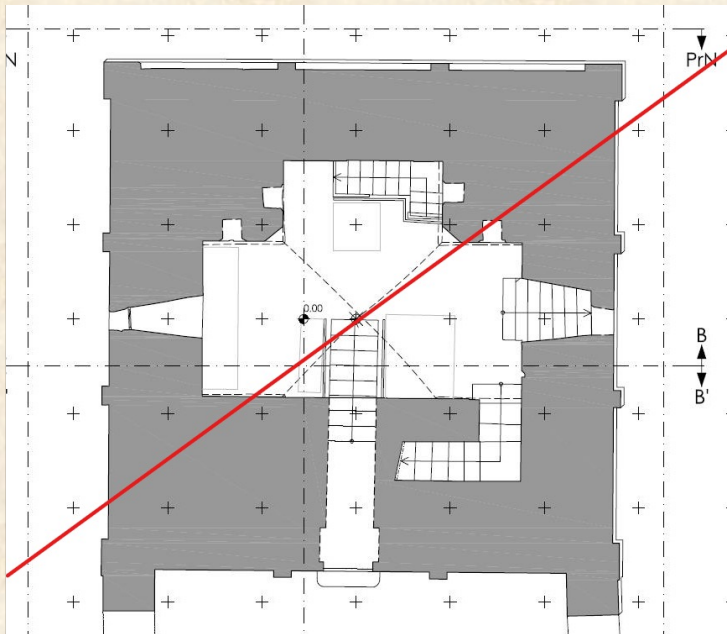


Direzione ovest

La Ghirlandina non può essere considerata un solido regolare e simmetrico, poiché la sua geometria è il risultato di una successione di interventi di correzione della verticalità. Di conseguenza, non è possibile individuare un unico asse geometrico rettilineo che ne rappresenti l'andamento complessivo.

A partire dalla sesta cornice, l'incremento dell'inclinazione verso sud risulta praticamente arrestato; questo coincide con la realizzazione, nel 1338, degli arconi di collegamento con la Cattedrale, i quali hanno fornito un effetto di contrasto e stabilizzazione della torre in quella direzione.

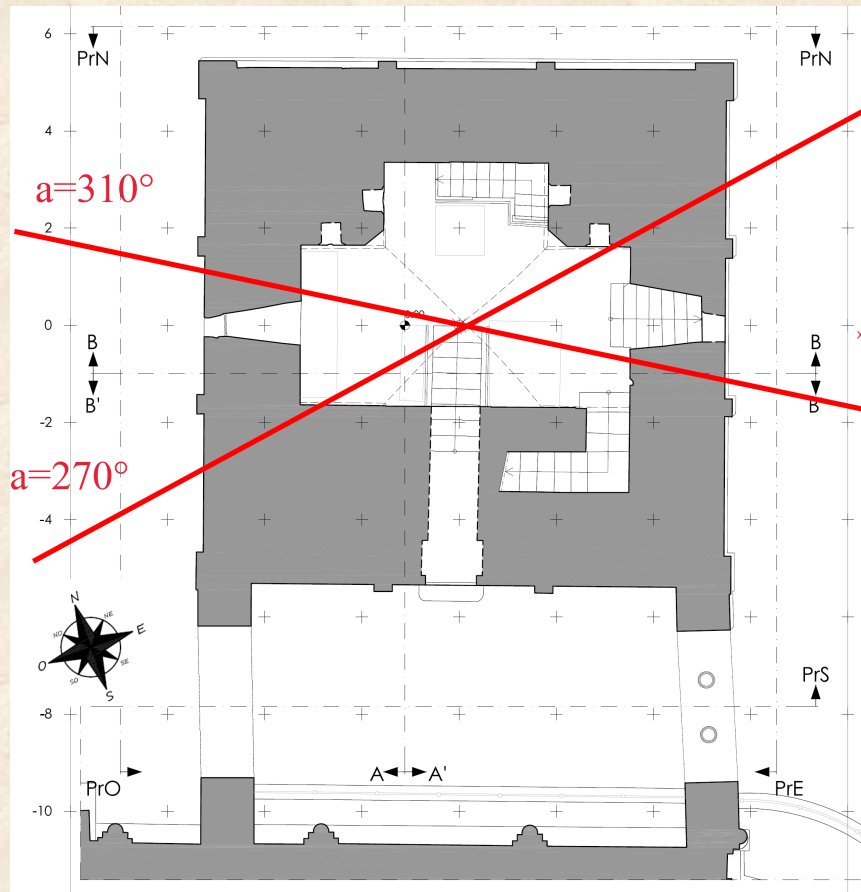
Pendenza della torre



Dagli studi del professor Cavani (1903) la Ghirlandina risultava inclinata verso sud-ovest e la traccia del piano di inclinazione formava un angolo di $7^{\circ} 5'$ con la diagonale nord-est, sud-ovest.

L'angolo di inclinazione fu stimato in $1^{\circ} 14' 16''$ e la pendenza $2,16\%$.

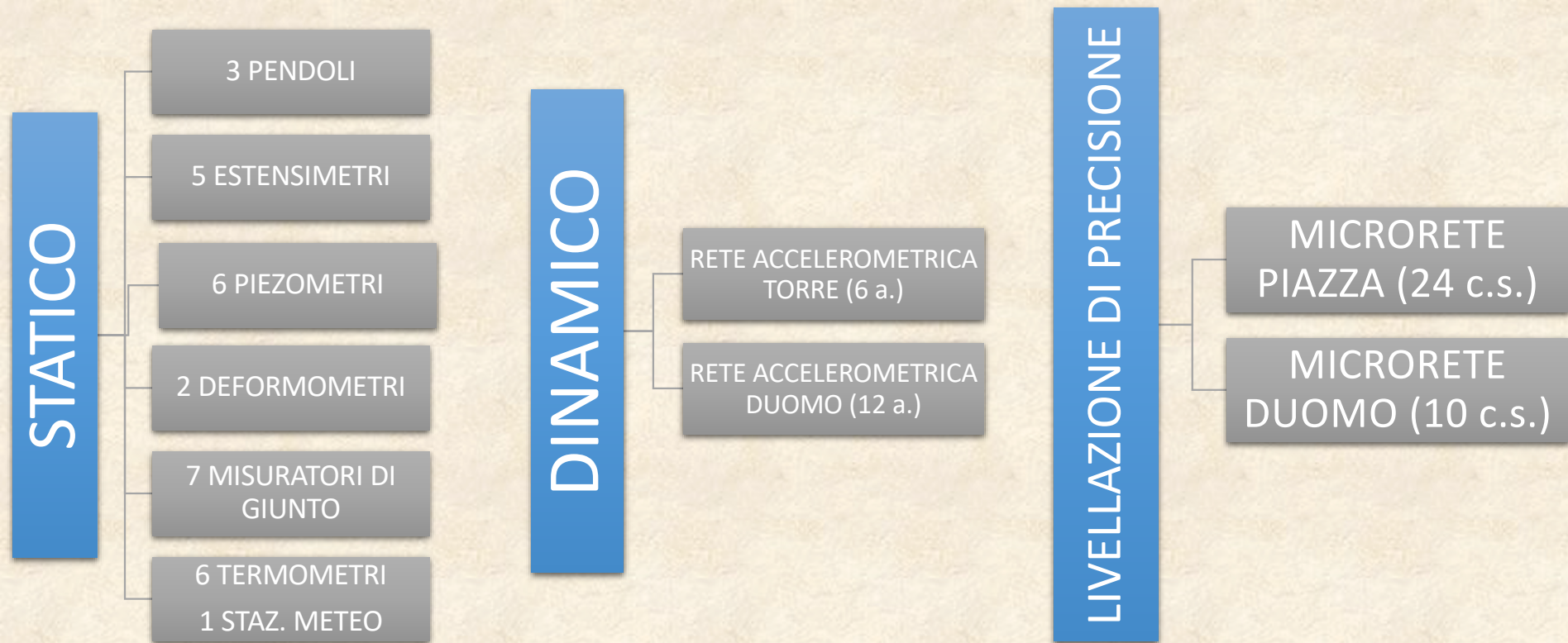
Pendenza della torre in funzione del tempo



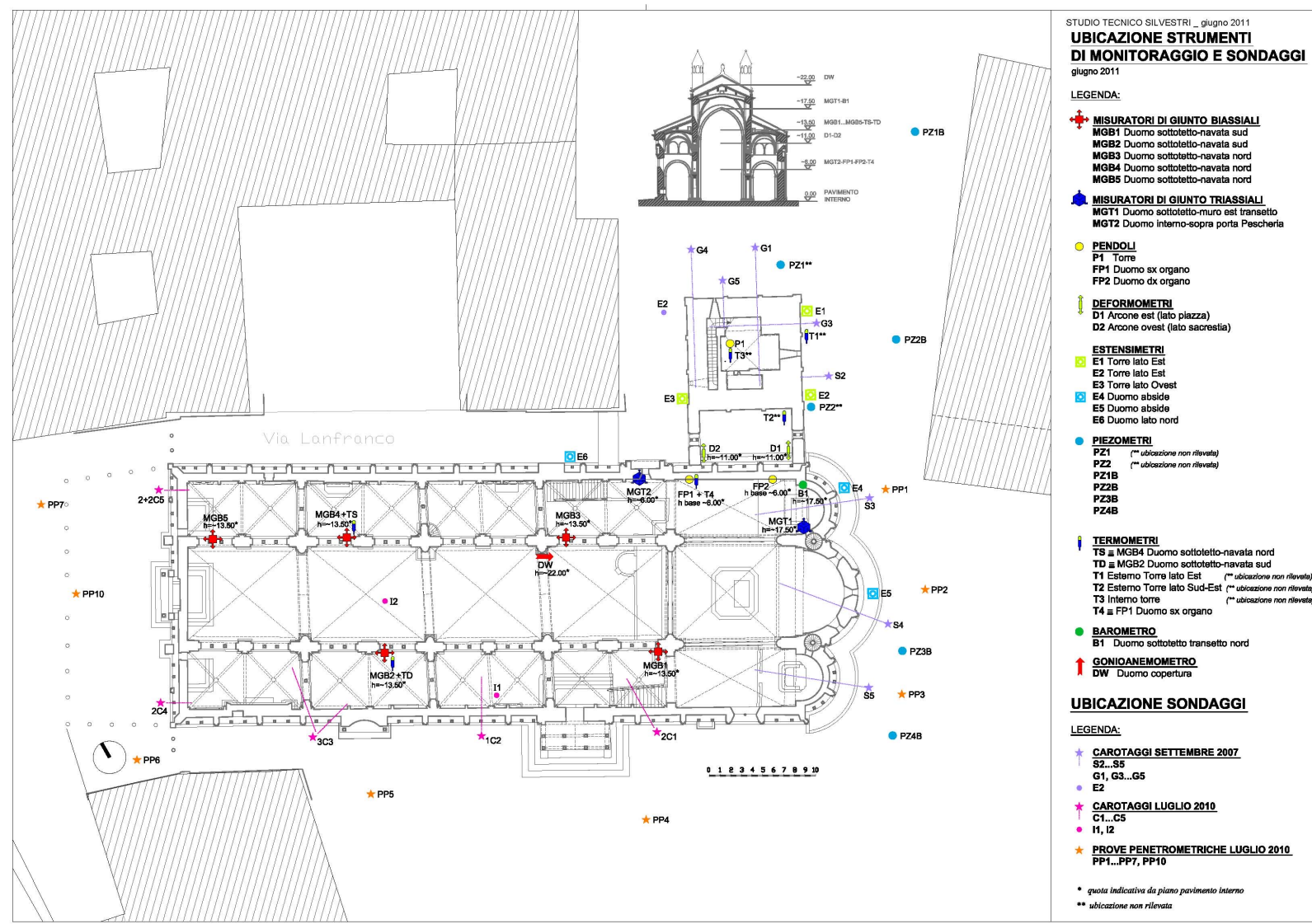
Il sistema di monitoraggio in realtà evidenzia che la traccia del piano di pendenza varia con un azimut tra 270° e 310°

La pendenza della Torre pertanto non è costante né in direzione, né in modulo, mostrando una forte dipendenza giornaliera dalle deformazioni termiche dovute all'irraggiamento solare, che tende a incurvare la torre, e una dipendenza stagionale dovuta principalmente alla variazione della falda acquifera.

Descrizione del sistema di monitoraggio



L'attuale sistema di monitoraggio, definito "*integrato*" in quanto comprende 3 tipologie di rilevazione, estesi per tutto il complesso Duomo- Ghirlandina



STUDIO TECNICO SILVESTRI _ giugno 2011
**UBICAZIONE STRUMENTI
 DI MONITORAGGIO E SONDAGGI**
 giugno 2011

LEGENDA:

MISURATORI DI GIUNTO BIASSIALI
 MGB1 Duomo sottotetto-navata sud
 MGB2 Duomo sottotetto-navata sud
 MGB3 Duomo sottotetto-navata nord
 MGB4 Duomo sottotetto-navata nord
 MGB5 Duomo sottotetto-navata nord

MISURATORI DI GIUNTO TRIASSIALI
 MGT1 Duomo sottotetto-muro est transetto
 MGT2 Duomo interno-sopra porta Pescheria

PENDOLI
 P1 Torre
 FP1 Duomo sx organo
 FP2 Duomo dx organo

DEFORMOMETRI
 D1 Arcone est (lato piazza)
 D2 Arcone ovest (lato sacrestia)

ESTENSIMETRI
 E1 Torre lato Est
 E2 Torre lato Est
 E3 Torre lato Ovest
 E4 Duomo abside
 E5 Duomo abside
 E6 Duomo lato nord

PIEZOMETRI
 PZ1 (** ubicazione non rilevata)
 PZ2 (** ubicazione non rilevata)
 PZ1B
 PZ2B
 PZ3B
 PZ4B

TERMOMETRI
 TS a MGB4 Duomo sottotetto-navata nord
 TD a MGB2 Duomo sottotetto-navata sud
 T1 Esterno Torre lato Est (** ubicazione non rilevata)
 T2 Esterno Torre lato Sud-Est (** ubicazione non rilevata)
 T3 Interno torre (** ubicazione non rilevata)
 T4 a FP1 Duomo sx organo

BAROMETRO
 B1 Duomo sottotetto transetto nord

GONIOANEMOMETRO
 DW Duomo copertura

UBICAZIONE SONDAGGI

LEGENDA:

CAROTAGGI SETTEMBRE 2007
 S2...S5
 G1, G3...G5
 E2

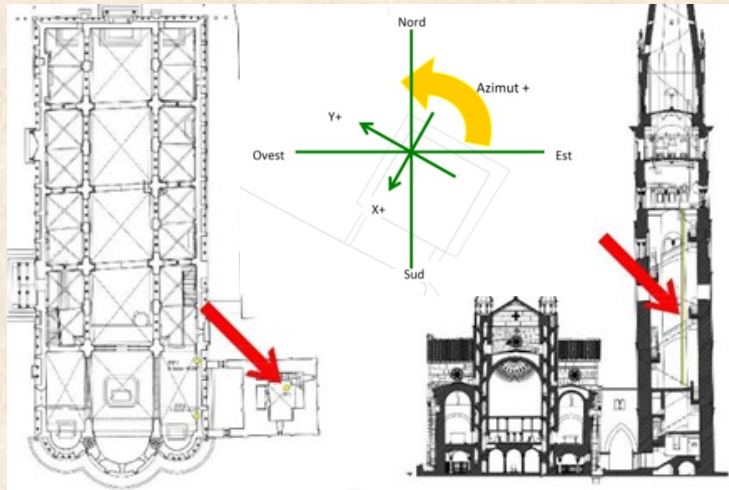
CAROTAGGI LUGLIO 2010
 C1...C5
 I1, I2

PROVE PENETROMETRICHE LUGLIO 2010
 PP1...PP7, PP10

* quota indicativa da piano pavimento interno
 ** ubicazione non rilevata

Layout del sistema di monitoraggio

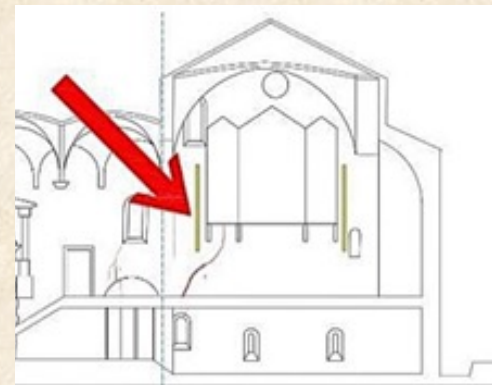
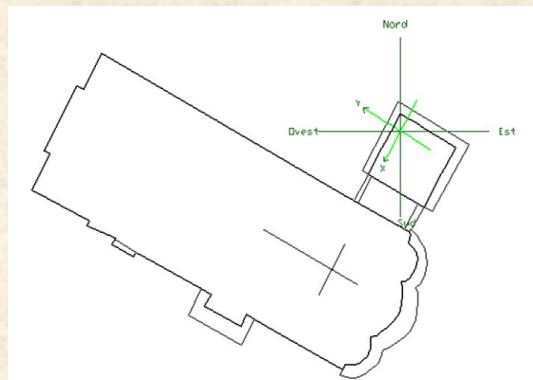
Pendoli



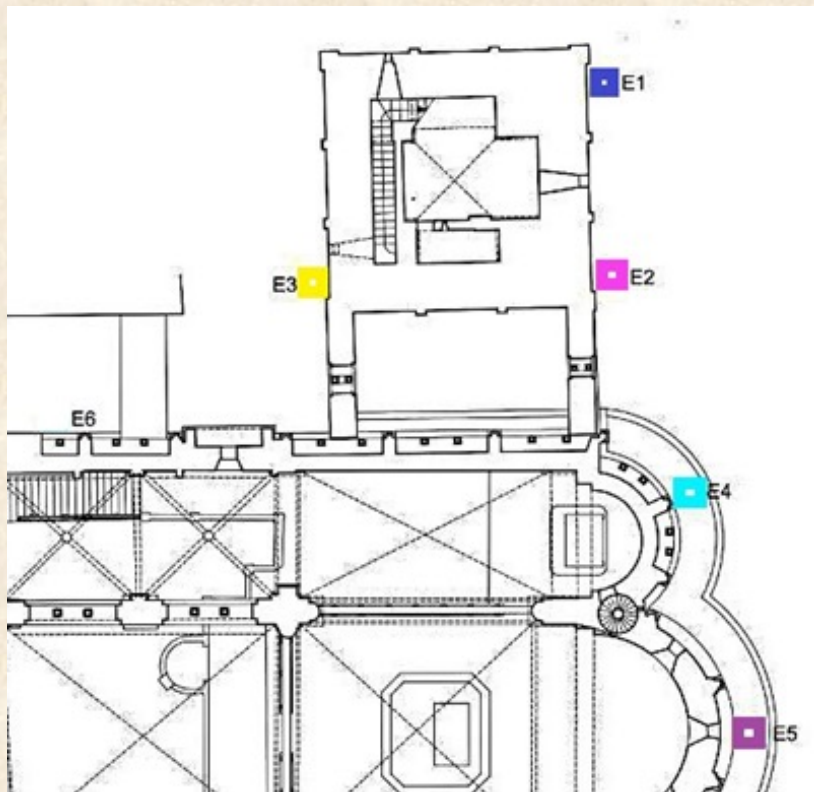
Il *pendolo* è composto da un sottile cavo in invar ancorato all'edificio, a cui è appesa una massa di circa 30 kg; l'apparato è smorzato da un sistema di alette immerse in bagno d'olio; il cavo è protetto da un tubo in rame.

I movimenti vengono rilevati da uno speciale telecoordinometro, formato da due sensori induttivi orientati ortogonalmente fra loro che forniscono gli spostamenti del punto sul piano orizzontale (coordinate cartesiane xy).

I pendoli installati sono 3: uno nella torre (P1) lungo 23 metri, e due nel transetto nord del duomo ai lati dell'organo (FP1-FP2), lunghi 4 metri



Assestimetri

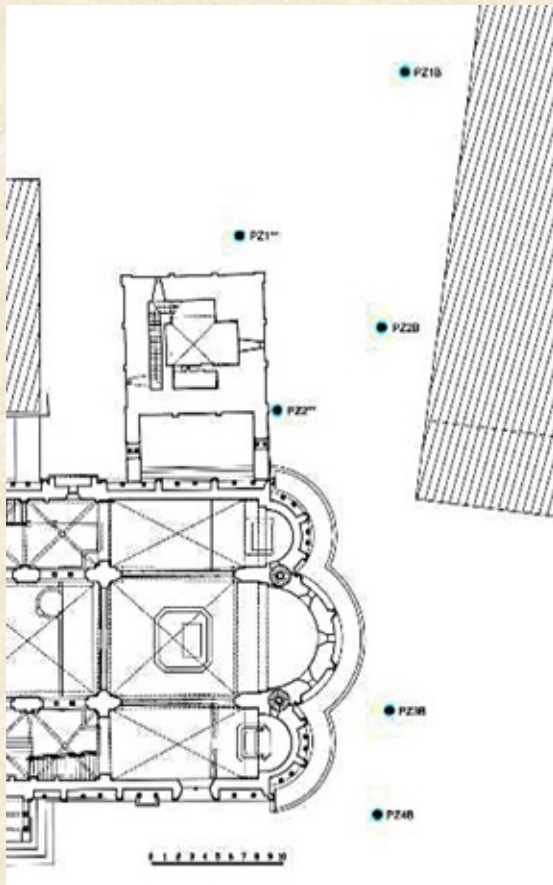


L'*assestimetro* è un dispositivo per la misura degli allungamenti unitari; che ha il compito di misurare il cedimento del piano di fondazione di un edificio rispetto a un punto prefissato.

La misura contemporanea di più punti consente di verificare la presenza di cedimenti differenziali e di stimare le corrispondenti rotazioni delle strutture.



Piezometri

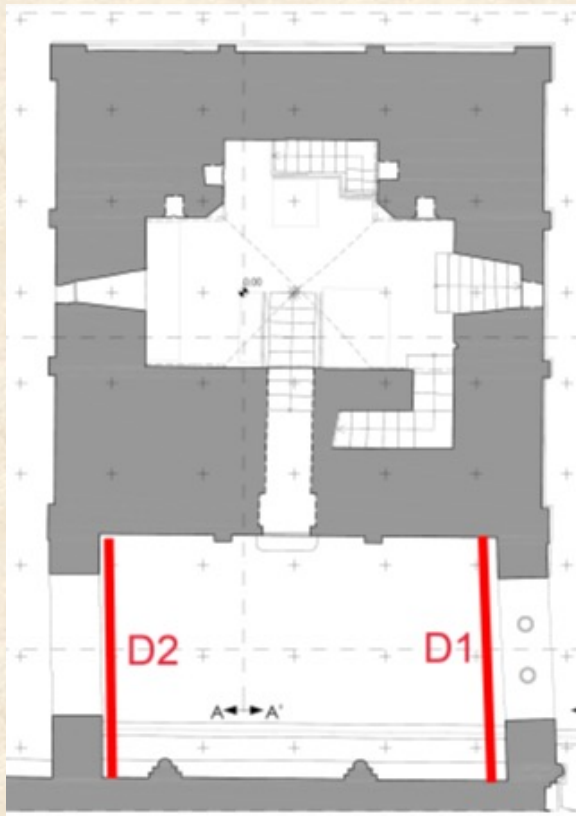


Il piezometro è uno strumento utilizzato per la misura della quota piezometrica della falda acquifera in un determinato punto del terreno.

I piezometri installati sono 6 e distribuiti nella piazza ad est della torre e del Duomo.

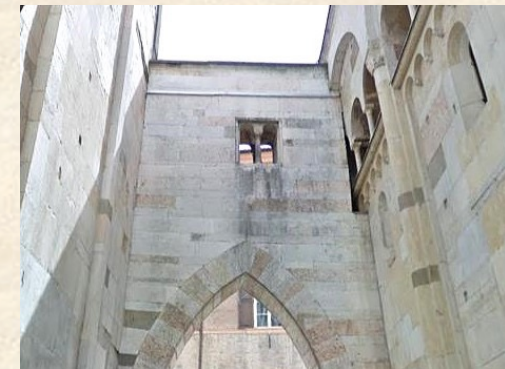
Tenuto conto del profilo stratigrafico e dei diversi acquiferi, sono installati alle profondità di 18, 24 e 55 m.

Deformometri

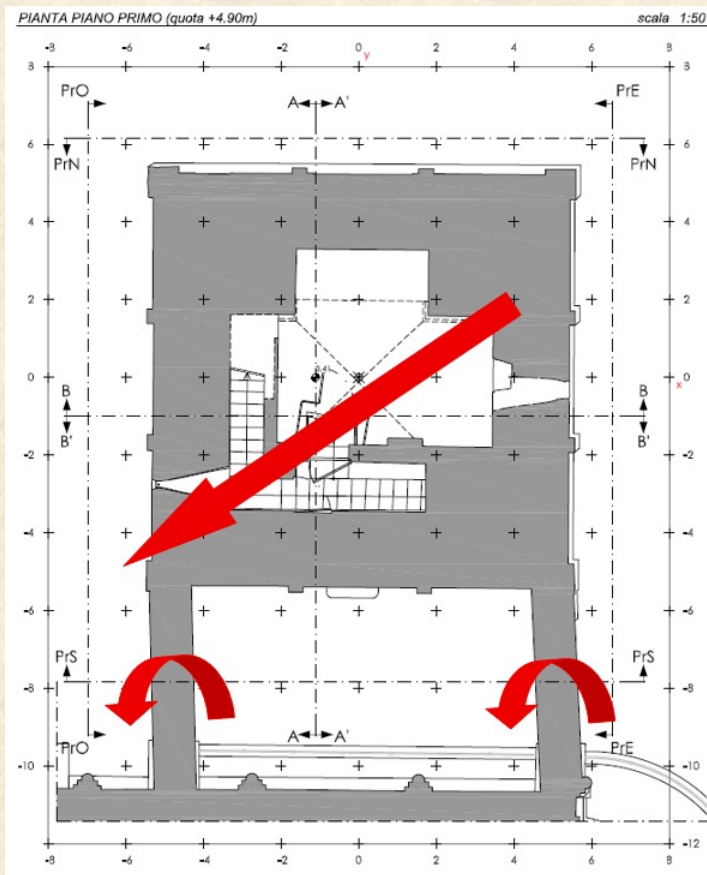


Il *deformometro* è un apparecchio atto a misurare la deformazione di corpi o strutture sottoposti a sollecitazioni.

Sono installati due deformometri in corrispondenza dei due archi che collegano il Duomo e la Torre al fine di analizzare l'interazione tra i due monumenti.



Perché monitorare gli arconi?



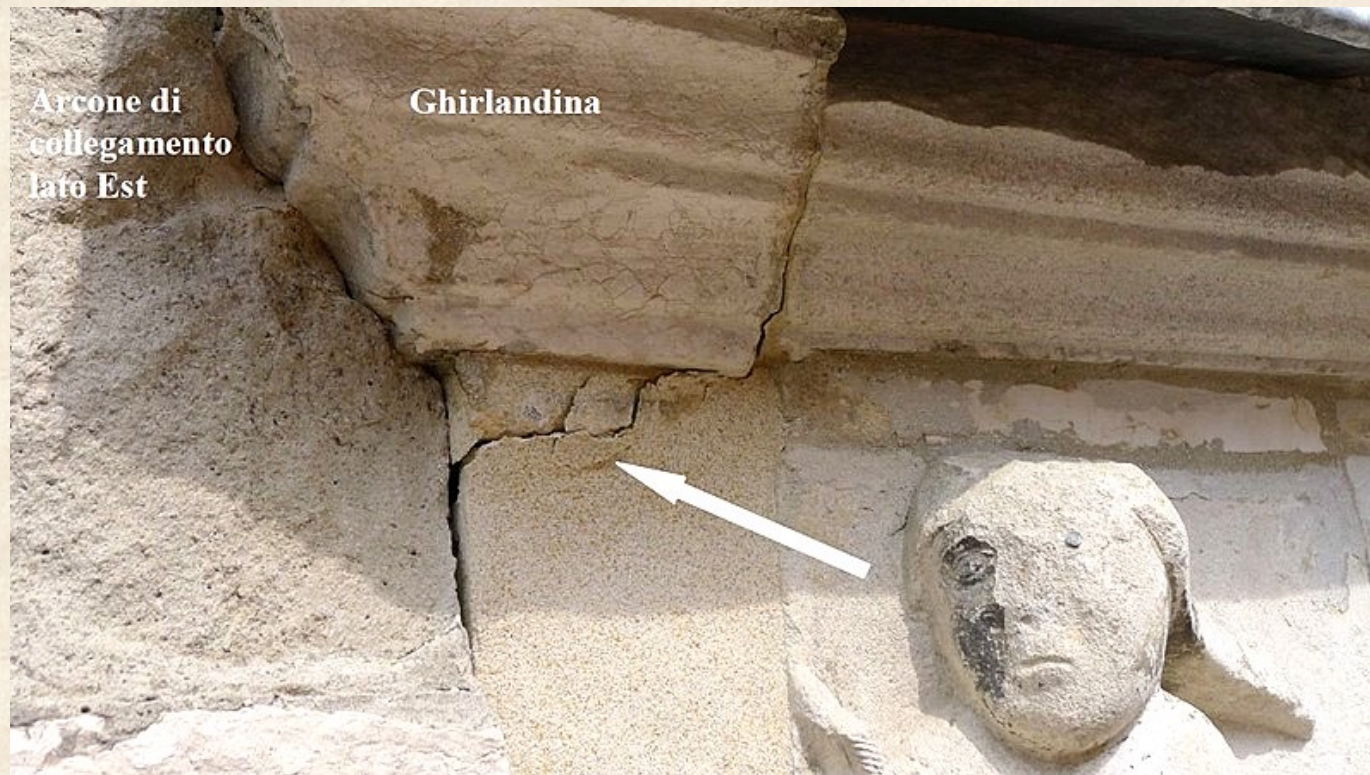
- La torre, inclinandosi verso la Cattedrale con una direzione obliqua, tende a indurre una rotazione degli arconi in senso antiorario, secondo un cinematismo schematizzabile come in figura
- Di conseguenza, ciascun arcone presenta due spigoli maggiormente compressi e due spigoli più scarichi.
- Questa rotazione degli arconi si combina con un abbassamento relativo differenziale tra Ghirlandina, arconi e Cattedrale, dovuto ai diversi carichi trasmessi al terreno dalle tre strutture.

Interazione arconi-torre



- Dalla foto si osserva che la posizione delle zanche metalliche che cingono il bassorilievo del Sansone (prospetto ovest della Torre), installate prima del rifacimento degli arconi dei primi del '900, non coincide con gli incavi predisposti.
- Tale fenomeno è dovuto ai cedimenti differenziali del terreno sotto la torre rispetto a quello dell'arco.
- Le elevate tensioni iniziali di contatto tra zanca e pietra, unitamente agli effetti dinamici indotti dall'azione sismica, hanno determinato una frattura.

Interazione arconi-torre



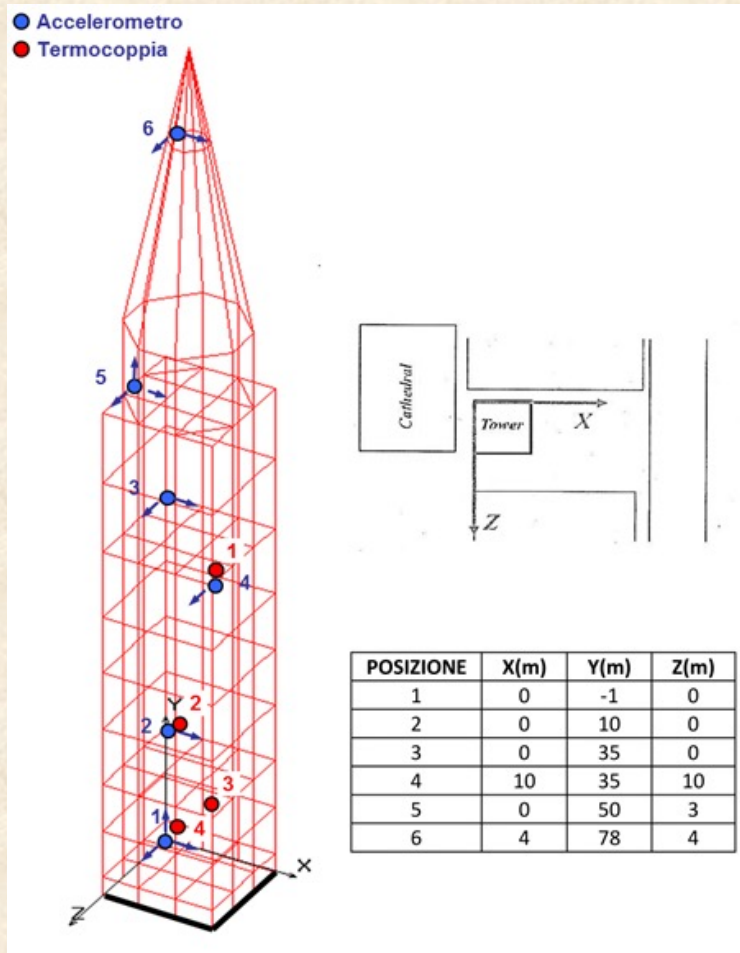
- Sul lato est si è verificato una analoga frattura , in prossimità del bassorilievo del Centauro.

Misuratori di giunto (biassiali e triassiali)

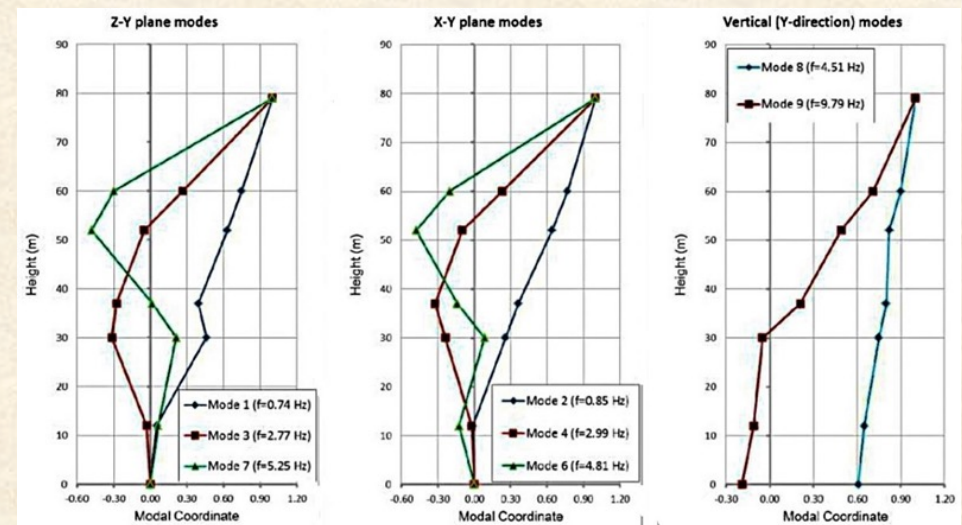


- I misuratori di giunto sono strumenti concepiti per il rilievo continuo dell'evoluzione delle lesioni; vengono installati a cavallo delle fessure da monitorare.
- I misuratori di giunto biassiali rilevano gli spostamenti lungo due direzioni nel piano della superficie del paramento murario; i misuratori triassiali consentono inoltre di rilevare anche gli spostamenti ortogonali al piano.

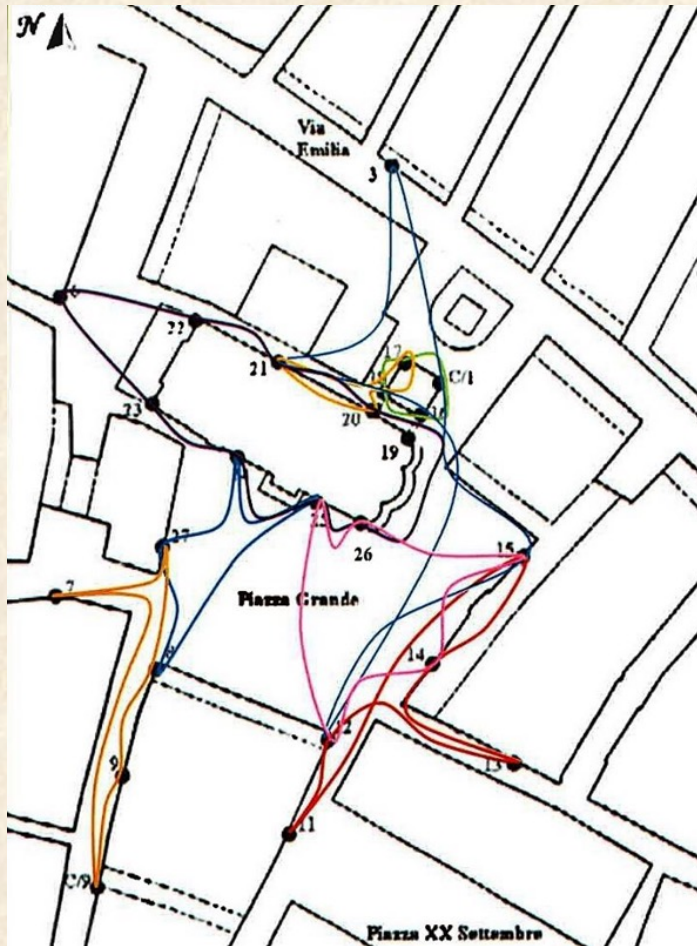
Monitoraggio dinamico



- Acquisizione di informazioni sul comportamento di un edificio sottoposto a sollecitazioni ambientali cicliche caratterizzate da velocità relativamente elevate (vento, vibrazioni dovute al traffico veicolare, sisma, ecc.).
- La finalità è lo studio degli aspetti dinamici dell'edificio, quali i modi di vibrare e i periodi propri, nonché l'ottenimento di informazioni sull'entità delle sollecitazioni a cui è sottoposto in specifici punti.

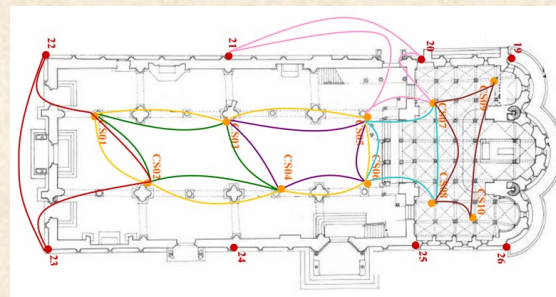


Livellazione di precisione

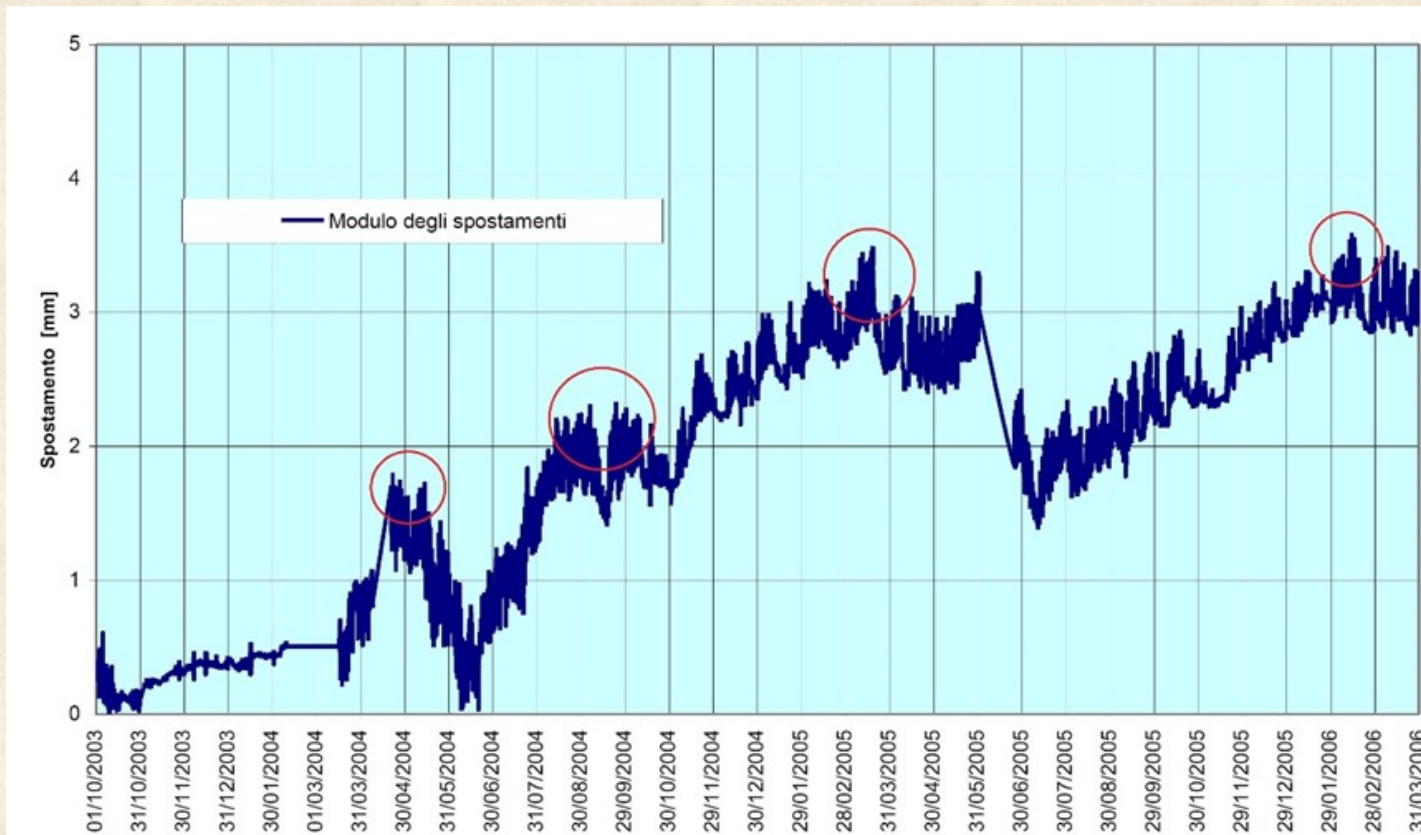


Insieme di procedure attraverso le quali si misura periodicamente, a intervalli di tempo e in periodi stagionali ben definiti, il dislivello esistente fra una serie di punti prestabiliti, rispetto a un punto preso come campione.

- Microrete di Piazza Grande: 24 capisaldi.
- Microrete della Cattedrale: 10 caposaldi.



Analisi dei dati: pendolo



Il grafico riporta il modulo del vettore spostamento.

Il «rumore» giornaliero è dovuto all'irraggiamento solare.

Gli spostamenti 2003-2006 mostrano un residuo di circa 3 mm su tre anni, corrispondente ad un aumento medio annuo della pendenza della torre pari a $1/23.000 \times 100 =$

$4,35 \times 10^{-3} \%$.

I massimi relativi vengono raggiunti nei mesi di aprile 2004, agosto 2004, febbraio 2005 e febbraio 2006.

Spostamento giornaliero del pendolo

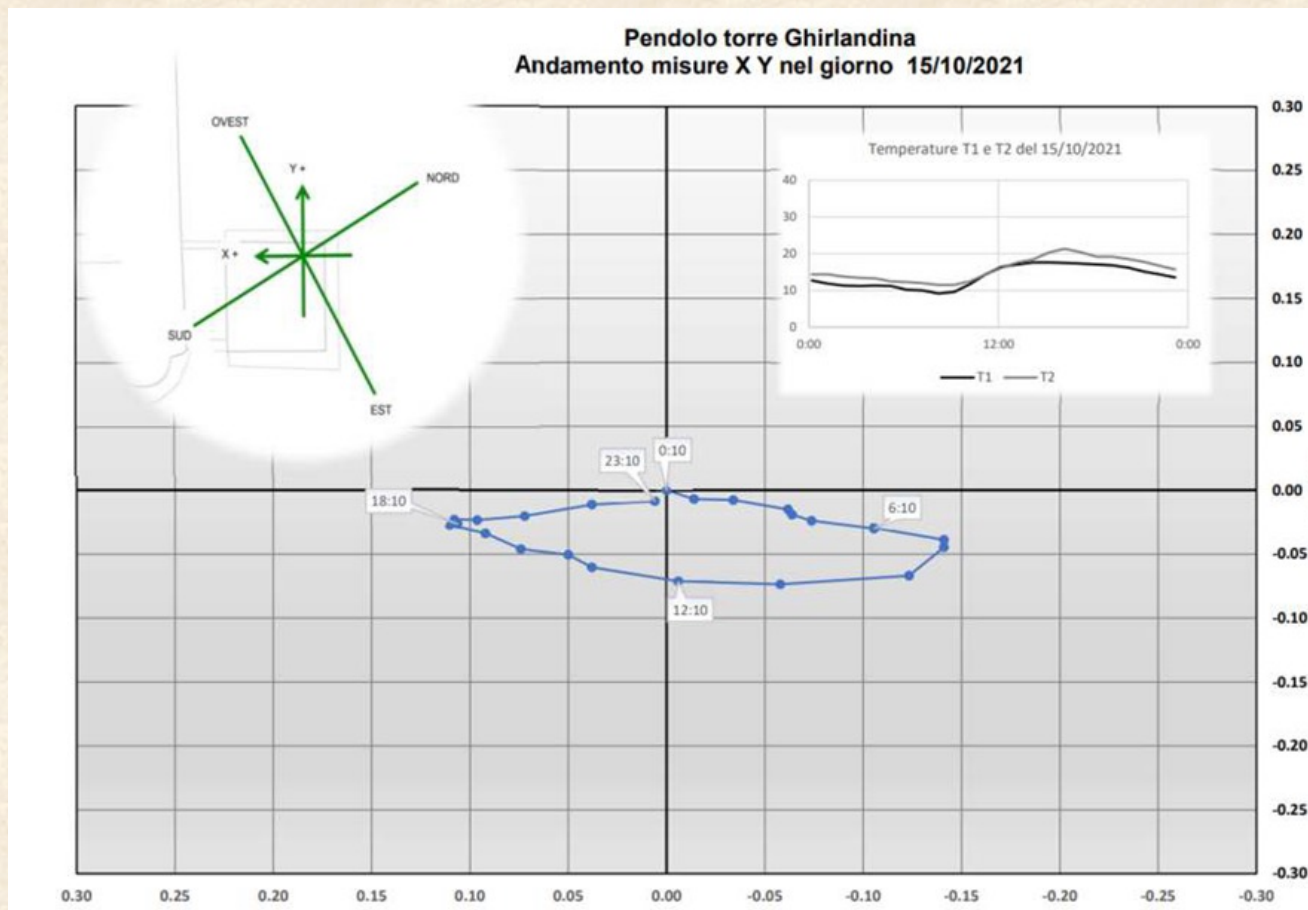
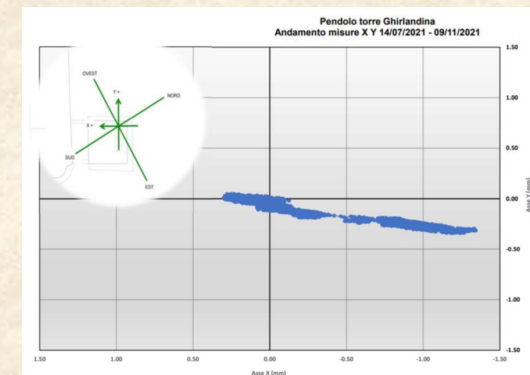
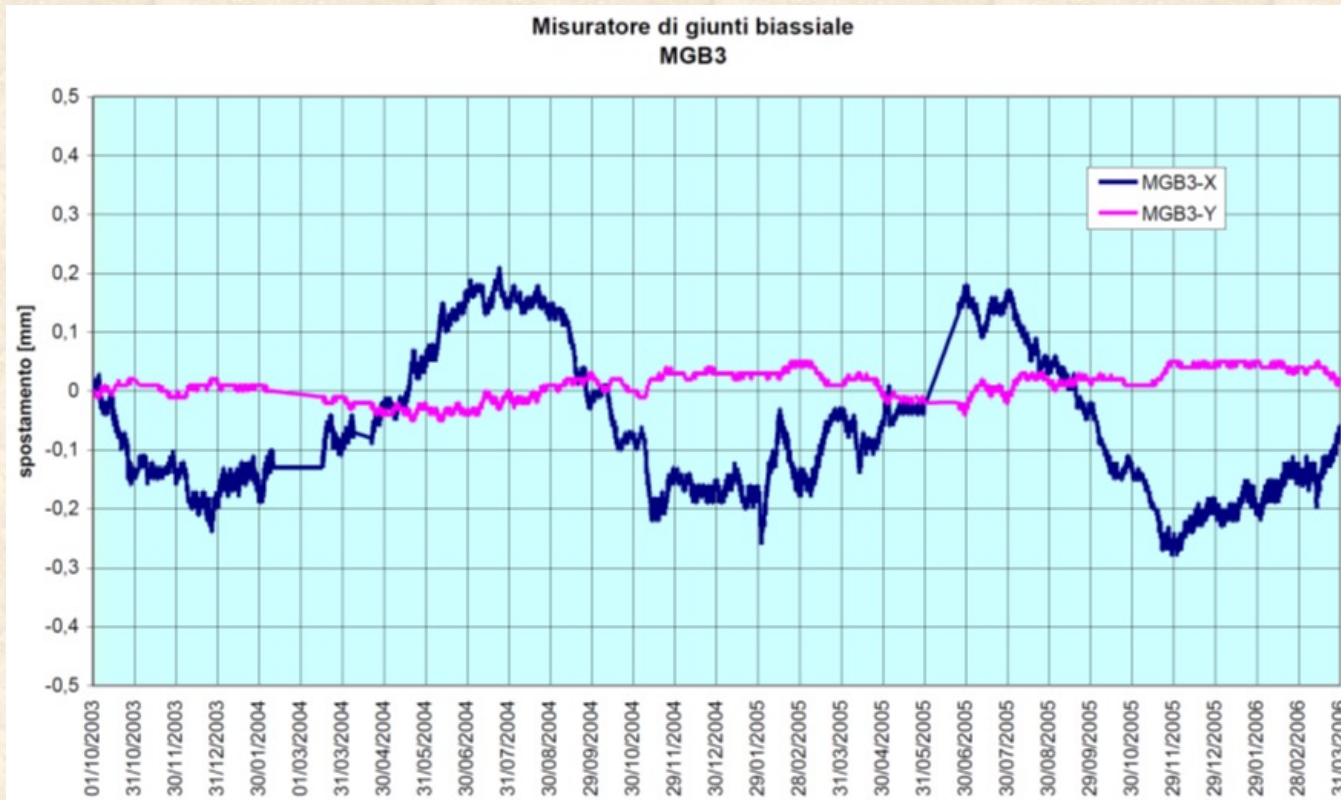


Diagramma dello spostamento giornaliero del pendolo sul piano orizzontale xy; la deformazione dovuta all'irraggiamento solare è quasi sempre recuperata.



Misuratori di giunto



I misuratori di giunto mostrano andamenti perfettamente sincroni alle temperature stagionali con completo recupero degli spostamenti a fine stagione; gli spostamenti massimi rimangono sempre di entità trascurabile (intorno a ± 2 decimi di mm).

Analisi dei dati – prospettive metodologiche



Stato attuale



La strumentazione installata in piazza Grande (estensimetri e piezometri) presenta criticità.

I pozzetti contengono il sistema di trasmissione dati wireless con antenna ubicata al centro del chiusino, appositamente realizzato per limitare l'impatto visivo sul sito. Tale soluzione tecnica ha come aspetto negativo l'esposizione agli eventi meteorici con conseguente presenza di acqua di ristagno nei pozzetti che nel tempo hanno portato a un decadimento della qualità della connessione.

Test di funzionamento dei sistemi di trasmissione

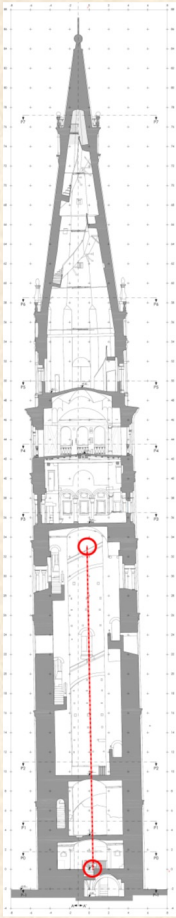
- Sono stati eseguiti test di funzionamento (sostituzione delle batterie, attivazioni forzate, sostituzione con una antenne “volanti” dotata di cavi integri, verifica dell’arrivo dei dati al sistema di acquisizione centrale (sala degli strumenti)
- È da evidenziare che tutti gli strumenti, anche quelli funzionanti al momento del test con antenna residente, dopo alcuni giorni di funzionamento discontinuo hanno cessato di trasmettere , ad eccezione di PZ4. Tale situazione è imputabile a dispersioni e ammaloramenti delle connessioni, dei cavi e dei collegamenti.

Interventi di riparazione e miglioramento

Alla luce di quanto sopraesposto, per poter riattivare il sistema di monitoraggio piezometrico ed assestometrico sono in corso le seguenti attività:

- revisione completa della sensoristica in piazza, con particolare attenzione a cavi e connessioni ed elevato grado di protezione IP;
- aggiornamento dei sistemi di acquisizione dati e sostituzione delle schede wireless con tecnologie più affidabili;
- ammodernamento generale dell'hardware (data logger), con sostituzione dei componenti obsoleti;
- adeguamento del software ai nuovi protocolli di trasmissione;
- revisione completa dei software di gestione dei dati.

Conclusioni e prospettive



- Data la complessità dei dati e l'alto grado di interdisciplinarietà è importante dotarsi di un *metodo logico e rigoroso di lettura dei dati*.
- I dati vanno *filtrati* dalle componenti cicliche che non lasciano residui, fra tutti la temperatura.
- Le misure significative sono quelle che coprono un *intero ciclo stagionale*; risulta inoltre fondamentale valutare i residui a fine anno.
- Il pendolo fornisce, di fatto, una misura *relativa* della pendenza; le valutazioni sulla pendenza *assoluta*, affinché abbiano un concreto significato fisico, richiedono un ulteriore approfondimento volto a definire il centro di massa della torre, che, idealmente collegato al baricentro geometrico della sezione di base, costituisce il riferimento per la stima della pendenza assoluta della torre.

Grazie per l'attenzione