

COMUNE DI MODENA

Settore Ambiente
Servizio Risorse e Territorio

AGISCO S.r.l.

SISTEMA DI CONTROLLO DEL DUOMO DI MODENA E DELLA TORRE DELLA GHIRLANDINA



**RAPPORTO SUL PERIODO
1/10/2003 - 31/03/2006**

Comune di Modena
Il Responsabile del Servizio
Dott. Alessandro Annovi

AGISCO S.r.l.
Il Presidente
Franco Robotti

INDICE

DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DEL SISTEMA AUTOMATICO DI CONTROLLO	pag. 3
UBICAZIONE DEI SENSORI DI RILEVAMENTO	pag. 6
COMPORTAMENTO DELLA STRUMENTAZIONE INSTALLATA E INTERVENTI DI MANUTENZIONE	pag. 7
ANDAMENTO DELLE GRANDEZZE MISURATE NEL PERIODO 1/10/2003 - 31/12/2005	pag. 8
RISULTATI DEL MONITORAGGIO	pag. 7
CONCLUSIONI	pag.13

DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DEL SISTEMA AUTOMATICO DI CONTROLLO

PREMESSA

Il sistema di controllo permette di seguire nel tempo il comportamento statico dei due monumenti sottoposti a differenti azioni esterne come le sollecitazioni termiche giornaliere e stagionali, le variazioni del livello di falda, le spinte reciproche tra Torre e Duomo e gli eventi sismici.

Il sistema è dotato di sensori per la misura dei cedimenti delle fondazioni, del movimento delle fessure, delle rotazioni della Torre, della velocità e direzione del vento nonché delle temperature in punti significativi delle strutture.

I SENSORI INSTALLATI

Per il monitoraggio dei due monumenti sono stati installati sensori di misura dei cedimenti (estensimetri), del comportamento delle lesioni (misuratori di giunti), della rotazione della Torre (pendolo), della temperatura (termometri) e della velocità e direzione del vento (gonianemometro).

Estensimetri

Gli estensimetri sono strumenti installati per effettuare la misura assoluta dei cedimenti delle fondazioni dei due monumenti, alle quali sono rigidamente collegati, rispetto ad un punto di riferimento profondo considerato fisso (-22 m dalla quota della piazza).

La misura contemporanea di più punti permette di verificare l'esistenza di cedimenti differenziali e di quantificare le corrispondenti rotazioni delle strutture.

La trasmissione dei dati all'apparecchiatura di acquisizione posta nella Torre avviene senza la stesa di alcun cavo, mediante sistemi di trasmissione wireless e speciali antenne calpestabili, integrate nella pavimentazione di Piazza Grande, la cui realizzazione è stata studiata appositamente per azzerare l'impatto ambientale della strumentazione nel contesto monumentale in cui è installata. La sensibilità degli strumenti è del centesimo di millimetro.

Gli estensimetri installati sono cinque, due per il controllo del Duomo e tre per il controllo della Torre.



Misuratori di giunti

I misuratori di giunti sono strumenti concepiti per il rilievo continuo dell'evoluzione dell'apertura di giunti o fessure. Essi vengono montati a cavallo della lesioni da monitorare e ne segnalano gli eventuali movimenti di apertura o chiusura.

Possono essere di tipo biassiale se misurano i movimenti in un piano (ad esempio una superficie muraria) o triassiale se misurano anche gli spostamenti ortogonali al piano. Sono state poste sotto controllo cinque lesioni del Duomo, quattro in corrispondenza della navata centrale ed una, strumentata con misuratore triassiale, in prosecuzione di uno dei due contrafforti che legano tra di loro il Duomo e la Torre. Anche questi sensori raggiungono sensibilità del centesimo di millimetro.



Pendolo

Il pendolo diritto è uno strumento espressamente concepito per il controllo della stabilità di edifici, in questo caso della Torre, il cui funzionamento è basato sul principio del filo a piombo.

E' composto da un ancoraggio superiore, installato in corrispondenza della Loggia dei Torresani, dal filo a piombo costituito in lega di Invar, per contenere le dilatazioni termiche, e dallo strumento di misura vero e proprio, costituito da uno speciale telecoordinometro che permette di eseguire la misura automatica della posizione del filo a piombo. In questa occasione è stato sviluppato ed impiegato un innovativo modello di telecoordinometro frutto di una ricerca internazionale finanziata dalla Comunità Europea.

Questa misura serve per analizzare le variazioni di inclinazione della Torre, sia quelle periodiche (di carattere giornaliero dovute alla variazione termica), sia quelle permanenti dovute a veri e propri comportamenti strutturali. La sensibilità strumentale è del centesimo di millimetro.



Termometri

Le sonde di temperatura servono per misurare le variazioni termiche cui sono soggette le strutture monitorate.

Lo scopo è quello di correlare l'andamento termico cui è soggetta la struttura con le misure acquisite, in maniera tale da poter valutare l'influenza delle variazioni di temperatura sulle deformazioni rilevate ed eventualmente poter effettuare le opportune correzioni sulle misure.

La Torre subisce un dondolamento in funzione dell'insolazione durante le differenti ore del giorno, per cui due sensori di temperatura sono installati sui due diversi lati esterni, mentre il terzo, come i due installati nel Duomo, misurano la temperatura interna.



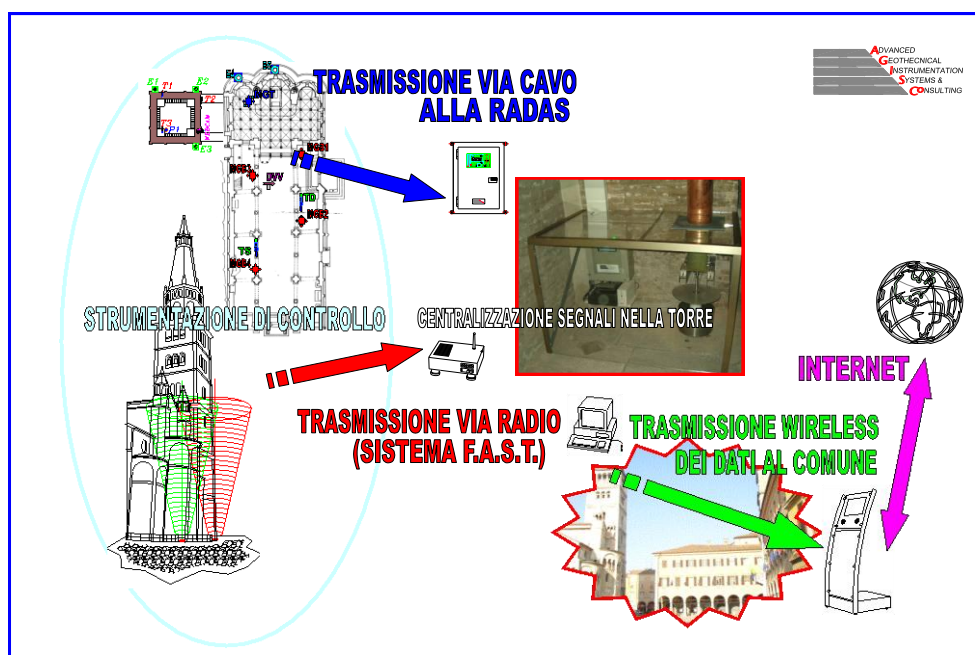
LE APPARECCHIATURE DI TRASMISSIONE DATI

Tutti i sensori del Duomo e della Torre, ad eccezione degli estensimetri esterni, sono collegati all'apparecchiatura di misura automatica, alloggiata all'interno della torre, mediante speciali cavi elettrici multipolari.

Gli estensimetri ubicati all'esterno sono acquisiti da dataloggers miniaturizzati dotati di sistemi di trasmissione dati mediante radio a basso consumo ed antenne speciali calpestabili sviluppate appositamente per questa applicazione.

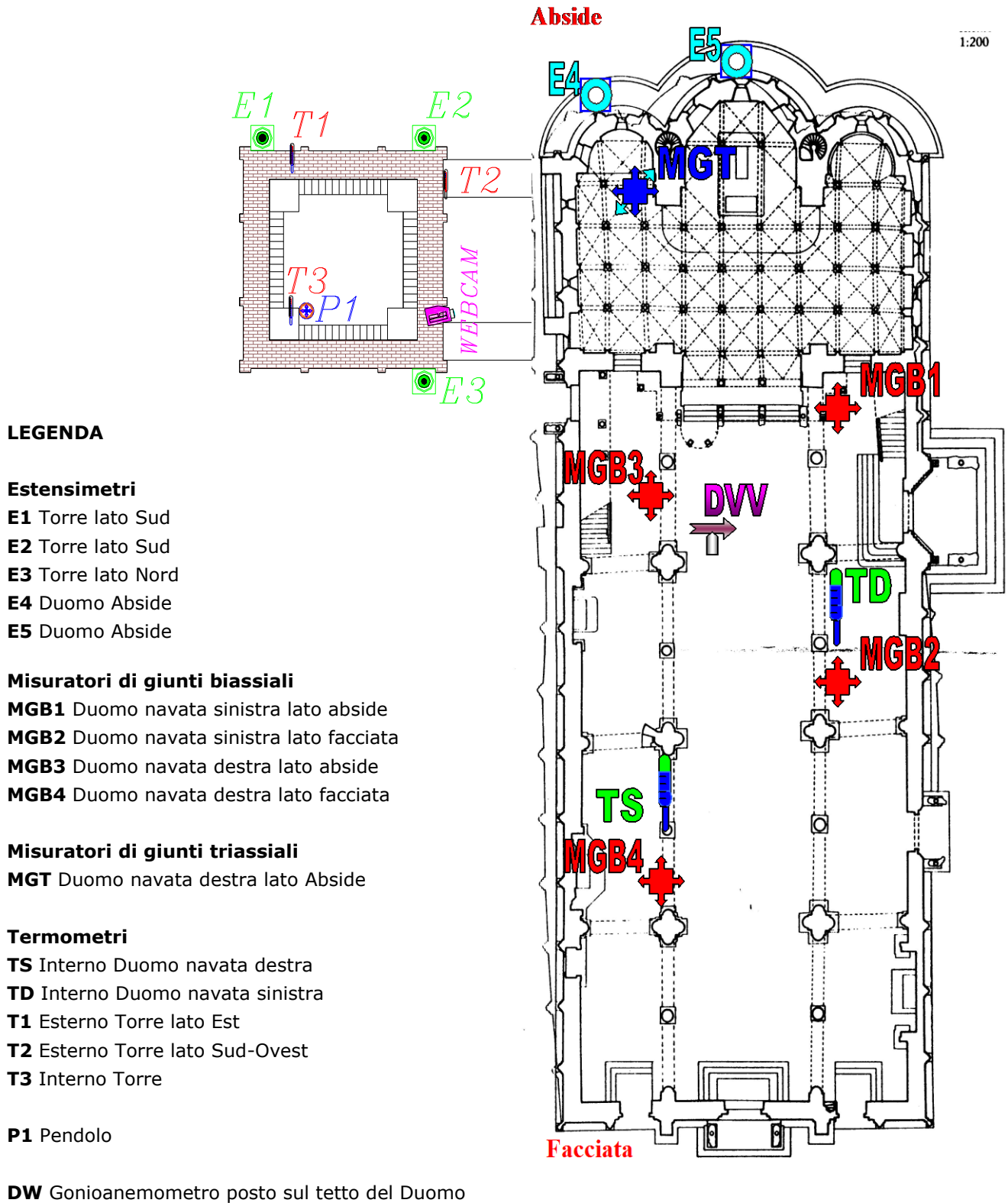
Un PC, situato nella Torre, archivia tutte le misure e le invia, con le immagini di una webcam, ad un PC gemello situato presso l'Info Point di Piazza Grande. La trasmissione wireless avviene grazie a due access point tipo WI-FI installati nella Torre presso l'Info Point.

Con un collegamento ad Internet è possibile accedere al sistema per lo scarico dei dati il



telecontrollo e la manutenzione.

UBICAZIONE DEI SENSORI DI RILEVAMENTO



COMPORTAMENTO DELLA STRUMENTAZIONE INSTALLATA E INTERVENTI DI MANUTENZIONE

La strumentazione è installata da circa due anni e mezzo ed ha funzionato sempre regolarmente con un ottimo livello di affidabilità.

In particolare un invidiabile primato riguarda la robustezza dell'intero sistema ai disturbi provocati dalle scariche atmosferiche. Nessun danno, infatti, per questa ragione, si è mai verificato al sistema di controllo nell'arco di due anni e mezzo nonostante siano passati il periodo autunnale e primaverile ricco di fenomeni e scariche atmosferiche.

Gli interventi di manutenzione eseguiti hanno riguardato prevalentemente la strumentazione installata all'esterno per problemi connessi con la presenza di acqua e piccoli atti di vandalismo ai tombini che ospitano gli estensimetri e gli acquisitori miniaturizzati.

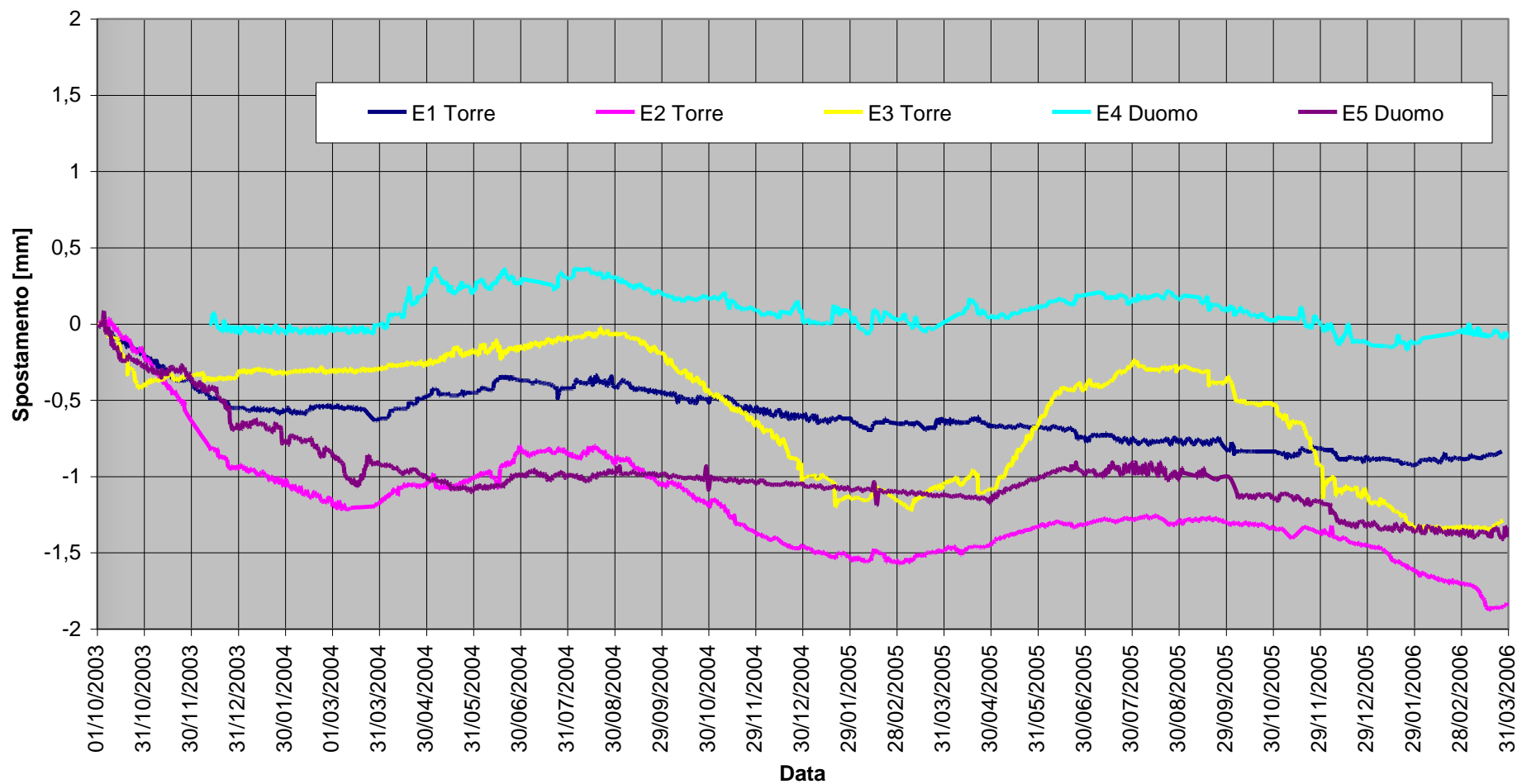
In particolare durante l'anno 2005 sono stati fatti i seguenti interventi:

1. manutenzione al PC situato nella Torre reso necessario dagli elevati livelli di umidità all'interno della stessa che, in alcuni periodi dell'anno, si avvicina al 100%.
2. sostituzione del disco fisso del PC del Chiosco, manutenzione straordinaria.
3. sostituzione delle batterie di tutti i Fast, manutenzione ordinaria.

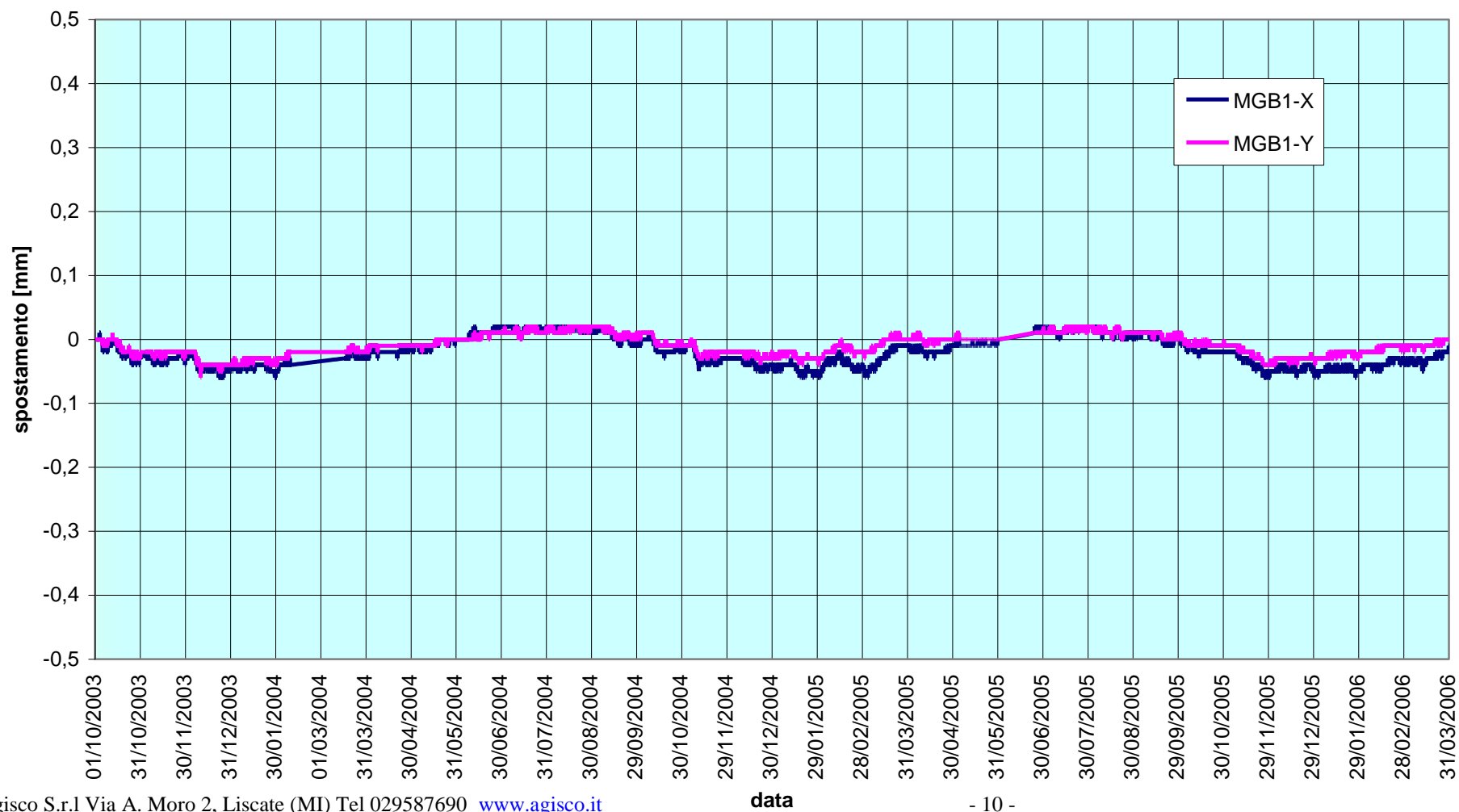
Nel mese di febbraio del 2006 è stato fatto un sopralluogo per riconfigurare i due fast che avevano qualche problema nella trasmissione dei dati per la visualizzazione da remoto.

**ANDAMENTO DELLE GRANDEZZE MISURATE NEL
PERIODO
01/10/2003 - 31/03/2006**

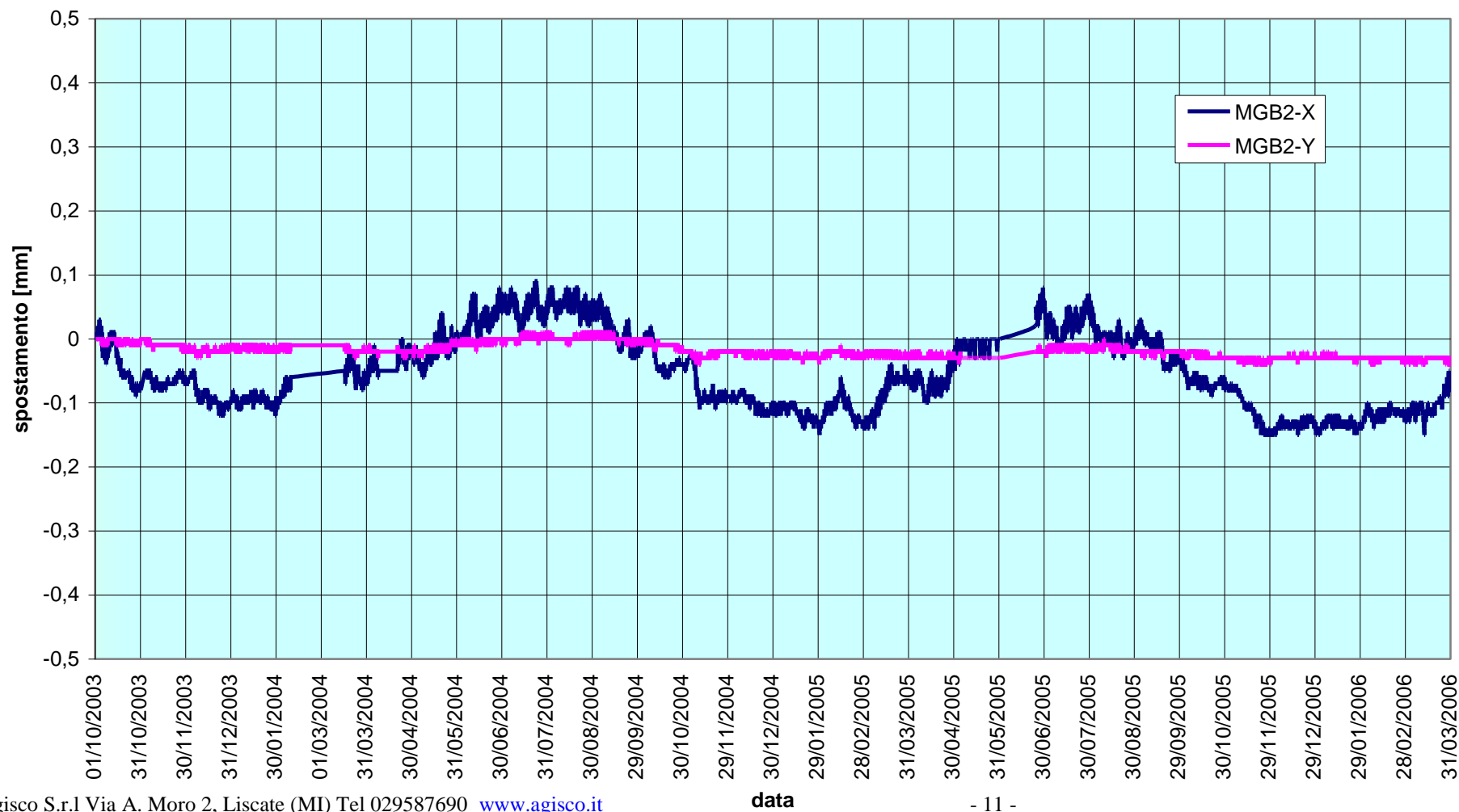
ESTENSIMETRI



Misuratore di giunti biassiale MGB1



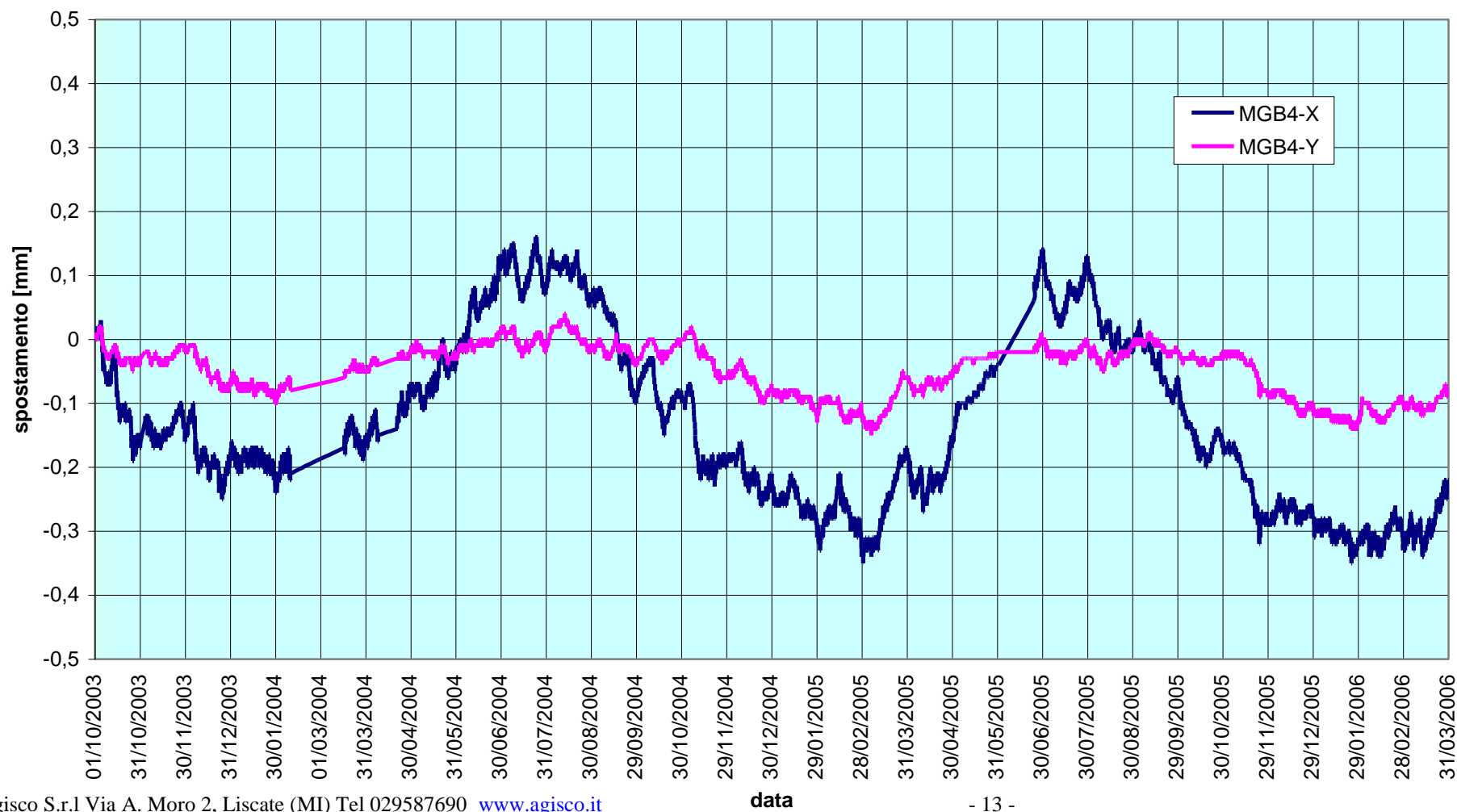
Misuratore di giunti biassiale MGB2



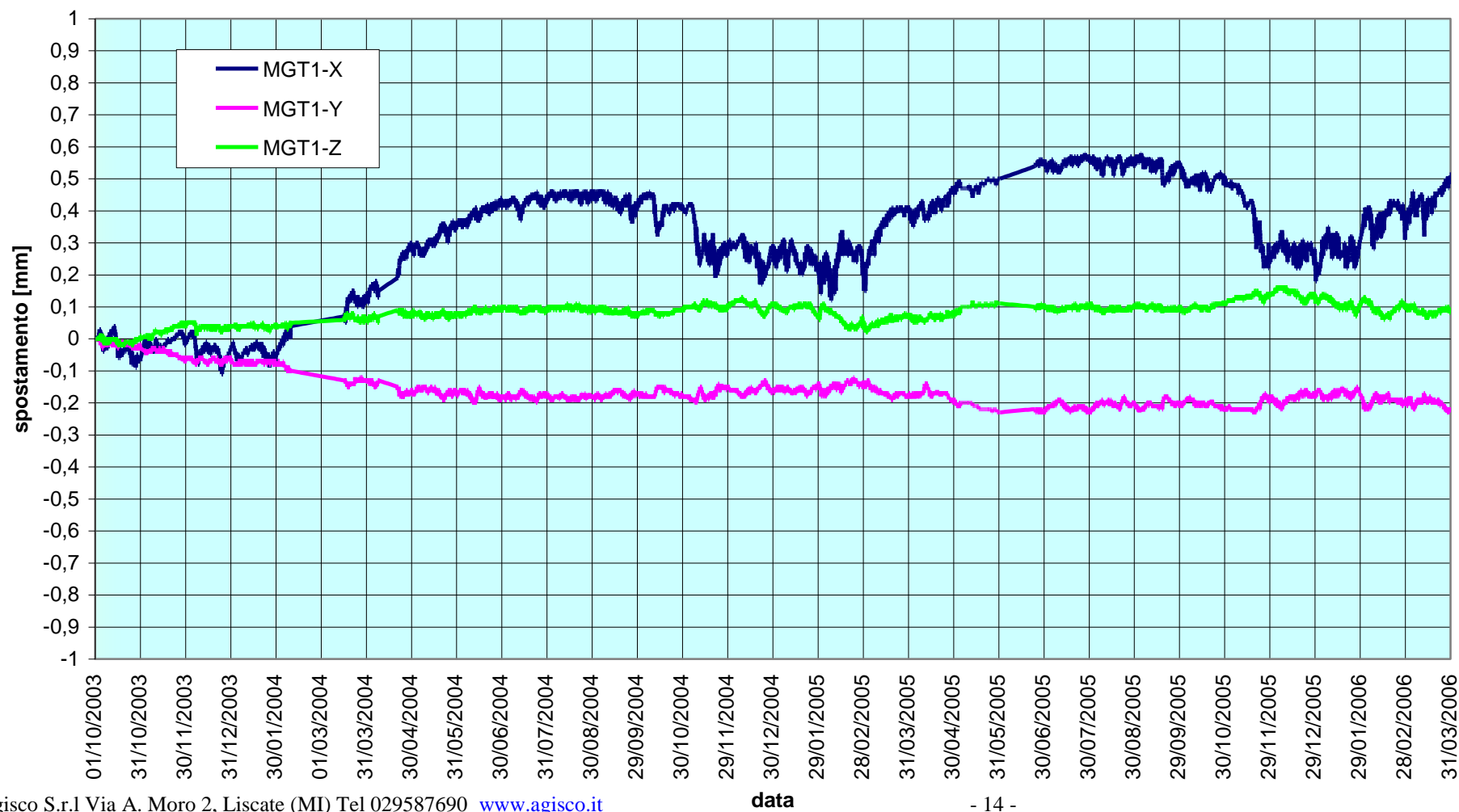
Misuratore di giunti biassiale MGB3



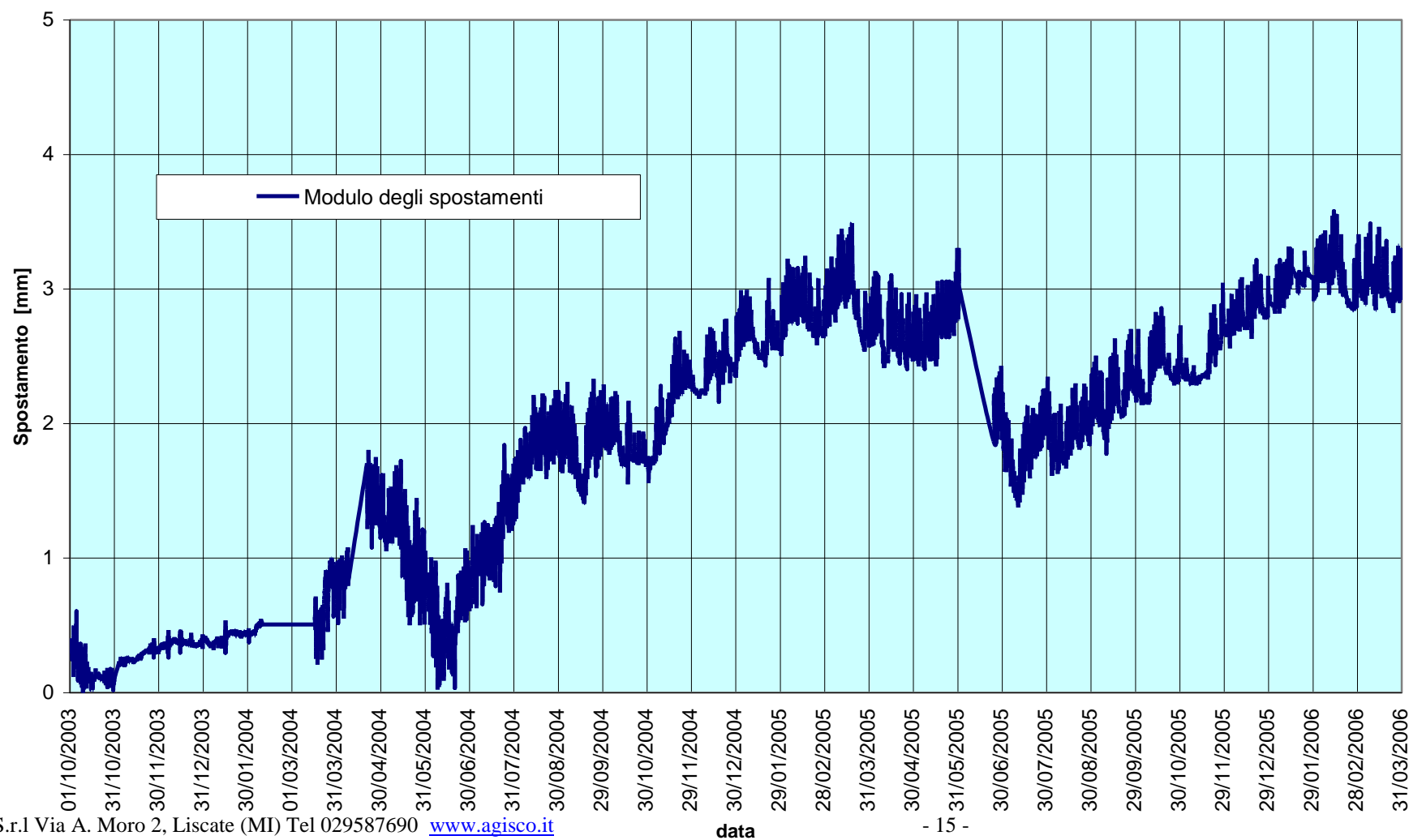
Misuratore di giunti biassiale MGB4



Misuratore di giunti triassiale MGT1



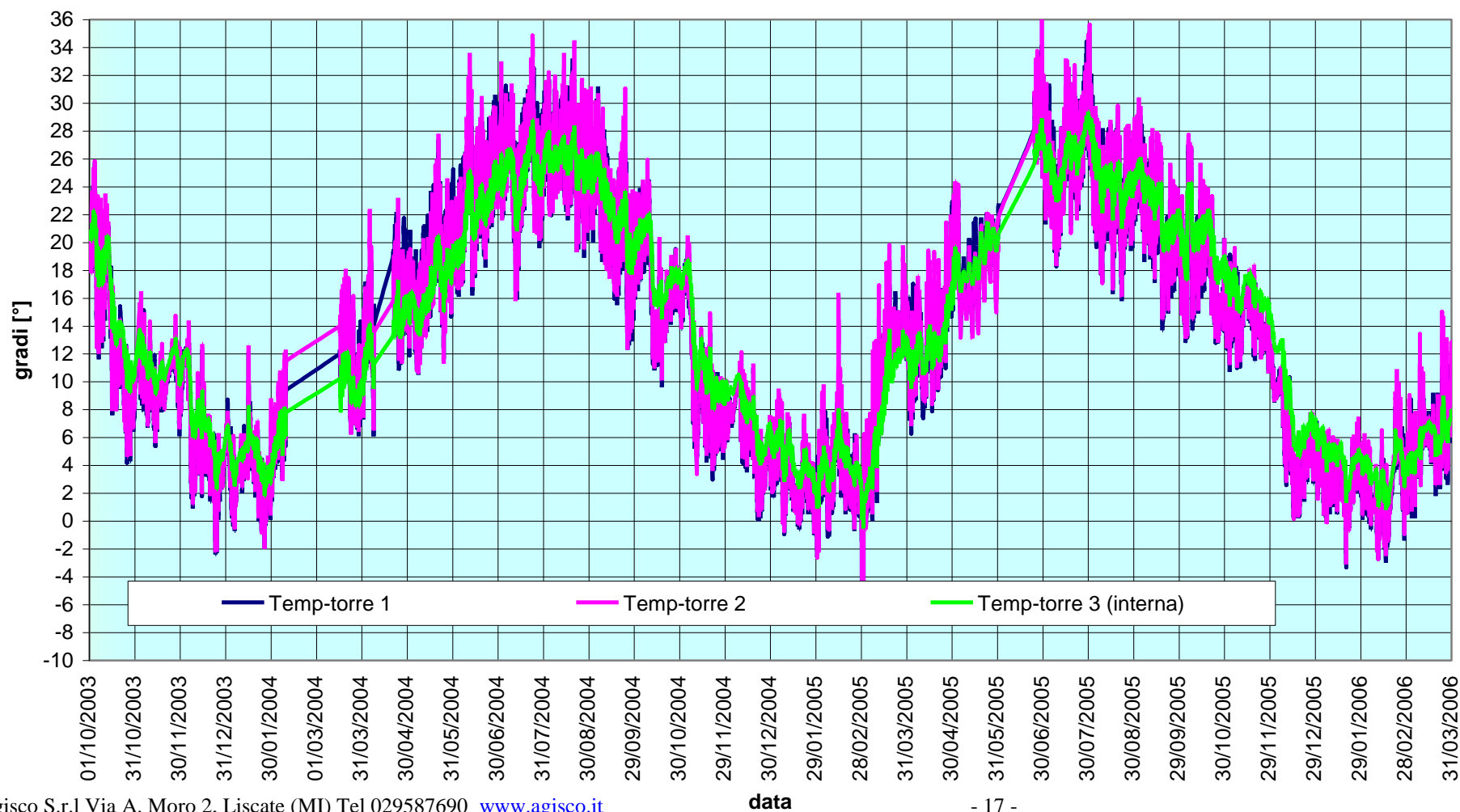
Pendolo



Sistema di controllo del Duomo di Modena e della Torre della Ghirlandina



Sensori di temperatura TORRE DELLA GHIRLANDINA



RISULTATI DEL MONITORAGGIO

La strumentazione, e tutto il sistema di controllo, ha iniziato la fase operativa nel mese di Ottobre 2003.

Tutte le misure sono state regolarmente ricevute dal sistema di acquisizione dati situato nella Torre, datalogger più PC, e trasmesse via WI-FI al PC situato nell'InfoPoint di Piazza Grande.

Da lì, mediante collegamento in rete Internet, i dati sono stati scaricati dalla sede dell'Agisco per essere elaborati e rappresentati sotto forma di diagrammi. Contemporaneamente una rappresentazione in tempo reale viene automaticamente realizzata da un opportuno software e rappresentata sul PC dell'Info-Point.

In tutto questo periodo non si sono verificati eventi di rilievo sui monumenti monitorati, anche in occasione del terremoto avvenuto alle 23.59 del 24/11/04 di Magnitudo 5.2 (VIII MCS) con epicentro nella zona del Garda. Le strutture del Duomo e della Torre non hanno risentito del fenomeno e nessuno strumento ha indicato variazioni apprezzabili in occasione dell'evento.

Le lesioni monitorate attraverso i misuratori di giunti triassiali non hanno subito nessuna variazione apprezzabile se non quelle derivate da fenomeni termici e per di più di entità trascurabili.

A tale proposito è stato riportato nella figura della pagina seguente la registrazione del misuratore MGB4, installato nella navata destra lato facciata Duomo, sovrapposto alla registrazione della temperatura di entrambi i termometri presenti all'interno: si può osservare la buona corrispondenza dell'andamento dei tracciati e la stretta dipendenza del comportamento della lesione dalla temperatura dell'edificio.

Una differente valutazione va fatta a proposito del misuratore di giunti triassiale MGT1.

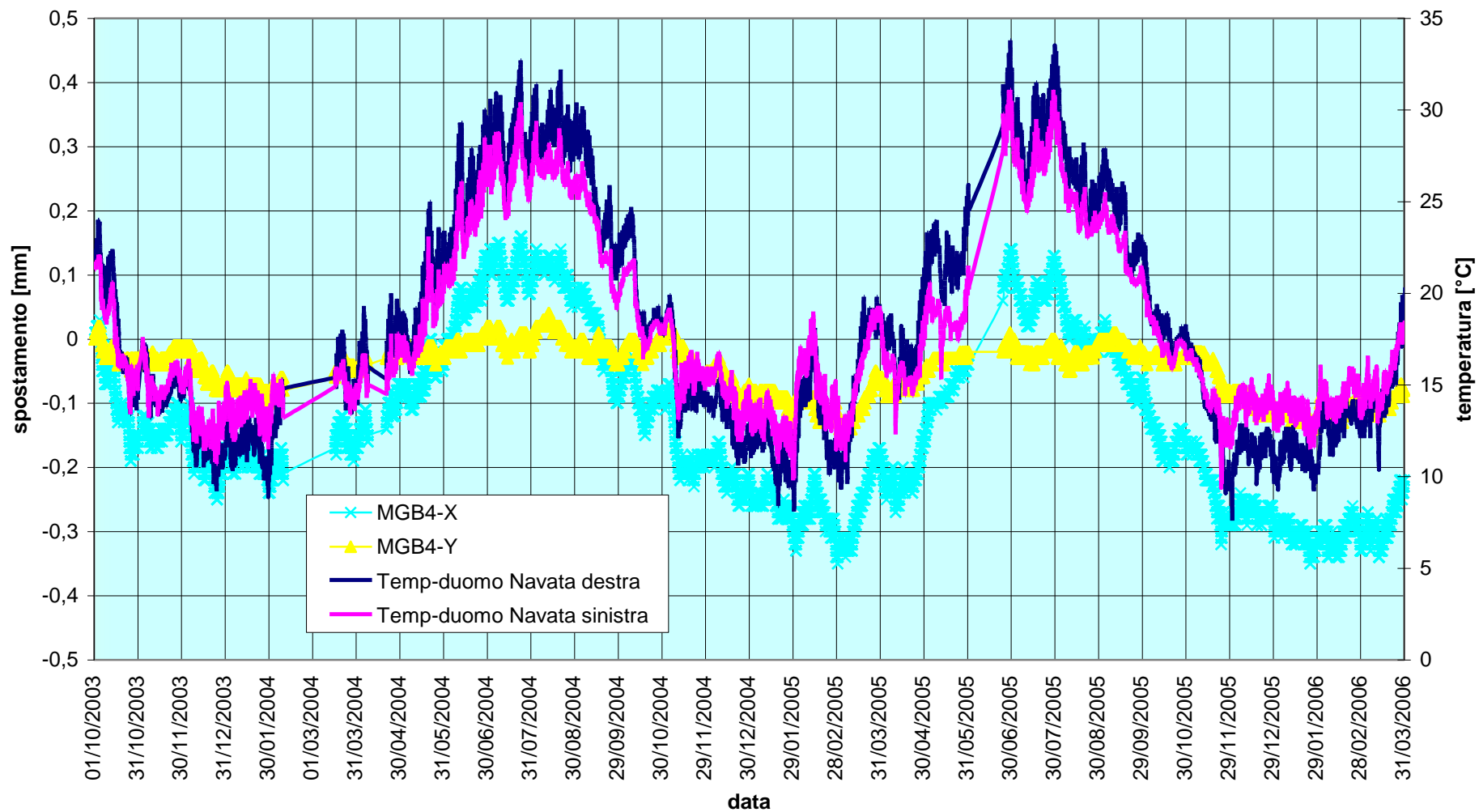
Questo è stato installato a cavallo della fessura situata in corrispondenza dell'appoggio della Torre sulla struttura del Duomo tramite uno dei due contrafforti esistenti.

Il giunto denota una leggera tendenza a chiudersi, molto probabilmente in funzione della spinta della Torre. Si tratta, in effetti, di pochi decimi di millimetro che per il momento non destano nessuna preoccupazione, ma che mostrano una evoluzione del fenomeno pressoché continua.

La Torre è tenuta sotto controllo mediante i tre estensimetri a base lunga ed il pendolo che confermano, come già evidenziato dal misuratore di giunti triassiale, una tendenza della Torre ad inclinarsi ruotando nella direzione della sua massima pendenza, cioè contro la struttura del Duomo.

In effetti l'esame delle deformazioni misurate dagli estensimetri mostra un cedimento differenziale permanente delle fondazioni della Torre in direzione del Duomo di entità ben correlabile con le rotazioni permanenti mostrate dal pendolo.

Andamento del Misuratore di giunto biassiale 4 e della Temperatura relativa



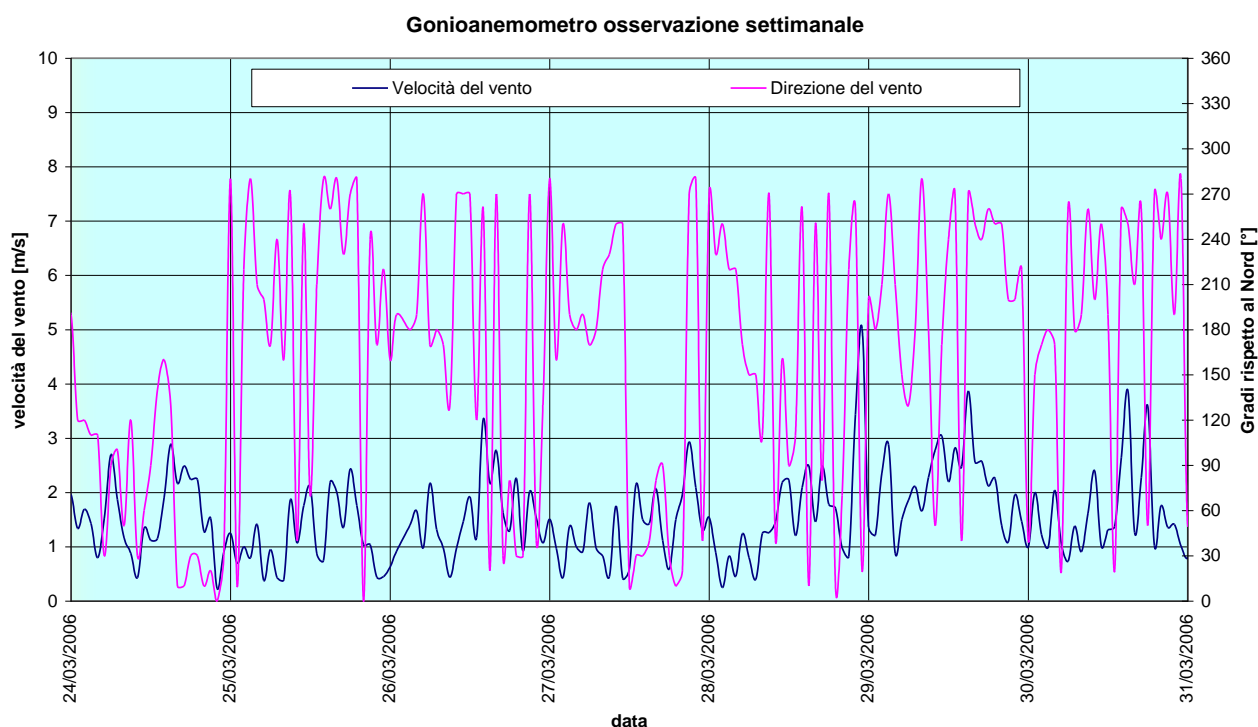
L'esame di questi due tipi di informazioni porta a dedurre che ci si trova di fronte ad un continuo, se pur lento, fenomeno di rotazione della Torre nella direzione della sua massima pendenza confermata dall'estensimetro E3 mostra il massimo spostamento. Questa rotazione ha probabilmente origine dal cedimento differenziale delle fondazioni come mostrato dagli estensimetri.

Tale fenomeno è, per il momento, di trascurabile entità, ma richiede una attenzione particolare in quanto potrebbe subire accelerazioni causate da molteplici fattori come, ad esempio, un fenomeno sismico oppure da importanti variazioni del livello della falda freatica.

A questo proposito va notato come, dall'esame dei grafici corrispondenti, il recente episodio di scossa sismica citata in precedenza non abbia avuto conseguenze né sulla Torre né sulla struttura del Duomo.

La stessa cosa può essere detta a proposito di oscillazioni dovute al vento, misurato attraverso il gonioanemometro anche se, nel periodo di osservazione, non si sono manifestati fenomeni particolarmente rilevanti.

Si riporta, a titolo di esempio, una registrazione settimanale del gonioanemometro.

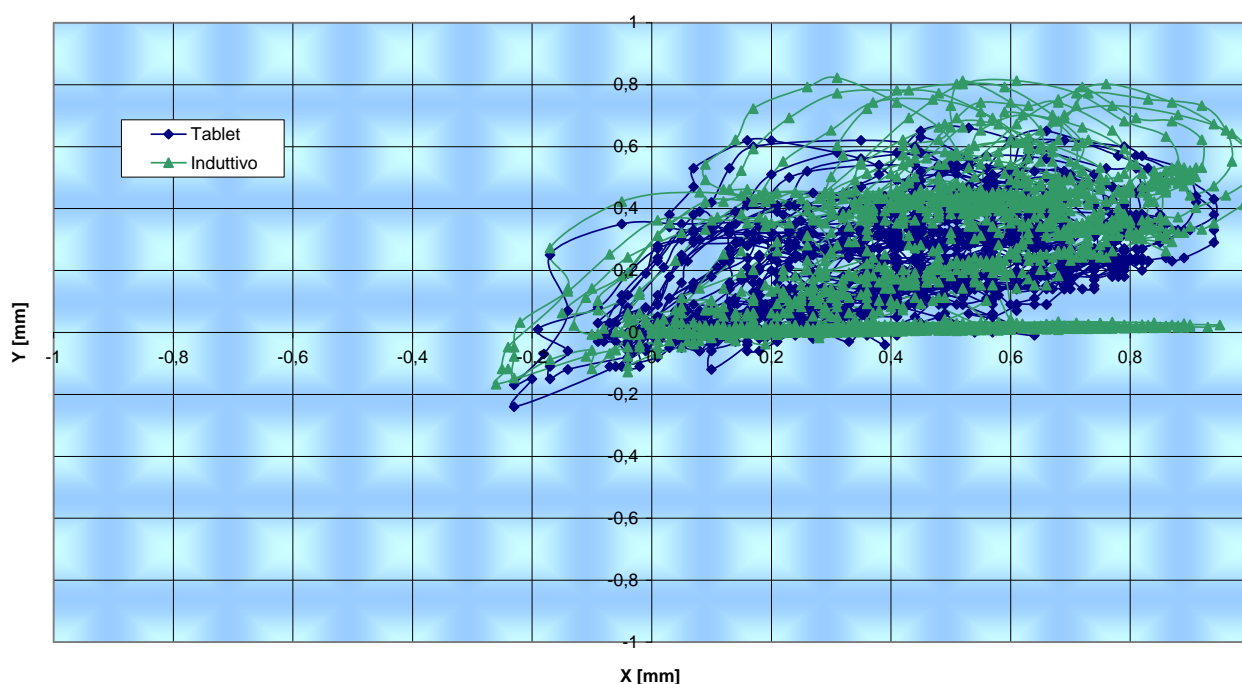


Gli spostamenti delle fondazioni del Duomo nell'arco dei due anni e mezzo, monitorati attraverso gli estensimetri a base lunga, non evidenziano instabilità della struttura e delle fondazioni.

E' stato effettuato uno studio comparativo delle misure ricavate contemporaneamente dai due sistemi di misura del filo a piombo installato presso la torre.

Si è rilevato un elevato grado di coerenza tra i due strumenti, anche e soprattutto nel periodo estivo durante il quale le oscillazioni giornaliere hanno ampiezze maggiori.

Rilevazione posizione filo a piombo - estate 2005

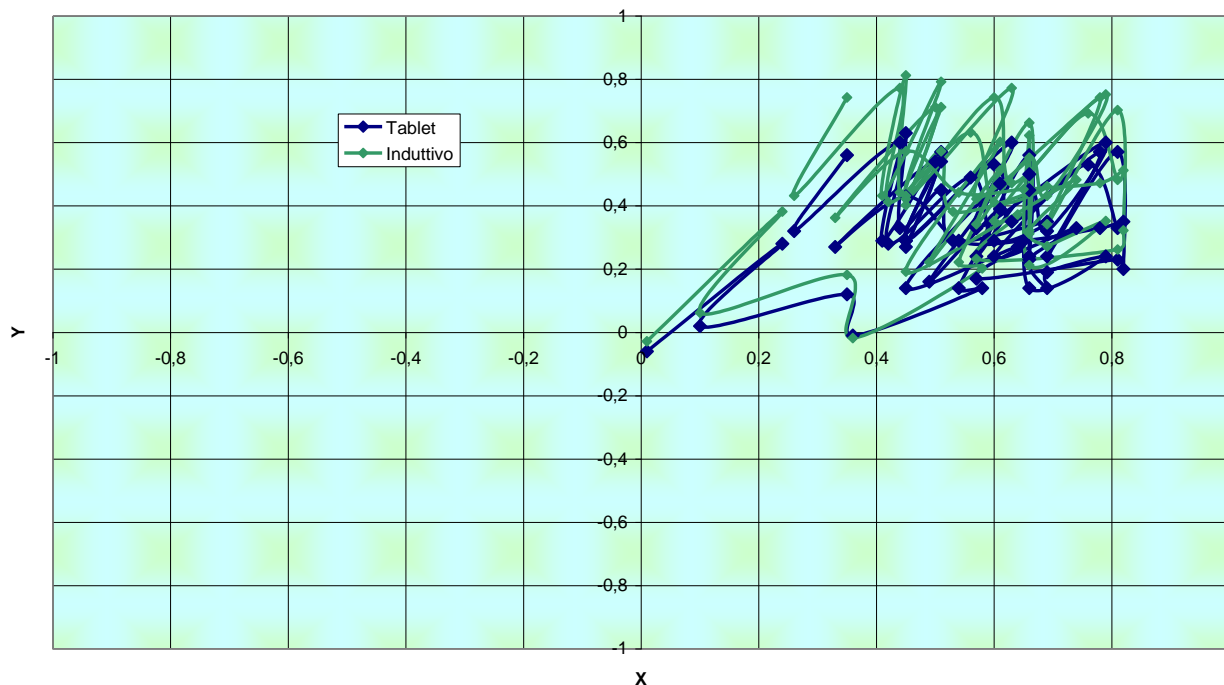


Nel grafico sono riportate integralmente le posizioni misurate degli strumenti durante tutta l'estate del 2005 lungo due assi coordinati.

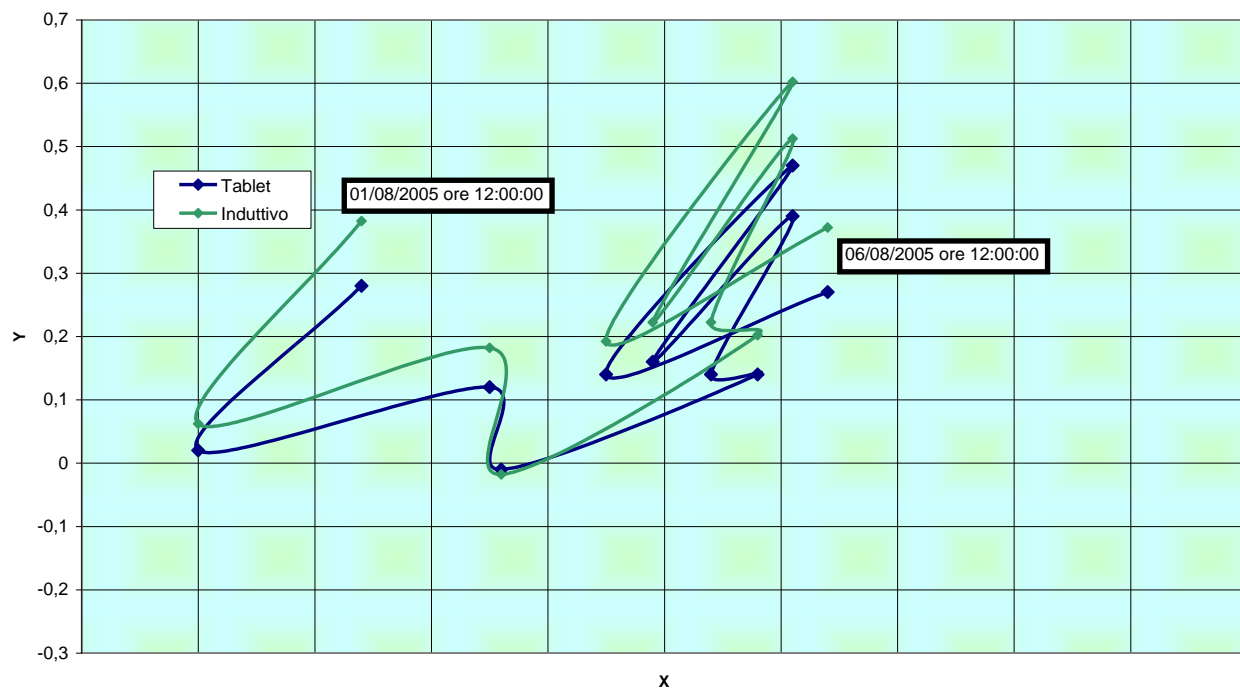
Si nota come esiste una notevolissima concordanza di valori anche tenendo conto della scala di misura. Le massime oscillazioni lungo i due assi coordinati sono dell'ordine di 0,8 mm.

Di seguito si riportano alcuni grafici in cui si può apprezzare "l'inseguirsi" della curva rilevata dai due telecoordinometri automatici (tablet e induttivo).

**Rilevazioni posizione filo a piombo
TABLET e INDUTTIVO - evidenziata la misura ogni 12 h**

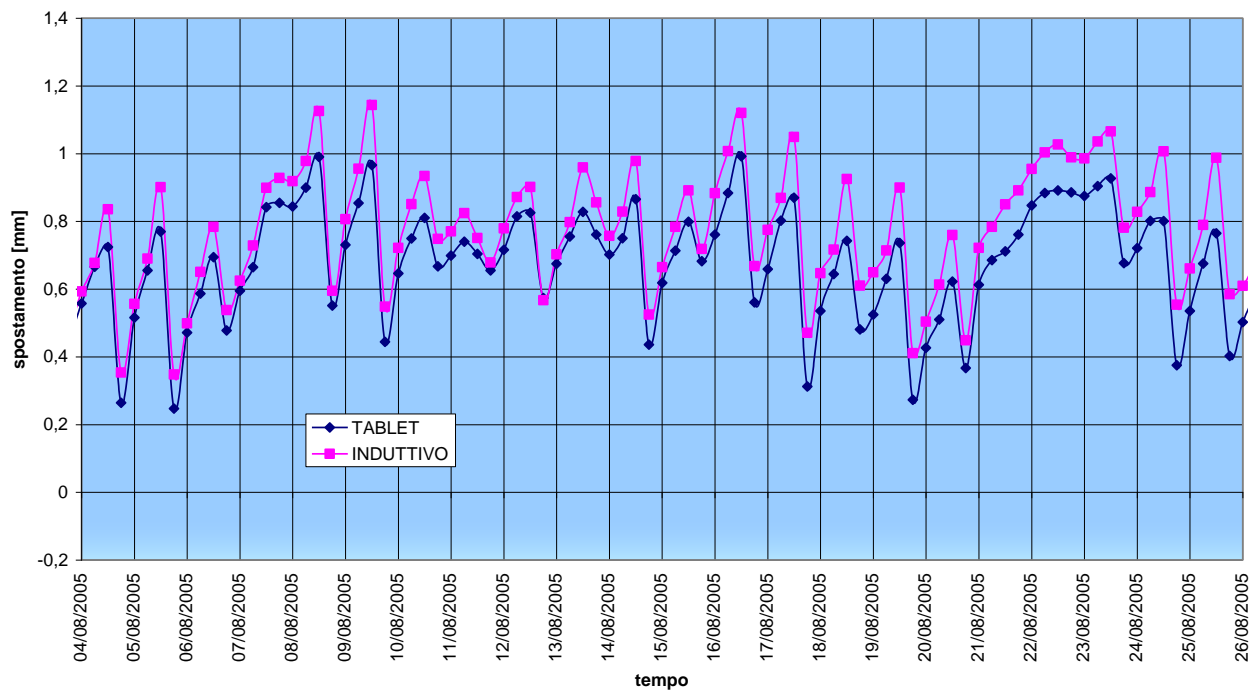


**Rilevazioni posizione filo a piombo - particolare
TABLET e INDUTTIVO**

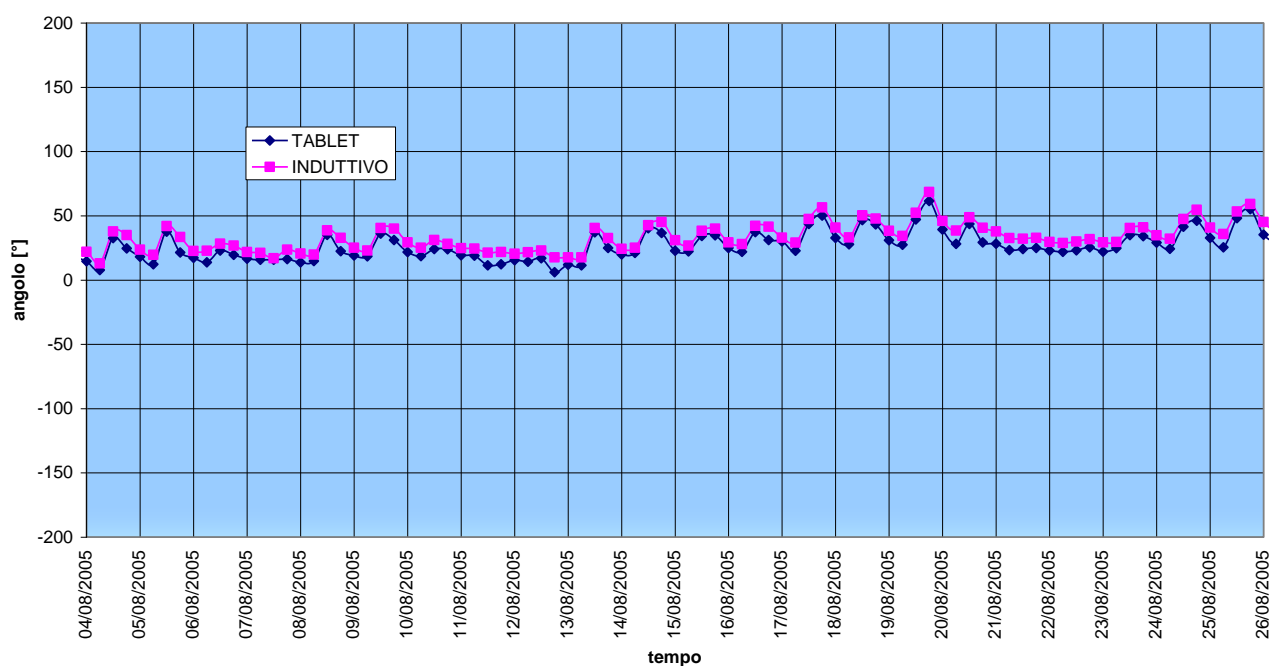


Anche le elaborazioni delle rotazioni, in modulo e fase, mostrano risultati coerenti fra loro.

MODULO
TABLET e INDUTTIVO



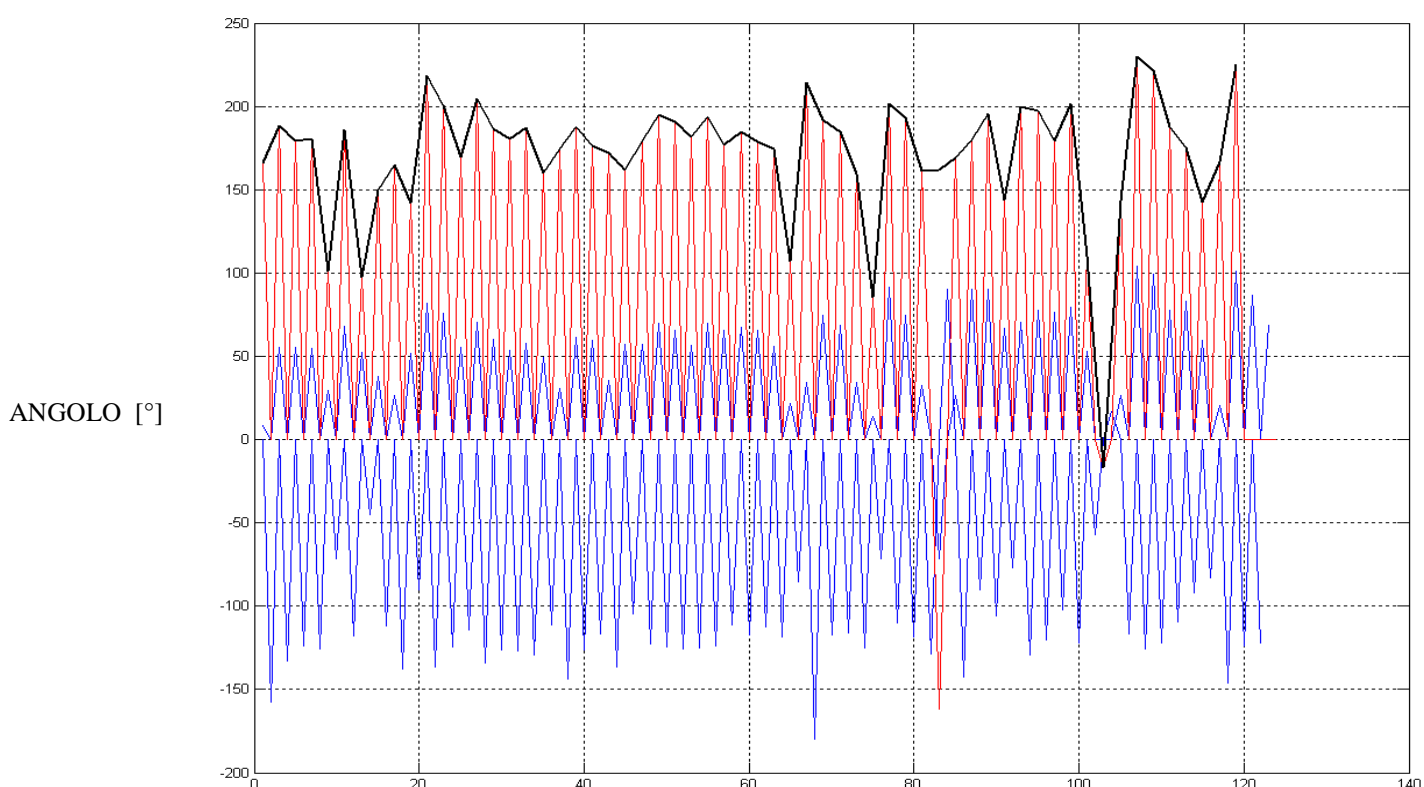
Fasi
TABLET e TELECOORDINOMETRO



Si è proceduto ad una piccola analisi statistica del comportamento della torre: in particolare si è calcolata la direzione di spostamento media durante la fascia temporale che va dalle ore 00:00 alle 12:00 (mattino) e durante quella che va dalle 12:00 alle 24:00 (pomeriggio).

Lo studio porta a dedurre che durante l'arco della medesima giornata, se il pendolo si muove lungo una direzione al mattino, durante il pomeriggio seguirà con una certa varianza la direzione opposta, cioè tende a tornare indietro lungo la stessa retta. Questo fenomeno si ripete spesso, nell'70% circa delle giornate esaminate.

ANALISI VALORI DI LUGLIO - AGOSTO 2005



Nel grafico sono riportate le 61 giornate che compongono il periodo di luglio-agosto 2005, in blu le direzioni della torre al mattino (picchi positivi) ed al pomeriggio (picchi negativi).

In rosso è riportata la loro differenza vettoriale, il cui inviluppo in nero rappresenta la differenza in angolo tra le due direzione di movimento del pendolo.

La media dell'inviluppo è 172° circa. Eliminando la misura 102, che è la più distante dal valor medio ed è probabilmente il risultato di un errore di misura, la media diviene 175°, molto vicina a 180°. La deviazione standard è pari a circa 30°.

CONCLUSIONI

Tali confronti confermano la bontà e l'affidabilità dell'insieme di misure sulle quali possono essere fatte successive elaborazioni ed interpretazioni più approfondite. Il periodo di osservazione ha superato ormai i due anni con una banca dati disponibile che abbraccia più di due cicli stagionali. Come si intravede dalle misure effettuate sarebbe estremamente importante analizzare i comportamenti strutturali del complesso duomo-contrafforti-torre al fine di determinare le evoluzioni nel tempo e prevedere successivi interventi strumentali e/o strutturali per limitare i possibili danni alle strutture stesse. Un'approfondita analisi strutturale del complesso torre-contrafforti-duomo nei vari periodi dell'anno potrebbe risultare particolarmente utile per la salvaguardia della struttura. I risultati di tale lavoro possono fornire indicazioni importanti per le future analisi strutturali e suggerire gli interventi più opportuni.