

SISTEMI GNSS AD ALTA FREQUENZA PER IL MONITORAGGIO STRUTTURALE: CRITICITA' ED EFFETTI DELLE VARIABILI AMBIENTALI.

HIGH FREQUENCY GNSS SYSTEMS FOR STRUCTURAL MONITORING: CRITICAL ISSUES AND CONTRIBUTIONS OF ENVIRONMENTAL ASPECTS.

P. Rossi ^a

^a Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Via Pietro Vivarelli 10, 41125
Modena
paolo.rossi@unimore.it

PAROLE CHIAVE: GNSS ad alta frequenza, monitoraggio strutturale, sito UNESCO di Modena, analisi segnale, variabili meteorologiche

KEY WORDS: high frequency GNSS, structural monitoring, UNESCO site of Modena, signal analysis, weather conditions

RIASSUNTO

Questo lavoro si inserisce nell'ambito del monitoraggio strutturale, si tratta di uno dei pochi esempi in Italia di monitoraggio con sistema GNSS ad alta frequenza applicato ad una torre civica italiana. L'indagine ad alta frequenza permette di quantificare la frequenza naturale di oscillazione della struttura e valutare lo stato di salute della stessa. La torre Ghirlandina di Modena, patrimonio dell'UNESCO, è stata scelta come oggetto di studio data la presenza di altri sistemi e sensori che monitorano in modo continuo la struttura. Il monitoraggio integrato fornisce un approccio multidisciplinare allo studio della struttura in esame, fornendo una valida interpretazione delle interazioni tra diversi fenomeni. Il test effettuato evidenzia le criticità emerse nell'applicazione della tecnologia GNSS ad alta frequenza, i movimenti individuati sono di bassa entità e non permettono di ottenere informazioni sullo stato di salute della struttura e sulle risposte alle sollecitazioni ambientali. Lo spettro di potenza risulta dominato dalle basse frequenze, solo una correlazione tra spostamento in direzione Est-Ovest e variazione diurna della temperatura viene identificata.

ABSTRACT

This work is one of the few examples in Italy of monitoring structural health with high-frequency GNSS system applied to a civic tower. The high-frequency survey allows to quantify the structural natural frequency and assess the health state of the same. The Ghirlandina Tower in Modena, was chosen as case study for its significance and for the presence of a continuous monitoring systems made of several sensors. An integrated monitoring system provides a multidisciplinary approach to the study of the structure and an exhaustive interpretation of the interactions between different phenomena. The test highlighted problems in the application of high-frequency GNSS technology: the magnitude of detected movements was not enough to significantly provide information about structure health status and its responses to environmental stresses. The power spectrum is dominated by low frequencies phenomena, only the shift in East-West direction showed a correlation with temperature variations.

1. INTRODUZIONE

Lo scopo di questa ricerca è identificare informazioni utili al monitoraggio strutturale al fine di preservare il patrimonio storico-artistico e garantire l'integrità delle strutture stesse. Il monitoraggio di opere civili e beni architettonici nasce dall'esigenza di mantenere nel tempo un adeguato livello di sicurezza strutturale e riveste un ruolo fondamentale sia nella protezione di edifici già danneggiati che nella predizione di fenomeni di degrado (Castagnetti et al., 2012; Lancellotta et al., 2013). Le opere alte e snelle (torri) o sviluppate in lunghezza (ponti) sono quelle più sensibili a fenomeni di degrado e danneggiamento. Si rende quindi necessario progettare un adeguato sistema di monitoraggio per determinare le cause, l'estensione e l'evoluzione di movimenti e rotazioni per definire gli interventi di manutenzione più appropriati. I sensori più utilizzati a tale scopo sono gli accelerometri, deformometri e altri che similmente raccolgono dati in modo continuo e permettono di indagare comportamenti statici e dinamici delle

strutture (Casciati e Faravelli, 2010; Chang et al., 2003; Meng et al., 2007; Omenzetter e Brownjohn, 2006). Per molti anni il monitoraggio del comportamento delle strutture si è affidato esclusivamente a strumenti come accelerometri installati sulla struttura di interesse, i cui risultati richiedono però un processo di integrazione per arrivare ai relativi spostamenti. La tecnologia di posizionamento satellitare è in grado di misurare le coordinate dei punti di controllo in modo diretto: ciò di fatto offre una grande opportunità per monitorare i movimenti, seguendo la struttura con continuità. Ogni struttura infatti è sempre soggetta a movimenti sebbene di piccolissima entità, e sarà quindi caratterizzata da una propria naturale frequenza di oscillazione. Il monitoraggio della frequenza naturale fornisce informazioni sullo stato di salute del sistema e una sua variazione può essere legata a fenomeni di degrado strutturale, si parla quindi di Structural Health Monitoring. La tecnologia GNSS (Sistema Satellitare Globale di Navigazione) ad alta frequenza consente di individuare anche i più piccoli movimenti della struttura.

La maggior parte dei lavori di ricerca sull'argomento studia l'applicabilità del sistema GNSS ad alta frequenza al monitoraggio dinamico di strutture, che possono vibrare a causa dell'azione del vento, di movimenti sismici e di variazioni di temperatura e di carico; analizzano inoltre l'affidabilità dei sistemi GNSS e la significatività dei risultati ottenuti. Alcuni lavori studiano l'applicabilità del sistema GNSS ad alta frequenza di campionamento al monitoraggio dinamico di strutture snelle, in particolare torri televisive, ciminiere e lunghi ponti (Lovse et al., 1995; Breuer et al., 2002; Seco et al., 2007). Altri studiano l'integrazione di accelerometri e GNSS per la ricostruzione di tutti i movimenti (ad alta e bassa frequenza) che caratterizzano la struttura in esame (Ogaja et al., 2001; Rizos et al., 2008; Moschas et al., 2014; Xia et al., 2014; Yi et al., 2013). Rizos et al. descrivono un progetto di monitoraggio iniziato nel 2006 sulla Latitude Tower a Sidney, un edificio alto 129 m. Sono stati installati accelerometri, anemometri e un'unità GPS rover posizionata in cima all'edificio (10 Hz), si vanno a monitorare gli spostamenti causati dal vento. La velocità media del vento misurata dall'anemometro è di ben 20m/s. Non si tratta di un monitoraggio real time, ma si effettua il post-processamento dei dati cinematici utilizzando le effermeridi precise. La risposta del GPS è risultata concorde con quella degli accelerometri. Nel luglio del 2004 Moschas et al. hanno analizzato l'applicabilità del monitoraggio dinamico con ricevitori GPS sul ponte sospeso pedonale Wilford (Nottingham,UK). L'unità master è stata posizionata su una riva del fiume, la rover sull'arco a metà del ponte. Le misure a 50 Hz sono state confrontate con quelle di un accelerometro triassiale posizionato accanto, mostrando buona compatibilità tra i risultati. La frequenza fondamentale di oscillazione del ponte è di 2.117 Hz, risultato molto vicino a quello ottenuto con l'accelerometro, pari a 2.116 Hz. Yi et al. integrano accelerometri e sistema GPS per la misura dei movimenti indotti dal vento su una torre di 420m ad Hong Kong durante un tifone, la combinazione dei due tipi di misure fornisce informazioni complete su movimenti ad alta e bassa frequenza.

I casi presentati sopra suggeriscono una effettiva capacità dei sistemi GNSS a misurare spostamenti (oscillazioni) di strutture molto snelle ed elastiche e sottoposte a forti sollecitazioni ambientali. Questo lavoro si pone l'obiettivo di applicare il sistema GNSS al monitoraggio di una torre civica italiana ed identificare gli effetti che le variabili ambientali tipiche del luogo hanno sul comportamento della stessa.

2. METODOLOGIA

2.1. Caso di studio

Il sistema GNSS ad alta frequenza è stato testato sulla Torre Ghirlandina (Modena, Italia), patrimonio dell'UNESCO dal 1997 (Fig. 1a). La Torre, insieme al Duomo e all'intera Piazza Grande sono il simbolo della città e hanno una grande rilevanza storica ed architettonica. La Torre Ghirlandina ha una base molto stretta (10.8 m) ed un'altezza di circa 89 m, non ha fondazioni e i suoi 6 piani a pianta quadrata sono sovrastati da una sezione ottagonale e una cuspide piramidale (Fig. 1b). La costruzione della Torre iniziò probabilmente nel 1099 insieme a quella del Duomo, fu progettata dall'architetto Lanfranco e terminata nel 1319 (Dieghi, 2009). Ci sono varie ipotesi sulle fasi costruttive susseguites, la forma che vediamo oggi è frutto di successive correzioni nella verticalità fatte durante la costruzione della struttura e di fenomeni di subsidenza e instabilità verificatesi fino ad ora (Alfieri et al., 2009; Di Tommaso et al., 2009). La scelta di questo caso di studio è

legata al significato storico e simbolico che la Ghirlandina ha per la città di Modena ed alla possibilità di confrontare e validare i risultati ottenuti con quelli di altri sensori. Sul sito UNESCO di Modena e in particolare sulla torre Ghirlandina sono attivi vari sistemi di monitoraggio con tecniche e sensori diversi. Sulla Torre sono installati alcuni accelerometri a diverse quote per lo studio del comportamento dinamico della struttura, frequenza naturale di oscillazione, forme modali e interazioni con le sollecitazioni esterne (Lancellotta e Sabia, 2013). Il pendolo, ancorato a circa 45 m di altezza all'interno della struttura, permette di identificare le oscillazioni della stessa. Estensimetro piezometro monitorano la subsidenza della struttura per cercare una correlazione con le variazioni della profondità della falda acquifera sottostante. Questi sensori monitorano in modo continuo la struttura, altre strumentazioni invece forniscono misure periodiche e offrono un approccio diverso al monitoraggio. Un rilievo con Laser Scanner terrestre dell'intera struttura ha permesso la creazione di un modello 3D da cui sono state estratte notevoli informazioni: l'altezza della Torre, la sua inclinazione variabile con la quota; inoltre, come indicato in Capra et al. (2015), i dati laser permettono di fare analisi geometriche e valutare gli assetti delle strutture portanti. Dal 2007 vengono svolte regolari campagne di livellazione ad altissima precisione, la livellazione permette di quantificare il fenomeno della subsidenza sulla Torre stessa e sull'intera area di Piazza Grande. Queste misure hanno permesso di individuare cedimenti differenziali dei quattro vertici della Torre, variazioni nelle velocità di abbassamento. I risultati sono stati poi correlati ed inquadrati col comportamento dell'intera area del centro di Modena. Il monitoraggio integrato permette, grazie all'uso di diversi sensori e tecniche, di accrescere la conoscenza sul comportamento della Torre grazie ad un approccio multidisciplinare, inoltre ogni sensore valida o completa i risultati rilevati ottenuti con un'altra metodologia. (Castagnetti et al., 2016).



Figura 1. a) Torre Ghirlandina e Duomo, Modena (Italia), inclusi nella lista del patrimonio dell'UNESCO dal 1997. b) particolare della cuspide ottagonale e della sommità della Torre. c) Antenna GNSS installa sulla balaustra del ballatoio più alto della Torre a 78 m di altezza.

2.2. Strumentazione

Il rilievo relativo-cinematico in post elaborazione ha richiesto una stazione di riferimento (master): MOPS (Modena Permanent Station), installata al Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" a circa 2 km dal sito in indagine, e una stazione rover installata sulla Torre. Un'antenna Topcon PG-S1 ed un ricevitore Topcon NET-G3, in acquisizione a 20 Hz per 24 ore sono stati posizionati sulla torre Ghirlandina (21-22 Marzo 2013). L'antenna è stata installata sulla balaustra del ballatoio presente in cima alla torre a circa 78 m dal suolo (Fig. 1b, c), il ricevitore è stato alloggiato internamente alla Torre a circa la stessa quota. La stazione master è costituita da un ricevitore GRX1200 e un'antenna LEIAR10 none della Leica. Il rilievo in modalità cinematica permette di misurare gli spostamenti della Torre, ciò presuppone che l'antenna fissata alla Torre subisca spostamenti dovuti alle sole oscillazioni della struttura stessa. L'antenna è connessa tramite una vite a 5/8 di pollice ad un supporto metallico, il quale è fissato ad una piastra per attrazione magnetica. Quest'ultima è stata resa il più possibile solidale alla balaustra fissandola attraverso delle corde e delle cinghie con blocco. Tra la piastra e la superficie della balconata è stato inserito un foglio in neoprene per proteggere la balaustra, creare attrito e rendere ancora più stabile l'installazione dell'antenna incrementando l'aderenza (Fig. 1c). Questo tipo di materializzazione non rende tuttavia il ricevitore perfettamente solidale con la struttura, potrebbero verificarsi piccoli movimenti legati ad una non perfetta aderenza tra i materiali, anche una dilatazione termica dei vari materiali costituenti la materializzazione potrebbe influenzare le misure. La presenza della guglia di copertura della Torre direzione Nord-Est costituisce un'ostruzione esterna che impedisce all'antenna di vedere tutti i satelliti disponibili e causa effetti di multipath, ciò sporca i dati e aumenta gli errori nelle misure. Molto spesso nell'ambito del monitoraggio è impossibile mantenere nella pratica le linee guida e ci si deve adeguare cercando soluzioni realizzabili il più possibile vicine ai requisiti teorici.

I dati meteorologici utilizzati in questo lavoro provengono dall'Osservatorio Geofisico del Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" ubicato in Piazza Roma (Pubblicazioni dell'osservatorio Geofisico, 1999), situato ad alcune centinaia di metri dalla Torre. L'Osservatorio effettua misure di pressione, umidità relativa, precipitazione, radiazione globale, ma quelle che più ci interessano in questo lavoro sono la temperatura, la direzione e velocità del vento. La temperatura è misurata in °C ad una quota di 30 m circa; il vento viene monitorato ad una quota di circa 40 m, le velocità sono fornite in km/h, la direzione di provenienza è fornita in gradi rispetto alla direzione Nord.

2.3. Processamento dati

Le stazioni master e rover restituiscono file orari di osservazione che devono essere convertiti nel formato standard internazionale RINEX (Receiver INdependent EXchange). I file RINEX della stazione rover sono stati analizzati per verificare la qualità del segnale GNSS, il software TEQC, appositamente sviluppato da UNAVCO (si veda manuale TEQC), permette di capire le condizioni di acquisizione del dato. La routine QC2SKY, sviluppata dal Dott. Marco Roggero (<https://sites.google.com/site/roggeroresearch/home/software/qc2sky>) elabora in forma grafica i dati in uscita da TEQC permettendo una immediata indagine sulla qualità del dato.

GrafNav 8.20 della NovAtel è un software per l'elaborazione in post processing dei dati GNSS acquisiti in modalità statica e cinematica. I 24 file RINEX di ogni stazione sono convertiti e concatenati in un unico file giornaliero, questa operazione permette di risolvere meglio l'ambiguità del dato GNSS ed ottenere risultati continui e più accurati. Il processamento in doppia frequenza fornisce una miglior accuratezza anche per baseline molto lunghe (>10 km) quando sono attivate le correzioni ionosferiche, inoltre migliora l'affidabilità delle tecniche di risoluzione dell'ambiguità. Effemeridi e file di correzioni ionosferiche precisi sono stati considerati nell'elaborazione. Si è verificato quale fosse il set di parametri più idoneo all'elaborazione dei dati in esame: una elevation mask di 10°, l'algoritmo KAR (Kinematic Ambiguity Resolution) per la risoluzione dell'ambiguità, e l'utilizzo delle sole osservazioni GPS, hanno fornito i risultati migliori in termini di continuità del segnale in uscita. Tra i risultati ottenuti solo quelli con ambiguità fissata sono stati considerati nella determinazione degli andamenti delle coordinate e dei relativi errori, le misure con ambiguità non fissata sono state trascurate perché caratterizzate da un errore superiore che avrebbe peggiorato la qualità del resto del lavoro. Ai segnali viene poi applicato un filtro passa-basso, il filtro media mobile con finestra temporale di 1 ora; questa operazione consente di limare la serie dei dati per cercare di eliminare il rumore e visualizzare le reali entità delle oscillazioni. In seguito si effettua l'analisi spettrale delle serie temporali filtrate, la Fast Fourier Transform (FFT) permette di convertire il segnale dal dominio temporale a quello delle frequenze (Cochran et al., 1967), il grafico frequenza-potenza mostra le frequenze più ricorrenti nelle misure effettuate (Yi et al., 2013). Lo scopo è individuare le frequenze più numerose ed analizzarle per identificare la frequenza naturale di oscillazione della Torre e quelle legate ad effetti ambientali esterni (variazioni di temperatura, venti...). Al fine di evidenziare eventuali correlazioni tra variabili meteorologiche e spostamenti rilevati dal sistema GNSS si confrontano qualitativamente le serie temporali, si calcolano la Cross Correlazione (Welch, 1974) e l'indice di Pearson (Fig. 2).

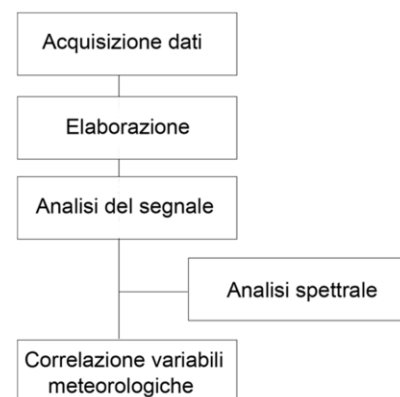


Figura 2. schema della procedura seguita nel processamento dei dati GNSS.

3. RISULTATI

Le problematiche nella materializzazione della stazione rover, come descritte nel paragrafo 2.2, devono essere tenute in considerazione nell'analisi dei risultati ottenuti. L'analisi della qualità del segnale GNSS effettuata con TEQC è graficata attraverso QC2SKY permette di vedere l'effetto che la presenza della guglia ha sul segnale ricevuto dal ricevitore. La guglia

impedisce la visione di alcune porzioni delle orbite dei satelliti (Fig. 3), inoltre crea effetti di multipath sul segnale in arrivo. I dati meteorologici forniti dall'Osservatorio Geofisico hanno permesso di ottenere informazioni utili al test effettuato. Nei giorni 21 e 22 Marzo le temperature sono variate tra i 6°C e i 16°C, i venti hanno raggiunto valori anche superiori ai 5 m/s e sono spirati prevalentemente da direzione Sud-Ovest. L'analisi delle temperature dei mesi di febbraio e Marzo 2013 ha permesso di individuare un picco di frequenza a 1.18×10^{-5} Hz dovuto alle variazioni diurne notturne della temperatura. Per i venti non è stato possibile individuare una frequenza prevalente perché la variabilità è ampia sia in termini di intensità e che di direzione.

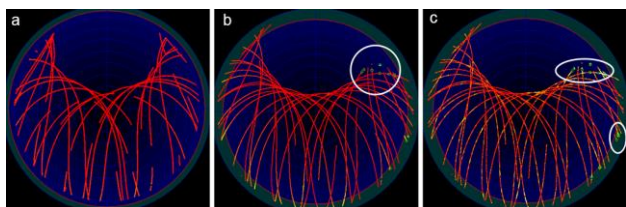


Figura 3. qualità del segnale GNSS ricavata dai file RINEX con TEQC e rappresentata con QC2SKY. a: file .iod della stazione master (MOPS); b: file .iod della stazione rover con indicati le orbite mancanti a causa della presenza della guglia in direzione Nord-Est; c: file .mp1 della stazione rover con indicati gli effetti di multipath legati alle strutture circostanti l'antenna.

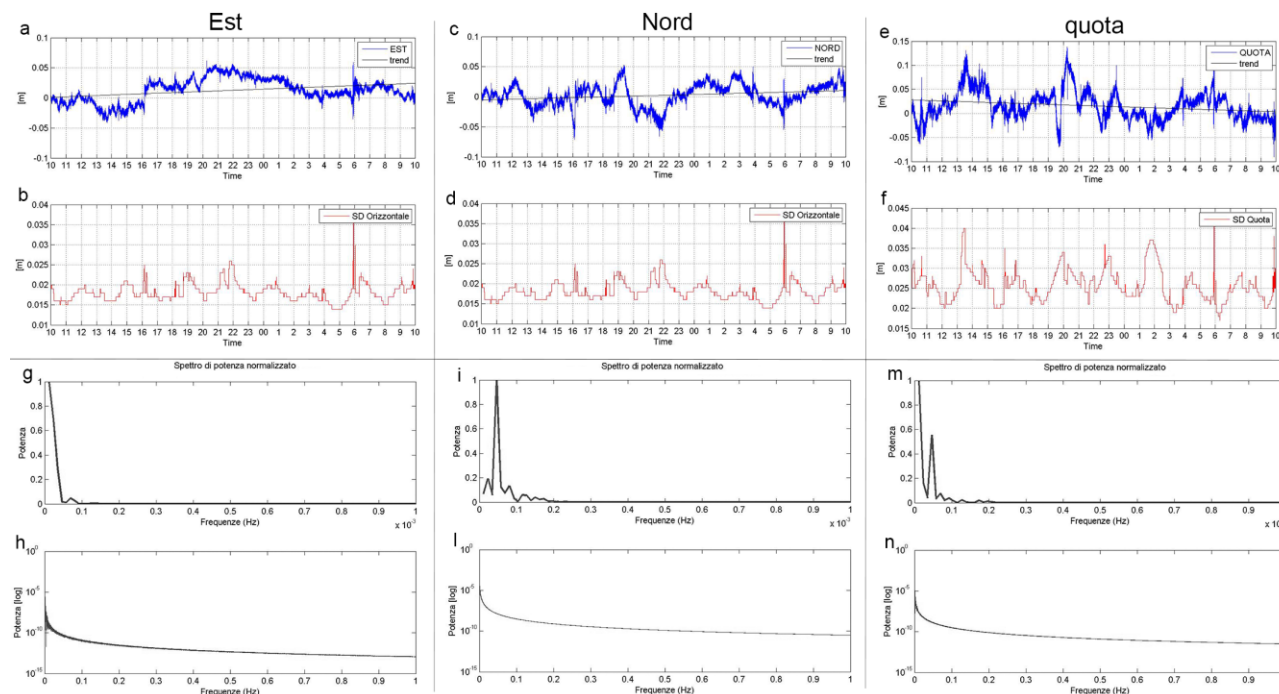


Figura 4. andamenti delle coordinate Est, Nord, quota della stazione rover (a, c, e), e rispettive deviazioni standard sulle 24 ore di misura (b, d, f). Spettri di potenza normalizzati per le tre coordinate calcolati sui dati filtrati con filtro passa-basso, in scala lineare e per frequenze $< 10^{-3}$ Hz (g, i, m) e in scala logaritmica per frequenze < 1 Hz (h, l, n).

Il confronto tra variabili meteorologiche e soluzioni GNSS ha prodotto un risultato significativo solo nel caso di temperatura e coordinata Est. La Cross correlazione indica che 7 ore è il salto tra i due segnali che permetterebbe perfetta correlazione tra essi (Fig. 5a); il coefficiente di correlazione ha un valore pari a -0.29, che indica una buona correlazione (30%) tra i due segnali. Come mostrato in Figura 5b l'effetto del picco di temperatura

Il processamento dei dati col software GrafNav ha fornito serie temporali delle posizioni lungo le coordinate Est, Nord e quota. Le sole soluzioni per cui l'ambiguità risulta fissata sono state utilizzate per la creazione degli andamenti delle coordinate (Fig. 4) e per le analisi successive. La posizione assunta nel primo istante di misura è usata come riferimento per il calcolo negli istanti successivi, per tutte e tre le coordinate si notano molte oscillazioni (Fig. 4 a, c, e) di cui la maggior parte può ritenersi non significativa in quanto inferiore al valore dell'errore (Fig. 4 b, d, f). Inoltre è presente un trend, che possiamo ritenere non significativo poiché della stessa entità degli errori in gioco, il punto iniziale e finale sono pressoché coincidenti, ciò significa che la struttura non ha un movimento residuo nel corso della giornata. L'analisi delle soluzioni con ambiguità non fissata evidenzia che la quota è più soggetta a problematiche sulla risoluzione. La percentuale di risultati con ambiguità fissata è il 99.5%, su 1728000 valori solo 942, corrispondenti a 47 secondi, hanno ambiguità non fissata. I risultati dell'elaborazione sono trattati con un filtro passa-basso e successivamente convertiti al dominio delle frequenze. I picchi nel dominio delle frequenze risultano inferiori agli 0.0001 Hz (Fig. 4g, h, i, l, m, n), e sono probabilmente legati al rumore strumentale o a movimenti di lunga durata. Non si evidenziano il picco caratteristico delle variazioni diurne e notturne della temperatura.

ha un effetto sugli spostamenti in direzione Est-Ovest che si manifesta dopo circa 7 ore.

4. DISCUSSIONI

In corrispondenza di ambiguità non fissate il segnale GPS presenta delle discontinuità. Ovviamente movimenti così

repentini non sono realistici in assenza di cause e forze agenti dall'esterno; è importante capire a cosa siano dovute tali discontinuità: se a malfunzionamenti della strumentazione, a una cattiva geometria dei satelliti, o se la presenza della guglia abbia impedito la ricezione del segnale o creato effetto di multipath.

Da studi effettuati sulla Torre con accelerometri e modelli agli elementi finiti è risultata una frequenza naturale di oscillazione caratteristica dell'intera struttura intorno ai 0.8 Hz (Di Tommaso et al., 2009). Il test con sistema GNSS non identifica un risultato simile, come possiamo vedere dalla Figura 4, le

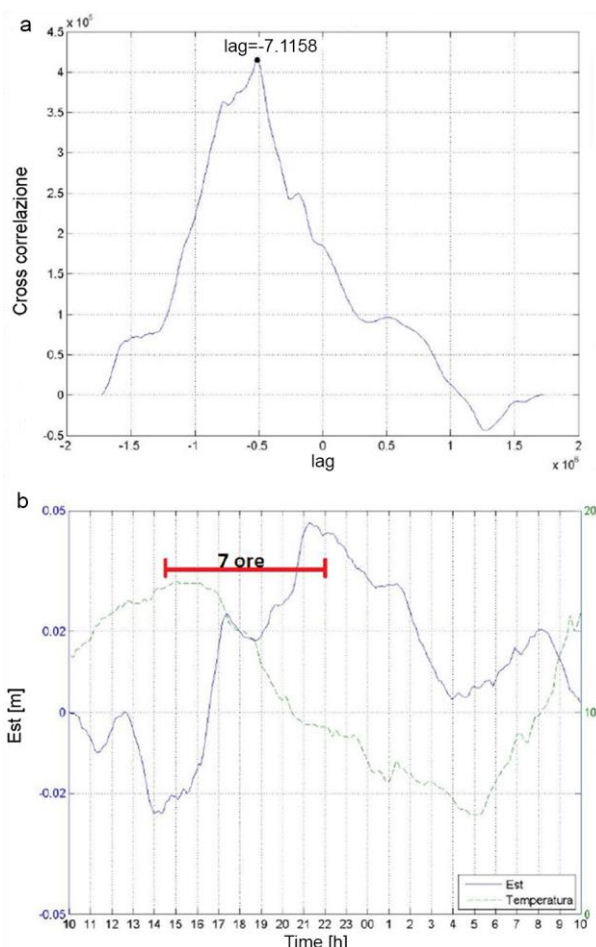


Figura 5. a) grafico della cross correlazione tra temperatura e coordinata Est, in evidenza il picco massimo di scostamento temporale pari a 7.12 ore. b) Rappresentazione dei due segnali, in evidenza il rapporto tra picco nella temperatura e massimo spostamento rilevato.

frequenze rilevate sono molto più basse. Questo risultato indica la presenza di fenomeni molto lenti, caratterizzati da periodi lunghi che mascherano le frequenze che si vorrebbero trovare, ad esempio il rumore strumentale o l'influenza da parte di fattori al contorno, quali temperatura e vento. Rizos et al., (2008), Roberts et al., (2004) evidenziano, nei loro casi studio, le potenzialità dei sistemi GNSS ad alta frequenza nel monitoraggio strutturale e per rilevare le frequenze caratteristiche delle strutture. Probabilmente la torre Ghirlandina, per le sue caratteristiche geometriche e costruttive, ha delle oscillazioni di piccola entità difficili da rilevare con sistema GNSS. Considerare le variabili meteorologiche in azione al momento della misura è utile giustificare le oscillazioni della struttura in esame. Nel nostro caso, date le

basse frequenze rilevate, siamo interessati a valutare gli effetti degli input ambientali; rimuovendo l'effetto di questi fenomeni ambientali dalle serie temporali GNSS si può identificare la frequenza naturale di oscillazione della Torre. La temperatura ha un'oscillazione giornaliera che induce dei movimenti nella struttura che si ripetono simili con un periodo di 24 ore, le frequenze in gioco sono quindi basse. Il monitoraggio della Torre è durato un tempo insufficiente ad identificare la periodicità delle temperature, ne è dimostrazione l'impossibilità di individuarne la frequenza caratteristica. I venti hanno una variabilità aleatoria, è difficile individuare una periodicità, inoltre le diverse direzioni dei venti influenzano diversamente le oscillazioni sulle coordinate. Risulta quindi impossibile ragionare nel campo delle frequenze ed estrapolare i segnali GNSS da queste componenti; si è deciso di fare un confronto qualitativo e valutare la correlazione tra spostamenti lungo le coordinate e variazione di temperatura e vento. La ricerca di una correlazione tra coordinata Est e variazione della temperatura è l'unica che ha prodotto un risultato significativo, il calcolo del coefficiente di Pearson e della Cross Correlazione hanno evidenziato un effetto apprezzabile sul movimento in direzione Est-Ovest della Torre (Fig. 5).

5. CONCLUSIONI

Il sistema GNSS ad alta frequenza permette di identificare informazioni utili al monitoraggio strutturale, come la frequenza naturale di oscillazione della struttura, al fine di garantire l'integrità delle strutture stesse e preservare il patrimonio storico-artistico.

Il test effettuato sulla Torre Ghirlandina con sistema GNSS a 20 Hz in acquisizione per una giornata ha evidenziato problematiche che hanno reso impossibile definire a pieno le potenzialità di questo sistema nel monitoraggio della frequenza di oscillazione della struttura. Il test, la materializzazione e l'installazione della stazione rover devono far fronte alle esigenze logistiche e di tutela dell'oggetto in esame, per cui si sono cercate soluzioni il più possibile vicine ai requisiti teorici. Un'ulteriore difficoltà nasce dal fatto che la Torre è soggetta ad oscillazioni molto ridotte, dell'ordine di pochi mm, che non sono rilevabili dai sistemi GNSS per limiti tecnologici di base.

6. BIBLIOGRAFIA

- Alfieri S., Blasi C., Carobbi M., Coisson E., 2009. *Structure, disorders and cracks. In the Ghirlandina tower - conservation project*, Cadignani R (ed). Luca Sossella, Roma, pp. 146-165.
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., 2002. Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(3), 223-230.
- Capra, A., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Rivola, R., Dubbini, M., 2015. *Recent approaches in geodesy and geomatics for structures monitoring*. *Rendiconti Lincei*, 26(1), 53-61.
- Casciati, S., Faravelli, L., 2010. Vulnerability assessment for medieval civic towers. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 193-203.
- Castagnetti, C., Bertacchini, E., Capra, A. 2016. Monitoring leaning towers by geodetic approaches: effects of subsidence

and earthquake to the Ghirlandina Tower. *Structural Control and Health Monitoring*, 23: 580-593.

Castagnetti, C., Bertacchini, E., Capra, A., Dubbini, M., 2012. Terrestrial laser scanning for preserving cultural heritage: analysis of geometric anomalies for ancient structures. In *Proceedings of the FIG Working Week*.

Chang, P. C., Flatau, A., e Liu, S. C., 2003. Review paper: health monitoring of civil infrastructure. *Structural health monitoring*, 2(3), 257-267.

Cochran, W. T., Cooley, J. W., Favon, D. L., Helms, H. D., Kaenel, R. A., Lang, W. W., Welch, P. D., 1967. What is the fast Fourier transform?. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1664-1674.

Di Tommaso A., Focacci F., Romano F., 2009. *Structural static and dynamic analysis of the Ghirlandina Tower*. In *the Ghirlandina tower - conservation project, Cadignani R (ed)*. Luca Sossella, Roma, pp. 164-177.

Dieghi C., 2009. Sources and studies for the history of the Ghirlandina. In *the Ghirlandina tower - conservation project, Cadignani R (ed)*. Luca Sossella, Roma, pp. 48-65.

Lancellotta, R., Sabia, D., 2013. The role of monitoring and identification techniques on the preservation of historic towers. *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, 57.

Lovse, J. W., Teskey, W. F., Lachapelle, G., Cannon, M. E., 1995. Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology. *Journal of surveying engineering*, 121(1), 35-40.

Manuale TEQC,
<http://facility.unavco.org/software/teqc/#toolkit>. (30 Ottobre 2013)

Meng, X., Dodson, A. H., Roberts, G. W., 2007. Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers. *Engineering Structures*, 29(11), 3178-3184.

Moschas, F., Avallone, A., Saltogianni, V., & Stiros, S. C., 2014. Strong motion displacement waveforms using 10-Hz precise point positioning GPS: an assessment based on free oscillation experiments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(12), 1853-1866.

Ogaja, C., Rizos, C., Wang, J., Brownjohn, J., 2001. A dynamic GPS system for on-line structural monitoring. In *Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001)*, Banff, Canada, pp. 5-8.

Omenzetter, P., Brownjohn, J. M. W., 2006. Application of time series analysis for bridge monitoring. *Smart Materials and Structures*, 15(1), 129.

Pehlivan, H., Aydin, Ö., Güllal, E., Bilgili, E., 2015. Determining the behaviour of high-rise structures with geodetic hybrid sensors. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(8), 702-717.

Publicazioni dell'Osservatorio Geofisico, *osservazioni meteorologiche dell'anno 1999*, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia.

Rizos, C., Li, X., Ge, L., Yoshida, A., 2008. How far could GPS go in monitoring structural response to wind events?. *Proceeding of 13th FIG Symposium on Deformation Measurements and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical, International Federation of Surveyors and International Association of Geodesy, Lisbon, Portugal*.

Seco, A., Tirapu, F., Ramírez, F., García, B., Cabrejas, J., 2007. Assessing building displacement with GPS. *Building and environment*, 42(1), 393-399.

Welch, L. R., 1974. Lower bounds on the maximum cross correlation of signals (Corresp.). *IEEE Transactions on Information theory*, 20.3 (1974): 397-399

Xia, Y., Zhang, P., Ni, Y. Q., & Zhu, H. P., 2014. Deformation monitoring of a super-tall structure using real-time strain data. *Engineering Structures*, 67, 29-38.

Yi, J., Zhang, J. W., & Li, Q. S., 2013. Dynamic characteristics and wind-induced responses of a super-tall building during typhoons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121, 116-130.