



**ESECUZIONE DI RILIEVO E MONITORAGGIO
DEI MOVIMENTI VERTICALI DEL SUOLO NEL
CENTRO STORICO DELLA CITTÀ DI MODENA**



Relazione di fine attività – Gennaio 2014

MONITORAGGIO NEL CENTRO STORICO DELLA CITTA' DI MODENA Rilievo altimetrico e controllo dei movimenti verticali

Il presente documento riporta la descrizione delle attività previste e svolte, e l'analisi dei risultati ottenuti, nell'ambito del contratto di prestazione tra il Dipartimento di Ingegneria 'Enzo Ferrari' dell'Università di Modena e Reggio Emilia e il Comune di Modena, Settore dei Lavori Pubblici inerente il monitoraggio dei movimenti verticali del centro storico con particolare attenzione al complesso monumentale di Piazza Grande.

1. ESECUZIONE DI CAMPAGNE PERIODICHE DI RILIEVO ALTIMETRICO: LIVELLAZIONE GEOMETRICA DI ELEVATA PRECISIONE

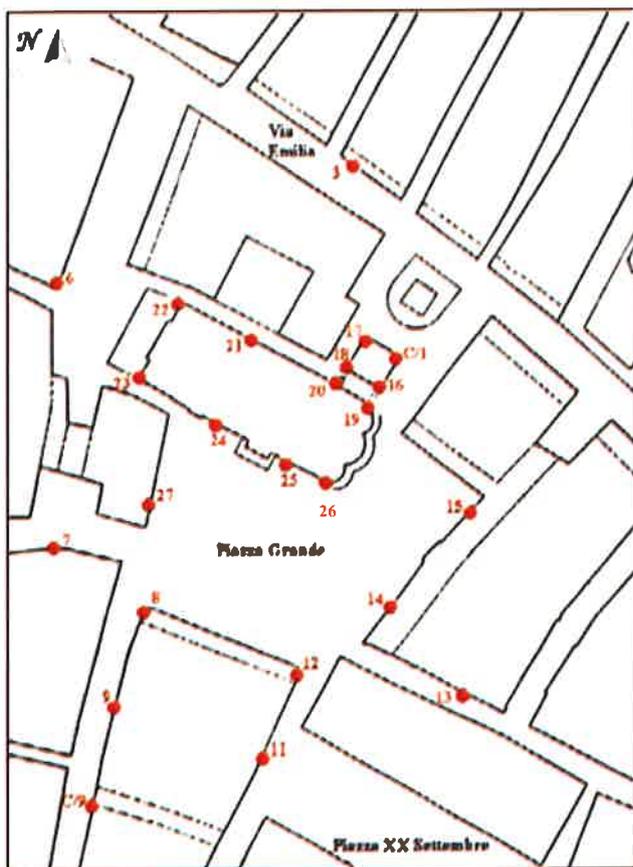


Figura 1. A sinistra: microrete di livellazione installata in Piazza Grande a cura del Comune di Modena, capisaldi esistenti. A destra: campagne di livellazione di elevata precisione nel complesso monumentale di Piazza Grande (particolare di via Lanfranco). Strumentazione utilizzata: livello Leica DNA03, stadia invar

Le misure di livellazione geometrica di elevata precisione della rete di Piazza Grande (Figura 1) sono state eseguite mediante l'utilizzo del livello digitale *Leica DNA03* e di stadia in materiale *invar* per la riduzione delle deformazioni dovute a variazioni termiche. L'utilizzo di questa strumentazione (specifiche tecniche riportate in Tabella 2), unitamente alla metodologia di esecuzione progettata con una adeguata ridondanza di misure e di collegamenti volti a un migliore calcolo di compensazione statistica delle osservazioni, assicurano un risultato di elevata accuratezza. L'adozione di sistemi e metodologie rigorose è resa necessaria dai movimenti attesi, necessariamente di piccola entità, per i quali si ipotizza che sia necessario un certo periodo di osservazioni affinché si identifichino movimenti significativi. Sono stati rilevati i capisaldi installati sui principali monumenti ed edifici di Piazza Grande ed è stato eseguito il collegamento a due



capisaldi esterni alla rete, ma appartenenti alla rete regionale per il controllo della subsidenza, installata da ARPA (Agenzia Regionale per la Prevenzione e l'Ambiente), e collocati agli estremi del centro storico. Questi capisaldi sono stati utilizzati per controllare e valutare l'abbassamento del caposaldo di riferimento della microrete di Piazza Grande e consentire una più corretta interpretazione finale dei risultati. In aggiunta il collegamento rende possibile inquadrare la microrete di Piazza Grande nella rete di ordine superiore regionale, permettendo eventualmente di determinare le quote assolute dei capisaldi della microrete stessa. I capisaldi scelti per il collegamento sono ubicati agli estremi opposti rispetto a Piazza Grande (criterio di bilanciamento della geometria di rete), uno sul Palazzo dei Musei Civici (estremità ovest della via Emilia) e uno sul Teatro Storchì (estremità est della via Emilia). Il progetto di rilievo della rete consiste in una pluralità di anelli tali da garantire il controllo di zone differenti della rete (ad es. anello nella Piazza, anello del Duomo, anello della Torre, ecc.) ed i collegamenti tra questi anelli intrinseci, così da avere l'opportuna ridondanza. In Figura 3 si riporta la mappa con l'indicazione degli anelli progettati e rilevati nella microrete (non si riportano in questa sede gli anelli di collegamento ai caposaldi estremali in quanto svolti con altre finalità e non inclusi nel calcolo di compensazione della rete al fine di non peggiorare l'accuratezza delle soluzioni a causa delle maggiori lunghezze delle linee di livellazione). Si sottolinea, infatti, che la strategia di effettuare un calcolo di compensazione esclusivamente sulla microrete di Piazza Grande serve per non peggiorare la qualità delle soluzioni, che diversamente se inserite in un unico calcolo con i collegamenti ai capisaldi estremali del centro storico situati ciascuno a distanze superiori a 1 km dalla Piazza, sarebbero inficiate dalla redistribuzione dei maggiori errori inevitabilmente abbinati ad anelli caratterizzati da maggiori distanze in gioco. Lo schema della rete è stato progettato preventivamente e mantenuto invariato in tutte le campagne di livellazione eseguite nell'abito di questo contratto. Schema abbastanza analogo è stato adottato per le campagne svolte, sempre dal Laboratorio di Geomatica dell'Università di Modena e Reggio Emilia, dal 2007 ad oggi (qualche piccola variante è stata introdotta durante la presenza del cantiere di restauro della Torre Ghirlandina). Le campagne di rilievo altimetrico in Piazza Grande, riportate in questo paragrafo e previste da contratto, sono state svolte in data 30 Aprile 2012, 13 Novembre 2012, 18 Aprile 2013, 20 Novembre 2013.

LIVELLO DIGITALE DNA03 DI LEICA GEOSYSTEMS – SPECIFICHE TECNICHE

Ambiti di utilizzo	Misure rapide di quota e differenza di quota Livellazione di I e II ordine Misure di elevata precisione
Accuratezza	Deviazione standard nelle misure di quota su 1 km (double run ISO17123-2)
misure elettroniche:	0.3 mm
con stadia invar	1.0 mm
con stadia standard	
misure ottiche	2.0 mm
misure di distanza σ	(elett.) 1 cm/20 m (500ppm)
Range	
misure elettroniche	1.8 m – 110 m
misure ottiche	da 0.6 m
Misure elettroniche	
Risoluzione misure quota	0,01 mm
Compensatore	
Tipo	Compensatore a pendolo con smorzamento magnetico
Slope Range	±10'
Accuratezza 	0.3"

Tabella 2. Caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata, livello digitale Leica DNA03.



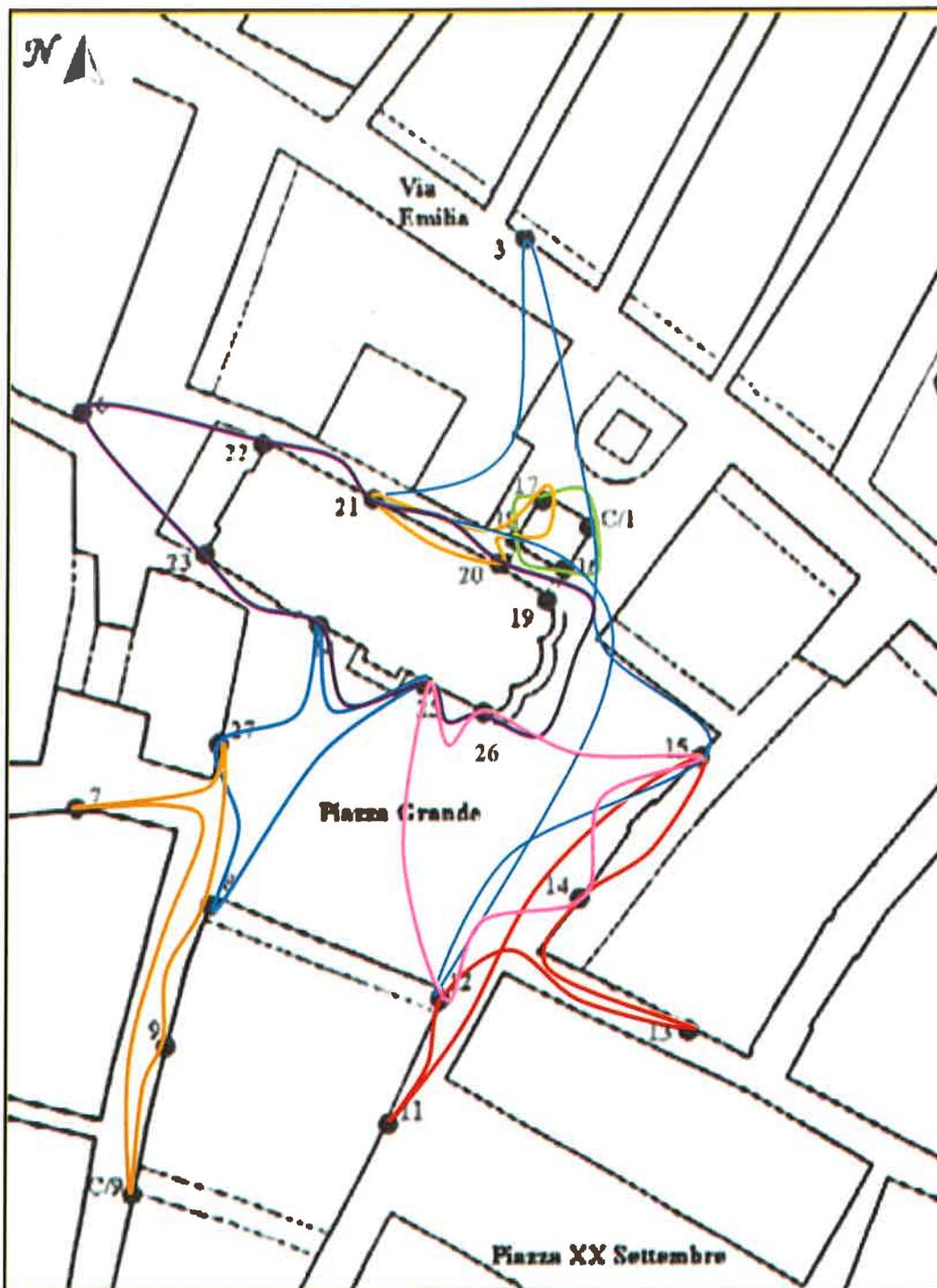


Figura 3. Rilievo altimetrico della microrete di livellazione geometrica di Piazza Grande, Modena: progetto delle misure e indicazione degli anelli rilevati.

Nelle campagne di misura non è stato possibile rilevare il caposaldo 19, installato sulle absidi nord, a causa dell'impossibilità di accedere al punto materializzato per la presenza del ponteggio che lo copre interamente da alcuni anni.

In Figura 1 si riporta anche una foto delle fasi di rilievo, dettaglio in via Lanfranco, da cui si possono identificare gli strumenti utilizzati.

AC



2. ELABORAZIONE DELLE OSSERVAZIONI E COMPENSAZIONE DI RETE

Una volta eseguite le misure in campagna viene effettuato il controllo di qualità delle osservazioni andando a calcolare, per ciascun anello effettuato, l'errore di chiusura e verificando che questo sia inferiore alla tolleranza imposta per una livellazione geometrica di elevata precisione, pari a 1mm/km. Solo gli anelli che rispettano questo criterio vengono utilizzati nel calcolo della rete. In realtà, questo controllo viene effettuato durante l'esecuzione delle misure, a conclusione di ciascun anello direttamente in campagna al fine di ripetere immediatamente le misure, qualora si verificasse la non conforme qualità dei dati. Questo assicura di avere a disposizione tutti gli anelli, con adeguata qualità, previsti da progetto per il calcolo della rete. Vengono successivamente calcolati i singoli dislivelli e preparato il file di input per il calcolo di compensazione. La compensazione della rete viene effettuata con il software *Star*Net v.6.0* ponendo come quota di vincolo la quota del caposaldo 12, installato sul palazzo della banca, a cui convenzionalmente viene attribuito il valore di 10 m (in analogia alla scelta condotta nell'ultima campagna di livellazione eseguita sulla rete nel 1991). La quota di vincolo convenzionale serve per studiare gli effetti locali nell'area e per valutare gli abbassamenti nel tempo; se si volessero le quote assolute, riferite quindi alla superficie di riferimento per l'altimetria in Italia, cioè il geoide definito tramite il mareografo di Genova, si dovrebbe avere a disposizione almeno un punto con quote assolute. Nel verificare la stabilità del caposaldo di riferimento, n°12, rispetto ai due capisaldi della rete regionale è possibile anche estrarre le quote ortometriche di tutti i capisaldi del rete. In alternativa anche il caposaldo C/1 della rete appartiene alla rete regionale e possiede quindi una quota ortometrica rilevata e pubblicata da ARPA (in analogia alle quote assolute dei due caposaldi agli estremi della via Emilia). In questa sede si riportano le quote relative in quanto non si ritiene necessario conoscere le quote assolute, essendo interessati ad effettuare un monitoraggio e quindi a conoscere gli abbassamenti nel tempo ed i gradienti differenziali (tutti valori indipendenti dalla quota convenzionale data al caposaldo di riferimento della rete).

La qualità media del calcolo, riportata come *standard deviation* con livello di confidenza al 95%, è risultata di 0.2 mm nella campagna del 30 Aprile 2012, di 0.1 mm nella campagna del 13 Novembre 2012, di 0.1 mm nella campagna del 18 Aprile 2013 e di 0.1 mm nella campagna del 20 Novembre 2013.

Si riportano in Tabella 4 le quote compensate relative al caposaldo 12, di quota convenzionale pari a 10 m e i relativi errori (fornito come *standard deviation* al 95% di confidenza). In Figura 5, invece, si mostra la mappa degli abbassamenti osservati nel periodo Aprile 2012 - Novembre 2013, pari a 1.5 anni, mentre in Figura 6 un grafico dell'abbassamento cumulato per tutti i caposaldi nel medesimo periodo di osservazione, anni 2012-2013. Si nota molto bene come i capisaldi della Torre Ghirlandina e quello della via Emilia siano interessati da abbassamenti molto maggiori rispetto agli altri capisaldi.

Ar



LIVELLAZIONE GEOMETRICA DI ELEVATA PRECISIONE: MICRORETE DI PIAZZA GRANDE
 QUOTE RELATIVE AL CS 12 (H=10m) E RELATIVA ACCURATEZZA (CONFIDENZA 95%)

CS	apr12		nov12		apr13		nov13	
	H [m]	σ [m]						
3	8.9578	0.0003	8.9577	0.0001	8.9546	0.0002	8.9537	0.0002
6	9.0426	0.0002	9.042	0.0001	9.0418	0.0002	9.0414	0.0002
7	9.4083	0.0003	9.4076	0.0001	9.4077	0.0002	9.4075	0.0002
8	9.9327	0.0003	9.9326	0.0001	9.9324	0.0002	9.9329	0.0001
9	9.9423	0.0003	9.9416	0.0001	9.9421	0.0002	9.942	0.0002
11	9.9568	0.0001	9.9566	0.0001	9.957	0.0001	9.9568	0.0001
12	10.0000	0.0000	10.0000	0.0000	10.0000	0.0000	10.0000	0.0000
13	9.5404	0.0001	9.5395	0.0001	9.5395	0.0002	9.539	0.0001
14	9.8041	0.0002	9.8036	0.0001	9.8036	0.0001	9.8031	0.0001
15	9.8193	0.0002	9.8193	0.0001	9.8188	0.0001	9.8183	0.0001
16	9.3586	0.0002	9.354	0.0001	9.353	0.0001	9.3522	0.0001
17	9.1087	0.0002	9.1062	0.0001	9.1049	0.0001	9.1041	0.0001
18	9.3751	0.0002	9.3698	0.0001	9.3689	0.0001	9.368	0.0001
19	-	-	-	-	-	-	-	-
20	9.3036	0.0002	9.3037	0.0001	9.303	0.0001	9.3022	0.0001
21	9.7475	0.0002	9.7472	0.0001	9.7468	0.0001	9.7463	0.0001
22	9.6775	0.0002	9.6775	0.0001	9.6771	0.0002	9.6767	0.0001
23	9.7546	0.0002	9.7545	0.0001	9.7544	0.0002	9.7541	0.0001
24	9.9378	0.0002	9.9374	0.0001	9.9373	0.0001	9.937	0.0001
25	9.9774	0.0002	9.9771	0.0001	9.9767	0.0001	9.9765	0.0001
26	9.9307	0.0002	9.9305	0.0001	9.9299	0.0001	9.9296	0.0001
27	9.6133	0.0002	9.6127	0.0001	9.6129	0.0002	9.6126	0.0001
C/1	9.3382	0.0002	9.3361	0.0001	9.3349	0.0001	9.3342	0.0001
C/9	9.6709	0.0003	9.6708	0.0001	9.671	0.0002	9.6709	0.0002

Tabella 4. Rete per il controllo dei movimenti verticali di Piazza Grande: quote compensate riferite al caposaldo 12 e relative accuratezze (livello di confidenza al 95%).

A2



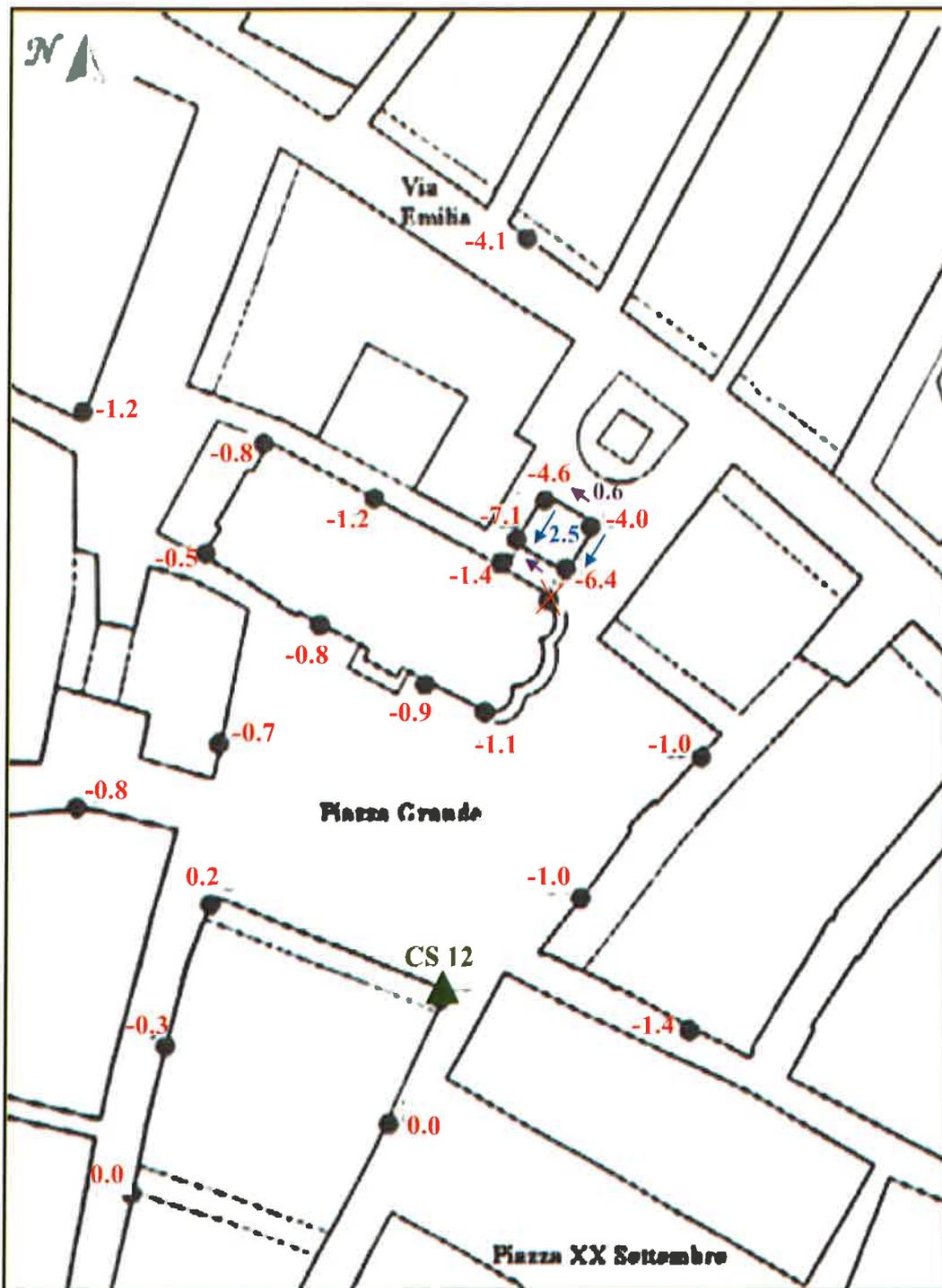


Figura 5. Rete per il controllo dei movimenti verticali di Piazza Grande: rappresentazione grafica degli abbassamenti subiti dai capisaldi e ottenuti dai rilievi periodici di livellazione geometrica di alta precisione. I valori, riportati in millimetri, sono relativi a 1.5 anni (periodo Aprile 2012- Novembre 2013).

Ar



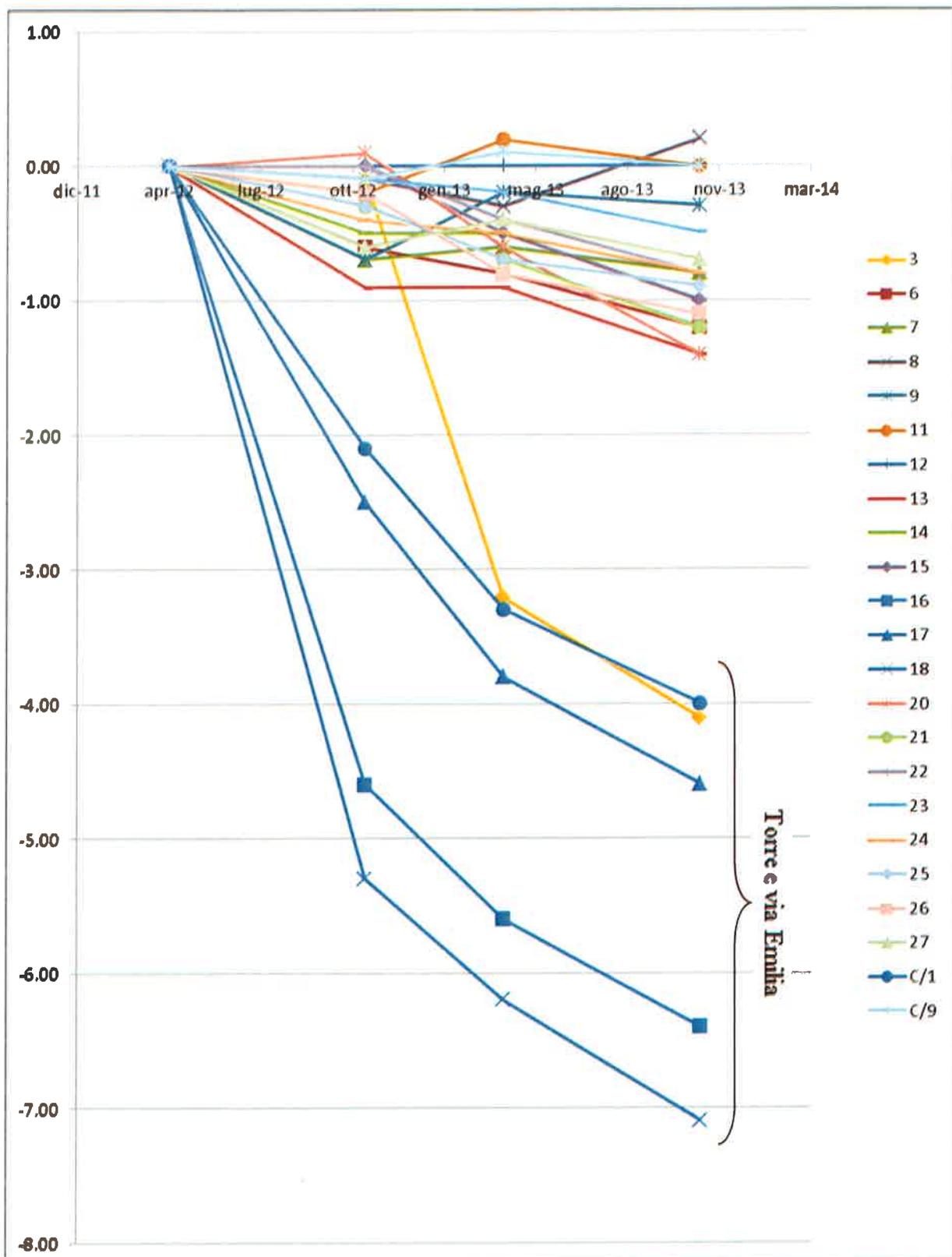


Figura 6. Rete di livellazione di Piazza Grande: abbassamento cumulato nel periodo Aprile 2012-Novembre 2013 per tutti i capisaldi della rete.

Ar



3. SUBSIDENZA NEL CENTRO STORICO: CONTROLLO DEGLI ABBASSAMENTI DEL CAPOSALDO DI RIFERIMENTO

L'identificazione degli abbassamenti è delle componenti differenziali di movimento, seppur riferite a un caposaldo interno alla rete a cui viene data una quota convenzionale, sono valide e del tutto significative in quanto costituiscono analisi relative effettuate *ad hoc* per identificare movimenti relativi. Tutte le considerazioni svolte, quindi, sulle Torre Ghirlandina a partire dalle livellazioni elaborate rispetto al caposaldo 12, analogamente a quelle svolte sul Duomo, sono affidabili e veritiere. Un modo corretto e rigoroso di procedere impone però di controllare la stabilità, o meglio l'abbassamento, del caposaldo di riferimento al fine di quantificare l'effetto di subsidenza che subisce perché essendo la subsidenza un fenomeno associato e presente nel territorio della Pianura Padana è certo che il centro storico nel suo complesso, se esaminato da un punto di vista esterno e geologicamente stabile come gli Appennini, sia in movimento. Un lento abbassamento costante di tutto il centro storico esiste ed è quantificato grazie alla rete regionale per il controllo della subsidenza installata da ARPA. ARPA dal 2005 non ha rilevato più questa rete ma ha rilasciato recentemente stime inerenti il fenomeno in Regione ottenute con tecniche miste (livellazione, PS-InSAR e GPS). La mappa della Regione si trova sul sito di ARPA e viene riportata in Figura 7.

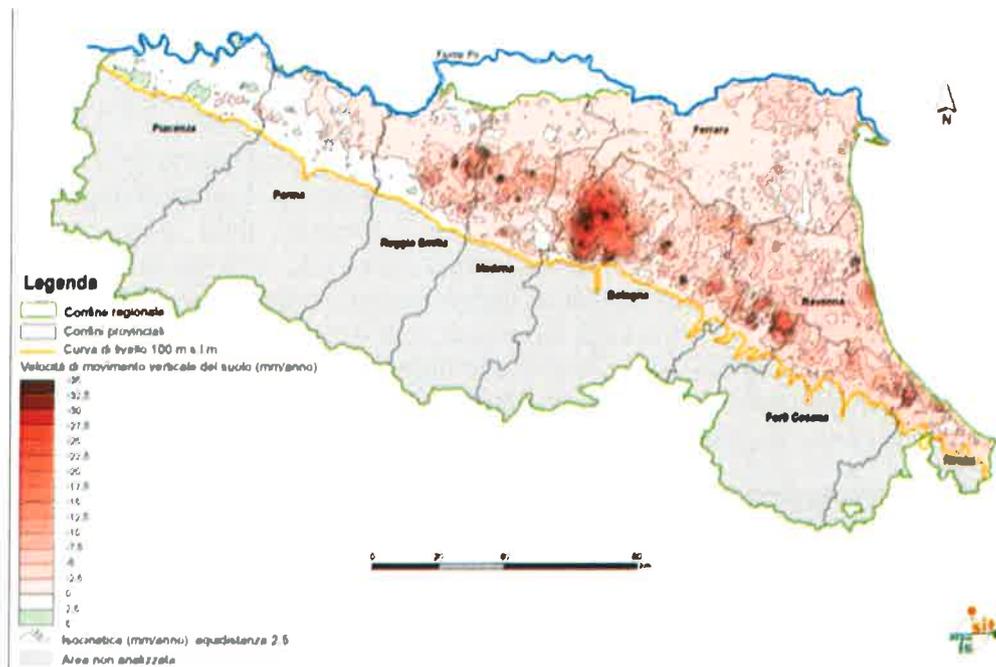


Figura 7. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011, ottenuta da analisi interferometrica radar effettuata da T.R.E. - Tele-rilevamento Europa con tecnica SqueeSARTM, algoritmo PSInSARTM di seconda generazione (Fonte: ARPA Emilia Romagna - http://www.arpa.emr.it/dettaglio_generale.asp?id=2969&idlivello=1423)

Avendo notato in passato movimenti in apparente innalzamento su alcuni capisaldi si è reso importante, nonostante non previsto da contratto, procedere con un controllo dei movimenti del caposaldo di riferimento. Questa scelta è motivata dalla necessità di conoscere il comportamento del punto di riferimento della rete per poter interpretare correttamente la rete nel suo complesso (si sottolinea di nuovo che le analisi relative ai singoli edifici, basandosi sui gradienti interni ai capisaldi della struttura stessa, non vengono inficiate da un eventuale movimento del caposaldo di riferimento).

AZ

A tal scopo dal Novembre 2011 sono stati effettuati, in corrispondenza di ogni campagna, due collegamenti tramite livellazione geometrica di elevata precisione (stessa strumentazione adottata nel rilievo altimetrico della rete di Piazza Grande, Tabella 2) tra la rete di Piazza Grande e due capisaldi installati in posizione estrema sulla via Emilia e appartenenti alla rete regionale per il controllo della subsidenza. Si riporta posizione e nomenclatura in Figura 8 sinistra. La compensazione di rete comprendente questi collegamenti ha permesso di verificare l'andamento del caposaldo 12 come se fosse un caposaldo in movimento; rimuovendo il vincolo delle sue coordinate è stato possibile verificare il movimento a cui è soggetto (con un'accuratezza di 0.5 mm al 95% di confidenza, leggermente inferiore a causa delle distanza in gioco superiori a 1 km). In Figura 8 destra si riporta il movimento insieme a quello di alcuni capisaldi della rete; questa conoscenza ora permette una corretta interpretazione di situazioni anomale: dall'esame della serie temporale degli abbassamenti si era notato, a partire dalla campagna di novembre 2011 e durante tutto il 2012, un comportamento anomalo di apparente innalzamento di tutti i capisaldi (lievemente visibile anche in quelli situati sulla Torre) in particolare quello situato sulla via Emilia, il numero 3. Questo dato non deve essere erroneamente interpretato come un effettivo innalzamento dell'area in quanto costituisce un effetto sistematico, riscontrato appunto su tutta la rete, dovuto al comportamento del caposaldo adottato come riferimento, il 12. In tutte le elaborazioni della microrete si considera questo punto come stabile quando in effetti non lo è; dal novembre 2011 il Laboratorio di Geomatica - Dipartimento di Ingegneria 'Enzo Ferrari' dell'Università di Modena e Reggio Emilia conduce ulteriori campagne di livellazione al fine di collegare questo caposaldo a un punto situato all'estremo del centro storico e facente sempre parte della rete regionale per il controllo della subsidenza. Questo collegamento permette di lasciare libero il punto 12 nel calcolo di compensazione vincolando tutta la rete alla quota assoluta del caposaldo situato sul Teatro Storchi e rilevata l'ultima volta nel 2005 (si veda mappa in Figura 8 sinistra). L'altro collegamento con il caposaldo installato sul Palazzo dei Musei, serve per il controllo delle quote da monografia (essendo ormai molto datate, sono anch'esse soggette a variazione a causa della subsidenza del centro storico dal 2005 ad oggi). Dall'analisi di questi risultati, ottenuti con un'accuratezza nella determinazione dei dislivelli di 0.5 mm circa (livello di confidenza 95%), si nota immediatamente come il caposaldo 3 continui ad abbassarsi per effetto della subsidenza, come ci si aspetta. Questo abbassamento però è inferiore a quello subito dal caposaldo 12 e, trattandosi di osservazioni relative, ciò si traduce in un apparente ma ingannevole innalzamento (Figura 8 destra).

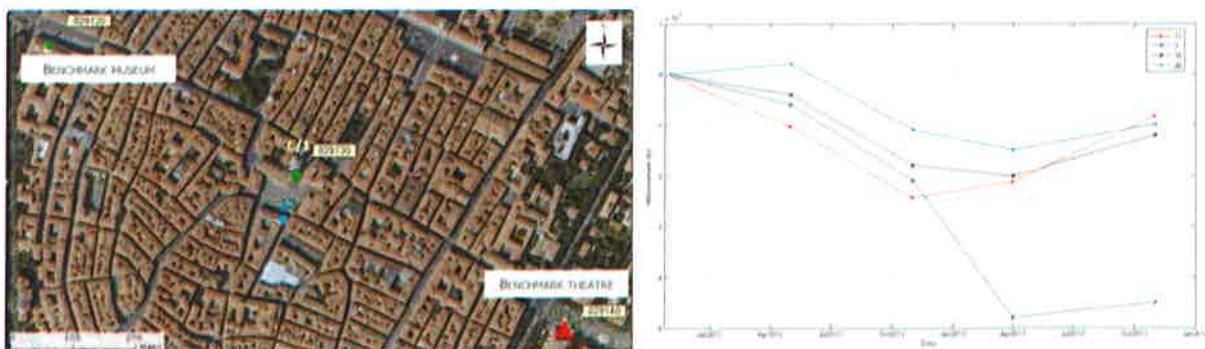


Figura 8. A sinistra mappa di ubicazione del caposaldo esterno 029140, situato presso il Teatro Storchi, rispetto al punto 12 (fonte mappa, Google Maps). A destra andamento delle quote relative al novembre 2011 calcolate rispetto al caposaldo 029140, esterno alla microrete di Piazza Grande.

Az



4. RECUPERO DEI DATI STORICI DI LIVELLAZIONE GEOMETRICA IN PIAZZA GRANDE: CONFRONTO E DEFINIZIONE DEI MOVIMENTI VERTICALI

Al fine di inquadrare le misure di livellazione previste in Piazza Grande per il 2012 e 2013 e per interpretare al meglio i risultati, essendo la rete installata da circa 30 anni, sono stati recuperati i dati delle livellazioni geometriche pregresse. In questo modo il monitoraggio dei movimenti altimetrici condotto in questi ultimi due anni viene inserito in un contesto più ampio che permette di analizzare, nel modo più completo ed accurato possibile, le dinamiche delle strutture di interesse e in particolare della Torre Ghirlandina. Si presta particolare attenzione anche al collegamento Duomo - Torre e per questi motivi si riportano anche i risultati degli abbassamenti rilevati in corrispondenza dei capisaldi installati sul Duomo.

La rete di livellazione geometrica di Piazza Grande, nata nel 1984 a cura del Comune di Modena, aveva il fine di controllare specificatamente gli effetti della subsidenza sugli edifici del complesso monumentale. Questa rete si inseriva in un progetto più ampio, finalizzato a controllare il fenomeno nell'intero centro storico, in conseguenza al manifestarsi di preoccupanti fessurazioni e danni verificatisi in una serie di edifici dell'area. Il monitoraggio si era reso necessario anche in seguito all'analisi dell'andamento piezometrico del centro storico, fortemente influenzato dal prelievo di acqua dagli acquiferi per attività industriali, prevalentemente concentrate nell'area nord della città. Si voleva, in questo modo, controllare l'evoluzione del fenomeno di subsidenza, e quindi gli effetti subiti dagli edifici del centro, in relazione a queste attività industriali. L'attività si è interrotta nel 1991 per poi riprendere nel 2007 con maggiore attenzione al sito di Piazza Grande, nel frattempo dichiarato patrimonio dell'umanità dall'UNESCO unitamente ai suoi gioielli di maggior pregio, la Torre Civica e il Duomo.

I risultati delle campagne di livellazione condotte dal 1984 al 1991, sono stati ottenuti con strategie di calcolo diverse da quelle utilizzate più recentemente quindi è stata preventivamente condotta un'operazione di omogeneizzazione dei dati al fine di renderli confrontabili e riferirli tutti al caposaldo numero 12, oggi scelto (in analogia all'ultima misure effettuata nel 1991) come riferimento per la rete e per il controllo degli abbassamenti e delle eventuali componenti differenziali. Pur non potendo assicurare la stessa accuratezza delle misure condotte dal 2007 ad oggi, i risultati relativi al caposaldo 12 si considerano significativi ad evidenziare il fenomeno di lungo periodo e la risposta delle due strutture di interesse al fenomeno di subsidenza, alle variazioni di falda e ad ogni altro fattore esterno rilevante. Le quote relative al caposaldo n° 12, a cui è stata data convenzionalmente quota pari a 10 m, sono riportate in Tabella 9 in cui si specificano i dati storici recuperati e omogeneizzati e le più recenti soluzioni ottenute dai rilievi condotti dal Laboratorio di Geomatica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Modena e Reggio Emilia dal 2007 al 2011.

Le Figura 10 visualizza graficamente gli abbassamenti osservati dal 1984 ad oggi, nonché quelli più recenti rilevati dal 2007 ad oggi, con una mappa colorata a scala di diverse intensità rapportate all'entità dell'abbassamento. Per una migliore interpretazione, si sovrappongono alla visualizzazione anche le curve di abbassamento e si evidenziano i capisaldi di Torre e Duomo.

Si riporta in Figura 11 un grafico che mostra l'andamento degli abbassamenti subito negli ultimi 30 anni circa, dal 1984 alla fine del 2013 dai capisaldi installati sulla Torre Ghirlandina e sul Duomo. Risulta molto chiaro come i capisaldi della Torre abbiano subito un abbassamento molto più intenso degli altri punti della rete ed è altrettanto chiaro come i capisaldi del Duomo più prossimi alla Torre (quelli ubicati in posizione nord-est, zona absidale lato via Lanfranco) siano quelli maggiormente interessati dal fenomeno di abbassamento, a testimonianza dell'interazione storica tra le due strutture. Si evidenziano inoltre componenti differenziali di abbassamento significative se rapportate all'accuratezza dei risultati ottenuti: questi gradienti di abbassamento interessano sia la Torre sia il Duomo. L'esame dei gradienti è riportato in Figura 12 nella quale si pone l'attenzione sia sulle componenti differenziali complessive sia su quelle più recenti.

MICRORRETE DI PIAZZA GRANDE (MO) - LIVELLAZIONE GEOMETRICA DI ELEVATA PRECISIONE: QUOTE COMPENSATE RELATIVE AL CS 12 (H=10m)

CS	Est[ml]	Nord[ml]	dic84	dic85	set86	feb88	mag89	ago89	dic91	dic07	apr08	nov08	set10	dic10	apr11	nov11
1	1652822.90	4942971.02	9.0215	9.0194	9.0196	9.0184	9.0185	9.0182	9.0149	-	-	-	-	-	-	-
2	1652794.71	4943011.68	9.1928	9.1902	9.1899	9.1886	9.1899	9.1905	9.1864	-	-	-	-	-	-	-
3	1652755.06	4943036.50	8.9831	8.9804	8.9797	8.9774	8.9772	8.9754	8.9704	8.9589	8.9578	8.9576	8.9555	8.9548	8.9549	8.9574
4	1652707.39	4943070.46	9.3371	9.3353	9.3352	9.3328	9.3324	9.3303	9.3263	-	-	-	-	-	-	-
5	1652701.19	4943034.77	9.1921	9.1900	9.1899	9.1868	9.1856	9.1833	9.1792	-	-	-	-	-	-	-
6	1652669.01	4943007.26	9.0755	9.0735	9.0737	9.0702	9.0679	9.0655	9.0622	9.0462	9.0456	9.0450	9.0437	9.0430	9.0435	9.0426
7	1652669.73	4942934.55	9.4353	9.4341	9.4346	9.4319	9.4299	9.4270	9.4245	9.4120	9.4101	9.4096	9.4096	9.4086	9.4091	9.4082
8	1652694.49	4942917.78	9.9413	9.9407	9.9412	9.9402	9.9393	9.9385	9.9369	9.9335	9.9330	9.9329	9.9331	9.9332	9.9329	9.9329
9	1652685.75	4942886.89	9.9479	9.9479	9.9488	-	9.9464	9.9465	9.9442	-	9.9418	9.9422	9.9430	9.9419	9.9426	9.9418
10	1652723.39	4942848.10	9.7126	9.7107	9.7104	9.7078	9.7068	9.7057	9.7037	-	-	-	-	-	-	-
11	1652725.36	4942869.83	9.9579	9.9577	9.9587	9.9574	9.9581	9.9592	9.9579	9.9563	9.9567	-	9.9573	9.9563	9.9568	9.9564
12	1652737.64	4942899.96	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
13	1652784.22	4942896.50	9.5546	9.5542	9.5537	9.5525	9.5520	9.5512	9.5486	-	9.5420	-	9.5408	9.5398	9.5403	9.5397
14	1652762.53	4942916.37	9.8168	9.8162	9.8164	9.8145	9.8149	9.8146	9.8108	9.8053	9.8052	9.8050	9.8048	9.8034	9.8040	9.8034
15	1652786.67	4942946.21	9.8365	9.8356	9.8353	9.8334	9.8335	9.8330	9.8291	9.8215	9.8213	9.8212	9.8200	9.8186	9.8191	9.8186
16	1652760.35	4942979.57	9.3986	9.3986	9.3967	-	9.3930	9.3927	9.3917	9.3868	9.3662	9.3644	9.3638	9.3601	9.3587	9.3583
17	1652753.44	4942993.72	9.1508	9.1472	9.1461	9.1437	9.1435	9.1426	9.1376	9.1178	9.1153	9.1143	9.1104	9.1090	9.1088	9.1086
18	1652748.71	4942985.82	9.4186	9.4149	9.4137	-	9.4115	9.4102	9.4048	9.3839	9.3814	9.3812	9.3774	9.3757	9.3758	9.3754
19	1652756.60	4942974.11	9.1076	9.1069	9.1060	9.1051	9.1050	9.1054	9.1019	9.0890	9.0882	9.0878	9.0855	-	9.0843	-
20	1652745.75	4942981.42	9.3230	-	-	-	9.3196	9.3202	9.3162	9.3067	9.3062	-	9.3041	9.3025	9.3028	9.3024
21	1652724.24	4942992.83	9.7601	9.7586	9.7592	-	9.7576	9.7578	9.7543	9.7491	9.7490	9.7488	9.7481	9.7468	9.7472	9.7466
22	1652703.41	4943003.12	9.6939	9.6921	9.6926	9.6913	9.6902	9.6897	9.6871	9.6792	9.6789	9.6788	9.6782	9.6774	9.6777	9.6772
23	1652692.10	4942981.52	9.7690	9.7677	9.7680	9.7666	9.7656	9.7646	9.7624	9.7561	9.7554	9.7555	9.7550	9.7545	9.7550	9.7545
24	1652711.58	4942970.11	9.9497	9.9487	9.9494	9.9481	9.9478	-	9.9445	9.9394	9.9391	9.9391	9.9383	-	9.9379	9.9372
25	1652731.74	4942959.58	9.9880	9.9872	9.9877	9.9862	9.9866	9.9864	9.9832	9.9792	9.9790	9.9790	9.9782	9.9769	9.9773	9.9768
26	1652744.13	4942952.62	-	-	9.9430	9.9431	9.9419	9.9418	9.9417	9.9387	9.9333	9.9329	9.9318	9.9304	9.9308	9.9303
27	1652696.93	4942948.32	9.6285	9.6274	-	9.6266	9.6251	9.6237	9.6209	9.6143	9.6140	9.6138	9.6138	9.6129	9.6134	9.6128
C/1	1652764.89	4942988.00	9.3774	9.3740	9.3734	9.3715	9.3711	9.3707	9.3657	9.3464	9.3441	9.3432	9.3391	9.3379	9.3378	9.3378
C/9	1652680.36	4942861.00	-	9.6826	-	-	9.6786	9.6787	9.6760	-	9.6718	9.6722	9.6717	-	9.6712	9.6707

Tabella 9. Quote relative compensate, espresse in metri, dei capisaldi appartenenti alla microrrete del complesso monumentale di Piazza Grande (Modena).



Piano di monitoraggio del centro storico di Modena: report finale sul rilievo allometrico - Gennaio 2014
Laboratorio di Geomatica - DIEF, Università di Modena e Reggio Emilia

22

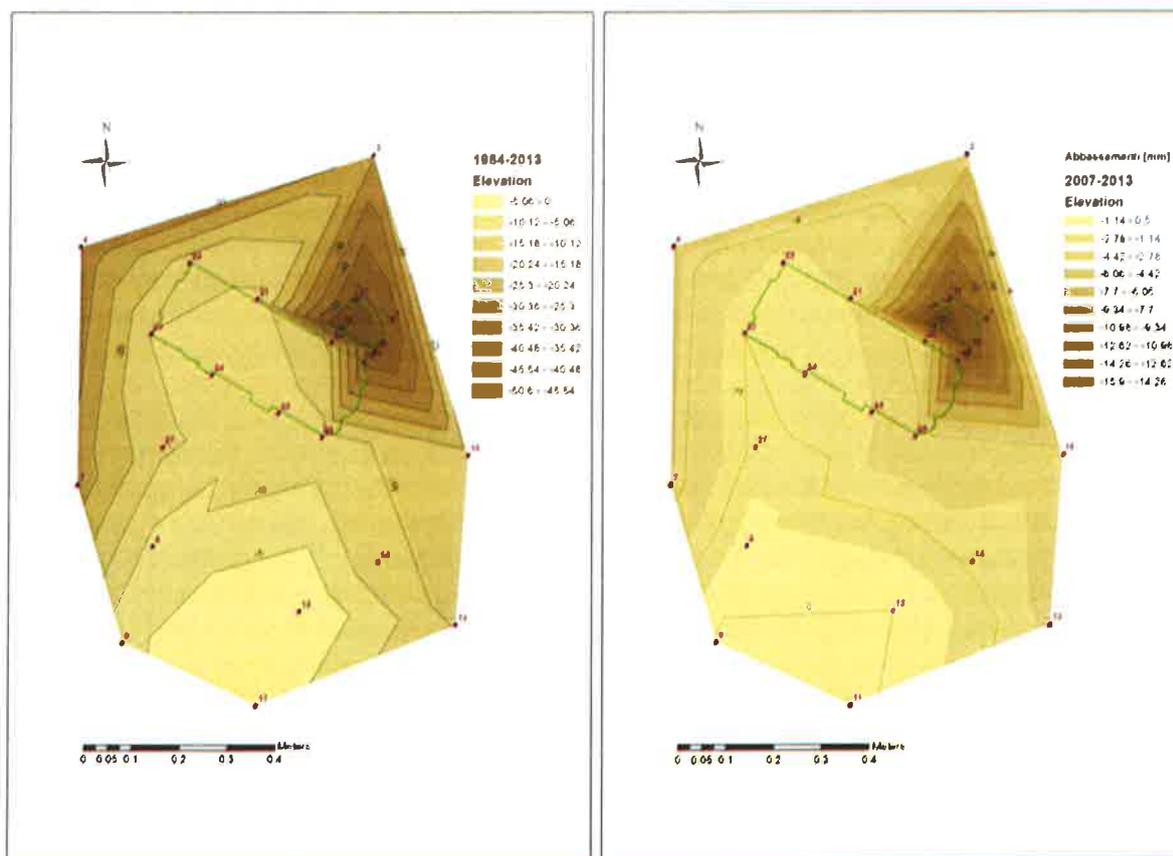


Figura 10. Monitoraggio dei cedimenti nel sito Unesco: mappa degli abbassamenti osservati con curve di abbassamento. A sinistra il lungo periodo e a destra le livellazioni più recenti. Tutti i valori sono in [mm].

Dall'esame del dato complessivo sui 30 anni inerente la Torre Ghirlandina, si osserva un continuo abbassamento, dovuto a molteplici fenomeni tra cui certamente la subsidenza, con effetti localizzati maggiori rispetto a tutti gli altri capisaldi della rete dovuti alle specifiche caratteristiche geotecniche del terreno (microsubsidenza ed effetti locali). I cedimenti verticali mostrano velocità variabili, alternando periodi di lievi abbassamenti a momenti caratterizzati da cedimenti più intensi e correlabili probabilmente a fattori esterni che hanno decretato l'accelerazione momentanea della tendenza. In tal senso si può evidenziare quanto riscontrato dalle ultime osservazioni. Nel 2012, tra fine Aprile e Novembre, quindi in soli 6 mesi, la Torre mostra abbassamenti anche di circa 5 mm (Figura 13 destra), valore significativamente maggiore rispetto al trend naturale di subsidenza atteso per quell'area (2-3 mm/anno da stime ARPA). Questo abbassamento è correlato al rilascio del terreno, avvenuto con un certo periodo di latenza, a seguito del sisma che ha colpito la Provincia di Modena a fine maggio dello stesso anno. Durante l'anno 2013, infatti, la Torre ha continuato il suo lento abbassamento secondo le velocità attese e in maniera concorde alla tendenza naturale riscontrata nel passato.

AK

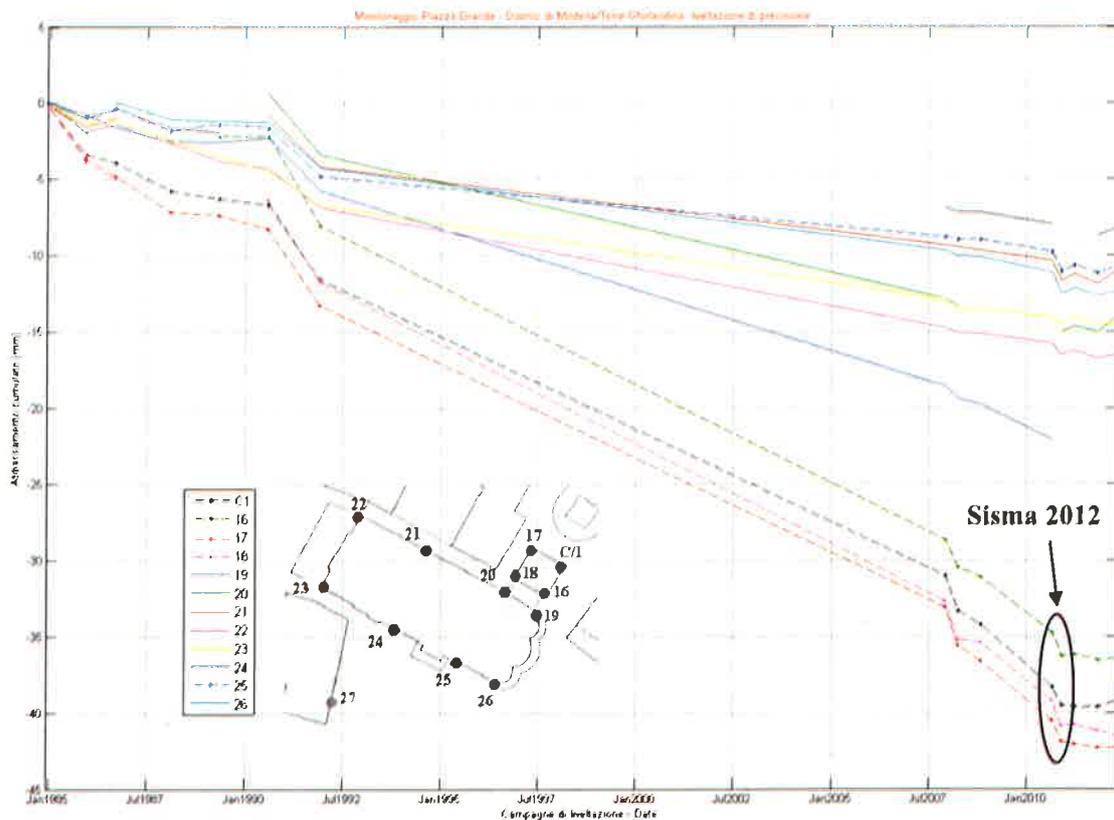


Figura 11. Monitoraggio dei cedimenti nel sito Unesco: abbassamenti subiti in un periodo di 30 anni, dal 1984 alla fine del 2013, dai capisaldi installati sul Duomo di Modena e sulla Torre Ghirlandina.

Aspetto ancora più importante e non trascurabile è l'esame delle componenti differenziali, in quanto potenzialmente capaci di innescare instabilità nella struttura: la Torre, in tal senso, continua la sua lenta rotazione verso sud e verso ovest, testimoniata dai gradienti riportati anche in Figura 12. Questa tendenza a ruotare in direzione sud-ovest è manifestata sia sul lungo periodo sia su tempi più recenti tramite l'identificazione di gradienti del tutto significativi. Dall'esame degli abbassamenti riscontrati nel 2012 e 2013 (Figura 5 e Figura 13 destra), si nota che questa componente differenziale è prevalente e particolarmente intensa in direzione sud, in quanto in questa direzione si osservano i gradienti maggiori (circa 2.6 mm in soli 6 mesi a fronte di gradienti di un ordine di grandezza inferiore riscontrati in passato in periodi di analoga durata) mentre in direzione ovest, si riscontrano valori più deboli (0.6 mm), seppur significativi. Al fine di sottolineare come le condizioni esterne, siano esse di natura antropica o naturale (come il sisma e la subsidenza), influenzino il comportamento della Torre e i suoi movimenti, si riporta l'analisi eseguita sulle componenti differenziali osservate dal 2007. Come mostrato in Figura 13 sinistra, tra il 2008 e il 2011 si evidenzia una controtendenza della struttura che apparentemente inverte il suo naturale movimento di rotazione verso sud-ovest per ruotare verso nord-ovest. Pur mantenendo il costante trend verso ovest la struttura smette di ruotare verso il Duomo e inverte la direzione; questo comportamento molto particolare è stato oggetto di controlli e analisi approfondite. Solo la prosecuzione delle attività di monitoraggio ha permesso di fare considerazioni affidabili: le campagne successive hanno messo in luce come dal 2011 in avanti la Torre abbia ripreso il suo naturale comportamento e abbia quindi ripreso la rotazione verso sud (testimoniata anche dall'esame complessivo sul periodo 2007-2013 che mostra un accordo, in termini di rotazione, con il movimento del tempo passato).

Ar

Spiegazione a questo fenomeno viene trovata nei lavori di restauro che hanno interessato la Torre proprio tra il 2008 e il 2011, anno in cui l'imponente ponteggio, e il telo di protezione che ricopriva la struttura, sono stati smontati rendendo di nuovo la Torre libera di oscillare in assenza di vincoli e irrigidimenti esterni.

Queste considerazioni certamente sottolineano come sia importante continuare a monitorare la struttura e ad analizzare nella maniera più rigorosa possibile i risultati al fine di comprendere e controllare i movimenti di un monumento così importante e le interazioni con il contesto.

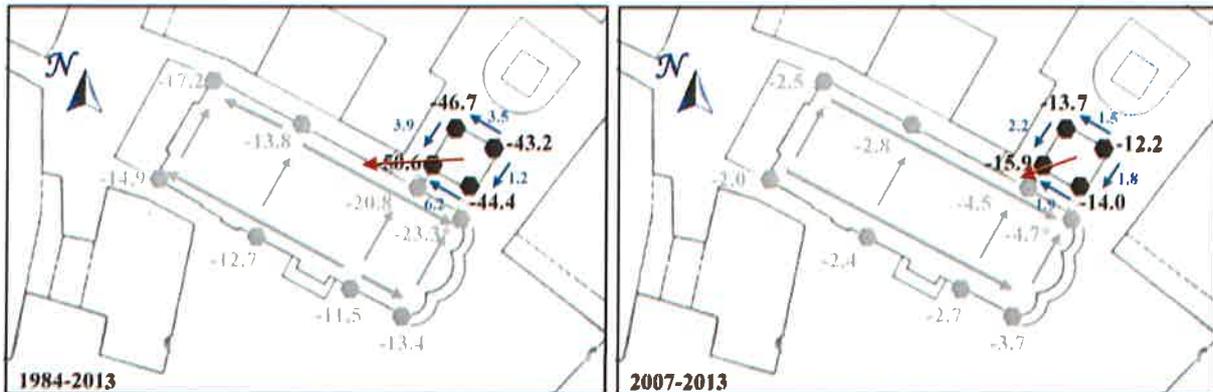


Figura 12. Monitoraggio dei cedimenti nel sito Unesco: abbassamenti differenziali e gradienti di rotazione con indicazione delle tendenze osservate. A sinistra il lungo periodo e a destra i risultati delle livellazioni più recenti.

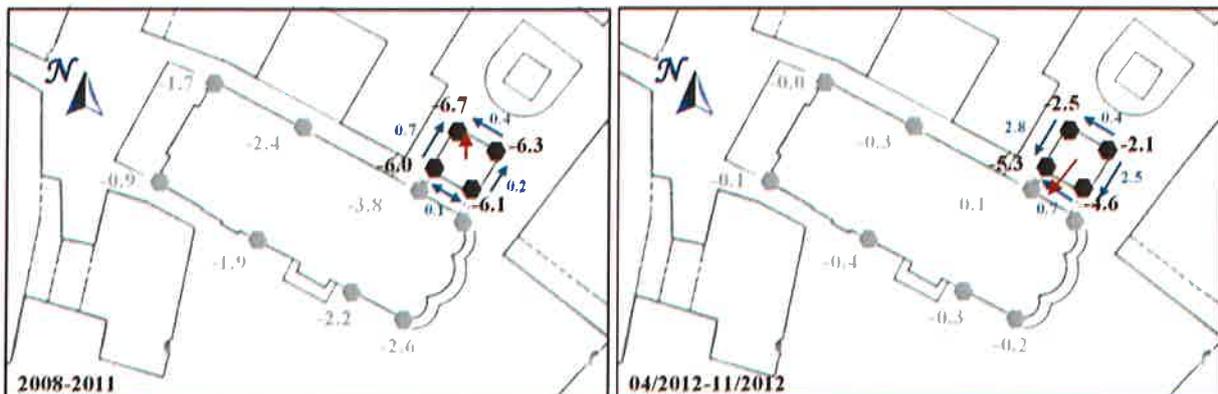


Figura 13. Monitoraggio dei cedimenti nel sito Unesco: analisi di dettaglio degli abbassamenti differenziali in periodi particolari: a sinistra il periodo 2008-2011 caratterizzato dalla presenza del ponteggio attorno alla Torre; a destra il confronto dei risultati delle campagne di livellazione precedente e successiva al sisma di Maggio 2012.

Ar

5. ANALISI ED INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI: POSSIBILI EFFETTI SULLE STRUTTURE CON ATTENZIONE ALLA TORRE GHIRLANDINA

Dall'esame dei risultati ottenuti nell'arco degli ultimi due anni di monitoraggio dei movimenti verticali in Piazza Grande, con particolare attenzione agli effetti sulla Torre Ghirlandina, si può certamente fare una considerazione positiva sull'utilità del rilievo della rete, che costituisce una preziosa ed importante infrastruttura per controllare gli abbassamenti e le eventuali componenti differenziali subite dalle strutture. Questa rete, infatti, permette una conoscenza ed un controllo completi ed efficaci per comprendere le dinamiche di monumenti così importanti e complessi dal punto di vista costruttivo come la Torre Ghirlandina e il Duomo di Modena. Certamente il valore inestimabile ed il pregio artistico, nonché il valore 'affettivo' per i cittadini, giustificano in pieno gli sforzi e le attenzioni dedicate a questi gioielli.

In relazione alla Ghirlandina, l'analisi dei dati osservati nel 2012 e 2013 ha permesso di mettere in luce un abbassamento significativo medio di circa 6 mm, valore lievemente superiore a quanto atteso dalla subsidenza naturale quantificato in circa 2-3 mm/anno da ARPA. Per quanto riguarda le componenti differenziali, si segnalano gradienti significativi prevalenti in direzione sud (circa 2.5 mm) e deboli in direzione ovest (0.6 mm). Si conferma quindi la tendenza, ormai osservata già dal 1984, della struttura a ruotare in direzione sud-ovest (concorde alla pendenza della torre stessa). Questi valori così intensi incentivano la prosecuzione delle attività di monitoraggio al fine di continuare a controllare la risposta della struttura ad effetti esterni. Queste informazioni risultano molto utili in sede di comitato tecnico, nell'ottica di un approccio multidisciplinare, per gli strutturisti che si occupano di valutare la vulnerabilità della struttura nell'ottica di prevedere situazioni di rischio e progettare interventi adeguati qualora si verificassero condizioni di instabilità per la struttura. Ad esempio, la livellazione è stato l'unico strumento che ha permesso di concludere che con il passare del tempo sono avvenute modifiche permanenti nella configurazione geometrica della Torre a seguito del sisma, come visualizzato in Figura 13 destra in cui si vede un abbassamento notevole in corrispondenza dei capisaldi. Il terremoto ha influenzato tutta l'area nord della rete, essendo anche il caposaldo n°3 interessato da un elevato abbassamento, di paragonabile entità a quelli osservati alla base della Torre mentre tutto il resto della rete si è attestata sui valori concordi con un periodo così breve di osservazione. Si rimarca il sollecito a proseguire il monitoraggio al fine di continuare a controllare il cedimento verticale ma soprattutto le eventuali componenti differenziali, valori che potenzialmente possono destare più preoccupazione in quanto, se eccessivi, possono innescare meccanismi di instabilità nella struttura. Altro fattore importante è cercare di valutare la velocità del trend di cedimento; questo aspetto rende ancora più importante approfondire il fenomeno e continuare il monitoraggio al fine di controllarne l'evoluzione.

Al fine di una migliore e più completa comprensione del fenomeno, sarebbe interessante e auspicabile effettuare un'analisi congiunta di questi risultati ottenuti dalla livellazione geometrica con quelli forniti da un piezometro. Sarebbe importante, infatti, conoscere l'andamento della falda e poter abbinare questo dato per interpretare le variazioni stagionali. L'esecuzione della livellazione con periodicità stagionale/semestrale, infatti, fornisce un'informazione discreta ed affetta dalle variazioni della falda. Questo contributo sarebbe valutabile e correlabile grazie ai dati di un piezometro. Risulterebbe altrettanto fondamentale ai fini di una corretta interpretazione dei risultati proseguire con il collegamento ai capisaldi estremali del centro storico, nella speranza oltretutto che la Regione provveda al collegamento di questi con i capisaldi installati sull'Appennino e ritenuti geologicamente stabili.

Documento redatto da: **ing. Cristina Castagnetti**
Documento approvato da: **prof. ing. Alessandro Capra**
Responsabile del progetto: **prof. ing. Alessandro Capra**

