



UNIVERSITA' DI PISA

FACOLTA' DI
INGEGNERIA

TESI DI LAUREA

Corso di: INGEGNERIA CIVILE
(VECCHIO ORDINAMENTO)

IL BATTISTERO DEL DUOMO DI PISA: MOVIMENTI ED INDAGINI

Relatore: Ing. NUNZIANTE SQUEGLIA
Candidato: GIOVANNI GALFANO

Anno accademico 2014/2015

Indice

Premessa	IV
Introduzione	V
Capitolo I: INTRODUZIONE STORICA	
Fasi costruttive, storia dell'evoluzione del fabbricato	2
Introduzione	2
Inserimento storico	3
Progressione storica dei lavori al fabbricato.	6
Il restauro del Battistero.	12
Descrizione attuale del Battistero di Pisa	20
Capitolo II: ANALISI DEI MOVIMENTI ALTIMETRICI	
Definizioni	30
Vecchia rete di livellazione	30
Nuova rete di livellazione	33
Analisi dei movimenti altimetrici del Battistero e della Piazza del Duomo	40
Descrizione dei dati	41
Scelta del punto di riferimento per la Piazza del Duomo	46
Il movimento del Battistero	55
Movimenti della Piazza	58
Capitolo III: INDAGINI SUL TERRITORIO	
Le indagini	66
Indagini geoelettriche	68
Dal metodo geoelettrico all'interpretazione	68
Analisi dei risultati delle indagini geoelettriche	70
Prove penetrometriche con piezocono (CPTU)	80
Introduzione	80
Strumentazione adottata	83
Riferimenti per l'interpretazione dei dati	85
Stratigrafia mediante correlazioni empiriche	89
CPTU 1	90
CPTU 2	90
CPTU 3	91

CPTU 4	91
CPTU 5	92
CPTU 6	92
CPTU 7	93
CPTU 8	93
Stratigrafia mediante interpretazione dei diagrammi qc e u	94
Osservazioni	98
Misura della velocità delle onde di taglio	99
Dilatometro sismico (SDMT)	99
Prova Cross-Hole	102
Costruzione ed interpretazione dei diagrammi di G0	105
Capitolo IV: FESSURAZIONI E DEFORMAZIONI	
Quadro fessurativo	110
Introduzione	110
Strumentazione adottata e disposizione	110
Presentazione ed interpretazione dei dati	111
Osservazioni	117
Livellazioni e misure tridimensionali	119
Introduzione	119
Relazione della livellazione geometrica interna - livellazione di precisione	119
Relazione livellazione geometrica esterna - movimenti altimetrici e livellazione di precisione	120
Relazione misure tridimensionali - movimenti planimetrici, rilevamento celerimetrico di precisione per la determinazione delle misure differenziali	121
Planimetria	122
Arcate Matroneo	124
Arcate sopra il Matroneo	124
Movimenti sui diametri	125
Osservazioni	128
Capitolo V: CONCLUSIONI	
Riepilogo delle informazioni acquisite	130
Introduzione	130
Riepilogo dell'analisi sui movimenti altimetrici	130
Riepilogo delle informazioni acquisite dalle indagini geoelettriche	131
Riepilogo delle informazioni acquisite dalle prove CPTU e SDMT	131

Osservazioni sul quadro fessurativo	132
Osservazioni sulle livellazioni e misure tridimensionali	133
Conclusioni	134
Pianificazione nuove indagini	135
Sondaggi	135
Piezometri tipo Casagrande	136
Bibliografia	138

Premessa

Euridice imprigionata nell'Ade nemmeno la musica di Orfeo potrà più destarla...eppure anche le speranze più vane se spinte da audace desiderio hanno un anelito di speranza.

Da eroico amante Orfeo scende negli inferi ma la tentazione ha il sopravvento e quel suo voltarsi indietro condanna Euridice ad un'eternità nell'Ade.

Ebbene, giorno dopo giorno un po' come Orfeo, noi studiosi cerchiamo delle risposte sul nostro passato, torniamo indietro nel tempo per ricostruire le grandi opere d'arte che ci sono state lasciate riportando alla luce misteri, segreti, tecniche e modalità lavorative sempre nuove; diamo delle risposte mai date o forse lasciamo ex-me quaero sine respontio, tuttavia agogniamo di sapere, conoscere...e nel buio aneliamo alla luce.

Forse quest'ardua impresa potrà non sempre trovare tutte le risposte, ma senz'altro una luce in più si accenderà su un tema su cui già altre luci sono state accese per ridare ogni giorno una speranza in più alla nostra "Euridice" non più prigioniera degli inferi bensì pioniera del nostro futuro.

Introduzione

A differenza di altre opere della Piazza, dove le varie operazioni di indagine sono state eseguite quasi sempre allo scopo di avere le maggiori informazioni possibili per studiare e risolvere problemi specifici e imminenti, per il Battistero non vi è mai stata l'esigenza di interventi particolarmente invasivi o di eccezionale restauro.

Si può affermare che nel corso degli anni il Battistero si è conservato in uno stato più che buono, non presentando mai particolari problemi statici o di instabilità strutturale. Le maggiori preoccupazioni, semmai, sono state quelle di preservare gli elementi del monumento dal punto di vista del loro eccezionale pregio storico ed artistico, vista la non grave rilevanza dei problemi strutturali.

E' comunque importante operare in modo da avere le maggiori informazioni possibili su tutti quei legami che esistono tra i vari fattori che determinano lo stato e la funzionalità di un fabbricato, a partire dalla progettazione, realizzazione ed evoluzione fino alla conoscenza dei fattori esterni come le caratteristiche del terreno, della falda acquifera, dei movimenti e mutamenti che l'ambiente circostante ha compiuto nel corso degli anni.

Questo lavoro prosegue l'operato dei miei colleghi, Francesco Capocchi e Martina D'Agresta, e rappresenta solo l'inizio di una più ampia indagine sulle caratteristiche di tutti quei fattori che incidono sulla struttura del Battistero, sui suoi movimenti, sull'evolversi dei cedimenti e crepe oggi presenti e sulla previsione di quelli che saranno i futuri punti critici ed i prossimi movimenti del monumento. Più precisamente, il lavoro si articola in cinque parti:

- una prima parte di introduzione storica che espone il contesto nel quale è stato costruito il Battistero, la descrizione del restauro ottocentesco e l'attuale presentazione del monumento;
- la seconda parte raccoglie gli studi sui movimenti del monumento e della Piazza (indagini già trattate dai colleghi citati ma riviste ed aggiornate);
- la terza parte raccoglie le indagini geoelettriche (sintesi dell'analisi svolta dal collega Capocchi) e le indagini effettuate sul sottosuolo attorno al Battistero attraverso la prova penetrometrica con il piezocono (CPTU) e la misura della velocità delle onde di taglio con il dilatometro sismico (SDMT) al fine di individuare la stratigrafia del terreno;
- l'ultima parte analizza il monitoraggio delle fessure e le livellazioni effettuate all'interno e all'esterno del Battistero.

Vengono infine tratte le conclusioni e suggerita una pianificazione dei futuri interventi con le caratteristiche dei metodi che dovranno essere adottati.

Capitolo I

INTRODUZIONE STORICA

Fasi costruttive, storia dell'evoluzione del fabbricato

Introduzione

Il Battistero è uno dei quattro edifici che compongono il complesso monumentale di Piazza dei Miracoli. Fu iniziato il 15 agosto 1152, su progetto dell'architetto Diotisalvi, ritenuto come uno dei possibili progettisti della Torre pendente, ma il suo completamento è avvenuto in epoche diverse. I lavori infatti furono interrotti presto per essere ripresi, con radicali modifiche alle idee iniziali, un secolo più tardi, sotto la guida di Nicola e Giovanni Pisano, che portarono a termine la struttura a fine Trecento. Questo ampio spazio di tempo rende ragione della particolare mescolanza di stili architettonici che contraddistinguono il Battistero e che è possibile ritrovare anche in altre opere di Piazza dei Miracoli. L'ultimo intervento effettuato sull'edificio così come lo vediamo oggi risale al XIX secolo, quando furono eseguite anche delle copie delle originali sculture ornamentali: statue e busti di santi e profeti; queste ultime, sono tuttora conservate nel Museo dell'Opera del Duomo.



Fig. 1: Il Battistero di Pisa, veduta del prospetto Sud-Est

Inserimento storico

All'epoca in cui l'opera di Diotisalvi ha inizio, Pisa è all'apice della propria importanza: la città è ricca, potente, in continuo ampliamento. La conclusione della Prima Crociata, nel 1099 d.C., cui Pisa ha partecipato inviando in terra Santa centoventi navi, l'ha resa particolarmente presente in oriente laddove era già presente una roccaforte ad Accon (San Giovanni d'Acri), fu così che Pisa estese il suo potere in oriente attraverso la fondazione di svariate colonie: Antiochia, Giaffa, Tripoli di Siria, Tiro, Gioppe, Laodicea e Accone. L'influenza pisana sul territorio indusse Papa Urbano II a nominare l'arcivescovo pisano Daiberto patriarca di Gerusalemme.

Al di là della valutazione storica dell'operato pisano e dello stesso Daiberto, il dato di fatto importante è che in queste condizioni l'idea e la simbologia legate alla terra Santa e al tema del Santo Sepolcro dovevano essere quanto mai avvertite presso la comunità pisana.

In questo stesso periodo i lavori di trasformazione della città si concentrarono su un'area, a quel tempo marginale all'edificato, dove si trovavano già varie costruzioni (prevalentemente ad uso liturgico), che però erano probabilmente decadenti e in cattive condizioni. In quest'area iniziarono i lavori di trasformazione che definiranno la piazza così come è ancora visibile oggi. L'intervento non riguardò solamente la liberazione del suolo, ma anche la ridefinizione del confine della città in quella direzione, con la costruzione della cinta muraria, che per la sua struttura non può essere considerata a pieno titolo "difensiva". Verosimilmente fu realizzata anche per scopi formali e per dare un limite chiaramente percepibile alla grande piazza. Possiamo dire che lo sviluppo urbanistico della città, e in particolare di quest'area, segue due principi: la ridefinizione dello spazio urbano e la realizzazione di un ambiente fortemente simbolico della ricchezza della città.

La simbologia che ruota attorno all'impostazione urbanistica dell'area è molto articolata. Vi si può ravvisare la volontà di replicare la raffigurazione del Santo Sepolcro di Gerusalemme, nella forma con cui il complesso si doveva presentare all'epoca, con la cattedrale in luogo del *Martyrion*, la cinta muraria e il fronte del cimitero a emulare il fronte roccioso del monte Calvario e con il battistero a costituire l'equivalente dell'*Anastasis* di Costantino (Diotisalvi imposta il progetto del battistero secondo un modello fortemente ispirato all'*Anastasis* così come si può ipotizzare che questa dovesse apparire allora). Il tutto collocato su una spianata regolare, ben delimitata come a Gerusalemme in quei tempi.

Dalla metà del XII secolo, Pisa tramite le acquisizioni della chiesa locale, ebbe un'espansione anche terrestre in Toscana e particolarmente nella Valdera, nel Valdarno inferiore e a Sud in direzione di Piombino. Contemporaneamente cresceva la rivalità con Lucca per il castello di Montignoso e per la via Francigena. Nello stesso periodo Pisa tentava una politica di penetrazione nell'Adriatico e di sfida alla supremazia veneziana. Nel 1206 veniva stipulato tra le due città un



Fig. 2: Plastico della Gerusalemme bizantina: l'Anastasis (Santo Sepolcro)

trattato con il quale Pisa rinunciava alle sue mire espansionistiche in Adriatico pur mantenendo il controllo degli sbocchi già acquisiti. Il trattato aveva funzione antigenovese e nel corso del tempo i rapporti tra Pisa e Venezia divennero generalmente di collaborazione e addirittura di alleanza per la conquista del mercato di Costantinopoli. Sotto il profilo culturale occorre ricordare in questo periodo la fondazione della celebre scuola pisana di studi giuridici.

All'inizio del XIII secolo, Pisa si impegnò nella normalizzazione dei rapporti con la rivale Genova. Nel 1209 e nel 1217, vi furono dei convegni di pace a Lerici che si conclusero positivamente con la firma di trattati che garantirono un periodo ventennale di pace tra le due potenze marinare, almeno fino a quando Federico II confermò a Pisa il possesso della costa tirrenica ma ciò rinnovò i motivi di ostilità. Con l'espansione nel Mediterraneo e il consolidamento degli interessi delle classi mercantili, divenne necessario modificare l'assetto istituzionale della città. Scomparve quindi la carica di console e intorno al 1230 i potenti mercanti individuaronò una nuova figura che li rappresentasse sul piano politico e li difendesse su quello militare: il Capitano del popolo. Nonostante l'opera riformatrice in città così come nei territori ad essa sottoposti, rimase una forte tensione interna dovuta alla rivalità tra la famiglia Della Gherardesca e quella Visconti. Dopo vari tentativi di pacificazione da parte degli arcivescovi e dell'imperatore stesso (Federico II), nel 1254 il popolo, con una rivolta, modificò l'assetto politico dando vita ad un consiglio di dodici Anziani

del Popolo rappresentanti l'opinione pubblica. Inoltre affiancarono ai consigli legislativi, composti da nobili, i nuovi consigli del popolo formati da rappresentanti delle arti principali e dai capi delle Compagnie del Popolo con la funzione di ratificare le leggi approvate dal Consiglio maggiore Generale e dal Senato.



Fig. 3: Interno dell'Anastasis in una raffigurazione del secolo XVII

Nel 1284 (anno in cui morì Nicola Pisano, e il Battistero era arrivato all'altezza del coronamento della galleria esterna), Pisa subì una disastrosa sconfitta da parte di Genova nella battaglia della Meloria. Tale sconfitta, unita alla devastazione da parte genovese del Porto Pisano nel 1290, conferì un durissimo colpo alla potenza marittima della repubblica. Il colpo finale alle gloriose imprese marinare fu poi inferto nel 1324 con la conquista definitiva da parte degli Aragonesi degli avamposti pisani in Sardegna. I lavori al Battistero riprenderanno nel 1365 con la costruzione delle cupole e termineranno il 1396 con l'installazione della statua in bronzo di San Giovanni Battista.

Il 9 ottobre 1406 i fiorentini riuscirono ad impossessarsi della città pagando il corrotto Capitano del popolo Giovanni Gambacorta che fece aprire la porta di San Marco. Ciò pose termine alla lunga resistenza della città agli attacchi esterni di fiorentini e genovesi.

Progressione storica dei lavori al fabbricato.

Il Battistero è un monumento alquanto complesso, che, a differenza del Duomo, è stato realizzato in una o massimo due fasi costruttive. Vi si è lavorato quasi ininterrottamente dal 1152 fino verso il 1396, quindi per due secoli e mezzo. Ciò rende ragione di come da un'idea iniziale (il progetto di Diotisalvi) si arrivi ad un completamento, in cui quell'idea iniziale è ancora presente ma nello stesso tempo completamente trasformata.



Fig. 4: Ricostruzione del Battistero secondo il probabile progetto iniziale di Diotisalvi

Considerati i tempi, sulle prime fasi della costruzione del Battistero abbiamo informazioni insolitamente abbondanti. Bernardo Marangone, storico dell'epoca, che segue l'inizio dei lavori, ci dice che il 12 agosto del 1152 è stato ultimato il primo anello della fondazione. Poco più di un anno dopo, il 31 agosto 1153, viene ultimato anche il secondo anello di fondazione; ma a tutt'oggi ci resta difficile capire quale si intendesse per primo e secondo anello se quello interno o quello esterno. Successivamente si parla del fatto che una nave dell'Opera Primaziale del Duomo trasporta a Pisa, prima dall'isola d'Elba e qualche anno dopo dalla Sardegna, delle colonne "grandi" di pietra. Il 30 ottobre 1163 si alza la prima colonna e in 14 giorni vengono alzate tutte le altre. In undici anni quindi si costruiscono le fondazioni dei due cerchi e si alzano tutte le colonne. Viene anche fatto un provvedimento nel quale ciascuna famiglia di Pisa era obbligata al pagamento di una tassa pari ad un denaro per finanziare l'opera.

Nonostante la nuova tassa, la costruzione del Battistero va molto a rilento; essa infatti non era seguita dall'Opera del Duomo (che era un'istituzione controllata direttamente dal comune), ma

dall'arcivescovo e dai canonici. C'è da dire che i rapporti tra questi e l'Opera del Duomo erano, non di rado, assai tesi, e culminarono successivamente in una vera e propria estromissione delle autorità ecclesiastiche da tutto ciò che riguardasse l'edificio. A questo punto, per procedere, ci dobbiamo appoggiare su pochi elementi sicuri: uno di questi è costituito dal portale Est (quello principale), che è possibile datare su base stilistica. Esso è riconducibile allo stile bizantino, quindi dovrebbe risalire ai primissimi anni del XIII secolo, e ciò è avallato dal fatto che nel 1204 (come ci rivela una iscrizione), probabilmente la stessa maestranza che lavora al Battistero esegue a S. Michele degli Scalzi un portale molto simile.

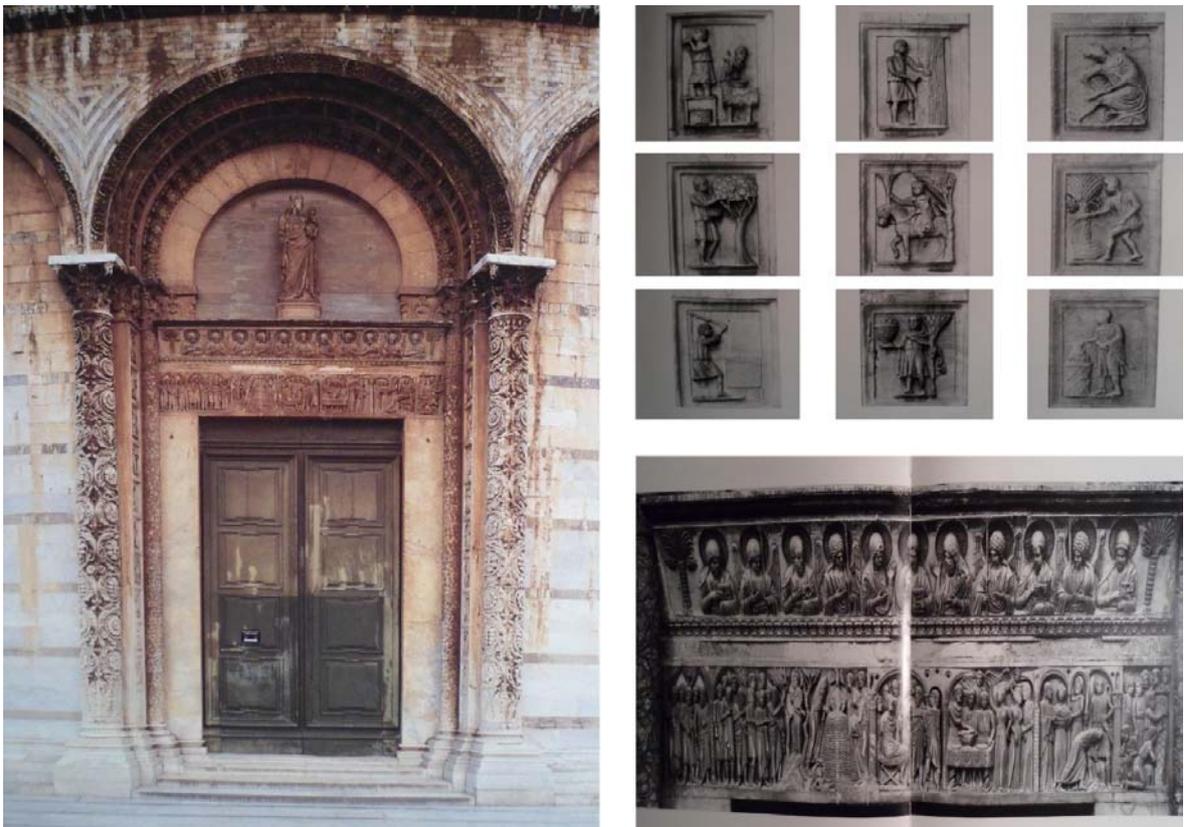


Fig. 5: Immagine del portale Est e particolari decorativi

La decorazione del portale permette di affermare che nei primi anni del 1200 la struttura perimetrale, per lo meno di una parte dell'edificio, doveva già essere stata costruita. Se poi esaminiamo il perimetro esterno del primo ordine del Battistero, possiamo notare una notevole analogia con il primo ordine del paramento esterno del Duomo, in particolare con quello di facciata. Siccome Rainaldo termina la facciata del Duomo prima del 1118 (anno di consacrazione) e il cantiere del Battistero inizia nel 1152, cioè 34 anni dopo, è chiaro che il perimetro dell'edificio non può essere stato realizzato da Rainaldo, verosimilmente morto, ma della generazione successiva

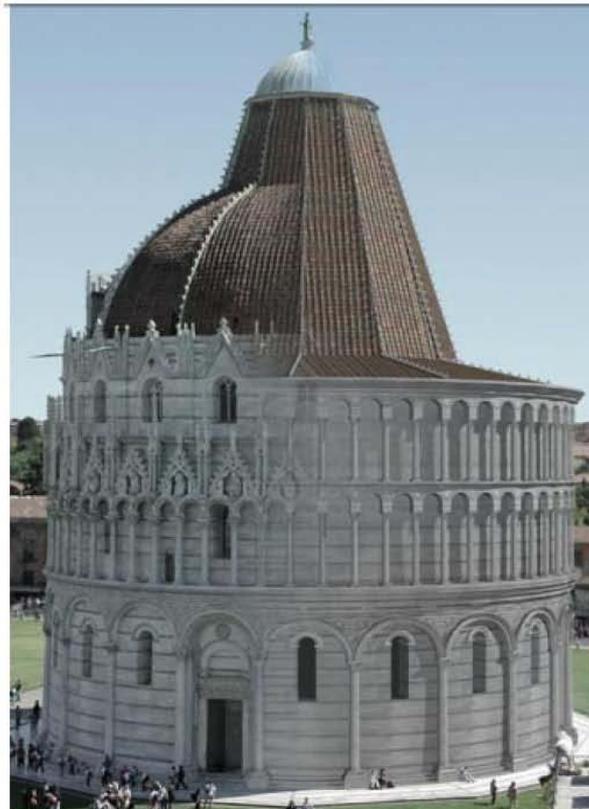
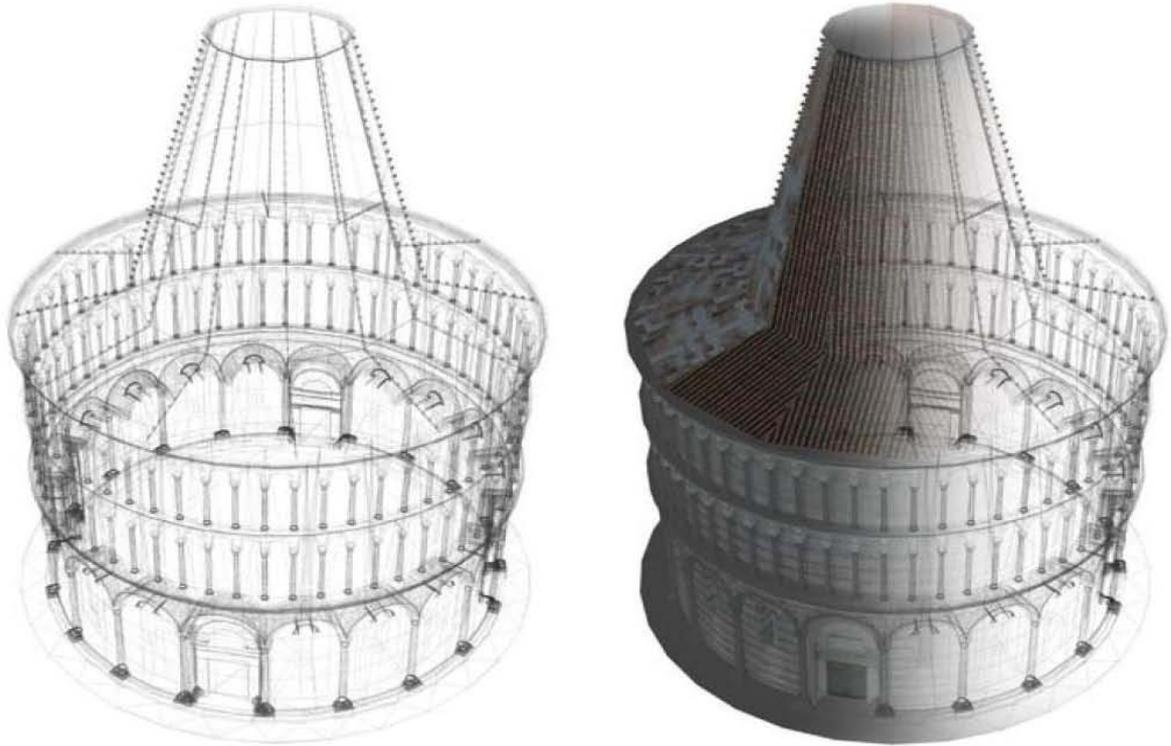


Fig. 6: Modello di un'altra ipotesi del progetto originale e inserimento fotografico a confronto con l'edificio attuale

di artisti di quella bottega. Lo stile della decorazione esterna del primo ordine del Battistero, e non solo delle archeggiature, si riscontra in particolare nella cornice marcapiano del primo ordine della facciata del Duomo.

Guido Bigarelli da Como, firma nell'anno 1246 il fonte battesimale. Questa data costituisce un riferimento cronologico preciso, e ci attesta che il Battistero ha finalmente acquisito piena funzionalità; eppure si tratta pur sempre di un troncone di edificio, corrispondente al primo ordine del Battistero odierno. Evidentemente, per un lunghissimo periodo, coperture provvisorie e altri accorgimenti hanno consentito l'uso liturgico della struttura. L'inadeguatezza delle soluzioni spiega perché si fosse costruito un pavimento a scivolo dal centro verso il perimetro, che potesse consentire un rapido scolo delle acque piovane.

A questo punto, per quanto riguarda l'evoluzione della struttura dell'edificio, vi sarà una pausa di circa 30 anni. Si continua nel frattempo a dotare il Battistero di magnifici arredi: nel 1260 viene posto in opera l'elemento divenuto più celebre, il pulpito scolpito da Nicola Pisano, e sempre in quel periodo viene realizzato il mirabile pavimento del presbiterio.

E' possibile datare un secondo lotto di costruzione al 1278: la certezza di questa data è fornita da un'iscrizione posta in basso sul muro perimetrale del matroneo che dice: "Anno domini MCCLXXVIII edificata fuit de novo". Evidentemente c'è una nuova fase costruttiva dell'edificio successiva alla realizzazione del pulpito e portata avanti, per quanto riguarda l'interno, fino al punto dell'iscrizione.

In questa fase vengono anche fatte le coperture delle volte nell'anello del primo ordine (anche la tipologia di costolature a tortiglione ivi impiegata si accorda con tale datazione), e contemporaneamente si incomincia a costruire il secondo ordine e ci si ferma, all'interno e all'esterno, all'altezza a cui è attualmente posta la lapide.

Resta da chiarire un piccolo rebus: la data 1278 posta sull'iscrizione va letta come la data di inizio del secondo lotto dei lavori, o come la data di termine dei lavori?

Alcune osservazioni stilistiche sembrano risolvere i dubbi. Infatti in questa fase vengono anche fatte le coperture delle volte nell'anello del primo ordine cui già parlato, il cui stile ci aiuta a determinare con maggiore precisione la data in cui i lavori sono stati effettuati.

Se esaminiamo il secondo ordine esterno, e cioè la galleria che appunto allora si andava costruendo, si notano riferimenti ad elementi presenti nei vari edifici della piazza: la loggetta a colonne è molto simile a quella dei piani più bassi del Campanile (costruiti subito dopo il 1173, anno di inizio dei lavori del Campanile), e l'apparato decorativo (assai più ricco, con teste sia alla base che al centro delle archeggiature), è simile a quello delle gallerie della facciata del Duomo. Ma è il loggiato ad incoronare la struttura il quale con la sua struttura a timpani e pinnacoli, introduce uno stile rivoluzionario. Fino a questo punto infatti l'aderenza a stili preesistenti non aveva consentito a Nicola Pisano di manifestare a pieno la sua personalità di architetto; soltanto l'analisi della decorazione (capitelli, ghiere, e soprattutto teste in base e in centro d'arco) aveva

segnalato la presenza dello scultore. Se si prova a situare il coronamento della galleria del Battistero all'interno dell'intera opera di Nicola Pisano si ha una conferma del fatto che la data 1278, attestata dall'iscrizione nel matroneo, si riferisce al completamento della struttura e non al suo inizio.

Invece gli elementi migliori della serie delle Sante e Santi con reliquiari che coronavano le vimperghe (ora quasi tutti nel museo dell'Opera del Duomo), sono attribuiti unanimemente dalla critica a Giovanni Pisano (figlio di Nicola); è quindi chiaro che alla morte di Nicola (1284) subentra Giovanni alla direzione del cantiere del Battistero, dedicandosi in un primo momento al completamento della decorazione scultorea.

Il 1284 per Pisa è l'anno della sconfitta alla Meloria; tra le altre vicende possiamo ricordare l'immediata emigrazione di Giovanni Pisano a Siena, dove gli viene offerta la carica di capomastro del Duomo. Nel frattempo egli continuava a seguire i lavori del Battistero pisano, verosimilmente attraverso brevi e ripetute visite nella città natale. Ciò è dimostrato dall'esistenza di documenti del 1295 relativi a pagamenti a Giovanni da parte dell'Opera per lavori nel Battistero.

La direzione di Giovanni comporta una lenta progressione delle opere murarie, che erano arrivate alla morte di Nicola (1284) all'altezza del coronamento della gallerie esterna.

Anche se vi sono delle versioni discordanti da parte dei critici per l'attribuzione dell'architettura della parte più alta del Battistero, dalla loggia esterna in su, si può pensare, facendo delle analogie stilistiche con altre opere, che il completamento del Battistero all'esterno, (con la sola eccezione del sistema delle cupole), sia stato progettato da Giovanni e in parte anche realizzato sotto la sua direzione. Se poi osserviamo, all'interno, il muro perimetrale del matroneo, notiamo che le statue che fiancheggiano due dei peducci pertinenti ad una copertura a volte a vela (poi non realizzata) sono assai simili alle statue appena sbazzate un tempo poste al culmine del muro perimetrale, elementi che possiamo attribuire alla maestranza di Giovanni; in altre parole, almeno in un notevole settore dell'edificio (che, in base all'analisi delle murature, si può identificare con la parte Est, di fronte al Duomo), ai tempi della morte di Giovanni (1315) il muro perimetrale era pressoché terminato. Si può ipotizzare a questo punto una pausa dei lavori al cantiere del Battistero di circa 40 anni.

Quanto ai lavori successivi, possiamo stabilire alcuni punti fermi. Nel 1359 Cellino di Nese viene mandato a Carrara per ordinare archi e finestre: le finestre dovrebbero essere quelle dell'ordine superiore esterno, a completamento dei lavori iniziati su progetto di Giovanni; gli archi sono quelli del loggiato con cui, all'interno, il matroneo si affaccia sul vano centrale.

Poco più tardi, nello stesso anno, si legge un documento in cui Cellino di Nese, Giannino di Tone e Domenico di Pasquino (presenti in quegli'anni anche nei cantieri del Duomo e del Camposanto) si impegnano a edificare due pilastri con due archi completi: all'esterno di marmo di Carrara con due filari di marmo nero e all'interno di pietra di Caprona. E' evidente che si stanno costruendo le

arcate interne, cioè che accanto ad altri pilastri già esistenti, i tre maestri costruiranno i due nuovi pilastri con gli archi completi. Infatti la descrizione ben corrisponde alle strutture tuttora esistenti.

Probabilmente in questo periodo si ha una certa accelerazione dei lavori, dal momento che poco dopo, nel 1365, Sibellino de Caprariis da Bologna, Puccio di Landuccio, Cellino di Nese e Biagio di Pardo hanno una commissione per frontespizi e cibori; nel 1372 poi Giannino di Tone e Domenico Cavallata si impegnano a fare altri due frontespizi. Si sta parlando delle edicole poste come abbaini all'esterno della cupola emisferica del Battistero; difatti nel 1383, verranno chiamati frontespizi le edicole che allora Puccio di Landuccio monterà per formare una loggia continua alla base del Duomo.

I documenti del 1365 e del 1372, sono importanti perché ci indicano il lasso di tempo in cui viene realizzata la struttura della doppia cupola, quella interna a tronco di piramide dodecagonale racchiusa in quella esterna a calotta emisferica. Di questa cupola abbiamo testimonianza negli affreschi di Antonio Veneziano fatti nel 1384-86, che ci mostrano la cupola completa. D'altra parte, sempre nel 1386, per la scarsità dei mezzi finanziari, l'Opera è costretta a vendere dei terreni per portare a compimento la complicata struttura delle cupole; possiamo quindi dire che i lavori per la costruzione delle cupole siano durati circa 20 anni.

A questo punto l'edificio nelle sue parti strutturali è completo, manca la statua in bronzo di San Giovanni Battista, che sarà realizzata nel 1394-96 da Turino di Sano, orefice da Siena.

Il restauro del Battistero.

Mentre la piazza del Duomo è soggetta a grandi trasformazioni nel suo assetto generale, si provvede al restauro dei singoli edifici: il Battistero fu sede di un grande cantiere che fu aperto nel 1835, quando era presidente dell'Opera Bruno Scorzi, e che si protrasse dal 1841 al 1856 sotto la presidenza di Vincenzo Carmignani.

Ma, già a partire dal 1817 sono registrati interventi a elementi architettonici deteriorati: i pezzi rimossi venivano ammassati nei magazzini, in attesa di un possibile riuso. Questo tipo di operazione preannuncia i criteri di restauro che avrebbero poi privilegiato il rispetto dell'immagine unitaria dell'edificio piuttosto che la conservazione dei materiali antichi, diversamente da quanto raccomandava il conservatore del Camposanto Carlo Lasinio, rispettoso di ogni singola pietra.

Le perizie condotte nel gennaio del 1825 da Stefano Piazzini (ingegnere dell'Opera) e Alessandro Gherardesca sullo stato delle quattro Fabbriche, prevedevano per il Battistero di *"risarcire diverse arcate, rimettere delle colonne, restaurare la gradinata esterna"* e prendevano atto della decadenza soprattutto della cupola e degli ornati esterni. Ma i lavori si indirizzarono in un primo momento a completare la piena fruibilità dell'edificio, che nel 1829 veniva liberato dal muro di recinzione e dalla vicina Casa dell'ortolano che alla metà del Cinquecento erano stati eretti a ridosso del settore occidentale. I terreni allora acquisiti dell'area del prato e quelli circostanti il Battistero vennero portati a un livello più basso per liberare parte del suo basamento. L'edificio continuava comunque a trovarsi incassato in un anello di tre gradini di marmo che occultavano le modanature della sua base. L'isolamento dell'intero edificio, permise la riapertura della sua antica porta occidentale. Della porta così riacquistata fu restaurato l'architrave; mentre tra il 1835 e il 1837 si avviavano i risarcimenti per degradi segnalati nella perizia del Gherardesca: *"attoppature"* ai conci e agli ornati, eseguite senza troppa disponibilità di mezzi e persone, che in realtà erano spesso vere e proprie sostituzioni. A niente valsero le denunce di Carlo Lasinio della *"riprovevole smania di rimuovere ogni cosa mentre dappertutto si provava religiosamente di conservare i più minimi rimasugli di antichità"*, sotto gli occhi dei forestieri che pure disapprovavano.

Nel 1839 il nobile pisano Vincenzo Carmignani subentrò a Bruno Scorzi come nuovo presidente dell'Opera del Duomo. Carmignani prese in mano la situazione, rescisse i contratti con i fornitori e i lavoratori abituali, verificò tutti i prezzi già stabiliti in passato e sostituì le forniture dei marmi passando dai marmi dei Bagni a S. Giuliano (dei quali l'Opera si era sempre servita) a quelli di Monte Altissimo.

Il Carmignani sin dai primi giorni di presidenza all'Opera, aveva ben chiari i suoi obiettivi. Egli trovò in Giovanni Storni, capo delle maestranze, un fedele collaboratore. Mancò invece la figura di un progettista che, oltre ad identificare i fini dell'intervento di restauro, ne seguisse anche le varie fasi. Alessandro Gherardesca (illustre professore dell'Accademia pisana di Belle Arti) formalmente fu il responsabile dell'intero lavoro (per lo meno fino al 1849), ma nel cantiere non effettuò che pochi sopralluoghi e si occupò a fondo solo della progettazione dei restauri dei portali meridionale

e settentrionale. Questo permise all'Opera di abbassare il costo dei lavori, (le sculture vennero pagate assai meno che negli anni precedenti), ma venne a diminuire la qualità della lavorazione. Gli elementi scultorei, da allora, furono infatti prodotti in serie, senza tenere conto dell'unicità del pezzo antico di cui avrebbero preso il posto. Proprio per questo oggi è abbastanza semplice, con una analisi dello stile e del materiale delle sculture, distinguere le parti ottocentesche del Battistero da quelle originali, nonostante la loro esposizione alle intemperie.

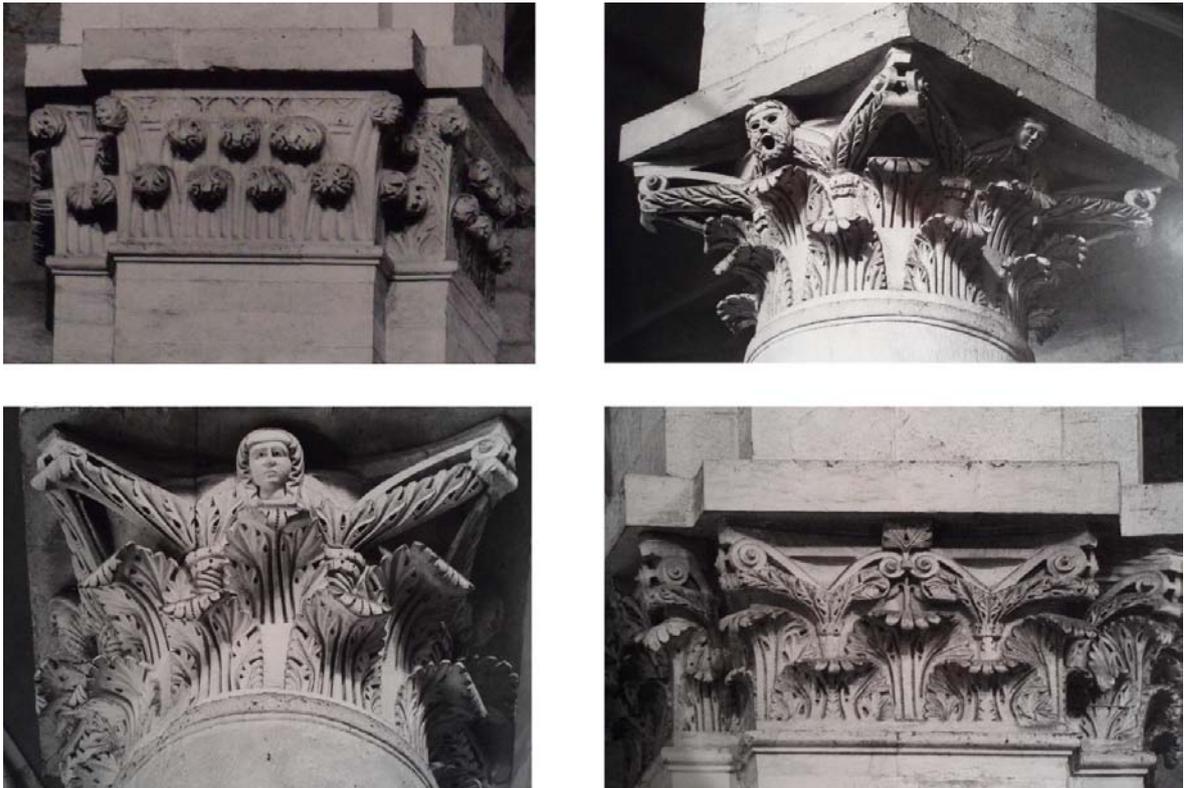


Fig. 7: Immagini di capitelli

Il Gherardesca, nel 1839, aveva fissato i fini dell'intervento nel proseguimento del restauro della decorazione esteriore, consistente in lavori di sculture, modini, murature, grappe di rame piombate, realizzazione di nuove colonne, archetti, mensoloni, pinnacoli. Ma fu il capo maestro muratore Giovanni Storni a compilare le periodiche perizie da sottoporre al Carmignani. Col susseguirsi dei ponteggi lignei attorno alle porzioni di parete del Battistero da restaurare, il capomastro identificava quali fossero i marmi danneggiati da sostituire e ne proponeva l'elenco agli amministratori dell'Opera. Con il trascorrere del tempo si instaurò quindi un meccanismo per cui, tolte le parti più rovinata e quindi fragili, a poco a poco anche quelle meglio conservate venivano coinvolte nei rifacimenti.

Su richiesta dello stesso Storni, che si sentiva a questo punto criticato sulle modalità dei lavori, venne invitato Gherardesca a effettuare un nuovo sopralluogo; nell'occasione il professore, puntualizzò quali fossero i lavori necessari alla porta settentrionale e approvò la rimozione delle

parti devastate, pregando altresì Carmignani di avvertire Storni di utilizzare gli attrezzi (mazza e scalpello) nel modo più delicato possibile.



Fig. 8: Particolari di capitelli di colonne e dei peducii

Il cantiere del Battistero, ufficialmente era stato aperto per lavori di “ordinaria manutenzione” e più precisamente per il risanamento delle parti pericolanti dell’edificio. Solo presentato sotto questa forma, l’intervento poteva essere seguito senza l’autorizzazione del Magistrato comunitativo.

I lavori durarono quindici anni: inizialmente si intervenne sulle pareti esterne (1841-1848), poi sul basamento (1849), infine sull’interno dell’edificio (1850-1856).

Nel 1841 dopo aver montato il ponte nella zona corrispondente alla porta meridionale e alle tre arcate adiacenti, verso Ovest, iniziarono i lavori del restauro, e venne chiamato anche Alessandro Gherardesca a effettuare una verifica di approvazione ai lavori.

Dal confronto tra i dati riferiti periodicamente dal capomastro al presidente dell’Opera e quelli che emergono dal riepilogo dei conti pagati, si nota che tra la primavera del 1841 e l’estate del 1847, gran parte del coronamento delle bifore dell’ultimo piano venne sostituito con marmi lavorati nel cantiere. Nella zona nord-occidentale, tale cornice venne anche modificata, aggiungendo decorazioni, che, prima dei lavori erano del tutto assenti. Anche i marmi delle cuspidi del fastigio, sopra la galleria del primo piano, e quelli dei tabernacoli sormontati dai pinnacoli che lo intervallano furono sostituiti, tanto più che erano posti in completo aggetto dalla parete dell’edificio e quindi sottoposti maggiormente ai danni delle intemperie e al rischio di caduta.

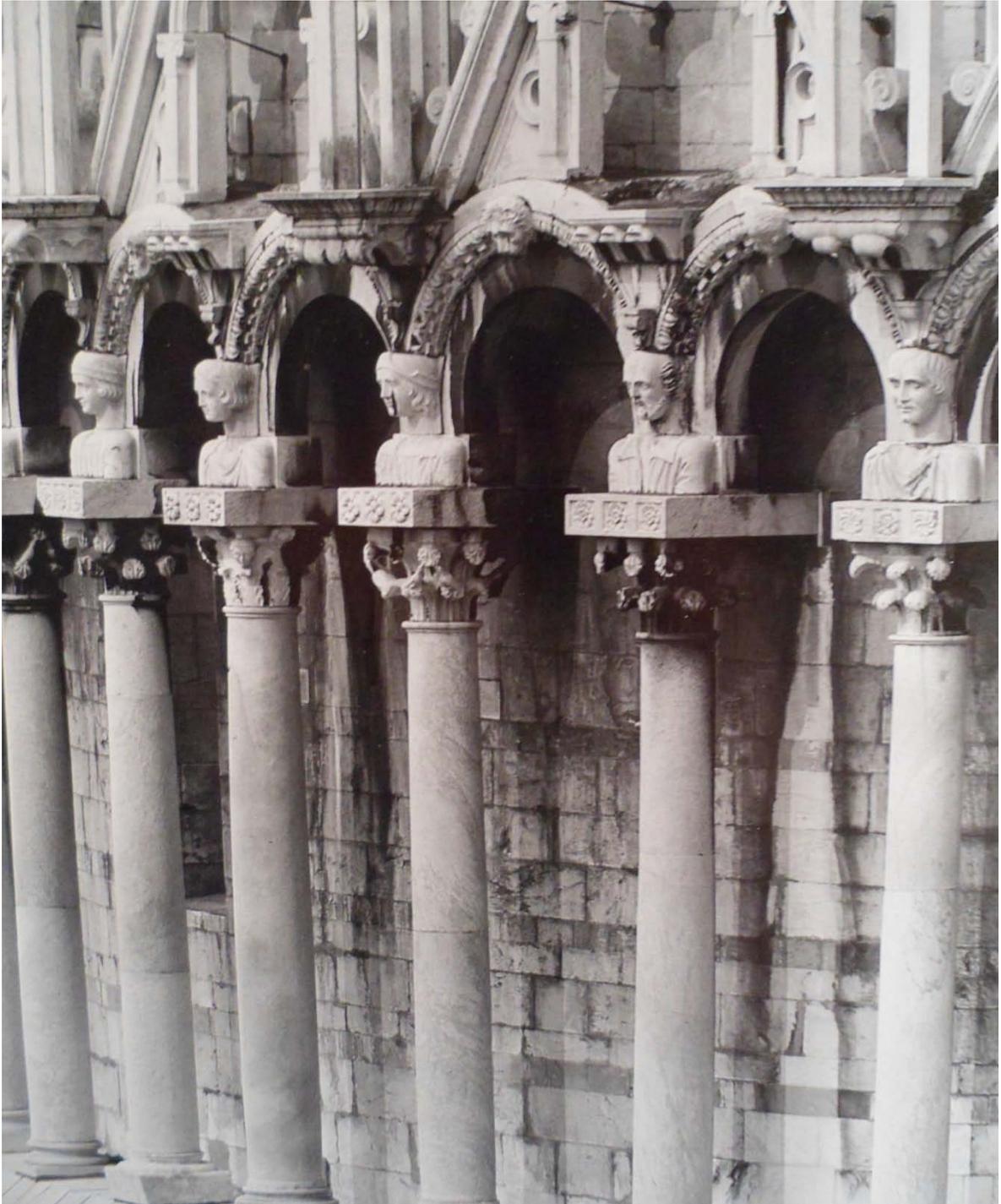


Fig. 9: Esterno, II ordine, una parte della galleria

Più cauti furono gli interventi alle parti figurative: vennero sostituite ventisei imposte ai sessanta archetti della galleria, e diciassette maschere nelle loro chiavi. Dei trenta Santi (i cui busti erano le edicole delle cuspidi), cinque vennero rifatti ex novo, di uno furono soltanto integrate le zone corrose, gli altri non necessitarono intervento alcuno. Quarantaquattro capitelli, quarantatre basi d'imposta e ventisei fusti delle sessanta colonne della galleria furono lavorati ex novo. Nessuna pietà venne riservata alle sculture a figura intera appoggiate sull'alto delle cuspidi. Delle ventisette

statue e dei tre busti che vi svettavano, solo quattro statue vennero ricollocate al loro posto. Le nuove figure furono ideate dallo Storni assai liberamente, senza la pretesa di replicare le statue medievali, che sono oggi conservate nel Museo dell'Opera del Duomo. Sulla cupola, furono rifatti due dei quattro tabernacoli, quelli all'estremità meridionale e settentrionale. Nel primo, venne replicato lo stemma trecentesco dell'operaio Scaccieri che li aveva costruiti, nel secondo venne alloggiato quello dell'operaio Vincenzo Carmignani. Una scelta radicale interessò la porzione di marmo nero degli archetti della galleria del primo piano, che fu tutta rinnovata. Infatti, una volta iniziato il lavoro con il marmo Bardiglio delle cave di Seravezza, al posto del marmo nero di Vecchiano, risultò troppo evidente la differenza di colore; il Bardiglio solo dopo una consistente levigatura mostra la sua colorazione grigio scura. Ciò deve aver determinato la sostituzione della maggior parte degli elementi che formavano contrasto di colore e anche il tentativo di renderne più scuri alcuni con una mano di olio macchiato. Fu anche per questo motivo che vennero rese pubbliche le accuse da parte di coloro che erano fortemente critici sullo svolgimento dei lavori. La denuncia fu sporta da Giuseppe Menici, anziano rappresentante della Comunità che si era interessato degli interventi al campanile durante l'operato dello Scorzi.



Fig. 10: Esterno, II ordine, capitelli, protomi, archetti e coronamento

In poco più di due anni, dal marzo 1841 al maggio del 1843, tutta la metà sud-occidentale del Battistero (quella maggiormente deteriorata dai venti di libeccio), era stata rinnovata. Rimaneva solo da sistemare la porta meridionale e l'intero basamento. A maggio del 1843, il ponteggio era pronto di fronte alla terza porzione da restaurare, consistente nella porzione che va dalla porta settentrionale alle tre arcate ad essa adiacenti verso Ovest. Entro la fine del 1846 l'intervento sull'ultima porzione era concluso, (17 arcate su un totale di 20) arrivando quindi a contatto delle tre arcate già restaurate dallo Scorzi.

Dopo il sopralluogo, effettuato nel settembre del 1847, il Gherardesca non poté far altro che approvare i lavori eseguiti dallo Storni.

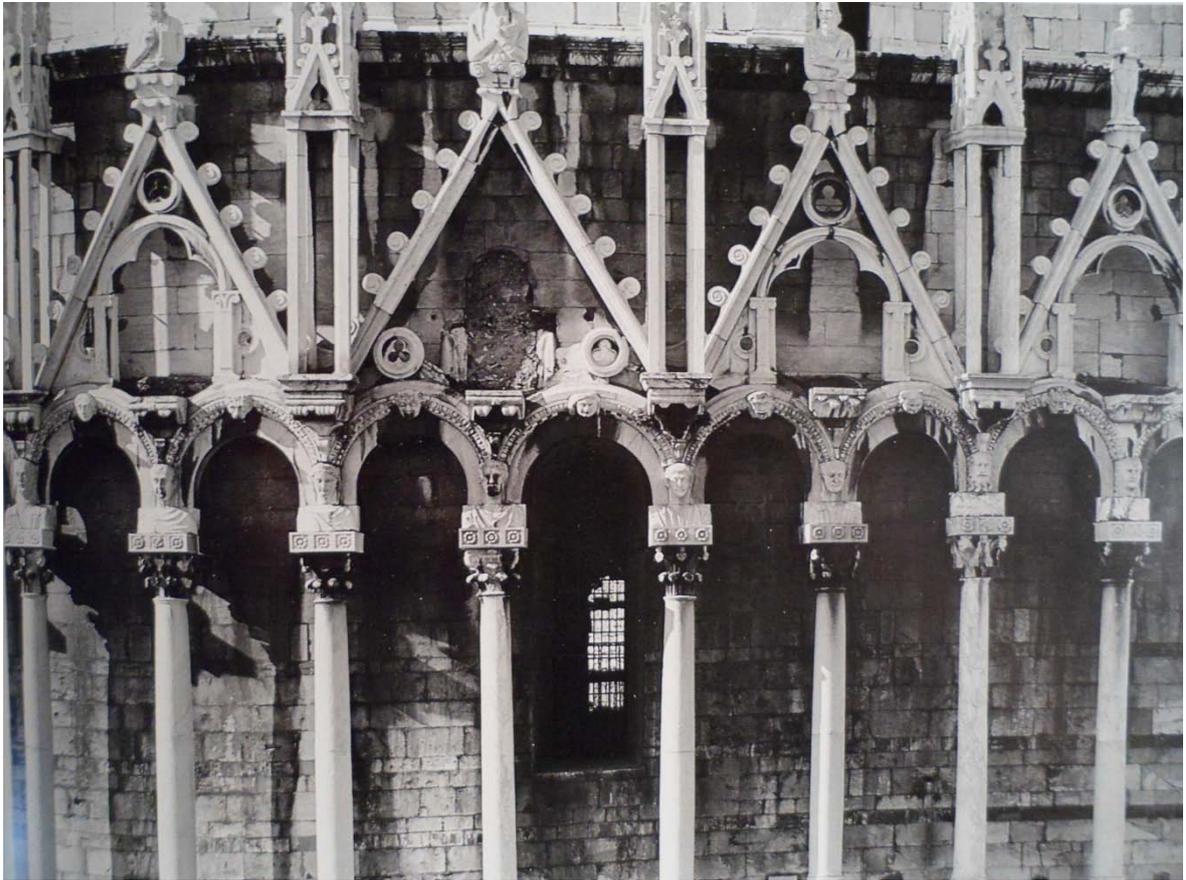


Fig. 11: Esterno, particolare della galleria e del suo coronamento

I lavori ai due portali (quello settentrionale e quello meridionale) vennero avviati contemporaneamente a partire dagli ultimi mesi del 1847 e conclusi nell'agosto del 1848, mentre venivano anche erette le impalcature nelle gallerie interne.

Preoccupato da una così grande sostituzione di elementi in marmo del Battistero, il canonico Luigi della Fanteria, Vicario generale dell'Arcivescovo di Pisa, nel settembre del 1848 mise in guardia il Carmignani contro il rischio di un intervento alla porta orientale (quella più riccamente ornata), circondata all'epoca dalle impalcature, e proprio grazie a queste, il vicario si era accorto della firma di Giovanni Pisano su una statua delle lunette. Nella lettera all'Operaio Carmignani, si legge infatti: *“Una statua con tale iscrizione diviene un oggetto intelligentissimo per l'antiquaria e per la storia delle arti e converrebbe che fosse lasciato nella sua integrità”*. La richiesta ebbe buon esito e la porta orientale rimase pressoché intatta. L'anno successivo, le basi della colonna e dei pilastri dell'archivolto che la inquadra, furono sostituiti con marmi nuovi. Solo dopo, nel 1855, anche le sculture della lunetta (la Madonna col Bambino e i due San Giovanni) vennero restaurate e vennero integrate le parti mancanti.

Nell'autunno del 1848 fu concluso il restauro delle facciate del Battistero; si trattava ora di porre rimedio agli inconvenienti del basamento esterno dell'edificio e del suo corridoio circostante, allora sopraelevato di tre gradini sul livello del prato. Si prevedeva di rifare tutta la gradinata composta da tre gradini con un ripiano di lastre bianche di marmo interrotte da quattro liste di bardiglio, e di fare una fondazione all'intera gradinata, con cemento e calcina mischiata a ghiaia e pietre. Ma quando gli operai iniziarono a smontare i primi gradini del corridoio esterno, si trovarono di fronte a una sorpresa: era venuta alla luce una piattaforma collegata alla cornice di base dalle sue pareti. A questo punto vi furono dei pareri contrastanti su come si dovesse procedere: da un lato vi era Storni che voleva lasciare la base scoperta, dall'altra Gherardesca che sosteneva quanto fosse più conveniente per la struttura lasciare il corridoio intorno al Battistero così com'era, anche perché altrimenti si sarebbe trovato a una quota più bassa del prato. La questione divenne di dominio pubblico e diverse personalità intervennero con propri pareri.



Fig. 12: Statua di Portareliquia, (esterno, II ordine, coronamento)

Fu Carmignani a impedire all'architetto la prosecuzione dei lavori secondo il suo volere. Il 17 maggio 1849, con una delibera formulata in accordo con i colleghi dell'Accademia, Gherardesca lasciava ad altri l'onere della decisione purché fosse esonerato da qualunque responsabilità. La collaborazione dell'architetto con l'amministrazione dell'Opera continuò fino alla sua morte, avvenuta nel 1852, ma dopo di allora i rapporti con l'Operaio furono assai freddi. Dopo la morte del Gherardesca, il cantiere del Battistero rimase senza alcuna guida fino al 1853, quando il Magistrato comunitativo impose all'Opera l'assunzione a contratto di un responsabile, e quel ruolo fu assegnato all'ingegnere comunale Pietro Bellini.

Le antiche “*gradule*” del Battistero vennero portate alla luce tra la primavera del 1849 e l’inverno del 1850. Nel corso dei due anni vennero acquistate 321 braccia di scalini di marmo bianco e 717 braccia di fascia di bardiglio (circa 160 e 350 metri). La progettazione del lavoro venne affidata all’ingegnere Tito Capusogli, che per sistemare il nuovo marciapiede dodecagonale fece abbassare il terreno circostante fino all’altezza conveniente e progettò l’apposizione di 12 colonnini, poi rimossi nel secondo dopoguerra.

Nel 1850, l’intervento all’esterno del Battistero poteva dirsi ultimato, ma già da due anni erano iniziati i lavori di restauro al suo interno dove vi si inseriscono le nuove vetrate del Botti; si bandisce inoltre un concorso per gli affreschi della cupola (peraltro mai realizzati). La loro conclusione verrà celebrata ufficialmente il 16 agosto 1856, con la riapertura al culto dell’edificio. Una iscrizione incisa in un pilastro interno, poco più in basso della data di fondazione dell’edificio, ricorda l’imponente restauro allora compiuto. La distanza tra le diverse concezioni del restauro alla base delle polemiche che avevano accompagnato costantemente i lavori si riflette nel confronto tra il necrologio dell’Operaio Carmignani - *"la meravigliosa mole del Battistero ... allo splendore della pristina dignità restituì"*, e le rassegnate parole del ben noto architetto Ruskin che nel 1845 da Pisa scrive: *"povero caro vecchio Battistero, tutti i suoi preziosi e vetusti intagli sono sparpagliati nello spazio erboso antistante; gli operai fanno portentosi quando si tratta di smantellare ... ma poco importa: il vecchio battistero è spacciato"*.

Descrizione attuale del Battistero di Pisa

Il Battistero è a pianta circolare, ricoperto di marmo bianco, prevalentemente in stile romanico pisano, ma decorazioni e bifore evidenziano un'influenza gotica. L'edificio segue lo stesso orientamento del complesso monumentale della piazza, con l'ingresso originale posto ad Ovest e la porta di uscita a Est, secondo l'antica formula del rito del battesimo.

Il Battistero presenta all'esterno numerosi e ricchi ornati, elementi scultorei elaboratissimi e numerosi elementi statuari; la densità e la composizione del complesso sistema di sculture e decori architettonici rende chiara e unitaria la percezione complessiva dell'edificio. Tutta l'architettura è realizzata in pietra di San Giuliano, tranne alcune colonne in granito proveniente dall'Isola d'Elba e dalla Sardegna.

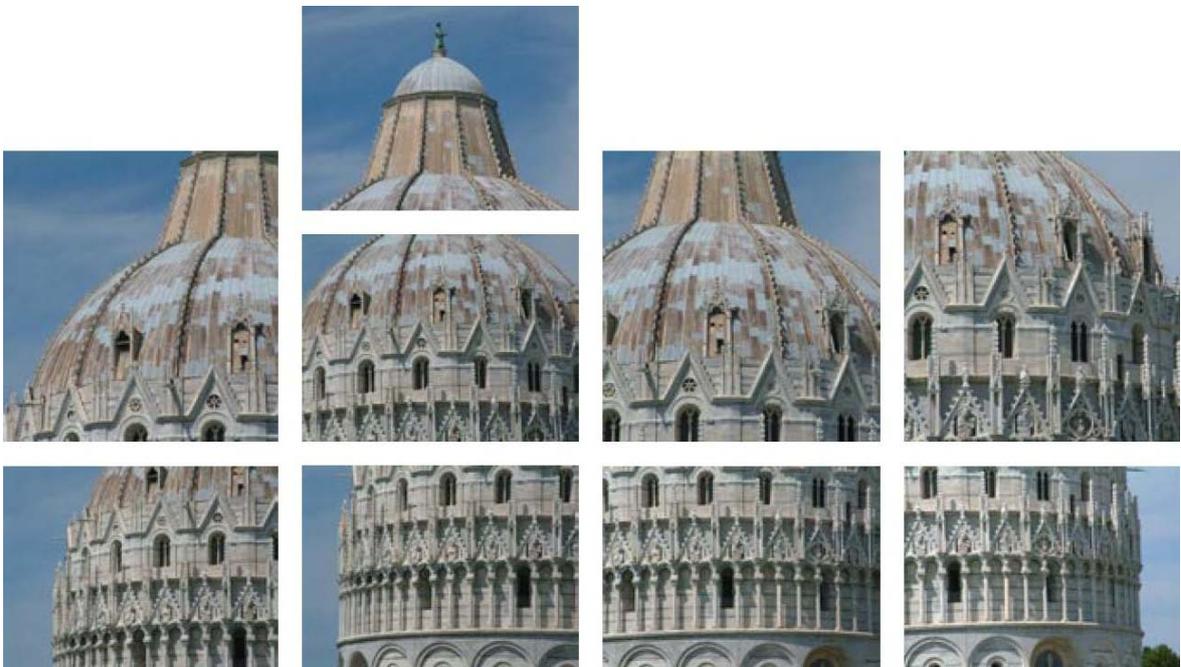


Fig. 13: Particolari costruttivi, lato Sud - Ovest

Il prospetto è suddivisibile in tre fasce orizzontali chiaramente distinguibili, al di sopra delle quali è impostato il sistema di cupole che coprono l'edificio. Ad ognuno di questi ordini corrispondono altrettanti livelli interni del Battistero: il piano terra, la galleria del primo piano e la galleria del secondo, ottenuta dal sistema delle volte di copertura. Esternamente la prima fascia è quella più semplice, è suddivisa in venti campate cieche, con portali posti ai quattro punti cardinali.

In ogni campata è posta una finestra stretta e alta, piuttosto profonda e chiusa da una vetrata a mosaico; le forme sono molto semplici e anche le ghiere degli archi a tutto sesto di ogni campata sono essenziali e piatte, sormontate da un elemento con motivo ornamentale a foglie. I capitelli delle colonne sono di ordine corinzio, mentre le finestre presentano come unico decoro una

semplice cornice all'imposta dell'arco. Il paramento murario è scandito da fasce di pietra bicolore; i conci utilizzati presentano la stessa altezza e ad ogni tre fasce di pietra chiara se ne trova una più scura di colore verde.

La fascia alla base è composta da due gradoni che corrispondono ai dadi delle colonne, sormontati da una serie di cornici che riprendono le modanature del basamento e le curvano lungo la superficie muraria. La parte terminale della prima fascia presenta invece un motivo a grandi triangoli che chiudono in una serie di elementi concentrici le superfici di risulta tra un arco e l'altro.

Le quattro campate che ospitano gli accessi hanno invece ricevuto un trattamento diverso e presentano una maggior ricchezza di elementi, con architravi e piedritti scolpiti con figure umane e animali, con cicli di elementi simbolici e rappresentazioni di vicende o personaggi biblici.

A presentare la maggior ricchezza di finiture e ornati è la porta Est, rivolta verso la facciata della Cattedrale, dove anche i fusti delle colonne sono scolpiti con un intricato disegno floreale, a differenza di altri lasciati semplicemente lisci.

La seconda fascia si stacca da quella inferiore mediante una cornice scolpita secondo un particolare motivo a foglie, al di sopra del quale, dopo uno spesso listello, si trovano i basamenti di un fitto ordine di colonne dal fusto cilindrico e capitelli tra loro diversi per foggia o decoro; in tutto l'ordine ne sono presenti ottanta. Al di sopra di questa fascia di colonne si sviluppa la parte del coronamento della galleria, che presenta la maggior ricchezza di elementi scultorei e ornati di tutto l'edificio; ogni capitello è sormontato da una protome e l'archetto di raccordo tra le colonne oltre ad un ricco motivo ornato presenta anche una protome, posta in chiave d'arco. In maniera alternata, al di sopra delle colonne è posta una serie di tabernacoli, in parte aggettanti su mensole, tutti terminanti in un alto pinnacolo ornato con motivo floreale.

A chiudere l'apparato della facciata, prima dell'imposta della cupola, si trova una terza fascia di finestre che affacciano nella galleria superiore, disposte fuori simmetria rispetto allo schema inferiore; si tratta di aperture piuttosto profonde, a tutto sesto, con finestratura bifora, dove la colonna presenta un capitello di minor accuratezza scultorea e maggior uniformità formale, sempre a motivo floreale.

Ogni settore della terza fascia della facciata è chiuso da una cuspide ornata con foglie rampanti e coronata con un giglio. Nella cuspide, in asse con la sottostante finestra si trova un oculo, che però è stato ormai tamponato. I settori sono intervallati da una parasta angolare che presenta gli stessi ordini di cornici e ornamenti dei fronti ed è conclusa con un particolare ornamento a tre guglie da cui emergono, in maniera alternata, i doccioni della cupola.

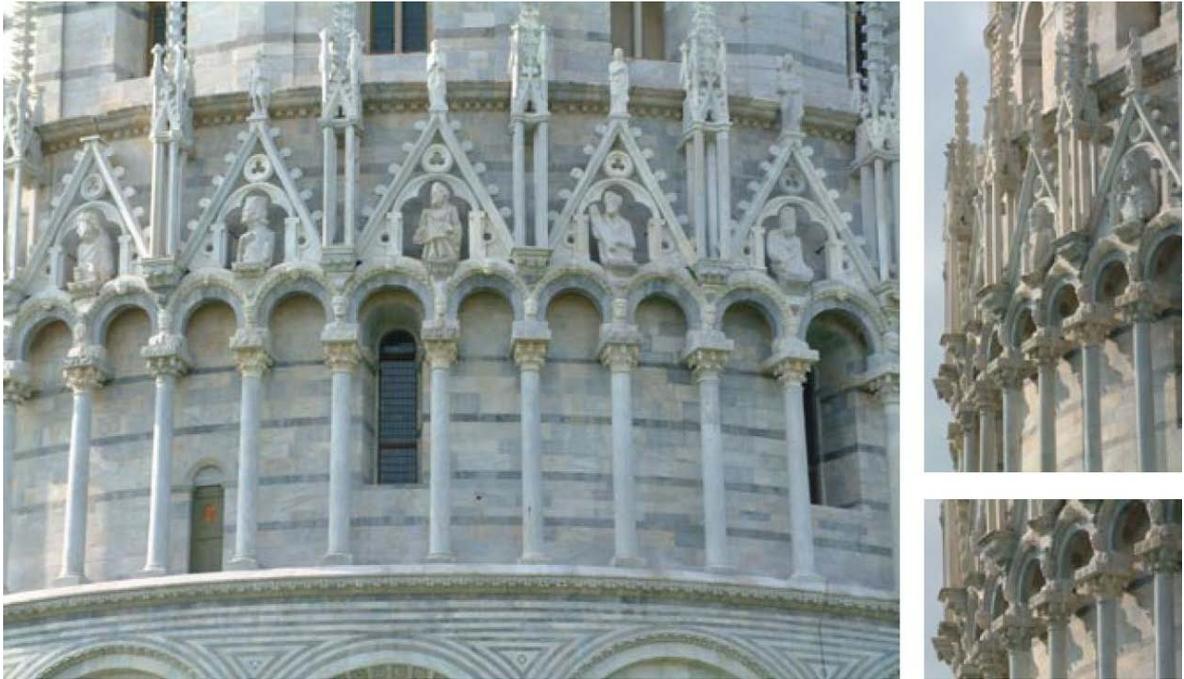


Fig. 14: Particolare della gallerie sterna del secondo ordine, lato Nord

La copertura dell'edificio è una struttura complessa, di cui dall'esterno si coglie la grande cupola a dodici settori e parte della volta piramidale che segue le stesse forme percepibili dall'interno.

Ogni settore della cupola presenta una finestra con edicola cuspidata; tutte queste finestre, a eccezione di quella che guarda la Cattedrale sono state murate. L'elemento di maggior evidenza nella copertura è la sua divisione in due grandi porzioni, di sei settori ognuna, differenti nel tipo di manto, in piombo per la parte verso Ovest e verso Sud e in laterizio per il lato Est e Nord. La ragione di questa scelta non è certa; alcuni sostengono che sia dovuta alle diverse condizioni di esposizione solare e climatica dell'edificio (soprattutto rispetto ai venti), altri attribuiscono una funzione di "faro" notturno (nelle città di mare vi erano numerose strutture che fungevano da enormi meridiane, sfruttando il riflesso della luna sulle lastre bianche per essere visibili alle navi da grandi distanze). La parte coperta in piombo presenta grandi lastre rettangolari, disposte verticalmente, mentre la parte coperta in cotto è costituita da speciali coppi e tegole, di dimensioni maggiorate rispetto alle convenzionali, non appoggiati ma murati per ovviare alla fortissima pendenza della cupola. Ogni settore della cupola è diviso dal successivo da un costolone in pietra e foglie rampanti che risalgono l'intera copertura per andare a fermarsi sulla cornice che fa da imposta alla cupoletta terminale, al di sopra della quale è posta una statua in bronzo raffigurante San Giovanni Battista.

Entrando nel Battistero, passando dall'attuale ingresso principale, troviamo alle spalle la piazza e la facciata della Cattedrale, per accedere in un ampio ambiente che permette di percepire lo spazio architettonico nel suo totale sviluppo. Così come dall'esterno è possibile, con un solo colpo d'occhio, apprezzare l'edificio nel suo complesso, ugualmente la visuale dall'interno è unitaria e lo

sguardo può spaziare liberamente dalla pavimentazione al primo ordine di colonne, alla galleria fino all'intradosso della volta e alla cupoletta della sommità senza che qualche elemento limiti la visibilità di altri.



Fig. 15: Interno, veduta da Nord - Est con vasca battesimale

L'ambiente interno al piano terra è costituito da un ampio vano centrale concluso da una serie di alte colonne e pilastri, in un numero complessivo di dodici, con la disposizione di un pilastro ogni due colonne; i pilastri sono realizzati ancora una volta in blocchi di pietra di San Giuliano ed hanno un particolare impianto cruciforme con i lati longitudinali inclinati secondo i raggi dell'impianto. Come precedentemente accennato, le colonne sono invece di granito di varia provenienza, prevalentemente dalle cave dell'Isola d'Elba e dalla Sardegna. Tutte e quattro le porte di accesso, dall'esterno conducono alla galleria del piano terra, alta, coperta con volte a crociera di impianto trapezoidale con le basi curve. Le pareti perimetrali della galleria presentano le sole aperture delle finestre ed un'altra serie di gradoni che vanno a costituire un sistema di sedute perimetrali.

I paramenti sono bicolore secondo lo stesso motivo presente all'esterno, con rari inserimenti di lapidi e scritte commemorative, che si trovano invece prevalentemente sulle superfici dei pilastri.

Colonne e pilastri sono connessi tra loro da arcate a tutto sesto, incurvate secondo l'andamento dell'impianto, con una leggera cornice a semplificare il raccordo tra il paramento dell'aula centrale e le volte a crociera della galleria. I capitelli dei pilastri sono ornati con motivi floreali, e sono tra loro uguali; il capitello delle colonne, pur rispettando un modello sostanzialmente simile, presenta motivi differenti, con elementi zoomorfi ed antropici, con animali simbolici e la rappresentazione di creature mitologiche e della tradizione popolare.

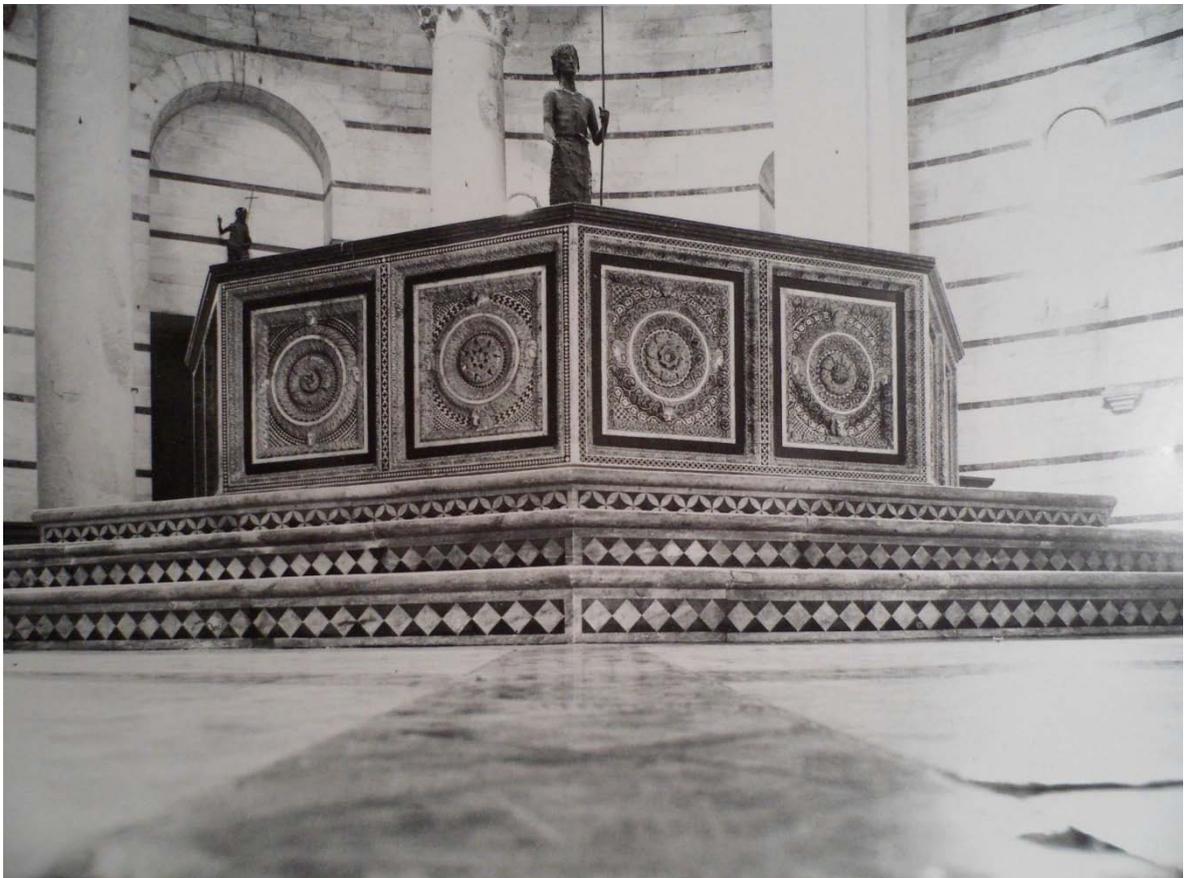


Fig. 16: La vasca battesimale di Guido da Como

Gli elementi scultorei presenti al piano terreno sono pochi ma molto ricchi. Di particolare rilievo il fonte battesimale ottagonale, molto grande e rialzato di tre gradini al di sopra del piano di calpestio, con una vasca ottagonale con quattro bacini minori, riccamente lavorata, specialmente per quanto riguarda la parte dei plutei e la pavimentazione della vasca. I primi sono disposti a due coppie per ogni lato del poligono, presentano un motivo scultoreo basato su un ricco rosone centrale su cui si innestano, in ogni quadrante, delle teste di uomini, animali e creature fantastiche. Per quel che riguarda la pavimentazione, questa è composta da un mosaico di tessere di marmi bianchi, rossi e blu, a formare un motivo di onde, con chiaro richiamo alla simbologia dell'acqua corrente richiesta nelle prime forme del rito battesimale. Al centro del fonte, al di sopra di un basamento a colonna, si trova una scultura in bronzo raffigurante San Giovanni Battista, ma questa è un'opera recente, posizionata al posto dell'originale, pertanto successiva al fonte.

L'altare con un'ampiezza di poco inferiore a quella del fonte, si trova alle spalle del fonte stesso. Questo non presenta particolari elementi di pregio, ma la pedana retrostante, allo stesso livello del secondo gradino del fonte, presenta una pavimentazione a mosaico ricchissima e di notevole bellezza. Il rivestimento è suddiviso in tre specchi rettangolari, a formare una "C" attorno all'altare; due di queste, le più grandi, disposte lateralmente all'altare, presentano un motivo a forme geometriche rette intrecciate, a formare numerosi angoli acuti e triangoli, in marmi e graniti di vario colore: bianche, nere, rosse, verdi, indaco, ocre. La terza parte della pavimentazione presenta le stesse soluzioni cromatiche e la stessa varietà di elementi lapidei, ma questa volta il motivo geometrico ottenuto è basato su linee curve e circolari, disposte secondo involucri di scaglie di varia foggia e colore.

Ad Est del fonte battesimale si trova il pulpito, opera di Nicola Pisano, eseguito circa un secolo dopo la costruzione del fonte battesimale. Il pulpito, costruito e scolpito in marmi diversi, prevalentemente bianchi e rossi, presenta una forma esagonale con sei colonne perimetrali di sostegno, tre delle quali poggianti su statue di leoni, e una colonna centrale con alla base figure umane e zoomorfe. Al di sopra di ognuna delle colonne perimetrali è stata posta una statua, nel loro insieme rappresentanti la Carità, la Fortezza, l'Umiltà, la Fedeltà, l'Innocenza e la Fede. I cinque pannelli che formano la parte superiore del pulpito sono separati da coppie di colonnine di marmo rosso. Il primo pannello presenta la Natività di Cristo, nel secondo e nel terzo è raffigurata l'Adorazione dei Magi, nel quarto si trova la Presentazione al Tempio, nel quinto e sesto pannello si trovano rispettivamente le scene della Crocifissione e del Giudizio Universale.

Per il resto la pavimentazione del piano di ingresso presenta una struttura organizzata in grosse linee di marmo nero intervallate da specchi di marmo bianco, a formare una maglia a raggiera basata sull'ottagono del fonte battesimale, con la presenza di alcune lapidi di sepolture e alcune rare incisioni raffiguranti simboli o lettere.



Fig. 17: Particolari della pavimentazione a mosaico di marmi e graniti dell'altare



Fig. 18: Il pulpito, opera di Nicola Pisano, posto a fianco del fonte battesimale

Lungo la parete perimetrale della galleria del piano terra si trovano due porte spoglie e di modeste dimensioni che danno accesso ciascuna ad una stretta scala che si sviluppa internamente allo spesso setto murario delle scale di accesso ai piani superiori; queste due rampe si sviluppano internamente al setto murario del Battistero, con varie aperture che si affacciano sia sull'esterno che sull'interno. Le due scale che proseguono ininterrottamente fino alla galleria del primo piano sono delle stesse dimensioni di quella inferiore, ma molto più essenziali e prive di particolari ornamenti. Le colonne e i pilastri assumono qui il medesimo aspetto, riducendo gli ornati dei capitelli a semplici cornici, presentando volte a botte, anche in questo caso impostate su impianto trapezoidale con basi curve. La galleria è pavimentata in cotto con semplici mattonelle rettangolari e presenta un doppio e ampio gradino che dà accesso al vano centrale. La parte alta del paramento interno della galleria presenta molti elementi interrotti, forse testimonianza della situazione di incertezza del cantiere del battistero nelle fasi di chiusura di questo secondo ordine. La cosa più evidente nella copertura della galleria del primo piano è la disposizione delle finestre che in virtù delle ripetute variazioni di simmetria risultano alquanto assortite nelle forme e dimensioni e nel comporsi con le arcate trasversali che collegano l'anello dei pilastri con la parte perimetrale.



Fig. 19: Setto che divide la galleria tra le due cupole e finestra tamponata nel sottovolto

Dal secondo livello, per poter salire alla galleria delle volte, si può usare una sola scala; in origine le due rampe erano uguali e da entrambe le parti si poteva arrivare al terzo livello, ma per problemi di degrado della struttura delle scala una delle due rampe è stata murata nell'ottocento e si possono percorrere solo una dozzina di scalini prima di incontrare la parete di tamponamento che la interrompe. La scala superstite si fa sempre più angusta durante la salita e al punto di sbocco al piano di calpestio della galleria permette di cogliere, attraverso una stretta finestrina, uno scorcio dell'imposta esterna della cupola, in un punto che altrimenti è impossibile vedere da terra. L'ambiente a cui si accede è una galleria anulare, spazio di risulta tra l'intradosso della cupola esterna e l'estradosso della volta a copertura del vano centrale; il piano di calpestio non corrisponde invece all'estradosso delle volte della seconda galleria, ma a quella che con tutta probabilità è la parte inferiore della copertura secondo il progetto originale di Diotallevi. L'intradosso della cupola esterna presenta, per ogni settore, una finestra bifora con un'apertura ampia circa un terzo della larghezza totale della vela, e che in altezza rimane entro la fascia dei primi quattro metri. Queste aperture, sono state tutte tamponate in passato per dare maggiore stabilità alla struttura della copertura. La tamponatura risulta un intervento molto aggressivo verso le forme architettoniche originali delle finestre, delle quali sono rimasti poco più che degli ingombri e poche cornici nella parte alta. Unica apertura preservata nel suo aspetto originale è la finestra che guarda la facciata del Duomo, dalla quale è possibile ammirare un bello scorcio della piazza. Per il resto il paramento murario non presenta particolari ornamenti, ma presenta alcune buche pontai e una risega per ogni setto divisorio, probabilmente utilizzate durante le fasi di costruzione della cupola esterna per sorreggere la centinatura.

Da uno dei settori è possibile accedere attraverso una scala a gradini in telaio di acciaio, all'esterno della volta piramidale, ma quest'ultima ha il solo scopo di permettere le operazioni di manutenzione ed ispezione al personale addetto.

Capitolo II

ANALISI DEI MOVIMENTI ALTIMETRICI

Definizioni

Geoide: superficie equipotenziale che passa per il livello del mare in un determinato punto.

Rete geodetica: insieme finito di punti posti sul terreno posizionati in un sistema di coordinate al fine di poter descrivere la superficie terrestre.

Le reti geodetiche possono essere di tre categorie:

- altimetriche o verticali (H);
- planimetriche orizzontali (ϕ , ω);
- plano-altimetriche (ϕ , ω , H);

dove H è la quota del punto rispetto al geoide, ϕ è la latitudine e ω è la longitudine.

Caposaldi: punti di osservazione delle reti altimetriche.

Vertici: tutti gli altri punti della rete geodetica.

Le reti possono essere anche distinte in:

- primo ordine (maggiormente precise);
- secondo ordine;
- terzo ordine.

Il caposaldo svolge la funzione di materializzazione di materializzare un punto di cui si vuole determinare la quota e possono essere orizzontali (pozzetti apribili o a muro) o verticali (piastrine con una linea incisa o una mensola che presenta una calottina sferica).

Vecchia rete di livellazione

Il primo caposaldo fu costituito dall' IGM (Istituto Geografico Militare) nel lontano 1886 per i grandi lavori di livellazione allora compiuti e poi collegato nel 1950 con la nuova rete geodetica fondamentale dello Stato. Questa linea di livello è tracciata in alto sullo stipite destro per chi entri della porta orientale ed è stata quotata + 6,79170 m sul livello medio del mare.

La prima commissione per lo studio delle condizioni statiche della Torre di Pisa venne istituita nel 1908 dal Ministero della Pubblica Istruzione che stabilì, con grande precisione (merito dei metodi usati dal Prof. Paolo Pizzetti, membro della commissione), la posizione altimetrica e planimetrica delle varie parti della Torre rispetto a capisaldi costituiti appositamente nella Piazza del Duomo di Pisa e fornì così elementi precisi di riferimento per rilevare poi nel tempo gli eventuali mutamenti che subissero la Piazza e la Torre. La commissione costituì nella Piazza del duomo sette capisaldi indicati con le lettere A, B, C, D, E, F, X (purtroppo andato perduto) le cui quote si riferivano al caposaldo precedentemente descritto. Quindi:

A = + 3,601 m. B = + 3,509 m. C = + 3,491 m.

D = + 3,156 m. E = + 3,297 m. F = + 3,199 m.

Inoltre fu misurata direttamente la base AB pari a 53,418 m. La quota di livello sullo stipite del Battistero e la base AB sono stati gli elementi fondamentali di riferimento di tutta la rete geodetica costituita dalla Commissione del 1908.

Nel 1928 il Prof. Gino Cassinis, membro della Commissione ministeriale allora in funzione per lo studio della statica della Torre, costituì altri 6 capisaldi: 4 indicati con α' , β' , γ' , δ' , sul piano superiore degli zoccoli di base di quattro delle quindici colonne che si vedono incassate nella parte più bassa della Torre; uno indicato con φ' , a destra dell'ingresso del Battistero (al disotto della linea incisa dall'I.G.M. nel 1886); e un altro ancora, indicato con ψ' , sulla base della colonna del cortile dell'Arcivescovado, immediatamente a destra entrando. Nel 1928-1929 questi 6 capisaldi furono quotati altimetricamente rispetto al livello medio del mare, congiungendoli con la linea di livello del Battistero. I risultati furono i seguenti:

$\alpha' = + 2,6217$ m. $\beta' = + 3,0078$ m. $\gamma' = + 2,3549$ m.

$\delta' = + 1,4521$ m. $\psi' = + 5,7881$ m. $\varphi' = 4,2866$ m.

Nel 1964 venne istituita la Commissione Polvani dal nome del Ministro per i lavori Pubblici (decreto n° 5806) con lo scopo di accertare le condizioni tecniche della Torre Campanara di Pisa rispetto alla quale veniva emanato un bando di concorso che si occupasse del consolidamento della stessa.

La commissione stabilì all'unanimità l'esigenza di indagini approfondite per la valutazione dei margini di sicurezza.

Per meglio definire i movimenti altimetrici della Piazza e dei monumenti che contiene, fu costituito un gruppo di lavoro che effettuò la ricognizione dei capisaldi creati fin dal 1911 nella Piazza del Duomo e costituì dei nuovi capisaldi, in modo che le acquisizioni dei dati acquistassero una maggiore affidabilità statistica.

Dal dicembre 1965 in poi l'Istituto Geografico Militare (I.G.M) di Firenze, per conto della Commissione nominata lo stesso anno dal Ministro dei Lavori Pubblici eseguirà periodicamente con il metodo rapido del Pizzetti, e indipendentemente dalle osservazioni svolte precedentemente, misurazioni ottico-geodetiche circa la posizione dei vari punti della Piazza.

I capisaldi esistenti avevano delle teste tuttora piane e non si prestavano, per questo, a gli strumenti usati nel 1965 per e rilevazioni altimetriche. Quindi venne cementato un bullone di acciaio inossidabile a testa sferica (detto "Strumentale") a lato di ogni caposaldo sulla stessa piastra di appoggio chiamati \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , \bar{D} , \bar{E} , \bar{F} ed infine è stato ricostituito il caposaldo X (rinominato \bar{X}) pressappoco nel posto originario.

I nuovi capisaldi furono così disposti:

- 13 capisaldi, costituiti da bulloni in bronzo del tutto uguali ai precedenti, furono fissati alla base delle colonne del primo ordine della Torre, in modo da avere almeno un caposaldo alla base di ogni colonna.

- 10 capisaldi in sottosuolo, fatti di porcellana compressa, fissati su grossi cippi di calcestruzzo e protetti opportunamente con pozzetti di ghisa e chiusino, furono distribuiti nel prato della Piazza del Duomo, scegliendo numero e luogo in modo da ampliare e infittire la rete, renderne i poligoni più idonei alle osservazioni e poter disporre in essa almeno un caposaldo (che poi sarà indicato come caposaldo S) in zona abbastanza appartata rispetto al traffico cittadino. I 10 capisaldi in questione verranno indicati con le lettere: $\overline{H}, \overline{I}, \overline{L}, \overline{M}, \overline{N}, \overline{O}, \overline{P}, \overline{Q}, \overline{R}, \overline{S}$.
- 10 capisaldi, costituiti da bulloni di bronzo del tutto uguali ai precedenti usati alla base della Torre, furono distribuiti sui basamenti del Duomo e del Battistero in luoghi opportunamente scelti ai fini perseguiti. I 10 capisaldi in questione sono indicati con i numeri $\overline{16}, \overline{17}, \overline{18}, \overline{19}, \overline{20}, \overline{21}, \overline{22}, \overline{23}, \overline{24}, \overline{25}$.

Alla fine del 1965 dunque, i capisaldi della rete distesa in tutta la Piazza del Duomo e in particolare intorno e addosso alla Torre, sono in totale 56, comprendendo nel conto il caposaldo fondamentale per le misure altimetriche costituito dalla linea tracciata sullo stipite destro entrando nel Battistero entrando dalla porta orientale.

Ricapitolando:

- Linea fondamentale di livello al Battistero (1886, 1950);
- Capisaldi più vecchi (1911 e 1928): A, B, C, D, E, F, $\alpha', \beta', \gamma', \delta', \phi', \psi'$;
- Caposaldo ricostruito X (1965);
- Capisaldi installati nel 1965: $\overline{A}, \overline{B}, \overline{C}, \overline{D}, \overline{E}, \overline{F}, \overline{H}, \overline{I}, \overline{L}, \overline{M}, \overline{N}, \overline{O}, \overline{P}, \overline{Q}, \overline{R}, \overline{S}, \overline{1}, \overline{2}, \overline{3}, \overline{4}, \overline{5}, \overline{6}, \overline{7}, \overline{8}, \overline{9}, \overline{10}, \overline{11}, \overline{12}, \overline{13}, \overline{14}, \overline{15}, \overline{16}, \overline{17}, \overline{18}, \overline{19}, \overline{20}, \overline{21}, \overline{22}, \overline{23}, \overline{24}, \overline{25}$.

Tra il dicembre del 1965 e il marzo del 1966 e tra il dicembre del 1966 e del 1967, vennero misurate le quote di tutti i capisaldi rispetto alla linea di livello tracciata sul Battistero. Le misure furono condotte con un tale rigore che la precisione raggiunta può ritenersi superiore ad un quarto della precisione strumentale e quindi è possibile ritenere che le misure possano essere affette da un errore medio non superiore a $\pm 0,2$ mm.

Nuova rete di livellazione

La rete di livellazione precedentemente descritta è rimasta tale fino al 1993, anno in cui a seguito di una convenzione tra il Consorzio Torre di Pisa e il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano e in preparazione dei futuri lavori di sottoescavazione della Torre, venne formata quella che possiamo considerare la nuova rete di livellazione della Piazza. Nella nuova rete, come vedremo, oltre ad una serie di nuovi e significativi capisaldi, la principale caratteristica è quella di aver riferito tutte le quote ad un nuovo caposaldo costituito da un palo di acciaio infisso ad una profondità tale (arriva ad “appoggiarsi” allo strato delle sabbie profonde) da considerarlo indipendente da ogni movimento della superficie della stessa Piazza.

La prima operazione eseguita dagli esperti del Politecnico fu quella di verificare tutti i capisaldi della rete di livellazione geometrica che da anni controllava i movimenti altimetrici della Piazza del Duomo e delle fondazioni della Torre.

Dal sopralluogo emerse il buon stato di conservazione dei due capisaldi φ' e ψ' istituiti dal Prof. Gino Cassinis nel 1928. Il primo, φ' , posto a destra della porta orientale del Battistero, ha svolto nella vecchia rete di livellazione della piazza, il ruolo di punto di riferimento. Il secondo ψ' , è posto sulla base della colonna del cortile dell'Arcivescovado, immediatamente a destra entrando.

I capisaldi A, B, C, D, E, F, (creati dalla Commissione del 1908 e messi in opera nel 1911) e i capisaldi $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{E}, \bar{F}$, (istituiti nel 1965 da Salvioni, dell'Istituto Geografico Militare di Firenze, ancora oggi in uso) hanno presentato un ottimo stato di conservazione; questi ultimi capisaldi sono costituiti da bulloni di acciaio inossidabile a testa emisferica e furono ubicati in posizione adiacente ai precedenti del 1911.

I capisaldi $\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}, \bar{6}, \bar{7}, \bar{8}, \bar{9}, \bar{10}, \bar{11}, \bar{12}, \bar{13}, \bar{14}, \bar{15}$, posti alla base delle colonne del primo ordine della Torre, risultarono ben conservati, così come i capisaldi $\bar{H}, \bar{I}, \bar{L}, \bar{M}, \bar{N}, \bar{O}, \bar{P}, \bar{Q}, \bar{R}$, in porcellana compressa e posti in opera nel 1965. Il caposaldo \bar{S} , risultò invece inaccessibile.

Il caposaldo \bar{X} , messo in sostituzione di quello nominato X, andato perso nel 1965 presentò uno stato di conservazione sufficiente, ma non ottima come i precedenti.

Per quanto riguarda i punti secondari della rete, dal sopralluogo, risultarono perduti i vertici di livellazione che collegavano il caposaldo ψ' posto nell'Arcivescovado, con il resto della rete.

Effettuato il sopralluogo e constatato il livello di conservazione dei capisaldi che costituivano la rete, gli operatori del Politecnico passarono alla seconda fase: decisero di elaborare il progetto di una nuova rete di livellazione che comprendesse i capisaldi della rete storica (risultati per la grande maggioranza in un buonissimo stato di conservazione) e la integrasse con una serie di nuovi capisaldi qui di seguito elencati:

- 9 capisaldi indicati con i numeri: 231, 232, 234, 235, 236, 238, 239, 240, 241, posti a formare un anello di livellazione che collega il vertice ψ' con il resto dei capisaldi presenti

nella Piazza del Duomo. Di questi, 3 sono costituiti da capisaldi in acciaio a testa sferica e i rimanenti da chiodi infissi nel terreno.

- 4 capisaldi in acciaio con testa sferica chiamati: 306, 506, 932, 933, infissi nella pietra dei canali di raccolta dell'acqua piovana al limite nord (506) e sud (306) del transetto Duomo e di fronte alla facciata del Duomo stesso (932 e 933).
- 3 capisaldi posti lungo l'anello di collegamento del nuovo punto fisso profondo nominato: DD1 con la rete di livellazione. Il vertice 126 è adiacente al Palazzo dell'Opera della Primaziale di Pisa ed è costituito da un caposaldo in acciaio a testa sferica. Il vertice 150 era in origine un semplice chiodo di passaggio, sostituito in seguito con il vertice 9150, formato da un caposaldo a testa sferica in acciaio inox collocato su apposito pilastro, come il punto 123.
- 9 capisaldi con stadiette in acciaio invar centimetrata, poste all'interno della Torre Campanaria, indicate con i numeri: 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109.
- 6 capisaldi a testa sferica, in acciaio, posti lungo il settore nord del catino della Torre, denominati: 201, 202, 203, 204, 205, 206.
- 4 capisaldi a testa sferica, anche questi in acciaio, posti sulla sommità del muro di contenimento che circonda il catino alla base della Torre. I capisaldi sono posti rispettivamente a est (209), a ovest (207) e lungo la direzione di massima pendenza della Torre; a nord (208) e a sud (210).
- 24 capisaldi posti all'interno di chiusini metallici e disposti in maniera da formare 4 raggi aventi origine dal bordo del catino della Torre e disposte lungo la direzione di massima pendenza della Torre (che è più o meno coincidente con la direzione nord-sud) e lungo la direzione est-ovest. I punti chiamati: 1, 2, 3, 4, 5, 6, sono del braccio nord; il 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 costituiscono il braccio sud; i punti: 14, 15, 16, 17, 18 il braccio ovest e i punti: 19, 20, 21, 22, 23, 24 il braccio in direzione est.

Alla fine di questo lavoro, la nuova rete di livellazione era, (ed è ancora oggi), composta da 139 capisaldi, collegati da 176 misure di dislivello. La livellazione di tipo "esteso" o "generale", comprende tutti i capisaldi posti nella Piazza del Duomo e nella Torre, considerando quindi anche il caposaldo profondo in acciaio DD1 e i capisaldi ϕ' e ψ' . Per effettuare una serie di misure più ampie, utili per monitorare la Torre, senza dover ogni volta rifare la livellazione dell'intera piazza, è stata denominata rete "parziale" l'insieme dei capisaldi posti nelle adiacenze della Torre, sulla Torre stessa, e dal caposaldo di riferimento DD1. Mentre la livellazione estesa veniva rimisurata ogni anno, quella parziale poteva essere misurata ogni 3-4 mesi, con un notevole risparmio di tempo; si ricorda che l'intervento di ristrutturazione della rete di livellazione è stato programmato per poter avere più dati possibili sui movimenti della Torre e per poter poi monitorare i lavori di sotto escavazione che si sarebbero eseguiti qualche anno dopo.

Attraverso la prima livellazione “estesa” eseguita nei giorni 3, 4 e 5 maggio 1993 fu calcolata la quota del nuovo punto fisso DD1, (si può considerare un punto indipendente dalla Piazza in quanto è fondato a una profondità notevole, su uno strato di sabbie profonde considerate ferme), rispetto a quello che fino ad allora era considerato il punto di riferimento dell’intera Piazza, e cioè il punto ϕ posto alla destra del portale orientale del Battistero. Da questa data in poi il punto DD1 è stato considerato come il nuovo vertice di riferimento a quota vincolata.

La strumentazione che utilizzarono gli operatori del Politecnico di Milano, per le operazioni di misura dei dislivelli, era composta da un livello automatico Zeiss Nil, dotato di lamina pianoparallela mezzocentimetrata e micrometro, in grado di garantire un errore quadratico medio chilometrico inferiore ai $\pm 0,2$ mm. e una coppia di stadie a gradazione mezzocentimetrata in invar, di 3 metri, dotate di supporti telescopici di sostegno e di livella sferica per il posizionamento in verticale.

Per la compensazione della misure scelsero il metodo dei minimi quadrati, secondo l’approccio alle osservazioni indirette.

In questo lavoro svolto dal Politecnico di Milano, le operazioni di livellazione geometrica, avevano il principale scopo di valutare i movimenti della Torre e dei capisaldi posti nelle vicinanze, durante le operazioni di posa in opera dei contrappesi in piombo che vennero installati alla Torre come provvisorio rimedio alla progressiva rotazione, in attesa di programmare quello che sarebbe poi stato l’intervento risolutivo della sottoescavazione.

Per questo motivo (come già accennato) la parte della rete di livellazione nell’area prossima alla Torre, nominata “parziale” assumeva in quel contesto una maggiore importanza rispetto a quella “generale” che descrive le deformazioni altimetriche di punti lontani dal cantiere della Torre; utile invece nel nostro caso per valutare le variazioni altimetriche nell’area del Battistero.

Poiché la rete di tipo “generale” ingloba anche quella “parziale”, sarebbe successo che nelle date in cui si sarebbero effettuate le misure di tipo “generale”, se la compensazione fosse stata fatta globalmente, le misure delle quote della “parziale” avrebbero risentito l’influenza delle variazioni dell’intera Piazza. Questo avrebbe comportato che i capisaldi più importanti in quel contesto (quelli nell’area della Torre) non sarebbero più stati perfettamente confrontabili con le rispettive quote calcolate in date diverse dove si procedeva solo con la rete “parziale”.

Per ovviare a questo problema decisero di compensare sempre separatamente le misure relative allo schema “parziale”. La restante parte di rete altimetrica (utilizzata dal collega Capocchi, per le sue osservazioni), venne dunque appesa alla “parziale” vincolandone le quote precedentemente calcolate.

Conviene ricordare, (per chi volesse rieseguire la serie storica delle quote di alcuni punti) che nella vecchia rete di livellazione i diversi capisaldi della Piazza, sono stati codificati con metodologie diverse nel corso del tempo. Ad esempio i capisaldi costituiti nel 1911 vennero identificati con una lettera alfabetica maiuscola; ai successivi vertici, (inseriti in adiacenza ai primi per permettere un

più accurato posizionamento della stadia), è stata aggiunta alla lettera del corrispondente punto una soprasegnatura. Anche per i capisaldi posti intorno al basamento della Torre, alla base del Duomo e del Battistero, (nella vecchia rete) si è in presenza di un differente metodo di codifica, consistente in un numero intero soprasegnato. I riferimenti fondamentali posti al Battistero e all'Arcivescovado hanno invece mantenuto il proprio nome in lettere greche con apice (ϕ' e ψ'). Per ultimi, tutti i capisaldi di classe inferiore distribuiti su tutta la Piazza del Duomo, hanno un codice composto da un numero romano e un numero intero; il primo indica l'anello di appartenenza, il numero intero è il codice di riconoscimento progressivo.

Nella nuova rete di livellazione, per risolvere i problemi del trattamento dei dati, soprattutto se eseguiti con programmi informatici, scelsero di associare ad ogni "vecchio" codice un nuovo e semplice codice di tipo numerico. Di seguito verranno riportate le tabelle che individuano la conversione tra le due convenzioni che chiameremo "storica" o "del Consorzio" la prima e "del Politecnico" la seconda, solo per i vertici utilizzati per l'analisi dei movimenti altimetrici dal collega Capocchi:

Nome caposaldo con convenzione del Consorzio	Nome caposaldo convenzione Politecnico di Milano
Φ	100
Ψ	1020
A	1010
B	1008
C	1009
D	1013
E	1011
F	1018
H	1005
I	1006
L	1002
M	1004
N	1012
O	1015
P	1017
Q	1016
R	1014
X	1003
DD1	999

Nome caposaldo con convenzione storica	Nome caposaldo convenzione Politecnico di Milano
VII ₅	705
VII ₆	706
$\bar{1}$	901
$\bar{2}$	902
$\bar{3}$	903
$\bar{4}$	904
$\bar{5}$	905
$\bar{6}$	906
$\bar{7}$	907
$\bar{8}$	908
$\bar{9}$	909
$\bar{10}$	910
$\bar{11}$	911
$\bar{12}$	912
$\bar{13}$	913
$\bar{14}$	914
$\bar{15}$	915
$\bar{16}$	916
$\bar{17}$	917
$\bar{18}$	918
$\bar{19}$	919
$\bar{20}$	920
$\bar{21}$	921
$\bar{22}$	922
$\bar{23}$	923
$\bar{24}$	924
$\bar{25}$	925

La prima livellazione della nuova rete, effettuata dallo staff del Politecnico di Milano in data 3 maggio 1993, ha avuto lo scopo di definire la quota di riferimento del vertice “profondo” DD1 (999), posto nella Piazza, a nord della Torre, rispetto al caposaldo di riferimento “storico” φ' . La quota del vertice φ' (100) è stata assunta pari a + **4,28361** metri e considerata come riferimento per la compensazione di tutta la rete di livellazione.

La compensazione ha permesso di fissare la quota del caposaldo DD1 (999) che risultò essere pari a + **3,57232** metri. Tale quota costituì da quella data in poi il nuovo riferimento per tutte le successive operazioni di livellazione. Nel tempo si osserverà ovviamente un movimento relativo tra la quota del punto DD1 e quella del punto ϕ' , in quanto il primo è profondamente ancorato allo strato di terreno costituito da “sabbie profonde”, mentre il secondo è parte stessa della Piazza e quindi sensibile ai suoi movimenti. Calcolata in questo modo la quota del punto DD1 (999) eseguirono la compensazione con il nuovo riferimento.

Di seguito sono riportate le tabelle dei valori della serie storica ricavate dal Politecnico, per i punti utilizzati dal collega Capocchi per le indagini al Battistero.

Nome del caposaldo	Nome caposaldo convenzione Politecnico di Milano	QUOTA 1965 (metri) I.G.M.	QUOTA 1986 (metri) I.G.M.	QUOTA 1991 (metri) I.G.M.	QUOTA maggio 1993 (metri) (*) Politecnico di Milano	Variazione 1993-1991 (mm)
Φ	100	4.28361	4.28361	4.28361	4.28361	---
Ψ	1020	5.77961	5.76740	5.76620	5.76630	+0.10
A	1010	3.62409	3.62540	3.62560	3.62568	+0.08
B	1008	3.52806	3.53420	3.53460	3.53390	-0.70
C	1009	3.51512	3.51991	3.52040	3.52021	-0.19
D	1013	3.18077	3.17717	3.17780	3.17860	+0.80
E	1011	3.31780	3.31611	3.31750	3.31787	+0.37
F	1018	3.23152	3.24857	3.24970	3.25057	+0.87
H	1005	2.94978	2.96945	2.97110	2.97113	+0.03
I	1006	3.13916	3.14902	3.14810	3.14255	-5.55
L	1002	2.82738	2.83228	2.83290	2.80455	-28.35
M	1004	3.04261	3.04787	3.04830	3.04781	-0.49
N	1012	2.92684	2.91287	2.91300	2.91319	+0.19
O	1015	2.72955	2.71656	2.71590	2.71644	+0.54
P	1017	3.34187	3.33010	3.32920	3.32942	+0.22
Q	1016	3.68570	3.68610	3.68680	3.68651	-0.29
R	1014	3.96336	3.96900	3.96970	3.97007	+0.37
X	1003	2.58838	2.59620	---	2.59315	---

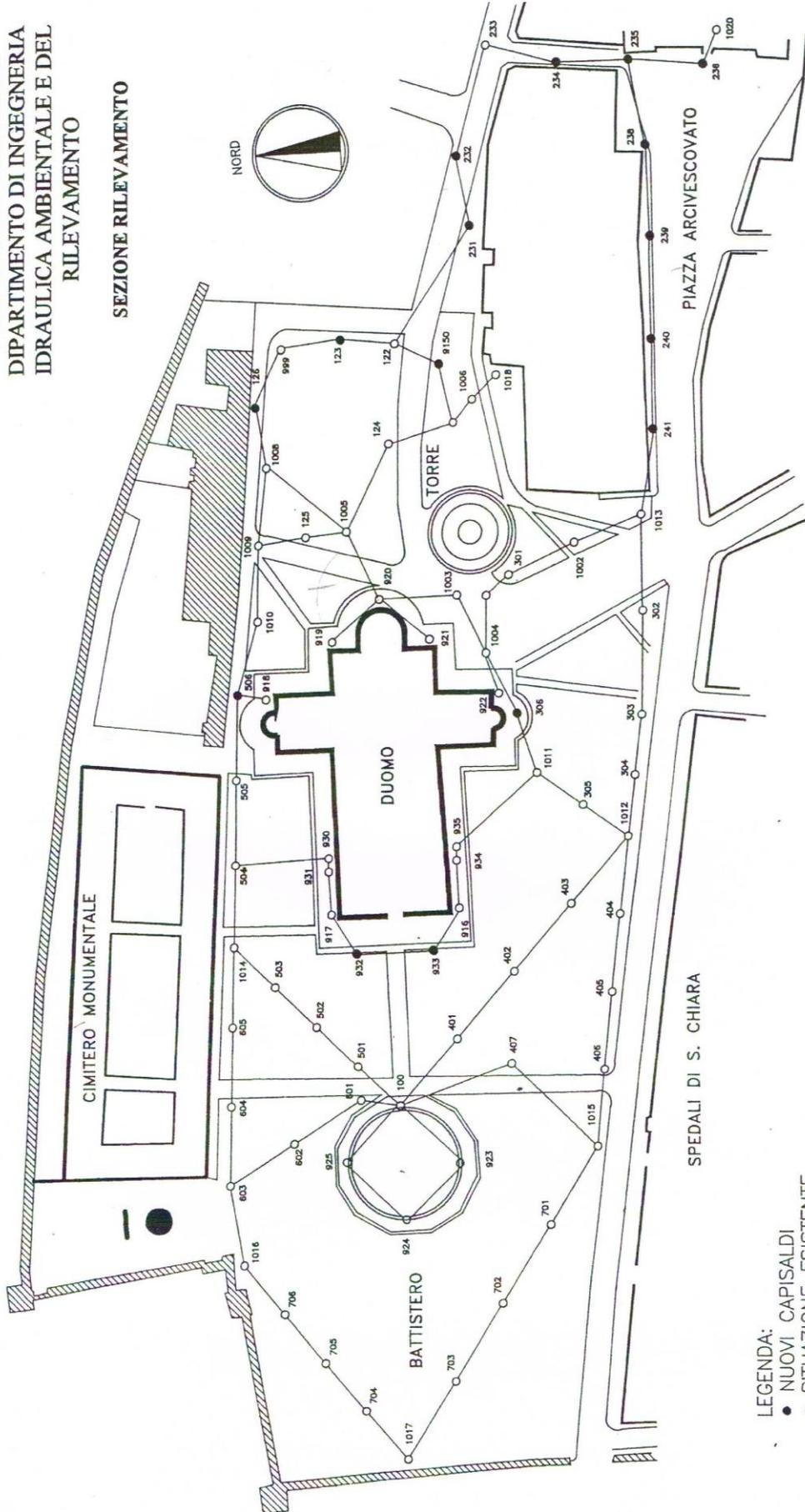
(BATTISTERO)

$\overline{23}$	923	4.36625	4.36493	4.36500	4.36532	+0.32
$\overline{24}$	924	4.51920	4.52068	4.52100	4.52090	-0.10
$\overline{25}$	925	4.36049	4.36263	4.36290	4.36258	-0.32

Rif. T01

POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
IDRAULICA AMBIENTALE E DEL
RILEVAMENTO

SEZIONE RILEVAMENTO



LEGENDA:
● NUOVI CAPISALDI
○ SITUAZIONE ESISTENTE

Analisi dei movimenti altimetrici del Battistero e della Piazza del Duomo

In questo paragrafo verranno rielaborate ed aggiornate le analisi dei colleghi Capocchi e D'Agresta sui dati che riguardano le quote di alcuni capisaldi misurate nel corso degli anni e le relazioni che hanno permesso di apprendere alcune informazioni sul movimento che, sia il Battistero, sia la Piazza del Duomo, hanno compiuto nel corso del tempo.

Capisaldi utilizzati per analizzare gli spostamenti del Battistero (tutti costituiti durante la Commissione Polvani nel 1964, tranne il 100 che fu istituito nel 1928 dal Prof. Gino Cassinis):

- φ' o 100 nella nuova nomenclatura, posto a destra dell'ingresso a Est del Battistero, al di sotto della linea incisa dell'I.G.M. nel 1886; di coordinate Est 395,6567 e Nord 548,3631.
- $\overline{23}$ o 923, posto a destra del portale Sud del Battistero, di coordinate Est 377,2690 e Nord 529,8082.
- $\overline{24}$ o 924, chiodo metallico posto sulla parte sinistra del gradino del portale Ovest del Battistero di coordinate Est 361,4332 e Nord 548,5682.
- $\overline{25}$ o 925, posto anche questo sulla parte sinistra del gradino del portale Nord del Battistero, di coordinate Est 380,4842 e Nord 563,8352.

Capisaldi per l'analisi degli spostamenti della Piazza del Duomo (tutti costituiti durante la Commissione Polvani nel 1964, tranne il vertice 14, istituito nel 1993 dal Politecnico di Milano):

- \overline{M} o 1004, costituito da un chiodo metallico da livellazione, posto in vicinanza del Duomo, nell'area che separa lo stesso dalla Torre; di coordinate Est 541,2216 e Nord 513,7343.
- \overline{N} o 1012, posto a sud del Duomo nella direzione dell'Ospedale del Santa Chiara a margine del prato; di coordinate Est 482,3935 e Nord 472,1942.
- \overline{O} o 1015, caposaldo in ceramica posto anche questo alla fine del prato verso l'ospedale, a Sud del Battistero; di coordinate Est 383,7078 e Nord 488,3145.
- \overline{P} o 1017, è il caposaldo più a Ovest dell'intera Piazza, in prossimità delle mura e della porta, realizzato in ceramica di coordinate Est 282,8006 e Nord 549,4471.
- \overline{Q} o 1016, in ceramica, posto a Nord del Battistero sul prato in prossimità delle mura, di coordinate Est 349,8491 e Nord 601,3154.
- \overline{R} o 1014, realizzato in ceramica e posto sul prato a Nord del Duomo in prossimità del muro del Camposanto; caposaldo che verrà assunto, come vedremo, come punto che meglio approssima la quota del piano di campagna della Piazza del Duomo; le sue coordinate sono: Est 453,2897 e Nord 598,2063.
- 14 (è solo identificabile con la nuova nomenclatura dato che è stato inserito nel 1993), formato da un chiodo metallico da livellazione, è l'ultimo punto dei cinque che costituiscono il braccio Ovest della rete di livellazione intorno alla Torre, molto vicino al già citato caposaldo \overline{M} ; il vertice 14 è stato adottato durante i lavori di sottoescavazione

della Torre, come il punto che meglio approssima la quota del piano di campagna della Piazza. Le sue coordinate sono: Est 545,4086 e Nord 514,5891.

Le fonti da cui sono stati presi i valori delle quote, riferite al livello medio del mare, dei vari capisaldi sono: lo specchio X “*Quote sul livello medio del mare, per gli anni 1965 1966, 1967 dei capisaldi della rete geodetica distesa in Piazza del Duomo di Pisa e sui monumenti*” allegato al Rapporto n°3 della relazione della Commissione Polvani, pubblicata nel 1971 dal Ministero dei Lavori Pubblici; i bollettini dell’I.G.M. “*Controllo stabilità Torre di Pisa, Misure Geo-Topografiche*” contenenti la sezione sulle misure altimetriche dal 1965 al 1986; la relazione sulle misure altimetriche, inserita all’interno del Rapporto di supervisione delle operazioni di misura e di elaborazione di queste ultime, tra il Consorzio Torre di Pisa e il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilievo del Politecnico di Milano del 1993; la relazione tecnica del dicembre del 2012 prevista dal Contratto di Ricerca tra il laboratorio A.S.T.R.O. del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Industriale dell’Università di Pisa e l’Opera Primaziale Pisana.

Descrizione dei dati

Il campione delle misure del valore delle quote dei vari capisaldi, parte dal 1928 con solo i valori dei capisaldi ψ' , che si trova all’interno dell’Arcivescovado (e che ha svolto un ruolo marginale essendo un vertice molto lontano dal monumento), e il caposaldo ϕ' che si trova all’entrata del Battistero, sotto l’incisione dell’I.G.M. e che per molti anni è stato assunto come punto base per la livellazione dell’intera Piazza. Gli altri vertici sono tutti molto più recenti, dal 1928 si passa alle misurazioni effettuate nel dicembre del 1965, nel dicembre del 1966 e nel dicembre del 1967. Una serie di campagne di misure sono poi state eseguite dal 1973 al 1991 ma è dal maggio del 1993, a seguito della convenzione con il Politecnico di Milano prima e con l’università di Pisa dopo, che sono disponibili una serie di misure ripetute costantemente quasi ogni anno, fino al luglio del 2014. Tra i vertici considerati, solo il caposaldo 14, (facente parte del così detto braccio Ovest della rete che circonda la Torre), è stato inserito nella fase di realizzazione della nuova rete di livellazione nel 1993 dal Politecnico di Milano, pertanto le misure della sua quota esistono solo da quella data in poi. E’ da sottolineare che per i vertici $\overline{23}$, $\overline{24}$ e $\overline{25}$, importanti perchè che sono posizionati sul gradino dei portali del Battistero, mancano alcune misure, e più precisamente manca la misura del 26 luglio 1999 per tutti e tre i capisaldi, la misura del 4 maggio 1998 per i vertici $\overline{24}$ e $\overline{25}$ ed infine la misura del 30 novembre 1996 solo per il vertice $\overline{25}$.

Da notare che il caposaldo ϕ' ha la stessa quota dal 1965 al 1993 in quanto, essendo un caposaldo I.G.M., serviva come punto di riferimento per il resto della livellazione fino a quando non è stato costruito il già citato caposaldo profondo DD1 (999) nel 1993.

Le tabelle con l’insieme delle misure sono riportate di seguito.

ANNO:	ϕ' / 100	ψ' / 1020	23 / 923	24 / 924	25 / 925	O / 1015
01-gen-28	4.2866	5.7881				
01-dic-65	4.28361	5.77961	4.36625	4.5192	4.36049	2.72955
01-dic-66	4.28361	5.77915	4.36632	4.51948	4.36066	2.72873
01-dic-67	4.28361	5.77921	4.36627	4.51954	4.36098	2.72783
01-set-73	4.28361	5.77411	4.36455	4.5197	4.36209	2.71945
01-apr-74	4.28361	5.77391	4.36425	4.5197	4.36219	2.71995
01-dic-74	4.28361	5.77241	4.36475	4.5202	4.36249	2.71915
01-mar-75	4.28361	5.77171	4.36455	4.5201	4.36249	2.71935
01-set-75	4.28361	5.77191	4.36445	4.5199	4.36239	2.71875
01-mar-76	4.28361	5.77301	4.36445	4.52	4.36229	2.71895
01-ott-76	4.28361	5.77131	4.36475	4.5203	4.36259	2.7188
01-ott-78	4.28361	5.77061	4.36455	4.5202	4.36259	2.71815
01-mag-79	4.28361	5.77051	4.36455	4.5201	4.36249	2.71825
01-apr-80	4.28361	5.67961	4.36455	4.5204	4.36259	2.71805
01-set-81	4.28361	5.76911	4.36475	4.5206	4.36259	2.71735
01-giu-82	4.28361	5.76891	4.36465	4.5202	4.36279	2.71725
01-nov-82	4.28361	5.76841	4.36475	4.5205	4.36269	2.71725
01-ott-83	4.28361	5.76851	4.36465	4.5205	4.36269	2.71685
01-set-86	4.28361	5.7674	4.36493	4.52068	4.36263	2.71656
01-gen-91	4.28361	5.7662	4.365	4.521	4.3629	2.7159
03-mag-93	4.28361	5.7663	4.36532	4.5209	4.36258	2.71644
21-ago-93	4.28239	5.76487	4.36407	4.51968	4.36131	2.71453
21-feb-94	4.28336	5.76585	4.36518	4.52081	4.3624	2.7161
06-feb-95	4.28266	5.76501	4.3644	4.52001	4.36164	2.71562
26-feb-96	4.28266	5.76497	4.36438	4.51981	4.36137	2.71549
30-nov-96	4.28205	5.76372	4.36398	4.51952		2.71497
04-mag-98	4.28178	5.76317	4.36389			2.7147
26-lug-99	4.2793	5.76108				2.70997
10-ott-00	4.27838	5.75922	4.36044	4.51616	4.35742	2.7082
08-nov-01	4.2778	5.7588	4.35978	4.51556	4.35689	2.70757
29-ott-03	4.27524	5.75619	4.35731	4.51249	4.35423	2.70393
01-ott-04	4.27526	5.75592	4.35728	4.51302	4.35424	2.70401
01-lug-05	4.27511	5.75589	4.35732	4.51306	4.35422	2.7036
01-giu-06	4.2741	5.75464	4.35634	4.51193	4.35317	2.70237
01-lug-08	4.27291	5.75263	4.35501	4.51075	4.35192	2.70108
01-lug-10	4.27243	5.75068	4.35478	4.51051	4.35166	2.70075
01-giu-12	4.27089	5.74869	4.3533	4.50916	4.35012	2.69884
01-giu-14	4.27029	5.74729	4.35304	4.5088	4.34952	2.69815

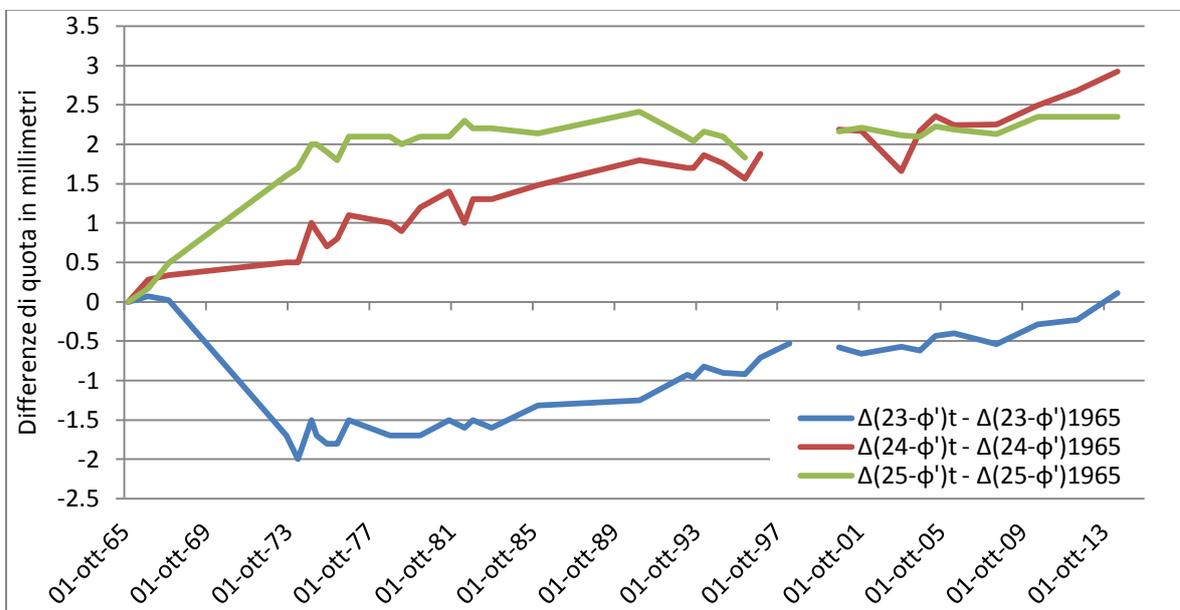
IL BATTISTERO DEL DUOMO DI PISA: MOVIMENTI ED INDAGINI

P / 1017	Q / 1016	N / 1012	M / 1004	R / 1014	14	ANNO:
						01-gen-28
3.34187	3.6857	2.92684	3.04261	3.96336		01-dic-65
3.34121	3.6858	2.92599	3.04235	3.96322		01-dic-66
3.34056	3.68587	2.92538	3.04271	3.96323		01-dic-67
3.33367	3.6843	2.91554	3.04411	3.96506		01-set-73
3.33367	3.6847	2.91534	3.04471	3.96616		01-apr-74
3.33337	3.685	2.91424	3.04461	3.96646		01-dic-74
3.33327	3.6852	2.91394	3.04451	3.96016		01-mar-75
3.33307	3.6848	2.91394	3.04491	3.96676		01-set-75
3.33277	3.6851	2.91404	3.04511	3.96696		01-mar-76
3.33267	3.6851	2.91384	3.04531	3.96716		01-ott-76
3.33187	3.6852	2.91354	3.04611	3.96746		01-ott-78
3.33177	3.6853	2.91384	3.04621	3.96756		01-mag-79
3.33147	3.6856	2.91344	3.04621	3.96776		01-apr-80
3.33107	3.6855	2.91334	3.04621	3.96766		01-set-81
3.33087	3.6856	2.91334	3.04641	3.96814		01-giu-82
3.33057	3.6859	2.91304	3.04651	3.96824		01-nov-82
3.33047	3.6859	2.91304	3.04681	3.96856		01-ott-83
3.3301	3.6861	2.91287	3.04787	3.969		01-set-86
3.3292	3.6868	2.913	3.0483	3.9697		01-gen-91
3.32942	3.68651	2.91319	3.04781	3.97007	2.92727	03-mag-93
3.32798	3.68502	2.91161	3.04615	3.96814	2.92562	21-ago-93
3.32881	3.68663	2.91265	3.04719	3.96893	2.92663	21-feb-94
3.3282	3.68585	2.91205	3.0468	3.96849	2.92619	06-feb-95
3.32762	3.68556	2.91207	3.04706	3.96852	2.92646	26-feb-96
3.32729	3.68496	2.91131	3.04623	3.96818	2.92566	30-nov-96
3.32695	3.68497	2.91082	3.04606	3.96807	2.92534	04-mag-98
3.32327	3.68161	2.90842	3.04397	3.96527	2.92336	26-lug-99
3.32106	3.68099	2.90708	3.04286	3.96446	2.92235	10-ott-00
3.32006	3.68054	2.90682	3.04289	3.96432	2.92267	08-nov-01
3.31648	3.67819	2.90362	3.04062	3.96189	2.92055	29-ott-03
3.31601	3.6782	2.9036	3.04015	3.96214	2.92041	01-ott-04
3.31614	3.67813	2.90336	3.03993	3.96139	2.92028	01-lug-05
3.31479	3.67725	2.90269	3.03941	3.96026	2.91982	01-giu-06
3.3129	3.67597	2.901	3.03834	3.95885	2.91877	01-lug-08
3.31219	3.67607	2.90026	3.03805	3.95869	2.9184	01-lug-10
3.3093	3.67462	2.89874	3.03674	3.95724	2.91738	01-giu-12
3.30848	3.67448	2.8978	3.03554	3.95683	2.91682	01-giu-14

I valori sono espressi in metri, e si riferiscono alla quota sul livello medio del mare dei vari capisaldi nei vari anni, le date si riferiscono al giorno in cui sono state eseguite le campagne di misura. Per semplificare, le lettere maiuscole con cui si identificano i vari vertici sono stati riportati in tabella senza la soprasedgnatura.

Dai valori in tabella si possono identificare le quote dei capisaldi ma non si riesce a leggere immediatamente i movimenti relativi che questi compiono tra loro.

Prendendo in esame solo il Battistero, è possibile calcolare le differenze di quote tra i quattro vertici posti sulle soglie dei quattro portali (ϕ' , $\overline{23}$, $\overline{24}$ e $\overline{25}$), assumendo come base il vertice ϕ' e la serie storica di misure dal 1965, (primo anno in cui disponiamo delle quote di tutti i quattro capisaldi). Il grafico e la relativa tabella di dati che si ottiene da questa operazione sono riportati di seguito e le differenze di quota sono espresse in millimetri.



Tenendo conto che il vertice $\overline{23}$ è sul portale a Sud, il $\overline{24}$ è a Ovest, il $\overline{25}$ a Nord e ϕ' ad Est, si può evidenziare dal grafico quanto segue:

- il vertice $\overline{23}$, dopo un periodo in cui il dislivello con il punto ϕ' ha assunto valori negativi, (vuol dire che in quel periodo ha ceduto di più del vertice ϕ') si è riportato quasi ad avere lo stesso scarto;
- i movimenti più repentini del Battistero si sono verificati tra il 1965 e il 1974, anni in cui sembra ruotare verso Sud, con asse da Ovest ad Est, compiendo lo spostamento di un corpo rigido (i vertici $\overline{23}$ e $\overline{25}$ si sono mossi sulla verticale di una quantità analoga ma in verso opposto rispetto a ϕ' , mentre il vertice $\overline{24}$ ha ceduto pressappoco quanto ϕ');

ANNO:	$\frac{\Delta(23-\phi)_t - \Delta(23-\phi)_{1965}}{\Delta(23-\phi)_{1965}}$	$\frac{\Delta(24-\phi)_t - \Delta(24-\phi)_{1965}}{\Delta(24-\phi)_{1965}}$	$\frac{\Delta(25-\phi)_t - \Delta(25-\phi)_{1965}}{\Delta(25-\phi)_{1965}}$
01-gen-28			
01-dic-65	0	0	0
01-dic-66	0.07	0.28	0.17
01-dic-67	0.02	0.34	0.49
01-set-73	-1.7	0.5	1.6
01-apr-74	-2	0.5	1.7
01-dic-74	-1.5	1	2
01-mar-75	-1.7	0.9	2
01-set-75	-1.8	0.7	1.9
01-mar-76	-1.8	0.8	1.8
01-ott-76	-1.5	1.1	2.1
01-ott-78	-1.7	1	2.1
01-mag-79	-1.7	0.9	2
01-apr-80	-1.7	1.2	2.1
01-set-81	-1.5	1.4	2.1
01-giu-82	-1.6	1	2.3
01-nov-82	-1.5	1.3	2.2
01-ott-83	-1.6	1.3	2.2
01-set-86	-1.32	1.48	2.14
01-gen-91	-1.25	1.8	2.41
03-mag-93	-0.93	1.7	2.09
21-ago-93	-0.96	1.7	2.04
21-feb-94	-0.82	1.86	2.16
06-feb-95	-0.9	1.76	2.1
26-feb-96	-0.92	1.56	1.83
30-nov-96	-0.71	1.88	
04-mag-98	-0.53		
26-lug-99			
10-ott-00	-0.58	2.19	2.16
08-nov-01	-0.66	2.17	2.21
29-ott-03	-0.57	1.66	2.11
01-ott-04	-0.62	2.17	2.1
01-lug-05	-0.43	2.36	2.23
01-giu-06	-0.4	2.24	2.19
01-lug-08	-0.54	2.25	2.13
01-lug-10	-0.29	2.49	2.35
01-giu-12	-0.23	2.68	2.35
01-giu-14	0.11	2.92	2.35

- dal 1974 al 2014 il Battistero sta compiendo un movimento di rotazione intorno ad un asse che va da Nord-Est a Sud-Ovest in quanto le variazioni di quota dei vertici $\overline{23}$ e $\overline{24}$ rispetto a φ' si muovono con rette di tendenza parallele, mentre quelle del vertice $\overline{25}$ hanno dei valori che oscillano attorno ad una retta orizzontale muovendosi, quindi, pressappoco come φ' ;
- il Battistero sta compiendo complessivamente un movimento di traslazione verso il basso, sommato ad un movimento di rotazione intorno ad un asse ipotetico che va da Nord-Est a Sud-Ovest, passando per il centro del monumento.

Scelta del punto di riferimento per la Piazza del Duomo

Per analizzare i movimenti che la Piazza del Duomo compie nelle sue varie porzioni, è indispensabile scegliere un punto, la cui quota, possa essere considerata come quota del piano di campagna della Piazza. Il vertice deve essere rappresentativo dell'abbassamento dell'intera Piazza; il suo spostamento deve poter essere considerato indipendente dal monumento che stiamo osservando e comunque deve essere in una zona non troppo lontana dal monumento stesso, per evitare che le caratteristiche del terreno o della falda acquifera siano totalmente diverse; il suo abbassamento non deve essere palesemente condizionato da altri fattori, tipo la vicinanza di un pozzo o la troppo vicinanza di un altro monumento.

Il collega Capocchi prese in esame i capisaldi \overline{M} , \overline{N} , \overline{O} , \overline{P} , \overline{Q} ed \overline{R} , che creano un anello che comprende la metà della Piazza verso Ovest dove risiede il Battistero. Di ogni vertice, ne è stato calcolato il dislivello rispetto a ciascun altro vertice, prendendone di volta in volta uno di riferimento. Partendo da questo lavoro ed aggiornandolo, sono state ottenute le seguenti sei tabelle, una per ogni punto assunto come riferimento, nelle quali sono riportati i dislivelli degli altri vertici. Per ogni tabella è stato creato un grafico che riporta l'andamento dei dislivelli nel corso degli anni. Dal tipo di curve che si ottengono, si possono fare alcune considerazioni: se i dislivelli rispetto ad un vertice presentano un andamento orizzontale vuol dire che tutti i punti hanno lo stesso cedimento, come se appartenessero ad un corpo che scende verticalmente. Se le curve hanno un andamento non orizzontale ma comunque parallelo tra loro, significa che i vertici hanno un cedimento verticale come se appartenessero a un medesimo corpo, escluso però il vertice di riferimento che risulta indipendente. E' ovvio che i precedenti casi sono situazioni estreme, è molto probabile che in pratica si abbiano dei grafici in cui vi sono curve che possono essere considerate (con le dovute approssimazioni) parallele, altre sghembe, si possono comunque trarre informazioni su i legami che vi possono essere tra vari vertici e quindi tra le varie porzioni di terreno.

I valori sia nelle tabelle che nei grafici, sono espressi in metri.

IL BATTISTERO DEL DUOMO DI PISA: MOVIMENTI ED INDAGINI

ANNO:	$\Delta(N-M)$	$\Delta(O-M)$	$\Delta(P-M)$	$\Delta(Q-M)$	$\Delta(R-M)$
01-gen-28					
01-dic-65	-0.11577	-0.31306	0.29926	0.64309	0.92075
01-dic-66	-0.11636	-0.31362	0.29886	0.64345	0.92087
01-dic-67	-0.11733	-0.31488	0.29785	0.64316	0.92052
01-set-73	-0.12857	-0.32466	0.28956	0.64019	0.92095
01-apr-74	-0.12937	-0.32476	0.28896	0.63999	0.92145
01-dic-74	-0.13037	-0.32546	0.28876	0.64039	0.92185
01-mar-75	-0.13057	-0.32516	0.28876	0.64069	0.91565
01-set-75	-0.13097	-0.32616	0.28816	0.63989	0.92185
01-mar-76	-0.13107	-0.32616	0.28766	0.63999	0.92185
01-ott-76	-0.13147	-0.32651	0.28736	0.63979	0.92185
01-ott-78	-0.13257	-0.32796	0.28576	0.63909	0.92135
01-mag-79	-0.13237	-0.32796	0.28556	0.63909	0.92135
01-apr-80	-0.13277	-0.32816	0.28526	0.63939	0.92155
01-set-81	-0.13287	-0.32886	0.28486	0.63929	0.92145
01-giu-82	-0.13307	-0.32916	0.28446	0.63919	0.92173
01-nov-82	-0.13347	-0.32926	0.28406	0.63939	0.92173
01-ott-83	-0.13377	-0.32996	0.28366	0.63909	0.92175
01-set-86	-0.135	-0.33131	0.28223	0.63823	0.92113
01-gen-91	-0.1353	-0.3324	0.2809	0.6385	0.9214
03-mag-93	-0.13462	-0.33137	0.28161	0.6387	0.92226
21-ago-93	-0.13454	-0.33162	0.28183	0.63887	0.92199
21-feb-94	-0.13454	-0.33109	0.28162	0.63944	0.92174
06-feb-95	-0.13475	-0.33118	0.2814	0.63905	0.92169
26-feb-96	-0.13499	-0.33157	0.28056	0.6385	0.92146
30-nov-96	-0.13492	-0.33126	0.28106	0.63873	0.92195
04-mag-98	-0.13524	-0.33136	0.28089	0.63891	0.92201
26-lug-99	-0.13555	-0.334	0.2793	0.63764	0.9213
10-ott-00	-0.13578	-0.33466	0.2782	0.63813	0.9216
08-nov-01	-0.13607	-0.33532	0.27717	0.63765	0.92143
29-ott-03	-0.137	-0.33669	0.27586	0.63757	0.92127
01-ott-04	-0.13655	-0.33614	0.27586	0.63805	0.92199
01-lug-05	-0.13657	-0.33633	0.27621	0.6382	0.92146
01-giu-06	-0.13672	-0.33704	0.27538	0.63784	0.92085
01-lug-08	-0.13734	-0.33726	0.27456	0.63763	0.92051
01-lug-10	-0.13779	-0.3373	0.27414	0.63802	0.92064
01-giu-12	-0.138	-0.3379	0.27256	0.63788	0.9205
01-giu-14	-0.13774	-0.33739	0.27294	0.63894	0.92129

IL BATTISTERO DEL DUOMO DI PISA: MOVIMENTI ED INDAGINI

ANNO:	$\Delta(O-N)$	$\Delta(P-N)$	$\Delta(Q-N)$	$\Delta(R-N)$	$\Delta(M-N)$
01-gen-28					
01-dic-65	-0.19729	0.41503	0.75886	1.03652	0.11577
01-dic-66	-0.19726	0.41522	0.75981	1.03723	0.11636
01-dic-67	-0.19755	0.41518	0.76049	1.03785	0.11733
01-set-73	-0.19609	0.41813	0.76876	1.04952	0.12857
01-apr-74	-0.19539	0.41833	0.76936	1.05082	0.12937
01-dic-74	-0.19509	0.41913	0.77076	1.05222	0.13037
01-mar-75	-0.19459	0.41933	0.77126	1.04622	0.13057
01-set-75	-0.19519	0.41913	0.77086	1.05282	0.13097
01-mar-76	-0.19509	0.41873	0.77106	1.05292	0.13107
01-ott-76	-0.19504	0.41883	0.77126	1.05332	0.13147
01-ott-78	-0.19539	0.41833	0.77166	1.05392	0.13257
01-mag-79	-0.19559	0.41793	0.77146	1.05372	0.13237
01-apr-80	-0.19539	0.41803	0.77216	1.05432	0.13277
01-set-81	-0.19599	0.41773	0.77216	1.05432	0.13287
01-giu-82	-0.19609	0.41753	0.77226	1.0548	0.13307
01-nov-82	-0.19579	0.41753	0.77286	1.0552	0.13347
01-ott-83	-0.19619	0.41743	0.77286	1.05552	0.13377
01-set-86	-0.19631	0.41723	0.77323	1.05613	0.135
01-gen-91	-0.1971	0.4162	0.7738	1.0567	0.1353
03-mag-93	-0.19675	0.41623	0.77332	1.05688	0.13462
21-ago-93	-0.19708	0.41637	0.77341	1.05653	0.13454
21-feb-94	-0.19655	0.41616	0.77398	1.05628	0.13454
06-feb-95	-0.19643	0.41615	0.7738	1.05644	0.13475
26-feb-96	-0.19658	0.41555	0.77349	1.05645	0.13499
30-nov-96	-0.19634	0.41598	0.77365	1.05687	0.13492
04-mag-98	-0.19612	0.41613	0.77415	1.05725	0.13524
26-lug-99	-0.19845	0.41485	0.77319	1.05685	0.13555
10-ott-00	-0.19888	0.41398	0.77391	1.05738	0.13578
08-nov-01	-0.19925	0.41324	0.77372	1.0575	0.13607
29-ott-03	-0.19969	0.41286	0.77457	1.05827	0.137
01-ott-04	-0.19959	0.41241	0.7746	1.05854	0.13655
01-lug-05	-0.19976	0.41278	0.77477	1.05803	0.13657
01-giu-06	-0.20032	0.4121	0.77456	1.05757	0.13672
01-lug-08	-0.19992	0.4119	0.77497	1.05785	0.13734
01-lug-10	-0.19951	0.41193	0.77581	1.05843	0.13779
01-giu-12	-0.1999	0.41056	0.77588	1.0585	0.138
01-giu-14	-0.19965	0.41068	0.77668	1.05903	0.13774

IL BATTISTERO DEL DUOMO DI PISA: MOVIMENTI ED INDAGINI

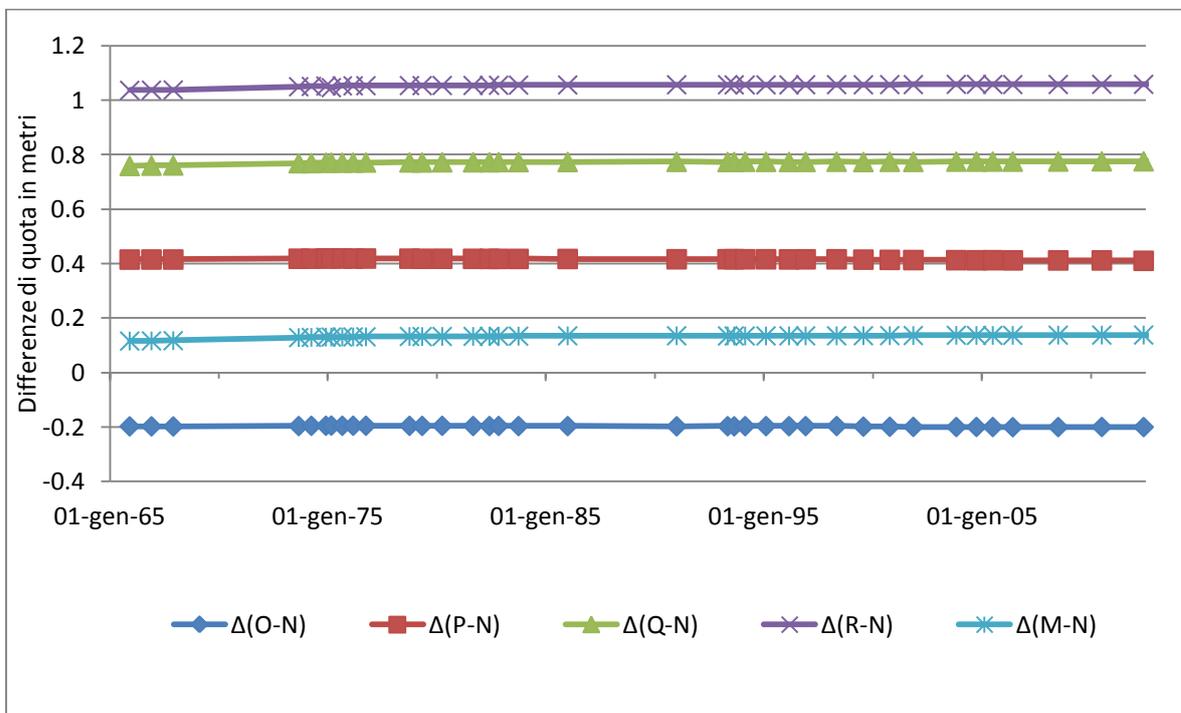
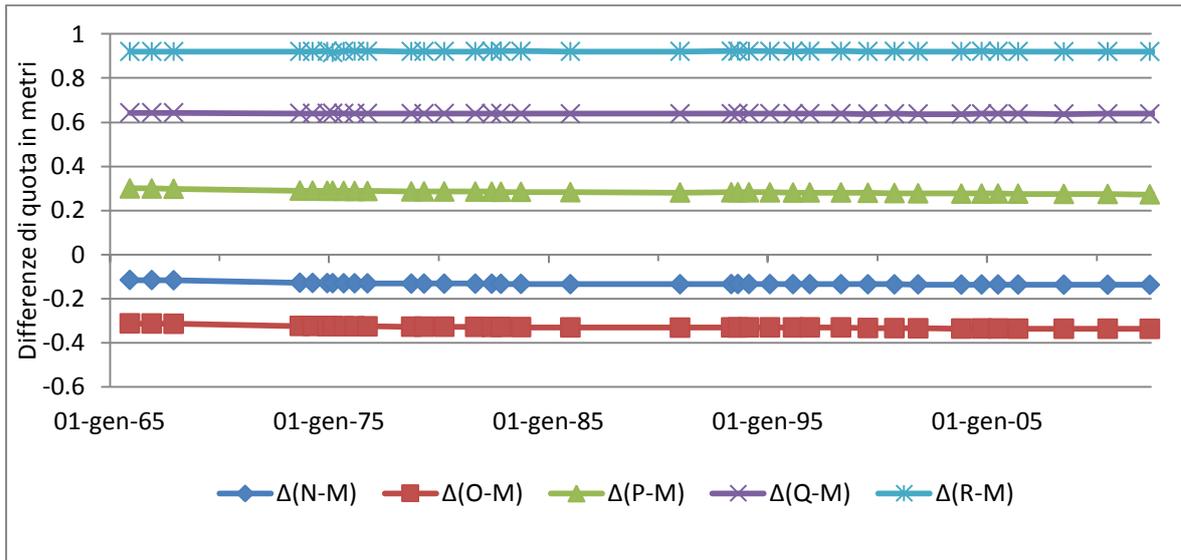
ANNO:	$\Delta(P-O)$	$\Delta(Q-O)$	$\Delta(R-O)$	$\Delta(M-O)$	$\Delta(N-O)$
01-gen-28					
01-dic-65	0.61232	0.95615	1.23381	0.31306	0.19729
01-dic-66	0.61248	0.95707	1.23449	0.31362	0.19726
01-dic-67	0.61273	0.95804	1.2354	0.31488	0.19755
01-set-73	0.61422	0.96485	1.24561	0.32466	0.19609
01-apr-74	0.61372	0.96475	1.24621	0.32476	0.19539
01-dic-74	0.61422	0.96585	1.24731	0.32546	0.19509
01-mar-75	0.61392	0.96585	1.24081	0.32516	0.19459
01-set-75	0.61432	0.96605	1.24801	0.32616	0.19519
01-mar-76	0.61382	0.96615	1.24801	0.32616	0.19509
01-ott-76	0.61387	0.9663	1.24836	0.32651	0.19504
01-ott-78	0.61372	0.96705	1.24931	0.32796	0.19539
01-mag-79	0.61352	0.96705	1.24931	0.32796	0.19559
01-apr-80	0.61342	0.96755	1.24971	0.32816	0.19539
01-set-81	0.61372	0.96815	1.25031	0.32886	0.19599
01-giu-82	0.61362	0.96835	1.25089	0.32916	0.19609
01-nov-82	0.61332	0.96865	1.25099	0.32926	0.19579
01-ott-83	0.61362	0.96905	1.25171	0.32996	0.19619
01-set-86	0.61354	0.96954	1.25244	0.33131	0.19631
01-gen-91	0.6133	0.9709	1.2538	0.3324	0.1971
03-mag-93	0.61298	0.97007	1.25363	0.33137	0.19675
21-ago-93	0.61345	0.97049	1.25361	0.33162	0.19708
21-feb-94	0.61271	0.97053	1.25283	0.33109	0.19655
06-feb-95	0.61258	0.97023	1.25287	0.33118	0.19643
26-feb-96	0.61213	0.97007	1.25303	0.33157	0.19658
30-nov-96	0.61232	0.96999	1.25321	0.33126	0.19634
04-mag-98	0.61225	0.97027	1.25337	0.33136	0.19612
26-lug-99	0.6133	0.97164	1.2553	0.334	0.19845
10-ott-00	0.61286	0.97279	1.25626	0.33466	0.19888
08-nov-01	0.61249	0.97297	1.25675	0.33532	0.19925
29-ott-03	0.61255	0.97426	1.25796	0.33669	0.19969
01-ott-04	0.612	0.97419	1.25813	0.33614	0.19959
01-lug-05	0.61254	0.97453	1.25779	0.33633	0.19976
01-giu-06	0.61242	0.97488	1.25789	0.33704	0.20032
01-lug-08	0.61182	0.97489	1.25777	0.33726	0.19992
01-lug-10	0.61144	0.97532	1.25794	0.3373	0.19951
01-giu-12	0.61046	0.97578	1.25985	0.3379	0.1999
01-giu-14	0.61033	0.97633	1.25909	0.33739	0.19965

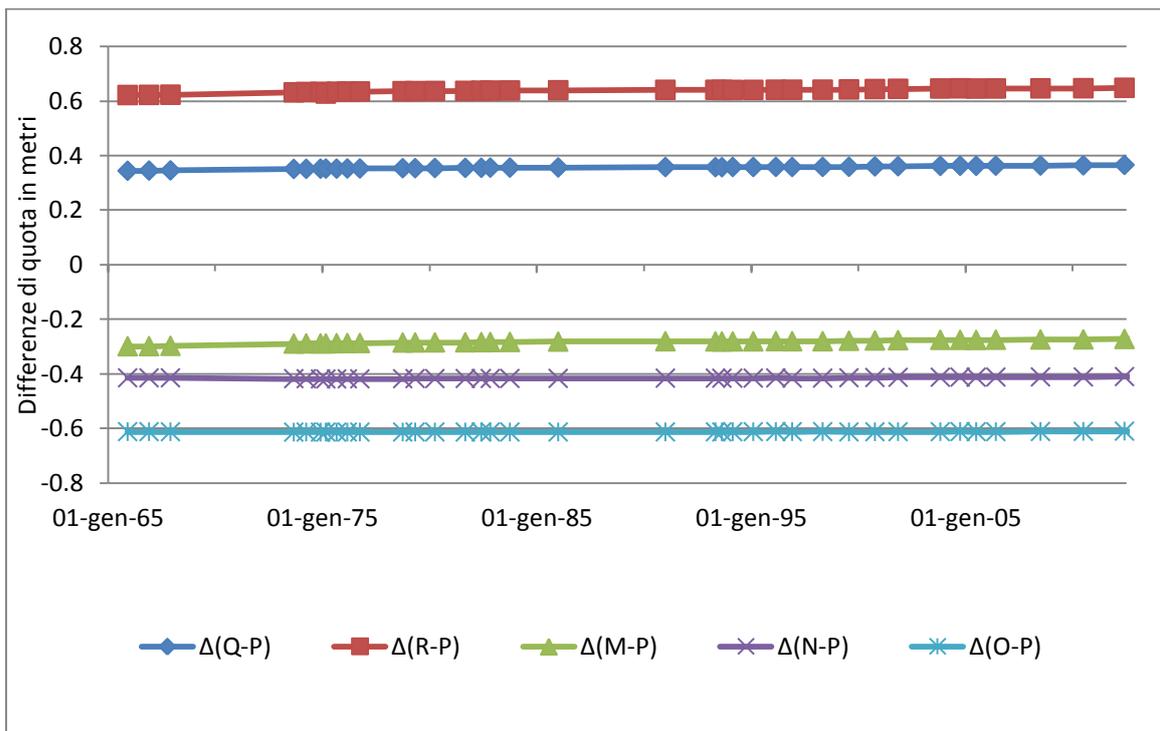
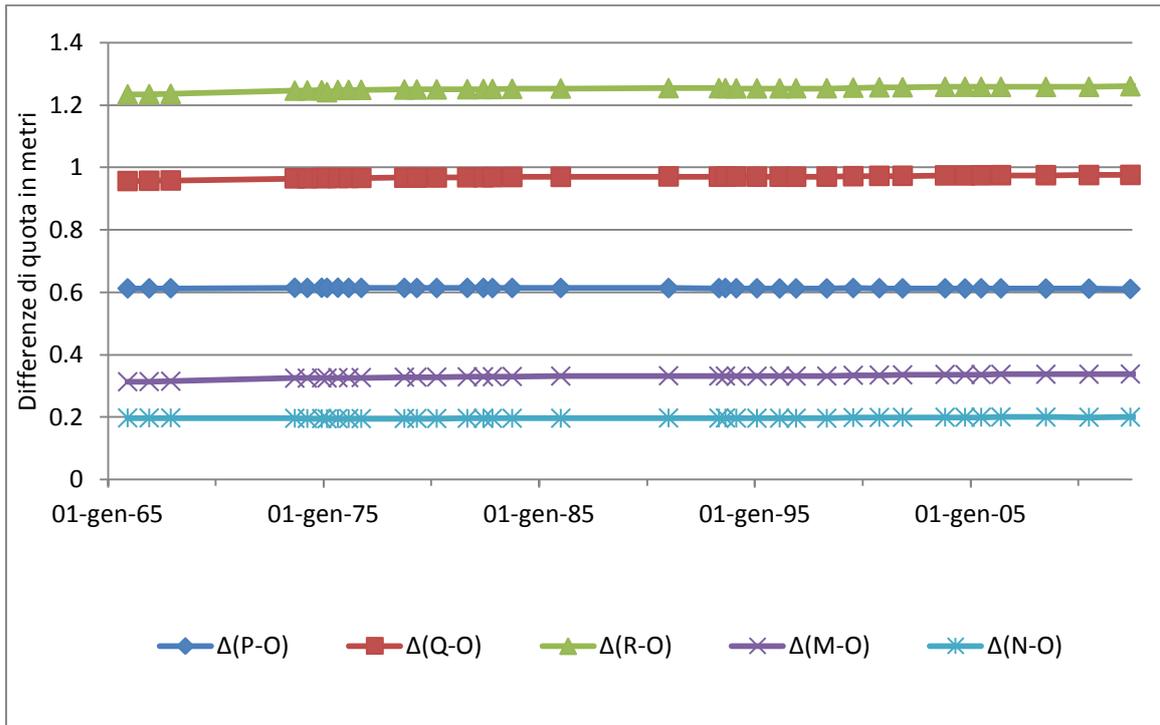
IL BATTISTERO DEL DUOMO DI PISA: MOVIMENTI ED INDAGINI

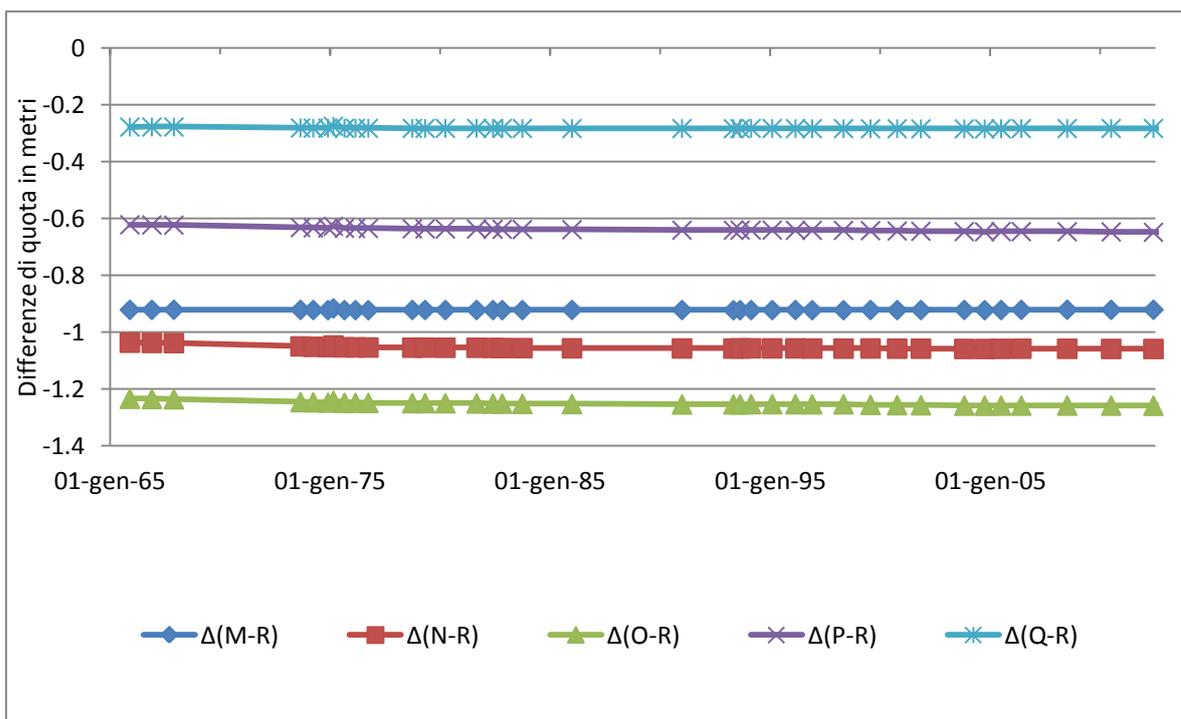
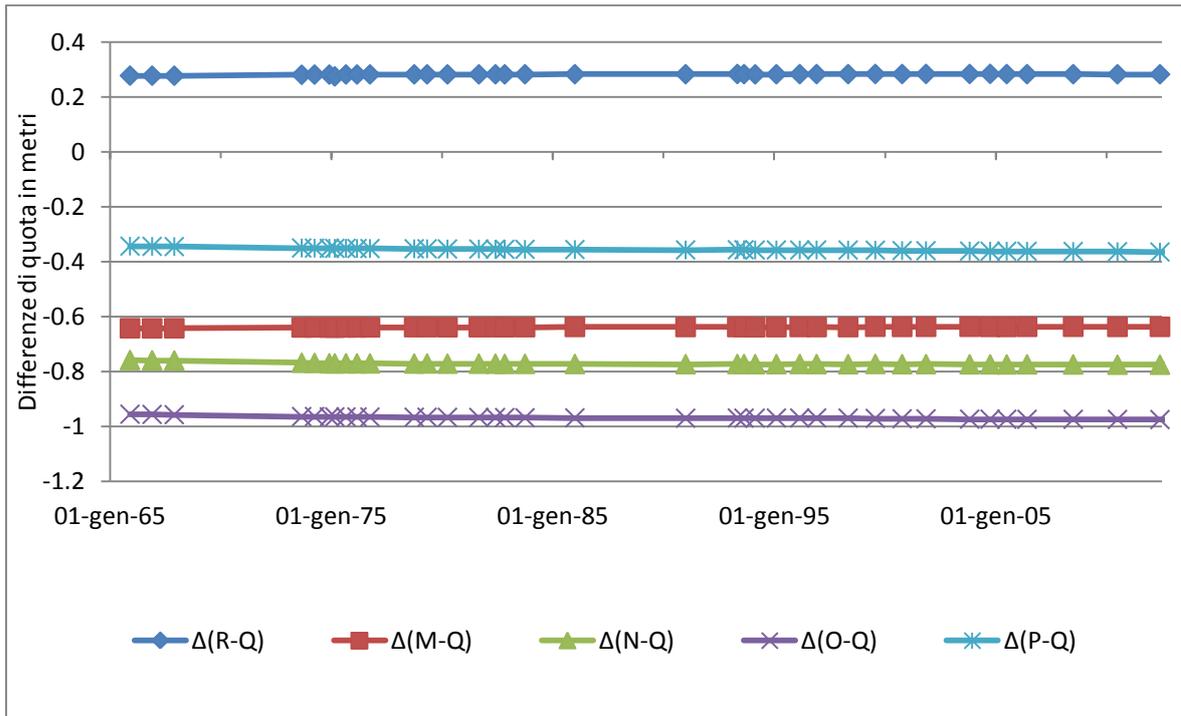
ANNO:	$\Delta(Q-P)$	$\Delta(R-P)$	$\Delta(M-P)$	$\Delta(N-P)$	$\Delta(O-P)$
01-gen-28					
01-dic-65	0.34383	0.62149	-0.29926	-0.41503	-0.61232
01-dic-66	0.34459	0.62201	-0.29886	-0.41522	-0.61248
01-dic-67	0.34531	0.62267	-0.29785	-0.41518	-0.61273
01-set-73	0.35063	0.63139	-0.28956	-0.41813	-0.61422
01-apr-74	0.35103	0.63249	-0.28896	-0.41833	-0.61372
01-dic-74	0.35163	0.63309	-0.28876	-0.41913	-0.61422
01-mar-75	0.35193	0.62689	-0.28876	-0.41933	-0.61392
01-set-75	0.35173	0.63369	-0.28816	-0.41913	-0.61432
01-mar-76	0.35233	0.63419	-0.28766	-0.41873	-0.61382
01-ott-76	0.35243	0.63449	-0.28736	-0.41883	-0.61387
01-ott-78	0.35333	0.63559	-0.28576	-0.41833	-0.61372
01-mag-79	0.35353	0.63579	-0.28556	-0.41793	-0.61352
01-apr-80	0.35413	0.63629	-0.28526	-0.41803	-0.61342
01-set-81	0.35443	0.63659	-0.28486	-0.41773	-0.61372
01-giu-82	0.35473	0.63727	-0.28446	-0.41753	-0.61362
01-nov-82	0.35533	0.63767	-0.28406	-0.41753	-0.61332
01-ott-83	0.35543	0.63809	-0.28366	-0.41743	-0.61362
01-set-86	0.356	0.6389	-0.28223	-0.41723	-0.61354
01-gen-91	0.3576	0.6405	-0.2809	-0.4162	-0.6133
03-mag-93	0.35709	0.64065	-0.28161	-0.41623	-0.61298
21-ago-93	0.35704	0.64016	-0.28183	-0.41637	-0.61345
21-feb-94	0.35782	0.64012	-0.28162	-0.41616	-0.61271
06-feb-95	0.35765	0.64029	-0.2814	-0.41615	-0.61258
26-feb-96	0.35794	0.6409	-0.28056	-0.41555	-0.61213
30-nov-96	0.35767	0.64089	-0.28106	-0.41598	-0.61232
04-mag-98	0.35802	0.64112	-0.28089	-0.41613	-0.61225
26-lug-99	0.35834	0.642	-0.2793	-0.41485	-0.6133
10-ott-00	0.35993	0.6434	-0.2782	-0.41398	-0.61286
08-nov-01	0.36048	0.64426	-0.27717	-0.41324	-0.61249
29-ott-03	0.36171	0.64541	-0.27586	-0.41286	-0.61255
01-ott-04	0.36219	0.64613	-0.27586	-0.41241	-0.612
01-lug-05	0.36199	0.64525	-0.27621	-0.41278	-0.61254
01-giu-06	0.36246	0.64547	-0.27538	-0.4121	-0.61242
01-lug-08	0.36307	0.64595	-0.27456	-0.4119	-0.61182
01-lug-10	0.36388	0.6465	-0.27414	-0.41193	-0.61144
01-giu-12	0.36532	0.64794	-0.27256	-0.41056	-0.61046
01-giu-14	0.366	0.64835	-0.27294	-0.41068	-0.61033

IL BATTISTERO DEL DUOMO DI PISA: MOVIMENTI ED INDAGINI

ANNO:	$\Delta(R-Q)$	$\Delta(M-Q)$	$\Delta(N-Q)$	$\Delta(O-Q)$	$\Delta(P-Q)$
01-gen-28					
01-dic-65	0.27766	-0.64309	-0.75886	-0.95615	-0.34383
01-dic-66	0.27742	-0.64345	-0.75981	-0.95707	-0.34459
01-dic-67	0.27736	-0.64316	-0.76049	-0.95804	-0.34531
01-set-73	0.28076	-0.64019	-0.76876	-0.96485	-0.35063
01-apr-74	0.28146	-0.63999	-0.76936	-0.96475	-0.35103
01-dic-74	0.28146	-0.64039	-0.77076	-0.96585	-0.35163
01-mar-75	0.27496	-0.64069	-0.77126	-0.96585	-0.35193
01-set-75	0.28196	-0.63989	-0.77086	-0.96605	-0.35173
01-mar-76	0.28186	-0.63999	-0.77106	-0.96615	-0.35233
01-ott-76	0.28206	-0.63979	-0.77126	-0.9663	-0.35243
01-ott-78	0.28226	-0.63909	-0.77166	-0.96705	-0.35333
01-mag-79	0.28226	-0.63909	-0.77146	-0.96705	-0.35353
01-apr-80	0.28216	-0.63939	-0.77216	-0.96755	-0.35413
01-set-81	0.28216	-0.63929	-0.77216	-0.96815	-0.35443
01-giu-82	0.28254	-0.63919	-0.77226	-0.96835	-0.35473
01-nov-82	0.28234	-0.63939	-0.77286	-0.96865	-0.35533
01-ott-83	0.28266	-0.63909	-0.77286	-0.96905	-0.35543
01-set-86	0.2829	-0.63823	-0.77323	-0.96954	-0.356
01-gen-91	0.2829	-0.6385	-0.7738	-0.9709	-0.3576
03-mag-93	0.28356	-0.6387	-0.77332	-0.97007	-0.35709
21-ago-93	0.28312	-0.63887	-0.77341	-0.97049	-0.35704
21-feb-94	0.2823	-0.63944	-0.77398	-0.97053	-0.35782
06-feb-95	0.28264	-0.63905	-0.7738	-0.97023	-0.35765
26-feb-96	0.28296	-0.6385	-0.77349	-0.97007	-0.35794
30-nov-96	0.28322	-0.63873	-0.77365	-0.96999	-0.35767
04-mag-98	0.2831	-0.63891	-0.77415	-0.97027	-0.35802
26-lug-99	0.28366	-0.63764	-0.77319	-0.97164	-0.35834
10-ott-00	0.28347	-0.63813	-0.77391	-0.97279	-0.35993
08-nov-01	0.28378	-0.63765	-0.77372	-0.97297	-0.36048
29-ott-03	0.2837	-0.63757	-0.77457	-0.97426	-0.36171
01-ott-04	0.28394	-0.63805	-0.7746	-0.97419	-0.36219
01-lug-05	0.28326	-0.6382	-0.77477	-0.97453	-0.36199
01-giu-06	0.28301	-0.63784	-0.77456	-0.97488	-0.36246
01-lug-08	0.28288	-0.63763	-0.77497	-0.97489	-0.36307
01-lug-10	0.28262	-0.63802	-0.77581	-0.97532	-0.36388
01-giu-12	0.28262	-0.63788	-0.77588	-0.97578	-0.36532
01-giu-14	0.28235	-0.63894	-0.77668	-0.97633	-0.366







Dall'osservazione dei grafici è stata la quota del caposaldo \bar{R} , anche per altre due considerazioni: una di tipo puramente pratico, in quanto il caposaldo è direttamente visibile dal caposaldo profondo DD1 (vertice di riferimento per le operazioni di livellazione dell'intera piazza) e quindi facilmente collegabile con gli strumenti che utilizzano parti ottiche; l'altra considerazione deriva dal confronto della variazione dei dislivelli con il caposaldo 14, che risulta avere un comportamento molto simile

al vertice (il caposaldo 14 venne scelto come il più rappresentativo nelle operazioni di monitoraggio durante l'installazione dei contrappesi in piombo e durante l'operazione di sottoescavazione della Torre).

Il movimento del Battistero

Per stabilire se gli spostamenti dei quattro capisaldi siano compatibili o meno con gli spostamenti che avrebbero gli stessi quattro punti se appartenessero ad un corpo rigido, è stata calcolata l'equazione del piano passante per tre (ϕ' , $\overline{23}$ e $\overline{24}$) dei quattro capisaldi e successivamente calcolata la quota del quarto ($\overline{25}$) come se appartenesse al piano stesso (questo dato verrà indicato in tabella come "Δ25 calc.").

I dati utilizzati sono relativi alle campagne di misurazioni dal 1973 in poi, in quanto i valori misurati precedentemente sono collocati in anni più lontani senza continuità e di conseguenza di minore affidabilità.

Partendo dunque dal 1973, per ogni campagna di misurazione, sono stati calcolati l'equazione del piano passante per i tre vertici sopra indicati, e il valore della coordinata z che il quarto caposaldo.

Dalle differenze nei vari anni tra i valori reali della coordinata z del punto $\overline{25}$, e i valori della stessa coordinata del punto $\overline{25}$ appartenente ai piani, si può stabilire se questo scostamento rientra nel campo di errore di precisione delle misure o se il vertice in realtà non può essere considerato appartenente ai vari piani.

I valori delle coordinate x ed y sono stati indicati nel rilievo planimetrico del Politecnico di Milano mentre, per quanto riguarda i valori delle coordinate z, non sono stati utilizzati direttamente i valori della quota dei vertici ma la loro differenza rispetto alla quota del 1973, assumendo quindi a quota zero il piano passante per i tre punti in quella data. In tabella sono riportate le coordinate x e y dei capisaldi, in metri, rispetto al sistema di riferimento adottato dal Politecnico.

	Coordinate ϕ'	Coordinate 23	Coordinate 24	Coordinate 25
Coordinata EST	395.6567	377.269	361.4332	380.4842
Coordinata NORD	548.3631	529.8082	548.5682	563.8352

In termini analitici il calcolo dell'equazione di un piano passante per tre punti si può risolvere nel seguente modo, l'equazione canonica del piano nello spazio tridimensionale R^3 è del tipo:

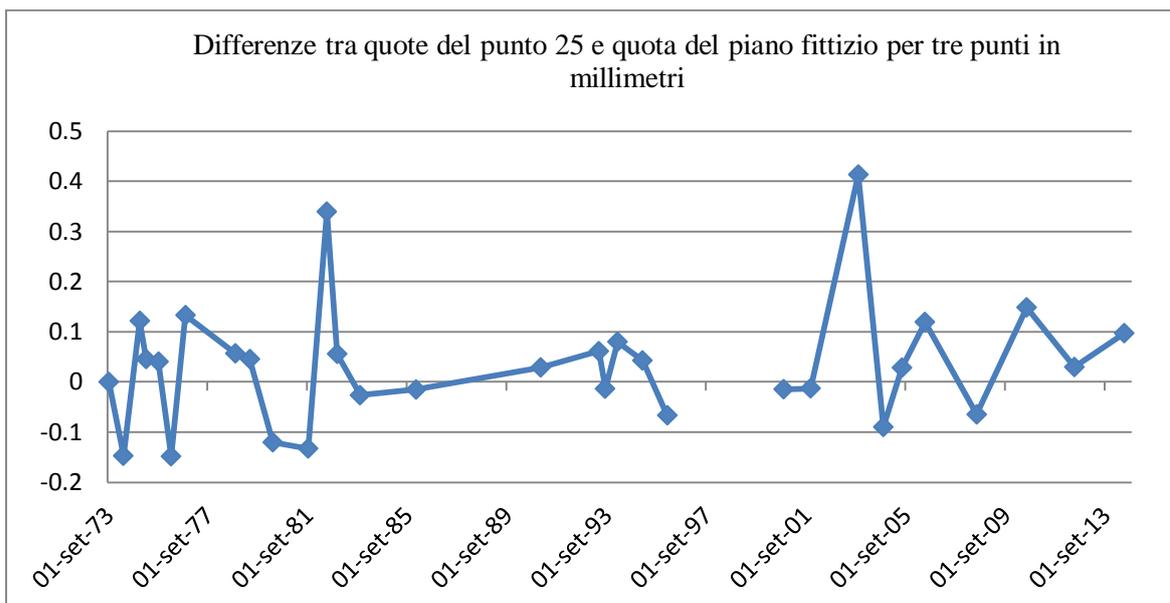
$$ax + by + cz + d = 0$$

in cui a, b, c , sono i parametri direttori del piano, con a, b, c non tutti nulli.

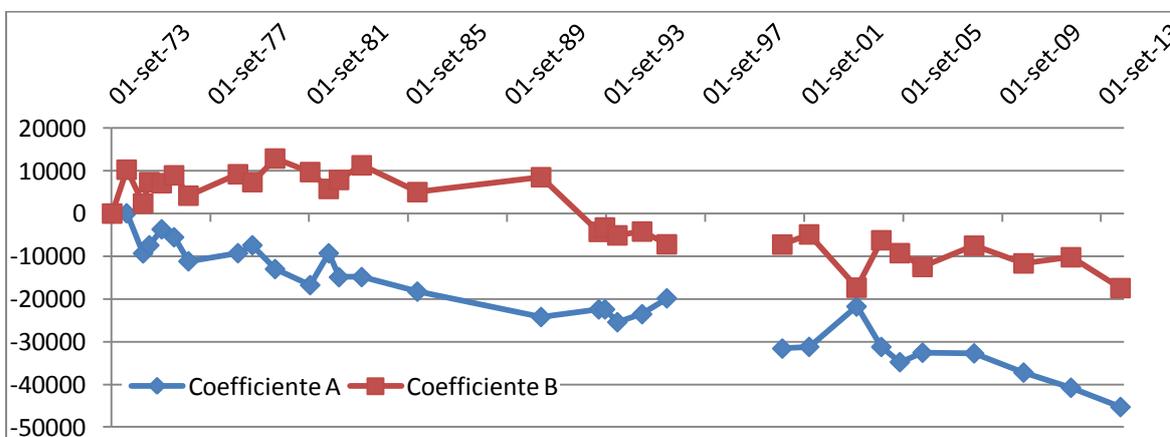
Anche dal grafico delle curve che esprimono il valore dei parametri direttori a e b dell'equazione del piano nel corso dei vari anni, si possono trarre conseguenze circa il movimento del Battistero.

I valori ottenuti dalla risoluzione dei calcoli sopra indicati, sono riportati nelle tabelle, e nei relativi grafici riportati di seguito, in cui i valori sono espressi in millimetri:

DATA	$\Delta (\phi' - \phi'_{73})$	$\Delta (23 - 23_{73})$	$\Delta (24 - 24_{73})$	$\Delta (25 - 25_{73})$	Coeff. A	Coeff. B	$\Delta 25$ calc.	$\Delta 25 - \Delta 25$ calc.
01-set-73	0	0	0	0	0	0	0	0
01-apr-74	0	-0.3	0	0.1	61.53	10267.05	0.2472182	-0.1472182
01-dic-74	0	0.2	0.5	0.4	-9318.47	2349.15	0.2782326	0.121767438
01-mar-75	0	0	0.4	0.4	-7421.96	7355.08	0.3544358	0.045564245
01-set-75	0	-0.1	0.2	0.3	-3690.47	7099.89	0.2596239	0.040376057
01-mar-76	0	-0.1	0.3	0.2	-5545.96	8938.66	0.3482329	-0.14823288
01-ott-76	0	0.2	0.6	0.5	-11173.96	4187.92	0.3668415	0.133158499
01-ott-78	0	0	0.5	0.5	-9277.45	9193.85	0.4430447	0.056955307
01-mag-79	0	0	0.4	0.4	-7421.96	7355.08	0.3544358	0.045564245
01-apr-80	0	0	0.7	0.5	-12988.43	12871.39	0.6202626	-0.12026257
01-set-81	0	0.2	0.9	0.5	-16740.43	9704.23	0.6326683	-0.13266832
01-giu-82	0	0.1	0.5	0.7	-9297.96	5771.5	0.3606386	0.339361372
01-nov-82	0	0.2	0.8	0.6	-14884.94	7865.46	0.5440594	0.055940622
01-ott-83	0	0.1	0.8	0.6	-14864.43	11287.81	0.6264654	-0.02646544
01-set-86	0	0.38	0.98	0.54	-18261.74	5015.016	0.5552245	-0.01522455
01-gen-91	0	0.45	1.3	0.81	-24213.665	8503.435	0.7810889	0.028911093
03-mag-93	0	0.77	1.2	0.49	-22423.807	-4286.855	0.4287806	0.061219441
21-ago-93	-1.22	-0.48	-0.02	-0.78	-22417.654	-3260.15	-0.766498	-0.01350238
21-feb-94	-0.25	0.63	1.11	0.31	-25415.152	-5109.408	0.2299082	0.080091811
06-feb-95	-0.95	-0.15	0.31	-0.45	-23543.254	-4210.298	-0.492776	0.042775898
26-feb-96	-0.95	-0.17	0.11	-0.72	-19828.172	-7203.368	-0.653513	-0.06648744
30-nov-96	-1.56	-0.57	-0.18					
04-mag-98	-1.83	-0.66						
26-lug-99	-4.31							
10-ott-00	-5.23	-4.11	-3.54	-4.67	-31587.493	-7255.107	-4.655457	-0.01454313
08-nov-01	-5.81	-4.77	-4.14	-5.2	-31199.987	-4884.981	-5.187254	-0.01274619
29-ott-03	-8.37	-7.24	-7.21	-7.86	-21755.447	-17342.823	-8.273325	0.413324853
01-ott-04	-8.35	-7.27	-6.68	-7.85	-31208.191	-6253.921	-7.760216	-0.08978377
01-lug-05	-8.5	-7.23	-6.64	-7.87	-34772.591	-9262.723	-7.898431	0.028430774
01-giu-06	-9.51	-8.21	-7.77	-8.92	-32552.156	-12495.952	-9.039483	0.11948332
01-lug-08	-10.7	-9.54	-8.95	-10.17	-32708.991	-7520.785	-10.10525	-0.06474607
01-lug-10	-11.18	-9.77	-9.19	-10.43	-37213.442	-11663.612	-10.57861	0.148607646
01-giu-12	-12.72	-11.25	-10.54	-11.97	-40751.179	-10223.359	-11.99969	0.029694301
01-giu-14	-13.32	-11.51	-10.9	-12.57	-45274.089	-17446.301	-12.66721	0.097213472



Dal grafico si vede chiaramente che i valori dello scostamento tra Δ_{25} e Δ_{25} calcolato, non sono prossimi a zero, seppur modesti. Possiamo sostenere che nei periodi 1973-1983 e 2001-2014 il Battistero si è mosso compiendo una rotazione non rigida, subendo l'effetto di cedimenti differenziali del sottosuolo che stanno in qualche modo deformando la sua struttura.

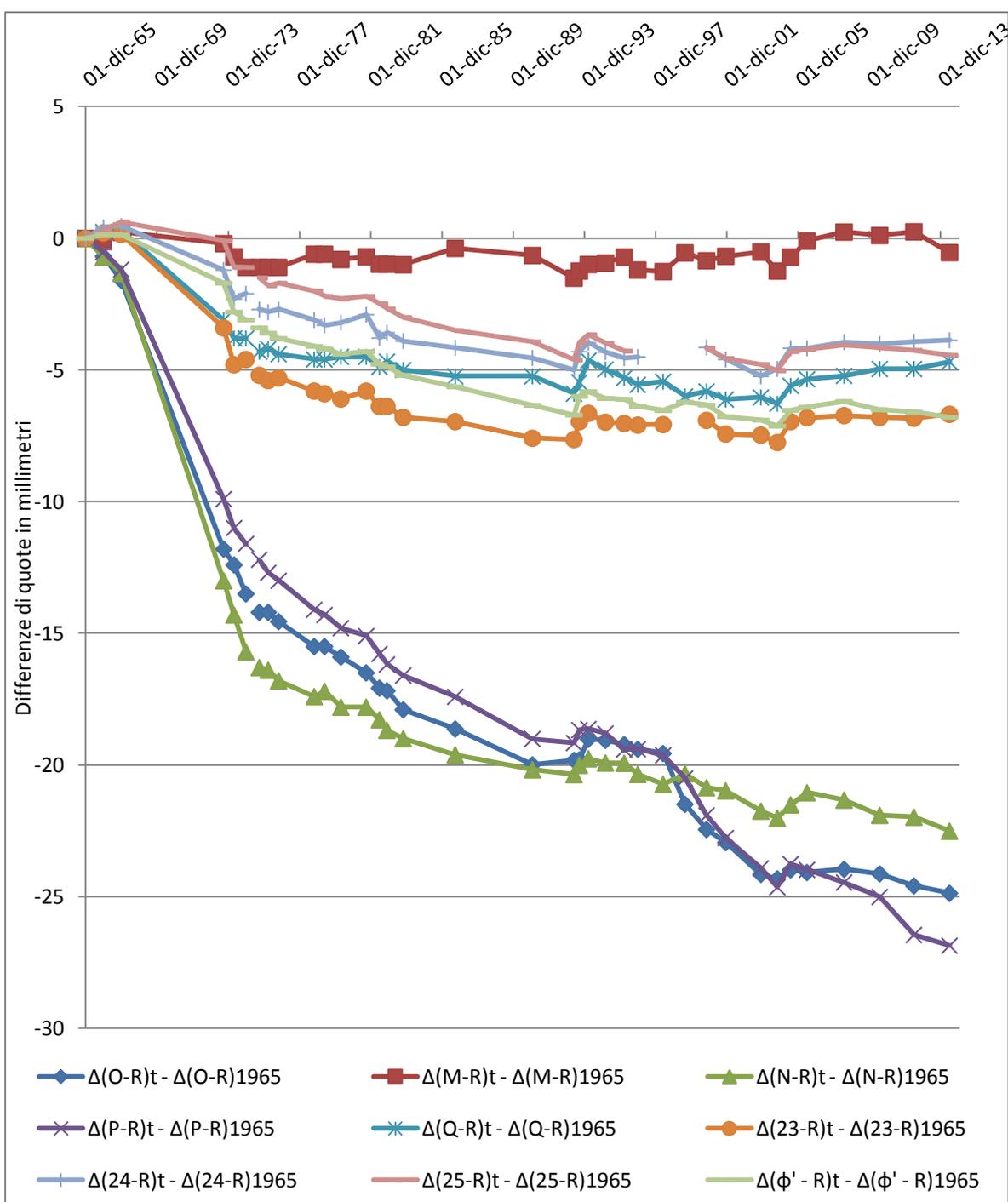


Il grafico che riporta i valori dei coefficienti direttori (a e b) delle equazioni dei piani nel corso degli anni ci indica che vi è una rotazione in atto, a conferma dei risultati già evidenziati nei precedenti paragrafi.

Movimenti della Piazza

Dopo aver scelto il vertice da considerare come il punto che rappresenta il piano di campagna della Piazza (nel nostro caso il vertice \bar{R}), per acquisire informazioni relative ai movimenti delle diverse porzioni della stessa, sono stati calcolate le variazioni di quota di tutti gli altri punti rispetto al vertice \bar{R} .

Il grafico ed i relativi dati serviti per la sua costruzione sono riportati a seguire (i valori sono espressi in millimetri).

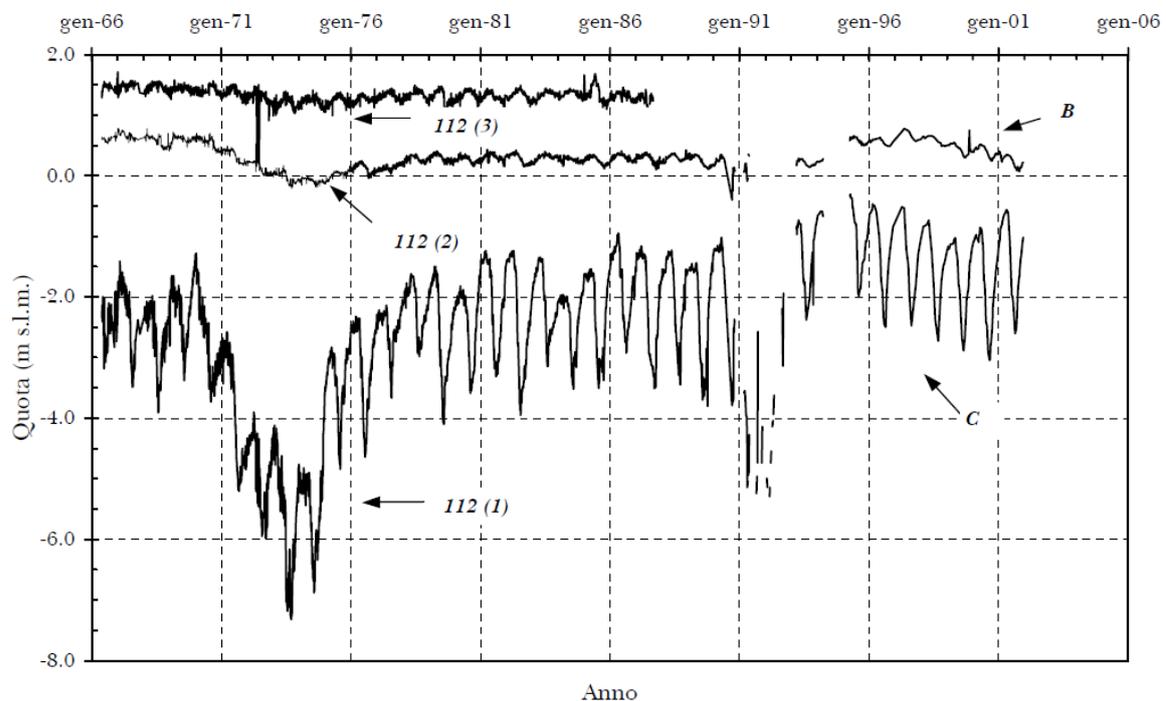


ANNO:	$\Delta(O-R)_t - \Delta(O-R)_{1965}$	$\Delta(M-R)_t - \Delta(M-R)_{1965}$	$\Delta(N-R)_t - \Delta(N-R)_{1965}$	$\Delta(P-R)_t - \Delta(P-R)_{1965}$	$\Delta(Q-R)_t - \Delta(Q-R)_{1965}$	$\Delta(23-R)_t - \Delta(23-R)_{1965}$	$\Delta(24-R)_t - \Delta(24-R)_{1965}$	$\Delta(25-R)_t - \Delta(25-R)_{1965}$	$\Delta(\phi^1-R)_t - \Delta(\phi^1-R)_{1965}$
01-gen-28									
01-dic-65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01-dic-66	-0.68	-0.12	-0.71	-0.52	0.24	0.21	0.42	0.31	0.14
01-dic-67	-1.59	0.23	-1.33	-1.18	0.3	0.15	0.47	0.62	0.13
01-set-73	-11.8	-0.2	-13	-9.9	-3.1	-3.4	-1.2	-0.1	-1.7
01-apr-74	-12.4	-0.7	-14.3	-11	-3.8	-4.8	-2.3	-1.1	-2.8
01-dic-74	-13.5	-1.1	-15.7	-11.6	-3.8	-4.6	-2.1	-1.1	-3.1
01-mar-75									
01-set-75	-14.2	-1.1	-16.3	-12.2	-4.3	-5.2	-2.7	-1.5	-3.4
01-mar-76	-14.2	-1.1	-16.4	-12.7	-4.2	-5.4	-2.8	-1.8	-3.6
01-ott-76	-14.55	-1.1	-16.8	-13	-4.4	-5.3	-2.7	-1.7	-3.8
01-ott-78	-15.5	-0.6	-17.4	-14.1	-4.6	-5.8	-3.1	-2	-4.1
01-mag-79	-15.5	-0.6	-17.2	-14.3	-4.6	-5.9	-3.3	-2.2	-4.2
01-apr-80	-15.9	-0.8	-17.8	-14.8	-4.5	-6.1	-3.2	-2.3	-4.4
01-set-81	-16.5	-0.7	-17.8	-15.1	-4.5	-5.8	-2.9	-2.2	-4.3
01-giu-82	-17.08	-0.98	-18.28	-15.78	-4.88	-6.38	-3.78	-2.48	-4.78
01-nov-82	-17.18	-0.98	-18.68	-16.18	-4.68	-6.38	-3.58	-2.68	-4.88
01-ott-83	-17.9	-1	-19	-16.6	-5	-6.8	-3.9	-3	-5.2
01-set-86	-18.63	-0.38	-19.61	-17.41	-5.24	-6.96	-4.16	-3.5	-5.64
01-gen-91	-19.99	-0.65	-20.18	-19.01	-5.24	-7.59	-4.54	-3.93	-6.34
03-mag-93	-19.82	-1.51	-20.36	-19.16	-5.9	-7.64	-5.01	-4.62	-6.71
21-ago-93	-19.8	-1.24	-20.01	-18.67	-5.46	-6.96	-4.3	-3.96	-6
21-feb-94	-19.02	-0.99	-19.76	-18.63	-4.64	-6.64	-3.96	-3.66	-5.82
06-feb-95	-19.06	-0.94	-19.92	-18.8	-4.98	-6.98	-4.32	-3.98	-6.08
26-feb-96	-19.22	-0.71	-19.93	-19.41	-5.3	-7.03	-4.55	-4.28	-6.11
30-nov-96	-19.4	-1.2	-20.35	-19.4	-5.56	-7.09	-4.5		-6.38
04-mag-98	-19.56	-1.26	-20.73	-19.63	-5.44	-7.07			-6.54
26-lug-99	-21.49	-0.55	-20.33	-20.51	-6				-6.22
10-ott-00	-22.45	-0.85	-20.86	-21.91	-5.81	-6.91	-4.14	-4.17	-6.33
08-nov-01	-22.94	-0.68	-20.98	-22.77	-6.12	-7.43	-4.6	-4.56	-6.77
29-ott-03	-24.15	-0.52	-21.75	-23.92	-6.04	-7.47	-5.24	-4.79	-6.9
01-ott-04	-24.32	-1.24	-22.02	-24.64	-6.28	-7.75	-4.96	-5.03	-7.13
01-lug-05	-23.98	-0.71	-21.51	-23.76	-5.6	-6.96	-4.17	-4.3	-6.53
01-giu-06	-24.08	-0.1	-21.05	-23.98	-5.35	-6.81	-4.17	-4.22	-6.41
01-lug-08	-23.96	0.24	-21.33	-24.46	-5.22	-6.73	-3.94	-4.06	-6.19
01-lug-10	-24.13	0.11	-21.91	-25.01	-4.96	-6.8	-4.02	-4.16	-6.51
01-giu-12	-24.59	0.25	-21.98	-26.45	-4.96	-6.83	-3.92	-4.25	-6.6
01-giu-14	-24.87	-0.54	-22.51	-26.86	-4.69	-6.68	-3.87	-4.44	-6.79

Dal grafico, dove vengono rappresentate le curve relative alle variazioni dei dislivelli tra i diversi capisaldi e il vertice \bar{R} , si possono ricavare alcune informazioni sul movimento della Piazza.

Intanto si noterà che le serie riferite ai vertici $\bar{23}$, $\bar{24}$, $\bar{25}$ presentano un'interruzione: questo perché non erano disponibili le quote di detti capisaldi risalenti al 1996, 1998, 1999. I punti, invece, ottenuti dai valore delle quote dei capisaldi risalenti al 1975 non sono da tenere in considerazione: poiché si discostano molto dagli altri punti è da ritenere che siano affetti da un errore.

Dal 1965 al 1973, cioè nei primi anni Settanta, c'è stata una concentrazione di movimenti che non si è più ripetuta negli anni successivi. In quegli anni si è verificato, per ogni vertice, un grande cedimento che a partire dal 1973 sta stabilizzandosi. E' difficile risalire alle cause di tale fenomeno: in primo luogo perché non sono disponibili le misurazioni altimetriche dei capisaldi che riguardano gli anni compresi tra il 1968 e il 1972; in più è lecito pensare che tali cause siano esterne proprio perché il fenomeno descritto è isolato. In particolar modo potrebbe dipendere dai cospicui pompaggi d'acqua delle industrie intorno Pisa (come la famosa Saint Gobain, molto attiva in quegli anni) che possono aver investito anche la falda di Piazza dei Miracoli. A conferma di quanto esposto, si riporta il grafico tratto da "LA TORRE DI PISA. Gli studi e gli interventi che hanno consentito la stabilizzazione della Torre di Pisa (2005)" rappresentante, nel tempo, il livello della falda misurato dai piezometri posti attorno alla Torre di Pisa.

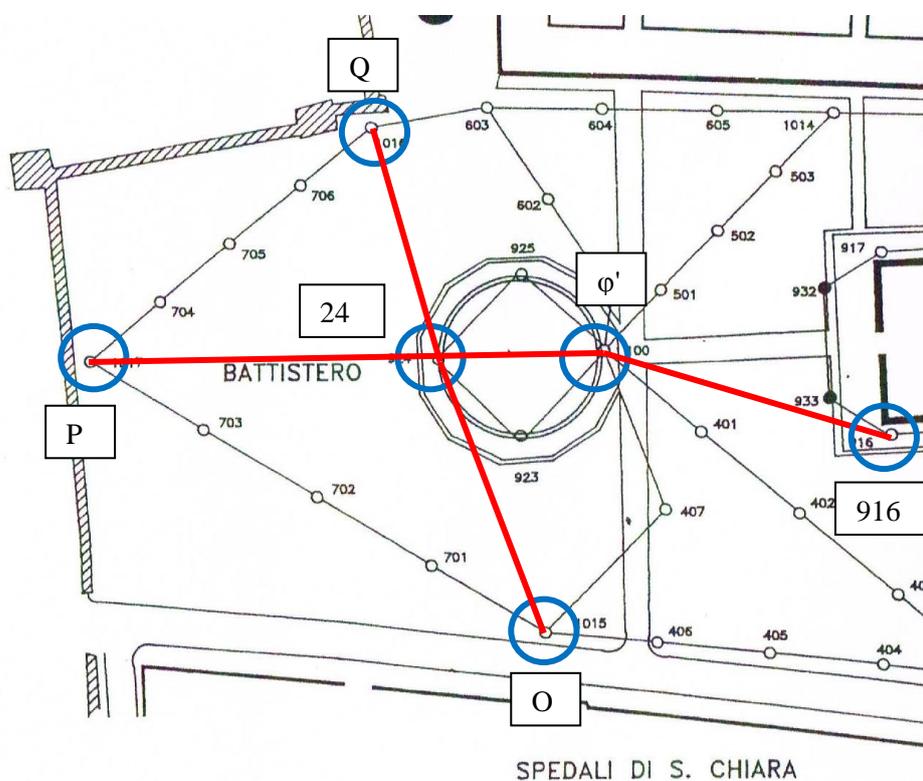


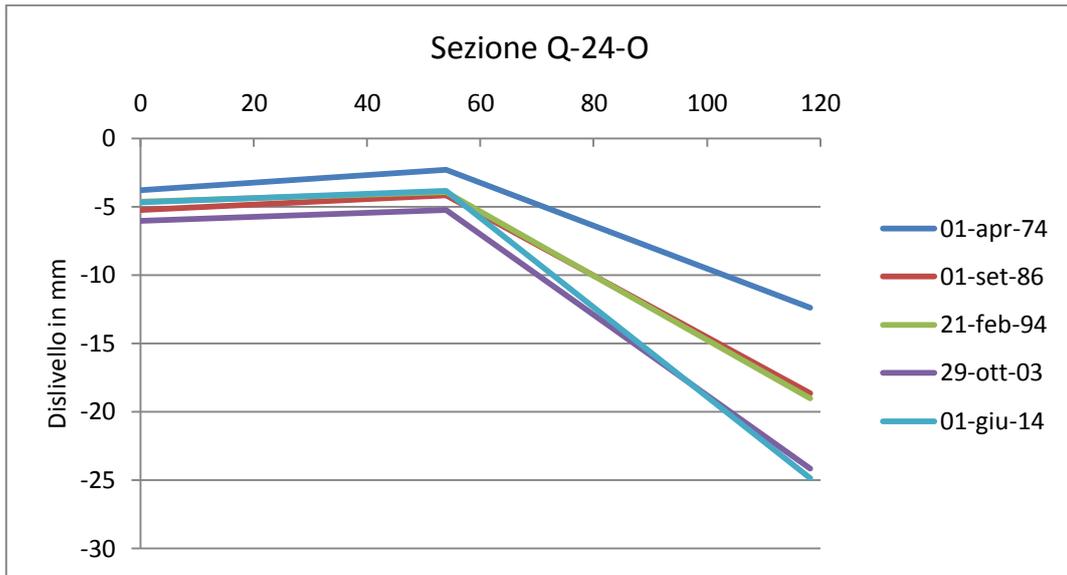
Dall'andamento delle curve riferite ai quattro capisaldi del Battistero, si nota che i due vertici ϕ' e $\bar{23}$ si sono abbassati (rispetto ad \bar{R}) nel corso degli anni di una quantità maggiore dei capisaldi $\bar{24}$ e $\bar{25}$, confermando quanto già dedotto dal grafico in cui si rappresentavano i dislivelli dei tre

capisaldi $\overline{23}$, $\overline{24}$ e $\overline{25}$ rispetto al vertice ϕ' , e cioè che il Battistero ha compiuto una rotazione rispetto ad un asse che va da Nord-Est a Sud-Ovest.

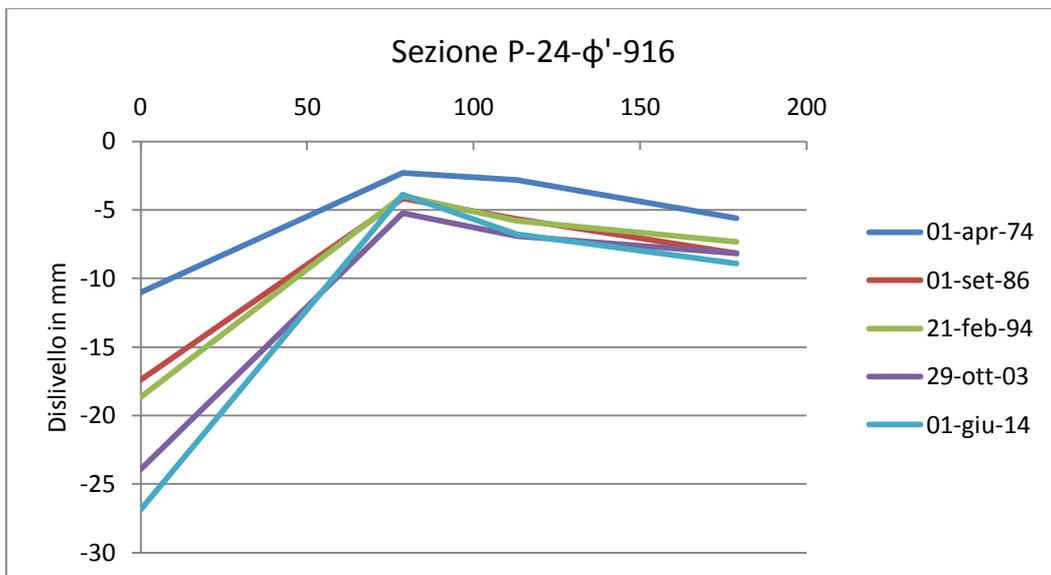
Osservando l'andamento delle variazioni di dislivello degli altri vertici, si nota che: mentre le curve riferite ai vertici \overline{M} e \overline{Q} hanno un andamento simile a quello dei vertici del Battistero, (per il punto \overline{M} si può dire che ha variazione zero rispetto ad \overline{R}), i vertici \overline{N} , \overline{O} , e \overline{P} presentano un notevole abbassamento rispetto ad \overline{R} , dovuto sia ad un brusco calo delle curve che si riscontra prima del 1973, sia da una maggiore inclinazione delle curve da quella data in poi. Ciò ci indica che la porzione di Piazza a Sud e ad Ovest del Battistero sta cedendo di una quantità maggiore rispetto a quella a Nord e ad Est. Questo movimento non coincide con la rotazione del Battistero, anzi, dai movimenti altimetrici delle porzioni di Piazza ci saremmo dovuti aspettare una rotazione del Battistero rispetto ad un asse che va da Nord-Ovest a Sud-Est anziché la rotazione rispetto ad un asse che va da Nord-Est a Sud-Ovest.

Si conclude questo paragrafo mostrando l'andamento delle differenze di quota dal 1965 ad oggi (sempre rispetto ad \overline{R}) in alcuni anni significativi, su sezioni di punti noti della piazza e del Battistero. Di seguito la pianta dove sono ubicate le sezioni e a seguire i grafici ed i relativi dati (le distanze sono riportate in metri e le differenze di quota in millimetri).





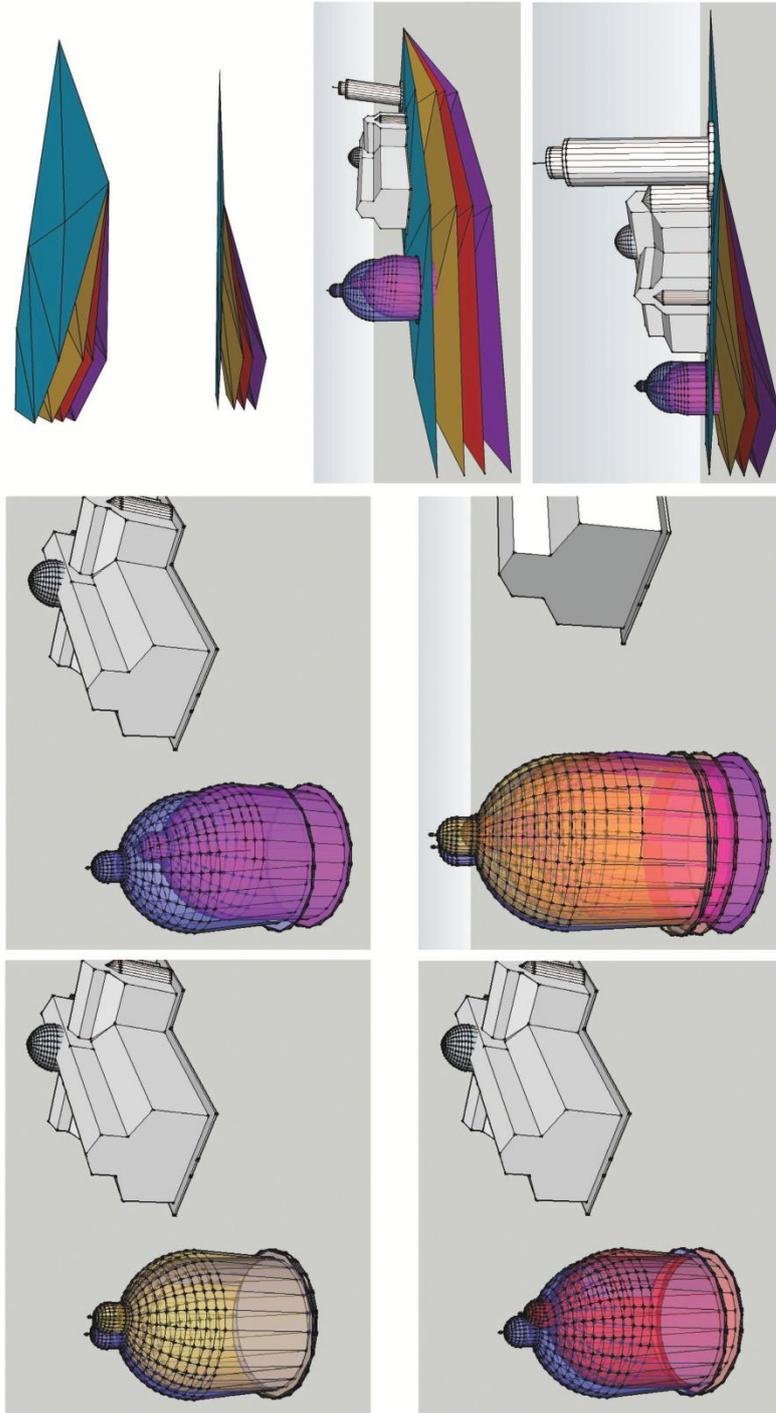
Punti	Distanze	01-apr-74	01-set-86	21-feb-94	29-ott-03	01-giu-14
Q	0.00	-3.8	-5.24	-4.64	-6.04	-4.69
24	54.00	-2.3	-4.16	-3.96	-5.24	-3.87
O	118.24	-12.4	-18.63	-19.02	-24.15	-24.87



Punti	Distanze	01-apr-74	01-set-86	21-feb-94	29-ott-03	01-giu-14
P	0.00	-11	-17.41	-18.63	-23.92	-26.86
24	78.64	-2.3	-4.16	-3.96	-5.24	-3.87
ϕ'	112.86	-2.8	-5.64	-5.82	-6.9	-6.79
916	178.99	-5.6	-8.18	-7.34	-8.18	-8.93

Dai grafici si possono evincere le seguenti considerazioni a conferma di quanto sopra esposto:

- La parte di piazza a Nord del Battistero cede in maniera analoga al Battistero in tutte le serie considerate ma è evidente l'abbassamento della parte della piazza a Sud negli anni, soprattutto nei periodi 1974-1986 e 1994-2003.
- La parte di piazza ad Ovest del Battistero cede molto di più dello stesso soprattutto nei periodi 1974-1986 e 1994-2003, mentre il punto 916 posto in prossimità del Duomo cede leggermente di più rispetto al Battistero.



Schema dei movimenti della Piazza e del Battistero:
 (gli spostamenti verticali sono stati amplificati di 1000 volte)

— Anno 1965 — Anno 1986 — Anno 2000 — Anno 2014

Capitolo III

INDAGINI SUL SOTTOSUOLO

Le indagini

I mezzi di indagine per indagare sulla natura dei terreni e sulle proprietà fisico-meccaniche sono di due tipi: il prelievo di campioni indisturbati, da portare in laboratorio per una successiva analisi, oppure l'esecuzione delle prove in loco. La prima consente una sperimentazione molto articolata ed accurata ma su volumi limitati e spesso i campioni prelevati non sono così indisturbati. La seconda, invece, offre la possibilità di operare su volumi di terreno decisamente maggiori e nelle condizioni del sito ma le grandezze misurate dovranno essere correlate empiricamente con le proprietà del terreno. E' buona norma percorrerle entrambe per arrivare a dei risultati attendibili.

Di seguito i principali mezzi di indagine.

Finalità	Mezzi di indagine	
Definizione del profilo stratigrafico	<i>Diretti</i>	<i>Indiretti</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Scavi accessibili (pozzi, cunicoli, trincee) • Perforazioni di sondaggio 	<ul style="list-style-type: none"> • Prove penetrometriche • Indagini geofisiche
Proprietà fisico-meccaniche dei terreni	<i>In laboratorio</i>	<i>In sito</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Analisi e prove su campioni indisturbati 	<ul style="list-style-type: none"> • Penetrometri (CPT, CPTU, SPT, DPT) • Scissometro • Pressiometro • Dilatometro piatto (DMT) • Prove di carico su piastra • Prove di permeabilità • Velocità delle onde sismiche (In foro: CH, DH; in superficie: SASW)

Nel nostro caso, dopo la descrizione delle analisi già svolte ed aggiornate nel capitolo precedente, viene riportata la sintesi dell'analisi condotta dal collega Capocchi alle indagini geoelettriche e, successivamente, le nuove indagini che sono state svolte recentemente.

La campagna di indagini in sito, per capire quale potrebbe essere il sottosuolo del Battistero, ha compreso:

- n° 8 prove penetrometriche con piezocono (CPTU) disposte idealmente lungo 2 assi ortogonali in modo da formare le bisettrici degli angoli compresi tra gli assi passanti per le porte di accesso.
- la misura velocità delle onde di taglio V_s utilizzando il dilatometro sismico (SDMT), disposto a circa 70 cm dalla prova CPTU n° 8 in direzione opposta al Battistero.

Purtroppo non sono stati ancora eseguiti, sebbene programmati, i sondaggi in sito per poter "tarare" i risultati di queste prove con la reale la stratigrafia del terreno.

La pianta seguente mostra l'ubicazione delle prove svolte.

Indagini geoelettriche

Dal metodo geoelettrico all'interpretazione

Le indagini geoelettriche sono tra i metodi geofisici più utilizzati per lo studio del sottosuolo in contesti archeologici: lo scopo è quello di ricavare informazioni riguardanti la geometria e la localizzazione di elementi antropici sepolti alla luce delle loro proprietà elettriche.

Questa tipologia di rilievi non invasivi (si definiscono “non invasivi” poiché non prevedono significative perturbazioni del suolo come scavi, buche o pozzi; va segnalato, tuttavia, che l'immissione per alcuni cm di elettrodi metallici in determinanti contesti quali pavimentazioni storiche, lastricati e selciati può essere considerata “invasiva”) si basano sui principi che descrivono la conduzione elettrica attraverso un mezzo: più una sostanza si lascia attraversare da portatori di carica, più essa viene definita conduttiva; viceversa essa è definita resistiva.

In particolare, e senza addentrarci nella trattazione teorica, il metodo della resistività si realizza attraverso la misura della differenza di potenziale elettrico in diversi punti della superficie del terreno. L'obiettivo è ricostruire modelli di resistività del sottosuolo attraverso un processo di inversione dei dati acquisiti in campagna.

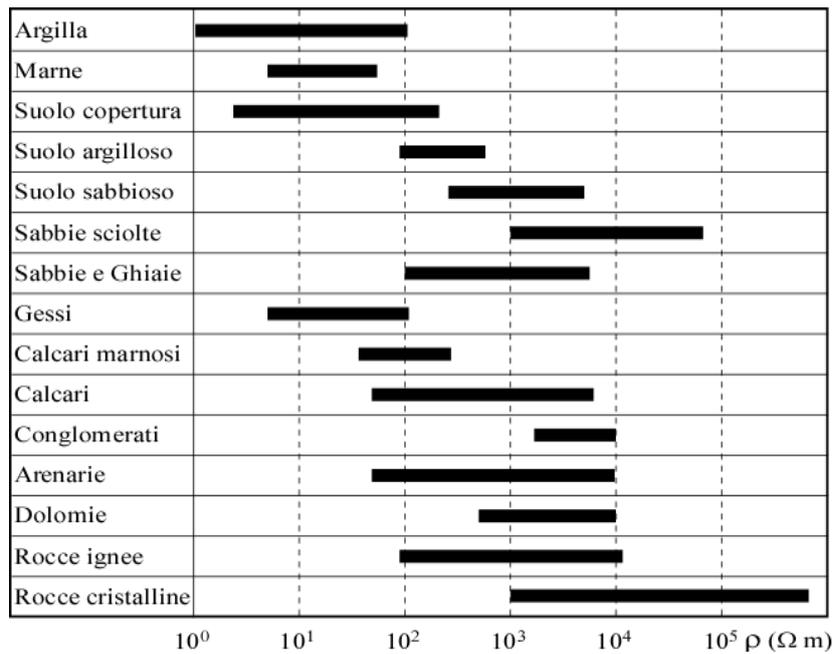
I modelli 1D e 2D sono il risultato di un insieme di delicate operazioni sul campo e in laboratorio: solo un operatore pienamente consapevole di tutti i passaggi è in grado di ricavare informazioni utili da un'indagine geoelettrica. L'interpretazione dei modelli di resistività, soprattutto in campo archeologico, va condotta con la massima attenzione e prudenza. È molto facile, infatti, cadere in facili approssimazioni o arrivare a conclusioni troppo affrettate.

Prima di tutto va ricordato che, oltre alle inevitabili anisotropie e disomogeneità del terreno che impediscono una ricostruzione univoca del modello geometrico, la resistività del sottosuolo dipende da diversi fattori quali porosità, presenza di fluidi, composizione mineralogica, grado di fratturazione, grado di saturazione nonché presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, etc.). In particolare, la resistività delle rocce è sempre maggiore a quella dell'acqua nei pori, è minima in corrispondenza del grado di saturazione massimo ed è tanto minore quanto maggiore è la porosità. Come risulta evidente osservando i valori riportati in tabella, anche per singole classi di rocce o terreni si registra una grande variabilità di valori di resistività (I valori di resistività a volte variano per diversi ordini di grandezza).

I sedimenti non consolidati generalmente hanno resistività inferiore rispetto alle rocce sedimentarie, tuttavia, proprio perché poco consolidati, risulta difficile stimare il valore della loro resistività, che dipende dalla porosità e dal contenuto in argilla. I terreni argillosi possiedono comunemente valori di resistività inferiori a quelli dei terreni sabbiosi. Il contenuto idrico, infine, ricopre un ruolo importante nella determinazione della resistività apparente del terreno, provocandone un abbassamento della resistività media. Alla luce di queste considerazioni del tutto

generali è evidente che non esiste una corrispondenza biunivoca tra valore di resistività riscontrato nel modello e materiale presente nel suolo e nel sottosuolo: solo un'interpretazione che tenga conto delle caratteristiche geologiche, archeologiche e fisiche del sito indagato può dipanare il rebus dato dalla variabilità dei valori di resistività.

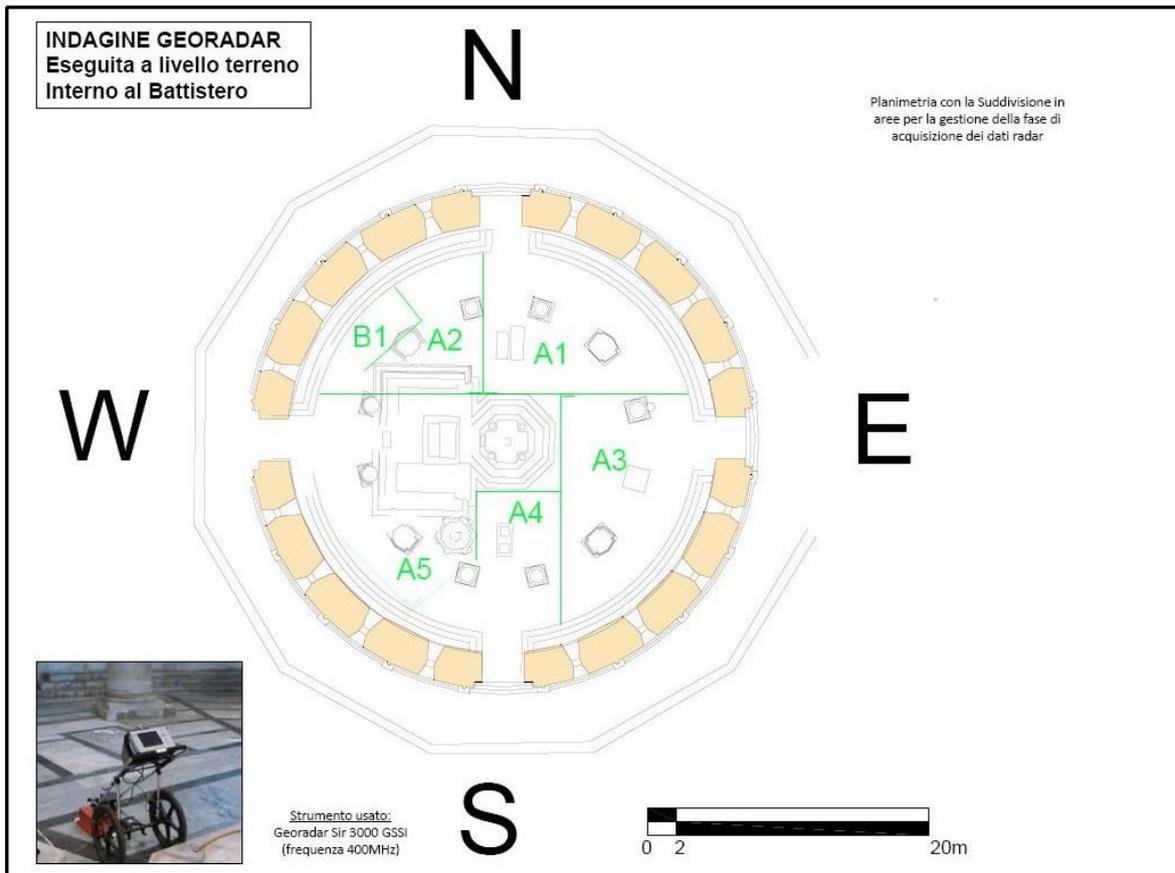
MATERIALE	INTERVALLO DI RESISTIVITÀ
Arenaria	$60 - 10^4 \Omega m$
Argilla	$1 - 120 \Omega m$
Sabbia	$100 - 1000 \Omega m$
Limo	$10 - 800 \Omega m$
Ghiaia	$100 - 5000 \Omega m$
Calcere	$100 - 5000 \Omega m$
Basalto	$10 - 10^5 \Omega m$
Marmo	$100 - 10^8 \Omega m$
Granito	$100 - 10^6 \Omega m$



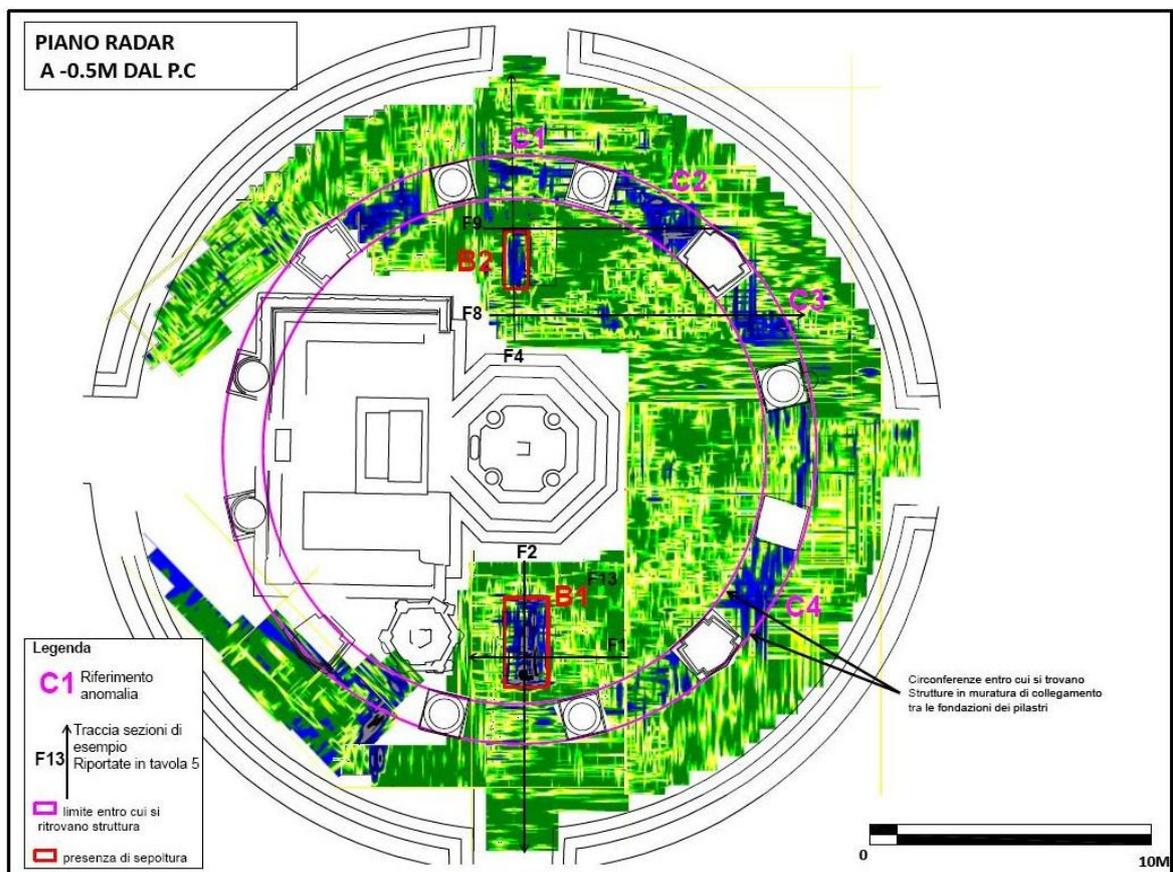
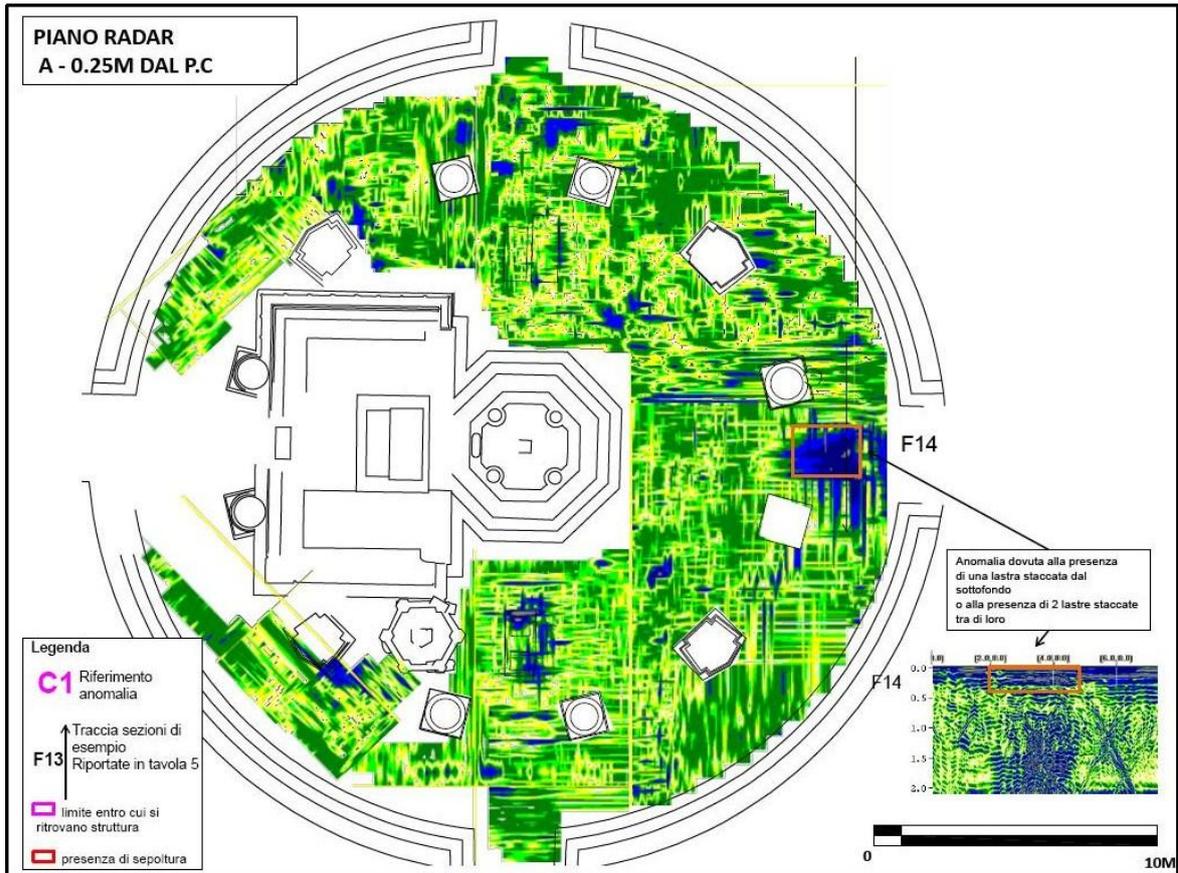
Analisi dei risultati delle indagini geoelettriche

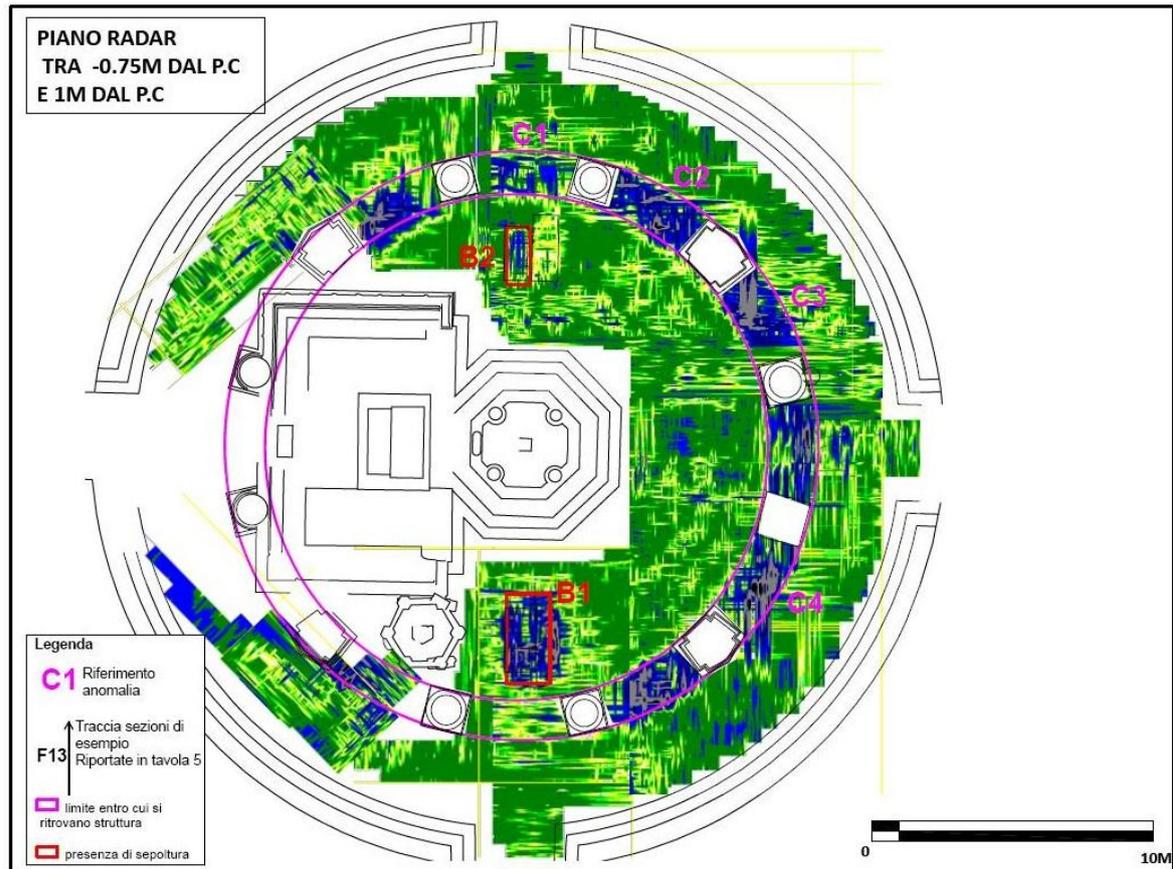
Per semplificare la lettura e la comprensione dei risultati, si riportano le immagini delle schede tecniche più significative del lavoro svolto dalla ditta esecutrice dell'indagine e commentandone gli aspetti per acquisire le varie informazioni.

La planimetria seguente mostra la suddivisione in aree dell'interno del Battistero, per la gestione della fase di acquisizione dei dati radar.



La planimetria evidenzia che l'interno del Battistero è stato diviso in sei aree, denominate A1, A2, A3, A4, A5 e B1, di cui è facile individuare la disposizione di ciascuna in relazione alla fonte battesimale, al pulpito e in base ai quattro portali, distinti anche dalle lettere delle direzioni cardinali.





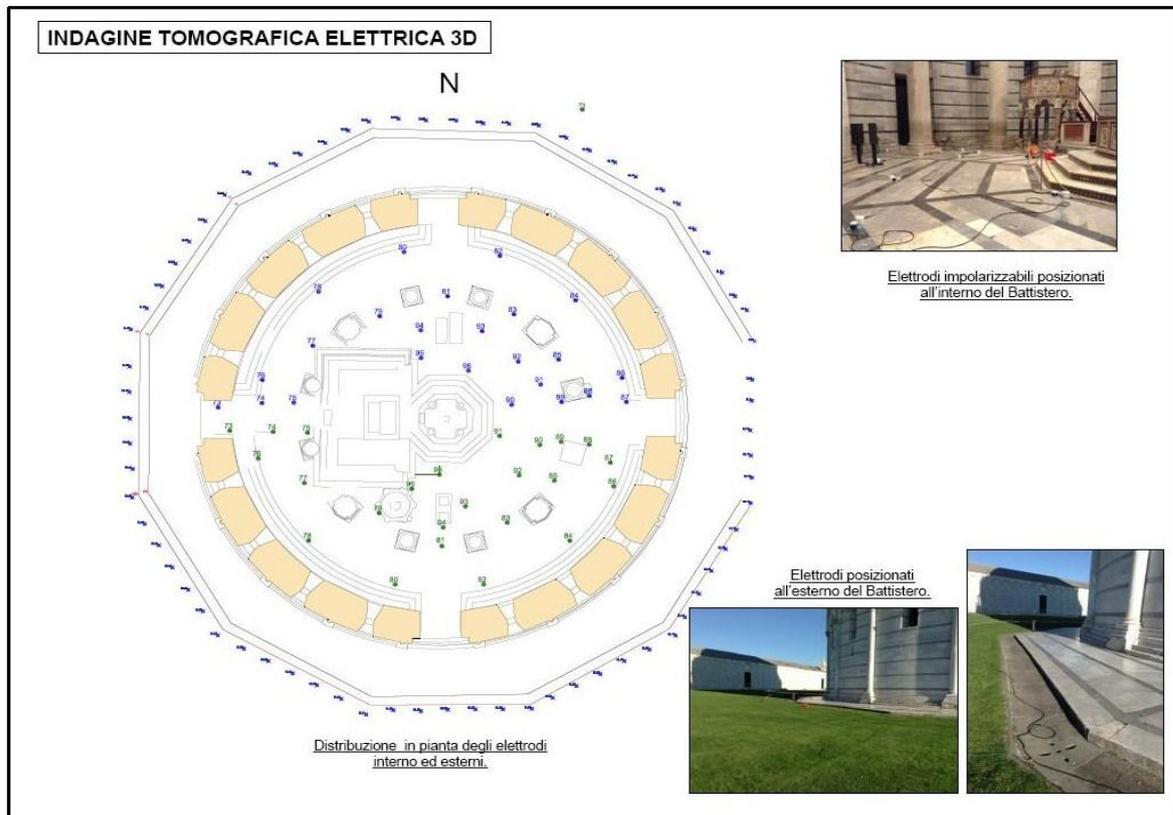
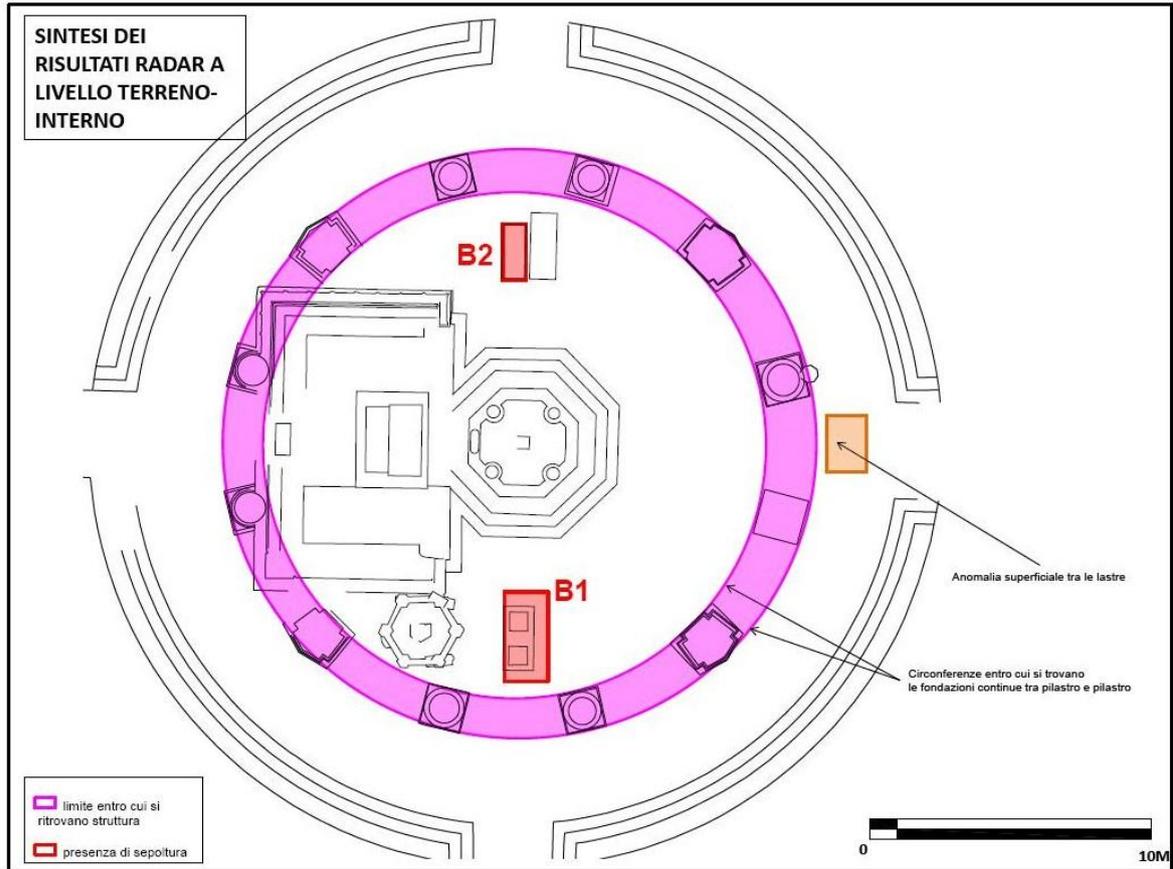
Utilizzando un radar a livello del terreno interno, possiamo notare dalle tre piante precedenti (a -0.5m , a -1.0m ed a -1.5m dal p.c.) una anomalia nei colori nei pressi dell'entrata Est dell'edificio. In quel punto la diversa risposta del radar è indicata dal colore blu. Nel rettangolo arancione si evidenzia l'anomalia che in questo caso, data la profondità, è dovuta alla presenza di una lastra staccata dal sottofondo in quanto la stessa anomalia non è presente nei risultati a maggiore profondità.

Dalle ultime 2 planimetrie, si inizia a vedere la struttura dell'anello di fondazione più esterno. Più precisamente si tratta delle strutture in muratura che collegano le fondazioni dei vari pilastri, in figura rappresentate dai tratti di colore blu compresi tra i due cerchi rosa che indicano i limiti entro cui si trova l'anello di fondazione.

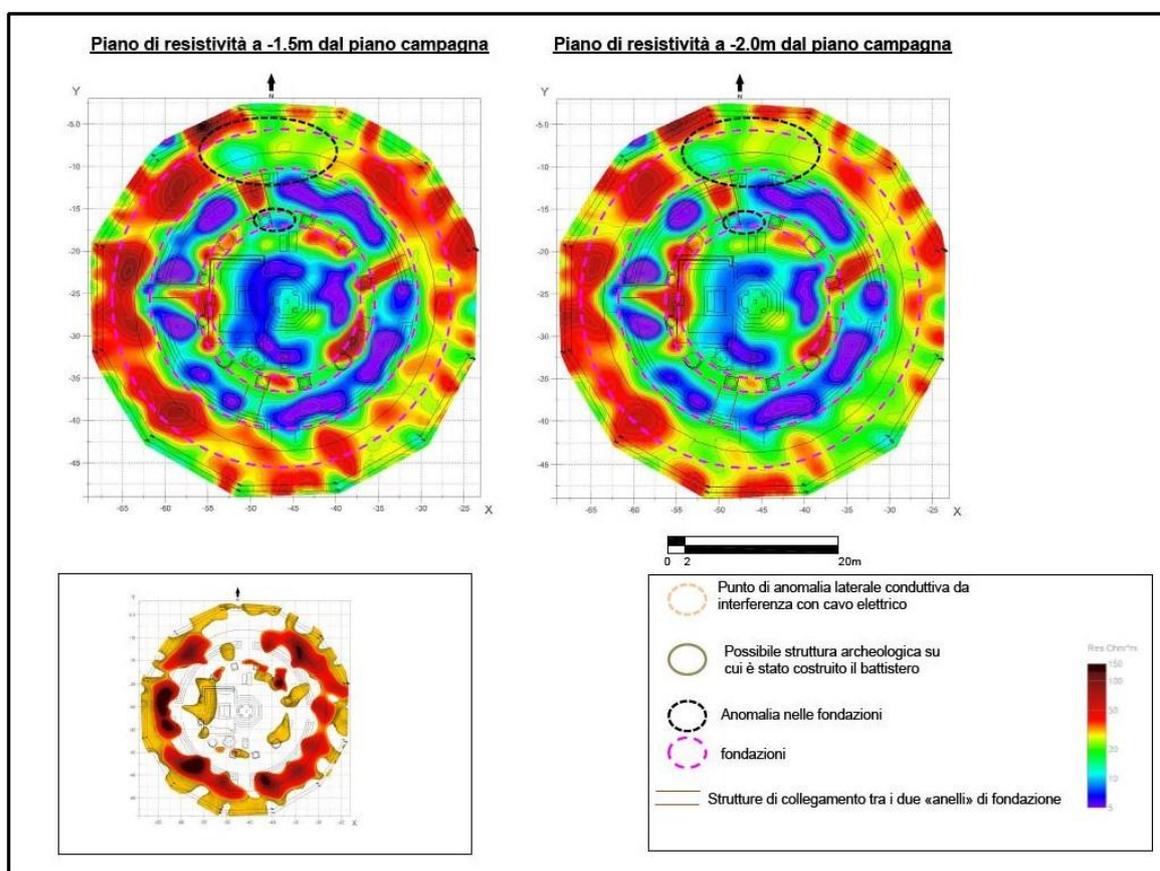
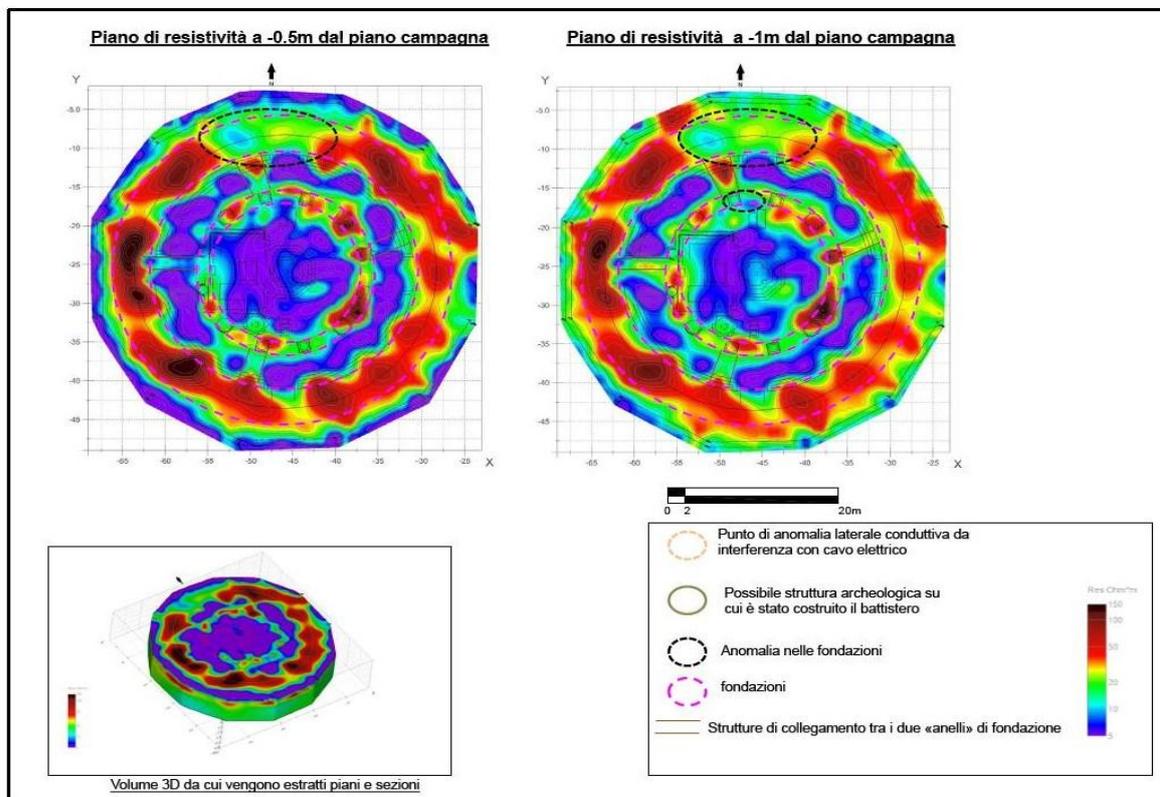
Nel confrontare la prima planimetria, con la seconda riferita a livelli più profondi, si nota che le zone in blu all'interno dei due cerchi sono più definite e più continue.

I due rettangoli rossi, denominati B1 e B2, indicano la presenza di tombe.

Di seguito, la planimetria che indica la sintesi dei risultati delle prove radar eseguite al livello della pavimentazione del Battistero ove sono facilmente riconoscibili l'anello di fondazione esterno, le due tombe (rettangoli rossi) e l'anomalia dovuta alla lastra vicino alla porta Est (rettangolo arancione).



Nell'immagine precedente è rappresentata la pianta della disposizione degli elettrodi per l'indagine geoelettrica, installati sia all'interno del Battistero, sia all'esterno lungo il perimetro del marciapiede.



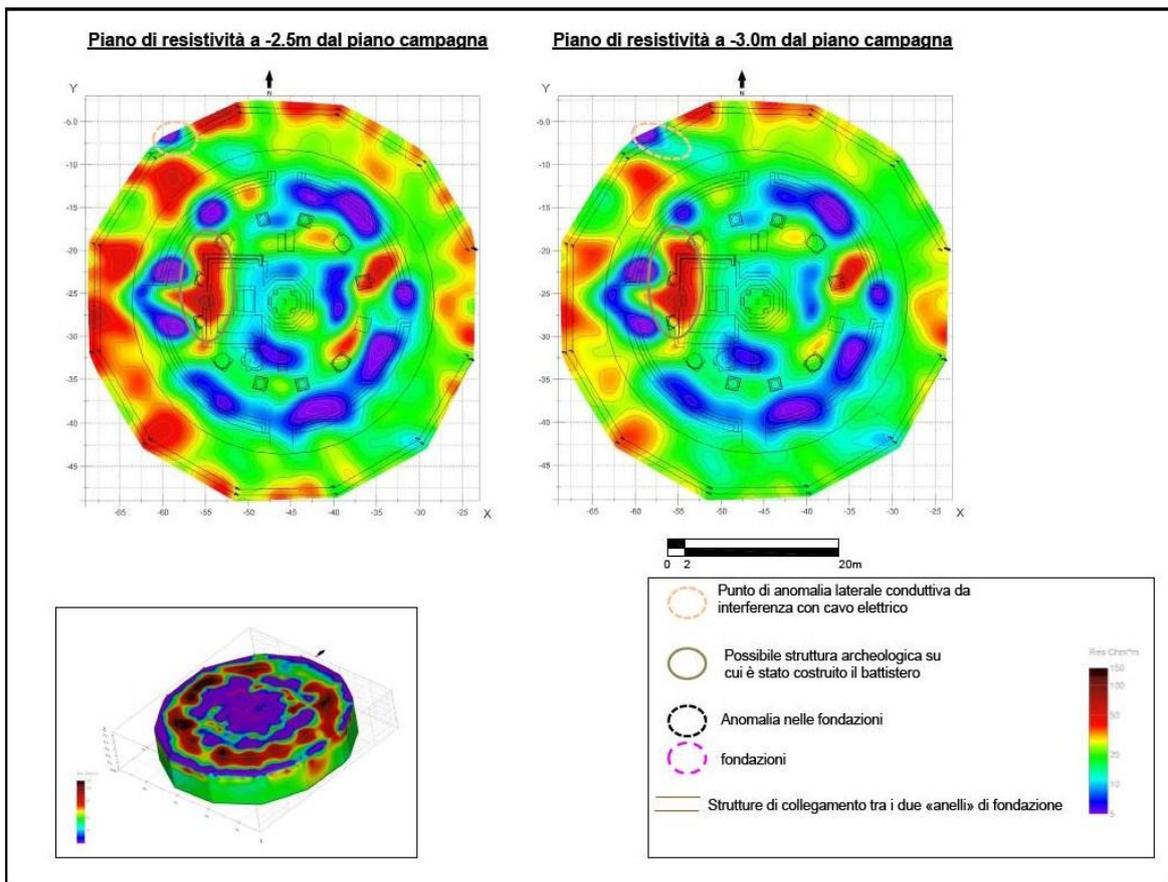
I piani di resistività, rilevata degli elettrodi installati, sono rappresentati da queste immagini colorate, nella scheda della pagina precedente abbiamo i piani di resistività riferiti alle quote -0.5m e -1.0m dal p.d.c. e di seguito le immagini dei piani a quota -1.5m e -2.0m.

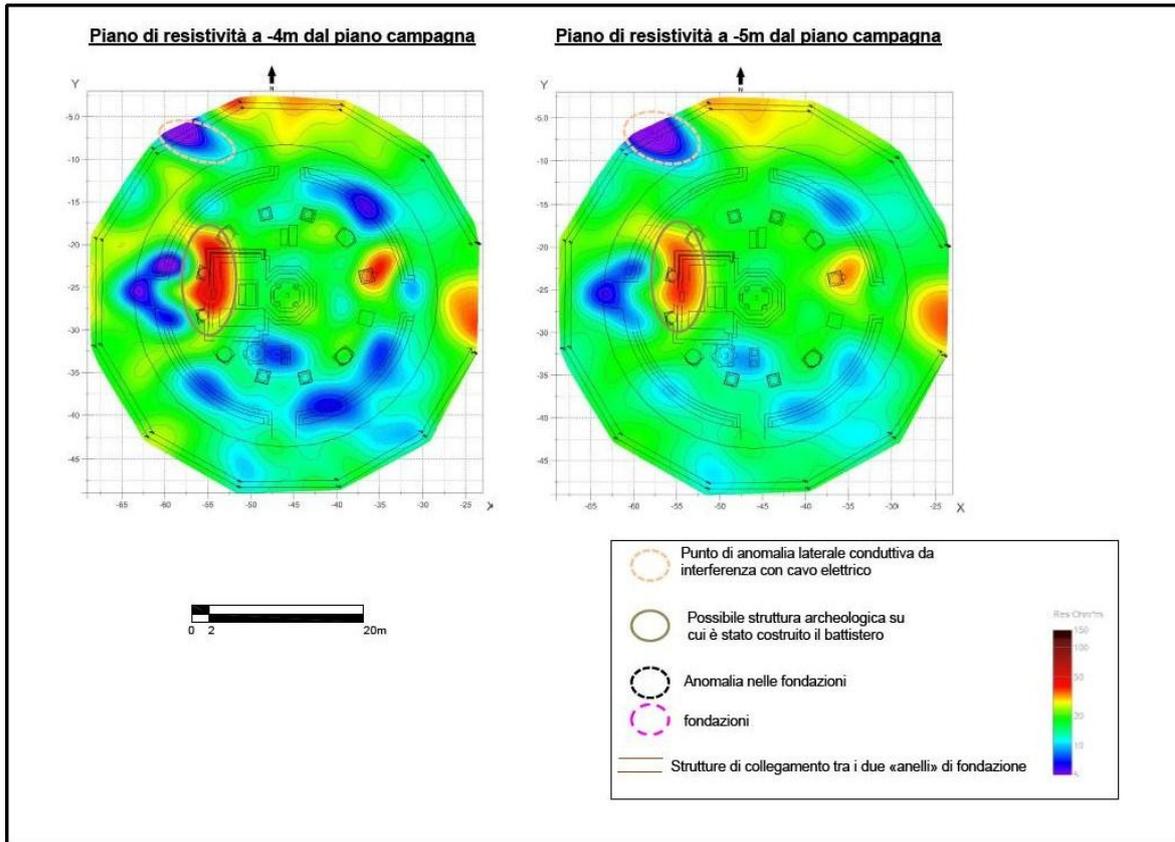
A queste profondità si possono notare delle anomalie di risposta del segnale su alcune zone dei due anelli di fondazione. I limiti dei due anelli di fondazione sono individuati dalle linee spezzate di colore rosa, mentre le anomalie sono cerchiare con linee nere tratteggiate.

Alla quota di -0.5m è già presente l'anomalia sulla parte nord della fondazione dell'anello più esterno, mentre l'anomalia sulla struttura dell'anello interno, sempre disposta a nord, ma di superficie ed entità minore, inizia ad essere evidente solo dai piani di resistività delle quote da -1.0m in giù.

Si nota anche la presenza di alcuni tratti di elementi di struttura di collegamento tra i due anelli di fondazione, come una sorta di raggi che uniscono le due fondazioni. Di questi tratti, i cui limiti sono individuati da linee di colore marrone, se ne contano quattro e sono disposti, non proprio in maniera simmetrica, ma approssimativamente lungo le quattro direzioni Nord, Sud, Est ed Ovest.

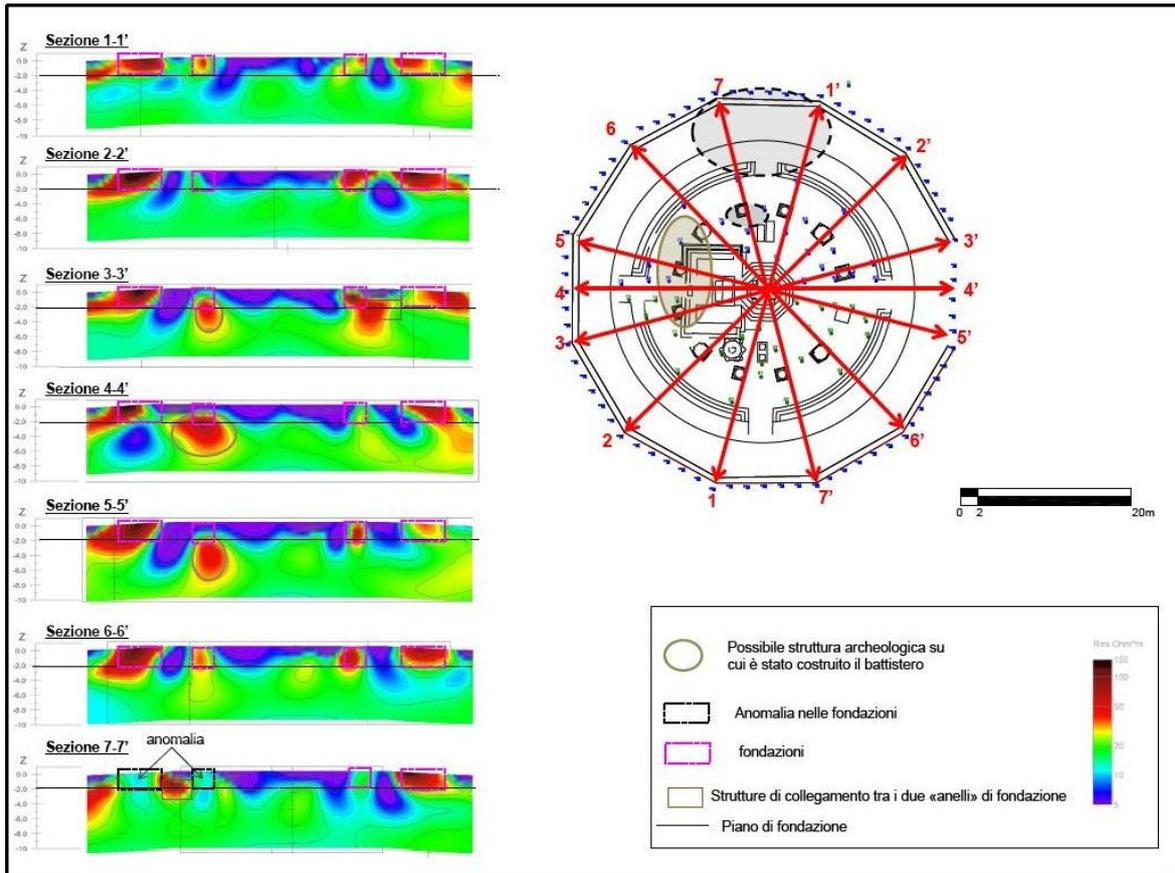
Di seguito saranno riportati i piani di resistività delle quote che vanno da -2.5m fino ad una profondità di -5.0m dal piano di campagna.





Da queste immagini, si possono acquisire diverse informazioni importanti:

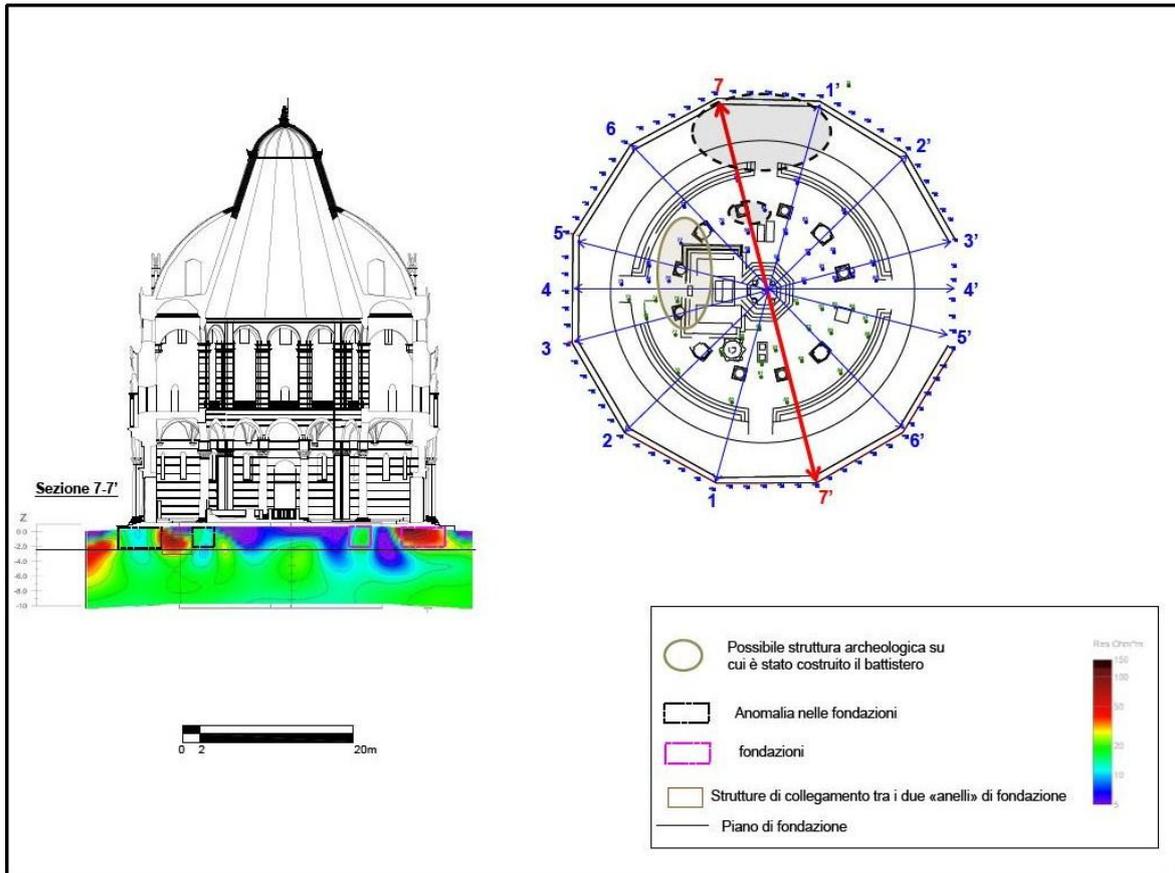
- non si rilevano più le strutture di fondazione ad anello e nemmeno le strutture di collegamento tra i due anelli, quindi a questa profondità il piano di appoggio delle fondazioni è già stato superato;
- il piano di fondazione possiamo quotarlo intorno a -2 metri sotto il piano di campagna;
- la presenza di una possibile struttura archeologica su cui sarebbe stato costruito il Battistero, nel grafico si evidenzia la resistività rossa che testimonia questa struttura, con una linea grigia;
- è presente anche a Nord-Ovest una zona di anomalia conduttiva, dovuta probabilmente alla presenza di interferenze con cavi elettrici.



La scheda sopra indica in pianta la disposizione delle varie sezioni di resistività del Battistero, e al lato sinistro riporta le sezioni stesse.

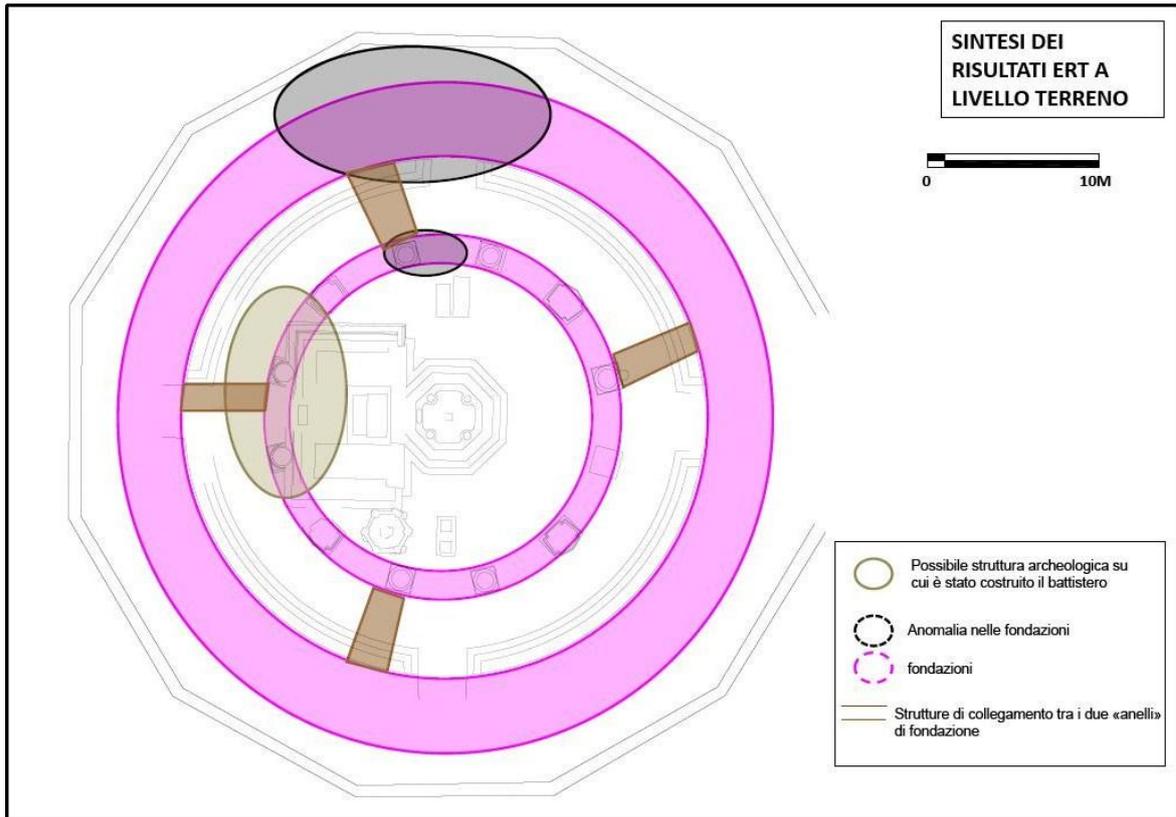
Da qui si può valutare correttamente la quota del piano di fondazione (linea nera) che si attesta su tutta la circonferenza del monumento ad una quota di circa di -2 metri dal piano campagna.

Nell'ultima sezione (Sezione 7-7') si vede chiaramente che l'anomalia evidenziata nelle varie piante è confermata anche in sezione e si traduce in una diversa resistività rilevata in un tratto a Nord della fondazione esterna, questo fenomeno potrebbe dipendere dalla presenza in quel tratto di un materiale diverso dal resto della fondazione, o dall'assenza per quel tratto della fondazione stessa. La prossima immagine è relativa alla sezione 7-7' ritenuta per questo motivo più rappresentativa:



L'immagine della sezione del Battistero, oltre a confermare le informazioni dedotte precedentemente, mette in luce che l'anello di fondazione esterno sporge di una quantità pari a circa 1 metro dalla limite della parete esterna del monumento, creando quindi un dente di fondazione che si estende per il primo tratto del marciapiede del Battistero. Questa caratteristica delle fondazioni era finora ignota.

Nell'ultima scheda vengono evidenziate in pianta le informazioni ottenute dai risultati, di rosa sono indicate le due strutture ad anello, con il marrone le strutture di collegamento, con i cerchi neri, la posizione delle anomalie nei risultati, e con il cerchio grigio la posizione della possibile struttura archeologica sopra cui è stato costruito il Battistero.



Prove penetrometriche con piezocono (CPTU)

Introduzione

Le prove penetrometriche si fondano sull'idea che la resistenza opposta dal terreno alla penetrazione di uno strumento dipenda dalle sue caratteristiche meccaniche (evidentemente, soprattutto dalla sua resistenza, dato che la penetrazione è un fenomeno di rottura) oltre che dallo stato del materiale. Si distinguono tra: prove penetrometriche dinamiche e prove penetrometriche statiche, tra cui quelle con punta piezometrica (piezocono o CPTU), la u serve per ricordare che nel corso della prova si misurano le pressioni interstiziali. Nel nostro caso sono state usate questo tipo di prove.

I penetrometri statici sono in genere montati su un autocarro che fornisce anche la necessaria reazione con il proprio peso. La capacità di un penetrometro è pertanto limitata a 100-200kN, da cui discende l'impossibilità di penetrare in terreni molto addensati o con orizzonti cementati, in questi casi si può ricorrere ad un preforo.

La prova penetrometrica statica consiste nella misura della resistenza alla penetrazione nel terreno di una punta conica standardizzata con apertura di 60° e diametro di 35.7 mm (area della sezione, $A = 10 \text{ cm}^2$), che viene infissa nel terreno con un martinetto meccanico o idraulico, alla velocità costante di 20 mm/s. (standardizzazione ASTM del 1979)



Fig. 1: Cingolato Pagani da da 200 kN

Nel penetrometro meccanico (punta Begemann), la colonna di aste che fa avanzare la punta è protetta da una tubazione di rivestimento con diametro esterno uguale a quello della punta. Fra punta e tubi è disposto un manicotto scorrevole (*friction jacket*) con area di $A_L = 150 \text{ cm}^2$, opportunamente sagomato per evitare l'ingresso di terreno nell'intercapedine fra aste e tubi, che permette la misura di una resistenza laterale locale. Si fanno penetrare in successione la punta, il manicotto, la tubazione di rivestimento e tutti e tre insieme per successivi tratti di 0.1 m, misurando la forza necessaria per infiggere la punta, R_P , la forza necessaria ad infiggere il manicotto, R_{LL} , la forza necessaria ad infiggere la tubazione di rivestimento, R_L , e la forza totale, R .

La resistenza unitaria alla punta, $q_c = R_P/A$ è il dato principale che si ricava dalla prova; essa viene presentata in genere sotto forma di diagramma di q_c con la profondità (profilo penetrometrico). Il rapporto tra R_{LL} e la superficie laterale del manicotto, rappresenta la resistenza laterale locale unitaria $f_s = R_{LL}/A_L$. Oltre a q_c si diagramma in funzione della profondità il rapporto $FR = q_c/f_s$.

Nel penetrometro elettrico vi è un'unica batteria di aste e le resistenze alla punta e laterale locale vengono misurate direttamente sull'attrezzo a mezzo di trasduttori elettrici (da cui il nome dell'apparecchio). Il vantaggio di questo sistema è quello di avere una misura continua e contemporanea delle due grandezze, che inoltre può essere acquisita su supporto informatico ed elaborata automaticamente.

Nel piezocono (CPTU) alla normale punta penetrometrica elettrica vengono aggiunte una o più piastre porose collegate a trasduttori che consentono la misura della pressione interstiziale nell'intorno della punta durante l'infissione. I trasduttori di forza per la misura della resistenza alla punta q_c e dell'attrito laterale R_{LL} , sono realizzati con ponti estensimetrici studiati per ridurre gli effetti prodotti da eccentricità del carico. Le due celle di misura sono meccanicamente indipendenti, in tal modo l'applicazione del carico sulla punta non dà luogo a letture apparenti sul carico del manicotto. Un termometro misura la temperatura degli elementi sottoposti a sforzo e permette, per mezzo d'algoritmi di calcolo, la compensazione termica delle grandezze in misura. Il sistema di misura d'avanzamento delle aste è costituito da un trasduttore di spostamento lineare. Un sottile cavetto in acciaio che esce dal dispositivo, è collegato alla testa di spinta e, durante la fase d'infissione delle aste, provoca la rotazione di un potenziometro multigiro. La corsa utile di misura può arrivare a 150 cm.

L'inclinazione assunta dal piezocono durante la sua infissione, è misurata per mezzo di un inclinometro biassale. Le derive termiche sono compensate sia per mezzo d'opportuni dispositivi presenti sui sensori sia via software.

I dati delle resistenze alla punta, al manicotto laterale, della pressione dei pori e dell'inclinazione della punta vengono registrati dal computer di pilotaggio della prova e successivamente elaborati. Con questa apparecchiatura è anche possibile eseguire prove di dissipazione della pressione interstiziale indotta dall'infissione, arrestando la penetrazione ad una determinata profondità e registrando l'andamento nel tempo della pressione neutra.

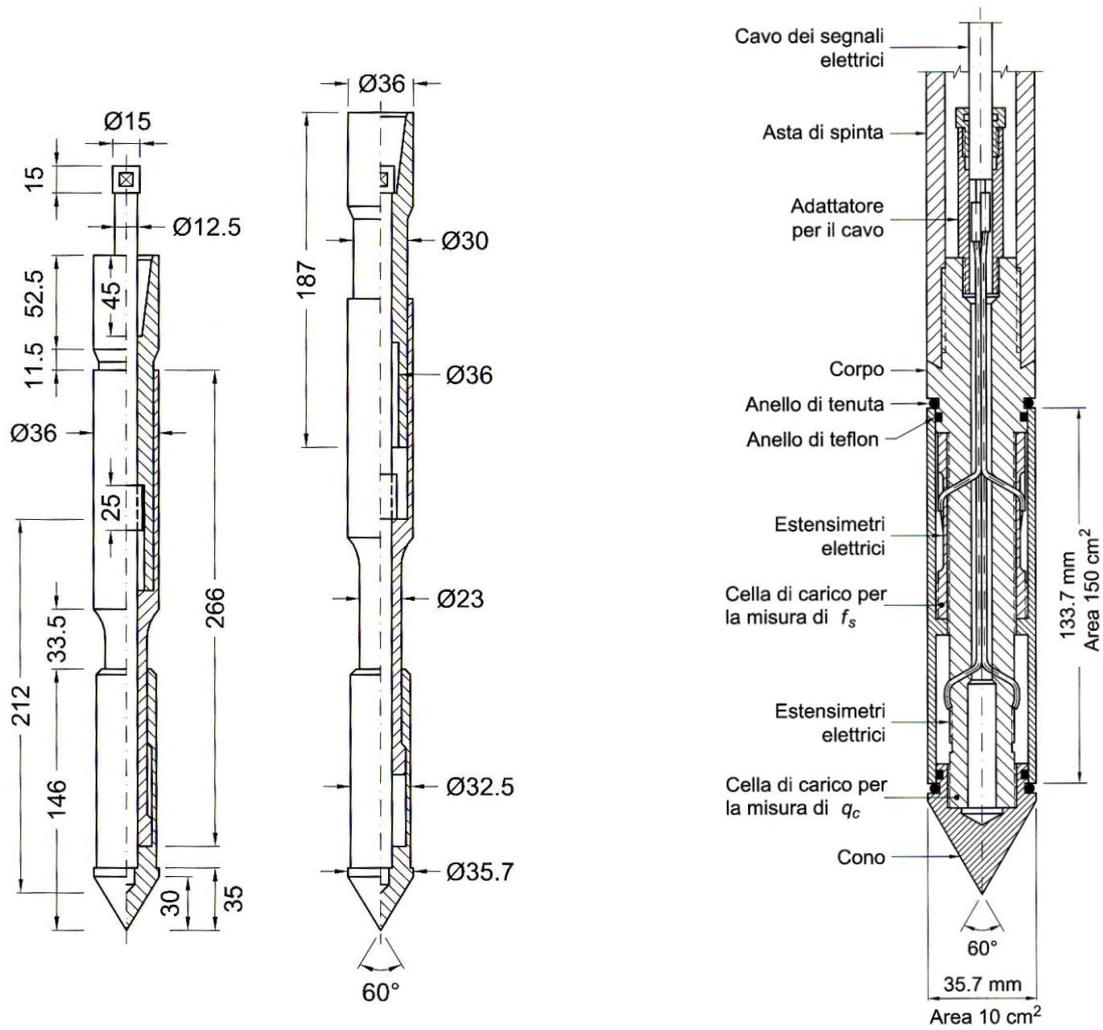


Fig. 2: Punta Begemann a sinistra e Penetrometro elettrico a destra

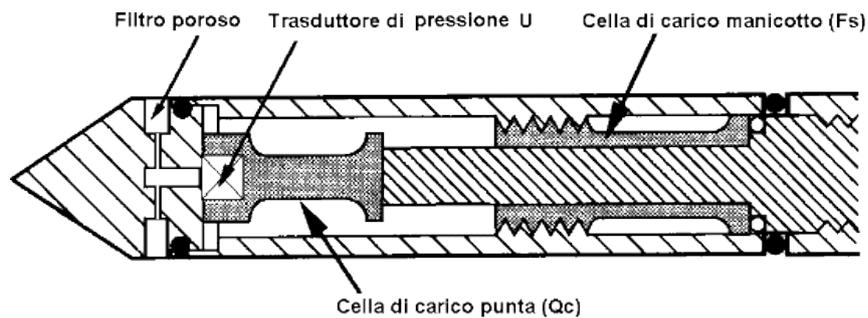


Fig. 3: Piezocono

Durante l'esecuzione della penetrometria, la penetrazione della punta nel terreno spostandolo, crea un eccesso di pressione nell'acqua interstiziale, rispetto al carico idraulico in condizioni statiche. La velocità di dissipazione di detto eccesso di pressione dipende dal coefficiente di consolidazione che a sua volta è funzione della compressibilità e della permeabilità del terreno. La prova di dissipazione può perciò essere eseguita a qualsiasi profondità, misurando i tempi di dissipazione

della pressione in eccesso nei pori, fino ad una certa percentuale del valore di equilibrio (normalmente il 60 – 80%), che viene assunto come il carico idrostatico alla profondità di prova.

I risultati delle prove CPT possono essere utilizzati per il riconoscimento della costituzione del sottosuolo in base ai valori caratteristici assunti dalla resistenza alla punta, all'andamento del profilo penetrometrico, ai valori caratteristici assunti dal rapporto FR, e, nel caso di prove CPTU, anche all'esame delle sovrappressioni interstiziali generate durante l'infissione.

Quindi I risultati delle prove penetrometriche possono essere utilizzati per indagare:

- Profilo stratigrafico;
- Grado di sovraconsolidazione (OCR);
- Stato di addensamento (D_r);
- Resistenza in tensioni totali (c_u);
- Resistenza in tensioni efficaci (ϕ');
- Deformabilità in tensioni totali (E_u);
- Deformabilità in tensioni efficaci (E');
- Caratteristiche idrauliche (C_v)

I vantaggi della ripetitività delle misure, di poter indagare un volume di terreno superiore a quello corrispondente a un campione in laboratorio e di ottenere registrazioni continue di parametri che mettono in luce peculiarità stratigrafiche, rendono questo tipo di prove ideali per l'identificazione di variazioni litologiche e la ricostruzione del profilo stratigrafico.

In particolare, per la ricostruzione del profilo stratigrafico, tali prove necessitano di carotaggi eseguiti in loco per poter "tarare" i risultati ottenuti in modo da poter procedere ad una identificazione più precisa ed accurata dei vari strati che compongono il sottosuolo.

Strumentazione adottata

Nel nostro caso è stato utilizzato il piezocono Pagani con il quale è stato possibile acquisire, durante il movimento continuo di spinta, le grandezze q_c (resistenza di punta) ed f_s (attrito laterale) ad ogni centimetro di profondità contro i 20 centimetri ottenibili dalla punta meccanica di tipo Begemann.

Il sistema acquisisce inoltre il valore della u (pressione idrostatica nei pori), l'angolo di inclinazione della batteria di aste ed il tempo di dissipazione (tempo intercorrente misurato tra la misura della sovrappressione ottenuta in fase di spinta e la pressione misurata in fase di alleggerimento di spinta).



Fig. 4 Piezocono Pagani Sistema TGAS07

Il sistema, oltre al piezocono comprende anche:

- il sistema di acquisizione;
- il modulo per la misura la profondità e la velocità di infissione;
- l'alimentatore elettrico;
- il GPS per la geolocalizzazione e un'antenna GSM per la trasmissione dei dati;
- il software dedicato per la lettura dei dati su PC.

Caratteristiche del piezocono			
<i>Canali di misura:</i>		<i>Dimensioni:</i>	
Resistenza di punta (qc):	50; 100 MPa	Angolo di apertura cono:	60°
Attrito laterale (fs):	1,6 MPa (titanio)	Diametro:	36 mm
Pressione nei pori (u):	2,5 MPa	Sezione di spinta:	10 cm ²
Inclinazione:	0 - 20°	Superficie laterale:	150 cm ²
Tip area factor (a):	0,80	Peso:	2,1 kg
Sleeve area factor (b):	0	Lunghezza:	413 mm

Riferimenti per l'interpretazione dei dati

Allo stato attuale, la stratigrafia del sottosuolo può essere ricostruita solamente utilizzando correlazioni empiriche (carte di classificazione dei terreni) quali quelle di ROBERTSON et al. [1986], ROBERTSON [1990], ESLAMI e FELLENIUS [1997; 2000]. Ovviamente, come tutte le correlazioni empiriche disponibili nella letteratura tecnica, hanno dei limiti di applicabilità a contesti diversi rispetto a quelli relativi al database di dati da cui sono state originate.

Alcuni autori hanno proposto metodi non tradizionali di classificazione dei terreni a partire da prove CPT che utilizzano la fuzzy logic [ZHANG e TUMAY, 1999], le reti neurali artificiali [KURUP e GRIFFIN, 2006] o approcci probabilistici [JUNG et al., 2008] ma richiedono un addestramento specifico per potere essere utilizzate e quindi non verranno presi in considerazione.

Le carte di classificazione maggiormente utilizzate per le prove CPTU sono descritte di seguito:

- a) ROBERTSON et al. [1986]: Robertson e Campanella hanno messo a punto due carte di classificazione utilizzando il medesimo parametro (q_t) per l'ordinata, ma due parametri diversi per le ascisse (R_f e B_q). q_t è la resistenza alla punta corretta in base alla u misurata in fase di penetrazione e al rapporto delle aree A_n/A_c .

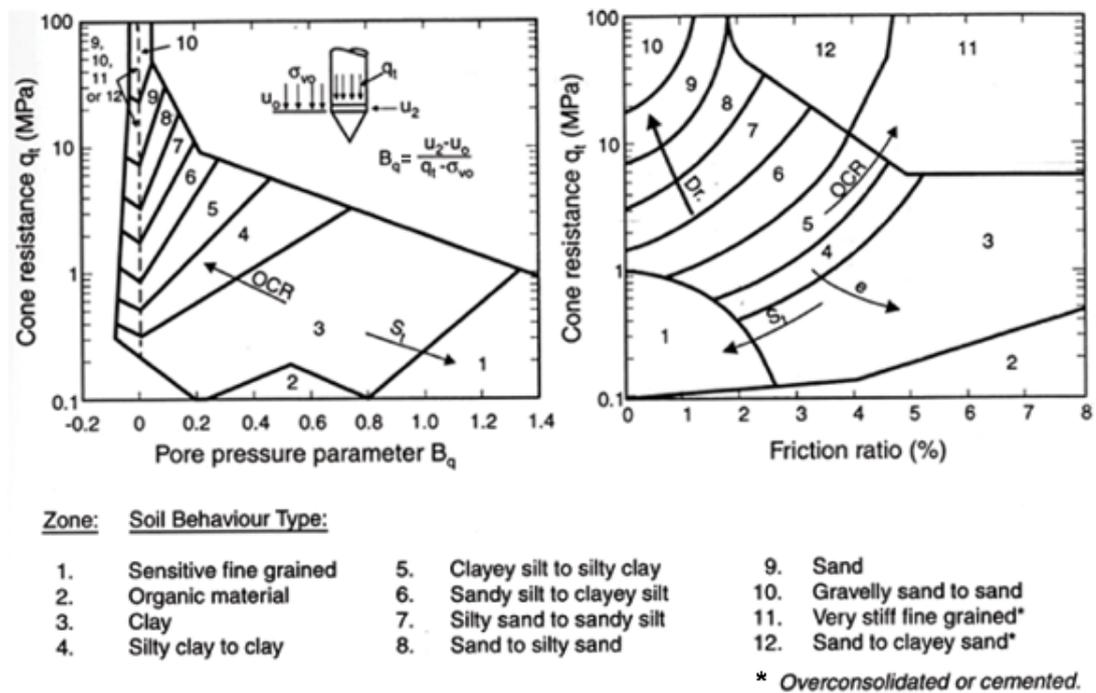


Fig. 5: Carte di classificazione (Robertson, 1986)

Dove:

A_c = area del cono

A_n = area netta

$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - A_n/A_c)$ è la resistenza alla punta corretta

$R_f = \frac{100 \cdot f_s}{q_t}$ è il rapporto di frizione

$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t * \sigma_{v0})$ è il "rapporto della pressione nei pori" (pore pressure ratio) dove:

- u_2 = pressione neutra misurata con un filtro poroso posto subito dopo la base del cono;
- u_0 = pressione idrostatica;
- q_t = resistenza alla punta corretta in base alla u ;
- σ_{v0} = carico litostatico totale

Gli autori suggeriscono di utilizzare entrambi i grafici, perché i fattori di influenza sono numerosi.

Ovviamente è possibile ottenere indicazioni differenti. In questo caso l'operatore deve sopperire con il proprio giudizio.

A puro titolo di esempio: se durante una prova otteniamo i seguenti valori: $q_t = 1\text{MPa}$; $R_f = 4\%$; $B_q = 0.1$ il terreno in esame potrebbe essere classificato argilla sulla carta q_t - R_f , e limo argilloso sull'altra. È possibile superare le incertezze con misure di dissipazione. Se la dissipazione è piuttosto rapida ($t_{50} < 60$ s) il terreno appartiene alla seconda categoria.

Nel 2010, queste carte di classificazione sono state aggiornate utilizzando, al posto del parametro q_t , il parametro q_c/p_a (dove per p_a si intende la pressione atmosferica). Il numero di tipi di comportamento del terreno (SBT) è stato ridotto da 12 a 9 per poter confrontare i risultati con le carte di classificazione introdotte nel 1990 (vedi punto seguente). Per semplificare l'applicazione della carta di classificazione, q_c/p_a e R_f possono essere combinati in un unico indice del comportamento del suolo $I(\text{SBT})$, dove $I(\text{SBT})$ è il raggio dei cerchi concentrici rappresentante i confini tra ciascuna zona SBT. I_c è definito come segue:

$$I(\text{SBT}) = ((3.47 - \log (q_c/p_a))^2 + (\log R_f + 1.22)^2)^{0.5}$$

- b) ROBERTSON [1990]: l'autore ha introdotto due nuovi parametri, per tenere conto dell'influenza che la pressione litostatica può esercitare con la profondità:

Q_t normalizzata = $(q_t - \sigma_{v0}) / \sigma_{v0}^2$; valore utilizzato nelle ordinate di entrambi i grafici

R_f normalizzata = $f_s / (q_t - \sigma_{v0})$

B_q normalizzata = $B_q = \frac{\Delta U}{q_t - \sigma_{v0}}$

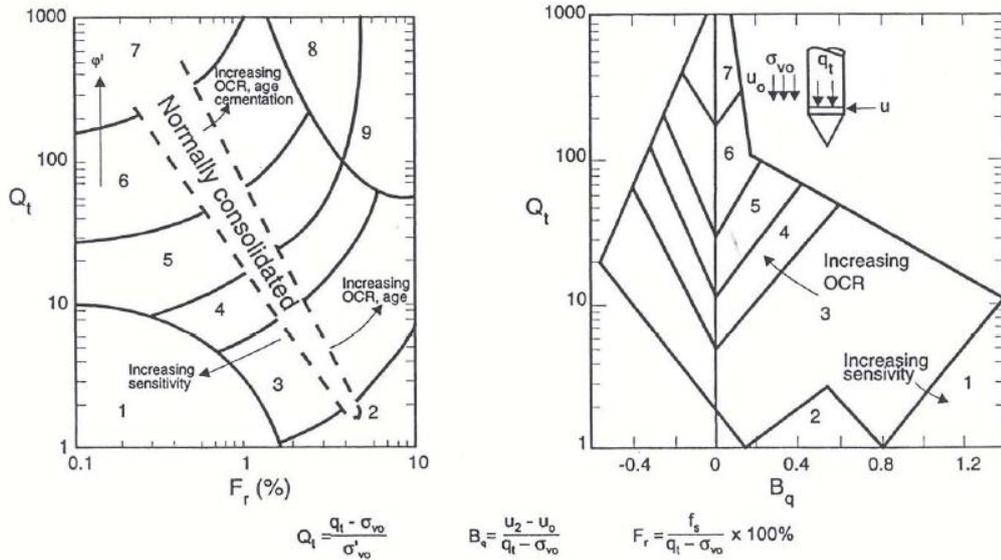
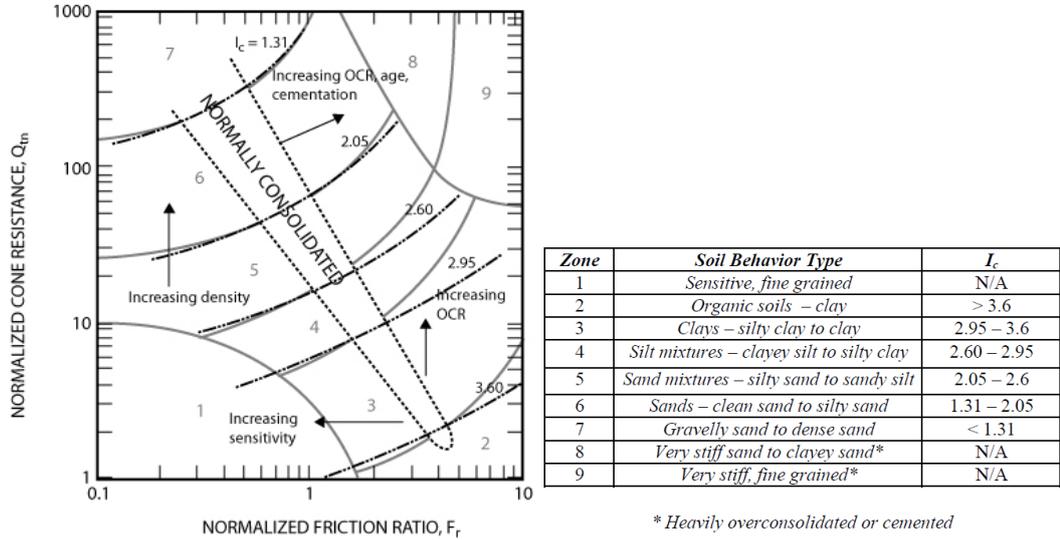
dove:

$\Delta U = u_2 - u_0$

Per semplificare l'applicazione della carta di classificazione SBT_n , la Q_t e R_f possono essere combinati in un unico indice del comportamento del suolo I_c , dove I_c è il raggio dei cerchi concentrici rappresentante i confini tra ciascuna zona SBT_n . I_c è definito come segue:

$$I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log R_f + 1.22)^2)^{0.5}$$

La carta di classificazione è applicabile solo dove il contributo delle tensioni litostatiche diventa alto, tanto da modificare significativamente la q_c . Per tale motivo l'autore consiglia di utilizzarli per profondità maggiori di 30 m dal piano di campagna.



- Zone** **Soil behaviour type**
1. Sensitive, fine grained;
 2. Organic soils-peats;
 3. Clays-clay to silty clay;

- Zone** **Soil behaviour type**
4. Silt mixtures clayey silt to silty clay
 5. Sand mixtures; silty sand to sand silty
 6. Sands; clean sands to silty sands

- Zone** **Soil behaviour type**
7. Gravelly sand to sand;
 8. Very stiff sand to clayey sand
 9. Very stiff fine grained

Fig. 6: Carte di classificazione (Robertson, 1990)

- c) ESLAMI e FELLENIUS [1997]: la carta di classificazione messa a punto dai due autori si basa su un database contenente dati di prove CPT e CPTU, associati a prove di laboratorio per suoli provenienti da 20 siti in varie parti del mondo. Il database non include casi di suoli cementati o argille molto compatte, e di conseguenza tali litotipi non vengono riportati nel grafico. Sulle ascisse è riportata la f_s , sulle ordinate viene adottato un nuovo parametro chiamato q_E (resistenza alla punta efficace) = $(q_t - u_2)$. In suoli sabbiosi densi la q_E differisce solo marginalmente dalla q_t ; al contrario in suoli fini la pressione neutra potrebbe (a causa del suo valore) rendere differenti i due parametri. La carta di classificazione viene divisa dagli autori in una serie di campi, per la nomenclatura dei vari litotipi è stata utilizzata la classificazione del Canadian Foundation Engineering Manual (Canadian Geotechnical Society, 1985).

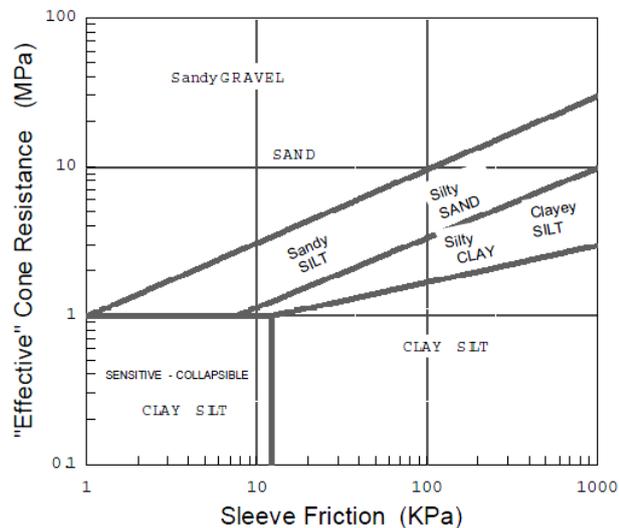


Fig. 7: Carta di classificazione (Eslami e Fellenius)

L'utilizzo delle carte di classificazione deve tuttavia tenere conto di alcune considerazioni:

- le correlazioni sono state messe a punto su terreni provenienti da contesti geologici che possono essere differenti da quelli dei suoli che si stanno esaminando. Le condizioni geologico-geotecniche (litotipo, grado di alterazione, di cementazione, di consolidazione, ecc.) dei terreni utilizzati per trovare le correlazioni andrebbero di conseguenza attentamente analizzate per verificare l'applicabilità delle stesse ai terreni studiati;
- importante è anche il tipo di attrezzatura penetrometrica utilizzata (punta meccanica, elettrica o piezocono). Non è lecito utilizzare una carta di classificazione sviluppata sulla base di prove meccaniche per interpretare i risultati di prove CPTU.

Un recente studio ha preso in considerazione 9 siti italiani, appartenenti a diversi contesti geologici, ed ha messo in relazione il profilo stratigrafico ottenuto dalle carte di classificazione (con i tre metodi citati) e il profilo ricavato dal sondaggio effettuato in loco valutandone, quindi, la percentuale di successo.

Le considerazioni ottenute sono state le seguenti:

- Le carte di classificazione utilizzate riescono ad identificare correttamente i litotipi incontrati nel caso di depositi omogenei saturi. Le percentuali di successo sono prevalentemente buone nel caso delle argille soffici o argille organiche e delle sabbie, mentre diminuiscono notevolmente nel caso dei terreni intermedi (limi, limi-argillosi e sabbiosi, argille-limose e sabbie fini con limo).
- La presenza di una zona superficiale parzialmente satura (soprattutto nei terreni a grana fine) conduce ad una sovrastima della granulometria del terreno. L'impiego della carta di classificazione di ROBERTSON [1990] tende ad accentuare tale sovrastima.
- La prova CPTU conduce ad una stima migliore del profilo stratigrafico rispetto alla prova CPT.
- Un miglioramento notevole nella capacità predittiva di alcuni metodi si ha a seguito del filtraggio dei dati.
- In alcuni casi appare problematica l'individuazione di strati sottili anche con l'impiego della prova CPTU.
- I risultati sottolineano che le metodologie di classificazione litologica esistenti in letteratura dipendono strettamente dalle condizioni geologiche dei terreni sui quali sono state messe a punto, non sono perciò applicabili acriticamente. Le prove penetrometriche inoltre necessitano di essere sempre tarate con sondaggi geognostici.
- Per le prove CPTU, tutti i metodi esaminati consentono una corretta identificazione dei passaggi stratigrafici. Tra i tre metodi considerati, quello di Eslami e Fellenius sembra condurre alle più basse percentuali di successo.

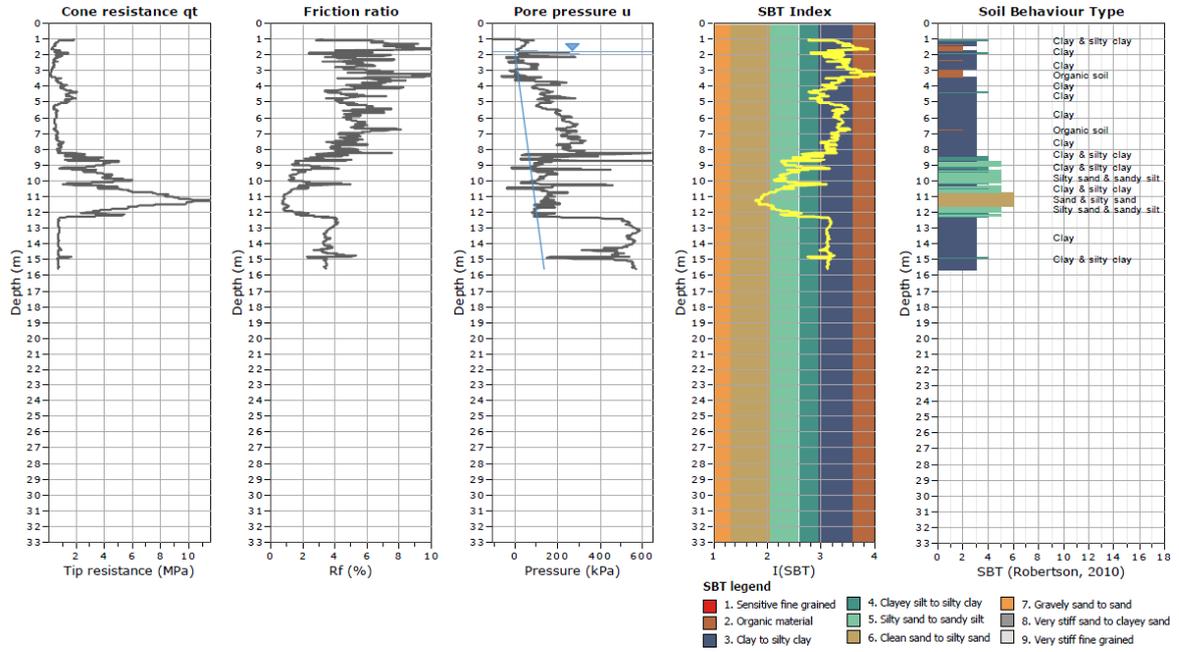
Stratigrafia mediante correlazioni empiriche

La mancanza dei sondaggi sulla effettiva natura geologica del sottosuolo non ci consente di "tarare" i modelli proposti in letteratura e quindi è possibile effettuare una prima valutazione della stratigrafia del sottosuolo del Battistero utilizzando il metodo di ROBERTSON et al. [1986], aggiornato al 2010, partendo dai risultati delle prove CPTU.

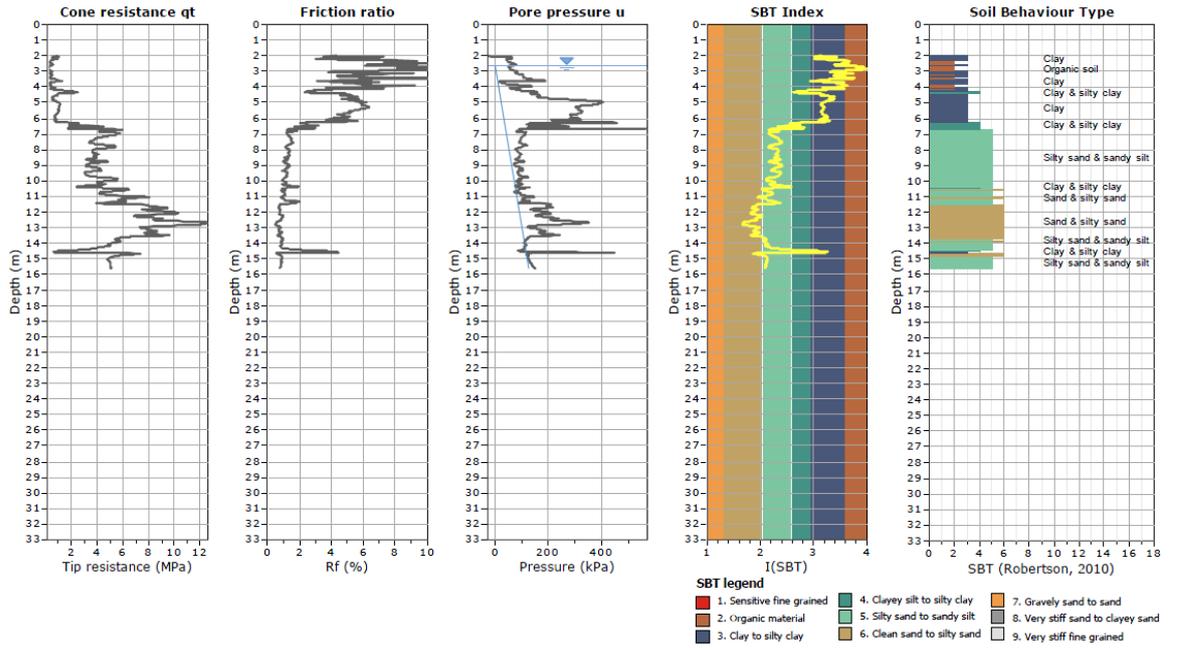
Le schede seguenti mostrano i seguenti parametri per ogni CPTU in funzione della profondità relativa al piano di campagna:

- Resistenza alla punta corretta q_t ;
- Rapporto di frizione R_f ;
- Pressione neutra u ;
- Indice del comportamento del suolo $I(SBT)$.

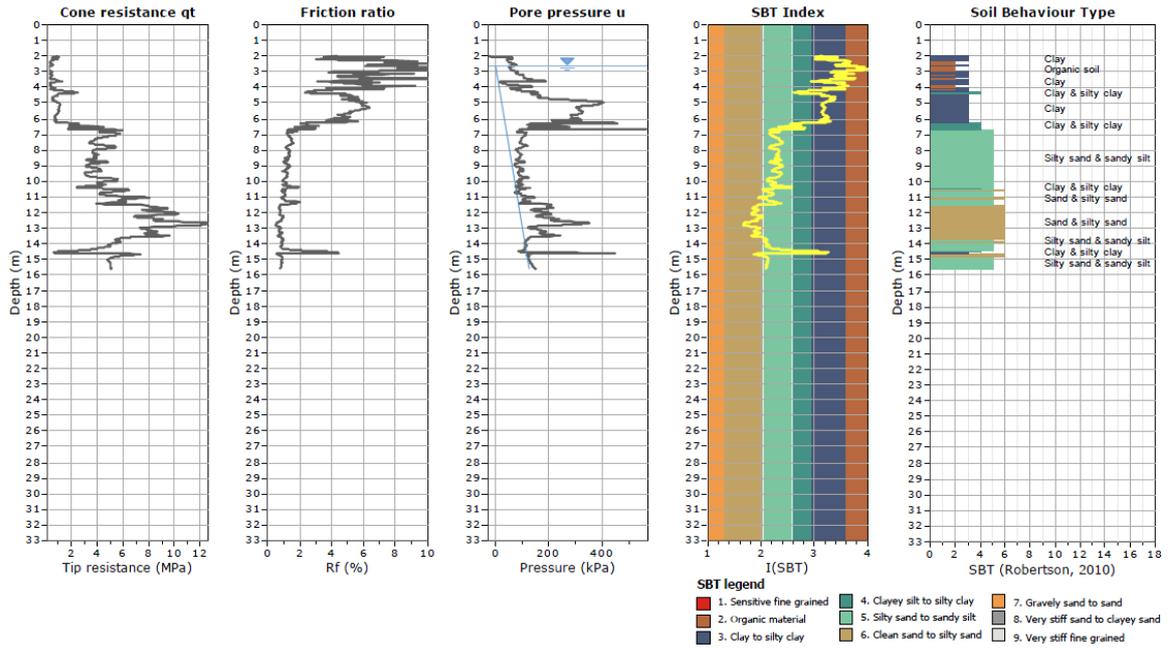
CPTU 1



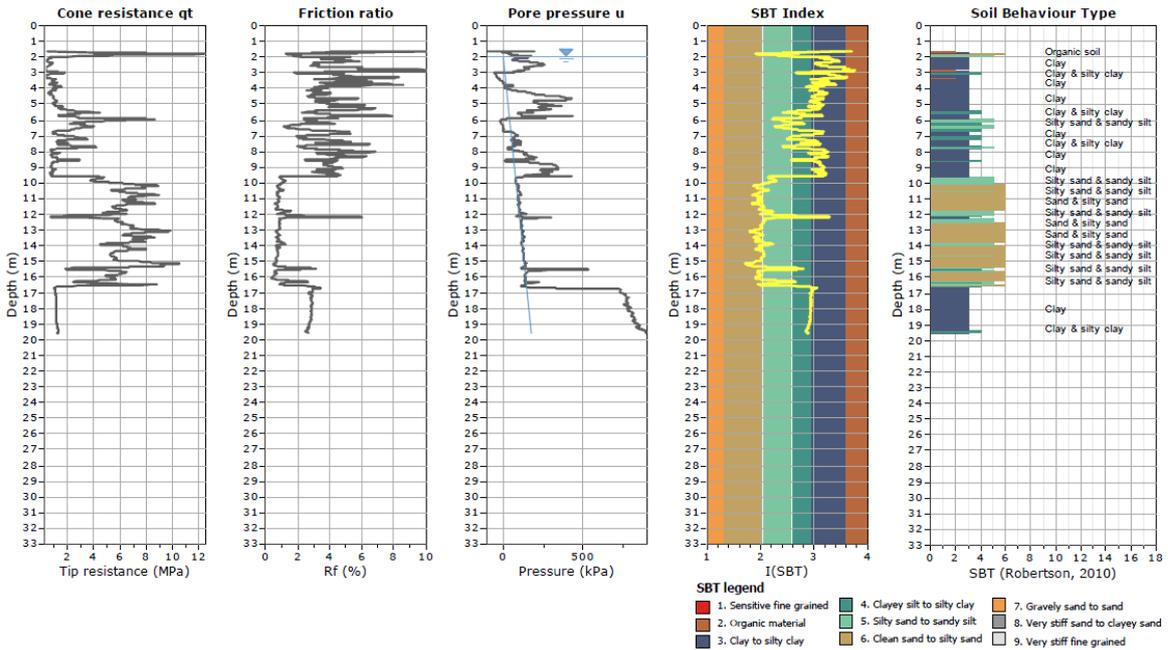
CPTU 2



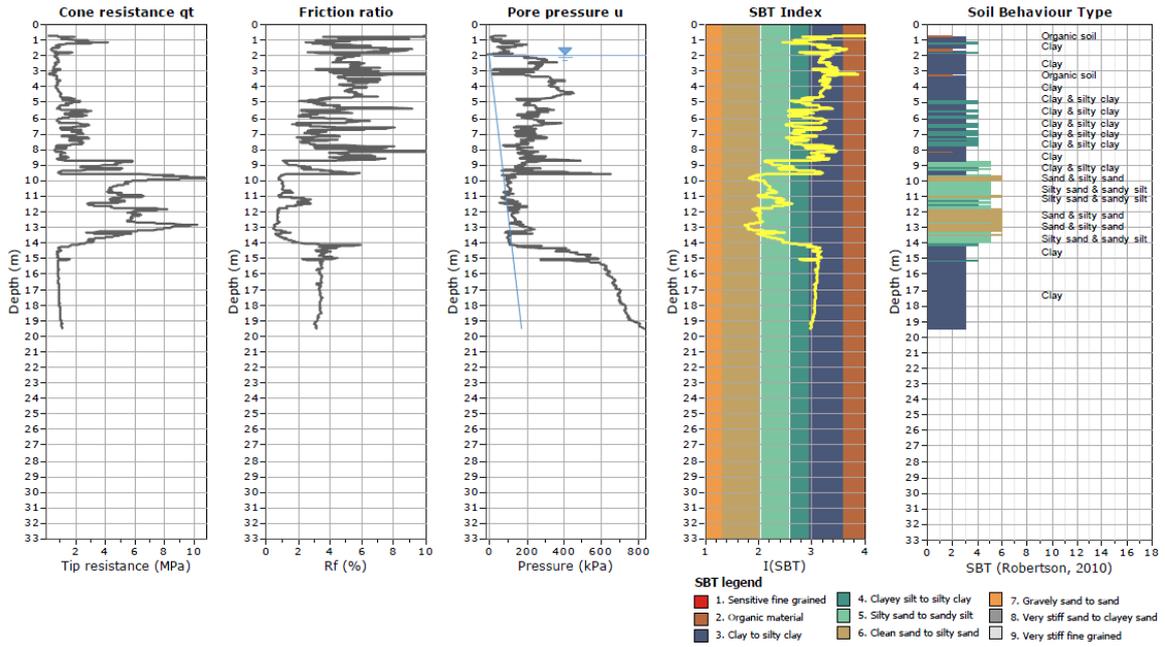
CPTU 3



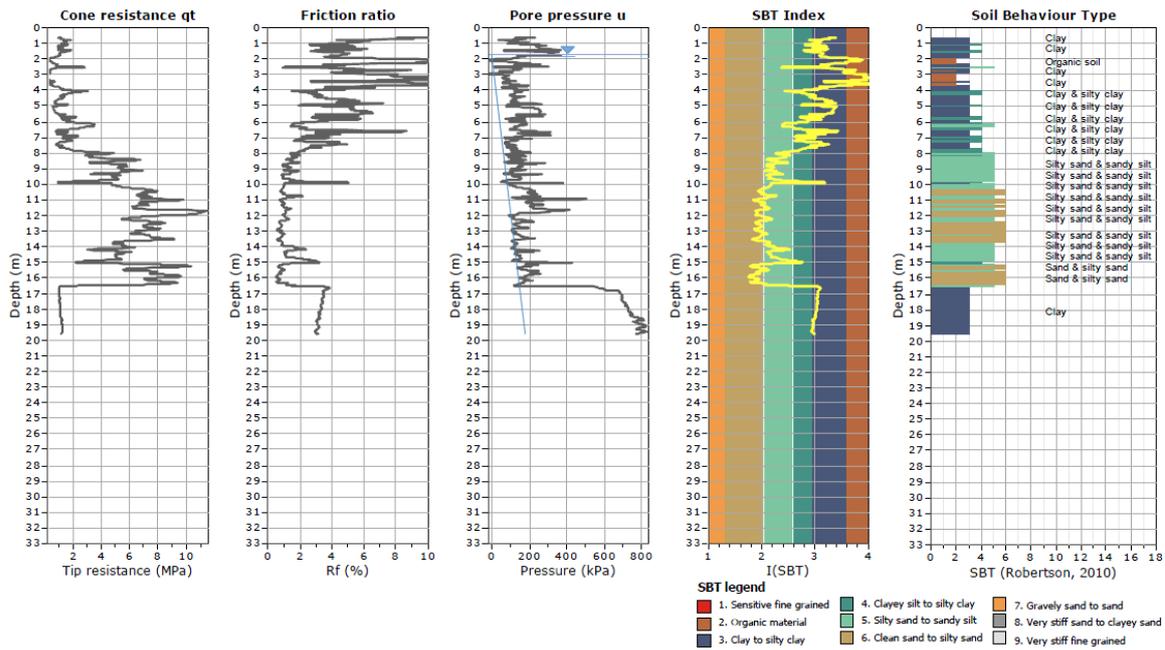
CPTU 4



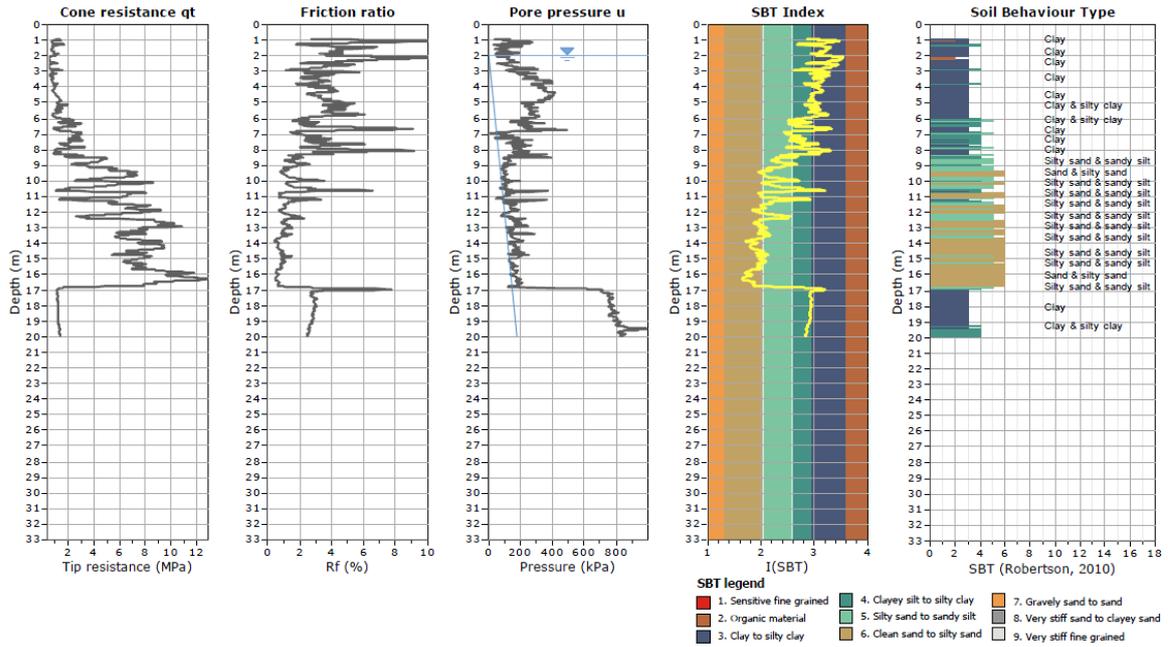
CPTU 5



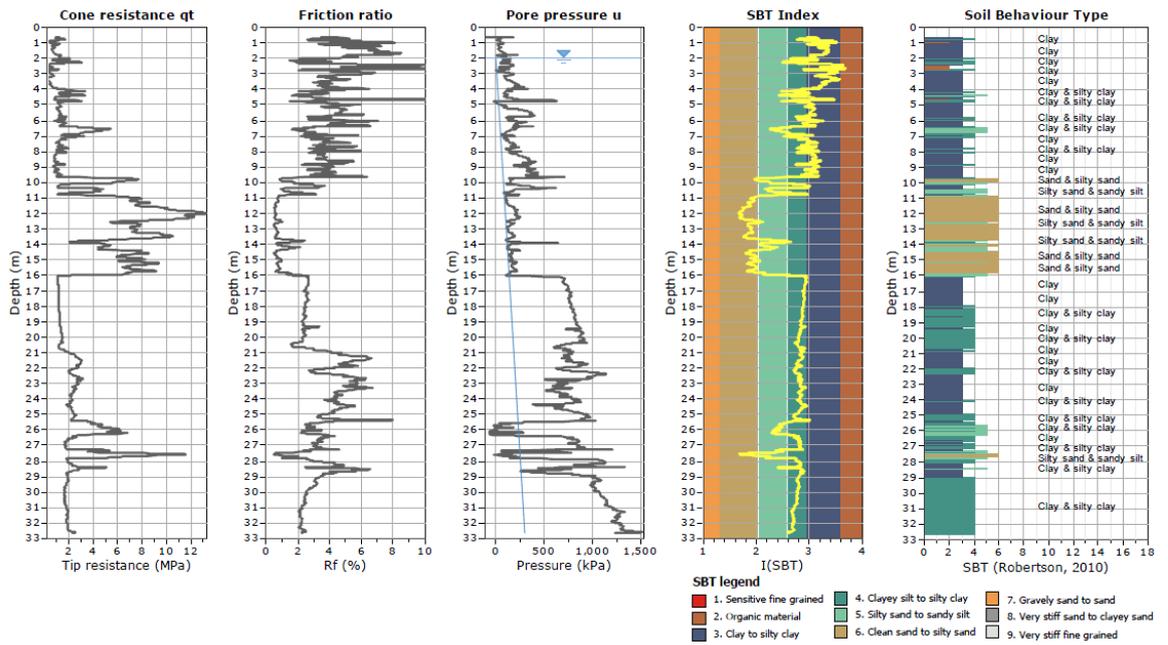
CPTU 6



CPTU 7



CPTU 8



Stratigrafia mediante interpretazione dei diagrammi q_c e u

Un po' più di chiarezza, può essere trovata esaminando i diagrammi della Resistenza alla punta q_c e la pressione neutra u posizionandole alle rispettive distanze relative dal Battistero e alle quote assolute.

Va ricordato che i terreni attraversati che offrono una Resistenza alla punta elevata q_c , saranno tipicamente terreni sabbiosi, viceversa per i terreni limosi o argillosi. Ovviamente questo dato non può essere letto da solo ma va preso in relazione con la corrispondente pressione neutra ricordando che valori elevati di u corrispondono a:

- Argille, da tenere a mediamente consistenti;
- Limi dal comportamento contraente.

Mentre valori bassi o negativi di u corrispondono a:

- argille sovraconsolidate molto consistenti;
- sabbie fini molto dense;
- sabbie limose;
- limi dilatanti.

Questi due diagrammi verranno sovrapposti in modo da poter identificare meglio le transizioni tra terreni coesivi ed incoerenti tenendo presente che una unità disegnata corrisponde a 1 MPa per le q_c e 100 KPa per le u .

Sono state realizzate quindi 2 sezioni del terreno in corrispondenza degli allineamenti dove sono state condotte le prove CPTU e una sezione attorno al Battistero in corrispondenza delle prove CPTU 8-4-5-7. Di quest'ultime prove sono state poi sovrapposte le relative resistenze alla punta q_c per verificare che i valori fossero paragonabili.

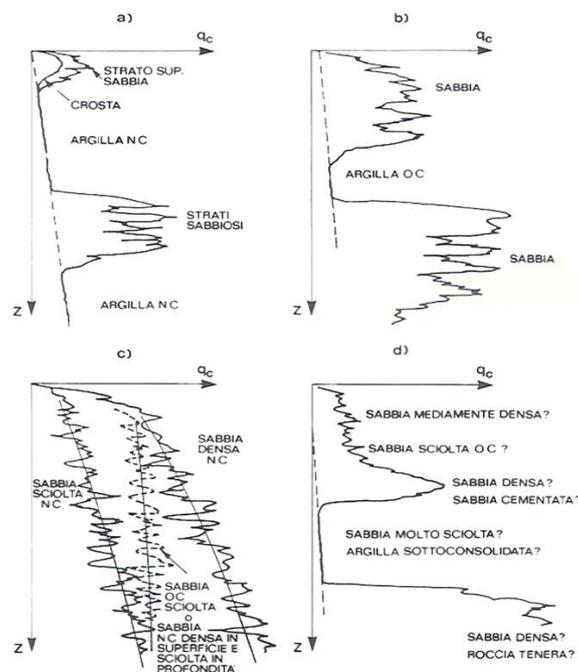
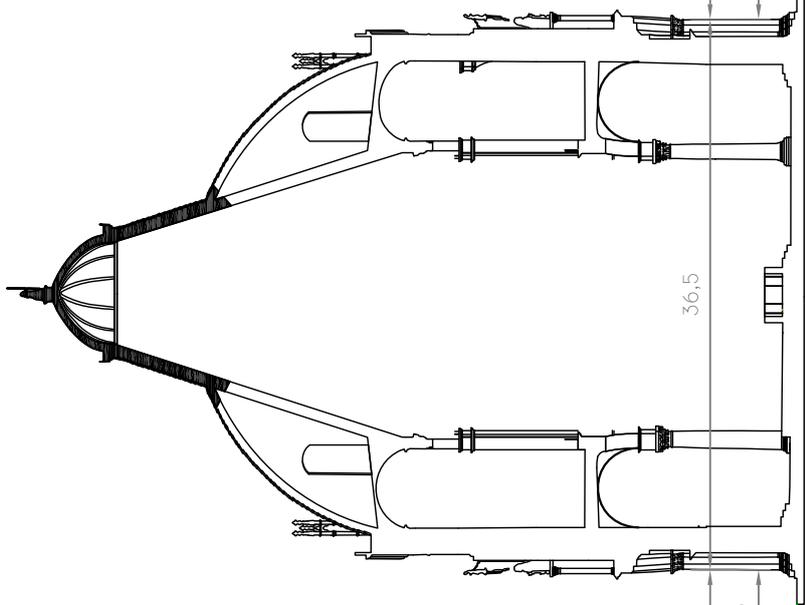
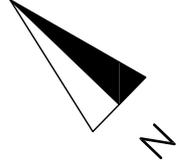


Fig. 8: Esempi di interpretazione

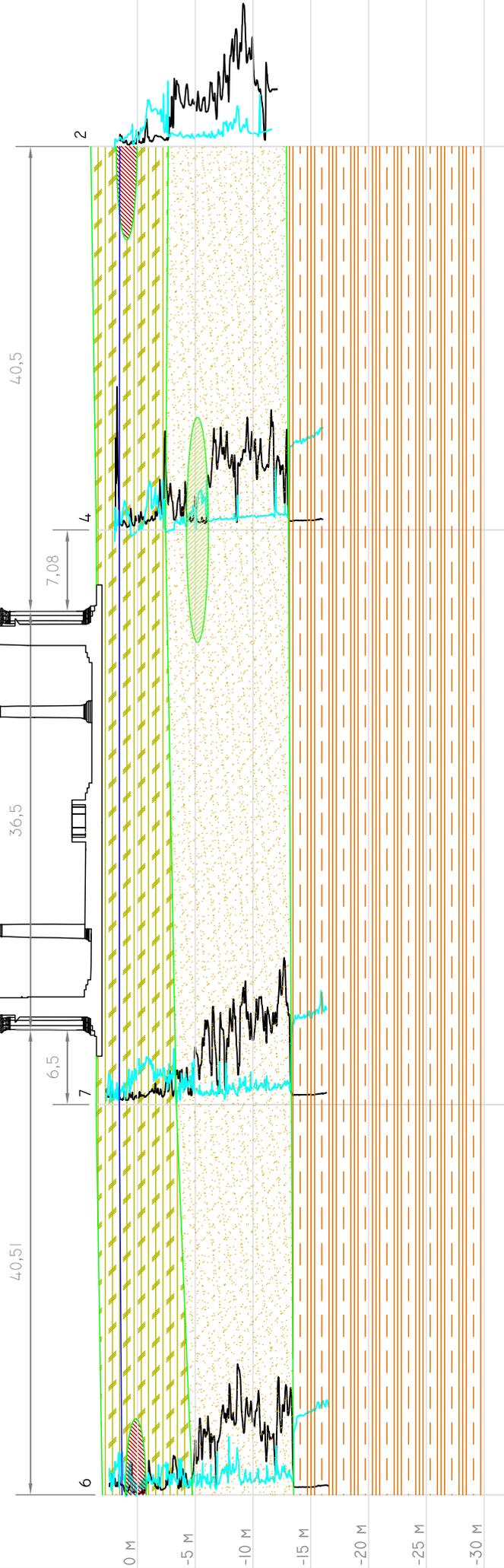
SEZIONE I

I:500 - DISTANZE
 I:1 MPA - RES. ALLA PUNTA
 I:100 KPA - PRESS. NEUTRA



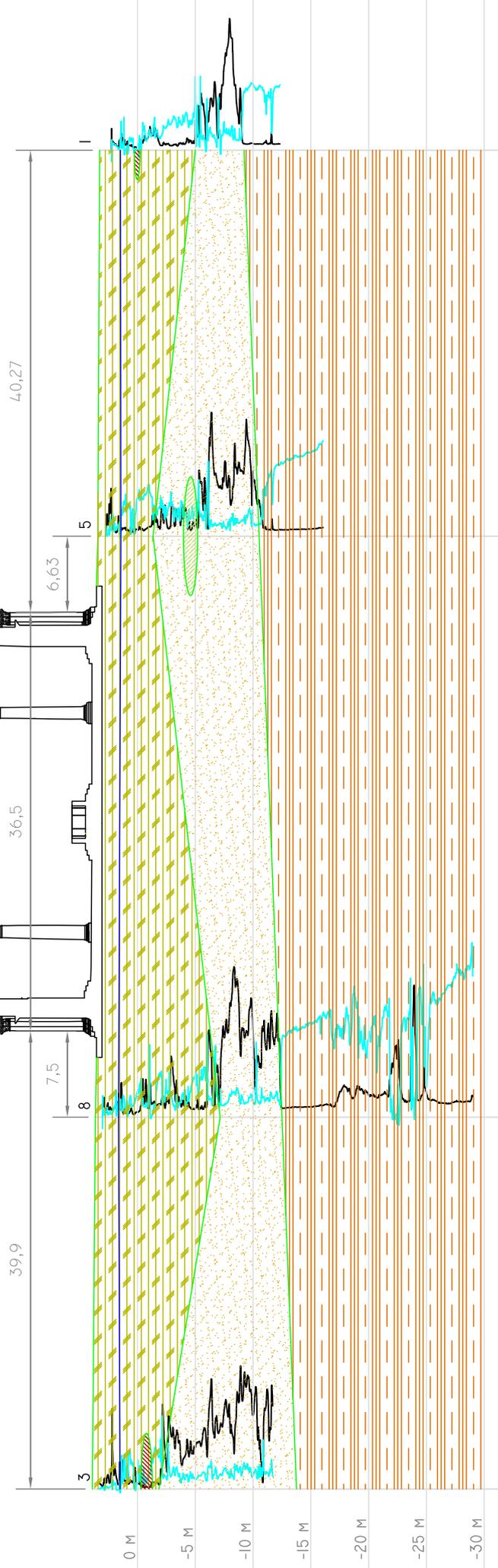
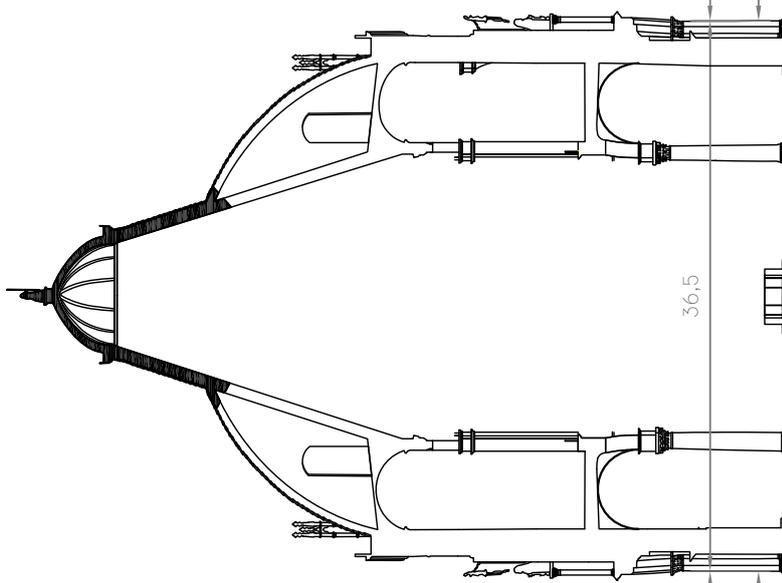
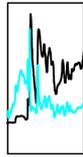
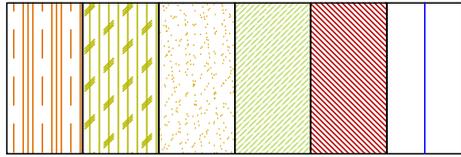
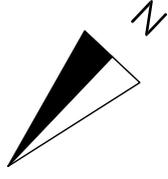
- ARGILLA
- TERRENO LIMO-ARGILLOSO
- TERRENO SABBIO-LIMOSO
- TERRENO LIMO-SABBIOSO
- TERRENO ORGANICO/TORBA
- LIVELLO DELLA FALDA

- RESISTENZA ALLA PUNTA
- PRESSIONE NEUTRA



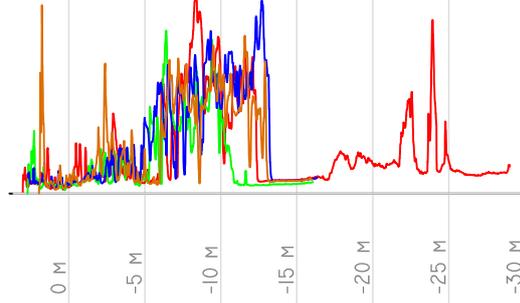
SEZIONE 2

I:500 - DISTANZE
 I:1 MPA - RES. ALLA PUNTA
 I:100 KPA - PRESS. NEUTRA



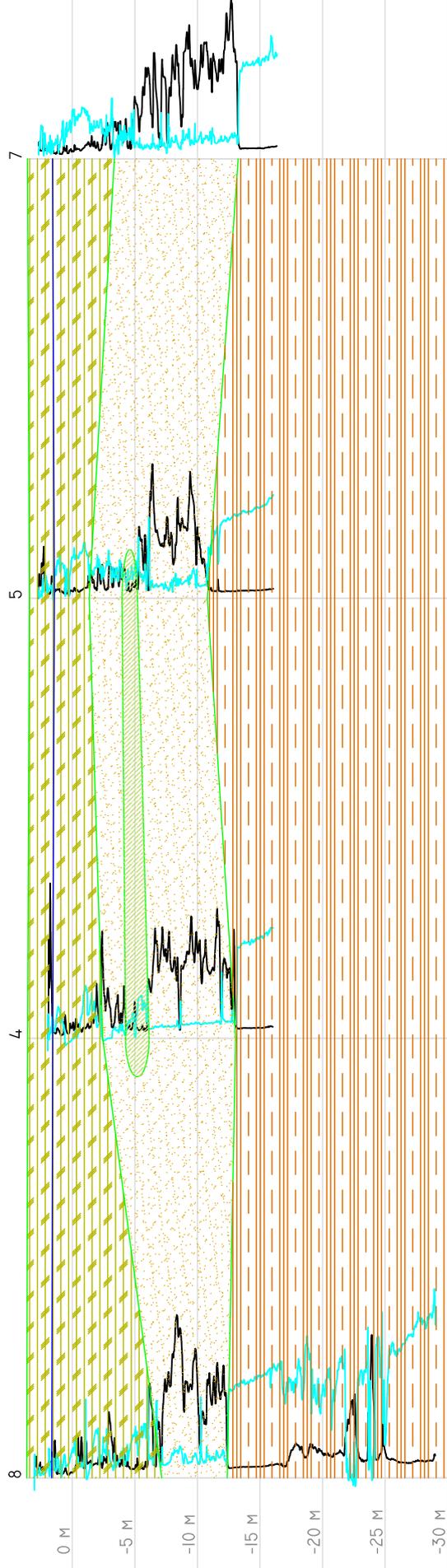
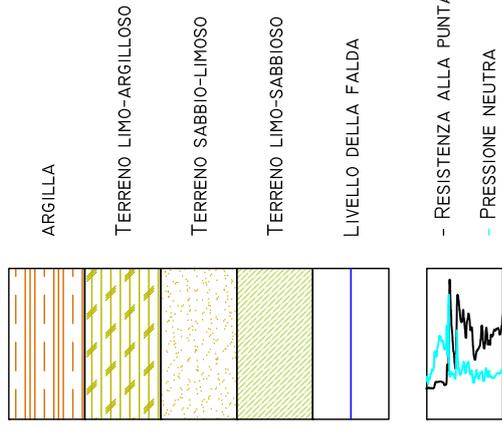
RESISTENZE ALLA PUNTA SOVRAPPORTE:

CPTU 8 - 4 - 5 - 7



SEZIONE 3
INTORNO AL
BATTISTERO

I:500 - DISTANZE
I:1 MPA - RES. ALLA PUNTA
I:100 KPA - PRESS. NEUTRA



Osservazioni

- I risultati delle correlazioni empiriche riportano un'alternanza di strati che può non rappresentare la realtà del sottosuolo in quanto l'indice di comportamento del suolo I(SBT) si muove spesso repentinamente, in virtù della elaborazione dei parametri di cui è composto, da un tipo di terreno a quello più vicino e quindi non è possibile considerare validi questi risultati senza prima verificarli.
- La falda acquifera è posizionata a circa 1.5m sul livello del mare ma questo dato dovrà essere verificato dalle misure dei piezometri.
- Sia l'indice di comportamento del suolo I(SBT) che la sovrapposizione dei diagrammi di q_c ed u fanno notare il passaggio allo strato delle argille, mentre la transizione dei due strati sovrastanti pare più difficile da valutare se non da questi ultimi diagrammi.
- Le prove CPTU 2 e 3 andrebbero ripetute in quanto non scendono al di sotto del tetto delle argille.
- Il tetto delle argille è praticamente un piano inclinato con retta di massima pendenza parallela alla linea della sezione 2 ed avente quote crescenti dalla CPTU 3 alla CPTU 1 (direzione NO-SE).
- Al di sopra del tetto di argilla vi è uno strato di sabbio-limoso ed uno strato limo-argilloso di spessore variabile.
- In corrispondenza delle prove CPTU 4 e 5 sembra esservi una lente di limo-sabbioso dello spessore di circa 1.5m
- In corrispondenza delle prove CPTU 1, 2, 3 e 6, vi è uno strato superficiale di terreno organico/torba all'interno dello strato limo-argilloso, dallo spessore variabile tra i 50 cm ed i 180 cm.
- Lo strato limo-argilloso in corrispondenza della prova CPTU 8 è di 10 m circa.

Misura della velocità delle onde di taglio

Dilatometro sismico (SDMT)

Il dilatometro sismico (SDMT) combina le tradizionali caratteristiche del dilatometro piatto DMT (Marchetti, 1980) con la capacità di misurare la velocità delle onde di taglio V_s . Inizialmente concepito per ricerca, negli ultimi anni SDMT è gradualmente entrato nell'uso comune nelle indagini geotecniche. Le principali motivazioni alla base dello sviluppo e della diffusione di SDMT sono:

- Richiesta crescente per analisi sismiche, per le quali V_s è un dato di input indispensabile e "multiuso". Un impulso in tale direzione è fornito anche dalle recenti normative (OPCM 3274/2003, D.M. 14.9.2005) che, in linea con l'Eurocodice 8, prescrivono la determinazione di V_s nei primi 30 m nei siti ricadenti in zona sismica (la maggior parte del territorio nazionale).
- Riconoscimento da parte di ricercatori e progettisti dell'importanza di indagare il comportamento dei terreni a piccole deformazioni (V_s fornisce il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0) e la non linearità della rigidità al variare della deformazione (curve $G-\gamma$).
- richiesta crescente per analisi di liquefazione.
- Disponibilità dei risultati DMT usuali (ad es. modulo di deformazione M_{DMT}) per applicazioni di progetto correnti (ad es. previsione di cedimenti, probabilmente la migliore applicazione della prova DMT).

Il dilatometro sismico (SDMT) è una combinazione della lama DMT standard con un modulo sismico per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s . La prova è concettualmente simile alla prova con cono sismico SCPT. Introdotto da Hepton (1988), il dilatometro sismico è stato successivamente messo a punto presso Georgia Tech, Atlanta, USA (Martin e Mayne, 1997, 1998; Mayne et al., 1999).

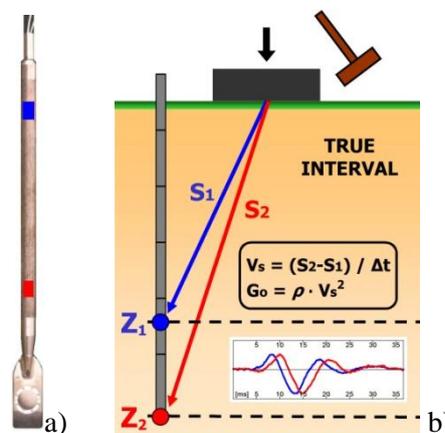


Fig. 9:(a) Lama DMT e modulo sismico. (b) Schema della prova con dilatometro sismico SDMT



Fig. 10: Attrezzatura SDMT



Fig. 11: Sorgente di energizzazione in superficie

Un nuovo sistema SDMT (Figure 9 e 10), è stato recentemente sviluppato in Italia.

Il modulo sismico (Figura 9a) è costituito da un corpo cilindrico posto sopra la lama DMT, munito di due ricevitori distanti 0.5 m. Il segnale è amplificato e digitalizzato in profondità. La configurazione true-interval a due ricevitori evita possibili inesattezze nella determinazione dello zero dei tempi dall'impatto, talora riscontrate nella configurazione pseudo-interval con un solo ricevitore. Inoltre la coppia di sismogrammi registrata dai due ricevitori ad una data profondità di prova corrisponde allo stesso colpo, anziché a colpi successivi non necessariamente identici, con sensibile miglioramento della ripetibilità delle misure di V_S (ripetibilità osservata ≈ 1 m/s). V_S è ottenuta (Figura 9b) come rapporto tra la differenza di distanza tra la sorgente e i due ricevitori ($S_2 - S_1$) e il ritardo dell'arrivo dell'impulso dal primo al secondo ricevitore (Δt). Le misure di V_S sono effettuate ogni 0.5 m di profondità. L'energizzazione avviene in superficie (Figura 3) mediante un martello a pendolo (≈ 10 kg) che percuote orizzontalmente una base di ferro parallelepipedica pressata verticalmente contro il terreno (grazie al peso del camion) ed orientata con asse longitudinale parallelo all'asse dei ricevitori, in modo che essi offrano la massima sensibilità all'onda di taglio generata.

I risultati SDMT sono generalmente elaborati in forma grafica come mostrato nell'esempio. Il profilo di V_S è riportato a fianco di quattro profili DMT base - indice di materiale I_D (tipo di terreno), modulo di deformazione confinato M , resistenza al taglio non drenata c_u e indice di spinta orizzontale K_D (correlato a OCR) - ottenuti da correlazioni DMT usuali.

Le misure di V_S ottenute da SDMT sono state validate in base a confronti con misure di V_S ottenute da altre prove sismiche in sito in diversi siti di ricerca e nella ripetibilità di V_S vi è uno scarto dell'ordine di pochi m/s.

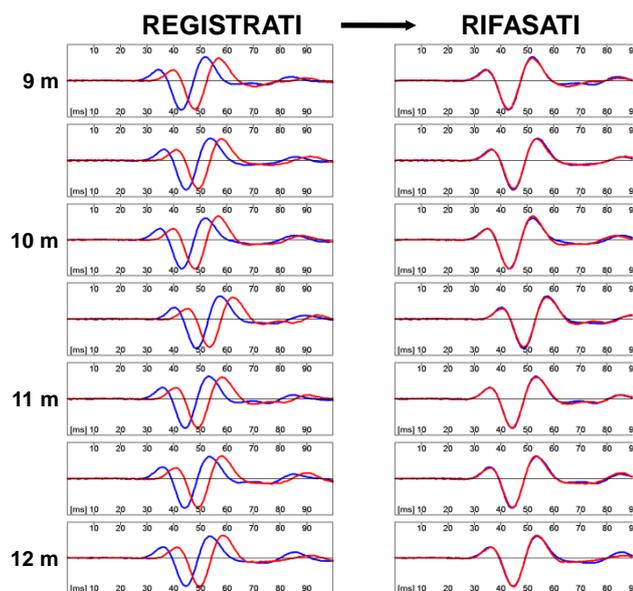
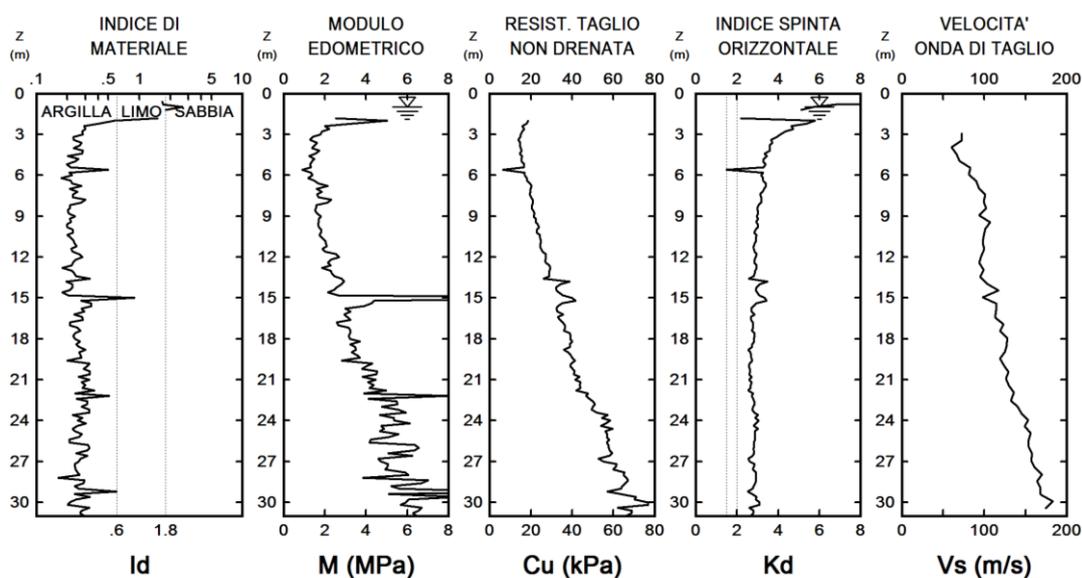


Fig. 12: Esempio di sismogrammi ottenuti da SDMT a varie profondità di prova nel sito del Fucino (Telespazio) – registrati e rifasati secondo il ritardo calcolato e presentazione dei risultati



Le velocità delle onde di taglio V_s misurate mediante la prova SDMT non forniscono informazioni utili da sole, in quanto non esiste in letteratura una correlazione tra questa grandezza e la possibile stratigrafia del terreno attraversata dallo strumento. E' però utile per ricavare il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 e metterlo in relazione con quello ricavato attraverso le prova Cross-Hole ordinata dal "Comitato per gli interventi di consolidamento e restauro della Torre di Pisa" ed effettuata vicino alla Torre di Pisa (lato Est) all'inizio dell'anno 2000.

Per la nostra prova, le misure sono state riferite al piano campagna che è ubicato a **+3,64 m** sul livello del mare (stessa quota della CPTU 8).

Prova Cross-Hole

E' un tipo di indagine invasiva volta alla conoscenza dei parametri elastici dei terreni a bassi livelli di deformazione ed è, assieme alle altre prove per la misura delle onde elastiche, indispensabile per la soluzione dei problemi di ingegneria sismica quali: la definizione della rigidità dinamica delle fondazioni, la risposta sismica locale, l'analisi della suscettibilità alla liquefazione. Le procedure comunemente utilizzate per la misura in sito di moduli iniziali e delle caratteristiche dissipative dei terreni. Possono essere raggruppate in due categorie: misure in foro o in superficie.

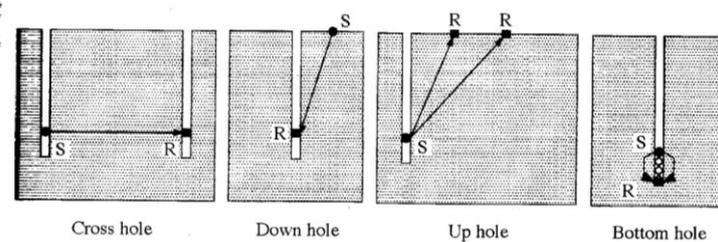


Fig. 13: Schema delle più comuni misure sismiche in foro; S = Sorgente; R = Ricevitore

Un esempio dello schema e dell'attrezzatura per le prove Cross Hole è descritto nella figura 14.

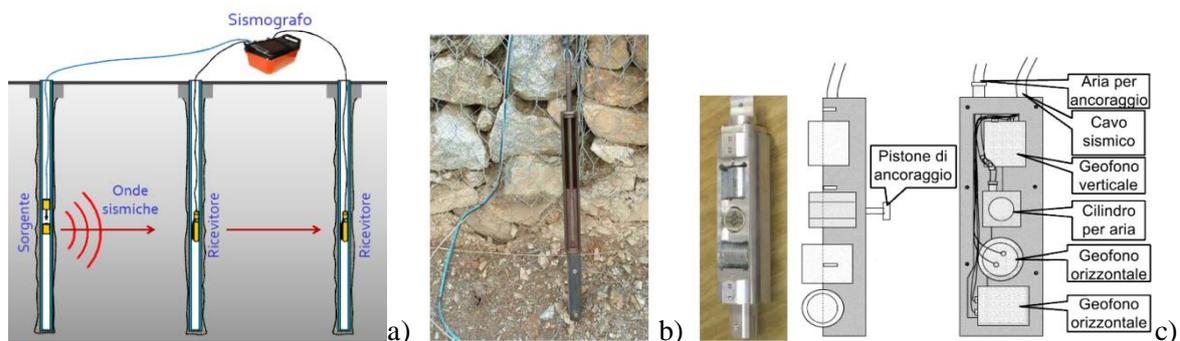


Fig. 14: a) Sismografo; b) Sorgente (martello); c) Ricevitore Triassiale

In questa prova viene misurato il tempo t necessario alle onde elastiche di compressione (P) o di taglio (S) per spostarsi da una sorgente posta in un foro ad uno o più ricevitori disposti in altri fori alla stessa profondità della sorgente tra loro distanti r . Si ha quindi:

$$V_P = r / t_P \quad \text{e} \quad V_S = r / t_S$$

Nelle applicazioni geotecniche assume una maggior importanza la V_S , perchè non influenzata dal grado di saturazione del terreno.

La velocità delle onde di taglio V_S viene utilizzata per ricavare il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 dalla seguente relazione:

$$G_0 = \gamma V_S^2$$

dove γ è il peso specifico del terreno in corrispondenza della V_S misurata.

Detto questo, la nostra prova è stata eseguita nel sottosuolo della Piazza del Duomo di Pisa, nelle vicinanze della Torre sul lato Est e più precisamente: una prova geofisica Cross-Hole per la determinazione della velocità delle onde di taglio (S) e di compressione (P).

La prova è stata eseguita utilizzando tre perforazioni ed i fori sono stati dotati di rivestimento in PVC, cementato al terreno, con diametro interno 90 mm circa e raggiungono dal piano campagna rispettivamente le profondità di:

- CH1: 66.5 m
- CH2: 71.0 m
- CH3: 69.1 m

Le misure sono state riferite al piano campagna che è ubicato a **+3,36 m** sul livello del mare.

L'esecuzione della prova in sito è avvenuta nel periodo dal 10 al 19 gennaio 2000.

Al fine di verificare la qualità della cementazione del tubo di rivestimento al terreno circostante, per ciascun foro è stato eseguito un rilievo di carotaggio sonico continuo impiegando un'apposita sonda.

Prima dell'inizio delle misure Cross- Hole, per ciascuno dei fori di prova è stato eseguito il controllo della verticalità mediante rilievo inclinometrico.

La misura delle velocità delle onde è avvenuta in tre sessioni separate adottando le seguenti modalità.

Il generatore è sempre stato calato nel foro CH3, mentre i fori CH2 e CH1 sono stati impiegati per la ricezione delle onde. In fase di discesa dei trasduttori, ad intervalli di profondità di 5 m, sono state eseguite misure di controllo al fine di effettuare una prima verifica dei tempi di percorso, delle ampiezze e delle frequenze dei segnali.

Una volta raggiunta la massima profondità utile per effettuare misure a pari quota, sono state eseguite le misure in fase di risalita, con passo di un metro, fino a raggiungere la superficie, registrando le forme d'onda ed i tempi relativi ai percorsi CH3-CH2 e CH3-CH1.

I segnali trasdotti dai ricevitori sono stati amplificati attraverso un condizionatore di segnale e successivamente acquisiti e visualizzati in forma digitale tramite personal computer dotato di scheda di acquisizione analogico/digitale.

I tempi di percorso delle onde P od S sono stati preliminarmente letti in campagna direttamente sullo schermo del PC, al fine di verificarne l'attendibilità, e successivamente controllati in fase di elaborazione dei dati.

I rilievi inclinometrici e le diagrafie soniche dei rilievi di carotaggio sonico non sono rilevanti per i nostri scopi: è necessaria solo la conoscenza del profilo delle velocità delle onde di taglio V_s .

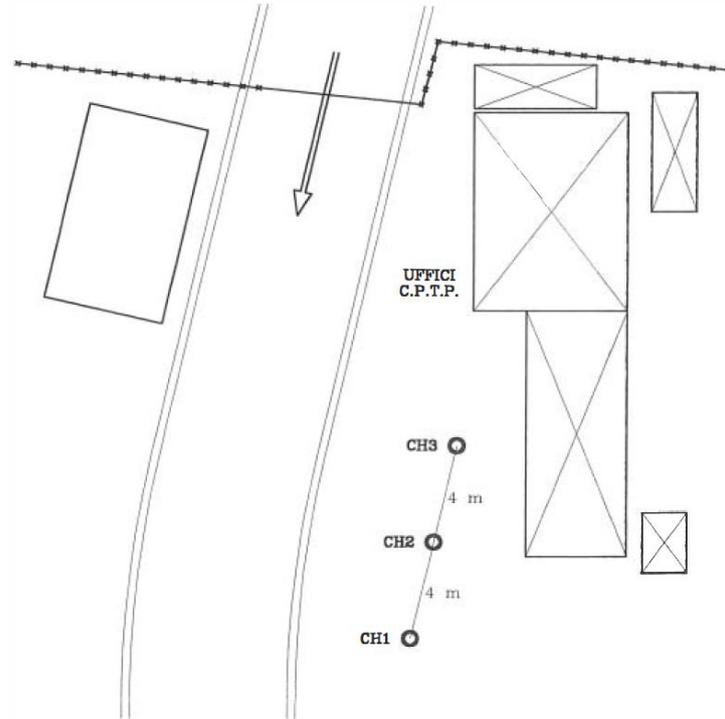


Fig. 15: Planimetria delle perforazioni

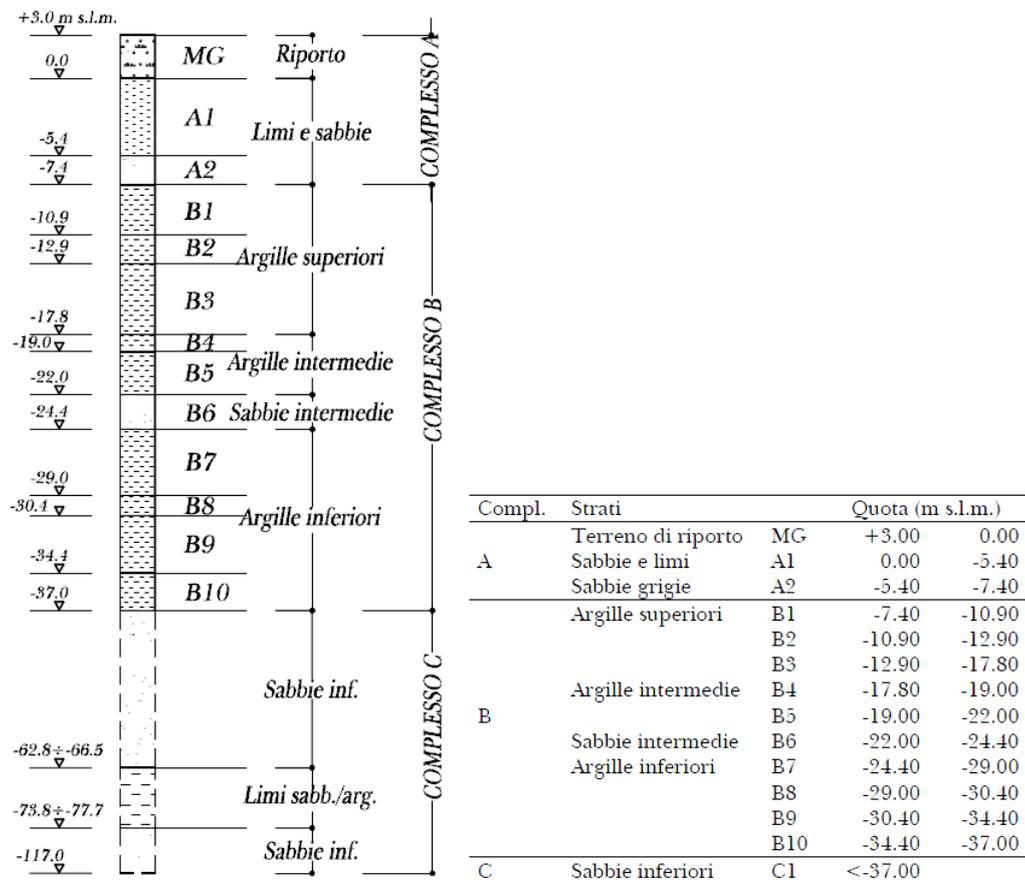


Fig. 16: Profilo stratigrafico del terreno in prossimità Torre di Pisa

Costruzione ed interpretazione dei diagrammi di G_0

Per poter ricavare il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 è necessaria la conoscenza della velocità delle onde di taglio V_S e del peso specifico γ degli strati attraversati. Le V_S si ricavano dalle misurazioni del dilatometro sismico (SDMT) mentre per il peso specifico γ si possono percorrere due strade diverse.

La prima consiste nel ricavarlo da relazioni empiriche come quella formulata da Robertson nel suo manuale "*GUIDE TO CONE PENETRATION TESTING*":

$$\gamma / \gamma_w = 0.27 [\log R_f] + 0.36 [\log(q_t/p_a)] + 1.236$$

dove:

- $R_f = \frac{100 \cdot f_s}{q_t}$ è il rapporto di frizione;
- γ_w = peso specifico dell'acqua nella stessa unità di misura di γ ;
- p_a = pressione atmosferica nella stessa unità di misura di q_t .

La seconda, invece, consiste nel raccogliere questi dati dai risultati di sondaggi vicini come ad esempio quelli della campagna di indagini per il sottosuolo della Torre di Pisa (vedi figure 16 e 17) tratte dall'opera "*LA TORRE DI PISA. Gli studi e gli interventi che hanno consentito la stabilizzazione della Torre di Pisa (2005)*".

Compl.	Strati	γ (kN/m ³)	G_s	w_N (%)	w_L (%)	I_P (%)	LI (-)
A	A1	18.94 ± 0.58	2.71 ± 0.03	30.9 ± 4.0	35.0 ± 5.3	12.9 ± 4.1	0.68 ± 0.31
	A2	18.07 ± 0.85	2.69 ± 0.04	37.3 ± 6.6	55.7 ± 7.8	30.4 ± 7.1	0.62 ± 0.20
B	B1	17.00 ± 0.89	2.76 ± 0.04	50.7 ± 12.5	73.1 ± 9.4	42.7 ± 7.8	0.56 ± 0.29
	B2	17.49 ± 0.57	2.76 ± 0.02	46.5 ± 6.7	59.2 ± 13.6	32.7 ± 12.0	0.73 ± 0.34
	B3	16.67 ± 0.58	2.75 ± 0.04	56.3 ± 7.5	70.9 ± 14.3	41.2 ± 11.4	0.72 ± 0.52
	B4	19.48 ± 0.96	2.72 ± 0.02	27.7 ± 8.4	53.2 ± 11.9	33.3 ± 9.3	0.27 ± 0.30
	B5	19.76 ± 0.79	2.75 ± 0.03	27.4 ± 5.9	46.3 ± 10.9	22.8 ± 9.6	0.15 ± 0.19
	B6	19.11 ± 0.49	2.70 ± 0.02	29.4 ± 2.9	33.0 ± 5.7	8.5 ± 3.5	0.59 ± 0.51
	B7	18.62 ± 0.97	2.75 ± 0.03	38.5 ± 8.9	59.7 ± 18.0	33.9 ± 15.3	0.41 ± 0.13
	B8	18.41 ± 0.51	2.72 ± 0.04	37.1 ± 5.0	48.9 ± 5.3	22.6 ± 8.5	0.57 ± 0.29
	B9	19.01 ± 1.41	2.66 ± 0.08	32.5 ± 9.4	54.5 ± 8.3	31.0 ± 6.0	0.21 ± 0.16
	B10	19.38 ± 0.44	2.76 ± 0.02	31.2 ± 4.1	51.3 ± 10.7	29.0 ± 10.2	0.34 ± 0.18
C		20.52 ± 1.29	2.65 ± 0.05	20.6 ± 8.5	-	-	-

Fig. 17: Proprietà indice degli strati attraversati del terreno in prossimità Torre di Pisa

Considerando che la Torre di Pisa è vicina in linea d'area al Battistero, la composizione degli strati sarà verosimilmente analoga ma gli spessori non saranno sicuramente gli stessi e neppure le rispettive quote di separazione. Pertanto, si potrebbe incorrere il rischio di assegnare un peso specifico γ errato al relativo strato attraversato. Per questo motivo sarà adottata la prima strada: il peso specifico γ sarà ricavato dai risultati della prova CPTU 8 attraverso la correlazione empirica pubblicata da Robertson.

La misura della velocità delle onde di taglio V_s attraverso il dilatometro sismico (SDMT) è stata fatta ad intervalli regolari di 1 m man mano che lo strumento affondava nel terreno e quindi serve ricavare il valore del peso specifico γ alle rispettive quote di misura.

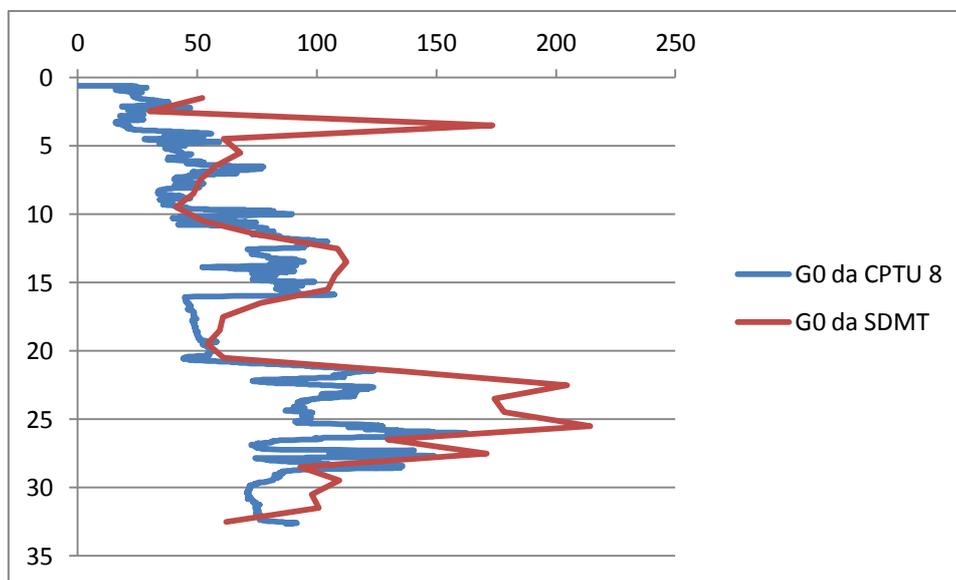
La prova con il piezocono (CPTU 8) ha fornito dei valori per ogni centimetro di terreno attraversato. Quindi, il peso specifico γ è stato calcolato mediando aritmeticamente i valori di γ ottenuti dalla CPTU 8 nell'intervallo compreso tra le quote di due misurazioni consecutive della V_s .

Di seguito i valori ottenuti:

Z ass.	Z rel.	Vs	γ	G ₀
[m]	[m]	[m/s]	[KN/m ³]	[Mpa]
2.14	1.50	174	17.215	52.122
1.14	2.50	131	17.414	29.884
0.14	3.50	326	16.331	173.558
-0.86	4.50	188	17.221	60.868
-1.86	5.50	196	17.668	67.872
-2.86	6.50	179	17.903	57.362
-3.86	7.50	168	18.148	51.221
-4.86	8.50	167	17.343	48.368
-5.86	9.50	155	17.140	41.179
-6.86	10.50	171	18.025	52.707
-7.86	11.50	204	18.096	75.306
-8.86	12.50	241	18.681	108.499
-9.86	13.50	248	18.252	112.257
-10.86	14.50	243	18.206	107.502
-11.86	15.50	239	18.298	104.518
-12.86	16.50	208	17.727	76.694
-13.86	17.50	189	16.962	60.589
-14.86	18.50	187	16.980	59.379
-15.86	19.50	178	17.077	54.105
-16.86	20.50	189	17.090	61.046
-17.86	21.50	273	18.197	135.620
-18.86	22.50	331	18.686	204.722
-19.86	23.50	302	19.120	174.385
-20.86	24.50	310	18.550	178.264
-21.86	25.50	339	18.653	214.364
-22.86	26.50	260	19.165	129.555
-23.86	27.50	307	18.140	170.968
-24.86	28.50	224	18.537	93.013
-25.86	29.50	245	18.230	109.424
-26.86	30.50	236	17.564	97.823
-27.86	31.50	240	17.479	100.677
-28.86	32.50	188	17.532	61.965

Da notare che il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 è stato calcolato con questi dati anch'esso ad intervalli di 1 m dalla quota di 1.5m dal piano di campagna (quota di partenza delle misurazioni della SDMT) fino alla quota di 32.5m dal piano di campagna (ultima quota utile dove è possibile calcolare γ in quanto la CPTU 8 si ferma subito dopo).

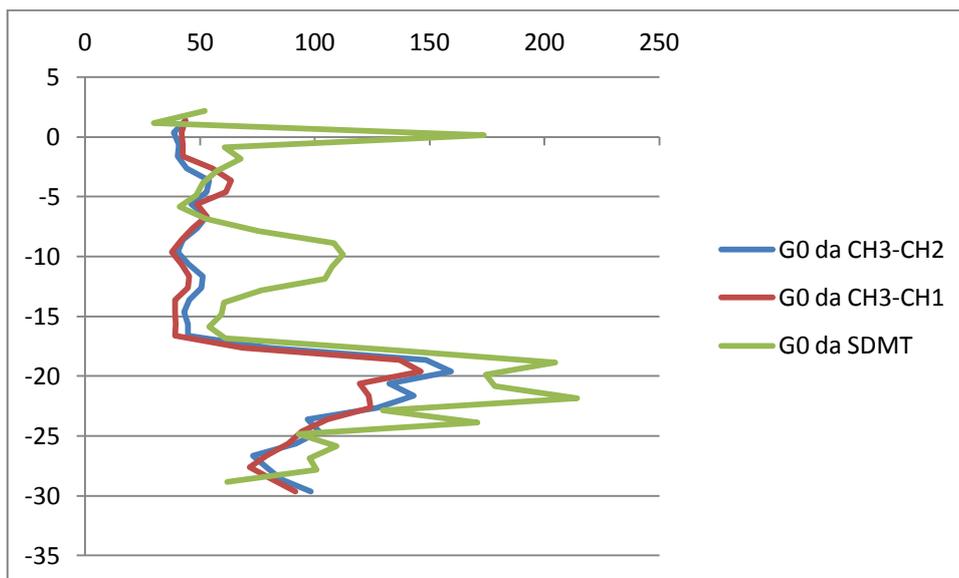
In prima analisi, sono stati messi in relazione i risultati ottenuti del modulo G_0 , ricavato empiricamente dai dati forniti dalla prova CPTU 8 con quelli ottenuti dalla SDMT. Il risultato è riportato nel seguente diagramma dal quale si può verificare l'esattezza dei dati acquisiti dalla prova SDMT eccezion fatta per il valore di G_0 alla quota di 3.5m dal piano di campagna probabilmente affetta da errore.



Successivamente sono stati messi in relazione i moduli di taglio ricavati dalle prove Cross-Hole eseguite vicino alla Torre di Pisa ottenendo il grafico riportato nella pagina successiva.

Da questo si può vedere che le curve ottenute sono tutte abbastanza aderenti ad eccezione del tratto compreso tra circa -7 m e -14 m sul livello del mare, tratto nel quale il modulo G_0 ottenuto dalla prova SDMT si discosta sensibilmente dai valori ottenuti dalle prove Cross-Hole. Il motivo è presto spiegato dal fatto che nel nostro caso si sta attraversando dei terreni con presenza di sabbie e limi mentre nei terreni dove sono state eseguite le prove Cross-Hole, siamo in presenza di terreni di diversa natura.

I risultati ottenuti confermano quanto concluso dalle interpretazione delle prove con il piezocono (CPTU).



Capitolo IV

FESSURAZIONI E DEFORMAZIONI

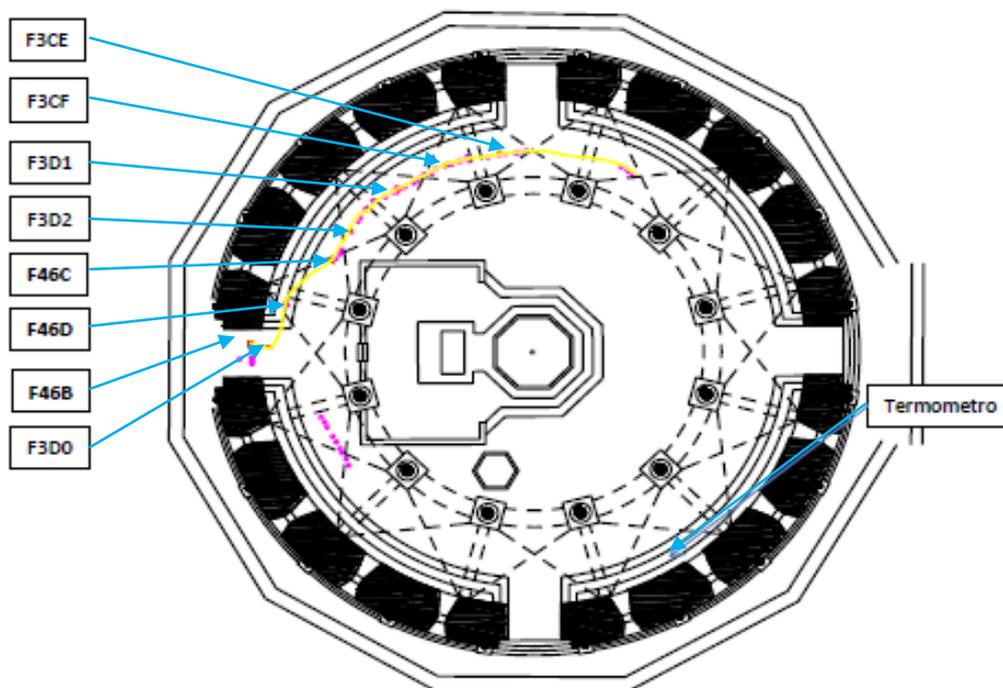
Quadro fessurativo

Introduzione

Come già detto, il Battistero si presenta in buone condizioni anche se recentemente si sono aperte alcune fessure nella struttura delle volte ed archi del primo ordine nel quadrante Nord-Ovest e sull'arco dell'ingresso Ovest. La possibilità che possano aprirsi esiste, non solo per il peso della struttura stessa, ma soprattutto per gli spostamenti che l'intero corpo sta subendo e subirà nel corso del tempo. Gli effetti legati al sottosuolo, visti prima, e delle variazioni termiche dovute al ciclo delle stagioni, che vedremo successivamente, inducono nel monumento delle deformazioni che potrebbero produrre a lungo andare dei danni ben maggiori delle singole fessure.

Strumentazione adottata e disposizione

Esistono diversi strumenti per monitorare le fessure (piastrine, estensimetri, fessurimetri, ecc..) in base al tipo di precisione che si vuole ottenere ma, soprattutto, in base alla necessità di effettuare o meno un monitoraggio nel tempo del fenomeno. Nel nostro caso, la scelta è stata obbligata da questa seconda necessità e quindi sono stati montati 8 fessurimetri GEKO disposti come da figura seguente:



Il fessurimetro GEKO è uno strumento che offre una soluzione wireless di monitoraggio e registrazione dei dati per le diverse applicazioni strutturali. In particolare, permette una misurazione contestuale e la registrazione di crepe e temperatura in tempo reale, al fine di ottenere correlazioni tra la tendenza di spostamenti e le variazioni periodiche di temperatura. Pertanto, si

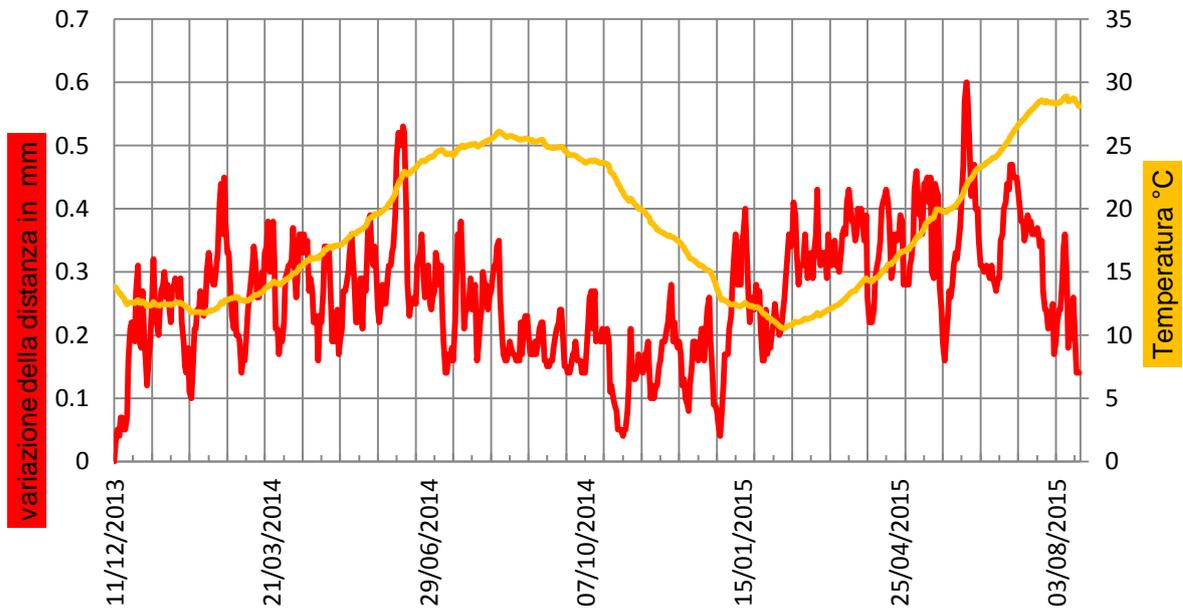
possono ottenere informazioni sui movimenti elasto-plastica di queste crepe che saranno utili per la diagnosi strutturale locale. I dati sono acquisiti, registrati e trasmessi al PC dell'utente attraverso un lettore USB ed un software dedicato, consentono una configurazione completa dello strumento (acquisizione e tempo di registrazione, l'orario della sveglia per l'ottimizzazione del tempo di durata della batteria, ecc.), la lettura in tempo reale, lo scaricamento e la memorizzazione dei dati. Inoltre è stato montato un termometro all'interno della struttura (nel quadrante Sud-Est) per verificare se vi è un innalzamento della temperatura dovuto l'irraggiamento solare.

Presentazione ed interpretazione dei dati

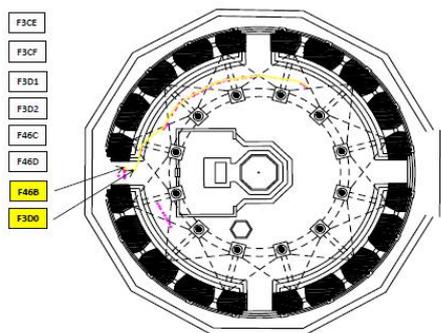
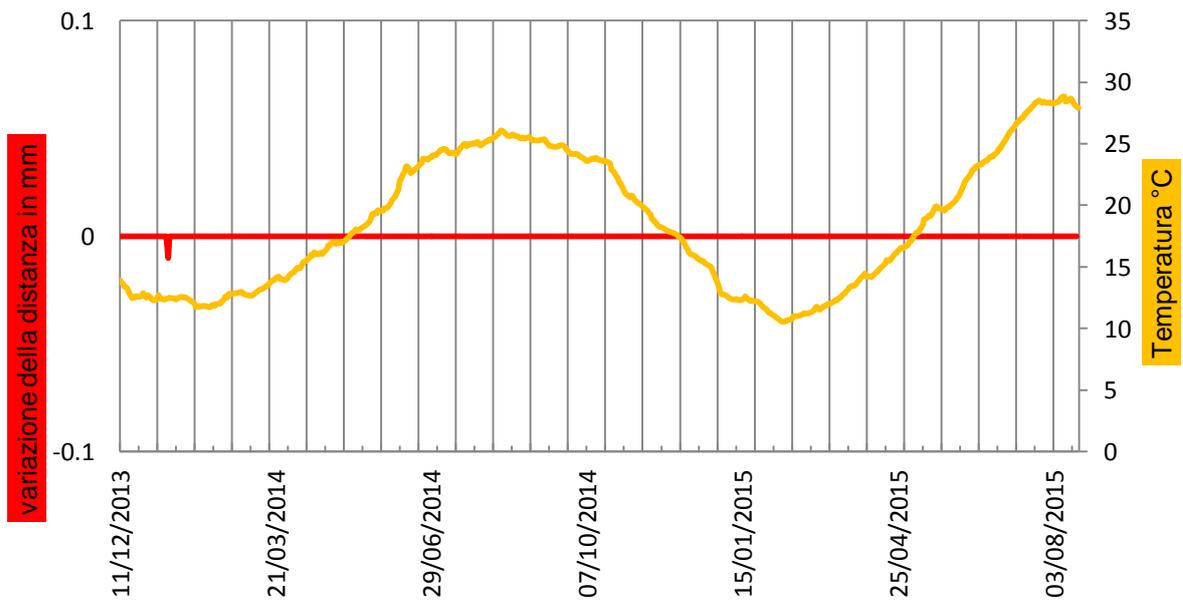
I dati ottenuti da questo monitoraggio partono dal 10/12/13 alle ore 13.30 circa e terminano il 19/08/15 alle ore 9.10 circa con misure effettuate ad intervalli regolari di 60 minuti. Le misure registrate sono la misura della posizione in millimetri e temperatura in gradi Celsius.

Per semplicità si è scelto di prendere in considerazione solo una rilevazione giornaliera della posizione delle varie crepe in corrispondenza delle ore 8.30 o in orari vicini a questa visto che le misure dei vari fessurimetri non sono sincronizzate allo stesso orario. I diagrammi costruiti di seguito per ogni fessurimetro riportano le differenze tra la posizione attuale e quella ad inizio rilevamento sovrapposto al diagramma delle Temperature, utilizzando una estrapolazione dei dati come descritta prima.

Fessurimetro F46B



Fessurimetro F3D0



Fessurimetro + Termometro
GEKO-F46B

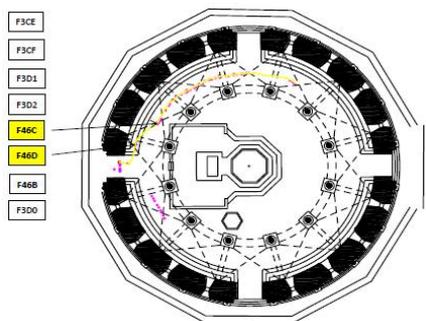
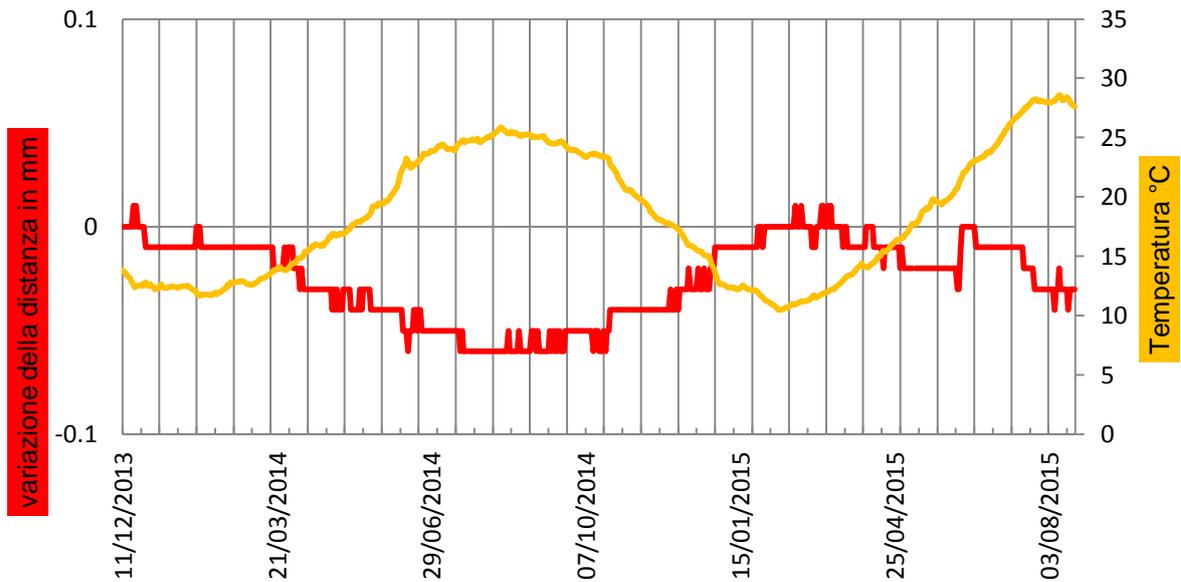


Fessurimetro+Termometro
GEKO-F3D0

Fessurimetro F46D



Fessurimetro F46C

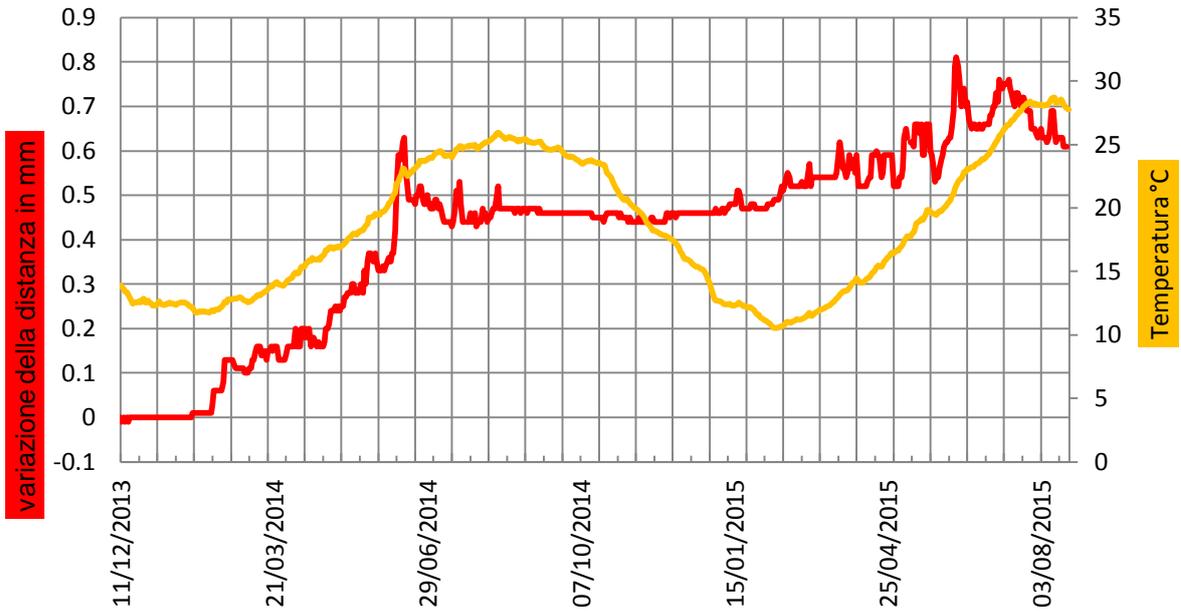


Fessurimetro+Termometro
GEKO-F46D

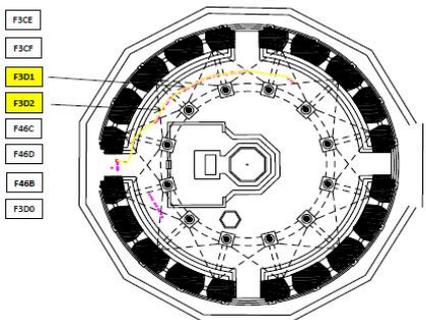
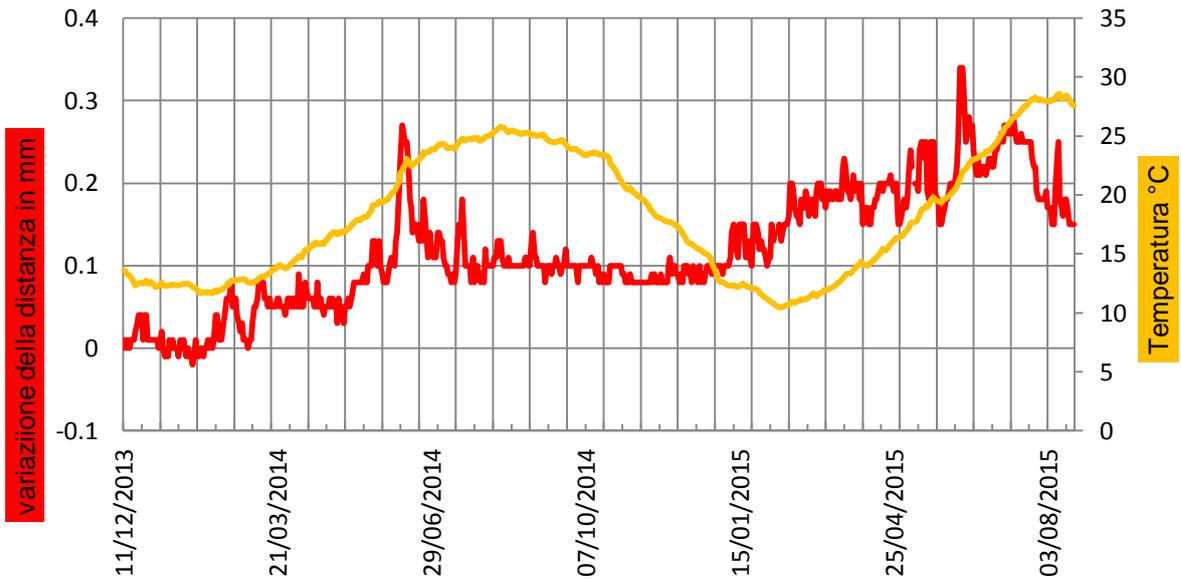


Fessurimetro+Termometro
GEKO-F46C

Fessurimetro F3D2



Fessurimetro F3D1

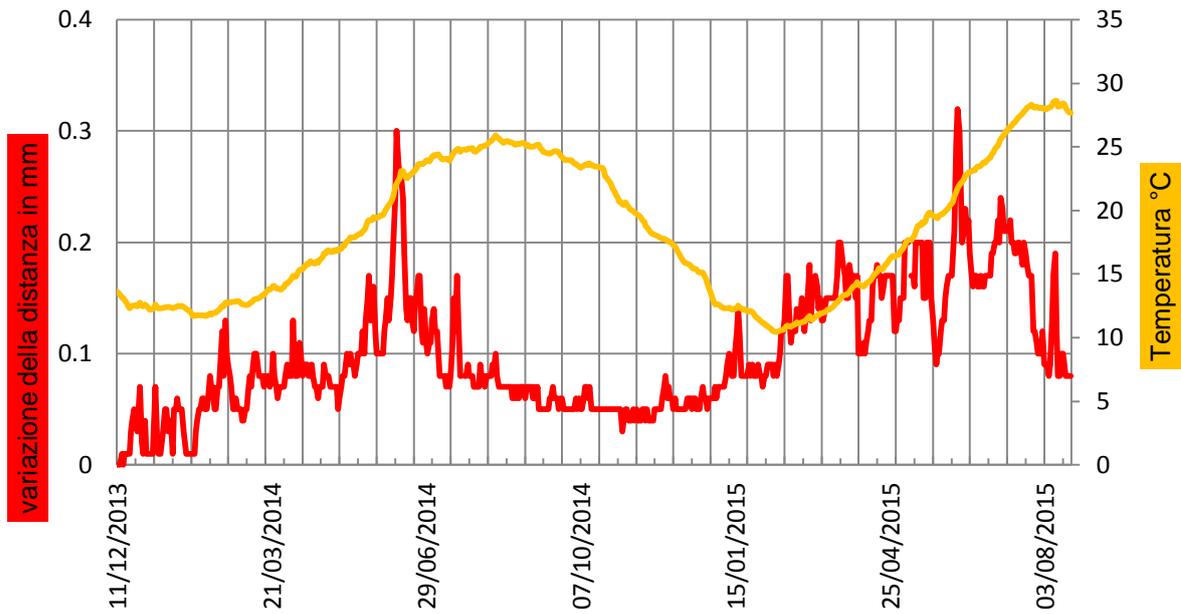


Fessurimetro+Termometro
GEKO-F3D2

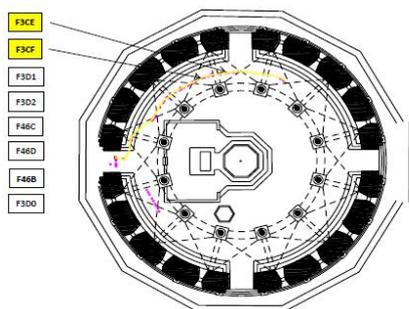
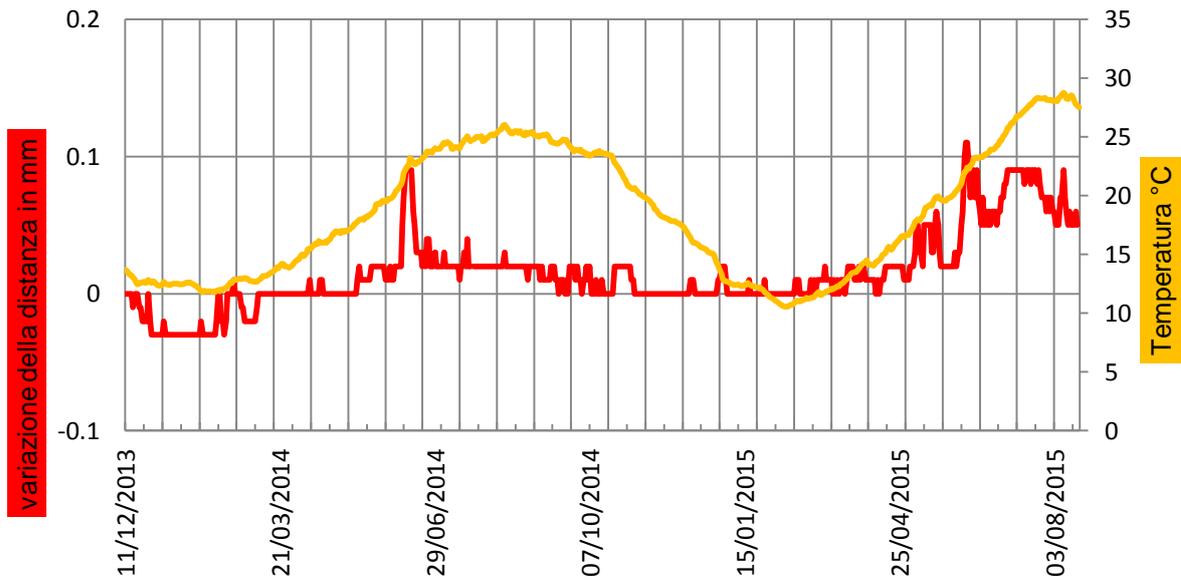


Fessurimetro+Termometro
GEKO-F3D1

Fessurimetro F3CF



Fessurimetro F3CE

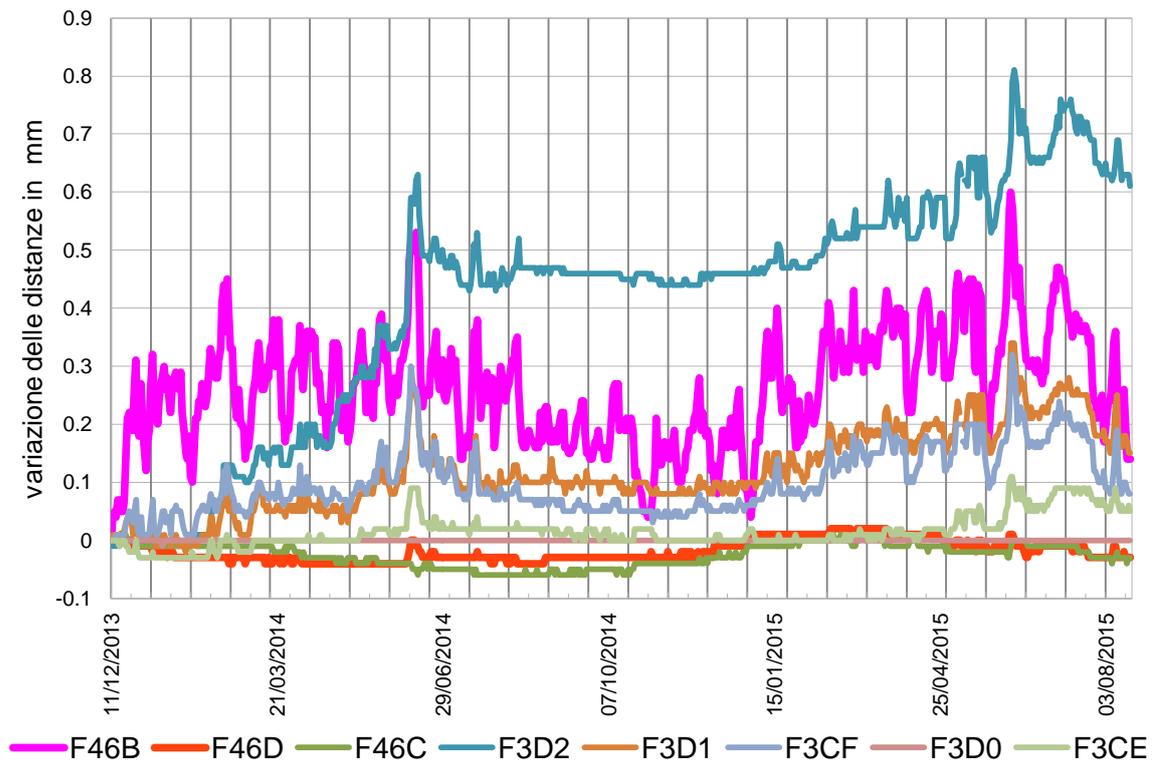


Fessurimetro+Termometro
GEKO-F3CF

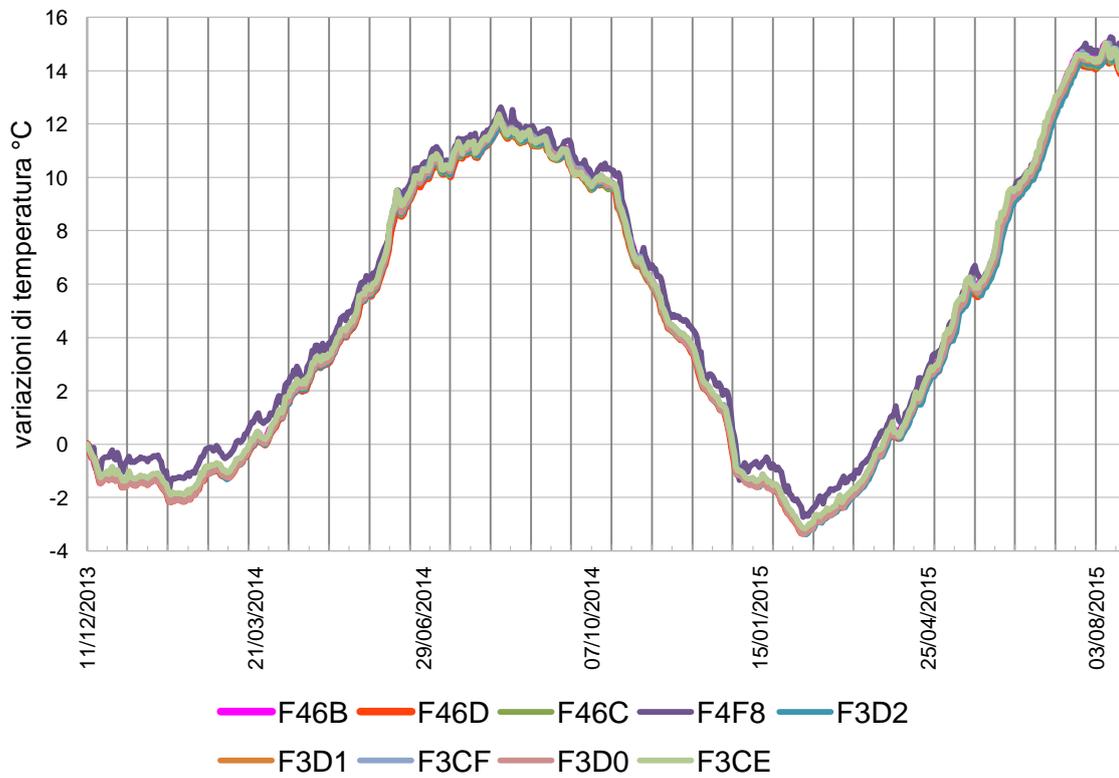


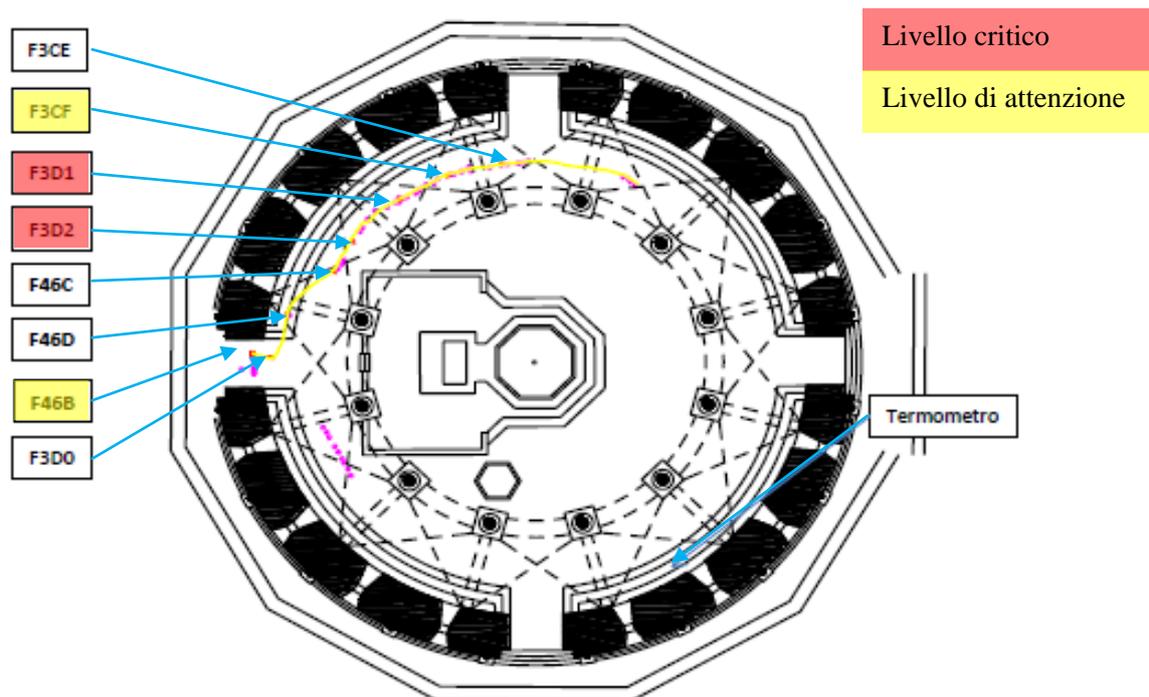
Fessurimetro+Termometro
GEKO-F3CE

Fessurimetri



Temperature





Osservazioni

- F46B mostra che la crepa sta oscillando nervosamente e ciclicamente nell'intervallo compreso tra 0 e i 6 decimi di millimetro manifestando quello che può essere il ritmo di apertura e chiusura della crepa. L'oscillazione risulta sfasata con l'escursione termica ma, soprattutto, l'apertura della crepa non ritorna all'ampiezza di inizio del ciclo.
- F3D0 non mostra alcun movimento.
- F46C e F46D mostrano che le rispettive crepe hanno un comportamento contraente (i valori misurati sono minori rispetto al loro rispettivo valore iniziale) ed in discordanza (quasi in controfase) con la temperatura. L'entità degli spostamenti è di pochi millesimi di millimetro.
- F3D2 e F3D1 mostrano che le rispettive crepe hanno un andamento simile ma il primo in scala più ampia: le crepe si allargano nel periodo Gennaio-Giugno per poi assestarsi fino al mese di Gennaio successivo quando si ripete il ciclo di apertura. La velocità con cui si apre della crepa in corrispondenza del F3D2 mostra qualche preoccupazione in quanto la sua gola è più ampia di 6/7 decimi di millimetro rispetto all'inizio della misurazione.
- F3CF mostra una tendenza della crepa ad aprirsi ma, alla fine del ciclo, torna quasi alla sua posizione iniziale: la struttura ha, sebbene limitatamente, subito comunque una deformazione plastica.

- F3CE ha mostrato un andamento attorno allo zero trascurabile fino ad Aprile 2015, momento in cui la crepa sembra che si sia aperta e non sia tornata alle dimensioni originarie.
- Le temperature all'interno del Battistero, misurate dal termometro posto in prossimità dell'accesso a Sud, mostrano come l'irraggiamento solare aumenti la temperatura nei periodi invernali mentre nel periodo estivo i valori sono poso sopra quelli degli altri punti. Al massimo, la variazione della temperatura si alza di circa 0.6°C rispetto a quella misurata in prossimità dei fessurimetri.

Livellazioni e misure tridimensionali

Introduzione

Si riportano di seguito le relazioni del Geom. Paolo Capraro che ha condotto le livellazioni interne ed esterne, nonché le misure tridimensionali di precisione. Verranno tralasciate le tabelle con le relative misure in quanto appesantirebbero notevolmente questo lavoro e non fornirebbero un valore aggiunto al lettore.

A seguire, pianta di collocazione dei vari punti di misura e grafici rappresentativi delle variazioni di distanza nel tempo riferite al valore della prima livellazione (17/12/2013).

Relazione della livellazione geometrica interna - livellazione di precisione

La livellazione geometrica di precisione per il collegamento dei capisaldi/stadiette è stata eseguita con livellazione geometrica dal mezzo, utilizzando un livello automatico di altissima precisione, CARL ZEISS JENA N1002A, strumento che ha un errore medio per un chilometro di doppia livellazione di $\pm 0.2\text{mm}$, 40 ingrandimenti ed un errore di stabilizzazione del pendolo di soli $0.05''$.

Lo strumento ha inoltre un sistema di compensazione degli errori di rettifica eseguendo le letture coniugate.

E' stata utilizzata una stadia in invar a doppia graduazione, la stadia viene appoggiata direttamente sul caposaldo di rotazione (RIF 1).

I calcoli relativi alla livellazione geometrica dal mezzo sono stati eseguiti compensando le letture coniugate, ecc.

E' stato preso quale caposaldo di riferimento altimetrico, per il calcolo delle quote, il caposaldo RIF 1 (materializzato da un caposaldo a testa sferica in acciaio inox infisso sul basamento della colonna posta davanti all'ingresso del Battistero).

I punti da controllare sono stati materializzati con stadiette fissate sulle colonne e sul paramento interno del Battistero.

Relazione livellazione geometrica esterna - movimenti altimetrici e livellazione di precisione

Il rilievo è stato eseguito con la metodologia della livellazione geometrica dal mezzo, procedura di precisione per il collegamento del caposaldo DD1 con il caposaldo IGM (indicato nella pianta seguente con CAP8), utilizzando un livello digitale automatico di alta precisione, LEICA DNA03 (le caratteristiche tecniche della strumentazione, riportano un errore teorico per un chilometro di livellazione eseguita in andata e ritorno o per poligoni chiusi di ± 0.3 mm) e stadia in invar da 2 metri (appoggiata direttamente sul caposaldo di rotazione e mantenuta verticale con appositi sostegni regolabili), lettura digitale al centesimo di millimetro (lo strumento effettua 5 letture per ogni misura, esegue la media e visualizza lo scarto riscontrato con le 5 letture - se lo scarto risulta superiore a 3 centesimi di millimetro, l'operatore ripete la misura) e registrazione automatica dei dati misurati.

La livellazione geometrica dal mezzo, consente di misurare con la massima precisione, operando con misure effettuate in andata e ritorno (ripetute ogni volta dalle stesse posizioni).

I calcoli relativi alla livellazione, sono eseguiti compensando le quote in andata e ritorno.

E' stato preso quale caposaldo di riferimento altimetrico, per il calcolo delle quote assolute, il caposaldo DD1 materializzato da un caposaldo profondo posto al di fuori della zona interessata dalle misure di monitoraggio; al caposaldo di riferimento è stata assegnata la quota di **3572.32** mm. Nella pianta seguente si possono vedere le posizioni dei vari capisaldi e delle stazioni.



Relazione misure tridimensionali - movimenti planimetrici, rilevamento celerimetrico di precisione per la determinazione delle misure differenziali

Il rilievo è stato eseguito con la procedura della celerimensura elettronica automatica (effettuando per ogni misura più strati di letture) che è la procedura topografica abitualmente utilizzata per questa tipologia di intervento, sia per la semplicità che per la sicurezza del risultato utilizzando un numero di misure sovrabbondanti e memorizzando le letture coniugate per poter compensare eventuali residui errori di rettifica.

Le misure, sono state effettuate con stazione totale di precisione, e registrazione automatica dei dati, utilizzando i prismi per il puntamento automatico ATR.

Le caratteristiche tecniche dello strumento utilizzato (Stazione totale Leica TS50 anche se in precedenza era stato utilizzato un TS30 avente precisioni e prestazioni similari), riportano un errore teorico di pochi decimi di millimetro a 100 metri, ad esempio:

- precisione angolare del TS50 $\pm 0.15\text{mgon}$, $\pm 0.2\text{mm}$ a 100 metri;
- precisione lineare del TS50 $\pm 0.6\text{mm} + 1\text{ppm}$, $\pm 0.7\text{mm}$ a 100 metri (anche se da numerose prove operative e di laboratorio, lo scarto riscontrato entro 100 metri non ha mai superato $\pm 0.3\text{mm}$ ed inoltre la misura è risultata estremamente stabile)

La procedura del rilievo, prevede il posizionamento della stazione totale su treppiedi telescopico posto circa al centro della fonte battesimale, e la misurazione di una serie di punti di riferimento, prismi fissati all'interno del Battistero come da pianta allegata punti 101-102-103-104.

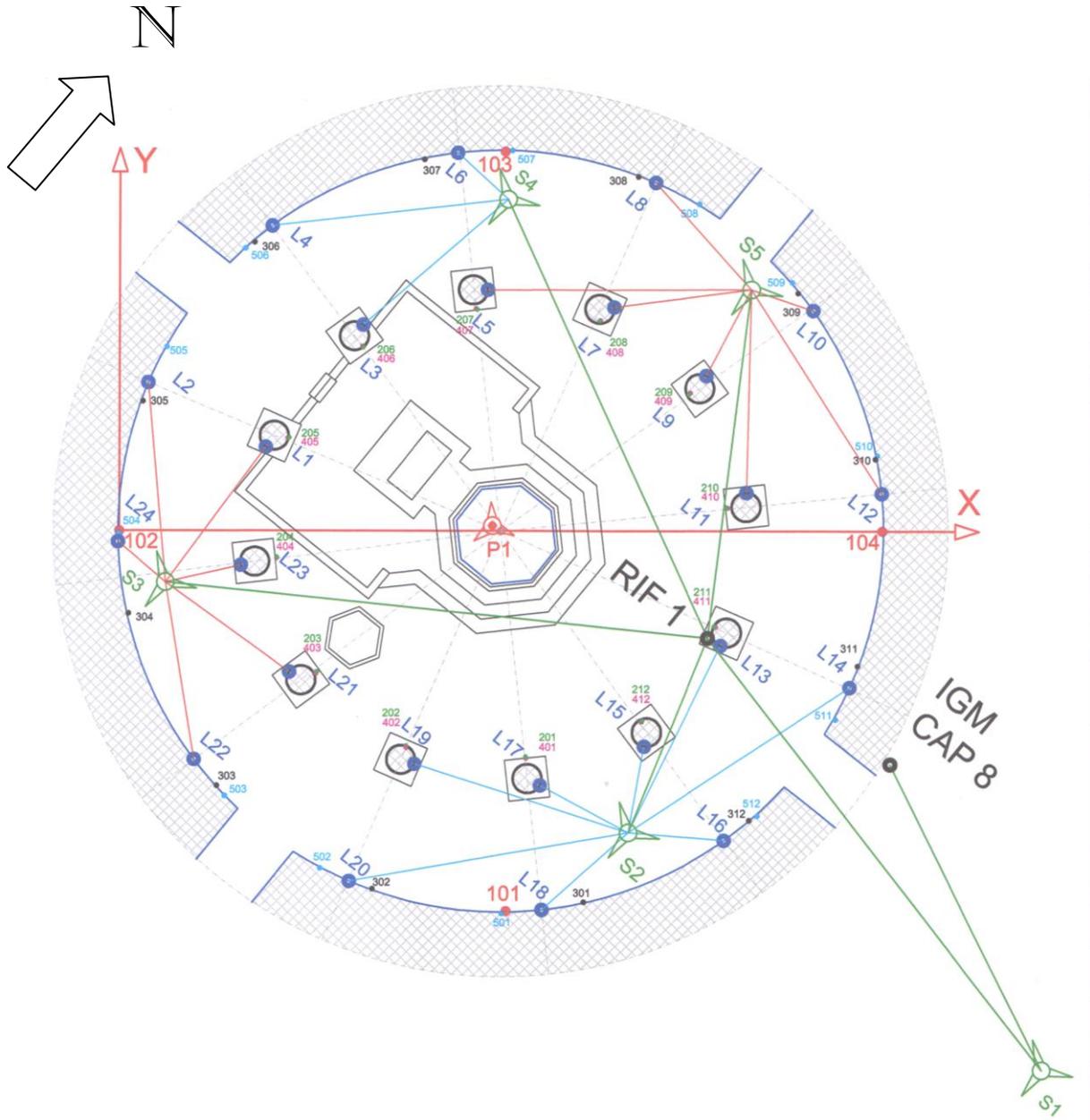
I punti da monitorare sono stati materializzati con prismi fissati all'interno del battistero:

- da 201 a 212 parete interna colonne;
- da 301 a 312 parete esterna;
- da 401 a 412 parete interna colonne;
- da 501 a 512 parete esterna.

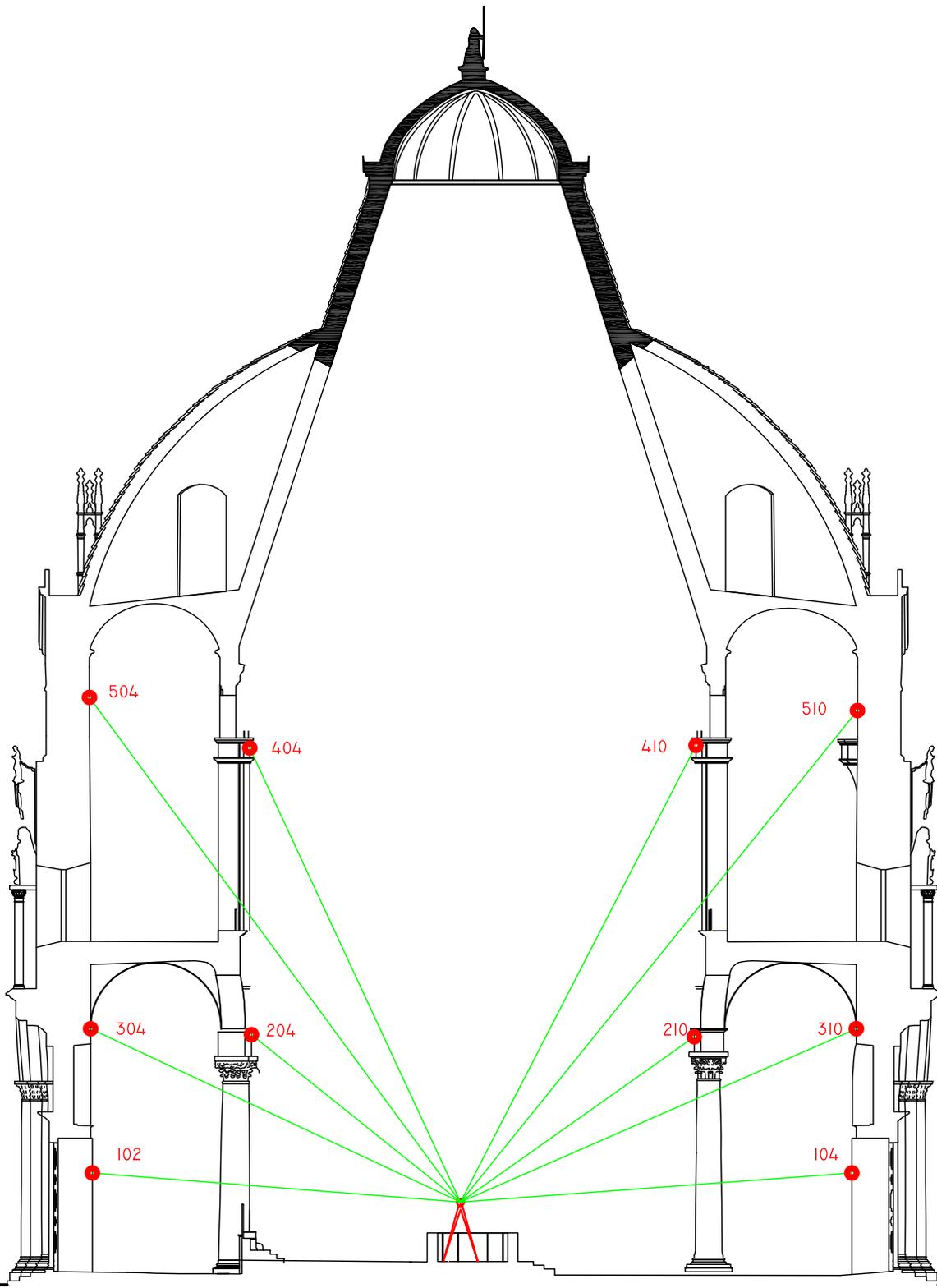
I calcoli relativi alla celerimensura di precisione, sono stati eseguiti compensando le misure.

Le misurazioni sono state effettuate con strumentazione "certificata" appositamente controllata prima della misurazione.

Planimetria

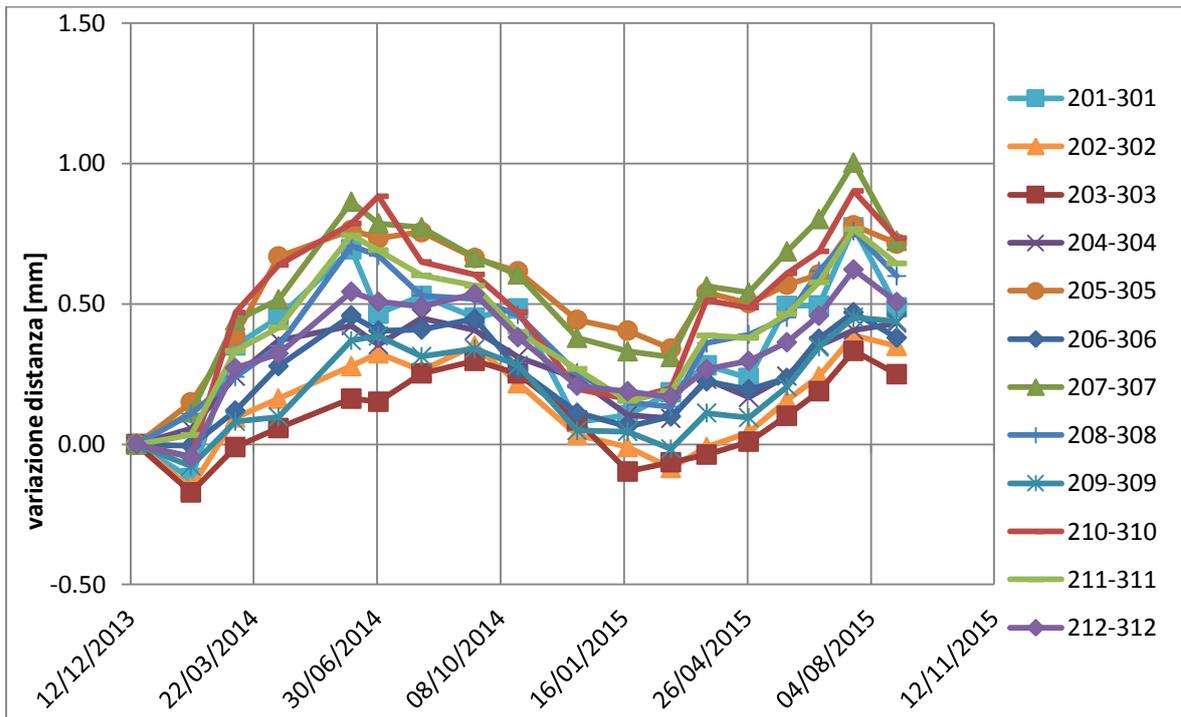


SCHEMA DELLE DISTANZE

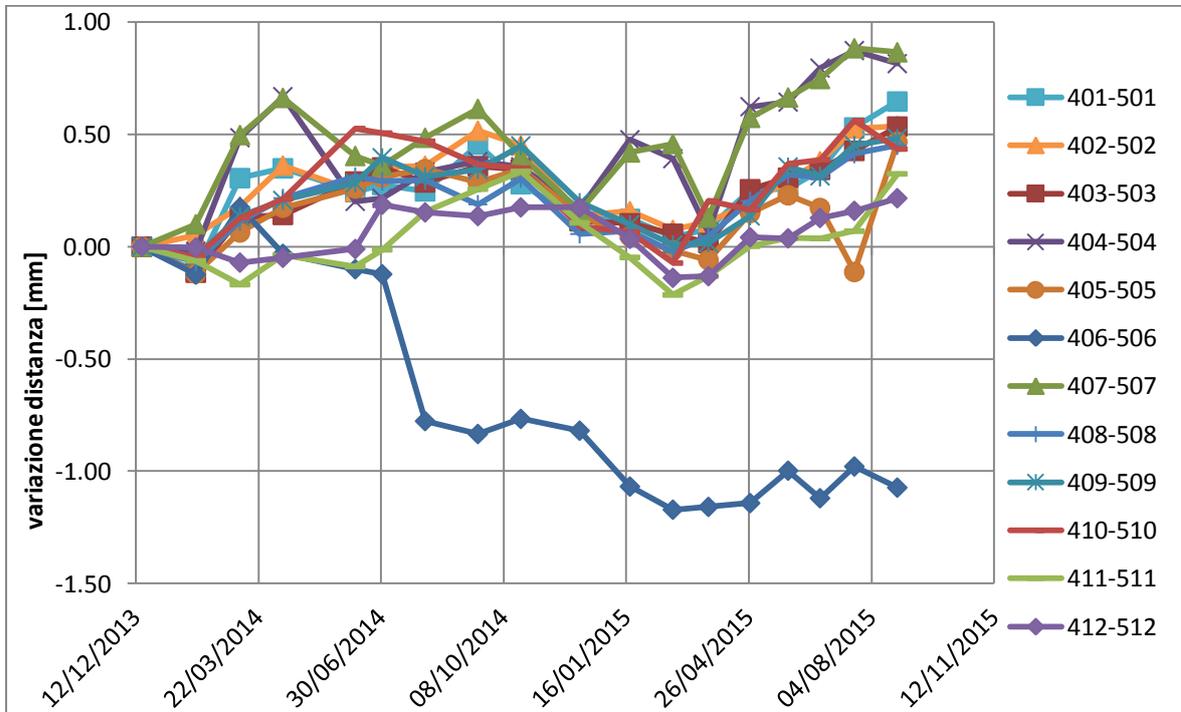


POSIZIONE INDICATIVA DEI PRISMI

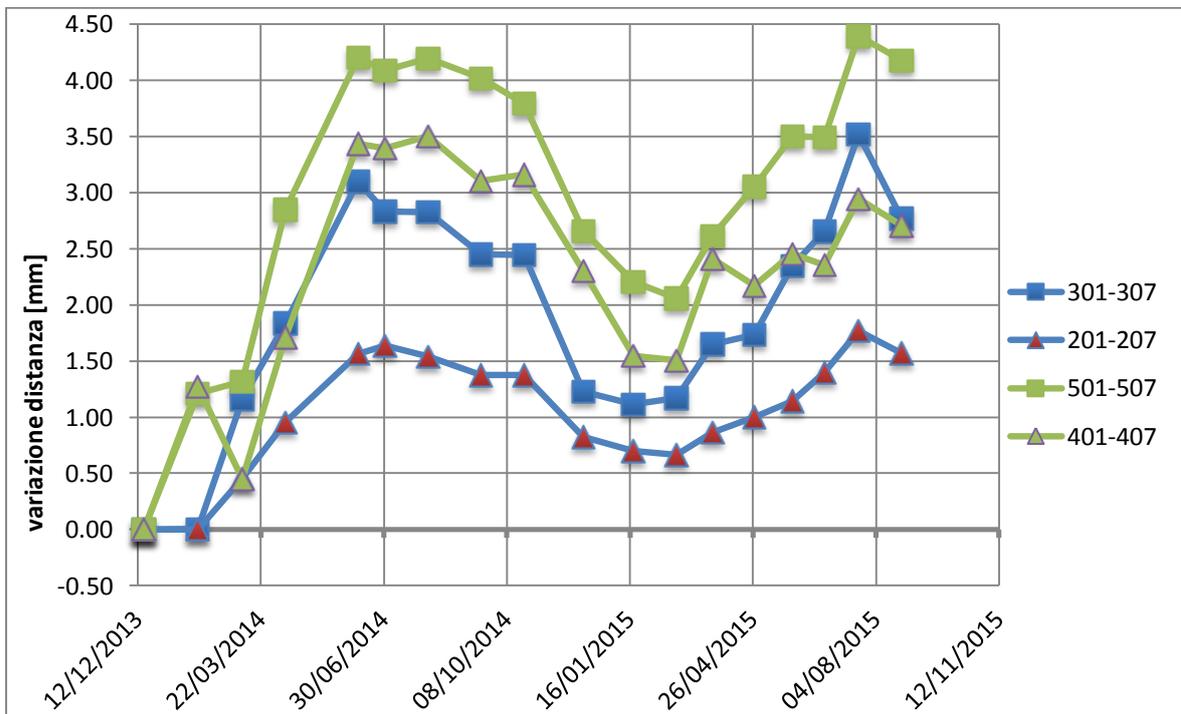
Arcate Matroneo

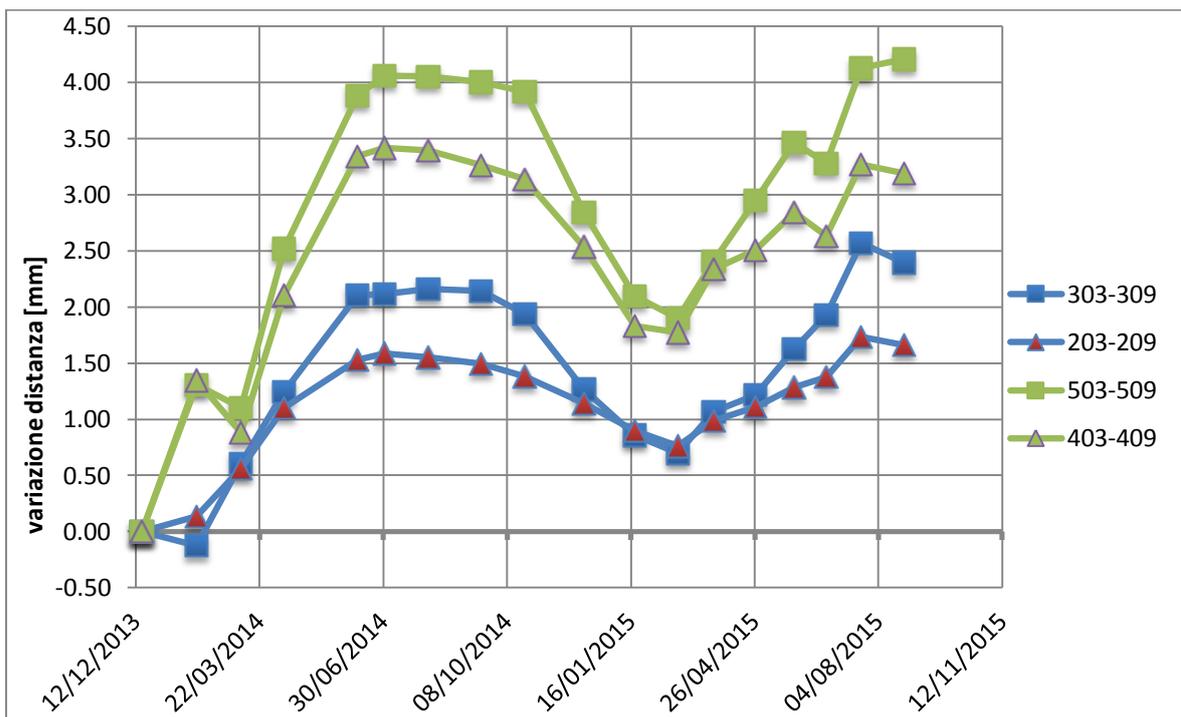
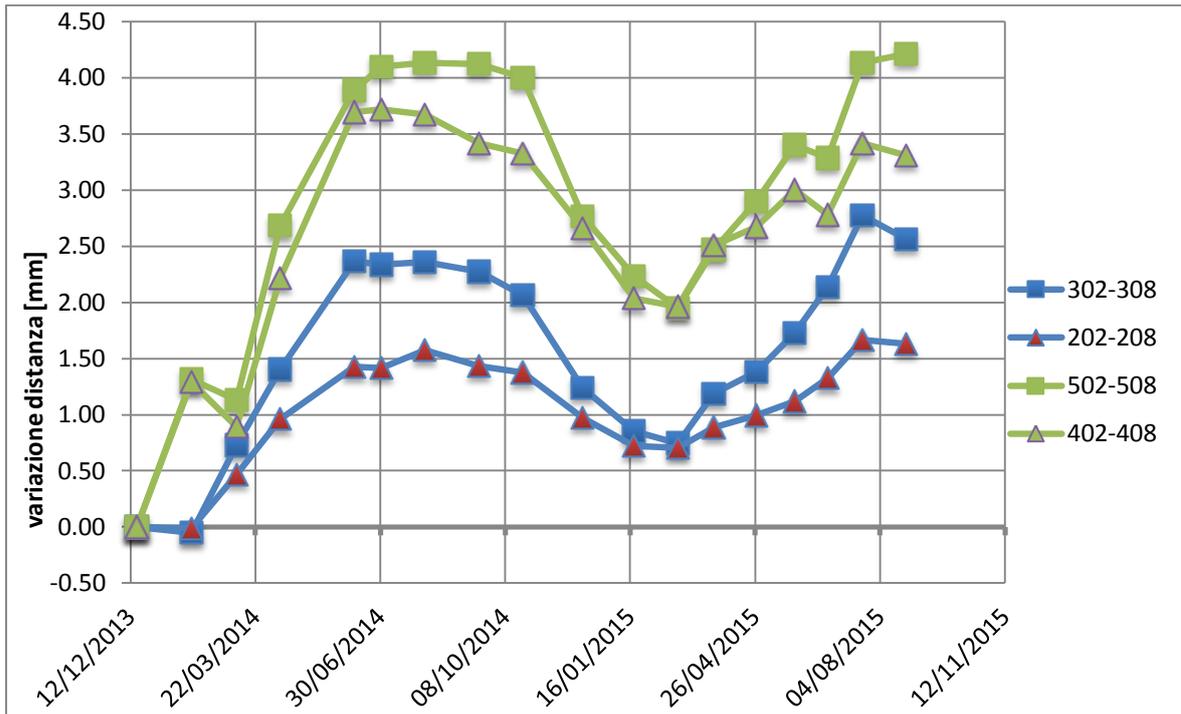


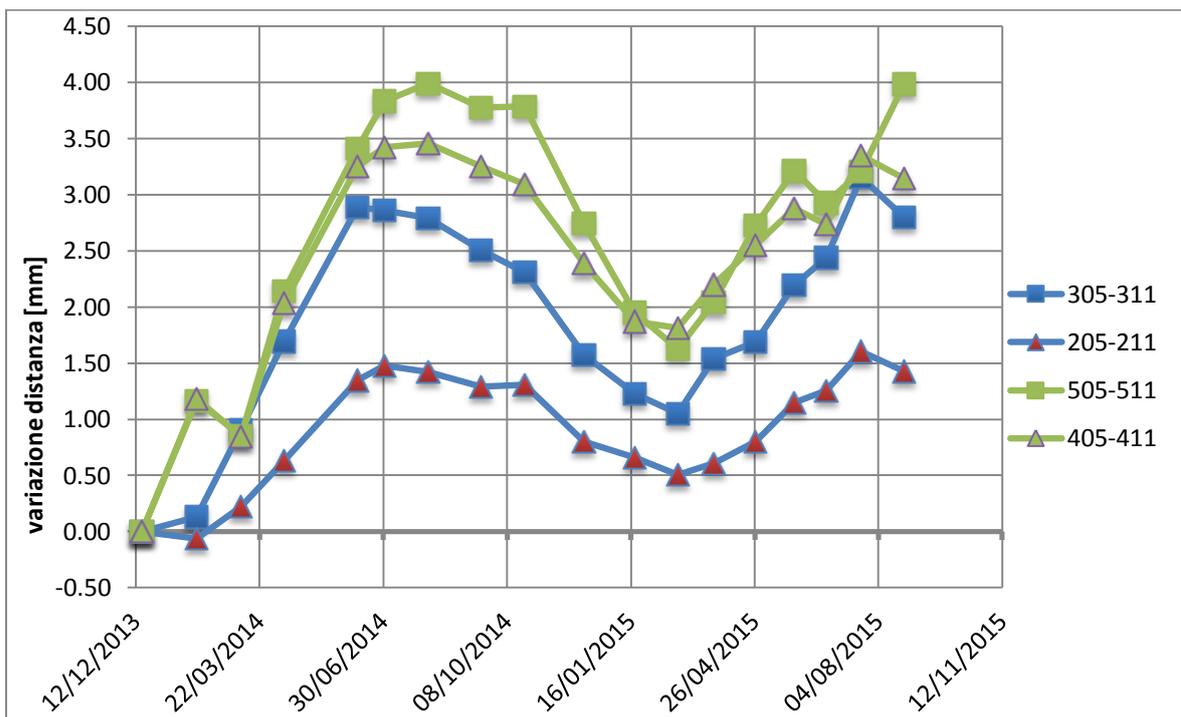
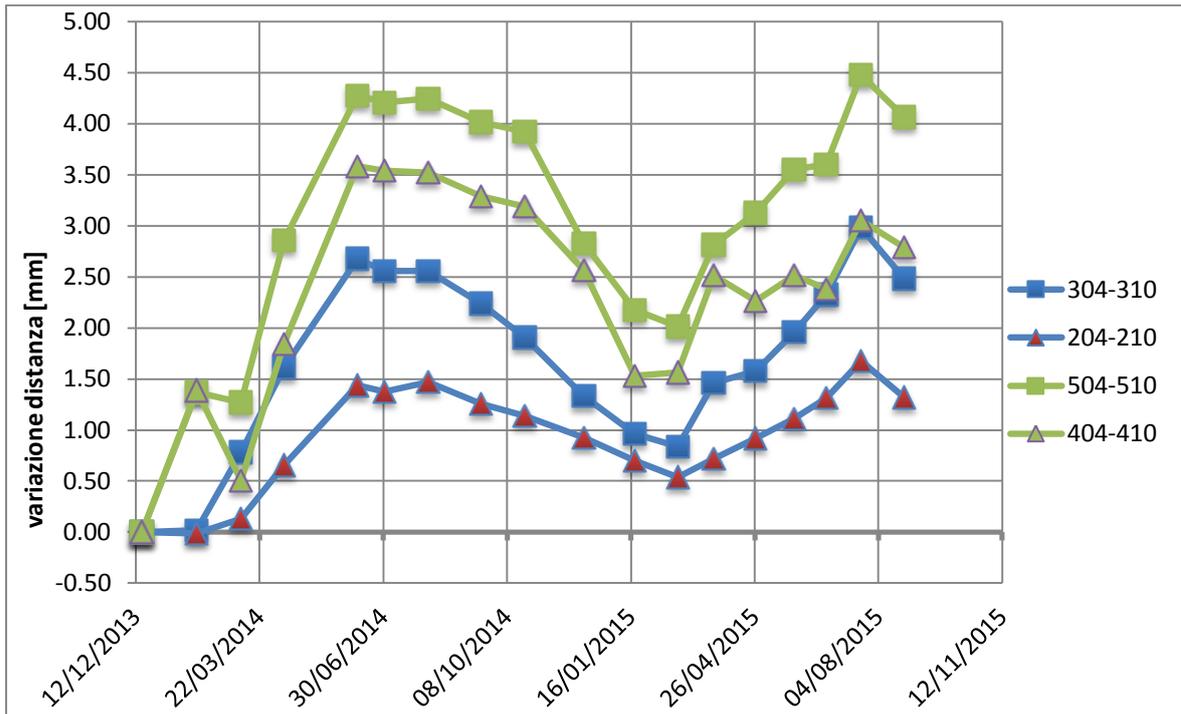
Arcate sopra il Matroneo



Movimenti sui diametri







Osservazioni

- 406-412 si allontanano non tanto quanto 506-512, infatti si ha un avvicinamento di 406-506 subito maggiormente tra luglio ed agosto del 2014 di circa 6 decimi di millimetro.
- 404-504 e 407-507 si discostano dall'andamento degli altri ma ritornano quasi alla posizione originaria (da tenere d'occhio con le prossime rilevazioni).
- gli archi sopra il matroneo tornano tutti alla posizione originaria (salvo uno scarto massimo di 2 decimi di millimetro dovuto probabilmente alla precisione della rilevazione ma comunque da monitorare) tranne 207-307 e 205-305 che hanno uno scarto annuo di circa 3/4 decimi di millimetro.
- Considerando le distanze tra colonna e colonna diametralmente opposta e tra parete e parete, nessuna di queste torna alla posizione originaria con scarto annuo maggiore di 1.5mm, per quanto riguarda i punti rilevati all'altezza del secondo livello di prismi, mentre compreso tra circa 0.5mm e 1.1 mm per il primo livello. Il maggiore degli scarti si ha nella distanza 406-412 pari a circa 3 mm.
- Non si rilevano spostamenti significativi per i punti battuti nella livellazione interna ed esterna.

Capitolo V

CONCLUSIONI

Riepilogo delle informazioni acquisite

Introduzione

Come già detto, questo lavoro da me svolto prosegue l'operato dei miei colleghi, Francesco Capocchi e Martina D'Agresta, sulle caratteristiche di tutti quei fattori che incidono sulla struttura del Battistero, sui suoi movimenti, sull'evolversi dei cedimenti e crepe presenti e sulla previsione di quelli che saranno i futuri punti critici e i prossimi cedimenti del monumento.

Nonostante il Battistero sia in uno stato più che buono, non presentando mai particolari problemi statici o di instabilità strutturale, le maggiori preoccupazioni sono state quelle di cercare di conservare nel miglior modo possibile gli elementi del monumento dal punto di vista storico-artistico.

E' comunque importante operare in modo da avere le maggiori informazioni possibili su tutti quei legami che esistono tra i vari fattori che determinano lo stato e la funzionalità di un fabbricato, a partire dai criteri in base ai quali è stato progettato, su come è stato realizzato e si è evoluto, alle informazioni sui movimenti che ha compiuto, sulle sue deformazioni, fino ad arrivare a conoscere bene anche i fattori esterni come: le caratteristiche del terreno, della falda acquifera e dei movimenti che l'ambiente circostante ha compiuto nel corso degli anni.

Proprio per questo non è possibile terminare questo lavoro con delle vere e proprie conclusioni: si è stato cercato di riassumere tutte le informazioni acquisite e soprattutto di pianificare quelle che dovranno essere le future operazioni di indagine per completare la conoscenza di tutti quei legami di cui si parlava precedentemente.

Riepilogo dell'analisi sui movimenti altimetrici:

- I movimenti più repentini del Battistero si sono verificati tra il 1965 e il 1974, anni in cui sembra ruotare verso Sud, con asse da Ovest ad Est, compiendo lo spostamento di un corpo rigido (i vertici $\overline{23}$ e $\overline{25}$ si sono mossi sulla verticale di una quantità analoga ma in verso opposto rispetto a φ' , mentre il vertice $\overline{24}$ ha ceduto pressappoco quanto φ').
- Dal 1974 al 2014 il Battistero sta compiendo un movimento di rotazione intorno ad un asse che va da Nord-Est a Sud-Ovest in quanto le variazioni di quota dei vertici $\overline{23}$ e $\overline{24}$ rispetto a φ' si muovono con rette di tendenza parallele, mentre quelle del vertice $\overline{25}$ hanno dei valori che oscillano attorno ad una retta orizzontale muovendosi, quindi, pressappoco come φ' .
- Il Battistero sta compiendo complessivamente un movimento di traslazione verso il basso, sommato ad un movimento di rotazione intorno ad un asse ipotetico che va da Nord-Est a Sud-Ovest, passando per il centro del monumento.

- Nei periodi 1973-1983 e 2001-2014 il Battistero si è mosso compiendo una rotazione non rigida, subendo l'effetto di cedimenti differenziali del sottosuolo che stanno in qualche modo deformando la sua struttura.
- Il caposaldo identificato con la lettera \bar{R} , posto sul prato a Nord del Duomo in prossimità del muro del Camposanto e di coordinate Est 453,2897 e Nord 598,2063, viene assunto come punto che meglio approssima la quota del piano di campagna della Piazza del Duomo.
- La porzione di Piazza a Sud e ad Ovest del Battistero sta cedendo di una quantità maggiore rispetto a quella a Nord e ad Est. Questo movimento non coincide con la rotazione del Battistero, anzi, dai movimenti altimetrici delle porzioni di Piazza ci saremmo dovuti aspettare una rotazione del Battistero rispetto ad un asse che va da Nord-Ovest a Sud-Est anziché la rotazione rispetto ad un asse che va da Nord-Est a Sud-Ovest.

Riepilogo delle informazioni acquisite dalle indagini geoelettriche:

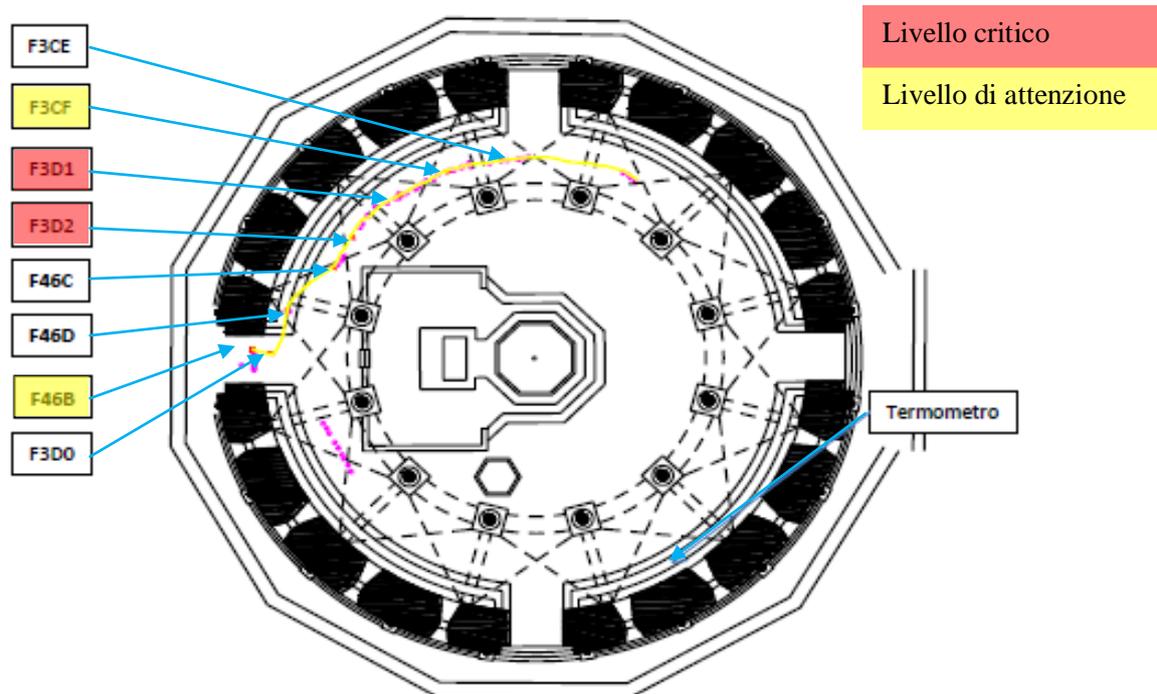
- Il piano delle fondazioni si può collocare ad una profondità di circa -2 metri dal piano di campagna, e questo su tutta la circonferenza del Battistero.
- I due anelli di fondazione sono collegati tra loro da quattro strutture in muratura.
- Le dimensioni delle fondazioni sono di circa: larghezza 4 metri per un'altezza di 2 metri, per l'anello esterno, e di 2 metri per 2 metri l'anello interno. L'anello esterno di fondazione sporge di circa 1 metro dalla parete esterna del battistero, su tutto il perimetro del monumento.
- Nella zona Ovest del battistero, vi è traccia di una possibile struttura archeologica su cui è stato costruito il Battistero.

Riepilogo delle informazioni acquisite dalle prove CPTU e SDMT:

- I risultati delle correlazioni empiriche riportano un'alternanza di strati che può non rappresentare la realtà del sottosuolo in quanto l'indice di comportamento del suolo I(SBT) si muove spesso repentinamente, in virtù della elaborazione dei parametri di cui è composto, da un tipo di terreno a quello più vicino e quindi non è lecito prendere per certi questi risultati senza prima verificarli.
- La falda acquifera è posizionata a circa 1.5m sul livello del mare ma questo dato dovrà essere verificato dalle misure dei piezometri.
- Sia l'indice di comportamento del suolo I(SBT) che la sovrapposizione dei diagrammi di q_c ed u fanno notare il passaggio allo strato delle argille, mentre la transizione dei due strati sovrastanti pare più difficile da valutare se non da questi ultimi diagrammi.
- Le prove CPTU 2 e 3 andrebbero ripetute in quanto non scendono al di sotto del tetto delle argille.

- Il tetto delle argille è praticamente un piano inclinato con retta di massima pendenza parallela alla linea della sezione 2 ed avente quote crescenti dalla CPTU 3 alla CPTU 1 (direzione NO-SE).
- Al di sopra del tetto di argilla vi è uno strato di sabbio-limoso ed uno strato limo-argilloso di spessore variabile.
- In corrispondenza delle prove CPTU 4 e 5 sembra esservi una lente di limo-sabbioso dello spessore di circa 1.5m
- In corrispondenza delle prove CPTU 1, 2, 3 e 6, vi è uno strato superficiale di terreno organico/torba all'interno dello strato limo-argilloso, dallo spessore variabile tra i 50 cm ed i 180 cm.
- Lo strato limo-argilloso in corrispondenza della prova CPTU 8 è di 10 m circa.
- I risultati ottenuti della prova SDMT confermano quanto concluso dalle interpretazione delle prove con il piezocono (CPTU).

Osservazioni sul quadro fessurativo:



- F46B mostra che la crepa sta oscillando nervosamente e ciclicamente nell'intervallo compreso tra 0 e i 6 decimi di millimetro manifestando quello che può essere il ritmo di apertura e chiusura della crepa. L'oscillazione risulta sfasata con l'escursione termica ma, soprattutto, l'apertura della crepa non ritorna all'ampiezza di inizio del ciclo.
- F3D0 non mostra alcun movimento.

- F46C e F46D mostrano che le rispettive crepe hanno un comportamento contraente (i valori misurati sono minori rispetto al loro rispettivo valore iniziale) ed in discordanza (quasi in controfase) con la temperatura. L'entità degli spostamenti è di pochi millesimi di millimetro.
- F3D2 e F3D1 mostrano che le rispettive crepe hanno un andamento simile ma il primo in scala più ampia: le crepe si allargano nel periodo Gennaio-Giugno per poi assestarsi fino al mese di Gennaio successivo quando si ripete il ciclo di apertura. La velocità con cui si apre della crepa in corrispondenza del F3D2 mostra qualche preoccupazione in quanto la sua gola è più ampia di 6/7 decimi di millimetro rispetto all'inizio della misurazione.
- F3CF mostra una tendenza della crepa ad aprirsi ma, alla fine del ciclo, torna quasi alla sua posizione iniziale: la struttura ha, sebbene limitatamente, subito comunque una deformazione plastica.
- F3CE ha mostrato un andamento attorno allo zero trascurabile fino ad Aprile 2015, momento in cui la crepa sembra che si sia aperta e non sia tornata alle dimensioni originarie.
- Le temperature all'interno del Battistero, misurate dal termometro posto in prossimità dell'accesso a Sud, mostrano come l'irraggiamento solare aumenti la temperatura nei periodi invernali mentre nel periodo estivo i valori sono poso sopra quelli degli altri punti. Al massimo, la temperatura si alza di circa 0.6°C la variazione della temperatura si alza di circa 0.6°C rispetto a quella misurata in prossimità dei fessurimetri.

Osservazioni sulle livellazioni e misure tridimensionali:

- 406-412 si allontanano non tanto quanto 506-512, infatti si ha un avvicinamento di 406-506 subito maggiormente tra luglio ed agosto del 2014 di circa 6 decimi di millimetro.
- 404-504 e 407-507 si discostano dall'andamento degli altri ma ritornano quasi alla posizione originaria (da tenere d'occhio con le prossime rilevazioni).
- gli archi sopra il matroneo tornano tutti alla posizione originaria (salvo uno scarto massimo di 2 decimi di millimetro dovuto probabilmente alla precisione della rilevazione ma comunque da monitorare) tranne 207-307 e 205-305 che hanno uno scarto annuo di circa 3/4 decimi di millimetro.
- Considerando le distanze tra colonna e colonna diametralmente opposta e tra parete e parete, nessuna di queste torna alla posizione originaria con scarto annuo maggiore di 1.5mm, per quanto riguarda i punti rilevati all'altezza del secondo livello di prismi, mentre compreso tra circa 0.5mm e 1.1 mm per il primo livello. Il maggiore degli scarti si ha nella distanza 406-412 pari a circa 3 mm.

- Non si rilevano spostamenti significativi per i punti battuti nella livellazione interna ed esterna.

Conclusioni

Il terreno al di sotto del Battistero, seppur con i dovuti distinguo, non è molto dissimile da quello della vicina Torre. Nell'analisi condotta attraverso le prove CPTU si sono visti abbastanza bene le transizioni tra i vari strati, sebbene vi siano state alcune incertezze sulla natura dello strato più superficiale (terreno limo-argilloso) e sulla sua transizione con lo strato sottostante. Questo è sicuramente un elemento da approfondire in quanto sembra che questo strato sia particolarmente spesso nel quadrante nord-occidentale, zona dove sono presenti le crepe monitorate.

Sebbene non sia da escludere che le oscillazioni del livello di falda possano aver contribuito al quadro fessurativo esistente, come pure le caratteristiche meccaniche del terreno più scadenti che negli altri quadranti, il movimento del Battistero è una rotazione (e quindi un affondamento) nel quadrante diametralmente opposto a quello delle fessure: motivo in più per approfondire le indagini al fine di identificare con precisione i litotipi al di sotto del monumento, le loro caratteristiche e soprattutto la loro suscettività all'acqua.

Questi dubbi da dirimere lasciano aperti almeno tre fronti di indagini:

- il monitoraggio delle stesse, soprattutto quelle che presentano un livello critico e di attenzione;
- la prosecuzione delle indagini del sottosuolo con i sondaggi;
- il monitoraggio del livello di acqua nel terreno e la determinazione del valore delle pressioni neutre.

Pianificazione nuove indagini

Sondaggi

Con il termine "sondaggio" si indica una perforazione del terreno effettuata a scopo di indagine utilizzando una macchina denominata "sonda".

Le principali finalità dei sondaggi sono:

- il riconoscimento della stratigrafia;
- il prelievo di campioni indisturbati per la determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche;
- il raggiungimento di una determinata profondità alla quale condurre prove in sito;
- l'installazione di strumenti di misura (assestimetri, inclinometri, piezometri).

Si distingue tra:

- perforazioni a distruzione, con lo scopo di raggiungere una determinata profondità, sono eseguite con strumenti (e.g.: scalpelli, triconi) che disgregano il terreno;
- perforazioni con carotaggio continuo che consentono il riconoscimento dei litotipi presenti mediante il recupero di colonne di terreno dette carote.

Il diametro dei fori di sondaggio varia tra 15 e 30 cm ed è possibile raggiungere profondità superiori a 100 m.

I sondaggi a carotaggio continuo possono ancora essere divisi in sondaggi:

- geognostici – consentono la definizione del profilo stratigrafico e delle condizioni idrauliche nel sottosuolo; i campioni che sono prelevati con i normali utensili di perforazione sono delle classi Q1 e Q2;
- geotecnici – oltre alle informazioni riguardanti il profilo stratigrafico prevedono il prelievo di campioni indisturbati per prove di laboratorio (classe Q4 e Q5) e/o l'esecuzione di prove in sito (prove penetrometriche dinamiche SPT, scissometriche, ecc.)

A seconda delle tecniche di perforazione si distingue infine in sondaggi a percussione e sondaggi a rotazione.

Con il termine campione si intende una porzione limitata estratta da una popolazione più o meno grande. La Geotecnica fa distinzione tra i campioni di terreno in funzione della loro utilizzabilità; in particolare facendo riferimento alle più volte citate Raccomandazioni AGI si suddividono i campioni in 5 classi in funzione del disturbo arrecato in fase di prelievo e quindi alle informazioni geotecniche che da essi si possono dedurre (vedi tabella seguente).

Caratteristiche geotecniche determinabili	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Natura del terreno	*	*	*	*	*
Composizione granulometrica		*	*	*	*
Contenuto d'acqua			*	*	*
Peso dell'unità di volume				*	*
Caratteristiche meccaniche					*
	Campioni rimaneggiati		Campioni a disturbo limitato	Campioni indisturbati	

I materiali estratti con i carotieri ricadono nelle classi Q1÷Q3, di conseguenza volendo acquisire informazioni sulle proprietà meccaniche dei terreni è risultato necessario sviluppare particolari attrezzi e strumenti per il prelievo di campioni di classe Q4÷Q5.

Quando la perforazione ha raggiunto la profondità prevista per il prelievo di un campione, viene interrotta ed il carotiere è sostituito con un campionatore. Si ricorda che il prelievo di campioni indisturbati è possibile, con le usuali tecniche, solo in presenza di terreni a grana fine (limi e/o argille). Sono stati messi a punto diversi tipi di campionatori in funzione della consistenza del terreno da campionare; infatti, le problematiche del campionamento sono profondamente diverse:

- per materiali molli, il problema è quello del recupero del campione e nell'evitare di comprimerlo;
- per materiali duri il problema è quello dell'infissione del campionatore.

Piezometri tipo Casagrande.

I piezometri sono strumenti utilizzati per monitorare la pressione interstiziale dell'acqua nel terreno, essi hanno due categorie di applicazioni: il monitoraggio del livello di acqua nel terreno e la determinazione del valore delle pressioni neutre.

Generalmente i piezometri utilizzati per misurare la pressione interstiziale nei terreni non sono diversi da quelli usati per la misura della pressione dell'acqua nei giunti delle masse rocciose: le differenze stanno nel metodo di installazione. I piezometri possono essere suddivisi in due categorie: quelli in cui è presente un diaframma tra acqua nel terreno e trasduttore (p. a trasduttore pneumatico, a corda vibrante o a resistenza elettrica); e quelli in cui il diaframma non è presente (p. aperti a tubo fisso e idraulici a due tubi). Generalmente con il termine piezometri s'intende uno strumento che misura la pressione interstiziale dell'acqua di un ben preciso strato di terreno.

Quando occorre determinare il livello dell'acqua nel terreno si ricorre all'impiego di pozzi di osservazione e piezometri aperti mentre, quando occorre determinare la pressione del fluido interstiziale, si impiegano piezometri muniti di trasduttori di pressione: piezometro idraulico a due tubi, piezometri pneumatici, piezometri a corda vibrante e piezometri elettrici.

Nel nostro caso si prevede di utilizzare il piezometro Casagrande, su altre verticali (almeno quattro) disposte sul prato in prossimità del Battistero. Questo tipo di piezometro è sempre un piezometro aperto a tubo fisso, ed è costituito da un elemento filtrante, rappresentato da un cilindro in pietra

porosa o in polietilene poroso ad alta densità del diametro di 30-50mm e della lunghezza di 200-300 mm. L'estremità superiore della pietra porosa è collegata ad un tubo di piccola sezione o da due tubi in PVC o in nylon ricoperti da polietilene, con diametro interno generalmente di 12.5mm, per il raccordo in superficie. In un foro di sondaggio possono anche essere posti in opera due piezometri di Casagrande a diverse altezze. Nel caso si preveda la posa in opera di due piezometri a diverse profondità nello stesso foro, il diametro minimo utile dovrà essere di 110 mm.

L'installazione prevederà due zone filtranti all'interno delle celle porose e due tappi impermeabili. La zona filtrante e il tappo impermeabile, contenuti tra le quote di posa dei due piezometri, dovranno essere dimensionati in altezza in funzione della stratigrafia e dell'individuazione degli strati permeabili ed impermeabili.

Per l'installazione del piezometro di Casagrande si procede nel seguente modo:

- a sondaggio ultimato, con il rivestimento in opera, si forma un tappo di fondo con malta di cemento, bentonite e acqua (con parti in peso rispettivamente pari al 32%-4%-64%), fino a 0.5m al di sotto della quota prevista per il piezometro;
- si pone in opera un filtro dello spessore di 0.5m e diametro delle particelle 1.4mm, ritirando man mano il rivestimento;
- si pone in opera il piezometro, collegando accuratamente il tubo di risalita, i giunti tra i vari segmenti di tubo devono avere una tenuta perfetta;
- si realizza intorno e sopra il piezometro un filtro di sabbia pulita di spessore 0.5m, ritirando gradualmente il rivestimento;
- si esegue un sigillo impermeabile, costituito da alternanze di palline di bentonite (del diametro di 20mm) e ghiaietto, di spessore 0.5-1.0m;
- si realizza uno strato (di 0.5-1.0m) di sabbia pulita e un secondo sigillo impermeabile;
- infine si riempie il foro, preferibilmente con malta di cemento, bentonite, acqua, colata attraverso delle aste che arrivano a fondo foro, la parte terminale viene sigillata con un blocchetto di calcestruzzo.

È importante che, sia durante queste operazioni che durante la trivellazione, il livello d'acqua sia mantenuto pari o al di sopra del livello di falda iniziale, in modo da minimizzare gli effetti di disturbo conseguenti al flusso d'acqua che tende ad instaurarsi verso il foro in seguito alla perforazione. Si installeranno anche dei sensori che ci permetteranno di avere una misura continua della quota piezometrica. Le informazioni ricavate saranno:

- il monitoraggio del livello di acqua nel terreno;
- la determinazione del valore delle pressioni neutre.

Bibliografia

Tesi di Laurea Specialistica di Francesco Capocchi: *Il Battistero del Duomo di Pisa: Movimenti ed indagini* – 2014

Tesi di Laurea Specialistica di Martina D'agresta: *I MOVIMENTI DEL BATTISTERO DI PIAZZA DEI MIRACOLI E DEL TERRITORIO CIRCOSTANTE* – 2015

Tesi di Dottorato di Ricerca del Dott. Giorgio Verdiani: *IL BATTISTERO DI PISA, rilievo e rappresentazione digitale tra ricerca e innovazione* - 2003

LA TORRE DI PISA. Gli studi e gli interventi che hanno consentito la stabilizzazione della Torre di Pisa - AA.VV - Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato - Volume II cap. I – 2005

Fascicolo n°3 dell'archivio geodetico I.G.M *Controllo stabilità Torre di Pisa Misure geotopografiche*, Firenze, 1986

D. Lo Presti, C. Meisina, N. Squeglia - *Applicabilità di prove penetrometriche statiche nella ricostruzione del profilo stratigrafico* - Rivista Italiana Di Geotecnica 2/2009

National Cooperative Highwayresearch Program - *Cone Penetration Testing* – Transportation Research Board -2007

B. H Fellenius e A. Eslami - *SOIL PROFILE INTERPRETED FROM CPTu DATA* - “Year 2000 Geotechnics” Geotechnical Engineering Conference, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand – 2000

P. K. Robertson e K.L. Cabal (Robertson) - *GUIDE TO CONE PENETRATION TESTING 6th Edition 2015* - Gregg Drilling & Testing, Inc. – 2014

P.K. Robertson - *Soil behaviour type from the CPT: an update* - 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA – 2010

L. Tonni - *Caratterizzazione geotecnica del sottosuolo mediante prove con piezocono* - Corso di Formazione A.P.C. – 2012

D. Marchetti, S. Marchetti, P. Monaco, G.Totani - *Risultati di prove in sito mediante dilatometro sismico (SDMT)* - XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica "Previsione e controllo del comportamento delle opere" - Padova-Abano Terme, 2007

G. P. Deidda - *Indagini Sismiche Invasive Convenzionali* - Giornata di Studio sulle indagini geofisiche –S. Giovanni Valdarno, 2012

C. Viggiani – *Fondazioni* – Hevelius -1999

www.directindustry.it – fessurimetro GEKO

www.pagani.it – piezocono per le CPTU

*A tutti coloro che lavorano per realizzare i propri obiettivi,
affinché i sogni diventino realtà.*

Giovanni Galfano