

**Committente: Segretariato regionale del MiC per la Puglia**

**Progetto esecutivo del monitoraggio e controllo delle strutture  
di fondazione ed elevazione della cinta meridionale"**

**CUP: F23G17000390001 CIG: ZF633FCBCC**

**Piano di Controllo e Monitoraggio**  
**Relazione Tecnica**

**Coordinamento: Prof. Ing. Fabio Fatiguso**

**Gruppo di lavoro:**

**Ing. Mariella De Fino**

**Rocco Rubino**

**Ing. Albina Scioti**

**Il Presidente**

**Prof. Ing. Fabio Fatiguso**



**B.Re.D. - Building Refurbishment  
and Diagnostics s.r.l.**

**C.so A. De Gasperi, 327 - 70125 BARI  
p.Iva 07332870729 - REA 549333**

Codice documento

PCM/2021/64/V02

Data revisione

24 gennaio 2022

Data approvazione

31 dicembre 2021

**Indice**

1. Introduzione .....	3
2. Monitoraggio geotecnico e topografico.....	5
2.1 Monitoraggio degli spostamenti .....	5
2.2 Misure inclinometriche.....	7
3. Caratterizzazione dei materiali da saggi in fondazione .....	11
4. Monitoraggio dei quadri lesionativi.....	13
5. Controllo delle opere provvisorie.....	15

## 1. Introduzione

Il complesso delle attività di rilievo e mappatura, di indagine diagnostica sulle murature in elevato e di indagine geognostica sulle strutture e i terreni di fondazione della cinta meridionale della Fortezza di Lucera (FG), come eseguite nel periodo dicembre 2020 – aprile 2021 dall'incaricato RTI, di cui la scrivente società è stata capofila, consente di individuare alcune questioni rilevanti e interlocutorie, il cui approfondimento attraverso ulteriori controlli e monitoraggi appare necessario per indirizzare correttamente le misure di intervento di natura geotecnica e strutturale. Le questioni predette, identificate anche alla luce del quadro conoscitivo generale e attraverso il costante confronto con i Progettisti e la Direzione Lavori, sono nel seguito discusse, con indicazione degli aspetti procedurali e operativi, a supporto della interpretazione dei documenti allegati: elaborati grafici PCM1-PCM2-PCM3, recante la localizzazione delle prove già eseguite e da eseguirsi, computo metrico-estimativo CME/2021/64/V00 e capitolato speciale CSA/2021/64/V00.

Nello specifico, nel corso di esecuzione di sondaggi (S01-S02-S03-S04) e scavi (SC01-SC02-SC03-SC04) in fondazione, nella porzione compresa fra la Torre della Regina e la prima torre quadrangolare, è stato riscontrato che le murature in elevato insistono su sottofondazioni continue in conglomerato, a loro volte impostate su strati di preparazione, di dimensioni variabili in larghezza e spessore. Gli strati di preparazione sono stato oggetto, in numero limitato di campioni (S01-S04), di analisi di caratterizzazione mineralogico-petrografica, che ne hanno consentito di classificarli come conglomerati poligenici fango-sostenuti e debolmente cementati. Inoltre, in corrispondenza di alcuni scavi (SC02), lo studio archeologico ha rilevato occupazioni non coeve alla costruzione della fondazione, con situazioni non necessariamente indicative delle soluzioni costruttive più ricorrenti.

***L'estensione di saggi e scavi fondali appare, dunque, fondamentale al fine di qualificare in modo sistematico e rappresentativo le soluzioni di interfaccia fra le strutture basamentali e i terreni adiacenti e le stratigrafie dei terreni stessi, nonché per analizzare ulteriori campioni di conglomerato delle strutture fondali e sotto-fondali, a supporto della identificazione delle tecniche di realizzazione.***

In parallelo, la mappatura del degrado, ha mostrato, da un lato, numerose e significative soluzioni di continuità alla connessione fra le torri e le cortine, dall'altro, situazioni localizzate, in particolare sui paramenti interni in laterizio, con fessurazioni sub-verticali e inclinate, potenzialmente riconducibili a movimenti di assestamento e/o cedimento verticale. Le predette evidenze consentono di ipotizzare che la cinta muraria sia o sia stata soggetta a fenomeni di rotazione e traslazione, legati, oltre che ai noti e affrontati problemi di stabilità del pendio a sud, anche a condizioni localmente anomale delle strutture murarie. Difatti, i diversi campi di muratura scanditi dalle torri potrebbero esibire comportamenti diversi, perché diversi sono lo sviluppo planimetrico longitudinale, la tipologia di vincolo alla base e le condizioni di confinamento laterale. Emblematico, in tal senso, è proprio il caso della porzione compresa fra la Torre della Regina e la prima torre quadrangolare, con lunghezza pari a circa il doppio delle porzioni successive, presenza delle già citate disomogeneità delle strutture fondali e sub-fondali e sostanziale assenza di collegamento con la torre circolare a est per la quasi totalità del suo sviluppo in altezza.

***Ulteriori approfondimenti, da un lato sugli spostamenti relativi delle strutture di fondazione rispetto al terreno, dall'altro sulla progressione dei quadri lesionativi delle strutture di elevazione, consentirebbero di ridurre l'incertezza interpretativa sulla natura, le cause e la progressione dei dissesti ipotizzati.***

Inoltre, rispetto ai dissesti di rotazione e traslazione, specifica attenzione merita il sistema di puntellature metalliche posto a ritegno del tratto di cinta adiacente la Torre della Regina, le cui condizioni di funzionamento ed esercizio non sono compiutamente note.

***Valutazioni specifiche su tensioni e deformazioni delle travature in acciaio e dei relativi plinti in calcestruzzo armato delle opere di ritegno risulta di grande interesse per comprendere la loro effettiva efficacia e utilità.***

Infine, si rappresenta che, rispetto agli esiti della campagna diagnostica e geognostica condotta nel periodo dicembre 2020 – aprile 2021, si ritengono qualificate in modo esaustivo le caratteristiche materico-costruttive e le condizioni di conservazione dei nuclei delle murature in elevazione, su cui sono state eseguite estese prove di carotaggio (da CC1 a CC14), analisi di laboratorio dei conglomerati (da LB1 a LB2) e ispezione video-endoscopiche dei fori (da END1 a END14). Tali indagini hanno, infatti, permesso di confermare in modo generalizzato una soluzione a corpo multiplo, con paramenti in laterizio di ridotto spessore e nuclei murari, formati da scheggioni di materiale lapideo informe e frammenti di mattoni in laterizio pieno e legati mediante malta di compattezza variabile. Tale soluzione varia, in aree più prossime alla Torre della Regina (CC12-CC13-CC14), per l'ulteriore presenza nel nucleo di pasta di cemento, ragionevolmente riconducibile a interventi di consolidamento.

In considerazione della situazione richiamata e a supporto della valutazione delle cause e della gravità di eventuali dissesti attivi, viene descritto, nel seguito, un **piano per la conduzione di monitoraggi e controlli**, da eseguirsi contestualmente e compatibilmente con i lavori di consolidamento e restauro a farsi, **in un arco di tempo complessivo di 12 mesi.**

Nello specifico, le macro-fasi di detto piano possono essere riferite a quattro aspetti distinti e complementari:

- Monitoraggio geotecnico per la valutazione di eventuali cedimenti delle strutture fondali (par. 2);
- Estensione dei saggi di fondazione a ulteriori aree della cinta muraria, per l'osservazione diretta e la caratterizzazione mineralogico-petrografica dei conglomerati costituenti le strutture fondali (per. 3);
- Monitoraggio degli spostamenti in corrispondenza dei principali quadri lesionativi delle strutture in elevato, al fine di verificare l'eventuale progressione nel tempo di fessurazioni e deformazioni attualmente riscontrabili (par. 4);
- Controllo delle puntellature metalliche di ritegno, posizionate in corrispondenza della porzione compresa fra la Torre della Regina e la Torre 1, nell'ottica di valutare stati tensionali agenti e deformazioni (par. 5).

Infine, a supporto delle attività di restituzione dei risultati ottenuti nel predetto piano, anche in relazione all'evoluzione delle concomitanti lavorazioni di restauro, si prevede:

- Elaborazione di fotopiani ad elevata risoluzione (almeno 5mm/pixel) per la documentazione ex-ante e ex-post dei lavori di restauro, da eseguirsi con tecniche di rilievo fotogrammetrico digitale terrestre/aereo;
- Documentazione delle fasi salienti della realizzazione delle opere mediante esecuzione di video timelapse nel corso dei lavori di restauro.

## 2. Monitoraggio geotecnico e topografico

Con particolare attenzione a eventuali cedimenti delle strutture fondali e a movimenti del versante, è utile prevedere un monitoraggio topografico sulle murature. Tale sistema deve essere necessariamente integrato da un sistema di monitoraggio geotecnico proprio per valutare la concomitanza di eventuali fenomeni di spostamento con cedimenti nei terreni di fondazione e/o fenomeni di instabilità di versante. Pertanto, è opportuno installare un sistema di monitoraggio geotecnico che, a titolo indicativo e non esaustivo, potrebbe consistere in:

- Monitoraggio topografico mediante installazione di prismi ottici per la valutazione di eventuali spostamenti plano-altimetrici;
- Monitoraggio topografico alla base della muratura mediante installazione di pilastrini con capisaldi topografici;
- Esecuzione di un sondaggio a carotaggio continuo con installazione di inclinometro in foro da ubicare a ridosso della muratura della Fortezza.

In base alle considerazioni precedenti e a beneficio della possibilità di rendere il sistema di monitoraggio pienamente efficiente per futuri utilizzi, si prevede di sviluppare il sistema come di seguito indicato.

### 2.1 Monitoraggio degli spostamenti

Le misure di spostamento in superficie saranno eseguite attraverso il rilievo topografico di precisione di mire topografiche installate in punti significativi dell'area di interesse; in particolare la rete di monitoraggio (Fig. 1) sarà così costituita:

- Realizzazione di 1 vertice sul lato opposto del versante per le misure con la stazione totale;
- Istituzione di 10 capisaldi altimetrici alla base del muro compresa fornitura accessori per la definizione planoaltimetrica con rilievo celerimetrico di precisione;
- Installazione di 10 micromire su muro;
- Rilievo con Stazione Totale

Di seguito si riporta in planimetria una possibile soluzione dei punti utili alla materializzazione della rete di monitoraggio topografico; il vertice dove verrà posizionata la stazione totale potrebbe essere ubicato in SP Appulo Sannitica, a una distanza inferiore a 700 m, che risulta di facile accesso e consente un'ottima intervisibilità dei capisaldi e delle micromire, che dovranno necessariamente essere ubicate ai piedi del muro di cinta gli uni e sulla parete gli altri.

La scelta del vertice rispetta le esigenze di:

- garantire la stabilità delle postazioni;
- contenere la distanza punto di monitoraggio-punto da misurare;
- acquisire misure ridondanti.



*Figura 1 Possibile ubicazione Rete di Monitoraggio*

Ai fini del monitoraggio topografico con stazione totale si utilizzeranno prismi (Fig. 2) con punto nodale circolari antiriflesso per portate fino a 3500m e precisione di centramento pari a 1mm montati su pilastri. In assenza di visibilità diretta, mediante poligonale o ulteriore lettura GPS statica.



*Figura 2 Prisma*

I punti posti sul versante oggetto di monitoraggio (rappresentati in rosso in Fig.1), andranno materializzati con pilastri in calcestruzzo armato stazionabili.

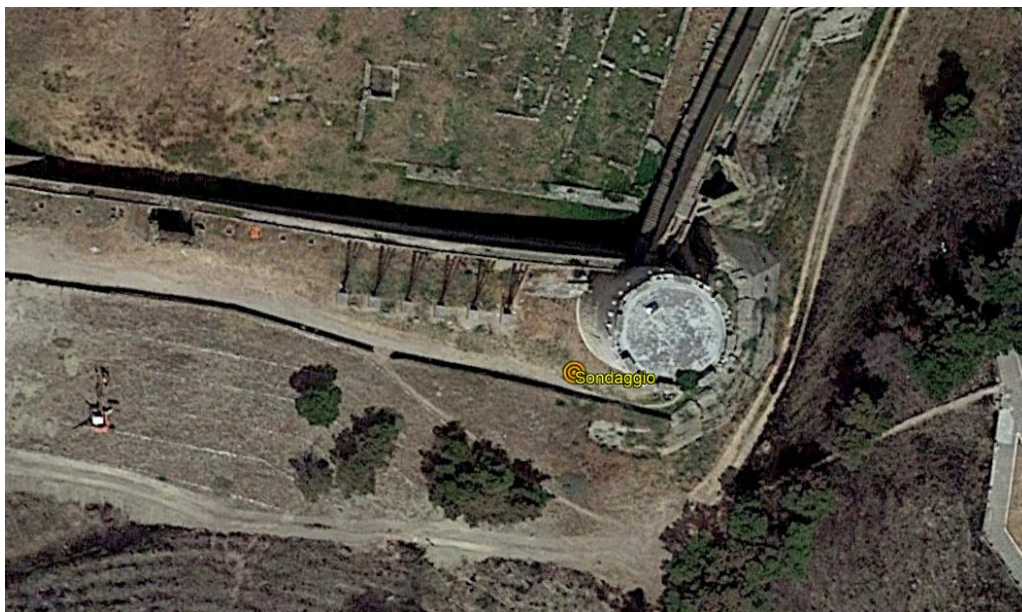
I pilastri in c.a. saranno dotati di target fotogrammetrici in modo da poter essere utilizzati a supporto di rilievi multitemporali, ad esempio con fotocamera da drone.

Ciascun pilastro stazionabile sarà dotato di **piastra a centramento forzato e tricuspidale**, da avvitare e bloccare sulla rispettiva piastra, su cui verranno di volta in volta agganciati la stazione totale o adattatore con prisma ottico. Ogni pilastro sarà dotato di copertura a salvaguardia del tricuspidale.

## 2.2 Misure inclinometriche

Il monitoraggio degli spostamenti profondi del terreno sarà eseguito attraverso misure inclinometriche manuali (4 letture annue). Queste consentiranno di valutare l'entità degli spostamenti del terreno al variare della profondità, individuando bande di taglio e zone di localizzazione della deformazione, quindi la profondità di potenziali superfici di scorrimento, la velocità degli spostamenti stessi e le direzioni preferenziali di movimento.

In linea generale, l'esecuzione del sondaggio verticale a 40 m di profondità sarà eseguita a rotazione a carotaggio continuo e sarà prevalentemente localizzata a ridosso della fondazione (Fig. 3).



*Figura 3: Possibile ubicazione sondaggio*

Le misure vengono eseguite utilizzando una strumentazione inclinometrica costituita essenzialmente da tre parti: la sonda inclinometrica, il cavo di collegamento e la centralina di lettura.

### SONDA INCLINOMETRICA

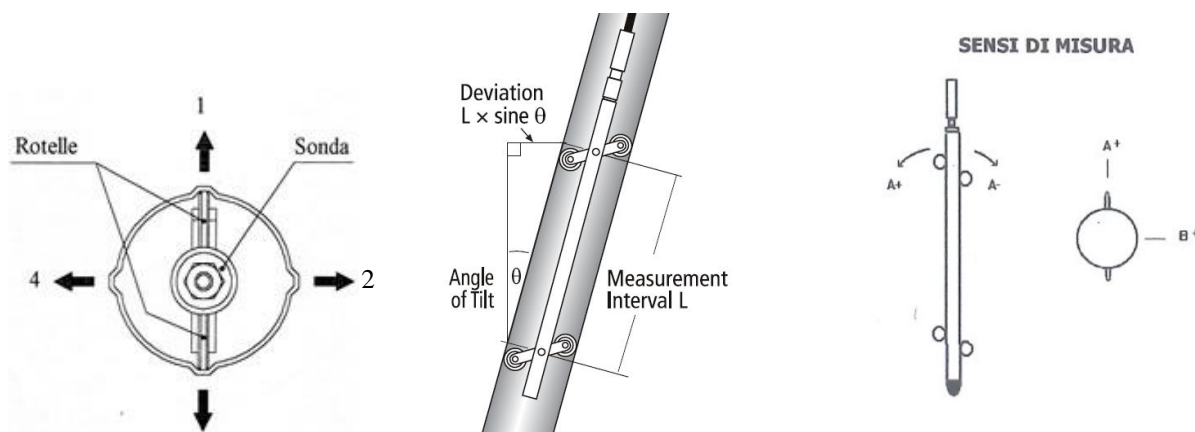
La sonda inclinometrica non misura direttamente lo spostamento ma misura l'inclinazione (pendenza) della tubazione. Lo spostamento viene calcolato in base alle variazioni dell'inclinazione nel tempo riferite alla Lettura di Zero ( $L_0$ ).

L'inclinazione della sonda viene misurata grazie a due servo-accelerometri a bilanciamento di forze. Un accelerometro misura l'inclinazione rispetto al piano stesso delle ruote dell'inclinometro (asse "X" oppure asse "A") mentre l'altro accelerometro misura l'inclinazione rispetto al piano verticale perpendicolare alle ruote (asse "Y" oppure asse "B").

Durante l'osservazione la sonda viene tirata verso l'alto, dal fondo del tubo sino alla sommità (lettura dal basso verso l'alto). La sonda viene bloccata ad intervalli regolari (ogni 50-100 cm) per eseguire le misurazioni dell'inclinazione.

I piani in cui giacciono le ruote, come detto, definiscono l'asse "X" mentre quello mutuamente ortogonale definisce l'asse "Y": il piano X-X (oppure A-A) è quello passante per le guide dispari G1-G3 mentre il piano Y-Y (oppure B-B) è quello passante per le guide pari G2-G4.

Le guide, coincidenti con le scanalature del tubo inclinometrico, sono posizionate come in Fig.4.



*Figura 4 Particolare del tubo e sonda inclinometrica con indicazione delle guide.  
 N.B. Si precisa che risulta duale riferirsi all'asse/piano (X-X oppure A-A) (Y-Y oppure B-B).*

La sonda inclinometrica (Fig. 5) è costituita da un corpo stagno in acciaio inossidabile, montato su due coppie di rotelle basculanti, contenente sensori servo-accelerometrici di elevata precisione (sensori servo-accelerometrici di derivazione Sheavitz). I sensori forniscono in uscita un segnale proporzionale all'angolo di deviazione dell'asse dello strumento rispetto alla verticale ideale passante per quel punto di misura.

Per eliminare gli errori di offset si passa una seconda volta la sonda attraverso il tubo. Nel secondo passaggio la sonda viene ruotata di 180 gradi (letture coniugate). Durante la restituzione ed elaborazione, i dati per 0 e 180 gradi devono essere combinati (media aritmetica) in modo opportuno e quindi considerati come un unico dato.



*Figura 5 Sonda inclinometrica SLOPE INDICATOR*

#### **CAVO DI COLLEGAMENTO**

Il cavo di collegamento/controllo ha lo scopo di misurare la profondità della sonda inclinometrica dal Piano di Riferimento (P.R.). Consente, inoltre, il passaggio di corrente per l'alimentazione e dei segnali elettrici tra la sonda e il dispositivo di lettura (centralina di acquisizione dati). Di lunga durata e di facile utilizzo, il cavo rimane flessibile anche a basse temperature e resiste agli agenti chimici e alle abrasioni. Un filo d'acciaio teso, insieme a leganti speciali, consente un'eccellente stabilità dimensionale.

Gli indicatori di profondità in gomma elastica sono vulcanizzati, in modo permanente, nella guaina del cavo stesso. Gli indicatori non si possono perdere e non possono scivolare lungo il cavo; inoltre gli indicatori non possiedono bordi rigidi che potrebbero danneggiare la guaina del cavo e i cavi elettrici.

I cavi di controllo metrici sono graduati con indicatori gialli a intervalli di 0.5 metri e con indicatori rossi a intervalli di 1 metro. Sono inoltre presenti indicatori numerici ad intervalli di 5 metri.

Per ottenere misurazioni inclinometriche accurate si colloca correttamente la sonda, allineando gli indicatori di profondità del cavo di controllo utilizzando sempre lo stesso riferimento: in genere il tecnico esecutore usa come riferimento per le misure l'estremità superiore del tubo o il bordo del chiusino di protezione. Per ottenere dati accurati è necessaria una precisione di 6 mm (1/4 di pollice) o meno in modo da consentire la ripetibilità della misura.

#### **CENTRALINA DI LETTURA (UNITÀ DI SUPERFICIE)**

Le letture delle inclinazioni rilevate dalla sonda sono eseguite per mezzo di una centralina portatile DATA-MATE della SLOPE INDICATOR (Figura 6) dotata di un display su cui vengono visualizzati le inclinazioni espresse in seno dell'angolo ( $\sin \alpha$ ), amplificate di un fattore pari a 25.000.

La centralina può registrare i dati mediante l'impulso fornito dal comando manuale dell'operatore.

Di seguito si riportano le caratteristiche della possibile strumentazione inclinometrica da utilizzare nel presente monitoraggio:

- Sonda servo-inclinometrica verticale DIGITILT della SLOPE INDICATOR, mod. 50302510, sensibilità 1/25000; due sensori servoaccelerometrici di derivazione Sheavitz.

- Cavo inclinometrico Slope Indicator, mod. 50601010, con armatura in acciaio armonico, guaina esterna in Neoprene e marche colorate, vulcanizzate ogni 50 cm, completo di connettore subacqueo, lato sonda e connettore LEMO per Datalogger. Versione da m. 50.
- Rullo avvolgitore in ABS per il trasporto di m. 100 di cavo inclinometrico.
- Centralina DIGITILT DATAMATE mod. 50310900, per la lettura e la registrazione dei dati inclinometrici, completa di batteria ricaricabile, caricabatteria da rete 220V c.a., comando a distanza, cavo seriale per PC e software di comunicazione, in ambiente Windows.

Ogni lettura è eseguita memorizzando i valori letti al display in digits della centralina nel momento in cui la sonda inclinometrica si trovava posizionata ad una profondità nota.

Le misure per la lettura di zero (L0) sono eseguite posizionando la sonda nelle quattro guide dei tubi (G1-G3 e G2-G4): la prima eseguita con la ruota di riferimento nella guida G1 mentre le successive nelle altre.

Di seguito si descrivono sinteticamente le fasi operative seguite per la gestione e l'elaborazione delle letture:

#### Memorizzazione dei dati

- Portare la sonda sino alla profondità di partenza (ULTIMA LETTURA UTILE) prossima al fondo foro. Attendere che i numeri sul dispositivo di lettura si stabilizzino. Se si utilizza il DataMate premere il pulsante per registrare le letture sia dell'asse X sia dell'asse Y.
- Sollevare la sonda sino alla successiva profondità secondo il passo di lettura prescelto. Attendere una lettura stabile e quindi registrarla. Ripetere questo processo sino a quando la sonda non raggiunge la sommità del tubo.
- Una volta arrivati in superficie, estrarre la sonda e ruotarla di 180 gradi. Questa volta le ruote superiori sono inserite nella scanalatura X180 (ovvero nella guida G3).
- Calare la sonda sino al fondo sollevarla sino alla profondità di partenza (ULTIMA LETTURA UTILE) e continuare l'osservazione. Effettuare le letture ad ogni profondità sino a quando non si raggiunge la sommità del tubo.
- Rimuovere la sonda.
- Lasciare la Postazione
- Raccogliere la sonda e il cavo. Rimettere i cappucci protettivi sul cavo e sulla sonda e riporre la sonda nella sua guaina protettiva. Rimettere i tappi protettivi dell'indicatore.
- Avvolgere il cavo. Rimuovere la puleggia, riporla nella sua posizione e quindi bloccare il suo cappuccio protettivo.

#### In Ufficio

- Raccogliere l'indicatore e ricaricare le sue batterie. Trasferire l'insieme dei dati su di un PC.
- Oliare le ruote della sonda. Se il magazzino in cui l'attrezzatura deve essere riposta è asciutto, rimuovere i cappucci protettivi dalla sonda, dall'indicatore e dal cavo di controllo e lasciar asciugare tutti i connettori.

L'esecuzione delle misure in tempi successivi (letture di esercizio), consentirà di ricavare la deformata nel tempo della tubazione rappresentativa dei movimenti del terreno circostanti la verticale inclinometrica.

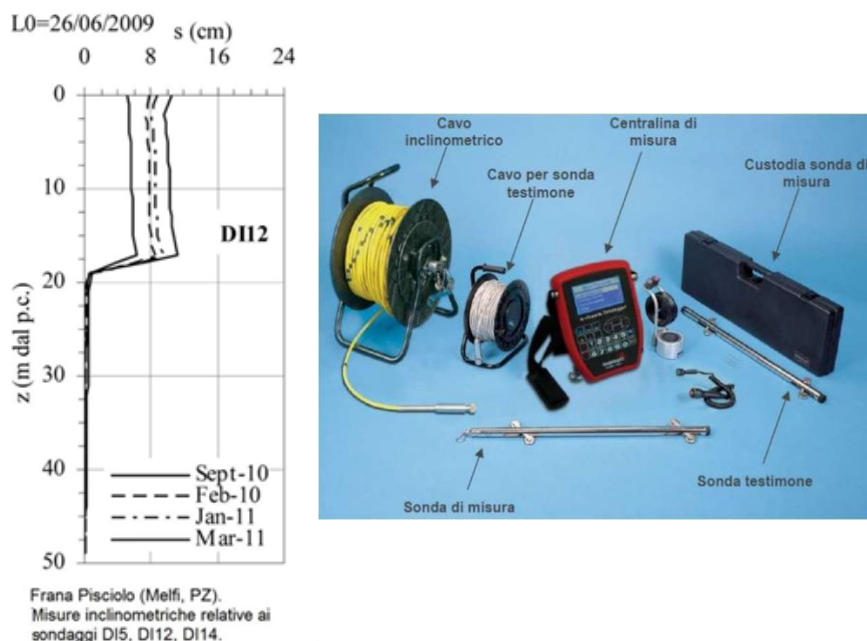
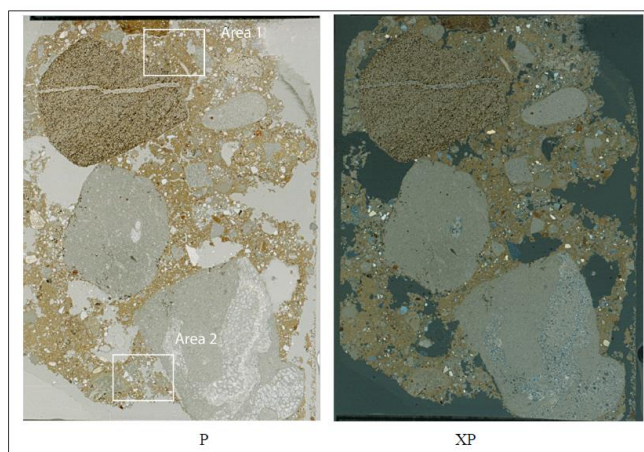
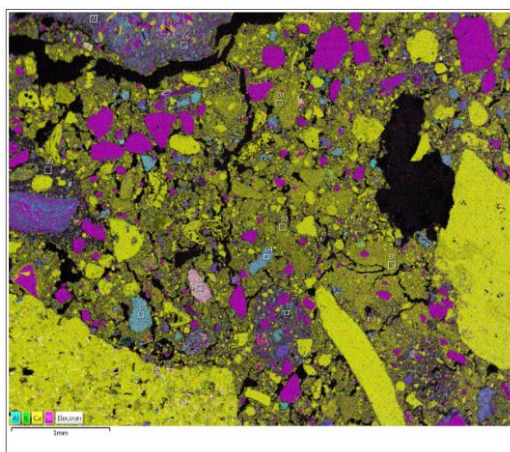


Figura 6 Esempio risultati misura inclinometrica e strumentazione inclinometrica standard

### 3. Caratterizzazione dei materiali da saggi in fondazione

Al fine di conseguire una valutazione complessiva delle soluzioni tecnico-costruttive adottate a livello fondale per la cinta muraria, su **n.6 aree di scavo** (da SC05 a SC10) di quelle previste da progetto, verranno eseguite osservazioni macroscopiche sulla morfologia e tipologia delle strutture e analisi di caratterizzazione mineralogico-petrografica delle malte e dei materiali lapidei, per accertarne la natura, provenienza e composizione. Per lo scopo, su **n.12 campioni** (da LB15 a LB26) di malte e/o lapideo dalle predette aree, verranno condotte: **preparazione di sezioni sottili** finalizzata ad individuare e caratterizzare i principali materiali costitutivi ed il relativo degrado mediante **analisi al microscopio ottico** e **osservazione al microscopio elettronico a scansione**, con **microanalisi (SEM-EDS)** e **diffrattometria a raggi X**, per la valutazione qualitativa e semi-quantitativa delle specie mineralogiche (Fig.7).





Punti analisi	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	Totale
1	0.5	0.8	3.1	12.4	0.0	0.0	0.0	0.7	80.8	0.0	1.7	100
2	0.0	0.8	2.2	10.4	0.0	0.0	0.2	0.6	83.9	0.5	1.5	100
3	0.3	0.9	2.8	10.5	0.0	0.0	0.2	0.6	82.8	0.0	2.0	100
4	2.6	0.0	18.4	64.9	0.0	0.0	0.0	13.6	0.5	0.0	0.0	100
5	0.5	0.0	17.9	64.4	0.0	0.0	0.0	16.9	0.3	0.0	0.0	100
6	1.6	2.4	15.4	57.0	0.0	0.0	0.0	4.6	12.4	0.5	6.1	100
7	0.9	2.9	13.7	55.5	0.7	0.4	0.1	4.6	15.6	0.5	5.0	100
8	0.5	7.3	9.5	43.8	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0	1.8	13.1	100
9	1.9	2.0	12.9	52.0	0.0	0.4	0.7	3.0	21.0	0.6	5.5	100
10	0.6	2.4	13.9	54.4	3.0	0.0	0.2	3.7	16.3	0.5	5.0	100

Figura 7. Esempio di analisi al microscopio elettronico per la valutazione qualitativa e semi-quantitativa delle specie mineralogiche  
[Fonte: Risultati indagini 2020-2021]

#### 4. Monitoraggio dei quadri lesionativi

Il monitoraggio delle fessurazioni e delle deformazioni sarà condotto, rispettivamente mediante trasduttori di spostamento e inclinometri.

I trasduttori di spostamento saranno configurati secondo un modulo base composto da n.4 sensori con doppio nodo sferico e intervallo di misura da 200 mm (tipo BeanAir DISP-SENS-BJ-MS-200MM-CL-1M) e da n.1 sensore di temperatura (tipo BeanAir BND-2.4GHZ-ONE-T-ST). Si prevede l'installazione di **n.2 moduli** (SP1-SP2), per un totale di **n. 8 trasduttori di spostamento** e n. **2 sensori di temperatura**, nei tratti intermedi di muratura fra torre adiacenti, in corrispondenza rispettivamente di un'area con e un'area senza evidenza di quadri fessurativi.

Per ogni modulo, i trasduttori saranno collegati, attraverso opportuno cavo schermato, ad una unità di acquisizione dati, dotata di n.4 ingressi in tensione ( $\pm 5V$ ), integrata con data logger di archiviazione interna dei dati e alimentata da una batteria interna ricaricabile con possibilità di alimentazione esterna (Fig.8).

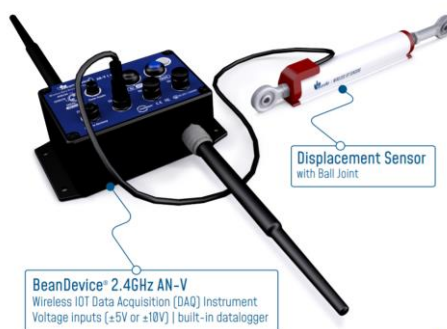


Figura 8. Esempio di trasduttore di spostamento wireless [Fonte: <https://www.beanair.com/displacement-sensors-compatible-with-beandevic-an-v.html>]

Per le misure di inclinazione, si prevede l'installazione di **n.6 inclinometri** biassiali wireless  $\pm 15^\circ$  con risoluzione di  $0,001^\circ$  (tipo BeanAir BND-2.4GHZ-HI-INC-15B-XR-RB-SCM) in prossimità delle creste di coronamento (da ICL1 a ICL6), sia su tratti di cinta che sulle torri. Ciascun inclinometro, alimentato da una batteria interna ricaricabile con possibilità di alimentazione esterna, integra con data logger integrato capace di archiviazione interna dei dati.

Tutti i dati di spostamento, temperatura e inclinazione sono trasmessi in modalità wireless ad un gateway per esterni (IP66) con protocolli wireless a 2,4 GHz e 3G / 4G / LTE, dedicato alla gestione della rete di sensori wireless e alla comunicazione remota con il software per il controllo e la supervisione del monitoraggio (Fig. 9). Il gateway, con possibilità di alimentazione esterna, sarà collegato ad un pannello solare e dotato di batteria tampone ricaricabile interna.

Tutte le misure predette saranno rilevate con **periodicità di reportistica trimestrale e frequenza di rilevamento di 12 ore** nella durata complessiva di 12 mesi per compensare eventuali oscillazioni cicliche legate a escursioni termiche stagionali.

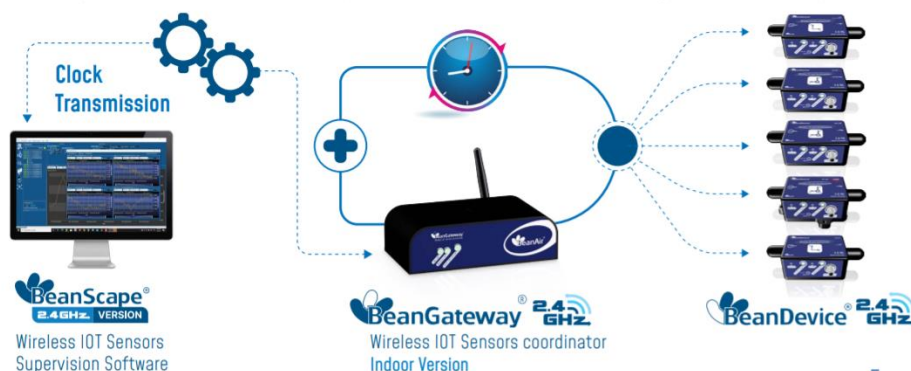


Figura 9. Esempio di infrastrutturazione di inclinometri wireless [Fonte: <http://www.wireless-iot-sensors.beanair.com/files/Datasheet-wireless-inclinometer-BeanDevice-HI-INC.pdf>]

Il predetto monitoraggio, verrà, altresì, integrato con un ulteriore metodo di tipo più sperimentale, caratterizzato da un approccio di non-contatto mediante fotogrammetria digitale, che appare particolarmente utile anche nell’ottica della verifica non invasiva nel lungo termine di deformazioni e/o fessurazioni.

Tale metodo si basa sulle seguenti fasi, da ripetersi per **n.2 sessioni**, all’inizio e alla fine dei 12 mesi:

- **Acquisizioni fotografiche**, effettuate in, mediante fotocamere di lunghezza focale adeguata e velivoli aerei a pilotaggio remoto, secondo criteri funzionali alla ricostruzione di modelli tridimensionali virtuali: posizione parallela all’oggetto di ripresa, distanza di ripresa entro 5m dall’oggetto della scansione, percentuali di sovrapposizione intorno all’80% tra immagini consecutive e intorno al 60% tra linee adiacenti.
- **Ricostruzione di modelli fotogrammetrici 2D o 3D**, mediante restituzione di modelli fotorealistici, attraverso ricostruzioni fotogrammetriche bi o tri-dimensionali (nuvole di punti, mesh poligonali testurizzate, ortofoto) ad elevato livello di dettaglio e risoluzione (intesa come la dimensione reale di un elemento descritto da un singolo pixel) pari almeno a 0.5 mm/pixel, mediante software di ricostruzione fotogrammetrica (tipo Agisoft Metashape®).
- **Elaborazione dei modelli fotogrammetrici a fini di monitoraggio**, attraverso:
  - Comparazione diretta e analisi di deviazione dei modelli fotogrammetrici (Fig. 10) acquisiti nelle n.2 sessioni, al fine di rilevare e quantificare la progressione dei quadri patologici, mediante algoritmi come “iterative closest point” e “nearest neighbour distance”, utilizzati su software di editing e analisi di nuvole di punti o mediante operazioni di soglia e di filtraggio su software di calcolo.
  - Comparazione analitica di sezioni trasversali, estratte in aree significative per la comprensione dell’evoluzione dei fenomeni patologici rilevati, mediante software di editing e analisi di nuvole di punti e software di calcolo.

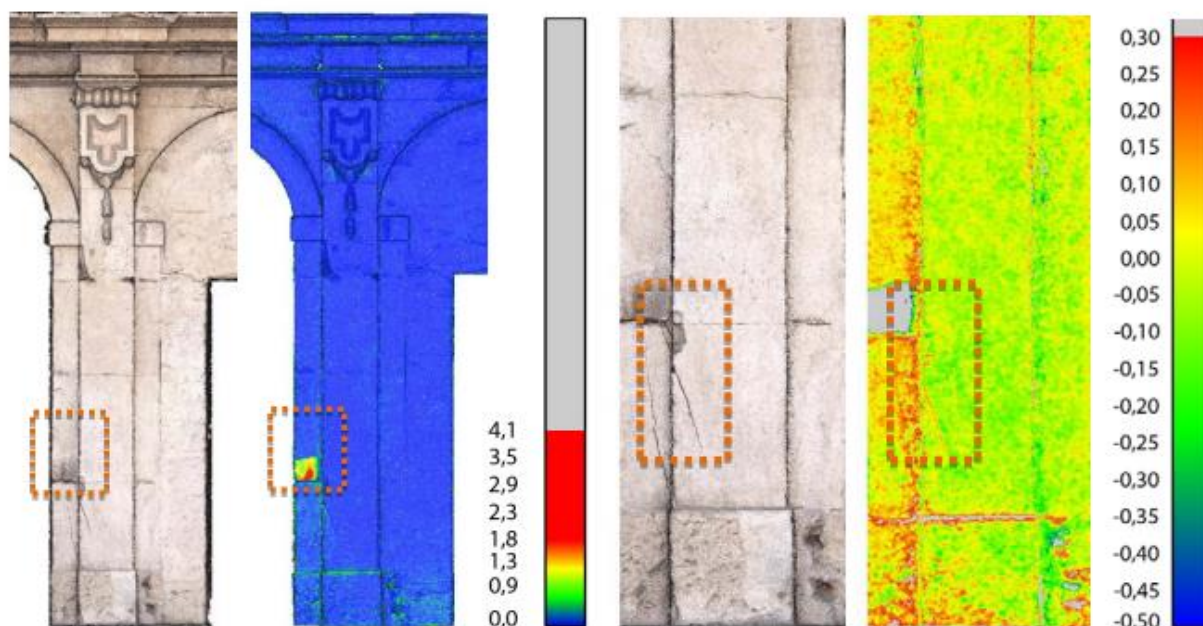


Figura 10. Esempio di comparazione diretta e analisi di deviazione di modelli fotogrammetrici [Fonte: De Fino M., Galantucci R.A., Fatiguso F., (2020), Remote diagnosis and control of heritage architecture by photorealistic digital environments and models, SCientific RESearch and Information Technology, Vol 9, Issue 2, e-ISSN 2239-4303]

L'attenzione verrà focalizzata su **n.2 aree** (MF1-MF2) con livello di dettaglio diverso. La prima area, corrispondente alla soluzione di continuità fra la Torre della Regina e l'adiacente tratto di cinta, verrà indagata con risoluzione pari almeno a 5 mm/pixel, corrispondenti a distanza di ripresa pari a circa 5 m dall'oggetto della scansione e lenti a lunghezza focale dai 16 ai 20 mm, per rilevare la progressione degli spostamenti. La seconda, riferita a un quadro fessurativo notevole, verrà rilevata con risoluzione pari almeno a 0.5 mm/pixel, corrispondenti a distanza di ripresa compresa in un range da 1-3 m dall'oggetto della scansione e lenti a lunghezza focale dai 20 ai 50 mm, per apprezzare variazioni millimetriche delle lesioni.

## 5. Controllo delle opere provvisori

Al fine di verificare le modalità di funzionamento delle puntellature metalliche di ritegno, posizionate in corrispondenza della porzione compresa fra la Torre della Regina e la Torre 1, si propone l'esecuzione di **n.3 prove di rilascio tensionale** (RT1-RT2-RT3), da eseguirsi in **n.1 sessione**, all'inizio dei 12 mesi, per la stima delle tensioni di esercizio agenti sui plinti in c.a. alla base. Tale misura potrebbe essere utilizzata per la calibrazione di modellazione teoriche del comportamento strutturale delle opere provvisori, al fine di determinare le effettive condizioni di carico, nonché per la valutazione comparativa della eventuale diversa risposta sperimentale degli elementi modulari di cui è composta la struttura metallica per effetto di sollecitazioni non uniformemente distribuite.

La prova prevede, previa applicazione sulla superficie dell'area di interesse di una coppia di estensimetri, l'isolamento di una porzione dell'elemento strutturale mediante quattro tagli prodotti sui lati di un quadrato esterno alla porzione occupata dagli estensimetri. I tagli sono eseguiti con una direzione di 45° verso l'interno

in modo da realizzare un elemento troncopiramidale con una sezione di testa estremamente ridotta, tale da garantire il completo rilascio delle deformazioni incorporate. La deformazione ( $\epsilon$ ) subita dalla porzione isolata, misurata dagli estensimetri posizionati tra i tagli, è assunta uguale in segno contrario alla deformazione relativa derivante dalle sollecitazioni agenti ( $\sigma$ ). Dalla deformazione può, quindi, essere calcolata la tensione di esercizio, noto il modulo elastico. Quest'ultimo è determinabile analiticamente, previa misura sperimentale della resistenza meccanica, mediante prova di compressione assiale di provino cilindrico prelevato in altro punto dell'elemento.

Inoltre, al fine di valutare eventuali progressioni nel tempo dello stato deformativo sulle puntellature metalliche, si prevede l'installazione di **n.3 moduli di misura** (EP1-EP2-EP3), ciascuno costituito da n.3 estensimetri per acciaio, di n.1 sensore di temperatura, per un totale di **n.9 estensimetri e n.1 sensore di temperatura**.

Per ogni modulo, gli estensimetri saranno collegati, attraverso opportuno cavo schermato, ad una unità di acquisizione dati (tipo BeanAir BND-2.4GHZ-ANMV-4CH), dotata di n.3 ingressi in tensione (+/-20mV), integrata con data logger di archiviazione interna dei dati e alimentata da una batteria interna ricaricabile con possibilità di alimentazione esterna. Tutti i dati sono trasmessi in modalità wireless al gateway per esterni di cui al par. 3, dedicato alla gestione della rete di sensori wireless e alla comunicazione remota con il software per il controllo e la supervisione del monitoraggio.

Per la specifica applicazione, le misure dovranno essere rilevate, con **periodicità di reportistica trimestrale e frequenza di rilevamento di 12 ore** per la durata complessiva dei 12 mesi per compensare eventuali oscillazioni cicliche legate a escursioni termiche stagionali.

## **6. Attività, voci di capitolato e di computi**

Ai fini di una più chiara lettura e correlazione dei contenuti della presente relazione con quanto riportato negli elaborati grafici PCM1-PCM2-PCM3, recanti la localizzazione delle prove già eseguite e da eseguirsi, computo metrico-estimativo CME/2021/64/V00 e capitolato speciale CSA/2021/64/V00, si riporta di seguito schema sintetico riepilogativo.

<b>INDAGINI DIAGNOSTICHE STRUTTURE IN ELEVATO</b>					
<b>Attività</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Relazione tecnica PCM</b>	<b>Computo CME</b>	<b>Capitolato CSA</b>	<b>Tavole PCM</b>
Elaborazione di fotopiani ad elevata risoluzione	Documentazione ex-ante e ex-post dei lavori di restauro, da eseguirsi con tecniche di rilievo fotogrammetrico digitale terrestre/aereo	Par.1 [pag.4]	Par.2 N. Ord. 4	P.to 1)	Generalizzato
Esecuzione video in timelapse	Documentazione delle fasi salienti della realizzazione delle opere nel corso dei lavori di restauro.	Par.1 [pag.4]	Par.2 N. Ord. 6	P.to 2) [pag. 3]	Generalizzato
Caratterizzazione dei materiali da saggi in fondazione	Esecuzioni di analisi mineralogico-petrografiche su n.12 campioni da prelevare in alcune delle arre di scavo già previste dal progetto	Par.3 [pag.11-12]	Par.2 N. Ord. 1-2-3	P.ti 5)-6)-7) [pag. 4]	PCM2: LB17-18-19-20 PCM3: LB15-16-21-22-23-24-25-26 (n.12 punti di prelievo)
Monitoraggio quadri lesionativi con trasduttori di spostamento	Acquisizione di misure mediante: n.2 moduli (unità wireless) ciascuno composto da n.4 trasduttori di spostamento (totale n.8 sensori) + n.2 sensori di temperatura (unità wireless)	Par. 4 [pag. 13]	Par.2 N.Ord. 7 (n.8 sensori)  N.Ord. 9 (n.4 unità wireless x 12 mesi =48 mesi)  N.Ord. 8-10-11 (gateway in comune con tutti gli altri sensori/unità)  N.Ord. 12 (acquisizione in comune con tutti gli altri sensori/unità)  N.Ord. 17 (assistenza in comune con tutti gli altri sensori/unità)	P.ti 8)-9) [pag. 4]	PCM3: SP1-2 (n.2 aree di indagine con n.4 trasduttori + n.1 sensore di temperatura ciascuna)
Monitoraggio quadri lesionativi con inclinometri	Acquisizione di misure con: n.6 inclinometri (unità wireless)	Par. 4 [pag.13]	Par.2 N.Ord. 9 (n.6 unità wireless x 12 mesi =72 mesi)  N.Ord. 8-10-11 (gateway in comune con tutti gli altri sensori/unità)	P.to 10 [pag. 4]	PCM2: ICL1-2-3-4 PCM3: ICL 5-6 (n.6 aree di indagine con n.1 inclinometro ciascuna)

			N.Ord. 12 (acquisizione in comune con tutti gli altri sensori/unità)  N.Ord. 17 (assistenza in comune con tutti gli altri sensori/unità)		
Monitoraggio quadri lesionativi con tecniche fotogrammetriche	Comparazione nuvole di punti fotogrammetriche in n.2 aree per n.2 rilevamenti	Par. 4 [pag. 14-15]	Par.2 N.Ord.5	P.ti 11-12-13-14-15 [pag. 5]	PCM2: MF1 PCM3: MF2 (n.2 aree di indagine per n.2 rilevamenti nel tempo ciascuna)
Prove di rilascio tensionale su plinti in c.a.	Esecuzione di misure in n.3 elementi	Par.5 [pag.15-16]	Par.2 N.Ord.13	P.to 16 [pag. 6]	PCM2: RT1-2-3
Monitoraggio deformazioni puntellature metalliche	Acquisizione di misure mediante: n.3 moduli (unità wireless) ciascuno composto da n.3 estensimetri (totale n.9 estensimetri) + n.3 sensori di temperatura (unità wireless)	Par.5 [pag.16]	Par.2  N.Ord. 9 (n.6 unità wireless x 12 mesi =72 mesi)  N.Ord.15-16 (n.9 estensimetri)  N.Ord.16 (n.9 estensimetri x 10m di cavi =90m)  N.Ord. 8-10-11 (gateway in comune con tutti gli altri sensori)  N.Ord. 12 (acquisizione in comune con tutti gli altri sensori/unità)  N.Ord. 17 (assistenza in comune con tutti gli altri sensori/unità)	P.to 17-18 [pag. 6]	PCM2: EP1-2-3 (n.3 aree di indagine con n.3 basette + n.1 sensore temperatura ciascuna)
<i>Fornitura sensori e trasduttori oltre i 12 mesi</i>	<i>Fornitura n.16 unità wireless (n.2 moduli trasduttori di spostamento + n. 6 inclinometri + n. 5 sensori di temperatura + n.3 moduli basi estensimetriche)</i>		<i>Par.4 N.Ord 1-2</i>		

**Monitoraggio Geotecnico**

	QUANTITA'	TIPOLOGIA	PROFONDITA'		PREZZARIO	note	Computo CME	Capitolato CSA	Tavole PCM
Sondaggio meccanico	1	sondaggio a carotaggio continuo	da m 0 a m 20 dal p.c.	20m	IG.001.007.a: listino Regione Puglia 2019		N.ord.4	P.to 4	PCM1
			da m 20 a m 40 dal p.c.	20m	IG.001.007.b: listino Regione Puglia 2019		N.ord.5		
Inclinometro	1	strumentazione installata nel foro	da m 0 a m 80 dal p.c.	40m	IG.001.030.a: listino Regione Puglia 2019	allestimento	N.ord.8	P.to 4	
					IG.001.030.b: listino Regione Puglia 2019	installazione	N.ord.9		
Cassette catalogatrici	8	cassetta di dimensioni 1x0.5x1 m idonea alla conservazione di 5 m di carotaggio			IG.001.023: listino Regione Puglia 2019		N.ord.7		
Pozzetto di protezione	1	pozzetto di dimensioni 40x40x40 cm di protezione della			IG.001.033: listino Regione Puglia 2019		N.ord.11		

**Monitoraggio Topografico**

	TIPOLOGIA	QUANTITA'	PREZZARIO	Note	Computo CME	Tavole PCM	Capitolato CSA
Istituzione di Capiisaldi Topografici a terra	Pilastrini	11	A02.037.010: listino opere pubbliche Regione Emilia-Romagna 2019	in cls armato, 10 capisaldi + 1 vertice	N.ord.16	PCM1	P.to 3
	Prisma circolare di precisione	2	NP05	Verranno spostati tra i pilastrini al momento della lettura	N.ord.18		
	Basamento	10	NP06		N.ord.19		
	Portaprisma	10	NP07		N.ord.20		
	Piastra con filettatura fissa da 5/8"	10	NP08		N.ord.21		
Punti di misura su parete	Micromire	10	NP09	da installare sulla parete muraria	N.ord.22	PCM2/PCM3	P.to 3