

APPROCCI INNOVATIVI NELLE INDAGINI SULLO STATO E SUL COMPORTAMENTO DELLE FONDAZIONI ESISTENTI

di Giulia Colla e Silvia Della Torre

RELAZIONE RIASSUNTIVA

1. INTRODUZIONE

Il tema del recupero e della conservazione del patrimonio storico architettonico e, più in generale, di qualunque costruzione edilizia rappresenta un argomento di grande attualità nella moderna ingegneria civile. L'intervento di riabilitazione ha come obiettivo quello di garantire la sicurezza, preservando, oltre che il bene materiale, il suo funzionamento strutturale. All'interno di questo processo, un ruolo fondamentale è rivestito dalla campagna di indagini diagnostiche, eseguite al fine di ottenere informazioni indispensabili per la definizione dello stato di fatto della struttura e la formulazione di un eventuale intervento.

Attualmente sono disponibili numerose tecniche di indagine che trovano diverse applicazioni nell'ambito delle strutture in elevazione. Tuttavia, l'analisi delle opere di fondazione non pare aver ricevuto pari livello di attenzione: nella definizione di un progetto che riguardi il recupero, il cambio di destinazione d'uso o l'adeguamento sismico di un fabbricato esistente, infatti, le fondazioni ed il terreno, che con esse interagisce, sono spesso posti in secondo piano o trascurati. Tra i principali motivi che giustificano questo atteggiamento vanno certamente menzionati la oggettiva difficoltà che si riscontra nello studiare strutture parzialmente o totalmente interrato, le condizioni di accessibilità, i problemi al contorno e la notevole estensione degli elementi stessi, specialmente nel caso dei pali di fondazione.

Gli argomenti trattati nell'elaborato non riguardano tanto la caratterizzazione meccanica dei materiali da costruzione utilizzati, quanto piuttosto l'individuazione

delle caratteristiche geometriche, delle dimensioni e dell'integrità delle fondazioni esistenti per mezzo di differenti approcci.

Fino a pochi decenni fa, le indagini geognostiche e sulle fondazioni si svolgevano esclusivamente mediante sondaggi esplorativi, carotaggi, prove in sito di vario genere (prove penetrometriche, di permeabilità, etc.) e prove di laboratorio condotte sui provini ottenuti durante la perforazione. I suddetti metodi forniscono informazioni puntuali e dirette circa gli elementi sotto esame, la loro composizione e la successione stratigrafica; essi consentono inoltre di ottenere provini rimaneggiati o indisturbati, utili per definire le proprietà meccaniche dei materiali da costruzione. Al contempo, tali approcci hanno lo svantaggio di offrire un'immagine solo puntuale e localizzata dell'opera e del suo stato di consistenza, e nulla possono dire sul comportamento dell'elemento strutturale rispetto alle mutate condizioni al contorno o di esercizio della struttura in elevazione.

Il recente avanzamento tecnologico ha consentito di sviluppare e rendere disponibili nuove tecniche di indagine, integrative rispetto a quelle tradizionali, in grado di fornire informazioni di tipo globale ed esteso sulle opere esistenti e sul terreno con esse interagente: i metodi geofisici.

Le prospezioni geofisiche sono basate sulla misura delle variazioni temporali e/o spaziali di determinate grandezze fisiche rilevabili in superficie in seguito all'applicazione di una perturbazione al terreno (un impulso meccanico o elettrico). L'acquisizione e la successiva analisi dei segnali e delle misure raccolte consentono di ricostruire la natura, le dimensioni e la profondità dei mezzi indagati, quindi la caratterizzazione stratigrafica e meccanica del sottosuolo.

Il successo di questi metodi è giustificato da alcuni considerevoli vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali, in quanto tali prove:

- sono poco o per nulla invasive;
- permettono una rapida caratterizzazione di vaste estensioni di terreno;
- consentono di stimare valori medi e non puntuali, riferibili a volumi rappresentativi;
- possono essere eseguite in modalità attiva (la perturbazione viene generata artificialmente) o passiva (vengono captati e analizzati segnali già naturalmente presenti nel terreno);
- sono piuttosto economiche;

- sono ormai supportate da solide basi teoriche e godono dell'esistenza in letteratura di un'ampia base di validazione sperimentale.

Per contro, tali approcci hanno il grande limite di essere indiretti, ovvero di consentire la determinazione delle proprietà desiderate solo in seguito all'interpretazione di parametri ad esse correlati.

In campo geotecnico, le prove di indagine geofisica più utilizzate possono essere suddivise in due grandi classi: i metodi sismici e quelli elettromagnetici. Si tratta di un insieme numeroso di tecniche, ognuna delle quali presenta un certo numero di pregi e difetti, quindi, di vantaggi e svantaggi rispetto alle altre. Diventa perciò necessario individuare, di volta in volta, a seconda delle caratteristiche dell'area, delle finalità da indagare e dei parametri che si intendono determinare il metodo (o i metodi) di ricerca più adatto ad ogni determinato contesto.

2. ORGANIZZAZIONE DELLA TESI

La tesi, avente come obiettivo quello di fornire una panoramica ampia e dettagliata delle metodologie geofisiche, illustrandone l'applicabilità, le potenzialità ed i limiti, è suddivisa in due sezioni, che corrispondono sostanzialmente a due fasi distinte dello studio.

Una prima parte, frutto di un'attività di ricerca e di approfondimento delle conoscenze bibliografiche oggi disponibili, offre uno scenario il più possibile completo delle tecniche di indagine geofisica. In quest'ambito, gli sforzi sono stati concentrati soprattutto sugli sviluppi più recenti ed innovativi di tali approcci che, come noto, sono in continua evoluzione.

In particolare, nel Capitolo 2 "I metodi sismici" vengono trattati i metodi geognostici di tipo sismico, ossia la classe di indagini geofisiche che si basa sulla caratterizzazione del terreno in seguito alla propagazione di una semplice perturbazione meccanica e che, ad oggi, è quella di maggiore rilievo nelle applicazioni di geotecnica. Le prove di tipo sismico possono essere suddivise in due categorie: tecniche intrusive o misure sismiche in foro (come la prova Cross-Hole, la prova Down-Hole, la prova Suspension P-S Velocity Logging Method, la prova con il cono o con il dilatometro sismico) la cui esecuzione richiede la predisposizione nel terreno di uno o più fori di sondaggio e tecniche non intrusive o misure sismiche

superficiali (come le prove di riflessione e di rifrazione ed i metodi basati sulle onde sismiche di superficie, tra cui la prova SASW, la prova MASW, la tecnica multicanale f-k, la tecnica CSW e la tecnica NASW), che vengono effettuate in corrispondenza del piano campagna.

Il Capitolo 3 “I metodi elettromagnetici” è dedicato all'altra categoria di indagini geofisiche di grande rilevanza in ambito geotecnico. Tra questi, sono inclusi i metodi geoelettrici, ossia quelle tecniche che consentono di ricostruire, a partire da misure effettuate in termini di resistività apparente in seguito all'immissione nel terreno di una corrente elettrica, una tomografia elettrica, ovvero una sezione della distribuzione delle resistività reali del sottosuolo, che sono funzione della tipologia di terreni, della porosità, del grado di saturazione e del contenuto ionico dei fluidi presenti. Un altro metodo elettromagnetico ampiamente utilizzato nelle campagne geognostiche al fine di ricavare informazioni riguardo alla struttura e alla composizione del sottosuolo è il georadar, anch'esso basato sulla propagazione e la riflessione di impulsi elettromagnetici nel terreno.

Nel Capitolo 4 “Le prove su fondazioni profonde”, viene posta l'attenzione sui metodi di indagine che riguardano i pali di fondazione. Dopo una breve sezione riguardante le più tradizionali tecniche diagnostiche su pali (come la prova di progetto e la prova di collaudo), vengono illustrate alcune tra le metodologie geofisiche esposte nei due capitoli precedenti, in questo caso mirate alla determinazione della capacità portante o dell'integrità di tali strutture. Tra le principali, si ricordano la prova Cross-Hole, il carotaggio sonico, la tomografia sonica, le prove vibrazionali (prova ecometrica e prova di ammettenza meccanica) e le prove ad alto livello di deformazione (primo tra tutti, il metodo CASE).

La seconda parte della tesi si compone di una raccolta di alcuni casi di studio riguardanti l'accertamento dello stato di fatto e l'esame del comportamento delle opere di fondazione di strutture esistenti mediante l'applicazione di alcune delle tecniche di indagine più diffuse. Si ritiene, infatti, che gli approcci precedentemente illustrati meritino un'ulteriore analisi che, attraverso la lettura

critica di recenti campagne geognostiche, ne risalti non solo i punti di forza, ma anche le debolezze, talvolta ancora poco note.

3. SINTESI DEI CASI TRATTATI

3.1. Il primo caso, trattato nel Capitolo 5 "Indagini geotecniche per l'analisi delle condizioni statiche di Ca' Foscari e Ca' Giustinian" riguarda le indagini geognostiche svoltesi all'interno del progetto di risanamento e riutilizzo di Ca' Foscari e Ca' Giustinian a Venezia, oggi sede dell'Università degli Studi.

I due edifici hanno cominciato a manifestare segni di dissesto nel 1994, con l'osservazione di un preoccupante stato fessurativo sulle murature e fenomeni di deformazione della pavimentazione a pianterreno. I provvedimenti adottati sono consistiti nella realizzazione immediata di opere di tirantatura su Ca' Foscari e nell'esecuzione di una campagna di indagini sperimentali.

Le indagini geognostiche, volte alla caratterizzazione del terreno e del sistema di fondazione dei due palazzi, sono state condotte esclusivamente per mezzo di tecniche tradizionali. Nel dettaglio, sono stati eseguiti sondaggi, talvolta abbinati ad ispezioni con sonda, pozzetti esplorativi, prove penetrometriche e prove di laboratorio sui campioni prelevati durante le perforazioni.

La campagna svolta ha permesso di ottenere informazioni sia riguardo al terreno, sia riguardo alle fondazioni esistenti. Per quanto riguarda la stratigrafia del sottosuolo, è stato rilevato il tipico profilo della laguna veneziana in cui, però, il "caranto", ovvero lo strato di limo argilloso, molto resistente, su cui poggia la maggior parte degli edifici della città, era solo parzialmente presente. Le fondazioni erano costituite da una muratura o dei conci di pietra poggianti su un doppio tavolato in legno, a sua volta sostenuto da una palificata, anch'essa lignea. L'infissione di pali in legno nel terreno, ricorrente nell'architettura veneziana, era frequentemente praticata al fine di compattare il suolo e superare gli strati superficiali con scarsa capacità portante, arrivando, ove possibile, allo strato di "caranto". Dalle indagini è stato rilevato, però, che, nel caso di Ca' Foscari e Ca' Giustinian, il piano di imposta delle fondazioni interne era situato ad una quota superiore (compresa tra -0,5 e -1,2 m s.l.m.) a quella delle fondazioni perimetrali (tra -2,2 e -2,3 m). Di conseguenza, i pali di fondazione affacciati sul Canal Grande e sul

Rio Ca' Foscari attraversavano interamente lo strato superficiale, scarsamente addensato, per poi intestarsi in uno strato sabbioso e resistente. Al contrario, i pali in corrispondenza dei muri di spina non raggiungevano il secondo strato e rimanevano "flottanti" nell'argilla.

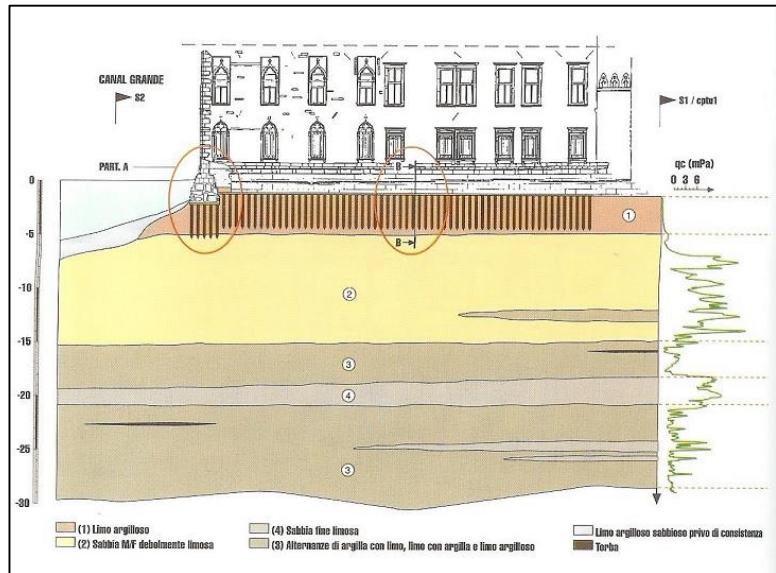
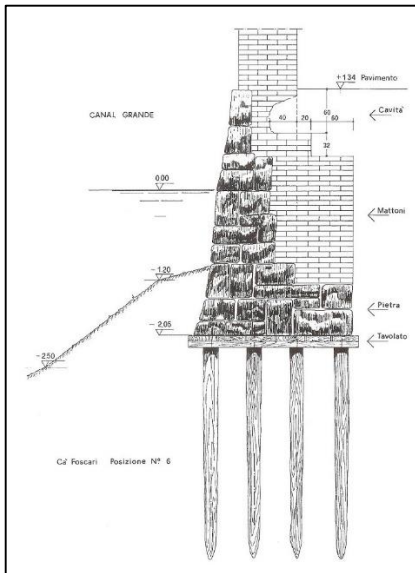


Figura 1. Fondazioni dei muri interni di spina (Colleselli, 1997)

Figura 2. Sezione stratigrafica e tipologie fondazionali (La Barbera et al., 1997)

Un secondo problema, emerso grazie agli scavi di ispezione, ai rilievi ed alle riprese televisive, era legato allo stato di conservazione delle fondazioni, sia superficiali che profonde, in corrispondenza del Canal Grande, soggette all'azione di erosione e scalzamento da parte del moto ondoso. Lo stato di degrado era inoltre incrementato dalla presenza di tubazioni, cunicoli interrati e scarichi in canale, che provocavano un continuo dilavamento delle murature e l'asporto di materiale.

L'indagine svolta a Venezia pone in primo piano la validità, la forte attualità dei metodi tradizionali e, in particolar modo, la loro applicabilità in un ambiente dove l'applicazione di un metodo geofisico non era possibile: la presenza dell'acqua salata avrebbe infatti compromesso i risultati di un approccio elettromagnetico e la limitata accessibilità del sito avrebbe impedito l'utilizzo di tecniche geofisiche sismiche.

3.2. Nel Capitolo 6 "Indagini geotecniche per l'analisi delle condizioni statiche del campanile del Torcello a Venezia", anch'esso ambientato nella città lagunare, viene ricostruita la storia del Campanile della Basilica del Torcello che, fin dai tempi

della sua costruzione, è stato oggetto di un gran numero di studi e di interventi di riabilitazione strutturale.

Le indagini geognostiche, avviate nel 2010 in seguito ad un segnalato rischio di crollo della torre campanaria, sono state precedute da un'importante lavoro di ricerca storico-archivistica, volto al fine di individuarne le fasi di realizzazione e di restauro e le caratteristiche tecnico-costruttive. In vista di un ipotetico intervento di ripristino, si riteneva infatti necessario evidenziare, proprio attraverso l'analisi delle numerose fonti archivistiche a disposizione, gli elementi utili per definire un approccio il più possibile conservativo e fedele al manufatto architettonico.

I documenti esaminati, per la maggior parte risalenti ai lavori di ristrutturazione eseguiti tra il 1902 e il 1906, hanno consentito la caratterizzazione del sistema di fondazione del campanile.

Le strutture di fondazione superficiale sono costituite da un basamento lapideo di 3,12 m, con una sporgenza relativamente piccola rispetto all'alzato fuori terra. Anticamente, al centro della fondazione, era presente, fino alla profondità di 2,5 m rispetto al piano campagna, un pozzo di forma quadrata, che è stato saturato con un getto di calcestruzzo proprio durante i lavori del 1903. Al di sotto del masso fondale è impostata la sottofondazione, composta da pali lignei di modeste dimensioni (in genere compresi tra 80 e 150 cm) e unita da uno zatterone in doppio tavolato ligneo, avente l'ulteriore funzione di fornire l'appoggio per la muratura soprastante.

L'indagine storica ha permesso, grazie alla ricca documentazione disponibile, di ipotizzare le principali cause del degrado - seppur limitato - del basamento del campanile, sostanzialmente dovuto all'azione degli agenti atmosferici sul materiale lapideo (arenaria) di per sé piuttosto carente a livello statico.

La campagna geognostica del 2010 è stata condotta con il principale scopo di individuare le caratteristiche geologiche dell'area di interesse e geotecniche dei terreni ivi presenti. A tal fine, sono stati svolti 3 sondaggi, di cui uno inclinato di 26° per intercettare i pali di fondazione, 3 prove penetrometriche dinamiche e due prove penetrometriche statiche con annesso test per la rilevazione delle pressioni neutre. Il materiale estratto è stato campionato nelle apposite cassette catalogatrici.

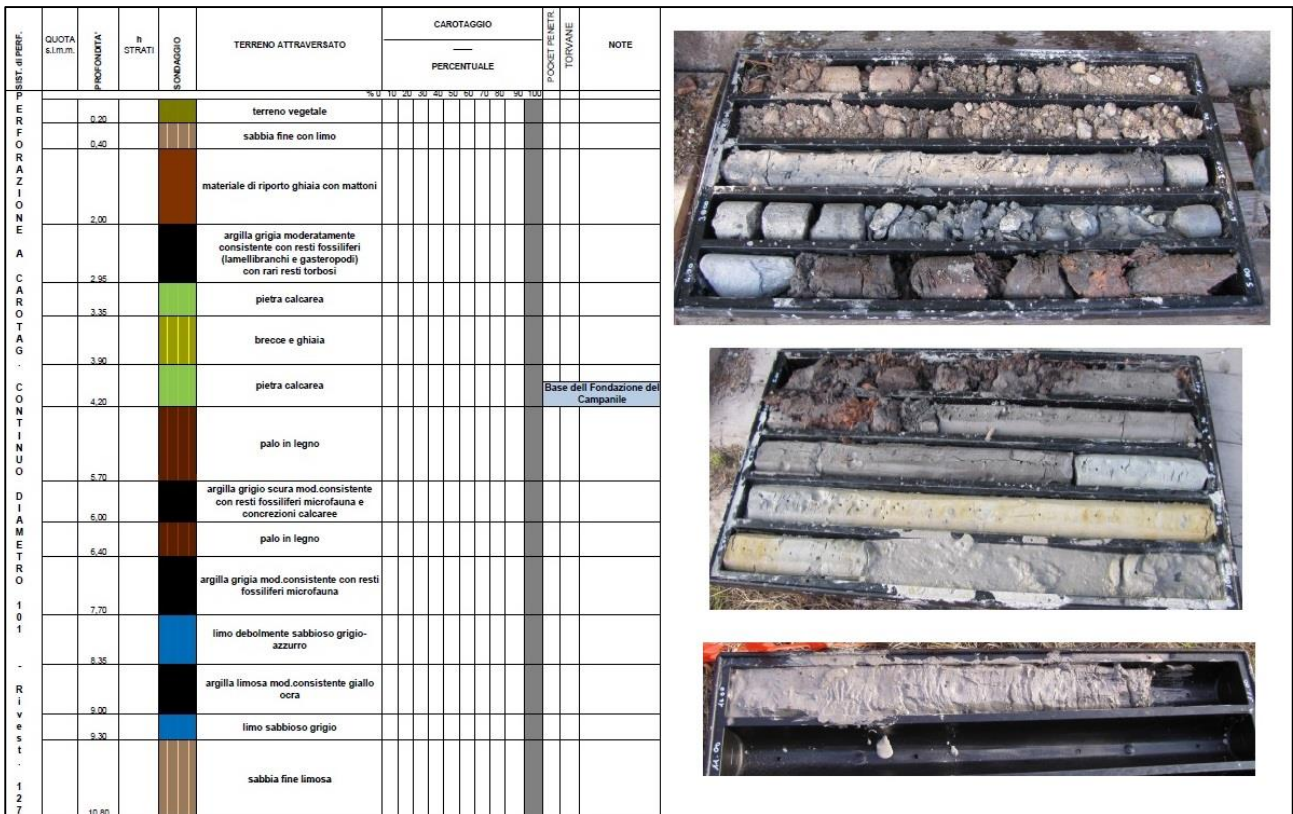


Figura 3. Sondaggio 1: Sezione stratigrafica e documentazione fotografica (Pierobon, 2010)

Le perforazioni eseguite hanno permesso la caratterizzazione del sottosuolo, sostanzialmente costituito tre orizzonti litologici, tra loro ripetutamente alternati e privi di una vera e propria soluzione di continuità, caratterizzati da un basso grado di addensamento e un alto contenuto d'acqua. I sondaggi hanno inoltre fornito preziose informazioni sulla struttura e sullo stato di conservazione delle fondazioni del campanile, confermando i risultati della precedente indagine archivistica ed evidenziando l'ottimo stato di conservazione dei pali. È stato, quindi, appurato che i problemi statici della torre campanaria non erano dovuti al degrado delle fondazioni, bensì ai preoccupanti ammaloramenti delle strutture in elevazione.

3.3. Nel corso del Capitolo 7 "La prospezione georadar sulle fondazioni dell'ex Caserma Garibaldi di Varese" viene illustrata una diretta applicazione del metodo georadar per l'individuazione di cavità nel terreno di fondazione dell'ex Caserma Garibaldi di Varese.

L'edificio, ancora oggi in stato di degrado, ha iniziato a manifestare gravi segni di dissesto nel 1992, in seguito alla costruzione di un garage interrato nell'attigua Piazza

della Repubblica. I lavori, preceduti da una campagna di indagini tradizionali per rilevare la stratigrafia del terreno, sono stati avviati nel 1990. Già nel 1992, sono state rilevate le prime lesioni in facciata, seguite da alcuni crolli e dissesti sempre più allarmanti. Tra i diversi provvedimenti, nel 2014 è stato intrapreso un intervento di tirantatura e sottomurazione che si opponesse al movimento rotazionale della facciata dell'edificio. Il 24 aprile, però, il gruppo di operai addetto alla sottomurazione ha rinvenuto una voragine di circa 10 m² sotto le fondazioni della caserma e la fognatura comunale per le acque chiare: la preoccupante scoperta ha portato all'immediata sospensione dei lavori e alla programmazione di una nuova indagine per analizzare ed approfondire la situazione.

La campagna geognostica, condotta al fine di individuare tutte le anomalie riconducibili alla presenza di cavità, è stata svolta, come anticipato, tramite l'applicazione della metodologia geofisica del georadar. A causa della natura litologica del terreno e delle numerose interferenze generate dall'attività antropica, è stato scelto di adottare due antenne con frequenza differente: un'antenna da 400 MHz, in grado di ottenere un maggior dettaglio superficiale, e una da 200 MHz capace di investigare a profondità più elevate. Complessivamente, sono state eseguite 47 sezioni georadar, con l'impostazione dei parametri di acquisizione e del fondoscala tale da ottenere il massimo dettaglio nei primi metri di sottosuolo dal piano campagna.

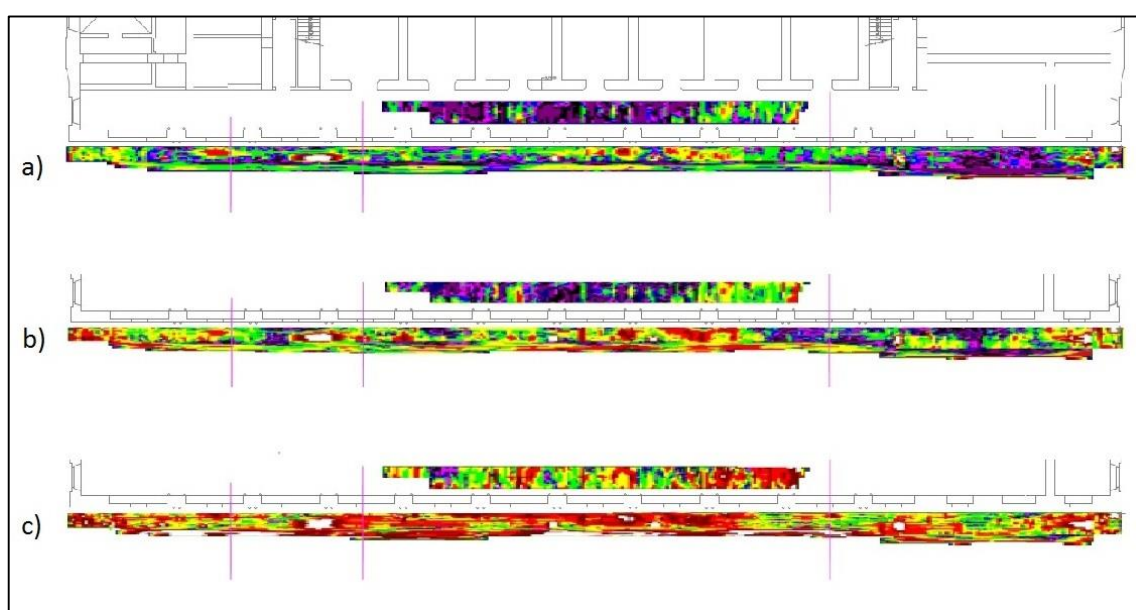


Figura 4. Mappa della riflettività georadar alla profondità di a) 150 cm; b) 200 cm; c) 250 cm (CIS Geofisica, 2015)

Alla fase di acquisizione, è seguita una complessa procedura di elaborazione ed interpretazione delle mappe di riflettività acquisite. Le anomalie georadar individuate durante la prospezione erano infatti riconducibili sia alla presenza di possibili cavità, sia di elementi antropici, come tombini, griglie metalliche e armature.

Al fine di investigare con maggiore dettaglio le aree di anomalia rilevate dal georadar, nel giugno del 2015 è stata attuata una fase di verifica diretta tramite l'esecuzione di otto carotaggi, prove penetrometriche dinamiche e campionamento del materiale. I campioni prelevati hanno accertato la presenza di importanti vuoti in quei punti dove l'indagine georadar aveva riscontrato le anomalie. Le cavità di maggiore rilevanza sono state riscontrate tra la fondazione della facciata e il diaframma di conterminazione del garage interrato, in concomitanza di uno strato di terreno superficiale incoerente.



Figura 5. Materiale prelevato durante I sondaggi (Colleselli, 2015)

L'esempio di Varese dimostra, quindi, la piena validità della prospezione georadar come metodo di indagine preliminare, in grado di eseguire un'analisi del sottosuolo o di una struttura esistente in modo rapido, non intrusivo ed economico. Al contempo, va però ricordato che le informazioni fornite da questa tecnica geognostica sono indirette, quindi non pienamente affidabili, e comportano la necessità di una fase di verifica con dati di taratura ricavati da esperienze precedenti.

3.4. L'utilizzo del georadar è riproposto nel Capitolo 8 "La ricerca della palificata sotto la Cattedrale di Santo Stefano Protomartire", inerente all'indagine di ricerca

di pali di fondazione sottostanti la Cattedrale di Concordia Sagittaria, in provincia di Venezia.

La campagna geognostica, che ha avuto luogo nel mese di novembre 2002, è stata qui eseguita per un duplice scopo: l'identificazione e lo studio della geometria delle armature nelle strutture di sostegno (plinti e solette) e la verifica di un'eventuale palificata al di sotto delle fondazioni dell'edificio. La prospezione è stata effettuata non secondo la sua usuale modalità, bensì in modo innovativo: l'antenna, infatti, anziché essere mossa in superficie, è stata calata all'interno di cinque perforazioni appositamente rivestite con una tubazione in PVC, ubicate sul perimetro esterno del lato sud-ovest del complesso religioso e spinte fino a 6 metri di profondità dal piano campagna. Terminata la fase di perforazione, dal centro di ogni foro è stato tracciato in superficie un reticolo circolare di riferimento $0^\circ - 360^\circ$ per il controllo dell'orientamento dell'antenna durante la calata e la rotazione.

Per raggiungere gli obiettivi prefissati, è stato necessario utilizzare due modalità d'acquisizione con geometrie completamente diverse: rotazione d'antenna da foro a frequenza medio-bassa (100 MHz) con cono di trasmissione prossimo a 90° , in grado di visionare il terreno in estensione piuttosto che nel dettaglio e avanzamento d'antenna ad altissima frequenza, molto direttiva, per ottenere un'elevata definizione spaziale e un maggiore dettaglio.

La prima modalità ha previsto l'inserimento dell'antenna all'interno di una batteria di tubi, che è stata calata fino a fondo foro e da qui fatta progressivamente risalire in superficie. Ad ogni passo di 50 cm, l'antenna ha compiuto una rotazione completa da 0° a 360° con lo scopo di irraggiare i possibili pali e rilevarne le riflessioni ad una distanza dal centro di perforazione compresa tra 3,5 e 5 metri. Non è stato possibile aumentare la distanza di penetrazione del segnale iperbolico a causa dell'assorbimento da parte della componente argillosa del terreno.

La seconda modalità ha invece richiesto l'acquisizione di un reticolo di dati a spaziatura centimetrica ad altissima frequenza, resa possibile anche dal fatto che l'elemento strutturale attraversato era costituito da calcestruzzo asciutto, in cui le onde viaggiavano con velocità sostenute e bassa attenuazione.

In totale, sono stati realizzati 61 profili GPR, con la completa copertura delle strutture indagate.

La fase di interpretazione dei risultati ottenuti dalla prova è stata piuttosto semplice per i fori 1, 2 e 3, poiché il cono di propagazione dell'onda ha subito, in questi tre casi, un solo evidente fenomeno di riflessione, imputabile alla presenza di un palo. Per i fori 4 e 5, invece, la situazione si è rivelata più complessa, dal momento che numerosi disturbi hanno interessato i segnali in arrivo all'antenna ricevente, provocando riflessioni puntuali in più direzioni e rendendo difficoltosa l'elaborazione dei dati di acquisizione. Il confronto tra gli echi qui registrati con le riflessioni riscontrate nei casi precedenti ha comunque consentito l'individuazione di pali o plinti.

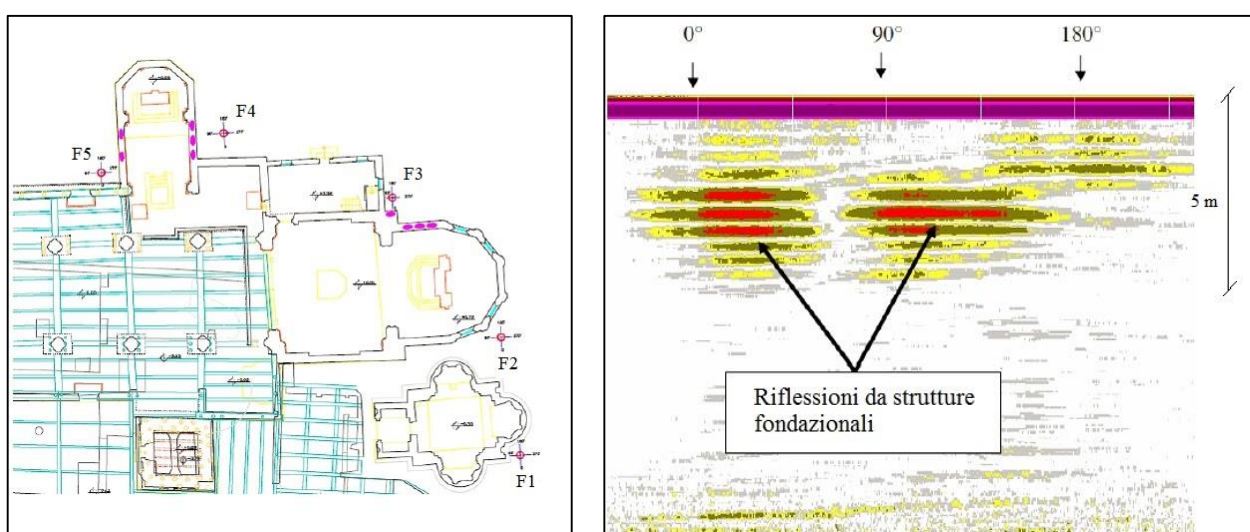


Figura 6. Ubicazione dei fori d'indagine GPR (Eurekos, 2002)

Figura 7. Foro 4: profilo GPR eseguito in rotazione a 3 metri di profondità (Eurekos, 2002)

Nonostante le difficoltà riscontrate, quindi, la prospezione georadar in foro si è rivelata efficace, in quanto ha condotto al raggiungimento di entrambi gli obiettivi. Inoltre, il buono stato di conservazione del complesso religioso testimoniato dalle indagini ha permesso il suo inserimento nell'itinerario di sviluppo locale "Giralemene", potenziandone il valore turistico.

3.5. Nel Capitolo 9 "Indagine sullo stato di consistenza delle fondazioni del Palazzo della Loggia" si approfondisce il particolare lavoro di indagine e riqualificazione svolto sul Palazzo della Loggia di Brescia. L'edificio è infatti stato - e continua ad essere - oggetto di studio non solo per i consueti motivi legati alla conservazione del simbolo d'identità della città lombarda, ma anche in virtù del controllo e del

monitoraggio dei segni di degrado che si sono manifestati sin dal tempo della sua costruzione.

I problemi statici di maggior rilievo, che hanno spinto, nel 1989, alla realizzazione di una prima campagna di indagini, erano prevalentemente associati al degrado della copertura lignea a carena e all'inclinazione delle pareti perimetrali.

Per quanto riguarda le sole indagini geotecniche, sono state eseguite 7 perforazioni, spinte ad una profondità di 35 m, grazie alle quali è stato possibile desumere sia la stratigrafia del sottosuolo che la geometria e la quota di posa delle fondazioni dell'edificio. Parallelamente ai sondaggi è stata condotta una ricerca storico-archivistica dalla quale sono emerse alcune informazioni di rilevante importanza. Innanzitutto, è stato scoperto che, al di sotto delle fondazioni del palazzo, fino al 1939 scorreva il fiume Garza; inoltre, è stata testimoniata la presenza di una palificata di circa 1600 pali di castagno, aventi una lunghezza di 2 m e un diametro di 10 cm. Per determinare lo stato di conservazione di tale palificata, la cui presenza non era stata appurata dalle precedenti perforazioni, è stato deciso di avviare un'ulteriore campagna geognostica.

L'indagine per la caratterizzazione dei pali di fondazione della Loggia è stata intrapresa nel 1998, in seguito allo studio di una metodologia investigativa ad-hoc, basata su tecniche tradizionali – al fine di ottenere risultati diretti - applicate in modo innovativo. La fase di pianificazione si era rivelata particolarmente complessa, dal momento che il campo dell'indagine era ubicato al di sotto di un palazzo storico, quindi difficilmente accessibile sia mediante tecniche tradizionali “classiche” che con approcci geofisici.

Inizialmente, sono stati realizzati due pozzi, di dimensione in pianta pari a circa 2,0 m x 1,5 m per 6 m di profondità, ubicati agli angoli sud-est e nord-ovest dell'edificio, in modo da non interferire con le reti tecnologiche e con gli scantinati. Fino alla base della fondazione, lo scavo è stato effettuato mediante mezzi meccanici e sostenuto su tre lati da pareti provvisorie in calcestruzzo armato. La muratura indagata è risultata regolare, con malta in buono stato di conservazione per tutto lo spessore della fondazione.

Attraverso uno scavo ulteriore di pianta 50 cm x 50 cm per 1 m di profondità, eseguito manualmente al di sotto della fondazione superficiale, è stato possibile

scoprire alcune cavità, presumibilmente lasciate dai pali di fondazione, di circa 10 cm di diametro e 75 cm di lunghezza. Una volta riempito lo scavo con ghiaia e malta per non perturbare la capacità portante del pilone, sono stati realizzati in successione altri pozzetti, per verificare il passo dei pali e la presenza di ulteriori vuoti. Ultimate le analisi, ciascun pozzetto è stato riempito di sabbia e coperto con una soletta in cemento armato removibile, per consentire riutilizzi futuri.

In seguito, sono stati realizzati due ulteriori pozzi, di profondità pari a 3 m, al di sotto del porticato della Loggia, proprio in corrispondenza della galleria sotterranea che testimonia il passaggio del Garza. Da qui, sono state quindi avviate alcune perforazioni orizzontali ed il successivo inserimento di una sonda televisiva.

Dalle ispezioni, è emerso che non vi era più alcuna traccia della palificata menzionata nei documenti storici, se non le cavità da essa lasciate, aventi diametro compreso tra 10 e 13 cm, lunghezze variabili tra 70 e 80 cm e interasse di 25 cm.

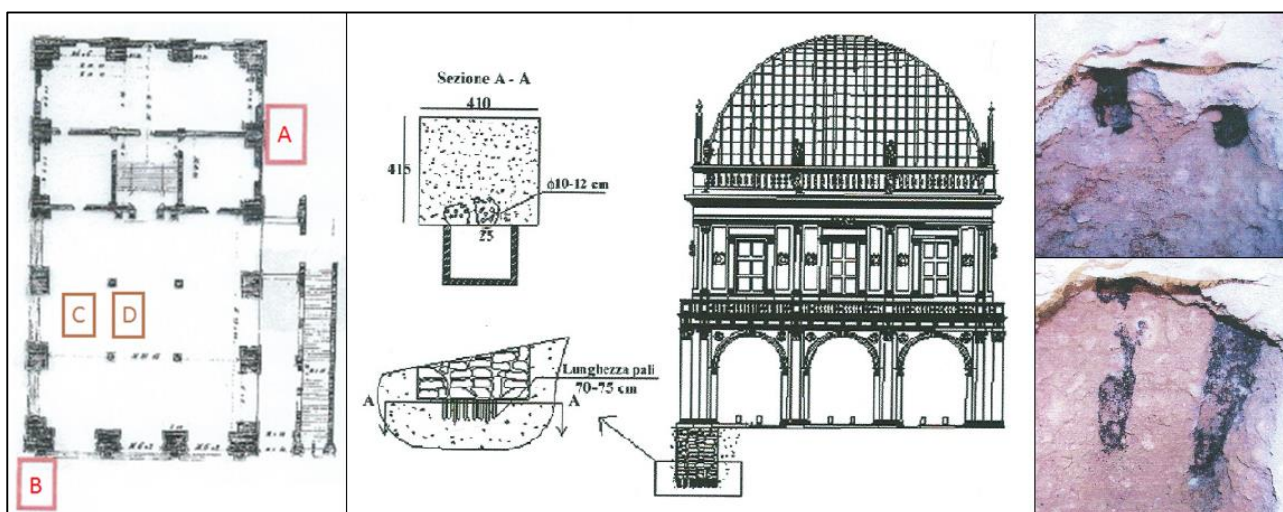


Figura 8. Ubicazione dei quattro scavi e rilievo dei vuoti della palificata nel pilone sud-est (Giuriani, 1999)

Per questo motivo, si è ritenuto inderogabile lo studio di un intervento rapido e mirato per il consolidamento delle fondazioni. Il progetto, ideato all'interno dell'Università degli Studi di Brescia, è stato basato sulla tecnica della microperforazione, che prevede il riempimento dei vuoti e degli interstizi tramite l'inserimento a passo fitto di una miscela di compattamento attraverso piccoli tubi di iniezione a bassa pressione. L'intervento è stato simulato con successo nei laboratori dell'Università nel luglio del 2000, ma la sua esecuzione al di sotto delle fondazioni del Palazzo della Loggia ha dovuto aspettare ben quattro anni, a causa

della mancanza di fondi. I lavori di consolidamento sono stati infatti avviati solo nel 2004, in occasione degli scavi per la linea metropolitana, che avrebbe comportato vibrazioni ed importanti cedimenti agli edifici vicini all'asse del tunnel sia in fase di costruzione che in fase di esercizio della linea.

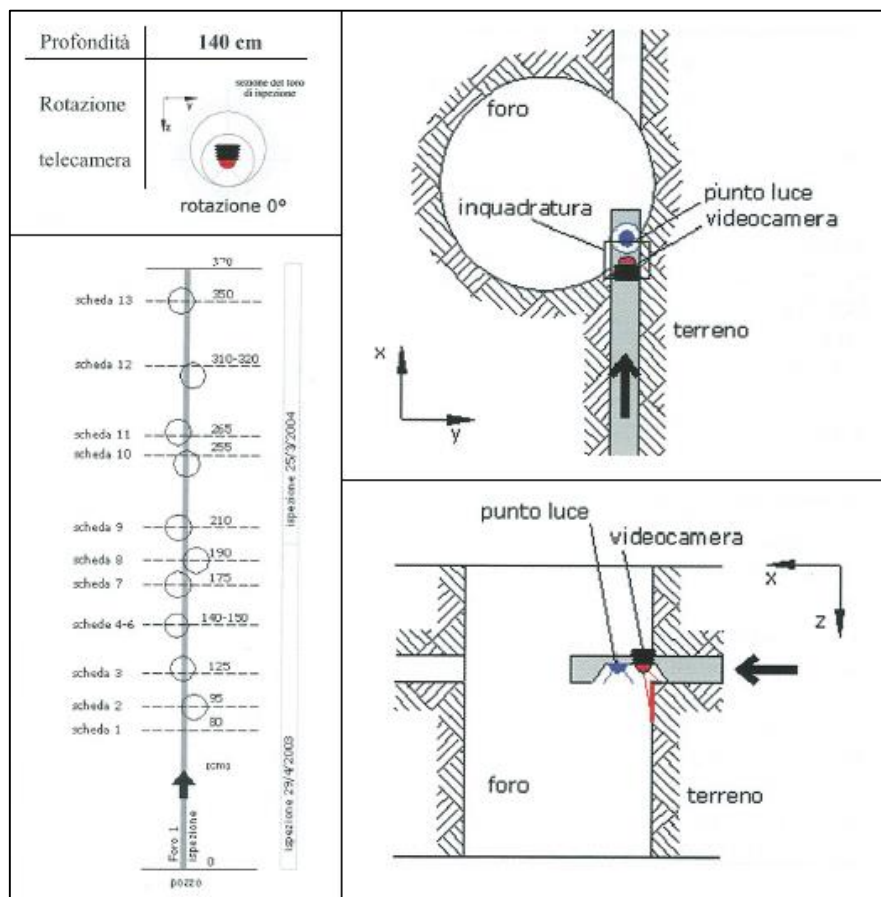


Figura 9. Applicazione della prova in sito: rilievo delle cavità con fotocamera (Bellini, 2007)

L'efficacia dell'intervento attuato è stata confermata dal sistema di monitoraggio posizionato sul perimetro del palazzo e nelle sue immediate vicinanze, che ha misurato cedimenti assai contenuti e limitati all'immediato intorno dell'infrastruttura.

3.6. Il Capitolo 10 "Le prospezioni geofisiche nell'area del parcheggio interrato di Piazzale Europa a Ponte di Legno", che descrive la campagna di indagini svolte sull'area compresa tra il cantiere del parcheggio interrato di Piazzale Europa e il fabbricato del condominio PDL a Ponte di Legno, in provincia di Brescia, è sicuramente l'esempio più significativo di integrazione tra metodi diretti ed indiretti. I lavori volti alla realizzazione del nuovo parcheggio sono stati articolati in due fasi costruttive distinte, intervallate da un programma di indagini per la caratterizzazione

geotecnica dei terreni interagenti con gli edifici limitrofi. Inizialmente, tra il 2007 e il 2009, è stata eseguita un'opera di sostegno degli scavi lungo il perimetro del parcheggio (confinante col condominio PDL) tramite una paratia costituita da pannelli di diaframma in calcestruzzo armato di lato 2,5 m, ognuno dei quali supportato da un tirante di ancoraggio. Successivamente, tra il dicembre 2009 e l'anno successivo, è stata realizzata internamente al piano scavo una seconda paratia di pannelli di diaframma in c.a. di lato 2,5 e 2,8 m supportati da un sistema di tiranti di ancoraggio.

Le indagini, condotte nell'ottobre del 2008, hanno comportato l'esecuzione sia di prove in sito (sei sondaggi a carotaggio continuo, numerose prove penetrometriche dinamiche, prove di consistenza, prove di permeabilità ed installazione di piezometri per il monitoraggio della falda) che di prove di laboratorio su campioni indisturbati e rimaneggiati provenienti dai depositi.

I sondaggi e le prove eseguite hanno consentito la determinazione della stratigrafia del terreno, sostanzialmente formata da quattro strati di natura differente (a partire da piano campagna, il primo ed il terzo strato di tipo incoerente; il secondo ed il quarto di tipo coesivo), e l'individuazione di due falde acquifere, una superficiale ed una profonda in pressione.

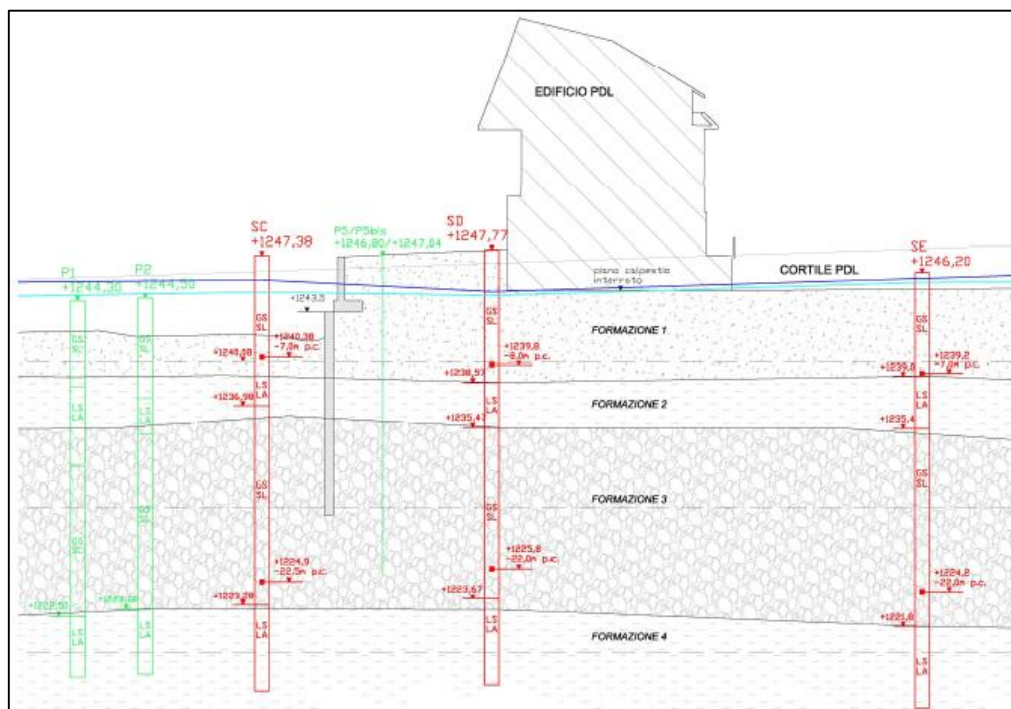


Figura 10. Esempio di sezione stratigrafica con rilevazione del regime idrogeologico (Colleselli, 2008)

Avendo, però, la costruzione del parcheggio interrato comportato una significativa alterazione delle condizioni del terreno al contorno dello scavo, nell'aprile del 2015 si sono manifestati alcuni fenomeni di sprofondamento del terreno di fondazione. L'episodio ha interessato una superficie piuttosto modesta (di circa 1 m x 1 m in pianta), localizzata nella porzione est dell'area compresa tra il cantiere del parcheggio e il condominio PDL, ma ha indotto a ritenere che il fenomeno potesse estendersi a tutta la fascia di terreno compresa tra il cantiere e gli edifici confinanti a sud.

È stata, quindi, avviata una nuova indagine, con lo scopo di verificare la presenza di eventuali cavità, alla base dei fenomeni di sprofondamento, e di volumi di terreno con scarso grado di addensamento. Viste le dimensioni dell'area di indagine - estesa per 20 m in larghezza e 100 metri in lunghezza - è stato deciso di adottare degli approcci geofisici. Nel dettaglio, sono state messe in atto due diverse metodologie di indagine: metodo sismico MASW 2D, con l'obiettivo di ricavare il profilo di rigidità del terreno a partire dalla sezione di distribuzione delle velocità delle onde di taglio V_s , a sua volta dedotta dall'analisi di frequenza delle onde superficiali e metodo geoelettrico multielettrodo, in grado di determinare le caratteristiche litostratigrafiche e idrogeologiche del terreno attraverso la rilevazione della resistività elettrica del sottosuolo. Nel primo caso, sono state effettuate tre sezioni MASW2D per una lunghezza compresa tra i 50 e i 70 m. Dal trascinarsi del "land streamer" (un array di 24 geofoni a bassa frequenza) si sono ottenute le curve di dispersione (velocità onde di Rayleigh - frequenza) e da queste, tramite un sistema di inversione attuato da processi automatici e iterativi, le sezioni desiderate e le mappe 2D. Per quanto riguarda invece il metodo elettromagnetico, sono state eseguite due sezioni geoelettriche: disponendo dei dati di input - corrente immessa, differenza di potenziale, configurazione elettrodoica (geometria) - è stato possibile calcolare la resistività apparente del sottosuolo indagato quindi, attraverso un processo di inversione, la resistività reale.

La scelta di adottare due tecniche geofisiche piuttosto che una sola ha reso più semplice la fase di analisi dei risultati ottenuti, riducendo notevolmente l'ambiguità interpretativa, tipica dei metodi indiretti. Dal confronto tra le linee geoelettriche e quelle sismiche, è stato possibile definire il profilo stratigrafico a monte del cantiere

che è stato poi, a sua volta, comparato con la stratigrafia risalente alle indagini del 2008.

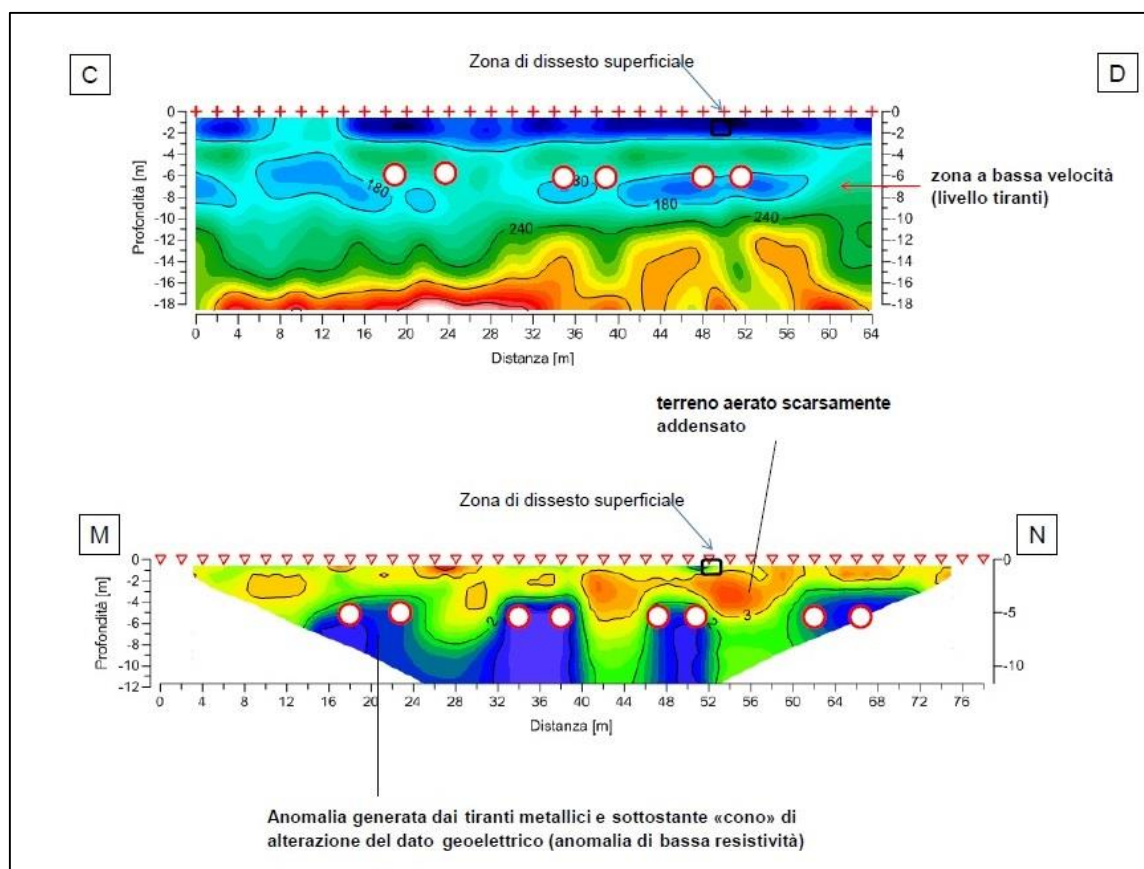


Figura 11. Sezioni di velocità delle onde di taglio (CD) e di resistività elettrica (MN) con individuazione di anomalie (Eurogeo, 2015)

Da quest'ultimo confronto è emersa una anomalia nel terzo strato in quanto, in corrispondenza della granulometria grossolana di sabbia e ghiaia rilevata dai sondaggi, si sarebbero dovuti registrare valori di velocità più elevati di quelli ottenuti dall'interpretazione dei risultati. La riduzione di velocità (che tendeva a scomparire verso sud, ovvero verso il condominio) è stata verosimilmente collegata alla riduzione di matrice fine e alla conseguente riduzione del grado di addensamento dei terreni posti sopra il livello impermeabile limoso a quota -7 m da piano campagna, probabilmente per effetto delle operazioni di perforazione ed esecuzione dei tiranti di ancoraggio delle opere di sostegno del parcheggio interrato. Infatti, dall'acquisizione dei dati dalle due prove geofisiche, si è ipotizzato che la zona ammalorata non fosse limitata a cavità isolate o punti localizzati a scarso grado di addensamento, ma estesa ad un volume di terreno a profondità nota (tra i 5 e i 7 metri), proprio in concomitanza dei tiranti di ancoraggio a sostegno

dello scavo. La forte riduzione del grado di addensamento del terreno era, quindi, verosimilmente dovuta all'operazione stessa di perforazione ed esecuzione dei tiranti.

L'individuazione delle zone segnate da anomalia e la determinazione delle ragioni dello sprofondamento hanno permesso la messa a punto di una proposta di intervento: l'addensamento del terreno tramite un sistema di iniezione. La campagna geognostica eseguita ha permesso, quindi, il pieno raggiungimento degli obiettivi prefissati, per giunta in tempi molto brevi (un solo giorno lavorativo) e senza comportare alcun ulteriore impatto ambientale all'area di indagine.

4. CONCLUSIONI

Come si è potuto apprezzare nei sei casi di studio affrontati, la sola conoscenza delle singole tecniche di indagine non sempre è sufficiente a garantire l'esito positivo di una campagna geognostica: ad una vasta preparazione teorica, è infatti necessario abbinare un attento studio, in relazione alle condizioni al contorno, della giusta combinazione tra le diverse tecniche a disposizione.

Attualmente, l'indagine geognostica per il recupero degli edifici esistenti deve essere considerata come un'attività multidisciplinare in quanto, accanto alle metodologie più tradizionali, sono ormai ampiamente diffusi numerosi approcci innovativi - i metodi geofisici - originariamente non propri del campo geotecnico. È proprio dall'integrazione tra i diversi metodi di indagine - ciascuno dei quali presenta una serie di vantaggi e di limiti rispetto agli altri - che si ottengono i risultati migliori.

Infine, non va trascurata l'importanza di un'accurata ricostruzione storica dell'opera in esame, indispensabile a definire un quadro conoscitivo iniziale, che costituisce il più efficace punto di partenza per qualsiasi indagine.