BANDO DI CONCORSO INTERNAZIONALE DI PROGETTAZIONE, CON PROCEDURA APERTA, PER LA PROGETTAZIONE DEL "SISTEMA TRAM PALERMO - FASE II" PROGETTO GENERALE E PROGETTO I° STRALCIO. C.U.P. n. D71E16000300001 - CIG: 722377715D

Città di Palermo

CODICE
R.6

DESCRIZIONE
Programma dettagliato delle indagini: Archeologiche; Ambientali; Topografiche; Geologiche; Geotecniche; Idrologiche-Idrauliche; Tecnologiche per cesimento sottoservizi

SCALA
/

NUMERO
1/1

INDICE

1. PREMESSA ... 3

1.1 Descrizione delle opere ... 4

2. INDAGINI TOPOGRAFICHE ... 6

2.1 Piano dei rilievi topografici ... 6

2.2 Rilievi topografici ... 7

2.3 Modalità operative ... 9

3. IDROLOGIA – IDRAULICA ... 13

3.1 Generalità ... 13

3.2 Caratterizzazione idrologica del territorio ed aspetti di Idraulica ... 13

4. INDAGINI GEOLOGICHE E GEOTECNICHE ... 15

4.1 Premessa ... 15

4.2 Normativa di riferimento ... 15

4.3 Indagini geognostiche ... 16

4.4 Rilevo geo-meccanico degli affioramenti calcarenitici ... 19

4.5 Video-ispezioni con telecamera ... 22

4.6 Indagini geofisiche ... 24

4.6.1 Prove in foro – Down-Hole test ... 25

4.6.2 Indagini tromografiche (HVSN) ... 28

4.6.3 Prova sismica a rifrazione ... 29

4.6.4 Indagini MASW ... 31

4.7 Indagini Geotecniche in sito ... 33

4.7.1 Prova Penetrometrica Dinamica SPT ... 33

4.7.2 Prova Penetrometrica Dinamica Continua ... 36

4.7.3 Prova con Deflettometro a massa battente FWD ... 38

4.7.4 Prova di carico su piastra ... 40

4.7.5 Misura della densità in sito ... 42

4.8 Prove di laboratorio ... 43

4.8.1 Terreni di fondazione ... 43

4.8.2 Materiali da costruzione ... 45

4.9 Indagini per la caratterizzazione terre e rocce da scavo ... 47

5. RICERCA CAVITA' ... 52

5.1 Generalità ... 52

5.1.1 Georadar ... 52

6. INDAGINI ARCHEOLOGICHE ... 57

6.1 Premessa ... 57

6.2 Siti di interesse archeologico e paleontologico e programma delle indagini ... 57

6.3 Indagine speleologica ... 63

7. INDAGINI AMBIENTALI ... 66

7.1 Rumore ... 66

7.1.1 Premessa ... 66

7.1.2 Campagna di monitoraggio acustico 67
7.2 Vibrazioni 70
7.2.1 Generalità 70
7.2.2 Controlli vibrometrici 72
7.2.3 Normativa di riferimento 73
7.2.4 Rete di monitoraggio – Specifiche logistiche 78
7.2.5 Rete di monitoraggio – Specifiche tecniche 79
7.2.6 Rete di monitoraggio – Criteri di fissaggio dei trasduttori 80
7.2.7 Metodi di misura 81
7.2.8 Rapporto di attività 82
7.3 Biodiversità 83
7.3.1 Generalità 83
7.3.2 Indicatori e dei parametri per il successivo monitoraggio 86
8. INTERFERENZE CON L'EDIFICATO 87
8.1 Generalità 87
8.2 Indagini sui fabbricati 87
8.2.1 Organizzazione del lavoro e delle risorse umane 87
8.2.2 La scheda del fabbricato 89
8.2.3 Valutazione dello stato di consistenza e dell'indice di vulnerabilità 92
8.2.4 Principali modificazioni strutturali 93
8.2.5 Valutazione della vulnerabilita' 94
9. SOTTOSERVIZI 97
9.1 Premesse 97
9.2 Classificazione dei Sottoservizi 97
9.3 Piano di indagini 98

1. PREMESSA

Come richiesto dal bando del Concorso di Progettazione in oggetto, la presente relazione descrive in dettaglio il piano di indagini che si propone di eseguire per la successiva fase di progettazione definitiva del nuovo sistema tramviario della città di Palermo, previsto per l'ampliamento del sistema attuale.

Partendo dalla notevole mole di dati e di informazioni esistenti e disponibili in particolare sul sottosuolo dell'area urbana di Palermo, è stato confezionato il presente programma di indagini che, tenendo conto degli specifici tracciati tramviari di progetto e delle caratteristiche della nuova infrastruttura, consente di integrare i dati esistenti in modo da pervenire ad un esaustivo quadro di conoscenza per il successivo livello di progettazione.

Il programma delle indagini, che riguarda l'intero complesso delle sette tratte di progetto inclusi manufatti speciali e opere d'arte, comprende i diversi ambiti da investigare che riguardano principalmente:

- Topografia;
- Geognostica;
- Geotecnica;
- Ambiente;
- Archeologia.

Inoltre, un aspetto fondamentale riguarda l'individuazione dei sottoservizi e delle interferenze in genere che interessano i tracciati tramviari, nonché l'effetto, in alcuni casi migliorativo, che la realizzazione della infrastruttura Tram determina sul patrimonio edilizio prospiciente i tracciati stessi.

In particolare, sarà redatta una mappatura dei fabbricati sensibili o particolarmente vulnerabili nei confronti delle lavorazioni previste, mediante compilazione di schede di vulnerabilità.

Nel seguito, dopo una breve descrizione dei tracciati delle nuove tratte della linea tramviaria, si illustrano in dettaglio le modalità di esecuzione delle indagini, la cui ubicazione prevista è illustrata nelle specifiche Tav. 111 – 127, nelle quali sono anche indicate le indagini già effettuate in passato e di cui si è in possesso dei relativi risultati acquisiti.

Il programma descritto potrà subire degli adeguamenti in funzione di eventuali aggiustamenti che potranno essere apportati alle opere nella successiva fase di

progettazione.

Nel progetto definitivo sarà definito il piano di monitoraggio e di controlli che sarà necessario attuare in corso d'opera durante la fase di realizzazione dell'infrastruttura.

1.1 Descrizione delle opere

Il sistema tranviario di Palermo previsto in progetto comprende sette nuove tratte che coprono sia l'area urbana intorno al centro storico sia alcune aree periferiche.

I tracciati delle nuove Tratte partono dall'assunto di collegare le linee esistenti per realizzare un unico sistema tranviario interconnesso anche con la linea ferroviaria e le principali arterie stradali che servono la città di Palermo.

Le nuove linee si estendono a nord attraverso la zona di espansione della città, fino a collegare Mondello, con l'anello terminale della linea E, e Sferracavallo con la linea G; a sud si estende fino a Bonagia con l'anello terminale della linea D.

Il tracciato delle nuove linee sarà ricavato, quasi totalmente, lungo gli assi stradali esistenti, mantenendo pressoché invariata la quota del piano del ferro rispetto al piano stradale; inoltre l'utilizzo di un pacchetto tranviario con spessori ottimizzati (h = 70 cm circa), ha consentito **di minimizzare** i movimenti terra e le demolizioni di manufatti esistenti, riducendo al contempo le quantità di materiali da movimentare e da conferire a discarica, nonché **di ridurre** le interferenze con i sottoservizi esistenti e gli impatti negativi dei lavori sui fabbricati adiacenti.

Rimandando alle specifiche relazioni Illustrativa R.1 e Tecnica R.2 per la descrizione dettagliata delle caratteristiche delle tratte e relativi tracciati, di seguito si riportano soltanto i dati salienti di ciascuna tratta.

Tratta A: si collega al terminale dell'attuale linea 1 esistente in adiacenza alla Stazione Centrale. Si sviluppa per un tratto di circa 1,3 Km lungo la via Roma per poi proseguire a singolo binario, con una sorta di anello, per circa 10 Km lungo la via Dalla Chiesa, via Marchese di Villabianca, via Leoni, Stadio di calcio, via De Gasperi, viale Croce Rossa, via della Libertà, via R. Settimo e via Cavour fino a ricongiungersi su via Roma.

Tratta B: parte dalla Stazione Notarbartolo, in collegamento con la linea 2 esistente, e si sviluppa per circa 1 Km lungo la via L. Da Vinci – Notarbartolo fino al Giardino Inglese.

Tratta C: si allaccia alla linea 3 esistente lungo il viale della Regione Siciliana per poi salire con due rampe sullo svincolo stradale esistente di via Basile e proseguire lungo la

stessa via e il corso Tukory fino alla stazione Centrale, con uno sviluppo di circa 8 Km.

Tratta D: collega la Tratta C da corso Tukory fino al quartiere Bonagia oltre il viale della Regione Siciliana, per una linghezza di circa 3,3 Km a doppio binario e di circa 2,7 Km a singolo binario ad anello dentro il succitato quartiere. Lungo il percorso, la tratta scavalva il fiume Oreto mediante un ponte strallato a unica campata di circa 220 m di lunghezza, che costituisce la più importante opera d'arte del progetto.

Tratta E: inizia dalla via De Gasperi e si sviluppa lungo l'asse viale Strasburgo – via Lanza di Scalea fino ad attraversare il quartiere dello ZEN e proseguire su via dell'Olimpo. Dalla piazza Castelforte inizia un tratto ad anello che percorre il viale Regina Margherita e il lungomare fino al paese di Mondello per poi tornare indietro sulle vie Palinuro, Galatea e Mattei e ricongiungersi alla piazza Castelforte, il tutto per uno sviluppo complessivo di quasi 15 Km.

Tratta F: si sviluppa per circa 4,6 Km a partire dalla Stazione Centrale percorrendo via Lincoln, il lungomare del Foro Italico, la Cala e via F. Crispi fino a risalire lungo la via Duca della Verdura e connettersi alla Tratta B di fronte il Giardino Inglese.

Tratta G: si dirama dalla Tratta E in corrispondenza del quartiere ZEN e si sviluppa per circa 5,3 Km fino alla borgata di Sferracavallo.

2. INDAGINI TOPOGRAFICHE

2.1 Piano dei rilievi topografici

Uno dei requisiti essenziali per la buona riuscita della progettazione di un opera è che la stessa sia sviluppata su un rilievo correttamente eseguito. Per conseguire tale risultato si opererà sia acquisendo le informazioni con il necessario grado di dettaglio, sia verificando la qualità delle stesse e della cartografia prodotta.

In relazione alle specifiche esigenze, si procederà all'esecuzione di rilievi celerimetrici . Propedeutica a questa fase, sarà la determinazione di una attività finalizzata alla materializzazione di un sistema di riferimento plano-altimetrico, necessario per la realizzazione dei rilievi topografici per la progettazione e la successiva fase di esecuzione dell'estensione del sistema tranviario.

Verrà prodotto un rilievo plano-altimetrico che interesserà una fascia a cavallo dall'asse sede dell'infrastruttura di larghezza tale da abbracciare tutte le interferenze con le linee in progetto.

Per la costituzione di nuovi capisaldi si prevede di utilizzare metodologie diverse andando a costruire una rete di capisaldi di vario ordine come di seguito descritto:

- realizzazione di rete GPS per la costituzione di capisaldi planimetrici di primo ordine;
- realizzazione di poligonali per raffittimento di capisaldi di primo ordine;
- realizzazione di poligonali di dettaglio per procedere a rilievi topografici;
- livellazioni geometriche per determinazione del dato altimetrico.

I metodi per la realizzazione della rete di capisaldi sono di seguito brevemente illustrati:

Capisaldi di I° ordine

Per la costituzione di capisaldi di *primo ordine* si procederà a rilievi con ricevitori **GPS** doppia frequenza e multicostellazione in modalità statica, con tempi di campionamento dei segnali e di stazionamento prestabiliti in relazione alle distanze delle basi da calcolare, con successivo calcolo di chiusure e determinazione dei capisaldi di rete con compensazione ai minimi quadrati.

L'appoggio planimetrico di tale rete sarà garantito dai capisaldi delle linee tranviarie esistenti dotati di doppie coordinate.

Capisaldi di raffittimento

Si procederà quindi alla poligonazione dei capisaldi di primo ordine con stazioni totali dotati di precisioni angolari 0,5" sessagesimali e distanziometro 0,8 mm+1 ppm, utilizzate in centramento forzato con letture angolari reiterate in diritto e capovolto. I lati della poligonale saranno determinati in precedenza con uniformità di distanze e non superiori ai 200 ml. Tali poligonali si appoggeranno ai capisaldi di primo ordine per I corretta determinazione degli errori di chiusura lineare e angolare.

Capisaldi di dettaglio

Anche per detti capisaldi si procederà quindi per metodo di poligonazione come per quelli di primo ordine con stazioni totali dotati di precisioni angolari 0,5" sessagesimali e distanziometro 0,8 mm+1ppm, utilizzate in centramento forzato con letture angolari reiterate in diritto e capovolto. I lati di poligonale saranno determinati in precedenza con uniformità di distanze e non superiori ai 100 ml. Tali poligonali si appoggeranno ai capisaldi di raffittimento per I corretta determinazione degli errori di chiusura lineare e angolare.

Livellazione geometrica

Per la determinazione delle caratteristiche altimetriche del tracciato, si procederà alla livellazione dei capisaldi apposti e calcolati planimetricamente in precedenza mediante livellazione geometrica dal mezzo con distanze massime di battuta di ml. 45-50. Saranno utilizzati livelli digitali con stadie Invar certificate e precisioni di lettura inferiori ad 1mm/Km su livellazioni andata e ritorno.

2.2 Rilievi topografici

Le indagini topografiche saranno svolte, attraverso **rilievi celerimetrici,** che saranno realizzati a scala 1:500 e scala 1:200, laddove necessario. Trattandosi di zona urbana ad alta densità di insediamenti abitativi: tale scelta si ritiene particolarmente importante in relazione al contesto urbano dell'intervento ed alla presenza di numerosi manufatti ed opere che *potrebbe essere utile rilevare*, ma soprattutto qualora dovessero presentarsi situazioni di maggiore criticità identificate durante la fase di progettazione definitiva. Tutto

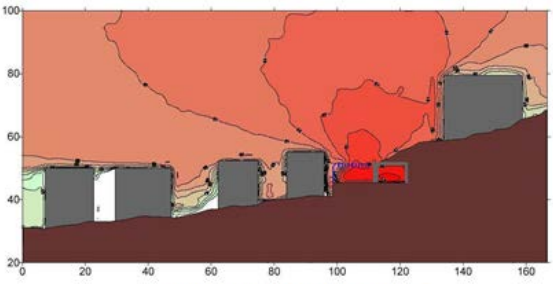
ciò concorre ad assicurare una maggiore precisione nello sviluppo della progettazione.

Il rilievo topografico a terra sarà svolto in due fasi:

La prima fase consisterà nel tracciamento dell'asse di progetto con utilizzo di **GPS**, adoperando una antenna base ricevente fissa su trigonometrico a terra di coordinate note (Gauss-Boaga) e più ricevitori mobili, permettendo cosi una precisione al centimetro sia planimetrica che altimetrica.

Inoltre, avvalendosi della tecnologia GPS, che prende come ellissoide di riferimento il sistema internazionale WGS84 (automaticamente collegato ai sistemi di coordinate Gauss-Boaga utilizzate sul territorio italiano), si potranno velocizzare le operazioni di campagna per l'appoggio delle foto atte alla restituzione in scala richiesta.

Considerato che si tratta di ambito urbano, **la seconda fase** consisterà nel controllo di tutte le interferenze; nel rilievo di dettaglio in corrispondenza di tutte le intersezioni stradali oggetto di intervento.



Modello di propagazione

Le reti di inquadramento e raffittimento, saranno collegate, per l'altimetria ai Capisaldi di livellazione della rete fondamentale dell'IGM e ad altri capisaldi provenienti da precedenti rilievi,studi e indagini, purché ritenuti validi ed utilizzabili dalla Committenza. La trasformazione delle coordinate ricavate nel sistema WGS84 nei sistemi di cui sopra, sarà condotta con l'utilizzo del software VERTO1 realizzato dall'IGM, ovvero realizzando un set di 7 parametri se i risultati del calcolo non forniranno sufficienti garanzie di precisione.

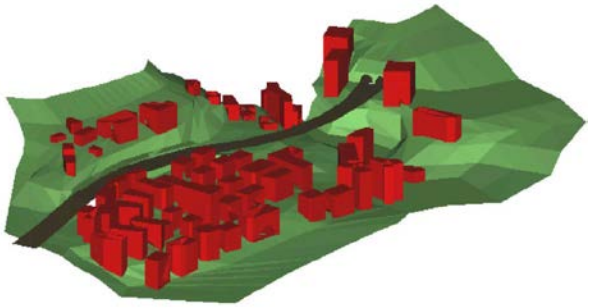
Il rilievo evidenzierà tutti i punti d'interesse abitativo (manufatti e altri elementi urbani), ma soprattutto permetterà una **corretta valutazione** di tutte le **interferenze**: **stradali** e di **servizi** (linee elettriche, gasdotti, reti di comunicazioni telefoniche, acquedotti ecc..). Renderà inoltre chiare tutte quelle zone non visibili dai fotogrammi dando inoltre un'interpretazione qualitativa ottima nelle zone in stretta aderenza alla sede della nuova infrastruttura.

L'elevata densità di punti rilevati e l'alta definizione delle foto potrà risultare particolarmente utile per modellazioni ambientali ed elaborazioni tridimensionali

Modelli e simulazioni possono essere utilizzati per verificare la propagazione di rumore,

onde radio ed altre emissioni, elettromagnetico, acustico, alluvionale, ecc., come riportato nei seguenti esempi:

In aggiunta al rilievo topografico, si propone di eseguire eventualmente il rilievo di manufatti esistenti significativi, mediante la **tecnica Laser Scanner**, già utilizzata con successo dal Concorrente in altri appalti.
La tecnologia Laser Scanner meglio risponde a determinati obiettivi, sia in termini logistici come velocità e qualità del lavoro di acquisizione, sia in termini di efficienza dei risultati ricercati.
L'esperienza maturata in contesti analoghi ha dimostrato che l'impiego di tecnologia Laser Scanner deve essere associato al rilievo topografico GPS e /o Total Station e a quello tradizionale celerimetrico, al fine di produrre dei modelli 3D estremamente precisi e dettagliati dai quali poter estrarre tutte le informazioni metriche necessarie alla restituzione vettoriale del manufatto di interesse.



Esempio di modello 3D

2.3 Modalità operative

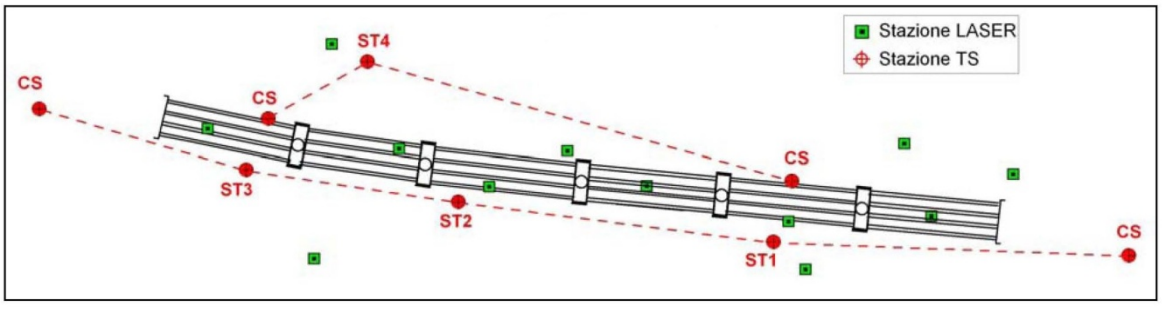
Le attività di rilievo con tecnologia Laser Scanner integrata con altra strumentazione, proprio per l'ottimizzazione della tempistica ed in accordo con i risultati attesi, segue una procedura operativa che può essere suddivisa nei seguenti punti:

1. **materializzazione della rete di inquadramento**; si tratta della materializzazione di almeno 4 capisaldi di orientamento per i rilievi celerimetrici e GPS del viadotto; tali vertici, costituiti da chiodi topografici infissi sui manufatti scelti, costituiranno i capisaldi del viadotto e costituiranno le monografie del Viadotto;

2. **misura dei capisaldi**: aggancio alla rete di riferimento IGM95; le operazioni di misura dei capisaldi utilizza la strumentazione satellitare (GPS, Global Positioning Systems) con ricorso, laddove necessario ad una metodologia di rilievo differenziale denominata Fast Static. Tale procedura prevede l'utilizzo contemporaneo di almeno due ricevitori, il primo fisso sul caposaldo a coordinate note (master GPS) mentre il secondo (rover) acquisisce i punti d'interesse stazionando su di essi per un intervallo temporale variabile a seconda della distanza master-rover, della visibilità satellitare e della posizione/geometria della costellazione satellitare visibile.

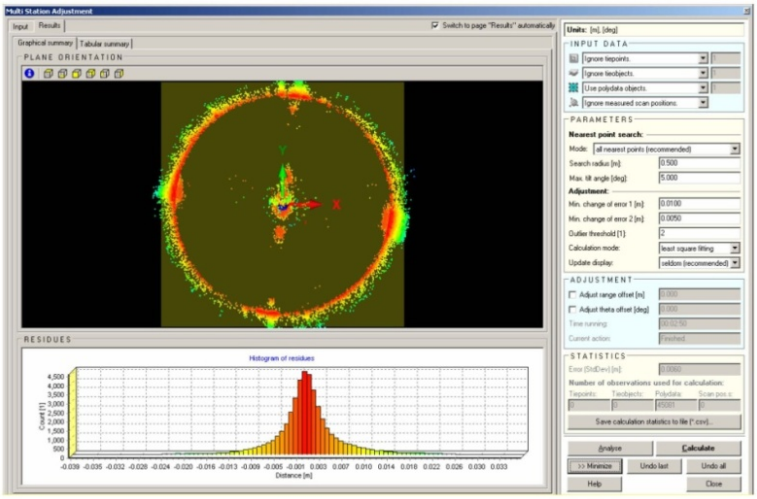
3. **rilievi topografici di dettaglio**; si sviluppano secondo due modalità distinte: il rilievo celerimetrico atto ad acquisire i punti notevoli delle strutture orizzontali e verticali nonché di georeferenziare le singole scansioni laser ed il rilievo cinematico GPS atto ad acquisire il piano viabile ee eventuali manufatti di interesse nell'area di progetto.

Il rilievo celerimetrico si esegue con strumentazione dotata di funzione con acquisizione dei punti anche senza prismi riflettore; essi si svolgono eseguendo poligonali vincolate agli estremi da capisaldi di riferimento ed hanno lo scopo di acquisire una serie di punti notevoli della struttura indagata e di georeferenziare le varie scansioni laser scanner acquisendo di volta in volta, la posizione del laser.



L'immagine precedente mostra un modello semplificato di un viadotto ricavato dal rilievo celerimetrico, da cui si evincono in rosso le poligonali vincolate a vertici caposaldi e le diverse posizioni rispetto all'opera della strumentazione.

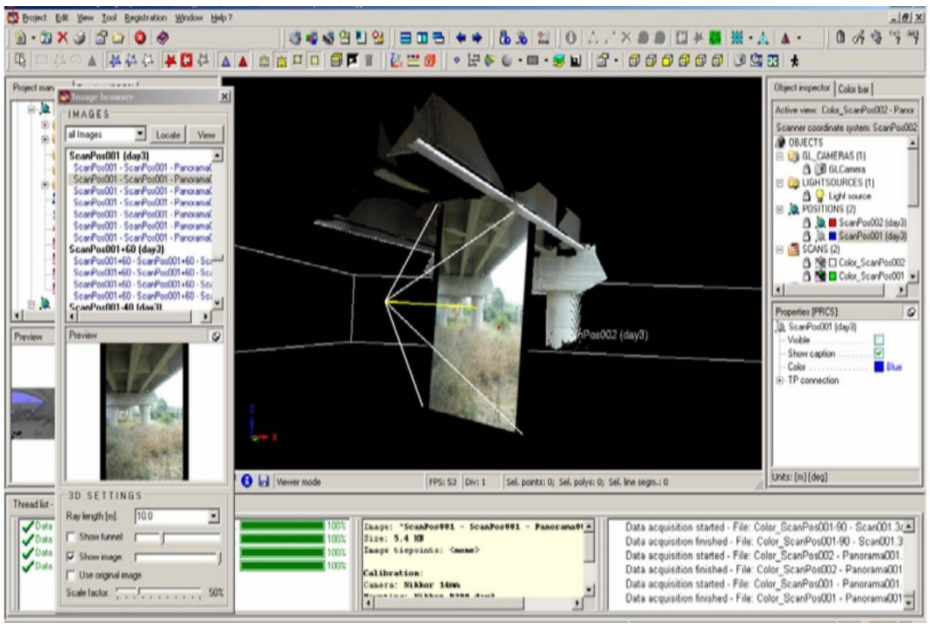
Il rilievo cinematico GPS si esegue con la tecnica denominata Stop & Go in configurazione RTK, in sintesi si utilizzano simultaneamente due ricevitori, comunicanti fra loro via gsm o via radio il "master" fisso su un punto di coordinate note ed il "rover" acquisisce i vari punti d'interesse stazionando sugli stessi per pochi secondi (la figura mostra una sezione semplificata in cui i cerchi in rosso indicano alcuni target del rilievo RTK).



Al termine delle fasi di acquisizione in campo si procede con una seria di elaborazioni mediante software dedicati che permettono di assemblare le nuvole di punti acquisiti in ciascuna scansione mediante una matrice che permette la rototraslazione dal sistema di riferimento "laser" al sistema di riferimento topografico (sistema metrico non deformato). Alla fine del processo di registrazione delle singole matrici è possibile creare, dall'unione di più scansioni effettuate sullo stesso manufatto da punti di vista differenti, un unico modello tridimensionale completo. Per ottenere una mosaicatura (assemblaggio attraverso matrici delle nuvole dei punti acquisiti) ulteriormente raffinata verrà utilizzato un algoritmo di calcolo (Multi Station Adjustment) che individua i piani comuni alle scansioni, determinando quindi gli allineamenti più dettagliati.

Alla fine del processo fin qui descritto, si ottiene un'unica nuvola di punti che rappresenta una fedele ricostruzione tridimensionale del manufatto.

Inoltre è possibile attribuire il colore, valore RGB, al singolo punto in quanto durante la fase di scansione viene scattata una singola fotografia che possiede quindi una matrice di posizione e rotazione rispetto al centro del laser scanner. Quest'ultima elaborazione permette di poter visualizzare i fotogrammi dal punto di presa del sistema laser e di effettuare una navigazione all'interno del modello con riferimento all'immagine scattata.



L'immagine che segue mostra un esempio di applicazione della metodologia Laser Scanner effettuata su alcuni viadotti da cui si può evincere la scelta di rappresentazione di un modello, si può infatti inserire nel contesto ambientale in cui si trova oppure poter selezionare soltanto l'opera. Inoltre la colorazione, ottenuta mediante attribuzione del valore RGB al singolo punto acquisito, rende la modellazione ancora più realistica.

Ricognizione: Verrà effettuata una attenta e scrupolosa ricognizione del lavoro eseguito, per il controllo della cartografia eseguita, l'integrazione dei particolari cartografici non restituiti, e la raccolta della toponomastica.

Compilazione della carta (editing) e Disegno: La compilazione della cartografia sarà articolata in più tipi di intervento sui dati dell'archivio:- codifica dei punti restituiti; - ricostruzione delle congruenze geometriche; - controlli sull'altimetria; - individuazione aree chiuse; - riporto della ricognizione; - organizzazione dei files di trasferimento. Le operazioni sopra descritte saranno eseguite off-line attraverso l'ausilio di stazioni videografiche interattiva, equipaggiata di idoneo software cartografico dedicato. La cartografia prodotta verrà disegnata su supporti cartacei, in maniera automatizzata (plottaggi).

3. IDROLOGIA – IDRAULICA

3.1 Generalità

L'area oggetto di esame ricade per la maggior parte nel bacino idrografico del fiume Oreto ed in parte in un'area intermedia compresa fra l'Oreto e Punta Raisi.

Il bacino idrografico del F. Oreto ricade nel versante settentrionale della Sicilia e si estende, per circa 120 km^2, dal M. La Pizzuta e dal M. Gibilmesi sino al M. Tirreno presso la stazione di S. Erasmo delle FF.SS. alla periferia Sud del centro abitato di Palermo. Esso confina tra il bacino del F. Jato a Sud-Ovest, il bacino del F. Belice destro a Sud ed il bacino del F. Eleuterio ad Est e ricade nel territorio della provincia di Palermo. Nel bacino ricadono i centri abitati di Altofonte e Monreale e una parte del centro abitato di Palermo.

Il corso del F. Oreto si sviluppa per circa 20 km e riceve lungo il suo percorso le acque di piccoli affluenti.

Nell'ambito della progettazione delle linee tramviarie si svilupperà uno studio idrologico preliminare, finalizzato alla determinazione delle altezze di pioggia ricadenti nelle aree prossime alle fermate e alle sottostazioni, da porre a base per le calcolazioni idrauliche.

Più in dettaglio, si procederà ad un lavoro duplice di ricerca bibliografica e raccolta ed analisi dei dati grezzi, essendo la piana di Palermo oggetto di numerosi e dettagliati studi in proposito. Entrambi i passaggi saranno utili per procedere ad un eventuale aggiornamento delle curve di probabilità pluviometrica reperite.

3.2 Caratterizzazione idrologica del territorio ed aspetti di Idraulica

Al fine di stimare le massime altezze di pioggia di progetto, sarà condotta un'indagine idrologica che consisterà nell'individuazione le stazioni pluviometriche più prossime all'opera in progetto e nell'applicazione del metodo dei *Topoieti* per individuare le stazioni pluviometriche da considerare nei calcoli idrologici.

Le stazioni pluviometriche preliminarmente individuate sono le seguenti:

- Altofonte;
- Monreale;
- Istituto Castelnuovo;
- Istituto Zootecnico;

- Osservatorio Astronomico;
- Partanna Mondello;
- San Martino delle Scale;
- Villa Trabia;
- Villagrazia.

Per ciascuna stazione pluviometrica selezionata saranno raccolte le altezze di pioggia massime annuali per la durata di 1, 3, 6, 12, e 24 ore, nel periodo disponibile per l'acquisizione.
Mediante l'elaborazione statistica dei suddetti dati saranno ricostruite le Curve di Probabilità Pluviometrica per ciascuna stazione presa in considerazione, che verranno utilizzate come base per le successive analisi.

Dal punto di vista idraulico si procederà alla raccolta di tutte le informazioni inerenti i sottoservizi come meglio specificato nel seguito della relazione. Si vuole qui sottolineare, per dare seguito al tema delle indagini idrologiche e idrauliche, che risulterà di fondamentale importanza l'esatta conoscenza del posizionamento dei numerosi collettori fognari che insistono nel territorio cittadino e delle loro dimensioni (fondamentalmente il diametro), in modo da potere risolvere tali interferenze effettuando anche le corrette valutazioni di sufficienza idraulica delle opere esistenti.

……
……

4. INDAGINI GEOLOGICHE E GEOTECNICHE

4.1 Premessa

Ai fini di una corretta progettazione dell'infrastruttura tramviaria, risulta fondamentale la completa conoscenza della Geologia e della Geotecnica dell'area di interesse. Con l'obiettivo di pervenire alla caratterizzazione geologica e geotecnica dei terreni di fondazione e per lo sviluppo delle verifiche geotecniche e strutturali delle opere presenti lungo il tracciato delle linee tramviarie ed in corrispondenza dei principali manufatti (ponte sul F. Oreto, sottostazioni, Deposito Olimpo) si pone pertanto in programma l'esecuzione di una articolata serie di studi ed indagini di carattere geologico e geotecnico, che spaziano dalle indagini geognostiche e geofisiche, alle prove geotecniche in sito ed in laboratorio, ai rilievi geo-strutturali degli affioramenti lapidei, alle indagini per la caratterizzazione delle terre e rocce da scavo.

I dati acquisiti integreranno e completeranno quelli già a disposizione del Concorrente, che si riferiscono a numerose campagne di indagini svolte negli ultimi 50 anni nell'ambito dell'intero territorio urbano palermitano integrati con dati e conoscenze specifiche a disposizione degli scriventi per lavori effettuati nelle aree adiacenti il tracciato stesso. Queste informazioni sono state analizzate criticamente e verificate per una prima ricostruzione del sottosuolo lungo il tracciato della tramvia. Complessivamente sono state disponibili i dati relativi a:

- oltre 400 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo di profondità variabile da 10 a 80 metri. I sondaggi sono spesso corredati dei risultati di prove penetrometriche dinamiche SPT, prove Down-Hole e rilievo del pelo libero della falda;
- numerose serie di indagini geofisiche (principalmente indagini tromografiche, MASW e sismica a rifrazione;
- oltre 100 serie di prove geotecniche di laboratorio su campioni di terreno e di roccia.

4.2 Normativa di riferimento

- Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 11 marzo 1988 - Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e delle scarpate, i criteri e le prescrizioni per la progettazione
- Circolare Ministeriale Lavori Pubblici 24/05/1988 N. 30493 - "Istruzioni riguardanti le

indagini sui terreni e sulle rocce";

- Decreto Ministero Infrastrutture 14 gennaio 2008 - Nuove norme tecniche per le costruzioni
- Circolare del Ministero Infrastrutture e Trasporti n. 617 del 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni"
- OPCM 3274 – Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. (G.U. n. 105 del 8 maggio 2003 - S.o. n.72)
- Norme UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione
- Norme UNI EN – UNI ISO – UNI EN ISO cc)
- Norme CNR (Consiglio Nazionale Ricerche)
- Raccomandazioni Commissione A.I.C.A.P.
- Raccomandazioni Associazione Geotecnica Italiana
- Eurocodici
  - EN 1992 Eurocodice 2: Design of concrete structures (strutture in calcestruzzo non armato, armato e precompresso)
  - EN 1993 Eurocodice 3: Design of steel structures (strutture in acciaio)
  - EN 1994 Eurocodice 4: Design of composite steel and concrete structures (strutture miste acciaio-calcestruzzo)
  - EN 1996 Eurocodice 6: Design of masonry structures (strutture in muratura portante)
  - EN 1997 Eurocodice 7: Geotechnical design (geotecnica: fondazioni, muri di sostegno, etc.)
  - EN 1998 Eurocodice 8: Design of structures for earthquake resistance (progettazione sismica)

4.3 Indagini geognostiche

L'esecuzione delle indagini geognostiche è fondamentale per la definizione **del modello geologico**, **idrogeologico**, **geotecnico** e **geo-meccanico** del tracciato/opera e per la scelta delle soluzioni progettuali, allo scopo di garantire al progetto un adeguato grado di affidabilità tecnico-economica.

Le indagini geognostiche in programma sono pertanto finalizzate:

1. all'inquadramento geologico, geo-morfologico e idro-geologico di dettaglio;
2. al riconoscimento macroscopico dei terreni e delle rocce di fondazione. In tale ambito risulta particolarmente importante la definizione della consistenza e della struttura (per i terreni a grana fina), del grado di addensamento (per i terreni a grana grossa), nonché della grana, del grado di cementazione e della presenza di fessure e discontinuità (per le rocce lapidee);
3. alla ricostruzione di dettaglio dei rapporti esistenti tra le opere in progetto ed i terreni;
4. alla valutazione dei caratteri dinamici dei terreni e dei possibili effetti di amplificazione sismica locale;.
5. alla scelta del tipo di fondazioni del ponte sul Fiume Oreto, delle sottostazioni e del Deposito Olimpo;
6. alla messa in opera della strumentazione geotecnica in grado di fornire elementi utili per la previsione dell'interazione con la falda e con l'edificato.

Le indagini geognostiche comprenderanno l'esecuzione di 51 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo e l'apertura di 71 trincee esplorative. L'ubicazione delle indagini è riportata nelle Tavole 111/127.

Si sottolinea che il numero di indagini potrà variare in più o in meno in dipendenza di situazioni locali che dovessero risultare variate al momento dell'esecuzione delle sperimentazioni in sito.

I **sondaggi**, finalizzati principalmente al riconoscimento macroscopico dei terreni e delle rocce di fondazione, avranno profondità compresa tra 10 m e 30 m sulla base delle opere previste (10 metri laddove la tramvia non prevede alcun intervento se non l'adeguamento delle opere stradali). In corrispondenza di ciascuna spalla del ponte sul F. Oreto si eseguiranno 5 sondaggi; in questo caso le perforazioni saranno spinte fino ad una profondità minima di 30 m. I fori ubicati nei siti

delle sottostazioni e del Deposito Olimpo, in numero di 4 avranno una profondità massima di 30 m. Tre perforazioni saranno eseguite in corrispondenza di ciascuna passerella che sarà realizzata lungo la via di Circonvallazione, mentre un sondaggio sarà eseguito per il riconoscimento dei terreni di fondazione della sottostazione di Piazza Sturzo.

Nel corso delle perforazioni si preleveranno campioni indisturbati, orientativamente tre per ogni verticale e si eseguiranno prove penetrometriche dinamiche SPT in corrispondenza dei terreni a grana grossa; il numero esatto di prove SPT sarà stabilito all'atto esecutivo. Si prevede anche l'esecuzione di prove Down-Hole per la caratterizzazione sismica dei terreni (v. più avanti) e l'installazione di piezometri a tubo aperto o di Casagrande, a seconda delle necessità, per la verifica dei livelli di falda idrica nelle zone dove è necessario studiare l'interazione delle opere con la falda.

I terreni e le rocce prelevati nel corso dei sondaggi sarà fotografato e descritto nella documentazione delle indagini e custodito all'interno di cassette catalogatrici. I terreni saranno descritti con riferimento, principalmente, al colore, alla grana, alla consistenza, alla struttura ed alla presenza di alterazioni. Per le rocce si farà riferimento al colore, alla grana, alla tessitura, al grado di cementazione ed alla presenza di alterazioni, cavità, etc..

Lungo ciascuna verticale sarà stimata la percentuale di carotaggio; si valuterà, inoltre, l'indice di qualità della roccia RQD.

I sondaggi potranno essere integrati da indagini geofisiche (sismica a rifrazione), qualora i risultati ottenuti non dovessero essere sufficienti per la ricostruzione dei rapporti tra le opere ed i terreni per la presenza di situazioni geologiche particolarmente complesse (ad esempio un contatto anomalo tra i terreni e le rocce del complesso calcarenitico-sabbioso e le argille del Flysch Numidico, elevati spessori di materiali di riporto, etc.).

Se necessario, le indagini geognostiche potranno comprendere anche rilievi **BHTV** all'interno dei fori di sondaggio. La tecnica del "televiewer" (BHTV) consiste in una indagine acustica che rileva le pareti del foro consentendo di risalire alla orientazione delle discontinuità dell'ammasso roccioso. Tale sistema è già stato utilizzato con successo in vari progetti, fornendo uno strumento efficace di previsione dei possibili cinematismi di rottura negli ammassi rocciosi e quindi di supporto al dimensionamento degli interventi di sostegno. Si valuterà anche l'opportunità di eseguire, in laboratorio, prove di taglio lungo discontinuità naturali o artificiali su campioni prelevati in sito.

Le **trincee esplorative** hanno lo scopo di pervenire al riconoscimento macroscopico dei terreni che costituiranno il piano di posa delle sedi tramviarie. Allo scopo di arrecare il minor disturbo possibile alla viabilità, le trincee saranno posizionate in corrispondenza di aree dove le interferenze con il traffico veicolare risultano minime.

All'interno delle trincee, spinte mediamente fino a profondità di 2 m dal piano di campagna, saranno effettuate prove e misure geotecniche (prove di carico su piastra misure di densità), come descritto più avanti e saranno prelevati campioni non indisturbati di terreno , da sottoporre a prove geotecniche di identificazione e di costipamento.

Le pareti della trincea saranno accuratamente fotografate e sarà determinato il grado di stabilità. I terreni e le rocce presenti all'interno dello scavo saranno identificati e descritti seguendo i criteri prima richiamati per i sondaggi geognostici.

4.4 Rilevo geo-meccanico degli affioramenti calcarenitici

A completamento della caratterizzazione geologica dell'area dove si costruirà il nuovo ponte per l'attraversamento del F. Oreto e per lo sviluppo del modello geo-meccanico della formazione calcarenitica interessate dalle fondazioni dell'opera, si procederà al rilievo strutturale puntuale degli ammassi rocciosi affioranti lungo le sponde del corso d'acqua in corrispondenza dell'area di impronta delle fondazioni dell'opera in progetto.

Questa indagine ha lo scopo di valutare eventuali interferenze con la stabilità delle opere di fondazione del ponte in relazione alla stratificazione delle rocce calcarenitiche ivi affioranti .

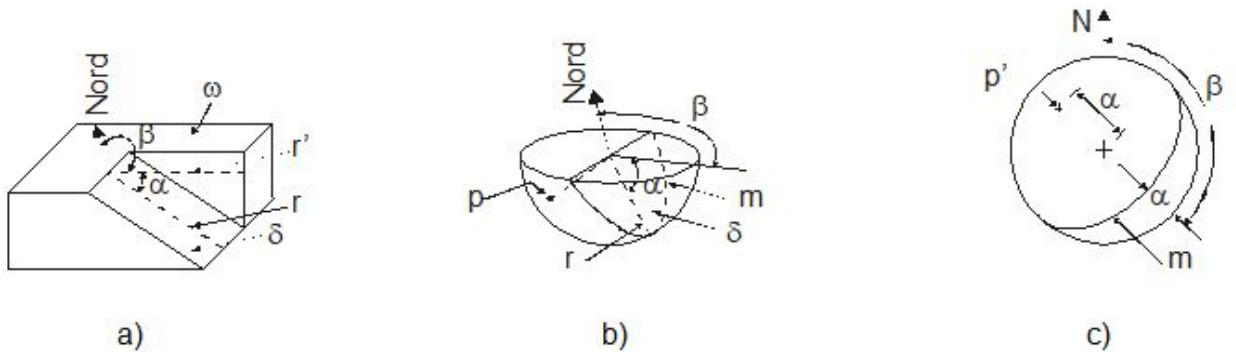
Per la definizione e la classificazione delle caratteristiche strutturali, si farà riferimento alla Normativa Internazionale proposta nel 1978 dalla International Society for Rock Mechanics (ISRM).

Il rilievo della giacitura degli ammassi rocciosi sarà effettuato misurando l'orientazione, la

spaziatura, la persistenza e l'apertura delle superfici di discontinuità individuabili negli affioramenti e restituendo i dati in diagrammi di Schmidt ed in diagrammi di isofrequenza.

Per eseguire il rilievo si utilizza la bussola di Clar. In presenza di superfici di discontinuità molto scabre ed ondulate, le misure si ripetono più volte, per individuare l'orientazione media.

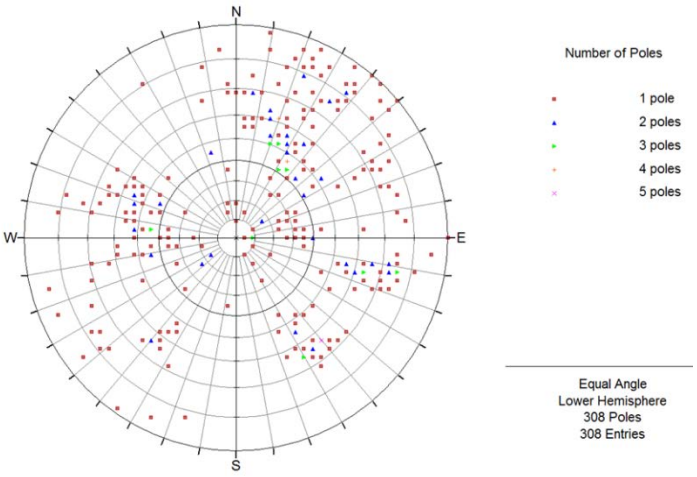
L'orientazione viene descritta dall'angolo di immersione α e dall'azimut di immersione β. L'immersione, definita dall'angolo fra la retta di massima pendenza e la sua proiezione sul piano orizzontale, varia fra 0 e 90°; l'azimut di immersione, definito dall'angolo fra tale proiezione e la direzione Nord, viene misurato in senso antiorario ed assume valori compresi fra 0° e 360° (fig. a).



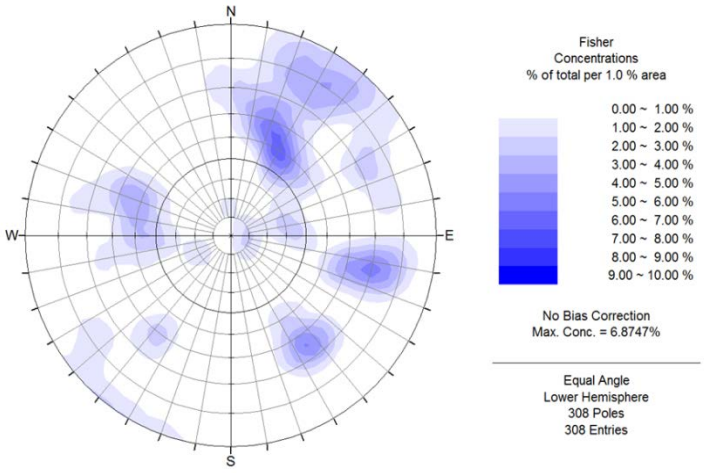
a) b) c)

Sistema di riferimento e rappresentazione grafica relativi all'orientazione delle discontinuità: a) definizione degli angoli α e β; b) emisfero di riferimento; c) diagramma di SCHMIDT.

ω piano orizzontale; δ piano delle discontinuità; *r* retta di max pendenza; *r'* proiezione di *r* sul piano orizzontale; *p* polo; *m* meridiano



I valori di α e β rappresentativi della giacitura di ciascuna superficie di discontinuità vengono restituiti in forma grafica sui diagrammi circolari di Schmidt, utilizzando la tecnica grafica della proiezione sferica a conservazione di aree. A tal fine, si immagini una sfera di raggio unitario che, essendo libera di traslare ma non di ruotare, mantiene rispetto al Nord un'orientazione costante. Portando idealmente a coincidere il centro della sfera con un punto del piano di discontinuità, quest'ultimo interseca la superficie sferica secondo un cerchio massimo o "meridiano" (fig. b). Oltre che dal meridiano, l'orientazione del piano di discontinuità può essere univocamente rappresentata dal "polo", punto di intersezione fra la superficie dell'emisfero inferiore e la retta, normale al piano, passante per il centro (fig. c).



I dati si elaborano sinteticamente costruendo i diagrammi di frequenza, rappresentanti, quindi, le aree di addensamento dei poli delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso. Su questi ultimi, per ciascun raggruppamento di famiglie, vengono tracciate le curve di isofrequenza, che contornano le aree in cui è presente la medesima percentuale di poli, allo scopo di individuare, per ciascuna famiglia, i valori degli angoli α_0 e β_0 di massima densità di tali punti.

La spaziatura viene definita come distanza intercorrente tra discontinuità adiacenti parallele o sub-parallele e viene misurata in centimetri.

La persistenza di una discontinuità, che viene misurata in metri, viene identificata con la lunghezza della traccia di tale

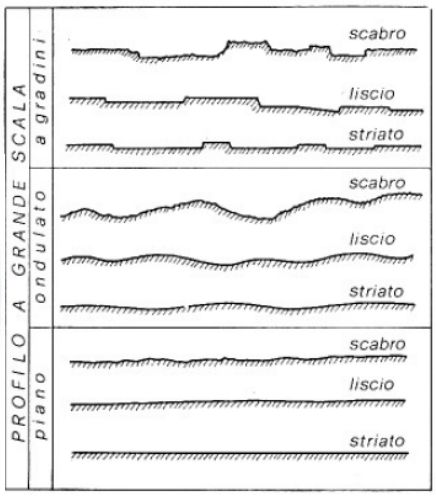


Fig. 6. - Profili di scabrezza a grande e a piccola scala.

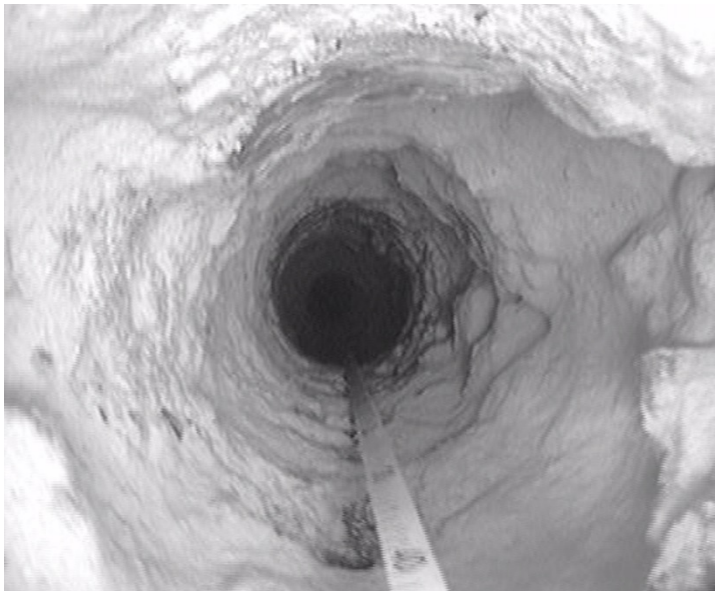
superficie sul fronte di esposizione ed influisce, al pari della spaziatura, sia sulla dimensione dei blocchi, sia sulla permeabilità per fessurazione dell'ammasso. Quest'ultima proprietà, nelle rocce, risulta inoltre condizionata dall'apertura, misurata in mm, delle discontinuità e cioè della distanza che intercorre fra le pareti.

Si procederà anche al rilievo della scabrezza dei giunti appoggiando alle superfici di discontinuità il profilometro, detto anche *Pettine di Barton*. La scabrezza a grande scala è dovuta alla presenza di ondulazioni o gradini, che modificano sensibilmente l'andamento geometrico della discontinuità, rispetto al piano cui essa è riferita. I termini descrittivi della scabrezza sono illustrati nella Fig. 6 che si allega, tratta da:

Ercoli L. Metodo normalizzato per la descrizione delle discontinuità negli ammassi rocciosi – RIG 1981 – Riassunti e Recensioni. La misura della scabrezza fornisce numerose informazioni, tra le quali il valore del Joint Roughness Coefficient JRC.

4.5 Video-ispezioni con telecamera

Tra le formazioni lapidee che si rinvengono nel sottosuolo di Palermo, il complesso calcarenitico-sabbioso rappresenta il termine che maggiormente interagisce con la progettazione dei più importanti manufatti a servizio delle linee tramviarie, quali il Deposito Olimpo, il ponte per l'attraversamento del F. Oreto e le passerelle pedonali lungo la via d Circonvallazione.



Il complesso calcarenitico.sabbioso comprende una vasta gamma di rocce tenere e terreni a grana fina, fra loro differenti per caratteristiche fisiche e macrostrutturali. I numerosi studi svolti nell'area palermitana hanno portato ad identificare nell'ambito del complesso, tra le rocce tenere, i termini lapidei **CL**, **CN** **CV**. Il riconoscimento della successione dei vari tipi di materiale lungo una verticale è spesso incerto per le difficoltà di estrarre carote relativamente indisturbate in un terreno spiccatamente eterogeneo. Il comportamento meccanico è alquanto variabile ed è

compreso fra quello tipico dei materiali incoerenti e quello delle rocce lapidee compatte.. Tale complesso rientra dal punto di visto geotecnico tra i terreni definiti "*strutturalmente complessi*".

In considerazione del ruolo importante che il complesso in esame gioca nella scelta del tipo di fondazione dei manufatti sopra indicati, si procederà all'esecuzione di video-ispezioni con telecamera all'interno dei fori di sondaggio effettuati nei terreni di fondazione di tali opere.

Le video-ispezioni sono in genere utilizzate per rilevare le caratteristiche costruttive di pozzi e tubazioni. Nel campo della geognostica e della geotecnica, permettono di osservare con continuità i terreni e rocce attraversati dalla perforazione, i passaggi litologici, la presenza e l'andamento di discontinuità, fratture e vuoti, la variazione della colorazione e della grana.

Grazie all'elevato grado di risoluzione della strumentazione più moderna disponibile sul mercato, si possono anche osservare particolari della *struttura* che difficilmente emergono dall'esame del materiale prelevato, a causa del "*disturbo*" correlato alle operazioni di prelievo, soprattutto nei terreni e rocce della formazione calcarenitico-sabbiosa *strutturalmente complessi*, come detto in precedenza. Nel corso dei numerosi studi geologici e geotecnici svolti nel territorio della città di Palermo sui terreni del complesso calcarenitico-sabbioso si è infatti molto spesso osservato che il materiale recuperato nel corso dei sondaggi può sovrastimare o sottostimare le caratteristiche fisico-meccaniche delle rocce calcarenitiche.

Nello specifico, le video-ispezioni sono mirate ad una migliore definizione delle caratteristiche macroscopiche delle rocce della formazione calcarenitica ed anche di eventuali rocce quarzarenitiche della formazione Oligo-Miocenica del Flysch Numidico che potrebbero incontrarsi soprattutto lungo le verticali di perforazione che saranno eseguite nella via di Circonvallazione e nella zona del Teatro Politeama Garibaldi.

Le video-ispezioni saranno anche utilizzate qualora nel corso dei sondaggi dovesse incontrarsi la presenza di cavità. La lunghezza dei tratti di foro da ispezionare potrà essere condizionata dalla presenza del rivestimento del foro di sondaggio (necessario per il mantenimento della stabilità del cavo) e dalla presenza della falda.è stata rinvenuta spesso a profondità comprese tra 8 m e 12 m dal piano di campagna.
Si impiegherà una sonda televisiva impermeabile, dotata di un obiettivo grandangolare che consente una esame particolareggiato delle pareti del foro. Si procederà ad una ripresa in continuo della video-ispezione, pertanto ogni eventuale anomalia potrà essere non solo evidenziata ad una certa quota dal piano campagna, ma potrà essere fotografata o meglio filmata nel corso dell´indagine. I filmati ottenuti saranno elaborati ed interpretati per evidenziare tutte le particolarità osservate e saranno restituiti su supporto magnetico.

4.6 Indagini geofisiche

Le indagini geofisiche in programma sono finalizzate all'integrazione dei dati acquisiti con i sondaggi meccanici eseguiti per la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce e per la ricostruzione dei rapporti opere-terreni.
Per la caratterizzazione sismica del sito (macrozonazione) si effettueranno prove Down-Hole all'interno dei fori di sondaggio ed indagini tromografiche HVSN allo scopo di valutare il parametro Vs_{30} attraverso il profilo di velocità delle onde di taglio S fino a 30 m di profondità. Si ricorda che Vs_{30} è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con l'espressione:

$$\overline{\quad}_{i=1} V_i$$

con:

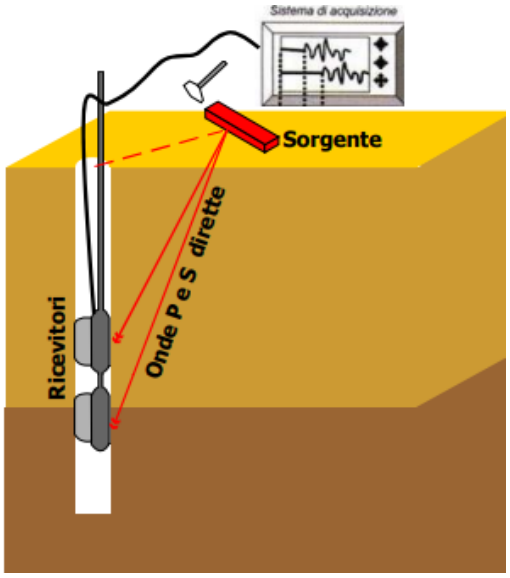
- hi = spessore in m dello strato iesimo;
- Vi = velocità delle onde di taglio dello strato iesimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m

Le indagini geofisiche saranno anche utilizzate per la ricerca delle cavità, nell'ambito delle indagini archeologiche e per la ricerca e mappatura dei sottoservizi. In tale ambito si effettueranno prevalentemente indagini sismiche a rifrazione e indagini con Georadar. Oltre a tali indagini potranno anche eseguirsi indagini MASW in dipendenza di situazioni locali.

Nel seguito si riporta una descrizione delle modalità di esecuzione delle suddette indagini.

4.6.1 Prove in foro – Down-Hole test

La prova Down-Hole è finalizzata alla determinazione dei profili delle onde sismiche di compressione (P) e di taglio (S) in funzione della profondità. La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno una perturbazione mediante una sorgente meccanica e nel misurare il tempo d'arrivo delle onde dirette, P ed S, alle varie profondità all'interno di un foro opportunamente predisposto.



Con il metodo sismico Down-Hole (DH) viene misurato il tempo necessario alle onde P ed S per propagarsi tra una sorgente sismica, posta in superficie, e i ricevitori, posti all'interno di un foro di sondaggio opportunamente cementato.

L'acquisizione dati avviene generando sulla superficie del terreno una perturbazione mediante una sorgente meccanica e misurando il tempo d'arrivo delle onde dirette, P ed S, alle varie profondità all'interno del foro opportunamente predisposto.

Lo schema di acquisizione prevede

- una sorgente meccanica di onde P ed S disposta in superficie
- 1 o 2 ricevitori (geofoni) ubicati all'interno del foro di sondaggio in corrispondenza della verticale da esaminare, collegati ad un sistema di acquisizione (sismografo)
- trigger ed eventuale dispositivo di orientazione dei geofoni.

Nella fase di perforazione del sondaggio il foro viene temporaneamente sostenuto con fanghi bentonitici o tubi di prerivestimento (*camicie*), per ridurre l'effetto di disturbo del terreno. Successivamente Il foro viene rivestito con un tubo di PVC, riempiendo accuratamente lo spazio tra foro e tubo con malta a ritiro controllato (*cementazione*) in modo da garantire la perfetta aderenza tra tubo e terreno. Se non si effettuata una corretta cementazione (problema particolarmente sentito operando in terreni granulari), durante la prova DH le registrazioni risulteranno ricche di alte frequenze. Per eseguire una

cementazione efficace è buona regola eseguirla dal basso, mediante tubi che iniettano la malta in pressione nell'intercapedine, piuttosto che per gravità. Prima di effettuare la prova DH occorre far trascorrere un tempo adeguato per il ritiro della malta in modo che sia garantita l'aderenza tubo-terreno.

Generalmente la sorgente delle onde S è costituita da una longarina metallica o da una trave di legno con estremità di acciaio o da una trave di c.a. mantenuta aderente alla superficie del terreno. Per la generazione delle onde P è invece utilizzata una piastra di acciaio.

Il sistema di ricezione si compone di uno o due ricevitori, ciascuno dei quali costituito da contenitore cilindrico contenente una terna di trasduttori di velocità orientati secondo le componenti di una terna cartesiana ortonormale, in modo che uno sia orientato secondo la lunghezza del contenitore (trasduttore verticale) e gli altri ad esso perpendicolari (trasduttori orizzontali). I trasduttori devono possedere appropriate caratteristiche di frequenza e sensitività. È opportuno che il sistema di ricezione sia dotato di un dispositivo per controllare l'orientazione dei trasduttori rispetto alla sorgente (orientamento assoluto).

Il trigger è un dispositivo dotato di sensore (inerziale, di spostamenti, di velocità, d'accelerazione etc.) collegato al sistema di acquisizione dati, che permette di far partire la registrazione del segnale sismico acquisito dai geofoni nell'istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. Il trigger è in genere realizzato mediante un geofono di superficie posizionato in prossimità della sorgente o mediante un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il martello colpisce la sorgente.

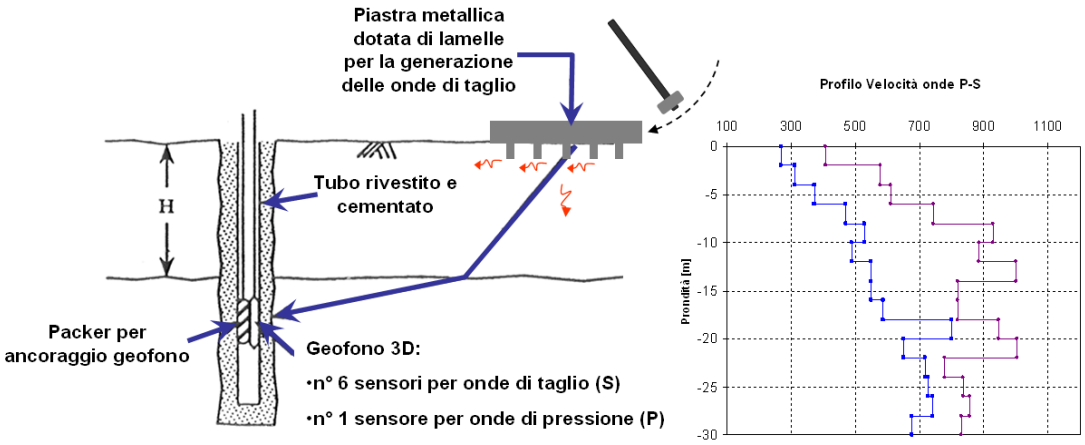
Il sistema di acquisizione e registrazione dati è un sistema multicanale in grado di registrare le forme d'onda e di conservarle in memoria di massa È collegato a ciascuno dei tre trasduttori di ciascun ricevitore e al sensore del trigger.

Le modalità operative prevedono:

- la predisposizione del piano d'appoggio delle sorgenti togliendo le asperità e rendendo la superficie liscia eventualmente mediante sabbia;

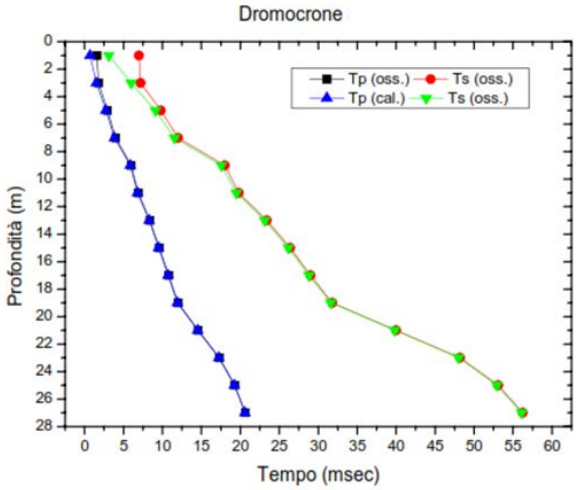
- la sistemazione della sorgente delle onde di taglio ad una distanza dal foro compresa tra 1,5 m e 2,5 m in modo che gli estremi siano equidistanti da esso e orientata in direzione ortogonale ad un raggio uscente dall'asse del foro del sondaggio;.
- Il collegamento dei ricevitori tra di loro ad una distanza di 1÷3 m in modo da impedirne la rotazione relativa;
- che i ricevitori siano assicurati alle pareti del tubo di rivestimento;
- che la sorgente di onde S venga colpita a destra e a sinistra, e la sorgente di onde P verticalmente e, allo stesso tempo, inizi la registrazione del segnale tramite trigger e ricevitori;

Eseguite le registrazioni, la profondità del ricevitore viene modificata (generalmente di 1,0 ÷1,5 m) e la procedura ripetuta.



Schema d'acquisizione prova Down-Hole

La prima fase dell'elaborazione prevede la correzione dei tempi di tragitto (t_{corr}) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde. Successivamente, si costruisce il grafico dei tempi di tragitto in funzione della profondità z, sia per le onde P, che per le onde S. La velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di



terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

Determinati i sismo-strati, si ottengono la densità media, funzione della velocità e della profondità, il coefficiente di Poisson, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica, la velocità media di propagazione delle onde di taglio V_{S30}.

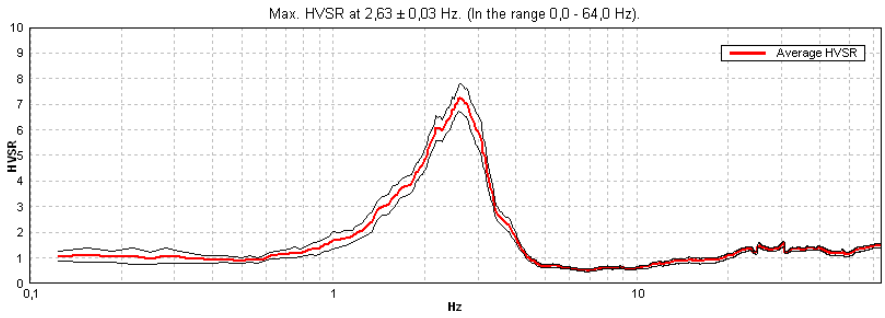
4.6.2 Indagini tromografiche (HVSN)

Per stimare il parametro V_{s30} al fine di caratterizzare i terreni dal punto di vista sismico secondo la normativa vigente in Italia (OPCM 3274; DM 14/09/2005, DM 14/01/2008 Norme Tecniche per le Costruzioni) si prevede anche l'esecuzione di indagini tromografiche, basate sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche, che naturali.

Questa tecnica rientra tra i metodi di sismica passiva e non ha bisogno di energizzazione esterna, poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo. Si hanno pertanto numerosi vantaggi rispetto alle metodologie sismiche di tipo attivo (MASW , Rifrazione, Down-Hole) tra i quali:

- le acquisizioni di sismica passiva difficilmente vengono "sporcate" da interferenze esterne poiché sfruttano come sorgente quella porzione del segnale sismico che altre tecniche considerano un disturbo.
- non necessitando di alcuna energizzazione esterna al sistema tali indagini possono raggiungere con facilità profondità dell'ordine del centinaio di metri.
- non richiedono più di un operatore e sono molto più veloci rispetto alle comuni tecniche sismiche.

Ovviamente, la sismica passiva non è in grado di fornire il dettaglio di una sismica a rifrazione o di una prova Down-Hole nelle applicazioni stratigrafiche, tuttavia è molto utile per una rapida individuazione del substrato sismico nelle problematiche legate alla risposta di sito.



In particolar modo con la tecnica a "Stazione Singola" viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (il cosiddetto metodo HVSR ovvero "Horizontal to Vertical Spectral Ratios – *Nakamura, Y. - 1989*). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (***f***) di questa vibrazione. Poiché è noto che in generale esiste una relazione semplice fra la frequenza ***f***, lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante la formazione di base (*bed-rock*) e la velocità media (Vs) delle onde simiche nel sottosuolo (ricavata per esempio dai metodi con antenna), attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato.

L'indagine consiste nella misurazione, e nella successiva elaborazione, del microtremore ambientale nelle sue tre componenti spaziali (x, y, z, oppure. E-W, N-S e Up-Down) a varie frequenze.

Per l'Analisi spettrale delle tracce e la modellazione viene utilizzato uno specifico software dedicato. Dall'analisi delle componenti spettrali delle tracce registrate è possibile:

- ricavare la frequenza fondamentale (o di risonanza) del sito;
- ottenere un'interpretazione del profilo stratigrafico-sismico ad elevata profondità con stima sulla profondità del *bed-rock* (substrato sismico o litologico) e del parametro Vs_{30} (velocità media delle onde S – di taglio – nei primi 30 metri di profondità).

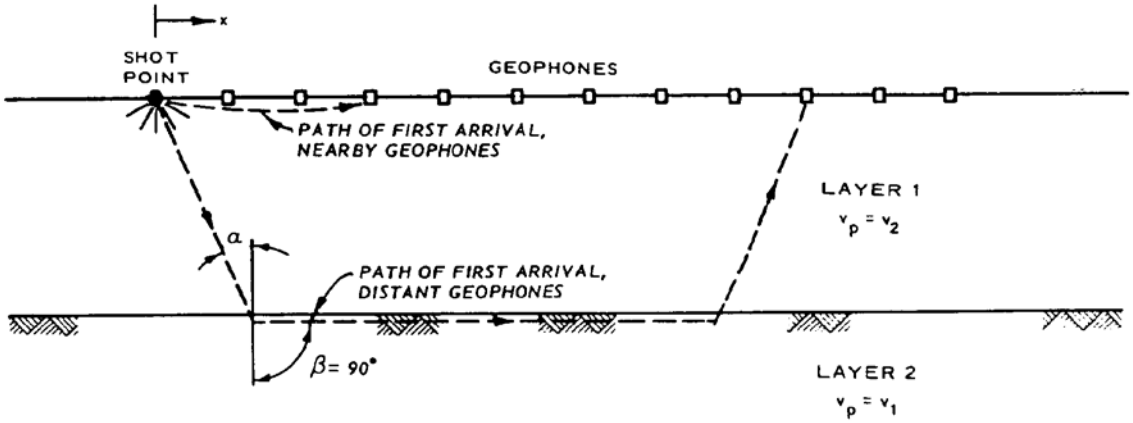
4.6.3 Prova sismica a rifrazione

Il rilievo sismico a rifrazione di onde P è un metodo di indagine basato sulla misura dei tempi di percorso che le onde elastiche, generate nel terreno in un punto-sorgente,

impiegano per raggiungere dei ricevitori (geofoni) disposti sulla superficie del terreno ed allineati con il punto di energizzazione. La distanza tra i geofoni e quella del punto di energizzazione sono scelte in base allo spessore ed ai tipi di materiale che si vogliono indagare.

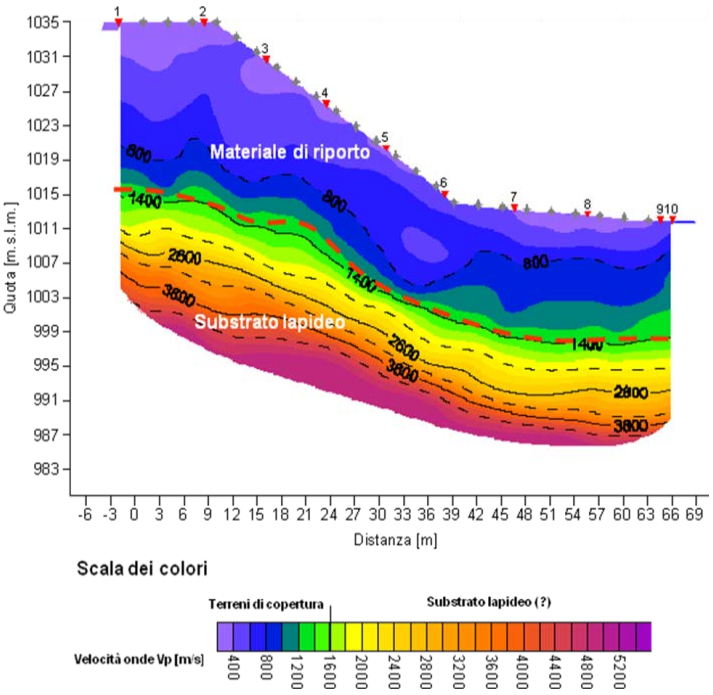
Le onde elastiche che si propagano in profondità e vengono in parte deviate (rifratte) lungo l'interfaccia che separa due mezzi a differente impedenza acustica (V1, V2) ed in parte proseguono verso il basso finché l'energia viene completamente assorbita dal mezzo in cui si propaga.

L'effetto di queste onde è la formazione di vibrazioni che vengono convertite in un segnale elettrico che, debitamente amplificato, viene riprodotto su monitor e memorizzato su supporto informatico.



Con i tempi di percorso rilevati mediante i geofoni e le distanze degli stessi dai punti di energizzazione si tracciano dei diagrammi tempi-distanze (dromocrone) che permettono di calcolare sia la velocità di propagazione delle onde di compressione P, sia la profondità e lo spessore dei terreni che sono stati attraversati dalle onde sismiche. L'interpretazione delle dromocrone consente di ricavare delle sezioni sismiche che schematizzano la distribuzione della velocità in funzione della profondità.

Dall'analisi delle dromocrone è possibile definire il numero dei sismo-strati presenti nel sottosuolo. E' importante sottolineare che la sismica a rifrazione funziona solo per velocità crescenti.



L'interpretazione per la risoluzione geometrica dei sismo-strati (profondità e velocità) si avvale di diverse metodologie di calcolo dalle più semplici procedure dirette (Hagedoorn, 1959; Barry,1967), seguendo le leggi generali dell'ottica, a quelle più complesse sia 1D che 2D che elaborano i dati mediante la tecnica del GRM (Palmer, 1980), del Ray-tracing o della tomografia (Hampson & Russell,1984; Olsen, 1989).

La finalità della tomografia è la dettagliata esplorazione del modello di distribuzione della velocità in un mezzo. Essa si basa sui primi arrivi ottenuti per set plurimi di coppie sorgente-ricevitore: la sola limitazione è quella che i raggi sismici formino una rete completa e cioè, idealmente, ciascun punto del mezzo investigato dovrebbe essere attraversato dai raggi in tutte le direzioni.

4.6.4 Indagini MASW

Il metodo MASW analizza la propagazione delle onde di Rayleigh indotte da una sorgente impulsiva o naturalmente presenti nel sottosuolo. In un mezzo verticalmente eterogeneo, la propagazione delle onde di Rayleigh è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse lunghezze d'onda. Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione, e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente. La curva di dispersione ottenuta elaborando i dati derivanti dalle indagini sismiche col metodo

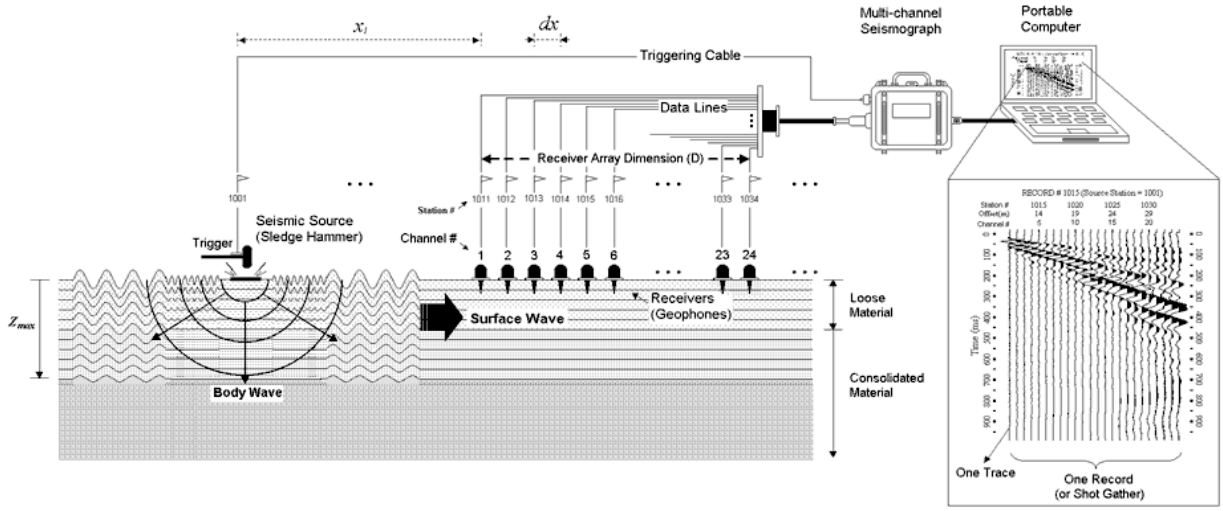
MASW è una curva apparente, derivante dalla sovrapposizione delle curve relative ai vari modi di vibrazione, e che per i limiti indotti dal campionamento non necessariamente coincide con singoli modi nei diversi intervalli di frequenza campionati.

Il processo di caratterizzazione può essere suddiviso in tre fasi :

1) Acquisizione dati [attiva (MASW) e passiva (Re.Mi)]
2) Elaborazione dati (analisi spettrale)
3) Inversione dei dati e valutazione del profilo di rigidità con calcolo del VS_{30}

Tra le diverse tecniche di processing per estrarre dai sismogrammi le caratteristiche dispersive del sito, la metodologia più diffusa è l'analisi spettrale in dominio f-k (frequenza-numero d'onda). I dati sismici registrati vengono sottoposti a una doppia trasformata di Fourier che consente di passare dal dominio x-t (spazio tempo) al dominio f-k.

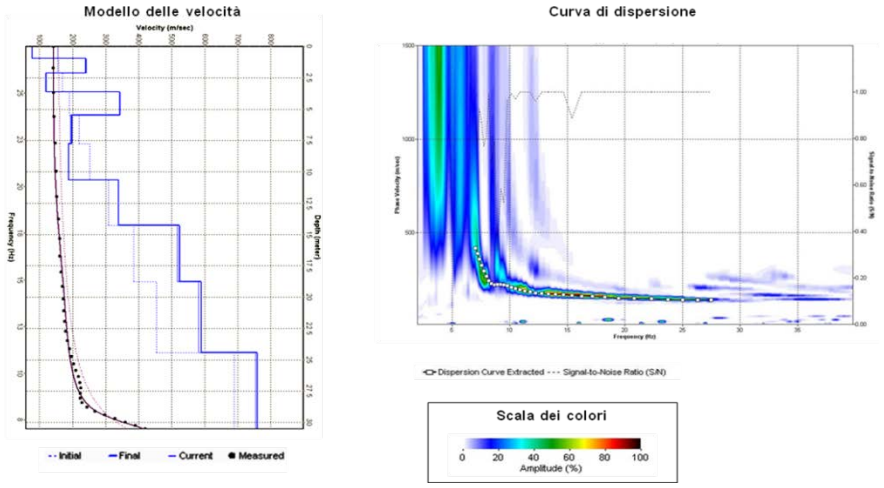
La velocità delle onde di Rayleigh è associata ai massimi dello spettro f-k; si può ottenere facilmente una curva di dispersione individuando ad ogni frequenza il picco spettrale, al quale è associato un numero d'onda k e quindi una velocità delle onde di Rayleigh V_R, determinabile in base alla teoria delle onde dalla relazione $V_R(f) = 2\pi f/k$.



Schema di acquisizione dati MASW

Riportando le coppie di valori (V_R,f) in un grafico, si ottiene la curva di dispersione utilizzabile nella successiva fase di inversione. La fase di inversione deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo schematizzato come un mezzo

(visco)-elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. Il processo di inversione è iterativo e termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione sintetica).



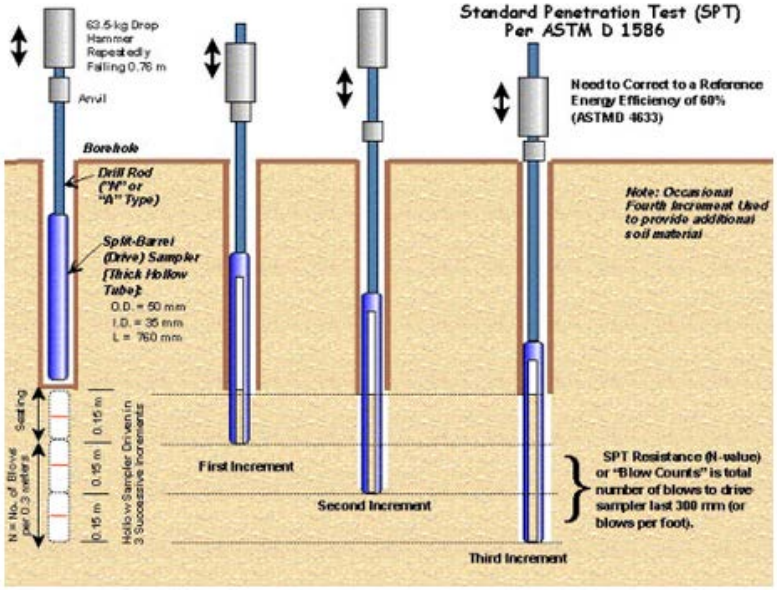
Curva di dispersione (analisi in frequenza) e modello di inversione con valutazione del profilo di velocità

4.7 Indagini Geotecniche in sito

4.7.1 Prova Penetrometrica Dinamica SPT

La Prova Penetrometrica Dinamica SPT.(Standard Penetration Tetst) è la prova in sito più diffusa ed utilizzata per la sua semplicità operativa, il basso costo ed una vasta letteratura per l'interpretazione dei risultati.

Con tale sperimentazione, che si esegue durante la perforazione, viene determinata la resistenza offerta dal terreno alla penetrazione dinamica di un campionatore infisso a partire dal fondo del foro di sondaggio. Subordinatamente è possibile prelevare piccoli campioni di terreno disturbati destinati in



genere al riconoscimento macroscopico e alla determinazione della composizione granulometrica.

La prova consiste nel registrare il numero di colpi necessari per far penetrare di 45 cm nel terreno a fondo foro un tubo campionatore di dimensioni standard, collegato alla superficie mediante batteria di aste in testa alle quali agisce un maglio del peso di 63.5 kg che cade liberamente da un'altezza di 0.76 m.

Si utilizzano le seguenti attrezzature standard:

- aste d'infissione del diametro esterno 50 mm e peso di 7 kg/m;
- testa di battuta di acciaio avvitata sulle aste;
- maglio di acciaio di 63.5 kg;
- dispositivo automatico che consente la caduta del maglio da un'altezza di 0.76 m;
- centratore di guida per le aste fra la testa di battuta e il piano campagna.
- campionatore standard (detto Raymond dalla società che lo ha introdotto per prima). Si tratta di un tubo carotiere avente diametro esterno di 51 mm, spessore 16 mm e lunghezza complessiva comprendente scarpa e raccordo alle aste di 813 mm.
- nei terreni ghiaiosi la scarpa del carotiere viene sostituita da una punta conica di diametro 51 mm, angolo 60°.

Durante la prova vengono misurati:

- il numero di colpi di maglio **N1** necessari a provocare l'avanzamento del campionatore per i primi 15 cm, assunti come tratto di "avviamento";
- il numero di colpi di maglio **N2** che provoca la penetrazione del campionatore nei successivi 15 cm;
- il numero di colpi di maglio **N3** necessari per gli ultimi 15 cm di avanzamento.

Si assume come resistenza alla penetrazione il valore:

$$N_{SPT} = N2 + N3$$

In definitiva, l'indice N_{SPT} è una misura indiretta dell'energia necessaria a determinare la rottura del terreno.

Dato il carattere empirico dei metodi di interpretazione dei risultati della prova SPT, è necessario seguire in modo scrupoloso le procedura di riferimento:

- ASTM D1586 Standard Method for Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soil
- ISSMFE Tech. Committee 1988(Standard Penetration Test (SPT) International Reference Test Procedure

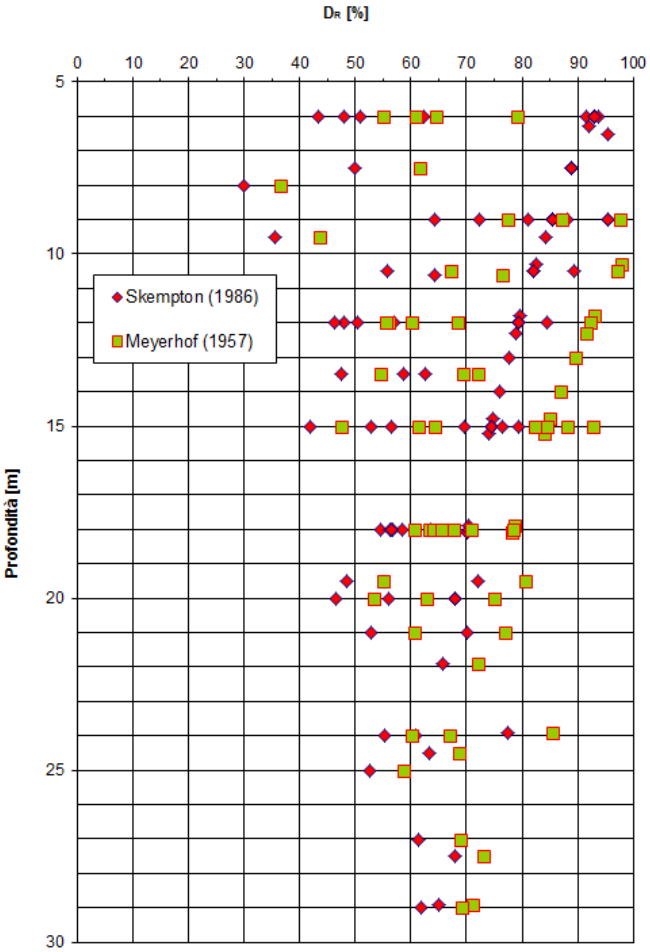
Vi sono numerose correlazioni tra la resistenza alla penetrazione (N_{SPT}) e i parametri geotecnici dei terreni sia granulari che coesivi:

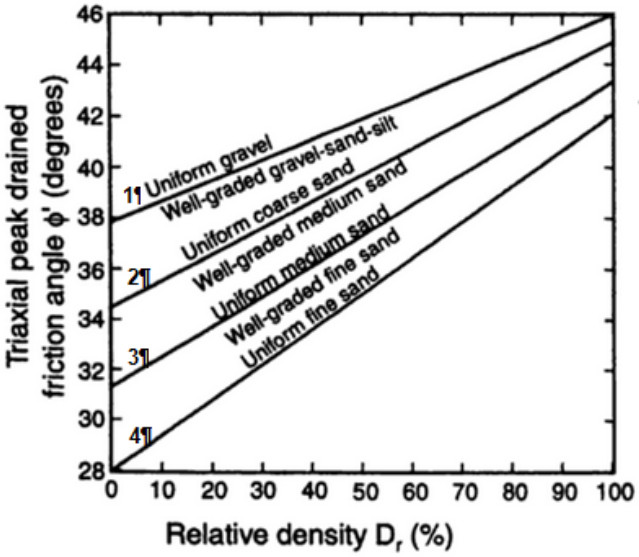
Per i terreni granulari, tra le correlazioni più attendibili tra la resistenza alla penetrazione (N_{SPT}) ed alcuni parametri geotecnici si segnalano:

- Correlazione di Hotz & Gibbs

  Permette di determinare la densità relativa dei terreni granulari D_R mediante la relazione tra la resistenza alla penetrazione e la pressione verticale efficace.
- Correlazione proposta da Skempton (1986).

  Considera il numero di colpi normalizzati per una tensione verticale efficace di 100





kPa ed un rendimento del 60%.

- Correlazione di De Mello
  Permette di ricavare l'angolo d'attrito in funzione dello sforzo verticale efficace.
- Le correlazioni di Schmertmann
  Pongono in relazione l'angolo d'attrito effettivo con la densità relativa in funzione di differenti granulometrie, utilizzando sia i valori della densità relativa Dr elaborati con il metodo di Hotz & Gibbs. che con il metodo di Terzaghi-Peck-Skempton.
- Correlazioni tra la resistenza alla penetrazione N_{SPT} e la compressibilità.

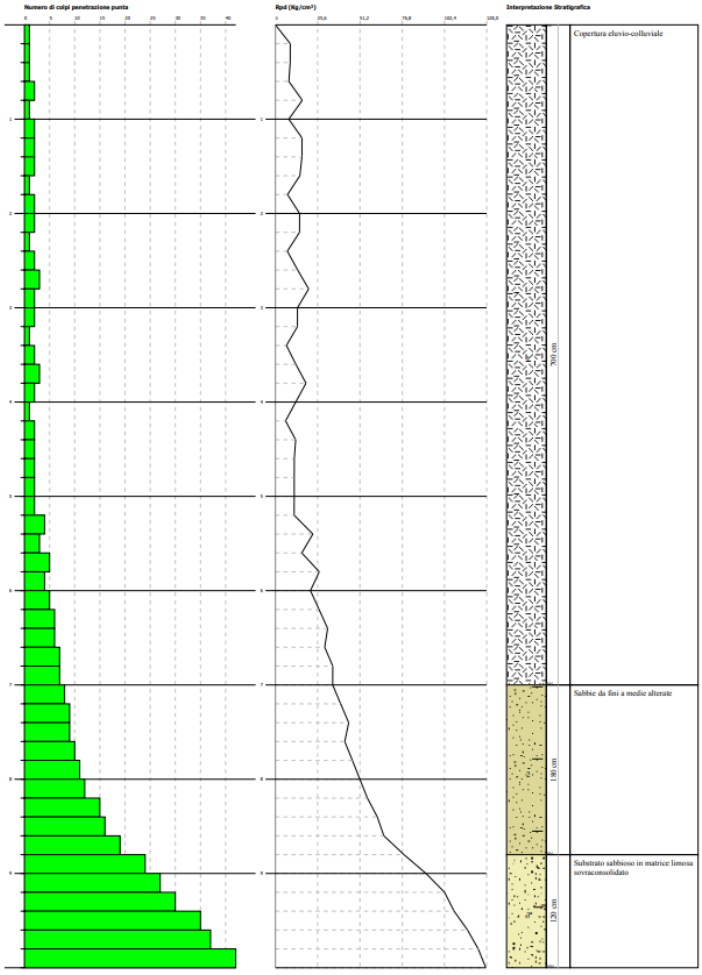
Per i terreni coesivi si utilizza in genere la correlazione di *Terzaghi - Peck* tra la resistenza alla penetrazione N_{SPT}, la consistenza e la resistenza non drenata Cu. La relazione tra N_{SPT} e Cu tuttavia si considera accettabile solo per argille sensitive, ossia per quelle argille per cui la sensitività A = Cui/ Cur (rapporto tra la coesione non drenata del campione indisturbato e coesione non drenata del campione rimaneggiato) varia da 4 a 8.
Le elaborazioni riguardano in genere la diagrammazione dei valori della densità relativa e dell'angolo d'attrito in funzione dellla profondità z dal piano di campagna.

4.7.2 Prova Penetrometrica Dinamica Continua

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica (per tratti consecutivi δ) misurando il numero di colpi N necessari. La prova è molto utilizzata data la sua semplicità esecutiva, l'economicità e la rapidità di esecuzione. La sua elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di "catalogare e parametrizzare" il suolo attraversato con un'immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici per la caratterizzazione stratigrafica.
Elementi caratteristici del penetrometro dinamico sono:

- Il peso massa battente M
- L'altezza libera caduta H
- La punta conica: diametro base cono D, area base A (angolo di apertura α)
- L'avanzamento (penetrazione) δ

Tra i vari tipi di penetrometri disponibili, nel presente caso si farà riferimento al penetromero dinamico medio (DPM) in cui il peso della massa battente M è compreso nel seguente intervallo: 10< M < 40.



Con tale attrezzatura è possibile indagare i terreni fino a profondità maggiori di 20-25 m. Nello specifico, tali prove verranno utilizzate per indagare i terreni di fondazione delle linee tramviarie, in alternativa all'apertura di trincee esplorative nelle aree dove risulta elevata l'interferenza con il traffico cittadino, con ovvie ripercussioni negative qualora si procedesse all'apertura delle suddette trincee.

I risultati ottenuti con la prova possono essere correlati in vari modo, in dipendenza degli scopi che si perseguono:

- Correlazione con il valore $\mathbf{N_{SPT}}$ ottenuto tramite la Prova Penetrometrica Dinamica SPT
- Valutazione resistenza dinamica alla punta Rpd tramite le note Formule Olandesi

Le elaborazioni vengono effettuate mediante programmi di calcolo automatici e permettono inoltre di utilizzare i dati ottenuti con le prove penetrometriche dinamiche continue per estrapolare utili informazioni geotecniche e geologiche. In particolare consente di ottenere informazioni su:

- l'andamento verticale e orizzontale degli intervalli stratigrafici,
- la caratterizzazione litologica delle unità stratigrafiche,

- i parametri geotecnici in funzione dei valori del numero dei colpi e delle resistenza alla punta.

Tra le correlazioni con le proprietà geotcniche dei terreni incoerenti, quali quelli riscontrabili lungo la maggior parte delle linee tramviarie nei primi metri al di sotto del piano di campagna si segnalano:

- il potenziale di liquefazione dei terreni (prevalentemente sabbiosi).
- Correzione con N_{SPT} in presenza di falda
- il valore dell'angolo d'attrito interno
- la densità relativa
- il modulo di Young ed il modulo di compressione edometrica
- il modulo di Poisson
- la velocità delle onde di taglio

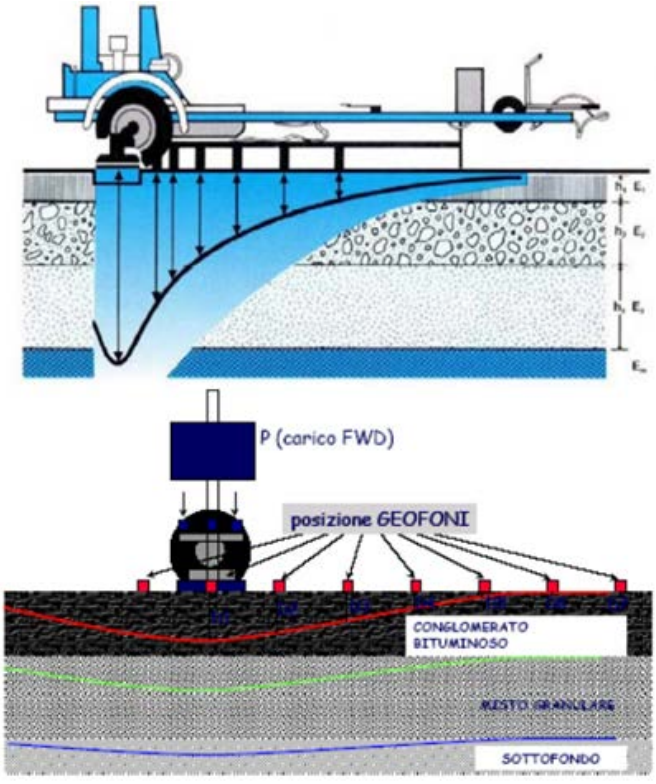
per i terreni coesivi::

- coesione non drenata
- il modulo di Young

4.7.3 Prova con Deflettometro a massa battente FWD

Considerata la difficoltà di eseguire prove di carico su piastra sul fondo dello scavo su cui verrà posata la sede tramviaria, che comporterebbero l'apertura di trincee in tratti di strada in esercizio, con conseguenti disagi al traffico, si ritiene più opportuno eseguire delle indagini mediante il Deflettometro a massa battente (**FWD**).

La prova FWD è un metodo di indagine non distruttivo che viene impiegato per la misurazione in sito delle proprietà



Schema di funzionamento del test FWD - Falling Weight Deflectometer

strutturali di una pavimentazione flessibile.

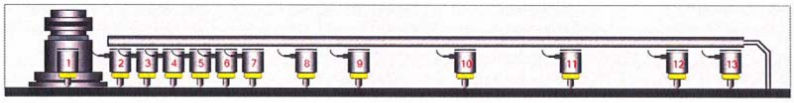
Tale metodo consiste nel misurare la deflessione verticale della pavimentazione indotta da un carico impulsivo generato dalla caduta di una massa su una piastra posata sulla superficie dello strato superiore della sovrastruttura.

Mediante tale strumentazione è possibile mantenere costante l'entità del carico applicato, riuscendo peraltro a raggiungere valori tali da poter essere paragonati a quelli di esercizio delle vetture tranviarie ed eliminando il problema del sistema di riferimento della misura di spostamento. Valori di deflessione modesti (inferiori ai 900 μm per carico massimo di 50 kN) per armamento tradizionale corrispondono a buone condizioni di portanza del sottofondo e non producono fenomeni di dissesto della pavimentazione adiacente che pertanto conserva caratteristiche di regolarità adeguate al transito in sicurezza. Al contrario valori elevati di deflessione della prova FWD, superiori ai 1000 μm, coincidono con aree della pavimentazione caratterizzate da maggior dissesto oppure non ancora soggette a degrado ma che presumibilmente saranno oggetto di futuro rapido deterioramento a causa della scarsa portanza mostrata.

Esistono due tipologie di deflettometri:

1. Falling Weight Deflectometer, (carico fino a 120kN) viene utilizzata per l'analisi di pavimentazioni stradali secondo le indicazioni del U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration
2. Heavy Weight Deflectometer, (carico fino a 250kN) viene utilizzata prevalentemente per pavimentazioni aeroportuali, dove i carichi raggiunti sono maggiori e dove perciò le pavimentazioni hanno una rigidezza superiore, secondo le indicazioni del Federal Aviation Administration. E' da sottolineare come il valore di 250 kN non sia casuale, ma rappresentativo del carico prodotto d

Il carico applicato viene misurato attraverso una cella di carico posizionata in corrispondenza della piastra circolare che insiste sulla superficie della pavimentazione in esame.



Geofono	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
Distanza dal centro della piastra (cm)	0	20	30	40	50	60	70	90	110	150	190	230	250

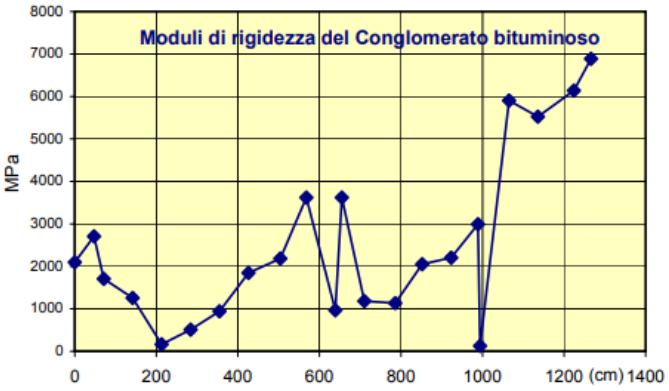
Schema della disposizione dei geofoni

Le deformazioni indotte dal carico vengono misurate per mezzo di una serie di geofoni posizionati lungo diversi punti

giacenti su un allineamento orizzontale, così da poter individuare il bacino di deflessione prodotto la momento dell' impatto della massa battente.

I valori della deflessione sono ottenuti, successivamente, integrando il segnale dell' accelerazione registrata da ogni singolo geofono con una precisione pari a 0,5 ± 1 µm.

I dati relativi alle misure del bacino di deflessione e della misura del picco di carico applicato vengono elaborati con il sistema di "back calculation" al fine di valutare i moduli di rigidezza dei singoli strati costituenti la pavimentazione stradale in esame. Noti gli spessori della pavimentazione, infatti, è possibile applicare la metodologia "*Deflection Basin Fit*" che combina la teoria Odemark con l' equazione di Boussinesq e sfrutta tecniche di integrazione numerica che consentono di calcolare per interazioni successive i moduli elastici dei singoli strati in cui è stata schematizzata la sovrastruttura.



Nel caso di pavimentazioni flessibili, i moduli ricavati corrispondono naturalmente alle condizioni climatiche (temperatura dell'aria e della pavimentazione) che si sono verificate durante l'esecuzione della prova. Per interpretare correttamente le misure della prova è necessario quindi effettuare ulteriori misure ed in particolare:

- rilievo dello spessore degli strati che compongono la pavimentazione, generalmente tramite carotaggio o pozzetto esplorativo;
- rilievo della temperatura dell'aria e dello strato superficiale (soprattutto se questo è in conglomerato bituminoso).

4.7.4 Prova di carico su piastra

La prova di carico su piastra viene usata principalmente per i problemi inerenti le pavimentazioni stradali e in alcuni casi per problemi inerenti le fondazioni (determinazione della costante di sottofondo). Viene utilizzata per il controllo dei terreni di sottofondo, dello strato di fondazione e dello strato di base delle pavimentazioni.

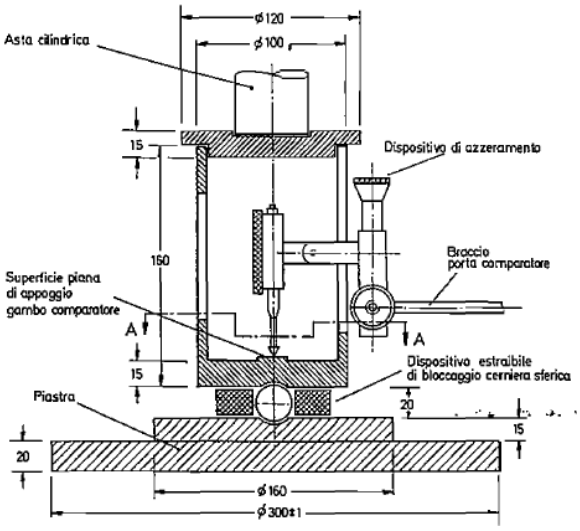
La prova permette di misurare convenzionalmente la capacità portante di un terreno di sottofondo, di uno strato di fondazione, di uno strato di rilevato attraverso la

determinazione del Modulo di deformazione M_D. Quest'ultimo si ricava dalla relazione

$$M_D = \Delta p/\Delta s \times D$$

con:

- Δp incremento di carico unitario trasmesso dalla piastra alla superficie caricata
- Δs corrispondente incremento di cedimento della superficie caricata
- D diametro della piastra



La normativa di riferimento adottata in Italia è:

- CNR B.U. n. 146 (1992) Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M'_d mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare

La prova viene eseguita con doppio ciclo al fine di determinare con il primo ciclo il moduilo MD convenzionalmente indicativo della portanza e con il secondo ciclo il modulo M'D che consente di valutare, mediante il rapporto M_D/M'_D, il grado di costipamento dello strato in esame.

Il carico viene applicato con un martinetto idraulico poggiato su una piastra rigida, usando un opportuno contrasto. Le misure degli abbassamenti della piastra vengono eseguite con almeno tre comparatori sorretti da un traliccio avente gli appoggi sufficientemente lontani dalle aree caricate. La piastra ha diametro pari a 30 cm e spessore non minore di 20 mm. Per la determinazione della costante di sottofondo si utilizza una piastra di diametro pari a 76 cm.

La Norma stabilisce le sequenze di carico e le modalità di elaborazione dei risultati.

Primo ciclo

- Per il terreno di sottofondo incrementi di 0,05 N/mm^2 fino a raggiungere la pressione di 0,2 N/mm^2;
- per strati di fondazione e di base incrementi di 0,1 N/mm^2 fino a raggiungere, rispettivamente, 0,35 kg/cm^2 e 0,45 N/mm^2.+

Secondo ciclo

- Per il terreno di sottofondo incrementi di 0,05 N/mm^2 fino a raggiungere la pressione di 0,15 N/mm^2;
- per strati di fondazione e di base incrementi di 0,1 N/mm^2 fino a raggiungere, rispettivamente, 0,25 kg/cm^2 e 0,35 N/mm^2.

I risultati della prova si riportano sotto forma di diagrammi aventi in ascisse le pressioni ed in ordinata i cedimenti.

I moduli di deformazione M_D e M'_D, corrispondenti al primo ed al secondo ciclo di carico rispettivamente, vengono determinati applicando la relazione prima riportata nella quale Δp e $\Delta' p$ si fissano pari a 0,1 N/mm^2 e si scelgono normalmente nei seguenti intervalli:

- per terreno di sottofondo Dp compreso tra 0,05 e 0,15 N/mm^2
- per lo strato di fondazione Dp compreso tra 0,15 e 0,25 N/mm^2
- per lo strato di base Dp compreso tra ,025 e ,035 N/mm^2.

4.7.5 Misura della densità in sito

Misura della densità in sito esprime il rapporto tra il peso secco di un terreno o di un materiale nella sua sede ed il suo volume totale. Le principali tecniche esecutive indicate dalla Norma CNR anno VI n. 22 sono:

a) metodo del cilindro. Applicabile per i terreni coesivi e a grana fine (passante al setaccio di 2 mm);

b) metodo del volumometro a membrana. Non applicabile per terreni molli, che si deformano sotto l'azione di una piccola pressione;

c) metodo del volumometro a sabbia. Applicabile in quei terreni in cui la dimensione massima dei granuli non sia superiore ad un quinto del diametro del foro della piastra;

Il metodo del volumometro a sabbia, che sarà utilizzato nell'ambito delle presenti indagini prevede l'impiego:

- di un volumometro a sabbia, costituito da una piastra di base forata al centro, un cono ed un contenitore.
- sabbia pulita ed asciutta passante al setaccio da 2 mm e trattenuta da quello di apertura 0,4 mm (sabbia calibrata). Preventivamente occorre determinare la densità della sabbia che si utilizza. Questa determinazione va ripetuta per ogni fornitura di sabbia.

La prova prevede il riempimento di un foro di controllo con sabbia calibrata. Sistemata una piastra circolare in modo che aderisca bene sul terreno in esame, si scava il foro raccogliendo il materiale smosso. Tramite un boccione pieno di sabbia, precedentemente pesato, si riempie in foro scavato.

Dalle successive pesate della sabbia residua e del materiale estratto (umido e secco), si ottengono sia il peso di volume del terreno in condizioni di umidità naturale, il volume del foro.

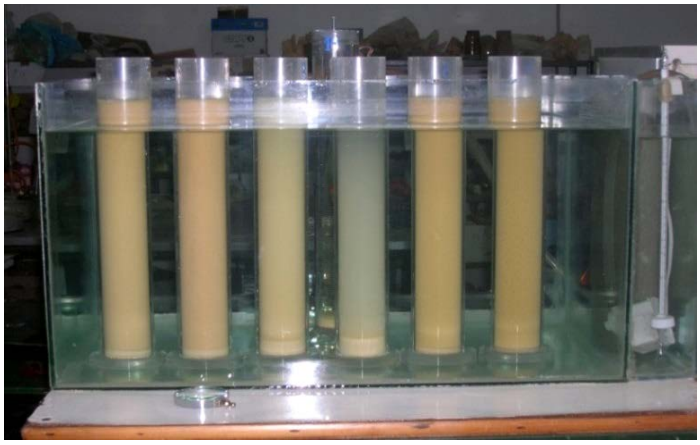
Dal rapporto tra queste due grandezze che il peso di volume secco γ_d. Quest'ultimo valore, confrontato con la densità massima ottenuta in laboratorio mediante prova di costipamento, consente di determinare la percentuale di compattazione ottenuta in cantiere.

4.8 Prove di laboratorio

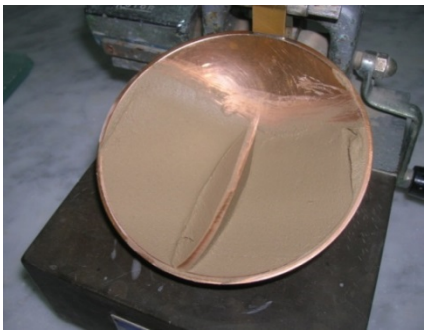
4.8.1 Terreni di fondazione

Sui campioni prelevati nel corso dei sondaggi si procederà all'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio, finalizzate alla caratterizzazione geotecnica dei terreni e delle rocce di fondazione, con particolare riferimento ai parametri di resistenza e di deformabilità.

Sui **terreni a grana fina** si effettueranno cicli completi di prove di identificazione comprendenti:



- il riconoscimento macroscopico (Raccomandazioni AGI);
- la determinazione del contenuto naturale d'acqua (ASTM D 2216,
- la determinazione del peso dell'unità di volume (Raccomandazioni AGI)
- la determinazione del peso specifico dei grani;
- analisi granulometriche mediante setacciatura e sedimentazione (ASTM D 422);
- la determinazione dei limiti di consistenza (ASTM D4318).



Per la determinazione dei parametri di deformabilità e di resistenza a taglio si prevedono:

- prove di rottura per compressione semplice a dilatazione trasversale libera (ASTM D2166);
- prove di taglio diretto consolidate drenate (ASTM D3080);
- prove di compressione triassiale consolidate drenate e consolidate non drenate con misura delle pressioni neutre;
- prove di compressione edometrica ad incremento di carico (ASTM D3080).

Sui campioni di roccia lapida, oltre a prove di identificazione, saranno eseguite:

- prove di compressione semplice;
- prove di carico puntuale.

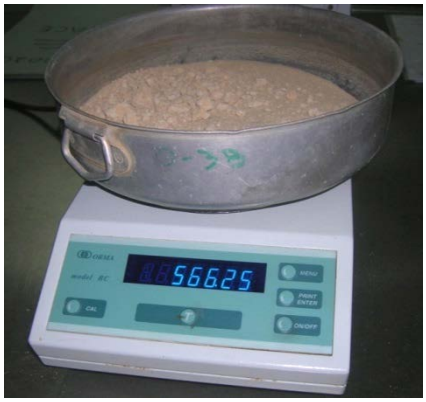
Ai sensi della vigente normativa di settore, le prove di laboratorio sui terreni saranno effettuate da un Laboratorio Autorizzato, principalmente in accordo con la Normativa ASTM e le raccomandazioni AGI:

Prove di laboratorio saranno altresì eseguite su campioni di **roccia lapidea** prelevati dalle cassette catalogatrici dei sondaggi e da affioramenti presenti nelle aree del tracciato in trincea, con particolare riferimento ai parametri di resistenza e di deformabilità. Sono previste

- prove di compressione semplice e triassiale con misura del modulo di Young tangente e secante e del coefficiente di Poisson,
- prove di carico puntuale
- prove di taglio lungo i giunti e piani di discontinuità con apparecchiatura tipo Hoek emisura dei profli di scabrezza.

Le prove di laboratorio saranno eseguite da un Laboratorio Autorizzato in accordo con la Normativa ISRM,

4.8.2 Materiali da costruzione



Per la caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali da costruzione per sottofondo e rilevato si provvederà all'esecuzione delle seguenti prove di laboratorio

- determinazione del contenuto naturale d'acqua (ASTM D 2216,
- la determinazione del peso specifico dei grani;
- analisi granulometriche mediante setacciatura e sedimentazione (ASTM D 422);
- prova di costipamento AASHO Modificato (CNR Anno XII n. 69 – ASTM D698 – ASTM D1557)
- misura dell'Indice di portanza californiano CBR CNR UNI 10009)
  misura dell'equivalente in sabbia (CNR - anno VII n. 27)

Le prove di laboratorio saranno eseguite da un Laboratorio Autorizzato.

Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio si procederà alla **Classificazione delle terre** utilizzando la Classificazione AASHO - UNI 10006.

Classificazione generale	Terre ghiaio – sabbiose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 ≤ 35 %							Terre limo - argillose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 > 35 %					Torbe e terre organiche palustri
Gruppo	A 1		A 3	A 2				A 4	A 5	A 6	A 7		A 8
Sottogruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Analisi granulometrica Frazione passante allo staccio 2 UNI 2332 (10) % 0,4 UNI 2332 (40) % 0,075 UNI 2332 (200) %	 ≤ 50 ≤ 30 ≤ 15	 - ≤ 50 ≤ 25	 - > 50 ≤ 10	 - - ≤ 35	 - - ≤ 35	 - - ≤ 35	 - - ≤ 35	 - - > 35	 - - > 35	 - - > 35	 - - > 35	 - - > 35	
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0,4 UNI 2332 Limite liquido Indice di plasticità	 - ≤ 6		 - N. P.	 ≤ 40 ≤ 10	 > 40 ≤ 10 max	 ≤ 40 > 10	 > 40 > 10	 ≤ 40 ≤ 10	 > 40 ≤ 10	 ≤ 40 > 10	 > 40 > 10 ($I_p \leq w_L$-30)	 > 40 > 10 ($I_p > w_L$-30)	
Indice di gruppo	0		0	0		≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20		
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa				Limi poco compressibili	Limi fortemente compressibili	Argille poco compressibili	Argille fortemente compressibili mediamente plastiche	Argille fortemente compressibili fortemente plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono			Da mediocre a scadente									Da scartare come sottofondo
Azioni del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna o lieve			Media				Molto elevata		Media	Elevata	Media	
Ritiro o rigonfiamento	Nullo			Nullo o lieve				Lieve o medio		Elevato	Elevato	Molto elevato	
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa						Scarsa o nulla			
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto. Incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo. Aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla				Reagiscono alla prova di scuotimento*. Polverulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido		Reagiscono alla prova di scuotimento*. Tenaci allo stato asciutto. Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido			Fibrosi di color bruno o nero. Facilmente individuabili a vista

* Prova di cantiere che può servire a distinguere i limi dalle argille. Si esegue scuotendo nel palmo delle mano un piccolo campione di terra satura d'acqua e comprimendolo successivamente fra le dita. La terra reagisce alla prova se, dopo lo scuotimento, apparirà sulla superficie un velo lucido di acqua libera, che scomparirà comprimendo il campione fra le dita

Saranno individuate le cave dove prelevare gli inerti per il confezionamento dei calcestruzzi. Su campioni allo scopo prelevati saranno eseguite le prove di pre-qualificazione come di seguito specificato:

- Esame petrografico (UNI EN 932-3)
- Analisi granulometrica per stacciatura (UNI EN 933-1)
- Determinazione del passante al setaccio 0,063 (UNI EN 933-1)
- Determinazione del coefficiente di appiattimento (UNI EN 933-3)
- Determinazione del coefficiente di forma (UNI EN 933-4)
- Misura dell'equivalente in sabbia (UNI EN 933-8)

- Determinazione del valore di blu (UNI EN 933-9)
- Prova Micro Deval (UNI EN 1097-1)
- Resistenza alla frammentazione mediante il metodo Los Angeles (UNI EN 1097-2)
- Determinazione della massa volumica in mucchio e dei vuoti intergranulari (UNI EN 1097-3)
- Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento degli aggregati fini (UNI EN 1097-6)
- Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento degli aggregati grossi (UNI EN 1097-6)
- Misura della resistenza al gelo (UNI 1367-1)
- Determinazione del contenuto di cloruri idrosolubili (UNI EN 1744-1)
- Determinazione del contenuto di solfati solubili in acido (UNI EN 1744-1)
- Determinazione del contenuto di zolfo (UNI EN 1744-1)
- Determinazione delle sostanze pericolose (UNI EN 1744-1)
- Determinazione del contenuto di sostanza organica (UNI EN 1744-1)
- Misura della resistenza a rottura degli aggregati grossi (4 provini), compresa la preparazione (UNI 8520-17)
- Determinazione del reattività alcali-silice (UNI 8520-22)

Tutte le sperimentazioni saranno eseguite da laboratorio Autorizzato ai sensi della vigente normativa.

4.9 Indagini per la caratterizzazione terre e rocce da scavo

Con l'entrata in vigore del Lgs 120/2017, che integra e sostituisce in alcune parti quanto stabilito dal D.M. 161/2012, si stabilisce di dovere utilizzare la maggior parte di tali materiali nell'ambito del cantiere ed in aree limitrofe, previa caratterizzazione secondo la vigente normativa di settore, limitando il trasporto a discarica solo di quella parte che risulterà inquinata ovvero non idonea.

Le principali novità introdotte dal DPR 120/2017 riguardano:

- la semplificazione delle procedure e fissazione di termini certi per concludere le stesse, anche con meccanismi in grado di superare eventuali situazioni di inerzia da parte degli uffici pubblici. Si evitano così i lunghi tempi di attesa da parte degli

operatori per la preventiva approvazione del piano di utilizzo delle terre e rocce da parte delle autorità competenti;

- procedure più veloci per attestare che le terre e rocce da scavo soddisfano i requisiti stabiliti dalle norme europee e nazionali per essere qualificate come sottoprodotti e non come rifiuti;
- una definizione puntuale delle condizioni di utilizzo delle terre e rocce all'interno del sito oggetto di bonifica, con l'individuazione di procedure uniche per gli scavi e la caratterizzazione dei terreni generati dalle opere da realizzare nei siti oggetto di bonifica;
- il rafforzamento del sistema dei controlli.

DM 161/2012 Terre e Rocce da scavo	
Dimensione dell'area	Punti di prelievo
Inferiore a 2.500 mq	Minimo 3
Tra 2.500 e 10.000 mq	3 + 1 ogni 2.500 mq
Oltre i 10.000 mq	7 + 1 ogni 5.000 mq

Al fine di adempiere alle prescrizioni dei citati decreti ministeriali, si prevede fin da ora la **caratterizzazione ambientale** di tutti i siti che saranno individuati all'interno del **Piano di Utilizzo delle terre e rocce da scavo**, ovvero dei **siti di destinazione finale**, individuati quali dimora definitiva dei materiali da scavo, nonché degli assi delle varie linee tramviarie previste in progetto.

Per l'accertamento dello stato di qualità ambientale del suolo, il prelievo di campioni da pozzetti esplorativi o sondaggi, le analisi di laboratorio e la stesura di rapporti tecnici e dell'elaborato relativo al "**Piano di utilizzo delle terre e rocce da scavo**" si farà riferimento al quadro normativo.

Il piano di campionamento di **tutti i siti di deposito** afferenti al "**Piano di utilizzo delle terre e rocce da scavo**" sarà effettuato mediante un campionamento sistematico su griglia con maglia di lato 50x50 m, avendo preventivamente considerato il tipo e le dimensioni del sito oggetto di intervento. Il numero dei punti di indagine secondo il criterio esemplificativo riportato nell'Allegato 2 al DM 161/2012 e succ. è il seguente:

Lungo l'asse principale di progetto, il campionamento sarà effettuato ogni 500 metri lineari, come previsto dal Regolamento DM 161/2012 e succ..

La profondità d'indagine sarà determinata in base alle profondità previste degli scavi. I campioni sottoposti ad analisi chimico-fisiche saranno:

- campione 1: da 0 a 1 m dal piano campagna;

- campione 2: nella zona di fondo scavo a 2 m;
- campione 3: nella zona intermedia tra i due (1 ÷ 2 m).

In merito alle "**Procedure di caratterizzazione chimico-fisiche e accertamento delle qualità ambientali**", il set analitico ricercato sarà quello previsto dalla short list della Tab.4.1 all'Allegato 4 del DM 161/2012 e succ., che si riporta di seguito.

Arsenico	Cadmio
Cobalto	Nichel
Piombo	Rame
Zinco	Mercurio
Idrocarburi C>12	Cromo totale
Cromo VI	Amianto
BTEX*	IPA*

Set analitico minimale (Tabella 4.1. Allegato 4 al DM 161/2012)

Sulle aree per le quali le analisi chimico-fisiche, eseguite in fase di progettazione, forniranno risultati non conformi alla colonna A della Tab. 1 dell'Allegato 5 alla Parte IV del D.Lgs 152/2006 e succ., sarà eseguita una nuova caratterizzazione in fase di esecuzione ai sensi dell'Allegato 8 al DM161/2012 e succ., limitatamente ai punti di indagine risultati non conformi.

Per quanto concerne le acque sotterranee, lungo il tracciato di progetto e nelle aree oggetto di deposito saranno rilevate le manifestazioni idriche (pozzi ad uso potabile, pozzi ad uso agricolo, sorgenti).

Sulla scorta delle possibili interferenze tra le attività di scavo e la falda acquifera, andranno eseguite indagini analitiche relativamente alla componente "ambiente idrico sotterraneo".

In merito alle modalità di campionamento per l'esecuzione dei pozzetti esplorativi, potranno essere utilizzati:

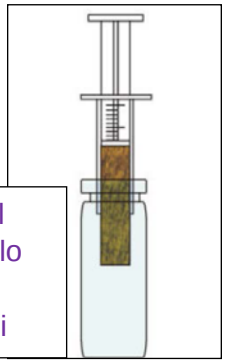
- mezzi manuali: cucchiai e pale, trivelle, tubi campionatori per profondità fino a 1 m;
- mezzi meccanici: escavatori a benna rovescia per profondità maggiori.

Al fine di non compromettere le caratteristiche ambientali dei campioni da prelevare e la

concentrazione di eventuali contaminanti, andrà attentamente controllata durante l'esecuzione dei pozzetti:

- l'assenza di perdite di olii, lubrificanti e altre sostanze dalle attrezzature utilizzate;
- predisporre un'area delimitata e impermeabilizzata per la decontaminazione delle attrezzature;
- decontaminare, usando acqua dell'acquedotto, alla fine di ogni perforazione sia gli attrezzi e gli utensili utilizzati in superficie, che quelli utilizzati in profondità nel pozzetto.

Per la formazione dei campioni per l'analisi dei composti non volatili si utilizzeranno i materiali prelevati dalle pareti e dal fondo dello scavo. La formazione del campione avverrà su un telo di materiale impermeabile (PE), in condizioni tali da evitare la variazione delle caratteristiche e la contaminazione del materiale. Il materiale che entra nella formazione del campione deve essere omogeneizzato sul telo impermeabile e prelevato sulla base dei metodi di quartatura per ottenere un campione rappresentativo dell'intero strato individuato.



Formazione del campione di suolo per l'analisi dei composti volatili

Vengono scartati in campo, dopo la quartatura, sia i materiali estranei (pezzi di vetro, rami, foglie), che i ciottoli con diametro > 2 cm.

Ogni campione è suddiviso in 3 aliquote:

- una per l'analisi ad opera del laboratorio incaricato;
- due da conservare, con modalità adeguate, di cui una per l'Ente di controllo (ARPA) e l'altra per un eventuale contraddittorio.

Le tre aliquote sono suddivise e introdotte in contenitori puliti (vasetti di vetro), sigillati individualmente e contrassegnati esternamente con un codice identificativo di punto di prelievo , intervallo di profondità, data e ora del

confezionamento, firma dell'addetto. Dopo la formazione il campione viene immediatamente trasferito in un contenitore a 4° di temperatura (borsa termica) e inviato entro 24 h al laboratorio.

Per la formazione dei campioni per l'analisi dei composti volatili si utilizzano le tecniche ASTM D4547/91 e EPA 5035/97, che permettono di recuperare il campione direttamente all'interno delle vials utilizzate per le analisi chimiche. Viene prelevata dal cuore della carota una piccola aliquota di terreno mediante un sub-campionatore costituito da una siringa in plastica. Il terreno viene poi estruso all'interno di una vial appositamente preparata.

In tutti casi di presenza di falda acquifera nel pozzetto esplorativo, si procederà ad acquisire un campione delle acque sotterranee mediante idoneo campionatore (siringa aspirante o bailer). Il campione così raccolto sarà conservato in contenitori sterili e trasferito in un contenitore a 4° di temperatura (borsa termica) e inviato entro 24 h al laboratorio.

5. RICERCA CAVITA'

5.1 Generalità

E' noto che il sottosuolo di Palermo è ricco di cavità di origine antropica a causa dell'intenso sfruttamento avvenuto nel corso dei secoli e fino agli inizi dello scorso secolo per il reperimento di materiali da costruzione di buona qualità ed a basso prezzo. L'intera area che si diparte dalle falde meridionali del M. Pellegrino e si estende fino alle zxone centrali, lambendo il viale della Libertà all'altezza del Giardino Inglese è ricca di cave, oramai celate dalle nuove costruzioni, ma che spesso proseguono nel sottosuolo su più livello, come più volte accertato nel corso di indagini per la costruzione di edifici pubblici e per civile abitazione. Il sottosuolo fu anche sfruttato ai tempi della dominazione araba per la costruzione di canali per il convogliamento dell'acqua attraverso la realizzazione di qanat, molti dei quali sono ancora percorribili.

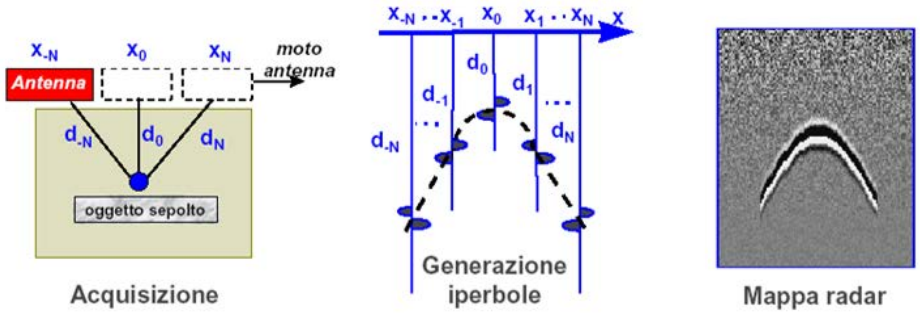
Per lo sviluppo della campagna di indagini finalizzata alla ricerca delle cavità che interferiscono con il tracciato delle linee tramviaria, si impiegherà il Georadar. Questa tecnologia sarà anche utilizzata nell'ambito delle indagini archeologiche e nella ricerca e mappatura dei sottoservizi,

5.1.1 Georadar

I rilievi georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) si basano sulla risposta di un segnale elettromagnetico di carattere impulsivo ad alta frequenza che viene inviato da un'antenna trasmittente. La presenza di discontinuità di proprietà elettromagnetiche del materiale provoca fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione dell'energia elettromagnetica incidente su tale discontinuità.

In generale, si analizza la risposta dell'onda elettromagnetica che viene riflessa in corrispondenza delle discontinuità del mezzo e che ritorna in superficie, dove viene captata da un'antenna ricevente.

Il principio di funzionamento del georadar differisce da quello del radar convenzionale in quanto il mezzo di trasmissione non è più l'aria ma una roccia o un terreno, la risoluzione è in genere decimetrica o centimetrica, e il campo di misura è limitato ad alcuni metri di profondità.



La velocità di propagazione di un'onda piana smorzata si ricava dalla soluzione dell'equazione d'onda e vale:

$$V_m = c / \left\{ (\varepsilon_r \mu_r / 2) \left[\left(1 + P^2\right) + 1 \right] \right\}^{1/2}$$

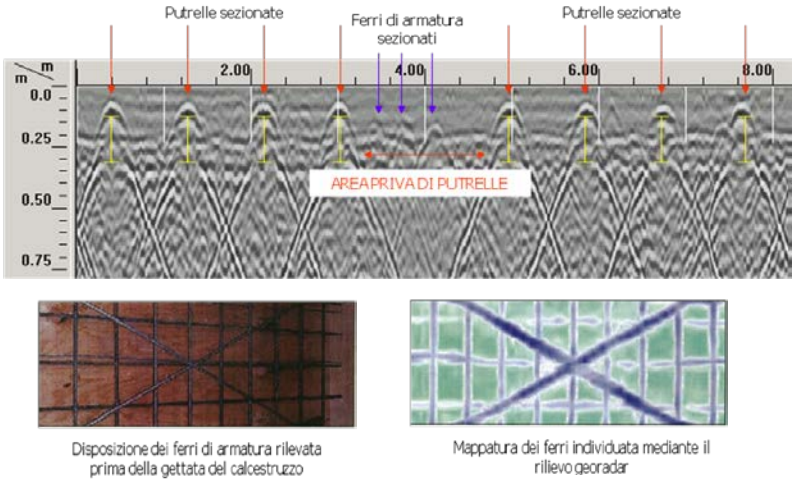
dove c'è la velocità dell'impulso radar nel vuoto (c ≅ 0.3 m/ns), ε_r è la costante dielettrica relativa e μ_r è la permeabilità magnetica relativa. *P* è il fattore di perdita (*loss factor*) che vale :

$$P = \tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$$

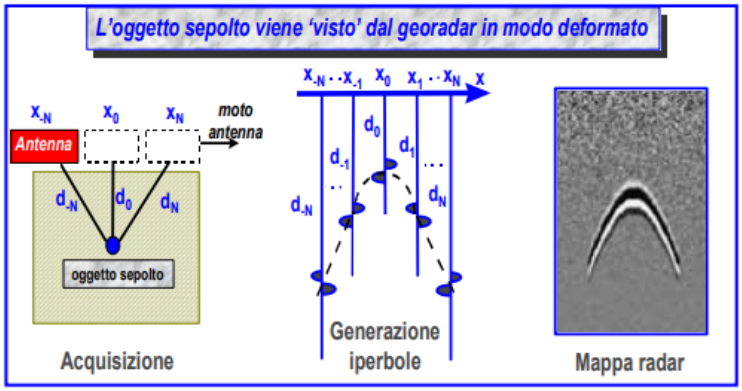
ed è un indice del grado di dispersività del mezzo.

Si distingue tra dielettrici poco dispersivi (P«1) e buoni conduttori (P»1). Quando la frequenza dell'oscillazione del campo elettrico è sufficientemente elevata e la conducibilità del mezzo indagato è bassa, come nel caso di rocce e terreni, la corrente di spostamento prevale rispetto a quella di conduzione, la propagazione del segnale è di tipo ondulatorio e il termine P può considerarsi nullo. Se inoltre si è in presenza di materiali non ferromagnetici ($\mu \cong \mu_0$), la relazione della velocità media si semplifica:

$$v_m = c / \sqrt{\varepsilon_r} = 0.3 / \sqrt{\varepsilon_r} \ .$$

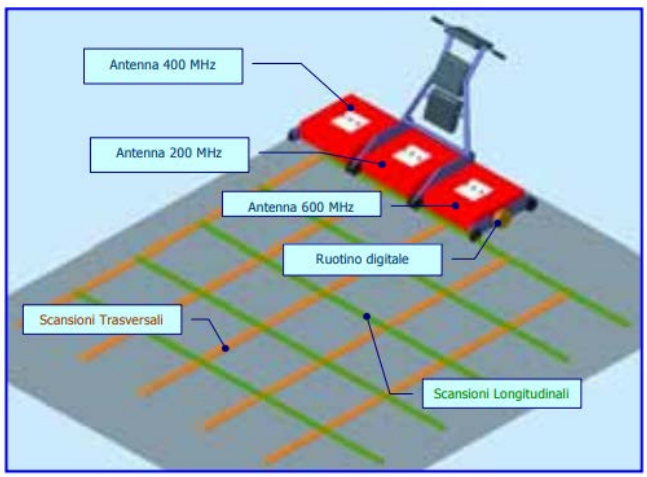


La rappresentazione dei dati acquisiti avviene normalmente su un diagramma tempi-ampiezze del segnale ricevuto dal georadar secondo sezioni bidimensionali (come riportato in figura), o mediante "time-slice", ovvero sezioni orizzontali di un modello tridimensionale ottenuto dall'acquisizione di linee affiancate (come riportato in figura).



Spostando l'antenna lungo una direzione prestabilita e accostando i diversi diagrammi tempi-ampiezze per i successivi segnali, si ottengono delle sezioni georadar, detti radargrammi, in cui le ampiezze di riflessione sono rappresentate in funzione del tempo di andata e ritorno (twt) e della posizione dell'antenna lungo il profilo di acquisizione. Durante l'acquisizione gli impulsi sono ripetuti con frequenza tra 30 e 100 kHz. Le tracce rilevate dall'antenna ricevente sono mediate prima di essere registrate: in tal modo, ogni singola traccia registrata è il risultato di una operazione di stacking, che ha come effetto l'aumento del rapporto segnale/rumore. In acquisizione si opera inoltre impiegando dei filtri in dominio di frequenza (filtri passa banda), con banda passante larga abbastanza da non perdere segnale utile. Successivamente, è possibile procedere ad un ulteriore filtraggio digitale sulle tracce acquisite.

Nel caso di ricerca ed individuazione di cavità ed altri manufatti, l'asse orizzontale riproduce la direzione di avanzamento dell'antenna al di sopra del mezzo investigato,

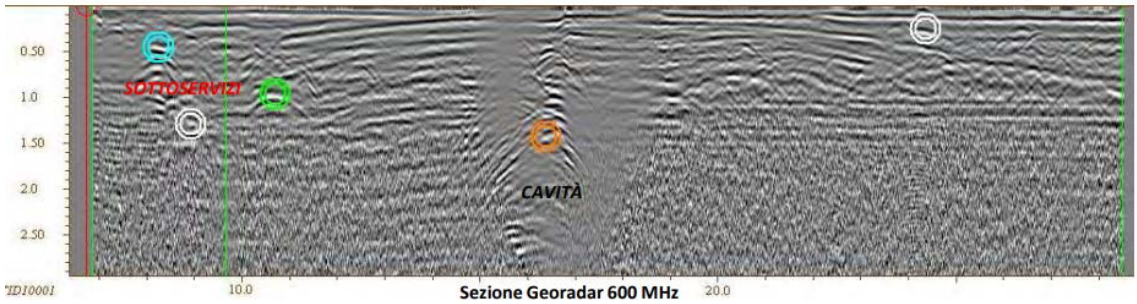


mentre l'asse verticale rappresenta la direzione di penetrazione degli impulsi. Tale distanza è espressa sotto forma di ritardo tra l'impulso emesso e quello riflesso ed è quindi pari a due volte la distanza antenna-bersaglio. Il valore del ritardo è convertito in valore metrico tramite la conoscenza della velocità di propagazione del segnale nel mezzo.

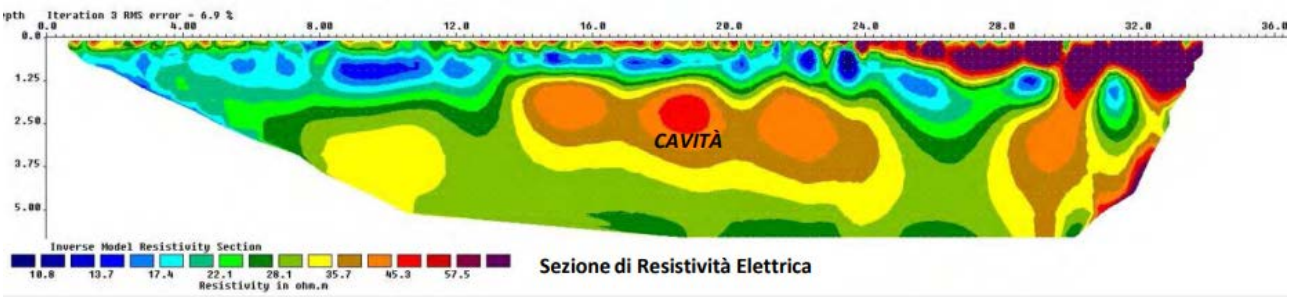
L'indagine si svolge con scansioni referenziate ed equidistanti sia longitudinali che trasversali. Le scansioni sono effettuate con tempi di ascolto adeguati alle finalità dell'indagine e con equidistanza commisurata ai target da individuare.

In parallelo all'esecuzione dell'indagine vera e propria, deve essere individuato un apposito sistema riferimento. Esso consiste in un sistema di assi cartesiani ortogonali detti "asse delle T o delle linee Trasversali" e "asse delle L o delle linee Longitudinali". Essi corrispondono rispettivamente all'asse delle X e delle Y del sistema cartesiano. Ogni misura sarà quindi posta in un senso o nell'altro e avrà un determinato punto di inizio, essa inoltre sarà posta parallelamente ad altre sezioni la cui equidistanza viene detta "passo di scansione". I dati acquisiti sono elaborati, utilizzando il sistema di elaborazione su una base cartografica in CAD, in modo da avere una ricostruzione precisa della ubicazione planimetrica e della profondità dei bersagli individuati. L'elaborazione dei dati può prevedere la visualizzazione contemporanea dei radargrammi prodotti e delle relative mappe tomografiche.

Sezione Georadar 200 MHz



Sezione Georadar 600 MHz



Sezione di Resistività Elettrica

Il Georadar sarà utilizzato anche per localizzare cavi e tubi interrati anche non metallici, tubazioni non metalliche (acqua e gas), fibre ottiche dielettriche, cavidotti, allacciamenti fognari, pozzetti, camerette, servizi metallici interrati di ogni genere, e tutto ciò che rappresenta un'incognita prima di scavare è oggi facilmente localizzabile a costi sensibilmente bassi.

Localizzazione rapida a zigzag del percorso di un singolo cavo o tubo.

Catturata a video la scansione verticale, dopo aver riconosciuto l'impronta inconfondibile di un servizio interrato, l'operatore può semplicemente ritornare sull'evento in retromarcia così da attivare in automatico la modalità *Localizzazione precisa di profondità*, posizione e marcatura a colori ed eseguire istantaneamente il salvataggio dell'immagine completa.

Scansione tridimensionale a griglia guidata.

Si possono anche effettuare scansioni tridimensionali a griglia guidata, indispensabili nella localizzazione urbana in prossimità di incroci stradali sempre densi di intersezioni fra servizi a diverse quote e con differenti dimensioni.

6. INDAGINI ARCHEOLOGICHE

6.1 Premessa

Le elaborazioni svolte nell'ambito del presente progetto inerenti la "*VERIFICA DELL'INTERESSE ARCHEOLOGICO*", disposta dal Codice dei Contratti, hanno consentito di definire lo scenario, il contesto e i siti di riferimento.

Sulla scorta delle analisi, della documentazione disponibile e delle tracce rinvenute e rinvenibili allo stato attuale, la verifica archeologica in programma sarà sostanziata da indagini, come dettagliato nel seguito ed evidenziato negli elaborati grafici delle Tavole 111/127, dove sono indicate le indagini in programma..

Per ciascuno dei siti individuati si riporta nel seguito il programma dettagliato delle indagini. Tra parantesi sono identificati il numero riferimento del sito e la tavola dove è cartografico il sito.

Tutte le attività indicate saranno svolte in accordo e sotto l'alta sorveglianza dei tecnici della Soprintendenza ai BB.CC.AA. e dei curatori del Museo Paleontologico G.G. Gemmmellaro, i quali saranno sempre prontamente informati di eventuali rinvenimenti nel corso dello svolgimento delle indagini e dei saggi. Gli stessi tecnici saranno costantemente coinvolti durante i lavori di costruzione delle linee tramviarie, nel corso dell'esecuzione degli scavi in zone ritenute di possibile criticità ai fini del rinvenimento di beni di interesse archeologico e paleontologico.

Sia nel corso delle indagini, che durante i lavori, ci si atterrà scrupolosamente alle indicazioni fornite dai tecnici innanzi indicati.

6.2 Siti di interesse archeologico e paleontologico e programma delle indagini

Qanat Castelforte (Tav. 122 - 1)

Già identificato e vincolato ai sensi del Codice dei BB CC. Nell'area triangolare indicata in planimetria è presente un pozzo seriale dal quale si può accedere al canale sotterraneo, che corre a profondità tale da non interferire con i lavori della linea tramviaria. Tuttavia si effettuerà un'indagine speleologica per verificarne l'esatta profondità.

Necropoli dell'Età del Rame di Piazza Leoni (2)

Sito identificato nel XIX secolo e del quale non si conosce l'esatta ubicazione; dovrebbe trovarsi non lontano dall'ingresso del Parco della Favorita. Data la possibile presenza di tombe ipogeiche scavate nella roccia si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria. .

Necropoli dell'Età del Rame di Piazza Giachery (Tav. 125 - 3)

Sito identificato agli inizi del XX secolo e del quale non si conosce esattamente l'ubicazione; dovrebbe trovarsi non lontano dall'ingresso del Mercato Ortofrutticolo. Data la possibile presenza di tombe ipogeiche scavate nella roccia si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria. E' evidente che la possibilità di intercettare resti archeologici è limitata alla parte più bassa della piazza, poiché il resto dell'area poggia terrapieno.

Antiche cave e deposito paleontologico presso il Giardino Inglese (Tav. 125 - 4)

I tagli di cava dal XVII secolo in poi sono chiaramente visibili nel Giardino Inglese e continuano verosimilmente al di sotto del percorso stradale della Via Libertà. Le cronache scientifiche indicano il rinvenimento di evidenze paleontologiche, costituite da resti di Elephas antiquus e fauna associata, durante i lavori di cava e taglio della Via Libertà. Nell'eseguire i lavori della linea tranviaria potrebbe esserci la possibilità di intercettare lembi di deposito tuttora conservati. Nell'area si effettueranno indagini sismiche a rifrazione. Inoltre, poiché la presenza di tali resti inglobati nella roccia è di difficile identificazione, si presterà la massima attenzione durante i lavori di scavo, per accertare la presenza di siffatti resti.

Resti medievali presso Museo Archeologico Regionale A. Salinas (Tav. 124 - 5)

Anni fa durante lavori di ristrutturazione nel cortile piccolo del museo, in prossimità della Via Roma, furono identificati resti di una struttura commerciale di età normanna. Ovviamente, tali resti erano inseriti in un contesto urbano che proseguiva al di sotto delle strutture del medesimo museo anche in direzione della Via Roma. Nell'area in esame si eseguirà un'indagine con Georadar, allo scopo di evidenziare eventuali resti, che potrebbero essere superficiali a giudicare dalle evidenze pregresse,.

Qanat in Via Roma (Tav. 124 - 6)

E' indiziata la presenza di qanat nei pressi dell'area compresa tra Via Bandiera e Via Venezia. Nell'area in esame si eseguirà un'indagine con Georadar, allo scopo di confermarne l'esistenza.

Probabile tempio romano dedicato a Mercurio presso la chiesa di Sant'Antonio Abate (Tav. 124 - 7)

Dalle cronache archeologiche si evince la presenza di resti sporadicamente rinvenuti nel passato, probabilmente attribuibili ad una struttura templare di epoca romana, che insisterebbe nei pressi della chiesa di Sant'Antonio Abate. Si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D e di eventuali saggi di scavo archeologico. Data la constatazione che il percorso della Via Roma è stato altimetricamente artificialmente creato e in quella zona apparirebbe su rilevato, è probabile che gli eventuali resti si trovino a notevole profondità anche se la contigua depressione costituita dalla Piazza del Garraffello (mercato della Vucciria) potrebbe indicare un salto di quota repentino e, quindi, l'eventualità di identificare resti romani a quote basse.

Qanat in Via Roma (Tav. 124 - 8)

E' indiziata la presenza di un qanat lungo l'allineamento Discesa dei Giudici – Via S. Anna. Nell'area in esame si eseguirà un'indagine con Georadar, allo scopo di confermarne l'esistenza.

Necropoli dell'Età del Rame presso edificio ex Standa in Via Roma (Tav. 124 - 9)

Sito identificato in occasione dell'edificazione del palazzo dove aveva sede, negli anni '60 del secolo scorso, il supermercato "Standa". Non se ne conosce esattamente l'ubicazione, tuttavia dovrebbe trovarsi nel piccolo slargo tra l'edificio suddetto e la Via Roma. Pertanto è molto probabile che la necropoli continuasse anche lungo la Via Roma. Data la possibile presenza di tombe ipogeiche scavate nella roccia si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria.

Necropoli Punica in Via Roma (Tav. 124 - 10)

Nell'area compresa tra Via Torino e Via Fiume è indiziata la presenza di un lembo di necropoli di epoca punica attraverso resoconti di antichi rinvenimenti, recentemente verificati. Si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria. In caso di rinvenimento di sepolture, sarà effettuata un'accurata documentazione dell'esistente, previo scavo archeologico.

Necropoli dell'Età del Rame presso il Palazzo delle Ferrovie in Via Roma (Tav. 124 - 11)

Sito identificato in occasione dell'edificazione del palazzo agli inizi del XX secolo. Non se ne conosce esattamente l'ubicazione. E' molto probabile che la necropoli continuasse anche lungo la Via Roma. Data la possibile presenza di tombe ipogeiche scavate nella roccia si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria.

Resti medievali presso la Chiesa della Pinta (Tav. 118 - 12)

Nell'area, già profondamente modificata dai lavori per la realizzazione della fermata della Metropolitana, sono stati indentificati resti di strutture medievali. E' probabile che altri resti siano ancora presenti in lembi più o meno superficiali nell'area. SI ritiene che l'indagine archeologica diretta mediante saggi sia la strategia migliore per definire la consistenza delle eventuali strutture residue.

Catacombe di Sant'Antonino (Tav. 124 - 13)

La presenza di resti catacombali nell'area è accertata dal loro rinvenimento all'interno della struttura conventuale di Sant'Antonino. E' pertanto, probabile che tale area si estenda anche lungo il percorso tranviario contiguo (Corso Tukory). Tuttavia, poichè dovrebbe trattarsi di resti profondi non interferenti con le strutture tranviarie. si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D.

Cimitero medievale e post-medievale di Porta di Termini (Tav. 124 - 14)

Nell'area dove sorgeva la Porta di Termini è indiziata la presenza di un lembo di necropoli di epoca medievale e post-medievale, attraverso resoconti di antichi rinvenimenti recentemente verificati, Si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché

indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria. In caso di rinvenimento di sepolture, sarà effettuata un'accurata documentazione dell'esistente, previo scavo archeologico.

Necropoli Punica nella zona di via Lincoln (Tav. 124 - 15)

Nell'area di via Lincoln, a vallo della Via archirafi, è indiziata la presenza di un lembo di necropoli di epoca punica, attraverso resoconti di antichi rinvenimenti recentemente verificati. Si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria. In caso di rinvenimento di sepolture, sarà effettuata un'accurata documentazione dell'esistente, previo scavo archeologico.

Qanat nella zona di via Lincoln (Tav. 124 - 16)

In Via Lincoln, all'altezza all'incirca del "Gymnasium" dell'Orto Botanico, è indiziata la presenza di un qanat. Nell'area in esame si eseguirà un'indagine con Georadar, allo scopo di confermarne l'esistenza.

Cimitero medievale della Kalsa di Porta Vittoria (Tav. 124 - 17)

Nell'area indicata di Porta Vittoria è indiziata la presenza di un lembo di necropoli di epoca medievale attraverso resoconti di antichi rinvenimenti recentemente verificati. Nell'area si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria..

Resti romani presso Villa Giulia (Tav. 124 - 18)

Nell'area di Villa Giulia è indiziata la presenza di resti monumentali di epoca romana attraverso resoconti di antichi rinvenimenti. Nell'area si procederà all'esecuzione di Tomografia Elettrica 2D, nonché indagini con Georadar limitate all'area di impronta della linea tramviaria, allo scopo di confermarne l'esistenza.

Nella tabella che segue si sintetizzano, per ciascun sito, le indagini in programma.

N. rif.	SITO	INDAGINI IN PROGRAMMA
1	Qanat Castelforte	Indagine speleologica
2	Necropoli dell'Eta' del Rame di Piazza Leoni	Tomografia elettrica 2D e Georadar
3	Necropoli dell'Eta' del Rame di Piazza Giachery	Tomografia elettrica 2D e Georadar
4	Antiche cave e deposito paleontologico presso il Giardino Inglese	Sismica a rifrazione
5	Resti medievali presso Museo Archeologico Regionale A. Salinas	Georadar
6	Qanat in Via Roma	Georadar
7	Probabile tempio romano dedicato a Mercurio presso la chiesa di Sant'Antonio Abate	Saggi di scavo archeologico
8	Qanat in Via Roma	Georadar
9	Necropoli dell'Eta' del Rame presso edificio ex Standa in Via Roma	Tomografia elettrica 2D e Georadar
10	Necropoli Punica in Via Roma	Tomografia elettrica 2D e Georadar
11	Necropoli dell'Eta' del Rame presso il Palazzo delle Ferrovie in Via Roma	Tomografia elettrica 2D e Georadar
12	Resti medievali presso la Chiesa della Pinta	Saggi di scavo archeologico
13	Catacombe di Sant'Antonio	Tomografia elettrica 2D
14	Cimitero medievale e post-medievale di Porta Termini	Tomografia elettrica 2D e Georadar
15	Necropoli Punica nella zona di via Lincoln	Tomografia elettrica 2D e Georadar
16	Qanat nella zona di via Lincoln	Georadar
17	Cimitero Cimitero della Kalsa di Porta della Vittoria	Tomografia elettrica 2D e Georadar
18	Resti romani presso Villa Giulia	Tomografia elettrica 2D e Georadar

Le tecniche di indagine geofisica sono state descritte in precedenza.

In caso di ritrovamento di tombe ipogeiche, queste ultime vengono in genere scavate, documentate e ricoperte. Qualora qualcuna dovesse presentare caratteri di particolare unicità la Soprintendenza potrebbe prescrivere il distacco totale della tomba asportando tutto il blocco roccioso in cui essa fu intagliata. A titolo di esempio, tale operazione fu effettuata Carini, dove fu intercettata una necropoli simile durante la costruzione della linea ferroviaria Palermo-Trapani. Oggi tale tomba è interrata nel cortile grande del Museo Archeologico Regionale A. Salinas di Palermo.
In caso di rinvenimento di sepolture, si avrà cura di effettuare un'accurata documentazione dell'esistente, previo scavo archeologico.
In caso di ritrovamento di resti fossili di animali, essi andranno recuperati con apposite tecniche di distacco.

6.3 Indagine speleologica

L'ispezione speleologica nell'ultimo decennio rientra fra le tipologie di indagine mirate ad una media conoscenza dei manufatti sotterranei, soprattutto nei centri storici.
Il primo presupposto di accessibilità, solitamente avviene a seguito o di segnalazioni durante lavori edili o sprofondamenti che si determinano soprattutto durante operazioni di scavo, ovvero casualmente come avvenuto in tempi recenti a Piazza Indipendenza, dove una campagna archeologica è stata sviluppata nel sottosuolo a seguito del verificarsi di un avvallamento della sede stradale nei pressi di palazzo d'Orleans. L'indagine ha portato alla luce una vasta necropoli di cui si ipotizzava la presenza, ma della quale non era nota l'esatta posizione. Sempre a Piazza Indipendenza, un''altro importante rinvenimento archeologico è avvenuto durante i lavori di scavo della galleria del Collettore Emissario Sud-Orientale della Città di Palermo.

In una città come Palermo, in cui diverse dominazioni si sono susseguite nel tempo, il patrimonio del sottosuolo diventa un luogo che può presentare svariate difficoltà di esecuzione di lavori proprio per la presenza di cavità di origine antropica.

In relazione alla possibile presenza di cavità nei siti innanzi indicati, l'attività di indagine speleologica prevede una ricognizione dell'area di ingresso al cavo ed una prima valutazione del livello di sicurezza dell'accesso.

Da questa analisi preliminare si scelgono le attrezzature e gli strumenti più adatti per il rilievo della cavità ed i presidi per la sicurezza della squadra di ispezione. Nello specifico, poiché è noto che tali cavità possono convogliare acque di varia natura (sorgentizie, acque nere) e/o avere sacche di gas pericolose, sono sempre in dotazione i rilevatori di gas, i respiratori o maschere, oppure particolari maschere filtranti.

L'attività di ispezione speleologica prevedono:

- l'attraversamento e l'esplorazione di canali sotterranei e/o di cavità sconosciute;
- il rilievo geometrico-dimensionale geo-riferito con l'esterno, allo scopo di individuare il reale andamento plano-altimetrico della cavità e/o canale esplorato;
- la valutazione dello stato di conservazione dei manufatti rinvenuti all'interno;
- il rilievo geometrico di eventuali manufatti *recenti* (ad esempio canali di scopo, pozzi, pilastri, strutture di fondazione) e la definizione della loro correlazione con l'edificato sovrastante;
- la valutazione della natura, della qualità e della granulometrie dei detriti franati sul fondo;
- il rilievo geo-strutturale di eventuali stratificazioni osservabili nelle pareti;
- la valutazione del grado di stabilità della cavità e/o canale, anche in relazione alla progettazione delle opere che correranno in superficie;

- una accurata documentazione fotografica.

I dati geometrici rilevati con la tecnica del rilievo speleologico sono graficizzati e le riprese video-fotografiche digitali effettuate durante il cammino all'interno dei condotti consentono in definitiva di determinare tipo e dimensioni delle sezioni, presenza di anomalie e discontinuità, immissioni primarie e secondarie e stato di conservazione dei manufatti.

7. INDAGINI AMBIENTALI

7.1 Rumore

7.1.1 Premessa

Il Progetto di Indagini ambientali relative alla componente "*rumore*" per la fase *ante-operam* è finalizzato ai seguenti obiettivi:

- testimoniare lo stato dei luoghi e le caratteristiche dell'ambiente naturale ed antropico esistenti precedentemente all'apertura dei cantieri ed all'esercizio dell'infrastruttura tramviaria in progetto;
- quantificare un adeguato scenario di indicatori ambientali tali da rappresentare, per le posizioni più significative, la "situazione di zero" a cui riferire l'esito dei successivi rilevamenti atti a descrivere gli effetti indotti dalla realizzazione e dall'esercizio dell'opera;
- consentire un agevole valutazione degli accertamenti effettuati, al fine di evidenziare specifiche esigenze ambientali ed orientare opportunamente gli interventi di mitigazione acustica.

I risultati di tali indagini saranno utili per una corretta ed efficace programmazione della successiva fase di monitoraggio in corso d'opera che avrà lo scopo di:

- documentare l'eventuale alterazione dei livelli sonori rilevati nello stato *ante-operam* dovuta allo svolgimento delle fasi di realizzazione dell'infrastruttura di progetto;
- individuare eventuali situazioni critiche che si dovessero verificare nella fase di realizzazione delle opere, allo scopo di prevedere le opportune modifiche alla gestione delle attività del cantiere e/o al fine di realizzare interventi di mitigazione adeguati, di tipo temporaneo e della fase post-operam, finalizzato ai seguenti aspetti:
- confronto degli indicatori definiti nello "stato di zero" con quanto rilevato in fase di esercizio dell'opera;
- controllo ed efficacia degli interventi di mitigazione realizzati (collaudo, ecc.).

L'individuazione dei punti di misura per la fase *ante-operam* è stata effettuata in conformità a criteri legati alle caratteristiche territoriali dell'ambito di studio, alle tipologie costruttive

previste per l'opera di cui si tratta, alle caratteristiche dei recettori individuati nelle attività di censimento, oltre che a quanto prescritto dal DPCM 16 maggio 2003. Appare anche utile premettere che, al fine di proteggere le persone dagli effetti negativi derivanti dall'inquinamento acustico, il legislatore ha stabilito i limiti di rumorosità che non possono essere superati:

- il DPCM 01/03/1991 stabiliva i valori limite per i comuni nei quali non sia ancora stato effettuato il piano di zonizzazione acustica comunale;
- il DPCM 14/11/1997 stabiliva i valori limite per i comuni nei quali sia invece attivo un piano di classificazione acustica del territorio comunale.

  I valori limite, si suddividono in:
- valori limite di emissione;
- valori limite assoluti di immissione;
- valori limite differenziali di immissione.

Si ricorda anche che **nel 2016 il Comune di Palermo ha approvato il Piano di Zonizzazione acustica comunale.** In tale contesto, **l'innesto dell'infrastruttura tramviaria inciderà positivamente sul miglioramento del clima acustico da traffico** per ampie porzioni del territorio comunale, mentre per altre, laddove coesisterà con il traffico veicolare su gomma, seppure in maniera ridotta, , l'aggiornamento del clima acustico rappresenta una delle elaborazioni più significative anche per verificare la strategia ambientale sottesa all'Infrastruttura.

7.1.2 Campagna di monitoraggio acustico

L'estensione e la localizzazione dell'infrastruttura tramviaria si distribuisce su un'amia fascia di territorio, connotato da tutte le componenti ambientali attive e passive di rumore e, soprattutto, intercetta numerosi recettori sensibili.

La fascia di studio interesserà una pozione parallela posta a tergo dell'infrastruttura, nonché particolari aree, quali le zone di attraversamento del Fiume Oreto, il Deposito Olimpo, rotonde, ect, oltre ai siti che ospitano recettori sensibili.

Si effettuerà una valutazione preventiva dei luoghi e dei momenti caratterizzati da un rischio di impatto particolarmente elevato (intollerabile cioè per entità e/o durata) nei riguardi dei recettori presenti, che consenta di individuare con maggiore precisione i punti

maggiormente significativi in corrispondenza dei quali realizzare il monitoraggio.
La campagna di rilievi e monitoraggio consentiranno, inoltre, di verificare che sia garantito il rispetto dei vincoli previsti dalle normative nazionali e comunitarie vigenti. A tale proposito, infatti, le norme per il controllo dell'inquinamento acustico prevedono sia i limiti del rumore prodotto dalle attrezzature, sia i valori massimi del livello sonoro ai confini delle aree di cantiere.
La campagna di monitoraggio acustico ha lo scopo di definire i livelli sonori relativi alla situazione attuale, di verificare gli incrementi indotti dalla realizzazione dell'infrastruttura di progetto (corso d'opera) rispetto all'*ante-operam* (assunta come "punto zero" di riferimento) e gli eventuali incrementi indotti nella fase *post-operam*.
Nel corso della campagna di monitoraggio saranno rilevate le seguenti categorie di parametri:

- acustici;
- meteorologici;
- parametri di inquadramento territoriale.

Questi dati saranno raccolti in schede riepilogative per ciascuna zona acustica di indagine, con le modalità indicate di seguito.
Per quanto riguarda i Descrittori Acustici, si rileveranno:

- il livello equivalente (Leq) ponderato "A" espresso in decibel;
- i livelli statistici L1, L10, L50, L90, L99.
- Questi ultimi rappresentano i livelli sonori superati per l'1%, il 10%, il 50%, il 95% e il 99% del tempo di rilevamento. In definitiva, indicano la rumorosità di picco (L1), di cresta (L10), media (L50) e di fondo (L90 e, maggiormente, L99).

La campagna di monitoraggio dei parametri meteorologici comprenderà il rilievo di:

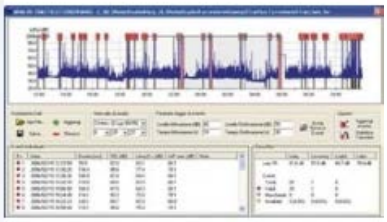
- temperatura;
- velocità e direzione del vento;
- presenza/assenza di precipitazioni atmosferiche;

- umidità.

Le misurazioni di tali parametri saranno effettuate allo scopo di determinare le principali condizioni climatiche e di verificare il rispetto delle prescrizioni che sottolineano di non effettuare rilevazioni fonometriche nelle seguenti condizioni meteorologiche:

- velocità del vento > 5 m/s;
- temperatura dell'aria < 5°C,
- presenza di pioggia e di neve.

Nell'ambito del monitoraggio è prevista l'individuazione di una serie di parametri che consentono di indicare l'esatta localizzazione sul territorio delle aree di studio e dei relativi punti di misura. A tale scopo saranno effettuate riprese fotografiche, che permetteranno una immediata individuazione e localizzazione delle postazioni di rilevamento.



Data la dislocazione dell'infrastruttura, la campagna sarà effettuata con il posizionamento, in 45 punti, di 9 fonometri mobili come rappresentato nelle tavole TAVV. 111/127 e con le seguenti prestazioni complessive per ciascun sito:

- n. 6 rilievi fonometrici diurni di media durata (20').
- n. 3 rilievi fonometrici notturni di media durata (20');
- n. 4 rilievi di rumore determinato da traffico stradale, di durata settimanale.

Oltre a tale tipo di indagine si prevede di operare il conteggio dei veicoli ante.operam sia nelle tratte attualmente servite dal tram, che in quelle di ampliamento. Si prevede di

campionare 20 punti attraverso 2 rilievi diurni (1 feriale e 1 festivo) e **2 rilievi notturni** (1 feriale e 1 festivo) a settimana e per 1 mese.

In corrispondenza di ciascun punto di misura saranno riportate le seguenti indicazioni:

- toponimo;
- comune con relativo codice ISTAT;
- stralcio planimetrico in scala 1:5000;
- zonizzazione acustica da DPCM 1/3/91 o da DPCM 14/11/1997 (e da Piano comunale 2016);
- descrizione delle principali caratteristiche del territorio: copertura vegetale, tipologia dell'edificato.
- foglio e tavoletta di riferimento IGM;
- destinazione di P.R.G. e/o di altro urbanistico;
- ubicazione precisa dei recettori;
- presenza di sorgenti inquinanti e caratterizzazione acustica di tali sorgenti, riportando i flussi e le tipologie di traffico stradale presente sulle arterie viarie, etc.;
- riferimenti della documentazione fotografica aerea e a terra.

7.2 Vibrazioni

7.2.1 Generalità

La realizzazione delle linee tramviarie in progetto ed opere connesse (sottostazioni , Deposito Olimpo, ponte sul Fiume Oreto, passerelle pedonali) implica l'utilizzo di mezzi e macchinari che possono essere considerati sorgenti vibranti. I moti vibratori così generati si propagano nel terreno a ridosso delle zone di immissione e possono interessare edifici situati in prossimità delle aree di lavorazione. Tali moti vibratori, filtrati dall'accoppiamento terreno-fondazioni, interessano tutta la struttura e sono percepiti dalle persone che abitano gli edifici direttamente o indirettamente attraverso il "solido" emesso dalle strutture e dagli oggetti posti in vibrazione.

Nei ricettori prossimi alle aree in cui si eseguono lavorazioni si possono verificare criticità causate da attività di cantiere come le operazioni di scavo all'aperto e in sotterraneo. Altre criticità possono essere dovute al transito di mezzi pesanti di cantiere su strade e piste estremamente prossime ai ricettori. Sono inoltre da tenere presenti gli effetti di amplificazione o di attenuazione indotti dalla natura dei terreni presenti e le caratteristiche

tipologiche dei ricettori stessi.

Si pongono pertanto in programma una serie di indagini ante-operam sulla componente "Vibrazioni", che consisteranno in una campagna di misure per rilevare la presenza di moti vibratori all'interno di edifici e a verificarne gli effetti sulla popolazione e sugli edifici stessi.

Per quanto concerne gli effetti sulla popolazione, le verifiche riguardano esclusivamente gli effetti di "annoyance", ovvero gli effetti di fastidio indotti dalle vibrazioni percettibili dagli esseri umani.

Per quanto riguarda gli effetti sulle strutture, in presenza di livelli elevati e prolungati di vibrazioni, sarà effettuata una campagna di rilievi su campioni di edifici potenzialmente vulnerabili

I rilievi su monumenti e beni artistici di notevole importanza storico-monumentale, terrà conto della loro dimensione di punti singolari con studi e valutazioni mirate.

Si sottolinea che per la particolare natura di talune lavorazioni, come ad esempio l'esecuzione di palificazioni, che, comportano la produzione di vibrazioni di notevoli entità soprattutto nella fase di trivellazione, la popolazione residente sarà soggetta, oltre all'indubbio fastidio che arreca qualsiasi lavoro in ambiente urbano, anche a possibili disturbi causati dalle vibrazioni. A questo si aggiunge che anche i fabbricati potrebbero risentire delle azioni indotte dall'esecuzione delle palificate; potrebbe infatti manifestarsi un quadro fessurativo nelle strutture portanti e nei tompagni, ovvero potrebbero aggravarsi una situazione di danneggiamento preesistente.

Ne consegue che all'interno dei normali edifici non saranno eseguite misure finalizzate al danno delle strutture ma solo quelle relative al disturbo delle persone.

Si procederà inizialmente alla rilevazione degli attuali livelli di vibrazione, che sono assunti come "punto zero" di riferimento e poi alla misurazione dei livelli vibrazionali determinati durante le fasi di realizzazione dell'opera.

Il monitoraggio della fase ante-operam è pertanto finalizzato a testimoniare lo stato attuale dei luoghi in relazione alla sismicità indotta dalla pluralità delle sorgenti presenti (traffico veicolare, etc) prima dell'apertura dei cantieri.

Tale monitoraggio viene previsto allo scopo di:

- rilevare i livelli vibrazionali dovuti alle lavorazioni effettuate nella fase di realizzazione dell'infrastruttura;
- individuare eventuali situazioni critiche (superamento dei limiti normativi) che si

dovessero verificare nella fase di realizzazione delle opere, allo scopo di prevedere modifiche alla gestione delle attività di cantiere e/o di adeguare la conduzione dei lavori.

Per le rilevazioni che si effettueranno in corso d'opera si dovrà tenere conto del fatto che le sorgenti di vibrazione possono essere numerose e realizzare sinergie d'emissione e esaltazioni del fenomeno se s'interessano le frequenze di risonanza delle strutture degli edifici monitorati.

Nel seguito si individuano le criticità in relazione alle vibrazioni che potranno indotte dalle attività lavorative necessarie alla costruzione delle opere in progetto e si indica la metodologia di rilevamento delle vibrazioni indotte sugli edifici dall'esecuzione dei lavori di costruzione delle linee tramviarie

In definitiva, lo scopo delle misure vibrazionali sarà quello di verificare se le sollecitazioni transitorie e/o continue prodotte dalla costruzione delle opere possano essere in grado di produrre lesioni agli edifici e/o a fabbricati in genere e valutare al contempo l'impatto delle vibrazioni sulla popolazione residente.

Tale metodologia segue il principio di progettazione "osservazionale", correntemente applicata nel campo dell'ingegneria geotecnica.

Preliminarmente si procederà a sopralluoghi per l'esame visivo dei fabbricati che ricadono nell'area di influenza delle lavorazioni, al fine di acquisire tutte le informazioni necessarie sulle strutture portanti e constatare la presenza di un eventuale quadro fessurativo. Questa fase propedeutica, fondamentale al fine di stabilire quali edifici andranno monitorati, comporterà l'elaborazione di schede tecniche di valutazione e catalogazione degli edifici da monitorare.

7.2.2 Controlli vibrometrici

Come detto in precedenza, le misure vibrazionali avranno lo scopo di verificare se possano verificare criticità ai fabbricati a causa delle sollecitazioni transitorie e/o continue prodotte dalle operazioni di cantiere per l'esecuzione dei lavori e valutare al contempo l'impatto delle vibrazioni sulla popolazione residente.

Le grandezze fondamentali ricavate mediante opportuni sensori saranno:

- i valori massimi di ampiezza (spostamento, velocità, accelerazione) di ciascuna componente;
- i valore massimo della risultante vettoriale delle tre componenti;
- la frequenza principale di oscillazione del fenomeno.

Tali valori acquisiti saranno comparati con i limiti di pericolosità imposti dalla normativa presa a riferimento.
L'area oggetto dell'intervento, ricadendo nel centro urbanizzato della città di Palermo, annovera zone sempre densamente abitate e di elevato pregio residenziale.
Ciò posto, considerando il caso in esame, si ritiene necessario procedere al monitoraggio vibrazionale di tutti recettori sensibili prossimi ai lavori.

7.2.3 Normativa di riferimento

La valutazione delle vibrazioni sarà condotta utilizzando gli standard internazionali (ISO) e nazionali (UNI):

- Norma ISO 2631-1 (2014) Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero – Parte 1: Requisiti generali;
- Norma ISO 2631-2 (2018) Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero – Parte 2: Vibrazioni negli edifici (da 1 Hz a 80 Hz);
- Norma UNI 9513 (1989) Vibrazione e Urti. Vocabolario;
- Norma UNI 9614 (2017) Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo;
- Norma UNI 11048 (2003) Vibrazioni meccaniche ed urti – metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo;
- Norma UNI 9916 (2014) Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici;
- Norma SN 640312 (1992) "Effet des ébranlements sur les constructions";
- DIN 4150-3-1999 Le vibrazioni nelle costruzioni Parte 3: Effetti sui manufatti;
- Norma ISO 16063-21 (2003) Methods for the calibration of vibration and shock transducers Vibration calibration by comparison to a reference transducer

Le norme di riferimento **ISO 2631** e **UNI 9614** indicano nell'accelerazione del moto vibratorio il parametro fisico che può caratterizzare le vibrazioni ai fini della valutazione del disturbo indotto sulle persone. Poiché l'accelerazione è una grandezza vettoriale, la descrizione completa del fenomeno vibratorio deve essere effettuata misurando la variabilità temporale della grandezza in tre direzioni mutuamente ortogonali.
Un altro parametro assai importante da quantificare ai fini del disturbo alle persone è il contenuto in frequenza dell'oscillazione dei punti materiali. Per quanto riguarda l'organismo umano, è noto che esso percepisce in maniera più marcata fenomeni vibratori caratterizzati da basse frequenze (1-16 Hz) mentre, per frequenze più elevate la percezione diminuisce. Il campo di frequenze d'interesse è quello compreso tra 1 e 80 Hz.

La norma **UNI 9614** e la norma **DIN 4150** definiscono:

a) i tipi di vibrazioni e direzione di propagazione;
b) i tipi di locali o edifici;
c) i periodi di riferimento;
d) il metodo di misura delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi.
e) i limiti che costituiscono il disturbo.

a) Tipi di vibrazioni e direzione di propagazione

Le vibrazioni immesse in un edificio si considerano:

- di livello costante: quando il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza rilevato mediante costante di tempo "slow" (1 s) varia nel tempo in un intervallo di ampiezza inferiore a 5 dB;
- di livello non costante: quando il livello suddetto varia in un intervallo di ampiezza superiore a 5 dB;
- impulsive: quando sono originate da eventi di breve durata costituiti da un rapido innalzamento del livello di accelerazione sino ad un valore massimo seguito da un decadimento che può comportare o meno, a seconda dello smorzamento della struttura, una serie di oscillazioni che tendono ad estinguersi nel tempo.

La direzione lungo le quali si propagano le vibrazioni sono riferite alla postura assunta dal soggetto esposto. Gli assi vengono così definiti:

- asse z passante per il coccige e la testa;
- asse x passante per la schiena e il petto;
- asse y passante per le due spalle.

La direzione della verticale coincide con l'asse z per un soggetto in piedi o seduto con l'asse x per un soggetto disteso.

b) Tipi di locali o edifici

I locali o gli edifici in cui sono immesse le vibrazioni sono classificati a seconda della loro destinazione d'uso in: aree critiche, abitazioni, uffici, fabbriche.

c) Periodi di riferimento La giornata è suddivisa in due periodi di tempo:

- diurno, dalle ore 7.00 alle ore 22.00;
- notturno, dalle ore 22.00 alle ore 7.00.

d) Le misure

Le vibrazioni possono essere misurate rilevando il valore efficace dell'accelerazione, che può essere espresso in m/s2 o mm/s2, o in termini di livello dell'accelerazione [dB].

Il livello dell'accelerazione L, espresso in dB, è definito dalla relazione:

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{\overline{a^2}}{a_0}\right)$$

dove a è il valore efficace dell'accelerazione in m/s2 e a_0 = 10-6 m/s2 è il valore efficace dell'accelerazione di riferimento.

Come prescritto dalla norma UNI 9614, le accelerazioni da valutare sono quelle comprese nel campo di frequenza tra 1 e 80 Hz. Inoltre, dal momento che la percezione da parte dei soggetti esposti varia a seconda della frequenza e dell'asse di propagazione, i valori rilevati devono essere ponderati in frequenza, allo scopo di attenuare le componenti esterne agli intervalli di sensibilità, ottenendo così il livello equivalente ponderato dell'accelerazione.

In alternativa a tale metodo, è possibile effettuare un'analisi dell'accelerazione in terzi d'ottava nell'intervallo 1 ÷ 80 Hz. Ai livelli riscontrati banda per banda occorre sottrarre una quantità pari a quella definita dai filtri di ponderazione indicati dalla Norma in una specifica tabella.

e) Limiti che costituiscono il disturbo

Per la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante e non costante, i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, corrispondenti ai più elevati riscontrati sui tre assi, possono essere confrontati con i limiti riportati nella Tabella 1 e nella Tabella 2 che seguono, rispettivamente per l'asse Z e per gli assi X e Y. Utilizzando il filtro valido per posture non note o variabili nel tempo (filtro per assi combinati UNI 9614), si assumono come limiti i valori relativi agli assi X e Y.

	a [mm/s^2]	L [dB]
Aree critiche	5,0	74
Abitazioni (notte)	7,0	77
Abitazioni (giorno)	10,0	80
Uffici	20,0	86
Fabbriche	40,0	92

Tab. 1 - Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza - Asse Z (Prospetto II – UNI 9614)

	a [mm/s^2]	L [dB]
Aree critiche	3,6	71
Abitazioni (notte)	5,0	74
Abitazioni (giorno)	7,2	77
Uffici	14,4	83
Fabbriche	28,8	89

Tab. 2 - Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza - Assi X e Y (Prospetto II – UNI 9614)

Quando i valori dei livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto. Il giudizio sull'accettabilità (tollerabilità) del disturbo oggettivamente riscontrata dovrà

ovviamente tenere conto di fattori quali la frequenza con cui si verifica il fenomeno vibratorio, la sua durata, ecc..

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla **UNI 9916** che fornisce. una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratori per valutare gli effetti sugli edifici in relazione alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica. Vengono inoltre fornite metodologie per ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o anche su edifici diversi a parità di eccitazione. La UNI 9916 considera gamme di frequenza variabili da 0,1 Hz a 150 Hz. Tale intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali di edifici sottoposti ad eccitazione naturale come per esempio il vento, nonché ad eccitazione causata dall'uomo. In alcuni casi l'intervallo di frequenza può essere più ampio, come ad esempio vibrazioni indotte da macchinari all'interno degli edifici stessi, tuttavia eccitazioni con contenuto in frequenza superiore a 150 Hz non sono in grado di influenzare significativamente la risposta dell'edificio. Le vibrazioni causate da urti prodotti da esplosioni, da battiture di pali o da altre sorgenti a ridosso della struttura non sono inclusi nella sopraccitata gamma di frequenza, ma lo sono però i loro effetti sulla struttura.

Sorgenti di vibrazione	Gamme di frequenza [Hz]
Traffico (su strada e rotaia)	1 ÷ 80
Esplosioni	1 ÷ 300
Battitura di pali	1 ÷ 100
Macchine esterne all'edificio	1 ÷ 300
Macchine interne all'edificio	1 ÷ 1000
Attività umane interessanti indirettamente l'edificio	0,1 ÷ 100
Attività umane interessanti direttamente l'edificio	0,1 ÷ 12
Vento	0,1 ÷ 10

Tabella 3 - Gamme di frequenza caratteristiche per diverse sorgenti di vibrazioni (UNI 9916/2004 Appendice A)

La UNI 9916 riporta una guida semplificata per la classificazione degli edifici secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno (v. tabella seguente).

Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni transitorie sulle costruzioni

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Posizioni di misura *)		
			Da 8 Hz fino a 30 Hz*)	Da 30 Hz fino a 60 Hz	Da 60 Hz fino a 150 Hz
A	Costruzioni molto poco sensibili (per esempio ponti, gallerie, fondazioni di macchine)	Occasionale Frequente Permanente	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C
B	Costruzioni poco sensibili (per esempio edifici industriali in cemento armato o metallici) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C
C	Costruzioni normalmente sensibili (per esempio edifici d'abitazione in muratura di cemento, cemento armato o mattoni, edifici amministrativi, scuole, ospedali, chiese in pietra naturale o mattoni intonacati) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	15 6 3	20 8 4	30 12 6
D	Costruzioni particolarmente sensibili (per esempio monumenti storici e soggetti a tutela) case con soffitti in gesso, edifici della classe C nuovi o ristrutturati di recente	Occasionale Frequente Permanente	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà
*)	Le posizioni di misura devono essere scelte sugli elementi rigidi della struttura portante o dove sono attesi i maggiori effetti delle vibrazioni.				

L'Appendice B contiene i criteri di accettabilità dei livelli delle vibrazioni.

7.2.4 Rete di monitoraggio – Specifiche logistiche

La rete sarà costituita da ministazioni sismiche digitali tre canali accoppiate singolarmente a geofoni 3D (velocimetri). Le ministazioni "sentinella" dovranno essere installate in corrispondenza dei basamenti (garage, scantinati…..prossimità fondazioni) degli edifici da monitorare (nella misura di una stazione di acquisizione + un geofono 3D per ogni recettore sensibile).
Il numero delle stazioni accoppiate ad altrettanti geofoni non è stimabile, in quanto dipenderà dalla tipologia e dalla densità areale degli edifici lungo le tratte consecutive di monitoraggio ma sarà comunque superiore a sei-otto sensori.

7.2.5 Rete di monitoraggio – Specifiche tecniche

La rete sarà costituita da Stazioni Sismometriche Digitali a tre canali accoppiate singolarmente a geofoni 3D (velocimetri). Le stazioni "sentinella" saranno installate in corrispondenza dei basamenti (garage, scantinati, in prossimità fondazioni) degli edifici da monitorare, nella misura di una stazione di acquisizione + un geofono 3D per ogni edificio ritenuto sensibile.
I geofoni saranno fissati alla base degli elementi strutturali, lontano da cavità, punti d'infiltrazione, aree di disturbo. I geofoni saranno installati circa 2 settimane prima di iniziare le lavorazioni nell'area che interagisce con il fabbricato sotto osservazione, allo scopo di valutare il rumore di fondo delle postazioni in assenza di attività di cantiere.
Le caratteristiche minime dei trasduttori (geofoni), in termini di risposta dinamica e di banda d'acquisizione, saranno:

- starting natural frequencies 4 ÷ 5 Hz
- frequency tolerance ± 0,5 Hz

I sensori avranno una frequenza propria di 4-5 Hz in modo da poter dare una risposta lineare dai 10 Hz fino a qualche centinaio di Hz e saranno collegati ad un computer dotato di idoneo software per la gestione e visualizzazione dei dati registrati nonché per l'elaborazione grafica dei medesimi.

Le unità di acquisizione saranno installate in zone protette, lontano dall'azione meteorica o da fonti di calore (caldaie, motori, ecc….) ed avranno le seguenti caratteristiche tecniche:

- canali di acquisizione per le ministazioni
- 16 bit di risoluzione
- "*sample rate*" variabile (non inferiore a 100 c.s.),
- controllo dei filtri Highpass e Lowpass
- registrazione in continuo e/o Trigger
- controllo dei "gain" di amplificazione e mastergain rapporto segnale/rumore
- registrazione dei dati su USBDisk min. 1 Gb. o trasmissione dei dati in unità centrale mediante trasferimento GSM.

7.2.6 Rete di monitoraggio – Criteri di fissaggio dei trasduttori

In generale le modalità di fissaggio dei trasduttori saranno tali da consentire la fedele riproduzione del moto vibratorio dell'elemento (parte strutturale o terreno) sul quale essi vengono fissati, senza che siano introdotte alterazioni del moto stesso imputabili al sistema di accoppiamento del trasduttore. Il sistema di montaggio sarà pertanto quanto più leggero o rigido possibile.

Fissaggio agli elementi strutturali

Il fissaggio dei trasduttori agli elementi strutturali degli edifici sarà conforme alle indicazioni del costruttore. Nei limiti del possibile saranno evitati elementi di supporto del trasduttore; in ogni caso l'elemento di supporto deve potersi considerare rigido nel campo di frequenze di interesse. Esso può essere fissato all'elemento strutturale per mezzo di viti o resine incollanti ad essicazione rapida.

Il fissaggio diretto del captatore è sempre preferibile, mediante collegamento meccanico a vite, ovvero l'incollaggio o il fissaggio magnetico; in ogni caso il metodo adottato non deve causare alterazioni della grandezza da misurare nel campo di frequenze di interesse. Inoltre si eviterà di fissare i trasduttori vicino o in corrispondenza di punti singolari come fessure di grande ampiezza o punti di infiltrazione d'acqua, porte di ventilazione e così via.

7.2.7 Metodi di misura

Per la valutazione dei livelli vibratori limite si farà riferimento alle normative e raccomandazioni prima richiamate.

Misura dell'eccitazione

Per verificare il livello di vibrazione alla base dell'edificio, la posizione di misura sarà scelta in corrispondenza alla fondazione o, nel caso di edifici senza fondazioni, alla base del muro di sostegno esterno, ad una altezza non maggiore di 0,5 m dal livello del terreno.

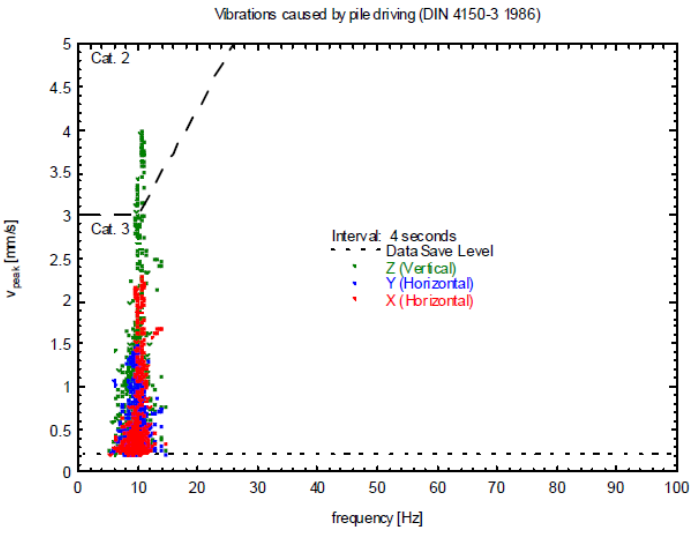
In punti di misura sulla fondazione saranno predisposti, se possibile, sul lato dell'edificio prossimo alla sorgente di vibrazione (almeno tre punti di misura).

Le vibrazioni per ciascun punto saranno misurate sia in direzione verticale, che in due direzioni orizzontali ortogonali, queste ultime scelte possibilmente con riferimento agli assi principali dell'edificio.

Per edifici ad ampia superficie di base, indicativamente con una dimensione di base maggiore di 20 m, le misure saranno eseguite simultaneamente in più punti (un punto di misura per ogni 10 m).

Misura della risposta dell'edificio

Per valutare l'ampiezza delle vibrazioni nelle parti strutturali degli edifici, il posizionamento dei trasduttori (geofoni) sarà effettuato direttamente sulle parti strutturali, nei punti presumibili di massima ampiezza del fenomeno vibratorio.



In presenza di edifici dissimmetrici o sottoposti a carichi dissimmetrici, saranno previste posizioni di misura atte a rilevare modi di vibrare torsionali dell'edificio stesso. Posizioni di misura aggiuntive potranno essere scelte in rapporto a Rilevazioni preliminari.

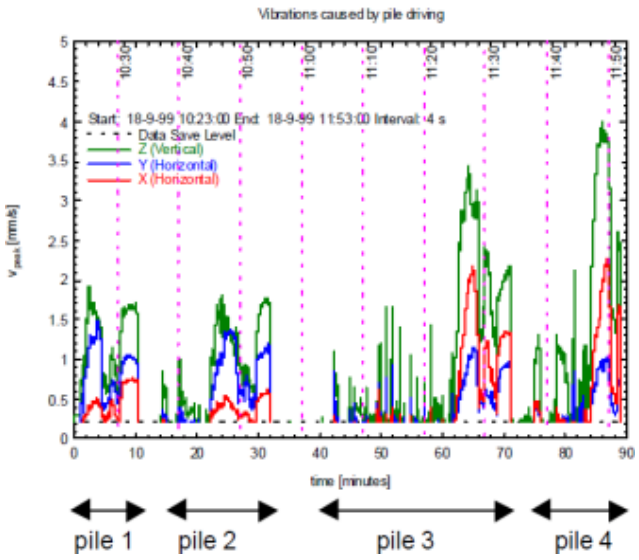
La misura delle vibrazioni sarà eseguita in continuo con campionamento dei valori di picco

del vettore velocità e registrazione dei dati ogni 10 secondi circa. I dati saranno restituiti giornalmente in forma grafica (valore di picco del vettore velocità – tempo, valore di picco del vettore velocità – frequenza) e confrontati con i valori massimi di riferimento (validi per la classe 3 – Costruzioni normali) di seguito indicati:

- per frequenze comprese tra 30 Hz e 60 Hz, modulo vettore velocità massima di 8 mm/s;
- per frequenze maggiori di 60 Hz, modulo vettore velocità massima di 12 mm/s.

7.2.8 Rapporto di attività

I dati acquisiti saranno elaborati in tempo reale (max. 24 ore), in modo da controllare sistematicamente sia le grandezze spettrali (frequenza e velocità di picco), sia il flusso statistico delle sollecitazioni a maggiore contenuto energetico. Settimanalmente sarà prodotto un rapporto di attività che conterrà le seguenti informazioni:



- la descrizione della struttura monitorata,
- il riferimento a documenti e normative applicabili,
- la data di esecuzione delle misure;
- la descrizione della sorgente di vibrazioni,
- la descrizione delle condizioni ambientali interessanti le misure effettuate,
- il numero di misure effettuate,
- la posizione e tipo dei trasduttori utilizzati e le la modalità di fissaggio;
- i criteri e le modalità di acquisizione dei dati,
- la descrizione delle catene di acquisizione ed elaborazione dei dati,
- la valutazione del rumore di fondo e degli errori,
- i risultati ottenuti,
- la valutazione dei risultati,
- il giudizio conclusivo.

7.3 Biodiversità

7.3.1 Generalità

La definizione di biodiversità si estende ad una complessa gamma di espressioni di ricchezza e varietà vegetale di tipo naturalistico, ma anche di tipo paesaggistico. Pertanto, le indagini, finalizzate alla verifica della variazione della qualità naturalistica ed ecologica nelle aree direttamente o indirettamente interessate dall'Infrastruttura, saranno localizzate in tutti gli ambiti ove l'espressione della biodiversità rappresenta sia il valore connotativo delle aree di impatto, sia fattore per la reinterpretazione delle aree di interesse/influenza degli interventi. Per quanto con riferimento all'attuale livello di progettazione, **il piano delle indagini sarà riferito alla fase *ante operam,*** non può essere ignorato che, ai fini del mantenimento degli obiettivi progettuali connessi alle categorie di intervento di mitigazione, compensazione, risarcimento e rigenerazione ambientale, detto piano confluirà nel superiore Piano di Monitoraggio Ambientale che sarà sviluppato **nel prosieguo dei livelli di progettazione**, per la verifica a VAS/VIA/VINCA e interesserà le fasi di realizzazione e di esercizio dell'infrastruttura.

La **relativa** campagna di indagini finalizzata al monitoraggio della biodiversità è funzionale a:

- caratterizzare lo stato della componente (e di tutti i recettori prescelti) nella fase ante operam, con specifico riferimento alla copertura del suolo e allo stato della vegetazione naturale e semi-naturale;
- **verificare la corretta attuazione delle azioni di salvaguardia** e protezione delle componenti;
- controllare, nelle fasi di costruzione e post operam, l'evoluzione della vegetazione e degli habitat presenti e predisporre, ove necessario, adeguati interventi correttivi;
- accertare la corretta applicazione delle misure di mitigazione e compensazione ambientale indicate nel SIA, al fine di intervenire per risolvere eventuali impatti residui;
- verificare lo stato evolutivo della vegetazione di nuovo impianto nelle aree soggette a ripristino vegetazionale;
- verificare l'efficacia degli interventi di mitigazione realizzati per diminuire l'impatto sulla componente faunistica.

In particolare, gli accertamenti non devono essere finalizzati esclusivamente agli aspetti botanici, ma devono riguardare anche i contesti naturalistici ed ecosistemici (in particolare gli habitat faunistici) entro cui la vegetazione si sviluppa. Nella fase attuale si procederà, alla descrizione della vegetazione potenziale e della vegetazione reale sulla scorta della bibliografia, dello stato evolutivo dei siti e degli habitat, attraverso un attento rilievo delle specie e dello stato delle aree, come anche dei potenziali rischi o minacce, attivi o potenziali, per classi e categorie di agenti.

Pertanto, sarà realizzata una schedatura che comprenderà i seguenti elementi minimi di base:

- area (o fascia territoriale) individuata su ortofoto e su rilievo a scala adeguata (da 1:500 a 1:2000);
- bibliografia e studi esistenti;
- qualità del sito;
- indice di copertura vegetale;
- elenco e densità delle specie esistenti;
- vincoli attivi;
- destinazione urbanistica;
- condizioni di contorno;
- punti di forza, criticità e minacce (generali e per tipo di agenti);
- vegetazione potenziale;
- classificazione fitoclimatica;
- per i Siti Rete Natura 2000: verifica e/o aggiornamento dei dati presenti nei *Formulari dei Siti* della Rete Natura 2000.

Si presume che l'impatto della superficie complessiva di studio e indagini interesserà circa 4 ha, in quanto sarà strutturata sulle seguenti classi di biodiversità potenzialmente interferite dall'infrastruttura:

- paesaggio agricolo residuale;
- siti Rete Natura 2000 (**con maggiore superficie di studio** del SIC ITA020012 Valle dell'Oreto)
- giardini e parchi storici.

<u>Principali caratteri della fauna</u>

Sarà descritta la fauna locale per quanto riguarda i vertebrati terrestri, l'erpetofauna (anfibi e rettili), la mammofauna (mammiferi), l'avifauna (uccelli).

Alcuni parametri e indici che **potranno essere presi in esame**i ed elaborati sono:

- **S = ricchezza di specie**, numero totale di specie nel biotopo;
- **H = indice di diversità** calcolato attraverso l'indice Shannon & Wiener (1963) in cui:
  $H = - pi * \Sigma \ln pi$ è la frequenza dell'iesima specie ed ln il suo logaritmo naturale.
- **J = indice di equiripartizione** di Lloyd & Ghelardi (1964). L'indice misura il grado di ripartizione delle frequenze delle diverse specie nella comunità; tale indice varia tra 0 e 1;
- **% non-Pass**. = percentuale delle specie non appartenenti all'ordine dei Passeriformi; il numero di non-Passeriformi è direttamente correlato, almeno negli ambienti boschivi, al grado di maturità della successione ecologica (Ferry e Frochot, 1970);

- **d = dominanza**; sono state ritenute dominanti quelle specie che compaiono nella comunità con una frequenza relativa uguale o maggiore di 0,05;
- **Abbondanza:** numero di individui/15' **=** numero di individui osservati di una determinata specie nell'unità di tempo di 15'; numero di individui/1000 m = numero di individui osservati di una determinata specie in 1000 metri di spazio di osservazione.

Ai fini della stima degli impatti dell'Infrastruttura sarà valutato (in percentuale sulle aree da campionare):

- Vegetazione e flora
  - sottrazione di vegetazione naturale, in particolare elementi di pregio naturalistico
  - sottrazione di vegetazione di origine antropica

- alterazione di popolamenti vegetali in fase di realizzazione dell'opera
- inserimento di vegetazione naturale, in particolare elementi di pregio naturalistico
- arricchimento di popolamenti vegetali in fase di realizzazione dell'opera

➢ Fauna
- interruzione o alterazione di corridoi biologici
- sottrazione o alterazione di habitat faunistici
- abbattimento della fauna.
- creazione di corridoi biologici
- arricchimento di habitat faunistici
- implementazione della fauna anche in termini di nuove nicchie potenziali di nidificazione

Inoltre, sarà effettuata una verifica dello stato fitosanitario, al fine di individuare eventuali alterazioni correlate, in particolare, alle attività di costruzione.

7.3.2 Indicatori e dei parametri per il successivo monitoraggio

Per quanto riguarda la componente vegetazionale, un parametro molto importante è quello del livello di antropizzazione della flora nelle aree di interesse. In letteratura tale parametro è basato sul rapporto tra le percentuali dei corotipi (insieme di specie ad areale simile) multizonali e quelli stenomediterranei (appartenenti all'omonima categoria). Il rapporto "specie sinantropiche (specie parassite indesiderate)/totale specie censite" rappresenta inoltre uno degli indici utilizzabili per il confronto dei risultati delle fasi di monitoraggio ed un modo per evidenziare le variazioni nell'ambiente naturale connesse alla realizzazione dell'opera.

I "Campi d'indagine" che saranno utilizzati per monitorare l'impatto dell'opera in modo efficace sono:

- Consumo di mosaici di fitocenosi
- Monitoraggio dello stato fitosanitario di singoli individui vegetali di pregio
- Analisi floristica per fasce campione
- Analisi delle comunità vegetali
- Analisi dei popolamenti faunistici
- Analisi delle comunità ornitiche significative e stabili degli ecosistemi fluviale ed agricolo
- Analisi multispettrale per il rilievo della copertura biofisica del suolo e stress della vegetazione naturale

I siti da campionare sono come rappresentati negli elaborati GRAFICI riportati nelle Tavole 11 – 127.

8. INTERFERENZE CON L'EDIFICATO

8.1 Generalità

Nel seguito si illustrano l'organizzazione e la metodologia di lavoro che si intendono adottare per lo sviluppo delle indagini sui fabbricati e per la mappatura e ricerca dei sottoservizi interessati dalle linee tramviarie in progetto. In particolare, vengono descritti le varie fasi delle attività e il metodo proposto per acquisizione, elaborazione, controllo, sintesi e restituzione dei dati rilevati.

L'organizzazione e la metodologia di lavoro proposti sono stati elaborati sulla base delle esperienze acquisite dai tecnici della raggruppamento, in lavori simili a quello in esame.

8.2 Indagini sui fabbricati

8.2.1 Organizzazione del lavoro e delle risorse umane

Sin dalla prima fase della progettazione sarà avviato il rilievo in situ che intende sviluppare sui fabbricati interagenti con le opere, con l'impiego di diverse squadre, ciascuna costituita da tecnici professionisti del settore, che in passato sono stati impegnati ripetutamente in indagini simili.

Si prevede di impegnare il seguente personale:

- un ingegnere senior, responsabile delle attività, che curerà il coordinamento del lavoro;
- una squadra composta da tecnici laureati, in numero adeguato alle esigenze lavorative, che svolgeranno i rilievi in sito e le indagini documentali e che si occuperanno della restituzione dei dati

Tutti i tecnici che saranno impiegati hanno acquisito un'ampia e consolidata esperienza nei vari settori dell'ingegneria strutturale e geotecnica connesse alle attività di indagine in argomento.

Nel corso dei sopralluoghi in sito e presso uffici preposti ogni squadra svolgerà le seguenti attività:

- acquisizione delle informazione circa la disponibilità delle carte di progetto;
- acquisizione e/o rilievo della tipologia della struttura (anno di costruzione, numero di piani, tipologia

- della struttura, quota piano stradale, etc.;
- rilievo di eventuali dissesti, consolidamenti eseguiti, ristrutturazione, restauri, etc.;
- individuazione del presunto tipo di fondazione;
- rilievo fotografico;
- acquisizione dei dati relativi ai nominativi completi di indirizzi e recapiti telefonici con i quali si è preso contatto.

I dati acquisiti saranno documentati in schede, successivamente elaborati e controllati in studio dagli ingegneri senior specializzati nel settore dell'Ingegneria Geotecnica e Strutturale.
Saranno individuati gli edifici particolarmente rilevanti o che presentano eventuali lesioni significative, sui quali sarà svolto un secondo più approfondito rilievo da parte di Ingegneri senior.
Nel corso della restituzione dei dati acquisiti si elaborerà su ogni scheda un giudizio sullo stato di consistenza dei fabbricati, nonché sulla loro capacità di assorbire distorsioni da cedimenti differenziali.
Nel caso in cui si ravvedesse la necessità di eseguire, in sede di progettazione, indagini integrative, verrà riportato il relativo programma sulla scheda.
La ricerca documentale sarà svolta dagli stessi tecnici che si occupano dei rilievi in sito. Si è constatato infatti, sulla base delle precedenti esperienze, che l'acquisizione dei dati documentali risulta più efficiente se viene svolta dagli stessi tecnici che svolgono il rilievo e l'acquisizione dei dati in campo.
Il numero di personale tecnico che da impiegare sarà calibrato per svolgere nel tempo disponibile le due attività di rilievo in sito e reperimento dei dati documentali esistenti presso gli uffici competenti.
In particolare, saranno presi contatti con:

- Ufficio del Genio Civile;
- Prefettura;
- Comune di Palermo Ufficio del Centro Storico;
- Comune di Palermo - Ripartizione Edilizia Privata;
- Enti Pubblici proprietari di immobili;
- Amministratori di condominio

- Conservatoria dei Registri Immobiliari

I dati acquisiti nel corso delle indagini in situ e la documentazione tecnica disponibile, saranno giornalmente verificati ed elaborati su computer nelle schede e nei grafici richiesti.

Saranno prodotti i seguenti elaborati:

1. relazione generale
2. planimetrie generali alla scala disponibile 1:1000 o 1:2000 con l'individuazione dei fabbricati ed i relativi dati principali (per rendere la planimetria di rapida lettura i fabbricati indagati saranno indicati con un colore differente in funzione dell'indice di vulnerabilità).
3. Scheda del fabbricato suddivisa in tre parti:
   a) scheda generale contenente la documentazione fotografica;
   b) scheda strutturale contenente i dati sulla struttura in elevazione ed in fondazione, eventuali ristrutturazioni e consolidamenti, gli elaborati progettuali che è stato possibile reperire;
   c) elenco persone contattate e relativi recapiti.

Nel paragrafo che segue sono indicati i contenuti della scheda.

Per una consultazione rapida e tematica delle schede, i dati saranno registrati su un data base relazionale. Sulla base dell'esperienza da acquisita nei lavori più recenti dello stesso tipo, si è infatti constatato che i dati registrati secondo tale criterio sono gestibili molto più facilmente. Infatti le schede gestite con un database costituiscono una vera e propria banca dati che consente con semplici ed intuitive operazioni la rapida consultazione di tutti i dati acquisiti.

8.2.2 La scheda del fabbricato

La Scheda del fabbricato riassume in maniera esauriente le caratteristiche di ciascun edificio investigato.

Nella scheda è immediatamente possibile individuare l'ubicazione degli edifici grazie al posizionamento, sul frontespizio, di un'immagine rappresentante la tratta in questione e la campitura dell'edificio oggetto della scheda.

All'interno della scheda tutte le informazioni generali sono raggruppate nella seconda pagina; seguono le voci "**principali caratteristiche strutturali**", "**modificazioni strutturali**", "**stato di consistenza delle strutture**" e "**fondazioni**". Le "**notizie generali**" danno indicazioni sull'ubicazione dell'edificio (quartiere ed indirizzo), sull'anno di costruzione (con eventualmente indicato il nome del costruttore), sul numero di piani, sulla presenza o meno di piani interrati o seminterrati, sulla proprietà, sulla destinazione d'uso, sui vincoli e sulla presenza o meno di amministratori di condominio.

Sotto la voce "**principali caratteristiche strutturali**" si danno notizie sul tipo di struttura portante, sul tipo di solai e sul sistema costruttivo.

Sotto la voce "**modificazioni strutturali**" sono raccolte le notizie utili a stabilire se la struttura si trova nelle condizioni originarie e svolge le funzioni per cui è stata progettata. In particolare si mette in evidenza se si sono verificate variazioni dei carichi permanenti e se sono stati eliminati, modificati o aggiunti elementi strutturali che hanno potenzialmente cambiato il funzionamento della struttura.

Sotto la voce "**stato di consistenza delle strutture**" sono accuratamente descritti tutti i segni di dissesto statico che eventualmente interessano gli edifici. In particolare vengono descritte le lesioni, il loro andamento e, quando possibile, si cerca di individuare la causa che le ha prodotte.

Sotto la voce "**fondazioni**" si hanno indicazioni sulla tipologia di fondazione e sulla quota di imposta. Si danno inoltre informazioni sui terreni di fondazione, sul livello di falda e sulla presenza o meno di cavità.

La scheda contiene inoltre una documentazione fotografica riportante i prospetti dell'edificio e le lesioni eventualmente presenti.

L'ultima voce riguarda l'**indice di vulnerabilità**, di cui ad un successivo paragrafo.

INTERFERENZE CON FABBRICATI/OPERE CIVILI

Edificio N° - Planimetria N°

Data rilievo:	
Ubicazione:	
Piani fuori terra:	
Piani interrati:	
Lunghezza:	
Destinazione d'uso:	
Edificio di Interesse:	
Recettore sensibile:	
Delimitato da:	
Ingresso:	
Periodo di costruzione:	

PRINCIPALI CARATTERISTICHE STRUTTURALI

	Esistente	Struttura a vista	Tipologia struttura	Solaio superiore a vista	Tipologia solaio
Secondo seminterrato					
Primo seminterrato					
Piano terra					
Piano ammezzato					
Piano primo					

MODIFICAZIONI STRUTTURALI

Variazioni dei carichi:

Modifiche alla struttura intelaiata: ☐ Eliminazione pilastri o travi ☐ Nessuna modifica

Corpi aggiuntivi: No

Modifiche ai setti murari: ☐ Eliminazione ☐ Apertura di varchi ☐ Allargamento di aperture ☐ Nessuna modifica

STATO DI CONSISTENZA DELLE STRUTTURE

Fessure: ☐ Lievi ☐ Importanti ☐ Assenti

Umidità: ☐ Fondazioni ☐ Solai latero-cementizi ☐ Balconi ☐ Assente

Corrosioni: ☐ Armature pilastri e travi ☐ Solai latero-cementizi ☐ Balconi ☐ Assenti

FONDAZIONI

Tipo di fondazione: ☐ Cordolo in muratura ☐ Travi di C.A. ☐ Pali o pozzi ☐ Plinti di c.a. isolati

Terreni di fondazione: ☐ Calcareniti ☐ Argille ☐ Sabbie ☐ Riporto

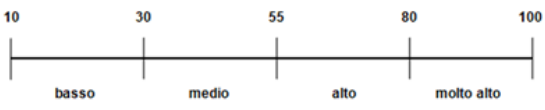
Quota di imposta:

Livello di falda:

Cavità sotterranee:

INDICE DI VULNERABILITA'

Vulnerabilità: 00



Note:

8.2.3 Valutazione dello stato di consistenza e dell'indice di vulnerabilità

Nel dettaglio, per quanto riguarda lo stato di consistenza delle strutture, saranno descritti i dissesti eventualmente in atto, tentando di individuarne le possibili cause.

Il rilievo sarà effettuato principalmente tramite la localizzazione delle lesioni nella struttura ed annotando per ognuna di esse alcune caratteristiche rilevanti ai fini della comprensione del fenomeno di dissesto.

Per ciò che riguarda i quadri fessurativi, per ogni singola frattura si annoterà:

- se la frattura sia passante o meno;
- se segue i giunti tra i blocchi, nel caso di strutture murarie;
- la direzione, sub-verticale, sub-orizzontale o inclinata;
- l'andamento, ondulato o irregolare;
- l'apertura ovvero la distanza fra le labbra della frattura;
- la dislocazione delle labbra della frattura.

Per gli edifici con quadro fessurativo importante sarà predisposta una documentazione aggiuntiva comprendente elaborati grafici che mostrano il quadro fessurativo rilevato.

Sarà inoltre annotata la presenza di fenomeni di corrosione eventualmente presenti nelle armature di pilastri e travi delle strutture in c.a., nei solai latero-cementizi e nei balconi.

Infine sarà rilevata la presenza di umidità e la sua provenienza, se da infiltrazioni attraverso la copertura ovvero dai terreni di fondazione per risalita capillare.

Le osservazioni sullo stato di consistenza della struttura saranno trasformate in valori numerici che permettano di identificare un cosiddetto **Indice di consistenza S** della struttura. Con riferimento alla tabella I, saranno utilizzati come fattori valutativi le lesioni, le corrosioni e l'umidità. Ad ogni fattore è collegato un aggettivo e un relativo punteggio. L'aggettivo è attribuito nel corso del rilievo. Quindi si definisce l'**Indice di consistenza S** come la sommatoria dei punteggi relativi ai fattori individuati: $S = \Sigma Ci$.

Lo stato di consistenza sarà definito::

- Buono se $0 \leq S < 20$
- Discreto se $20 \leq S < 50$
- Mediocre se $50 \leq S < 80$
- Pessimo se $S \geq 80$

Tabella I: Valutazione dello **Stato di consistenza S** delle strutture

FATTORI	CAMPI (Ci)			
Lesioni	assenti	modeste	diffuse	importanti
	0	20	50	80
Umidita'	assente	al solaio / copertura	alle pareti	ai piani terra / cantinati
	0	5	5	10
Corrosione	assente	balconi	solai latero cementizi	armature pilastri e travi
	0	5	10	15

8.2.4 Principali modificazioni strutturali

Nel corso dell'indagine si terrà conto, quale fattore fondamentale ai fini della valutazione della vulnerabilità degli edifici, la presenza o meno di modificazioni apportate alla struttura in tempi successivi alla costruzione.

In particolare, saranno accertate, in maniera diretta o attraverso informazioni assunte dai proprietari o dagli inquilini, eventuali variazioni dei carichi che la struttura ha subito per effetto di cambio di destinazione d'uso dell'immobile o di una sua parte, eventuali modificazioni di setti murari o pilastri e la eventuale presenza di corpi aggiunti alla struttura con volumi significativi.

Per ciò che riguarda i carichi sarà investigata la possibile trasformazione di ambienti destinati ad abitazione in magazzini/negozi o in ambienti pubblici o ancora in officine.

Per le strutture murarie sarà accertato, ove possibile, che non siano state allargate le aperture esistenti, che non siano stati aperti nuovi varchi o del tutto eliminati alcuni setti murari.

Per le strutture di c.a. si accerterà se alcuni pilastri o travi hanno subito consolidamenti, riduzioni della sezione trasversale o l'eliminazione.

Infine si accerterà la presenza di corpi aggiuntivi in elevazione o adiacenti collegati o meno alla struttura originaria.

Sulla base delle osservazioni in sito si assegnerà un punteggio ad ogni modificazione (vedi tab. II), crescente con l'importanza della stessa rispetto alla variazione del funzionamento della struttura, e si definirà un **Indice delle modificazioni strutturali M**, ottenuto dalla somma dei singoli punteggi: $M = \Sigma Ci$.

Le modificazioni strutturali saranno definite:

- Lievi se 0 ≤ M < 20
- Modeste se 20 ≤ M < 50
- Rilevanti se 50 ≤ M < 80
- Importanti se M ≥ 80

Tabella II: Valutazione dell'**Indice delle modificazioni strutturali M**

FATTORI	CAMPI (Ci)			
Variazioni dei carichi	Nessuna	Magazzini / Negozi	Ambienti pubblici	Officine
	0	5	10	20
Setti	Nessuna modifica	Allargamento aperture	Apertura varchi	Eliminazione
	0	5	15	30
Pilastri	Nessuna modifica	Consolidati	Riduzione sezione	Eliminazione
	0	5	25	40
Corpi aggiuntivi	Assenti	Adiacenti non collegati	Adiacenti collegati	Sopraelevazioni
	0	5	10	20

8.2.5 Valutazione della vulnerabilita'

La valutazione degli effetti prodotti su di un edificio dallo scavo eseguito in prossimità dello stesso, richiede un'analisi dettagliata del complesso scavo/terreno – edificio.

La sensibilità dell'edificio agli eventuali movimenti causati nel terreno di fondazione dallo scavo è definita come vulnerabilità, tenendo conto della terminologia normalmente impiegata nella definizione dei parametri di rischio.

E' noto infatti che il rischio viene definito come il prodotto tra la pericolosità e la vulnerabilità. La pericolosità rappresenta la probabilità che un dato evento si verifichi in un certo intervallo di tempo o di spazio, mentre la vulnerabilità tiene conto dell'insieme di persone e cose che risentono degli effetti di tale evento.

Nel nostro caso il fattore pericolosità è rappresentato dai cedimenti dovuti agli scavi ed è legato alle caratteristiche geometriche dello scavo (dimensioni, profondità e ubicazione) ai metodi di realizzazione dello scavo ed alle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati. Il fattore di vulnerabilità tiene conto dell'insieme di infrastrutture che si trovano nell'area di influenza dell'opera.

Al fine di fornire un ulteriore dato utile alla progettazione si ritiene pertanto importante valutare il parametro vulnerabilità che consente di individuare quantitativamente la capacità degli edifici di resistere alle modifiche dello stato di sollecitazione conseguenti ai cedimenti indotti dallo scavo di gallerie e trincee.

In questa fase non è possibile stimare la pericolosità in quanto questa è intimamente legata alle scelte progettuali. Tali scelte progettuali potranno essere calibrate al fine di ridurre il rischio entro valori di accettabilità.

La vulnerabilità di un edificio rispetto ad una qualunque deformazione del suolo rappresenta la sua maggiore o minore attitudine a sopportare le sollecitazioni indotte dai cedimenti delle fondazioni. Essa è dunque una proprietà intrinseca del fabbricato in relazione alle caratteristiche del terreno, funzione cioè della tipologia di edificio (geometria, tipologia strutturale, stato di conservazione) e del complesso fondazione – terreno.

Per esprimere sinteticamente la vulnerabilità, quantizzata con un indice, utilizzando le metodologie descritte, si è elaborata una tabella di calcolo che rappresenta il prodotto finale di un attento studio teorico preliminare.

Tale **indice di vulnerabilità V** viene determinato associando un peso ad alcuni parametri caratteristici dell'edificio, della fondazione e del terreno. La sua valutazione avviene attribuendo un fattore a ciascun parametro, suddiviso in campi rappresentanti diverse tipologie, ciascuno con diverso peso numerico. La somma tra i prodotti ottenuti moltiplicando il fattore Fj con il valore attribuito al campo Ci fornisce l'**Indice di vulnerabilità V.**

I fattori utilizzati sono raggruppati in due voci principali(vedi tab. III).:

- Edificio
- Sottosuolo

Sotto la voce Edificio sono raggruppati i fattori relativi alla tipologia strutturale, al tipo di fondazione, all'altezza intesa come numero di piani fuori terra e alla lunghezza, dimensione caratteristica presa come proiezione su una direzione ortogonale alla direttrice dell'opera, alla destinazione d'uso, allo stato di consistenza della struttura e alle modificazioni strutturali così come sono state definite nei precedenti capitoli. Sotto la voce Sottosuolo sono raggruppati i fattori relativi al terreno di fondazione, al livello della falda e alla presenza di cavità.

L'indice di vulnerabilità assume valori compresi fra un minimo di 10 e un massimo di 100.

L'edificio si definisce:

- Poco vulnerabile se $10 \leq V < 30$
- Mediamente vulnerabile se $30 \leq V < 55$
- Vulnerabile se $55 \leq V < 80$
- Molto vulnerabile se $80 \leq V < 100$

Tabella III: Valutazione dell'**Indice di vulnerabilità V**

	FATTORI	Fj	CAMPI (Ci)			
Edificio	Struttura	3	acciaio	c. a.	mista	muratura
	Punteggio		1	2	3	4
	Fondazione	2	indiretta su pali	diretta in cemento armato	pozzi in muratura	superficiali in muratura
			1	2	3	4
	Numero piani	1	1 piano	2/3 piani	4/6 piani	> 6 piani
			1	2	3	4
	Lunghezza	2	< 10 m	10 m ÷ 25 m	25 m ÷ 50 m	> 50 m
			1	2	4	6
	Destinazione d'uso	1	abbandonato	privato	pubblico	edificio storico
			0	2	4	+1
	Stato di consistenza delle strutture	3	buono	discreto	mediocre	pessimo
			0	2	4	6
	Modifiche strutturali	3	lievi	modeste	rilevanti	importanti
			0	2	4	6
Sottosuolo	Terreni di fondazione	2	calcareniti	argille flysch	argille azzurre	terreni di riporto
			1	2	3	5
	Profondità. livello falda	1	> 40m	40 m ÷ 20 m	20 m ÷ 5 m	superficiale
			0	1	2	4
	Cavita'	3	assenti	incerte	probabili	presenti
			0	1	2	3

Indice di vulnerabilità $V = \Sigma Ci\ Fj$

9. SOTTOSERVIZI

9.1 Premesse

Il Concorrente è in possesso di numerosi dati relativi ai sottoservizi che interferiscono con le linee tramviarie in progetto. Le relative aree dove ricadono tali sottoservizi sono riportate negli elaborati grafici delle tavole da 111 a 127.

Allo scopo di aggiornare e completare il quadro delle conoscenze, sono in programma indagini specifiche finalizzate alla localizzazione e mappatura di tutti i sottoservizi presenti nel sottosuolo al di sotto del piano di posa della linea tramviaria, fino ad una profondità di 2,5 – 3,0 m.

Tale attività sarà condotta in conformità alla recente **UNI/PdR 26/01/2017**, che alla **Sezione 1** "*Tecnologia di realizzazione delle infrastrutture interrate a basso impatto ambientale - Sistemi per la localizzazione e mappatura delle infrastrutture nel sottosuolo*" fornisce le modalità per la localizzazione e mappatura, in maniera non distruttiva, di elementi ubicati nel sottosuolo delle sedi stradali o delle aree sulle quali sia necessario eseguire detti rilievi quali sottoservizi, strutture, reperti archeologici e cavità.

Il documento è applicabile sia agli impianti in ambito urbano, sia a quelli in ambito extraurbano e fornisce le specifiche descrittive delle indagini in termini di:

- livelli di qualità e prestazioni minime;
- analisi di archivi storici;
- sopralluoghi ed esecuzione di misure;
- modalità di esecuzione di rilievi radar e verifica dei risultati;
- inquadramento cartografico;
- reportistica.

9.2 Classificazione dei Sottoservizi

La Classificazione dei sottoservizi viene ad essere basata su quattro "Livelli di Qualità", dal livello più basso D (raccolta di dati da archivi storici, informazioni ottenute con interviste agli addetti alle reti o a chi ha posato le reti) fino al più alto A, basato sui risultati dell'osservazione diretta dei sottoservizi e l'ispezione dei manufatti interrati.

In fase di progettazione la UNI/PdR 26/01/2017 prescrive di utilizzare i risultati di indagini che fanno riferimento al livello di qualità minimo B, generalmente indicato come LQ-B: "*Classificazione dei sottoservizi sulla base di indagini con strumenti di rilievo geofisico*".

Questo livello è a sua volta suddiviso in due sottocategorie, in relazione alla strumentazione di indagine utilizzata ed alle procedure operative.
In funzione del livello di qualità e dell'origine dei dati e dei materiali dei sottoservizi (solo per il sottolivello LQ-B-I), vengono definiti:

- il range di errore sul piano orizzontale, variabile a seconda delle diverse fasce di profondità;
- la percentuale massima di errore sulla profondità di indagine.

9.3 Piano di indagini

Per lo sviluppo del presente piano di indagini si farà riferimento alle indicazioni fornite dalla sezione 1 della UNI/PdR 26/01/2017 relativamente al Livello di Qualità LQ-B.
La campagna di acquisizione dati avverrà attraverso l'uso di una strumentazione Georadar (GPR–Ground Probing Radar) multifrequenza, descritta in altro capitolo, che la realizzazione di profili trasversali e longitudinali con spaziatura adeguata al sito.
La strumentazione che sarà impiegata, di moderna generazione, comprende tutti gli accorgimenti, tecnologie e strumenti necessari per il raggiungimento dei migliori risultati. Inoltre, la strumentazioni sarà sottoposta a test operativi in condizioni note per la verifica dell'efficienza delle prestazioni e della correttezza dei risultati forniti.
Come anche specificato dalla UNI/PdR 26/01/2017, si precisa che, Per la natura stessa delle indagini realizzate per ottenere il Livello di Qualità LQ-B, i risultati che si ottengono mantengono necessariamente livelli di incertezza dettati, oltre che dal corretto utilizzo e manutenzione delle strumentazioni e dall'impiego di personale tecnico specializzato, anche da vari fattori ambientali, quali la natura del sottosuolo, il grado di umidità e la densità di sottoservizi, in particolar modo in situazioni con un alto grado di complessità come i centri urbani. Pertanto, il risultato di tali indagini viene a costituire un modello

tridimensionale che non può in alcun caso essere considerato una riproduzione esatta della realtà sottesa all'area di indagine, ma una schematizzazione di essa con l'accuratezza tipica della strumentazione che viene utilizzata.

Le indagini saranno estese ad una fascia larga a sufficienza a cavallo della linea sarà estesa.

Per realizzare una mappatura precisa dei sottoservizi verrà eseguita una fitta maglia di profili GPR, utilizzando uno strumento multifrequenza: con "scansioni longitudinali", aventi spaziatura variabile tra 2 e 3 m in funzione della larghezza della sede stradale da investigare, e "scansioni trasversali" con spaziatura variabile tra 2 e 5 m in funzione della morfologia dell'area da investigare (incroci, densità abitativa, ecc.).

Prima dell'avvio delle attività relative all'acquisizione dei dati, attraverso la strumentazione Georadar dedicata alla localizzazione delle infrastrutture del sottosuolo, si avvierà una attività di raccolta di informazioni e dati che comprenderà:

- l'identificazione e la perimetrazione dell'area di indagine;
- la valutazione cartografia esistente ed una eventuale integrazione con rilievo topografico (operazione necessaria in caso vi siano almeno due sistemi di riferimento locali o comunque una cartografia di base insufficiente);
- il rilievo di elementi utili alla localizzazione ed individuazione della tipologia di sottoservizio (quali armadietti, caditoie, chiusini, pali illuminazione, collegamenti verticali ed altri elementi collegati a sottoservizi);
- l'individuazione delle aree dove le indagini Georadar devono essere particolarmente approfondita, come ad esempio aree nelle quali dovranno essere realizzate le sottostazioni.

I risultati delle indagini saranno restituiti su supporto cartaceo e digitale sotto forma di:

- elaborati cartografici;
- relazioni tecniche.

Di norma le scale cartografiche utilizzate, che permettono una rappresentazione chiara delle infrastrutture presenti nel sottosuolo, saranno 1:100 e/o 1:200.

La documentazione comprenderà:

- dettagli dell'area di indagine, perimetrata sulla cartografia;

- sistema di riferimento locale utilizzato per l'acquisizione, riportato in cartografia;
- descrizione delle strumentazioni utilizzate per eseguire il rilievo;
- livello di Qualità ottenuto nel rilievo, unitamente alla modalità di esecuzione delle indagini;
- segnalazione in cartografia di aree di anomalia e alta attenuazione del segnale elettromagnetico;
- stima della profondità di penetrazione del segnale radar;
- informazioni relative alla posizione e natura dei servizi:
- rappresentazione dei servizi con polilinee;
- profondità dei servizi rispetto al piano stradale o al piano campagna;
- laddove possibile, la natura dei servizi e l'ente di appartenenza;
- laddove possibile, la dimensione approssimativa (fascia di ingombro);
- Le informazioni relative ad altre anomalie con rappresentazione di:
- anomalie di piccola estensione (per esempio trovanti, piccole cavità, pozzetti, ecc.);
- anomalie lineari (per esempio vecchi muri o fondamenta);
- anomalie estese (stratificazioni, grosse strutture, ecc.);