	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteri per l'individuazione delle cavità sotterranee

## 1 PREMESSA

La presente relazione analizza le problematiche connesse alla presenza certa o solo probabile delle cavità sotterranee interferenti, direttamente e/o indirettamente, sia con le gallerie che con le stazioni lungo il tracciato della nuova linea della Metropolitana Automatica Leggera di Palermo, con particolare riferimento alle due fasi di **indagine e bonifica**.

Allo stato attuale delle conoscenze le tratte del tracciato potenzialmente fertili di cavità sotterranee sono state individuate tra le stazioni Oreto Nord e Giulio Cesare, e tra le stazioni Archimede e Notarbartolo, così come indicato negli elaborati grafici allegati al progetto.


## 2 REQUISITI DEL SISTEMA

Le soluzioni progettuali proposte ai fini dell'identificazione delle cavità sotterranee e degli eventuali interventi di bonifica nel caso di un loro reperimento sono state improntate sui criteri qui di seguito esposti. Va evidenziato che in genere si prevede la presenza di cavità sotterranee nelle porzioni più superficiali di terreno, mentre le gallerie di linea in progetto sono ubicate a profondità generalmente comprese tra 15 e 20 m rispetto al piano campagna.

### 2.1 INDAGINI

Il sistema di indagini previsto in questo progetto è stato scelto con l'obiettivo di soddisfare i seguenti requisiti:

- **minimizzare l'impatto dei cantieri superficiali**, riducendo il numero dei cantieri, limitando l'estensione delle aree occupate, e prevedendo la possibilità di ubicare i cantieri non necessariamente sulla proiezione verticale del punto/area da indagare;
- **limitare il numero delle perforazioni dal piano campagna**: tale requisito si traduce, come si vedrà nel seguito, nella limitazione del numero di indagini dirette (perforazioni di sondaggio) e nell'adozione di sistemi di indagine di tipo indiretto (indagini geofisiche);
- **raggiungere un buon livello di continuità delle indagini**: il volume di terreno compreso tra le gallerie e la superficie dovrebbe essere esplorato praticamente senza soluzione di continuità;
- **eseguire la maggior parte delle indagini prima dei lavori**: l'anticipo delle indagini, meglio se durante il periodo previsto per lo sviluppo della progettazione definitiva ed esecutiva, e comunque preliminarmente al passaggio delle TBM, è il requisito essenziale per poter pianificare la eventuale bonifica senza interferire sul programma dei lavori;
- **svincolare la fase di avanzamento dello scavo delle gallerie da quelle di indagine e bonifica**, adottando sistemi in grado di esplorare in profondità il terreno nell'intorno delle gallerie prima del passaggio delle TBM.
- **ridurre i tempi di indagine**: una riduzione dei tempi di indagine, è un vantaggio non solo per la stazione appaltante e per l'impresa esecutrice, ma per l'intera collettività, che subirà un disagio minore per i lavori ed infine potrà disporre dell'infrastruttura in tempi minori, senza ritardi.

 CITTÀ DI PALERMO	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteria per l'individuazione delle cavità sotterranee

## 2.2 BONIFICA

Il requisito essenziale per questa attività è che possa espletarsi completamente, o quasi, prima dell'inizio dei lavori, o comunque secondo un preciso programma. Risulta infatti essenziale escludere la possibilità, od almeno ridurla al minimo, che l'azione di bonifica debba essere affrontata all'improvviso in conseguenza dell'accertamento non preventivo di una cavità. Ciò significa che, a maggior ragione, le indagini devono esaurirsi in fase preliminare, in modo tale che la bonifica possa essere attuata come prima fase dei lavori, senza interferenza con le altre lavorazioni, relative sia alle gallerie, che alle stazioni e agli altri manufatti.

### 3 METODOLOGIE USUALI E RELATIVE CRITICITÀ

Le attività di indagine e bonifica delle cavità sono condizionate dal fatto che è obiettivamente molto difficile stimarne preventivamente la posizione e l'entità, e quindi riuscire a valutare le opportune soluzioni, in modo da non avere ricadute negative in termini di definizione dei tempi di esecuzione e programmazione dei lavori.

Nel caso specifico, l'obiettivo principale di questo studio è stato quello di cercare di ridurre al minimo il rischio dell'individuazione di cavità durante l'esecuzione dei lavori, che potrebbe avere forti ripercussioni sui tempi di costruzione (in particolare di avanzamento delle TBM) oltre che sull'impatto superficiale causato dalla necessità di un intervento immediato e non programmato di bonifica delle cavità stesse.

Per questo motivo in questa fase progettuale si è dato **un maggiore risalto alla fase di indagine** rispetto a quella di bonifica, in quanto maggiormente critica, non solo per le sue dirette implicazioni in termini di impatto superficiale, ma anche per le potenziali conseguenze legate alla sua interdipendenza con altre fasi costruttive.

Per questo motivo si è cercato di individuare innanzitutto le principali criticità dei metodi di indagine più diffusi, e successivamente di individuare quelle tecniche più moderne che consentano una più accurata fase di indagine da effettuare in fase preliminare, col fine di ridurre al minimo le possibili interferenze durante l'esecuzione dei lavori.

#### 3.1 INDAGINI

##### 3.1.1 Gallerie TBM

Nei tratti in cui si determina l'interferenza tra le gallerie realizzate con scavo meccanizzato e le zone fertili per le cavità sotterranee, le tradizionali ed usuali tipologie d'indagine sono di due tipi: **perforazioni in avanzamento dalla TBM** e **perforazioni dalla superficie**.

Entrambe queste due metodologie presentano tuttavia delle peculiarità e delle criticità che sono qui di seguito evidenziate.

##### a) PERFORAZIONI IN AVANZAMENTO DALLA TBM

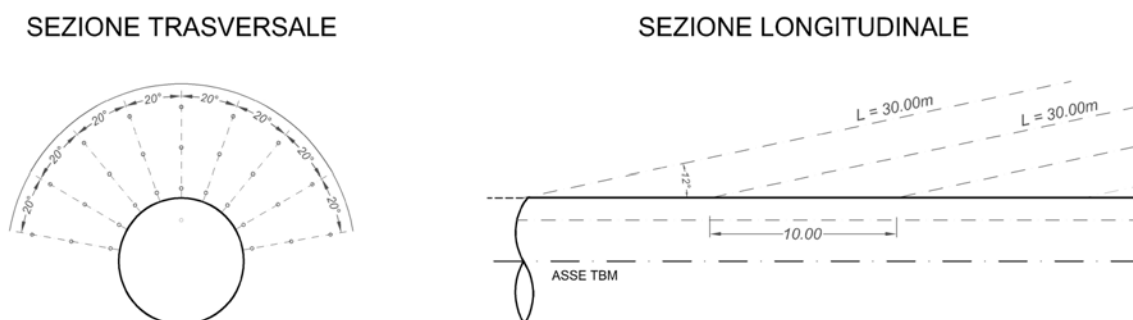



Fig. 1 Schema delle perforazioni in avanzamento dalla TBM

Le perforazioni in avanzamento dalla TBM vengono eseguite generalmente dal mantello della

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteri per l'individuazione delle cavità sotterranee

fresa, e sono orientate in modo da esplorare in avanzamento un semicono di terreno al contorno della sezione di scavo.

Tale modo di procedere presenta tuttavia una serie di criticità, qui di seguito evidenziate:


- **rallentamento della TBM:** la velocità di avanzamento è fortemente penalizzata da questo tipo di indagini per le quali sono necessari ripetuti fermi, più o meno lunghi in relazione all'esito delle perforazioni stesse;
- **rischi legati al fermo** di una macchina, quale la TBM, la gestione della continuità del cui funzionamento è sicuramente un problema delicato;
- **dipendenza della fase di avanzamento:** non solo da quella di indagine ma soprattutto da quella della conseguente bonifica, che determina una significativa incertezza nei tempi previsti per lo scavo meccanizzato e quindi sull'intero programma lavori;
- **difficoltà esecutive:** la realizzazione delle perforazioni dall'interno della TBM richiede la presenza di tecnici dedicati e di specifiche attrezzature, con importanti limitazioni in termini di spazi di manovra e sicurezza degli operatori;
- **ristrettezza del campo di indagine:** le perforazioni, per la disposizione geometrica prevista, consentono l'esplorazione della corona sovrastante la calotta delle gallerie, ma con una non trascurabile componente di discontinuità e irregolarità dell'area effettivamente coperta (specie ai bordi della corona circolare investigata).

#### b) PERFORAZIONI DALLA SUPERFICIE

Le indagini dalla superficie sono in genere preliminari rispetto a quelle in avanzamento dalla TBM, e consistono in una serie di perforazioni verticali a distruzione di nucleo con maglia prefissata e successiva ispezione televisiva.

Anche questo tipo d'indagine presenta una serie di criticità per il progetto in esame, principalmente in termini di impatto superficiale:

- **interferenza con gli edifici e con aree private:** le gallerie corrono per notevoli estensioni sotto aree densamente costruite e pertanto, l'esplorazione dall'alto del volume di terreno in cui si risente dell'influenza dello scavo, diventa difficile se non localmente impossibile, proprio laddove gli effetti potenziali hanno conseguenze peggiori;
- **interferenza con la viabilità:** anche per le indagini previste in corrispondenza di strade o piazze sorgono una serie di problemi, non solo in termini di conseguenze sul traffico dei veicoli e sui lavori di ripristino della pavimentazione, ma anche come vincolo di esecuzione per fasi del cantiere;
- **interferenza con l'archeologia:** l'esecuzione di perforazioni dalla superficie in zone archeologicamente fertili può subire forti limitazioni e ritardi;
- **interferenza con i pubblici servizi:** il rispetto della maglia di perforazione prevista potrebbe essere disatteso in funzione della presenza di pubblici servizi lungo il corridoio infrastrutturale, e in ogni caso l'interferenza con i sottoservizi costituirebbe un rallentamento per i tratti iniziali delle perforazioni;
- **tempi lunghi di esecuzione:** il continuo spostamento dei cantieri superficiali ha una forte incidenza sui tempi netti di perforazione;

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteri per l'individuazione delle cavità sotterranee

- **necessità di maglie di perforazioni molto fitte:** l'interasse delle perforazioni dovrebbe essere molto piccolo per l'identificazione di cavità piccole e disposte secondo allineamenti particolarmente "sfortunati".

### 3.1.2 Stazioni e altri manufatti

Le indagini dal piano di campagna per l'identificazione delle cavità in corrispondenza delle aree di stazione e degli altri manufatti di linea, consistono generalmente in una serie di perforazioni verticali a distruzione di nucleo e successiva ispezione con telecamera lungo gli allineamenti delle paratie in progetto. Tali indagini presentano le stesse criticità di quelle per le gallerie, con il modesto vantaggio che le stazioni sono per lo più ubicate all'interno di piazze o di aree comunque con ridotti vincoli superficiali rispetto al generico corridoio di tracciato.

## 3.2 BONIFICA

La tecnica di bonifica delle cavità consiste essenzialmente nel riempimento delle cavità reperite con idonei materiali (calcestruzzo, misto cementato, ghiaia, ecc.). Nel caso in cui la dimensione della cavità sia molto grande, è possibile prevedere la perimetrazione della stessa con un allineamento di micropali accostati dotati di sacco otturatore, da iniettare in modo da realizzare un diaframma a tenuta per il successivo riempimento.

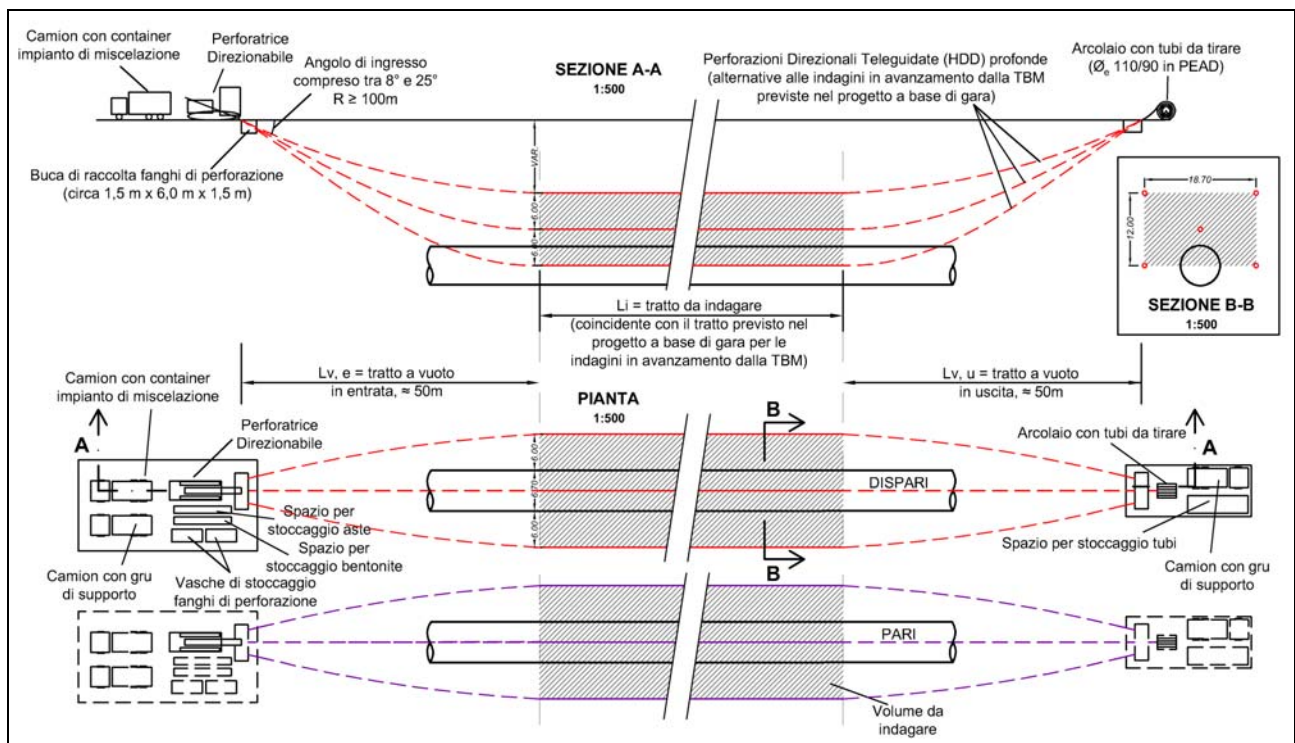
L'unica criticità della fase di bonifica è rappresentata dalla sua potenziale contemporaneità con la fase di scavo della TBM, qualora le indagini previste durante l'avanzamento della fresa ne richiedano l'esecuzione. Infatti l'eventuale necessità di bonifica conseguente l'accertamento di una o più cavità tramite le indagini in avanzamento, richiederebbe un intervento dalla superficie non pianificato né programmato; ciò si tradurrebbe non solo in un fermo della TBM con conseguente ritardo dell'intero programma lavori, ma anche in un negativo impatto sul territorio di non sempre facile gestione.

## 4 METODOLOGIE PROPOSTE

### 4.1 INDAGINI PRELIMINARI

La tecnica d'indagine preliminare qui di seguito illustrata consente di rinunciare del tutto alle perforazioni in avanzamento dal fronte della TBM, ovviando così a tutte le criticità descritte in precedenza. Dovendo soddisfare i requisiti in grado di risolvere le predette criticità, questa tecnica si basa su un metodo misto di indagini dirette (perforazioni) ed indirette (indagini geofisiche), integrate e tra loro complementari.

Tale soluzione, pur concentrando i cantieri per le indagini in pochi punti di facile accesso e generalmente laddove non si creano difficoltà alla circolazione dei veicoli e tanto meno alle attività sociali, quindi con un limitato impatto superficiale, è in grado di tracciare il percorso della TBM, preliminarmente al suo passaggio, con una serie di "perforazioni direzionali teleguidate"<sup>1</sup> (fase 1), che, partendo dalla superficie con una certa inclinazione raggiungono, nelle varie posizioni stabilite, la profondità della galleria, per seguirne il tracciato lungo tutto il tratto da indagare e per poi risalire in superficie.



Dall'interno di tali perforazioni, opportunamente predisposte mediante l'inserimento di un tubo in PEAD Ø110 mm, ed attrezzate con i necessari dispositivi, sono successivamente eseguite le indagini geofisiche, mediante prove sismiche **cross-hole in orizzontale (fase 2)**.

Infine, qualora le indagini di fase 1 e 2 rilevino la presenza di una cavità, dal punto superficiale corrispondente, ma solo in quell'area, sarà eseguita una **perforazione a distruzione di nucleo**

<sup>1</sup> d'ora in poi per brevità HDD, acronimo di Horizontal Directional Drilling

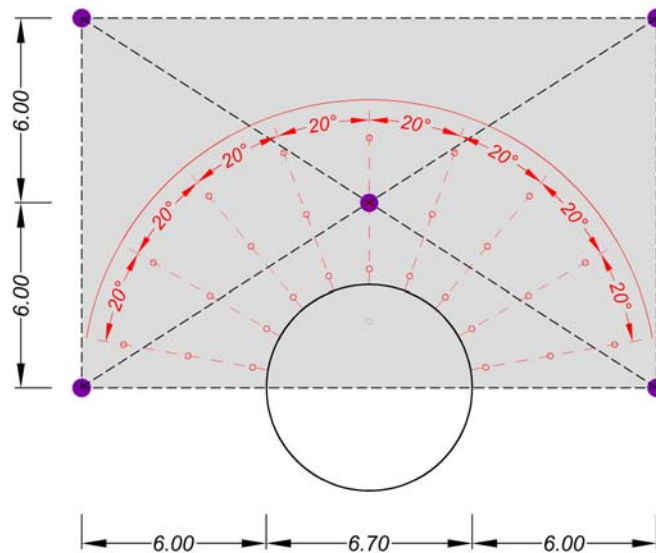
**con ispezione televisiva** al fine di accertare le reali dimensioni della cavità e di progettare la bonifica (**fase 3**).

Tutte queste attività saranno comunque effettuate in fase preliminare rispetto al passaggio delle TBM, con notevoli vantaggi nei confronti del programma lavori; si può anzi prevedere che tali indagini si possano realizzare ancora durante le fasi di progettazione definitiva ed esecutiva.

Il sistema di indagine previsto è quindi di tipo misto; rispetto ai sistemi che prevedono perforazioni verticali e orizzontali con reticoli molto fitti per poter individuare le cavità significative, il sistema misto, a parità di volume indagato, consente di ridurre il numero delle perforazioni realizzando un reticolo con interassi tali da non superare la distanza limite per le indagini cross-hole (circa 20 m). In altre parole le HDD sono principalmente strumentali alle indagini sismiche e solo in minima parte assolvono alla funzione di indagine diretta.

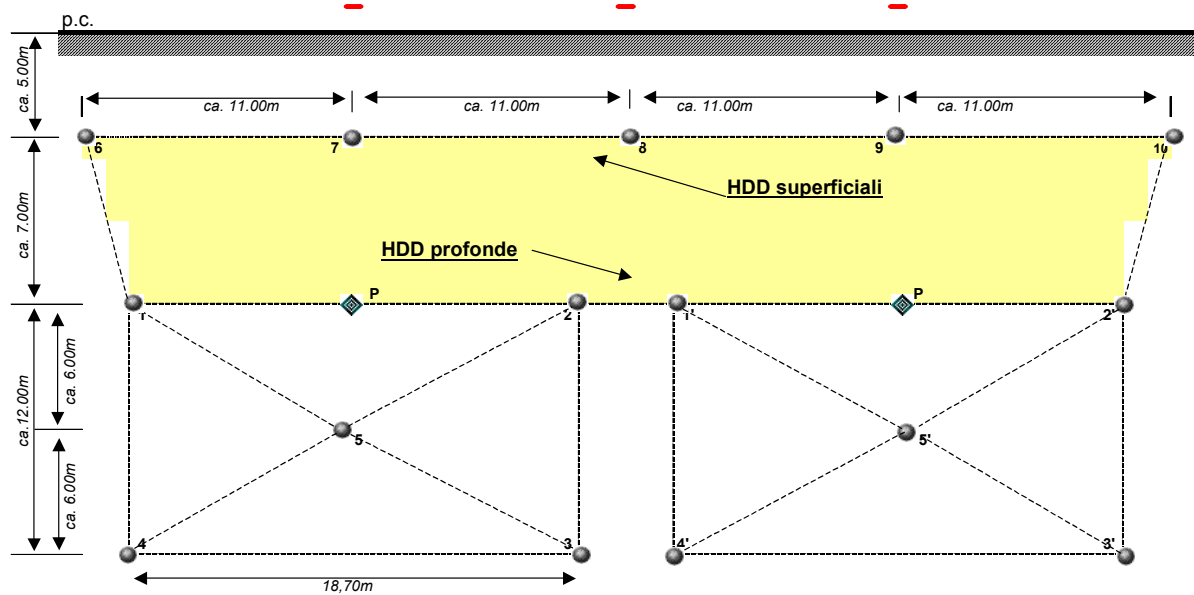
Sono state ipotizzate due tipologie di HDD costruttivamente identiche ma funzionalmente diverse, di cui si illustrano le principali caratteristiche, meglio illustrate nei disegni allegati al progetto:

- le **"HDD profonde"**, parallele all'asse della galleria, in numero di 5 per ogni galleria, disposte secondo un reticolo costituito dai vertici di un rettangolo 18.7x12.0 m e dall'intersezione delle sue diagonali



- le **"HDD superficiali"**, parallele alla superficie, disposte in numero di 5 o 6, a seconda dell'interasse tra le gallerie, ad una profondità di circa 5 m con il criterio che risultino più superficiali possibile, compatibilmente con i vari vincoli (fondazioni edifici, archeologia, pubblici servizi,...), lungo il corridoio infrastrutturale, che sono alternative alle indagini preliminari dalla superficie, e vengono eseguite con perforazioni a distruzione di nucleo ed ispezione televisiva.



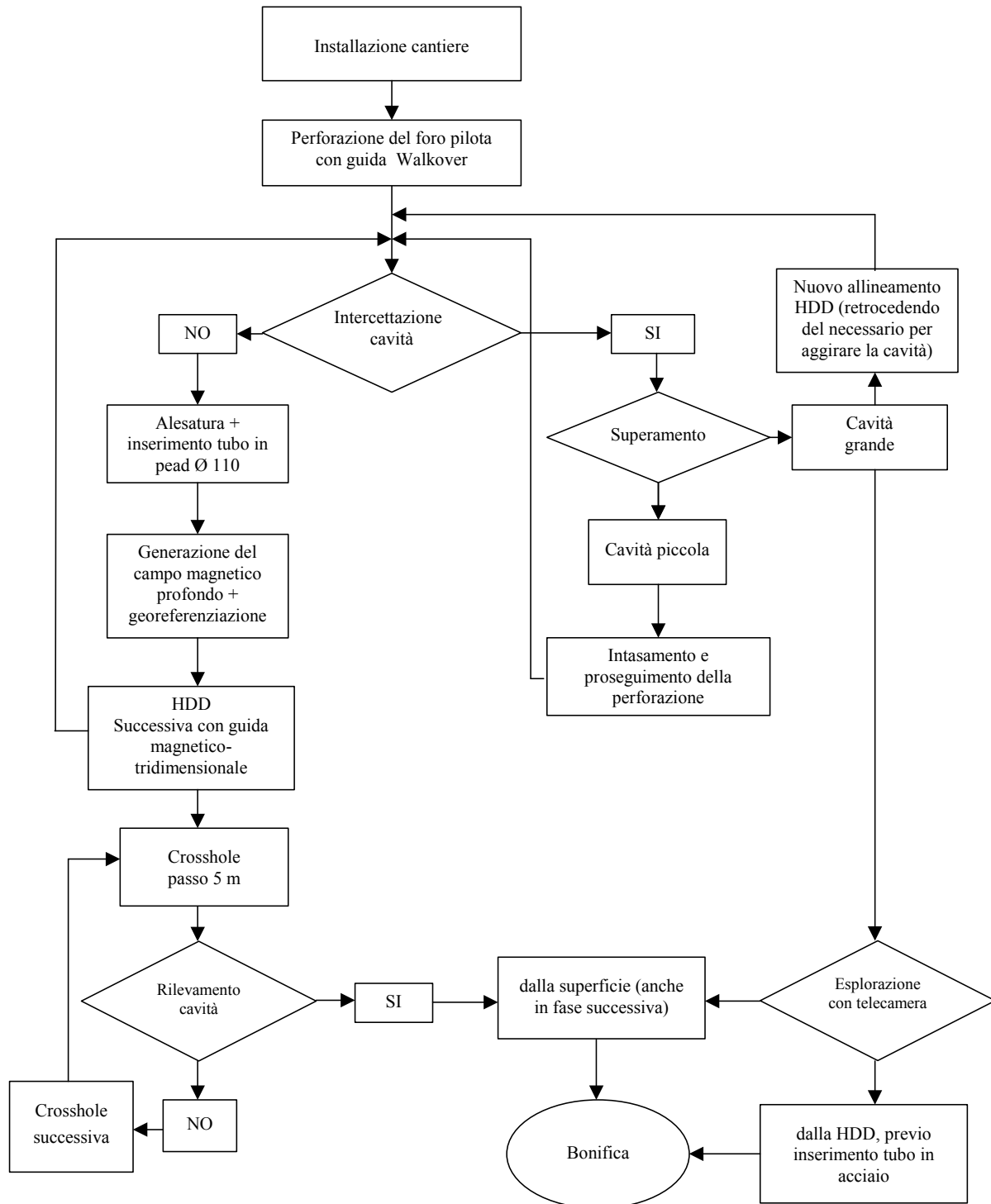


Qui di seguito si descrivono in dettaglio le varie fasi del sistema d'indagine proposto, di cui il seguente diagramma di flusso rappresenta una sintetica illustrazione.





**Diagramma di flusso del sistema misto di indagine delle cavità: HDD + Crosshole alternativo alle indagini in avanzamento dalla TBM ed alle indagini dalla superficie**



#### 4.1.1 Fase 1: perforazioni direzionali teleguidate (HDD)

##### a) CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA

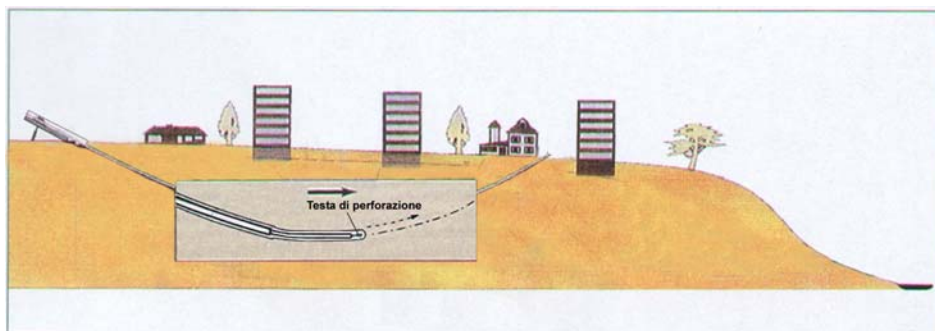
La tecnologia della perforazione direzionata deriva dalla perforazione petrolifera, dove la necessità di perforare con precisione a notevoli profondità richiede strumentazioni di orientamento e guida estremamente sofisticati. Successivamente, grazie alla semplificazione degli apparati, è derivata la tecnica che utilizza le perforazioni direzionate per la posa di servizi (condotte idriche, collettori fognari, cavi elettrici e telefonici) senza scavo di trincee (tecnica "trenchless" o "no-dig"). Questo trasferimento di know-how ha generato la tecnologia denominata Horizontal Directional Drilling (HDD), che è stata importata in Italia all'inizio degli anni ottanta

Da allora c'è stato un notevole sviluppo che ha consentito l'applicazione di questa tecnologia in numerosi casi, anche di notevole lunghezza, superiore ai mille metri, consentendo l'inserimento di tubi fino a 1200 mm di diametro. La frontiera è rappresentata, da un lato dalla potenza della macchina perforatrice e dall'altro dalle caratteristiche fisiche e meccaniche del sistema di perforazione nonché dal diametro del tubo da inserire, oltre che dalle caratteristiche dei litotipi attraversati.

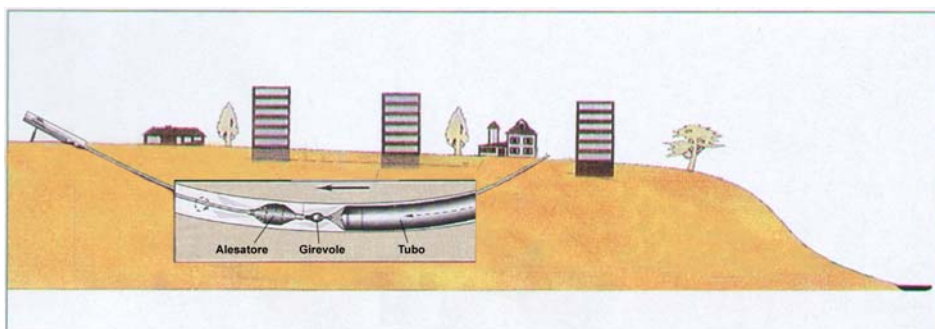
Anche gli avanzamenti ottenibili (diverse decine di metri, senza arrivare ai record ottenuti – sempre nel caso però delle perforazioni in campo petrolifero – di oltre 800 m/giorno) sono di entità tale da giustificare sempre di più la sostanziale economicità di questa tecnologia; per non parlare della sua pratica insostituibilità quando si voglia ridurre o eliminare l'impatto in superficie generato da un tradizionale sottoattraversamento da parte di condotte o altro, di zone edificate o comunque difficilmente accessibili dall'alto.

Lo schema tipico del metodo, quello cioè di sottoattraversamento di una zona abitata, o di un fiume, con punti di partenza e di arrivo in superficie, prevede sostanzialmente le seguenti fasi:

##### i) l' esecuzione del foro pilota



##### ii) l'alesatura del foro e l'inserimento, a ritroso e mediante tiro, del tubo



Nel caso in esame, poiché lo scopo principale delle HDD è quello di predisporre dei fori opportunamente condizionati per la successiva esecuzione delle prove sismiche cross-hole, è sufficiente l'inserimento di un tubo in materiale plastico di diametro molto ridotto (110 mm, riducibile anche a 90 mm nei tratti meno impegnativi). Ne conseguono notevoli vantaggi sia dal punto di vista delle macchine perforatrici (potenza richiesta non eccessiva), sia dell'inserimento del tubo (elevata flessibilità e basso attrito).

Peraltro, una serie di problemi certamente sussiste nella pratica realizzazione del sistema proposto, per lo più legati alla successiva fase di esecuzione della sismica cross-hole in foro, che richiede una ragionevole precisione nel parallelismo degli allineamenti. Questo problema viene superato mediante l'utilizzo di un sofisticato metodo di guida di tipo magnetico, come meglio descritto in seguito.

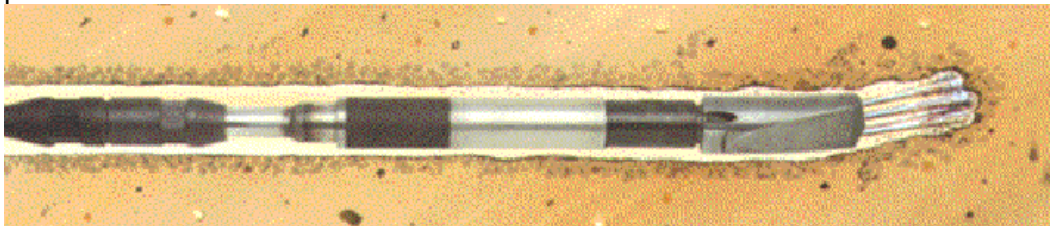
## b) LA PERFORAZIONE

La tecnica della perforazione in genere prevede una postazione di partenza, dove è collocata la macchina perforatrice ed altri elementi dell'impianto (gruppo pompante, vasconi di raccolta acqua, vasconi di raccolta fanghi di perforazione, ecc.) e una postazione d'arrivo, dove sono collocati l'arcolaio con il tubo in PEAD che deve essere posato, ed altri elementi accessori.

- **Esecuzione del preforo:** una volta intestata la perforazione, si procede seguendo il tracciato indicato, operando, quando necessario, le manovre di deviazione rispetto all'andamento pianificato, grazie alla strumentazione posta sulla punta di perforazione che consente di verificare costantemente l'andamento della perforazione stessa, agendo sui parametri di spinta-rotazione della perforatrice.

La perforazione può essere eseguita con diverse tecniche:

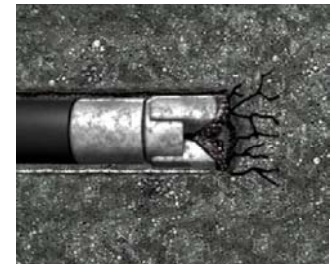
- o Il sistema più comune consiste nel realizzare il foro mediante l'erosione del terreno per mezzo di fanghi che, passando attraverso le aste di perforazione, fuoriescono ad alta pressione dalla testa di perforazione. Tale utensile ("paletta") presenta una superficie inclinata sulla quale, durante la spinta senza rotazione, il terreno esercita la pressione necessaria alla deviazione; lo stesso utensile invece avanza in modo rettilineo quando viene fatto ruotare. I raggi di curvatura ottenibili sono funzione della tipologia di terreno e del diametro e dello spessore della batteria di perforazione.



Le fasi della perforazione iniziano con l'allineamento della perforatrice mediante un sistema di collimazione. Eseguite le operazioni preliminari si dà inizio alla perforazione guidata con inserimento delle coordinate di zero nel sistema di controllo direzionale. La perforazione viene sospesa con una frequenza decisa dal tecnico in funzione della precisione richiesta, per effettuare la misurazione necessaria per il calcolo della distanza e della posizione della punta rispetto all'asse teorico. Se i valori si sono mantenuti costanti rispetto alle coordinate iniziali, si procede perforando in rotazione. In caso di deviazione vengono apportate le

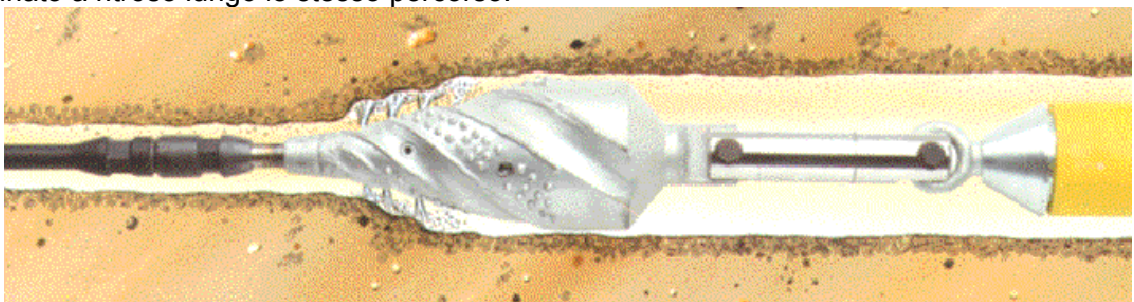
correzioni necessarie orientando opportunamente la punta asimmetrica, ed avanzando in sola spinta per la lunghezza stimata sufficiente a correggere la traiettoria. Terminata tale manovra, si effettua una nuova misura per verificare l'esito della correzione. Tale procedura viene applicata fino a raggiungere la fine della perforazione.

- o Il sistema di perforazione ad espulsione di fanghi non è impiegabile per la perforazione in materiali molto compatti: in tali circostanze si possono impiegare sistemi di perforazione a roto-percussione che consistono nell'impiego di speciali martelli pneumatici a fondo foro direzionabili, alimentati da aria compressa additivata con schiume fluide (biodegradabili). Tale sistema non garantisce però un preciso direzionamento.
- o Estremamente efficace e precisa è la perforazione idromeccanica con mud-motor, ottenuta per mezzo di uno speciale motore a turbina, azionata da una circolazione forzata di fanghi a cui è solidale un utensile di perforazione; ruotando la turbina ruota anche l'utensile che taglia meccanicamente e con facilità le rocce.




Nel nostro caso, visti i terreni da attraversare ai fini della individuazione delle cavità, si ritiene l'uso del mud-motor il più indicato allo scopo.

- **Alesatura e posa del tubo:** al termine del preforo, indipendentemente dal metodo impiegato, la testa di perforazione viene sostituita da un particolare alesatore che viene trascinato a ritroso lungo lo stesso percorso.



Esso ruota grazie al moto trasmesso dalle aste di perforazione ed esercita un'azione fresante sul terreno, ancora coadiuvato dai getti di fango (questa volta posizionati in senso ortogonale all'asse del foro). In fase di alesatura viene trascinato il tubo da posare agganciato all'alesatore stesso per mezzo di un giunto girevole, avente la funzione di non trasmettere l'inutile rotazione al tubo. Peraltro, il limitato diametro previsto (110 mm) può



	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteri per l'individuazione delle cavità sotterranee

rendere superfluo l'uso dell'alesatore, soprattutto nei tratti in cui si dovesse ritenere di poter usare il tubo da 90mm.

### c) IL SISTEMA DI GUIDA

Il controllo totale della testa di perforazione è assicurato da una speciale strumentazione alloggiata all'interno della stessa ed in grado di fornire, ad ogni istante, la profondità, l'inclinazione e la direzione sul piano orizzontale.

Attualmente sono disponibili, per il sistema di controllo della testa di perforazione, diversi tipi di tecnologie, basati essenzialmente sul principio delle onde radio e del campo magnetico. Nel caso in esame, poiché le profondità delle perforazioni arrivano fino a 30 metri e, per certi tratti, è forte la presenza di potenziali disturbi superficiali, costituiti dal passaggio di sottoservizi, preesistenze, ecc., si ritiene opportuno proporre un **sistema di guida a due fasi**.

Dapprima verrà eseguita, con il sistema ad onde radio e quindi con la guida di un operatore (walk over) dalla superficie, ovvero con sistemi di tipo magnetico (la scelta del sistema sarà legata alle condizioni di superficie nelle zone da sottoattraversare), una perforazione di riferimento o "pilota" per ciascuna galleria. La perforazione pilota sarà disposta sulla proiezione verticale dell'asse della galleria, ma ad una quota di 12 m superiore (e quindi ad una profondità massima di circa 15 m), avente principalmente la funzione indiretta di strumento per la guida ad elevata affidabilità delle HDD successive: sarà sufficiente che queste due prime perforazioni approssimino gli assi delle gallerie, in modo tale che le perforazioni successive siano tutte dislocate nel campo magnetico che verrà generato da esse.

Successivamente, dopo aver messo in funzione la generazione del campo magnetico all'interno della perforazione pilota e dopo aver effettuato la georeferenziazione dello stesso, potranno essere eseguite le altre perforazioni (5 HDD profonde per ogni galleria e 5 o 6 HDD superficiali per l'intero corridoio individuato dalle due gallerie) con precisione centimetrica, grazie ad un sistema di guida magnetico tridimensionale.

Dell'applicazione di tale sistema esistono oramai diverse esperienze che hanno prodotto risultati molto positivi. A titolo d'esempio si riporta la descrizione del sistema impiegato in occasione della realizzazione della Metropolitana di Napoli, anche se per uno scopo diverso da quello del presente progetto.

*Per mantenere un alto livello di precisione e facilitare le operazioni in cantiere, è stato sviluppato e modificato espressamente per tale applicazione un pacchetto di calcolo. Le operazioni di calcolo che il software esegue automaticamente in tempo reale possono essere così riassunte:*

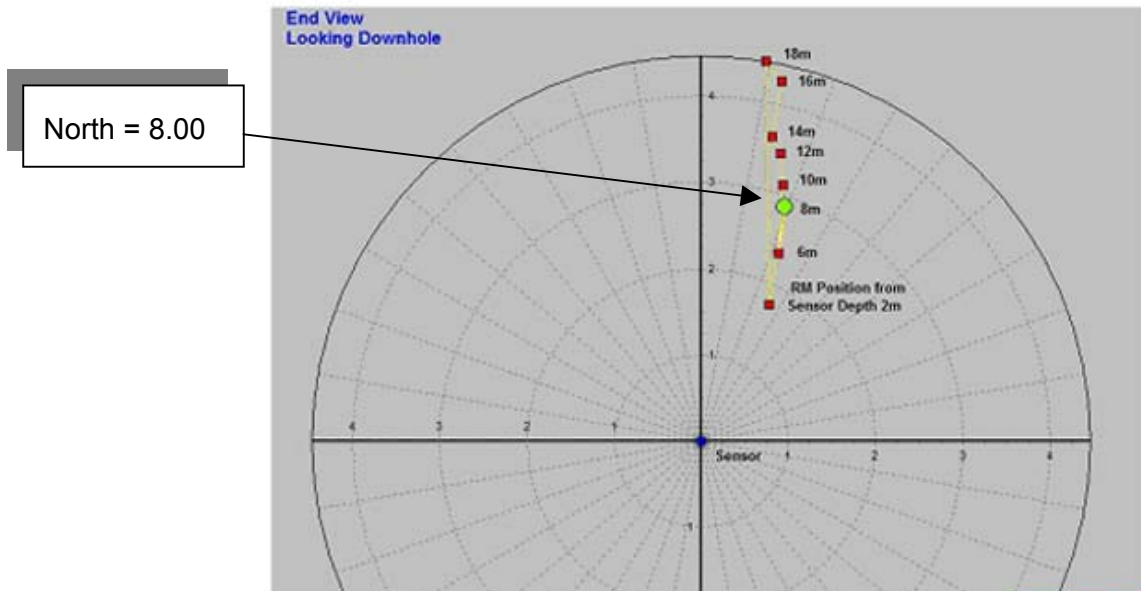
- *Calcolo delle coordinate, ottenuto elaborando i valori forniti dall'inclinometro e dalla bussola stazione per stazione (in genere ogni due o tre metri).*
- *Calcolo delle coordinate per triangolazione magnetica, basato sulla stima dei valori di intensità di campo forniti da tre magnetometri tra loro ortogonali.*
- *Filtrazione dei valori corretti e calcolo delle medie (per ogni stazione la strumentazione esegue 30 misure in 5 secondi)*
- *Calcolo di convergenza e mediazione dei valori A e B precedentemente descritti.*

*I dispositivi di superficie riguardano:*

- *una scatola di alimentazione del campo magnetico*
- *un trasduttore-alimentatore collegato via cavo alla sonda di perforazione*
- *un monitor sul quale il tecnico che dirige la perforazione può leggere le informazioni relative all'orientamento della punta ed alla sua inclinazione (vedi figura 3)*

- un computer dove tutte le informazioni sul posizionamento tridimensionale della punta vengono raccolte ed elaborate graficamente.

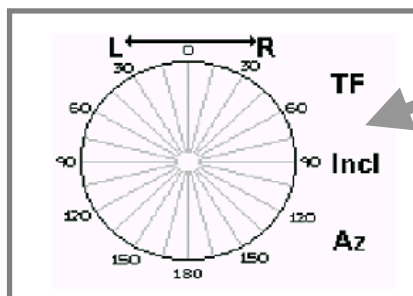
Queste operazioni vengono effettuate attraverso il programma di calcolo in pochi secondi e



Schermata della posizione relativa rispetto al foro guida


consentono, con le configurazioni in oggetto, di raggiungere buoni valori di accuratezza. Gli stessi valori vengono restituiti istantaneamente sia come coordinate assolute e relative sia in forma grafica. In figura si presenta un esempio di vista delle posizioni relative del foro di riferimento e della punta di perforazione. La freccia indica la posizione della punta dopo 8 metri di perforazione, mentre al centro è indicata con "sensor" la posizione del foro di riferimento.

Per ogni foro realizzato viene prodotta la documentazione relativa al posizionamento tridimensionale della perforazione.



Monitor a disposizione del perforatore

I risultati finora ottenuti permettono di affermare che il sistema adottato consente di perforare con la precisione richiesta, e con tempi esecutivi prevedibili e contenuti. Si aggiunge in fine che questi

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteri per l'individuazione delle cavità sotterranee

metodi, data la loro sempre maggiore diffusione, sono anche in continua fase di miglioramento ed aggiornamento.

#### d) L'INTERCETTAZIONE DI UNA CAVITÀ

Se è vero che lo scopo primario è quello di accertare la presenza di eventuali cavità, o meglio di poterne escludere con certezza la presenza, è altrettanto vero che, nel sistema misto proposto, non è necessario che l'eventuale cavità sia intercettata dalle HDD, ma è sufficiente che essa venga successivamente rilevata con il metodo indiretto (cross-hole).

Nel caso in cui una cavità dovesse essere intercettata in fase di perforazione, l'operatore se ne accorgerebbe immediatamente per la improvvisa perdita di pressione dei fanghi di perforazione: si potrebbero quindi presentare i seguenti casi, in funzione delle dimensioni e della tipologia della cavità incontrata.

Se le **dimensioni sono limitate** e la tipologia della cavità non è complessa, ma isolata e non ramificata, si può realizzare il suo immediato intasamento con gli stessi fluidi di perforazione, opportunamente additivati allo scopo, o con materiale apposito (es. gesso) direttamente iniettabile nella cavità attraverso la testa di perforazione; quindi si può più o meno agevolmente attraversare la cavità stessa, riproforando il materiale utilizzato per l'intasamento, con riserva di successivo intervento dall'alto per completare la bonifica della cavità secondo le specifiche progettuali.

Nel caso di **dimensioni maggiori**, rilevabili dall'operatore per la forte perdita di tracciato della testa di perforazione, si procede, lasciando la batteria di perforazione all'interno del foro, all'inserimento di un tubo in acciaio (fino a raggiungere la fine della cavità), in grado sia di contenere i fanghi di perforazione sia di mantenere il corretto allineamento dell'asta di perforazione nell'attraversamento della cavità stessa, grazie alla maggiore rigidità del tubo rispetto all'asta di perforazione. Tale tubo metallico, subito dopo il passaggio a ritroso dell'eventuale alesatore e quindi del tubo definitivo in PEAD attraverso la cavità, viene recuperato. L'inserimento del tubo provvisorio in acciaio fornisce l'ulteriore importante possibilità di inserimento di una telecamera, previo sfilamento della batteria di perforazione e lavaggio del tubo, al fine di accertare forma e dimensioni della cavità intercettata e meglio pianificarne la bonifica.

Come ulteriore possibilità, sempre nel caso di cavità grande o intercettata lungo il suo sviluppo longitudinale, si può pensare di retrocedere con la punta di perforazione di due o più aste (ogni asta è lunga circa 5 m) in modo da cambiare la traiettoria ed aggirare la cavità stessa. Tale operazione potrà essere effettuata o per tentativi o dopo aver accertato le dimensioni e la forma della cavità incontrata (in questo caso con una video ispezione attraverso una perforazione verticale a distruzione di nucleo, dal punto superficiale corrispondente).

#### e) TEMPI DI ESECUZIONE

Sebbene le HDD siano state previste tutte in fase preliminare, e pertanto la loro fase di realizzazione non risulti direttamente influente sul programma lavori generale, si ritiene opportuno fornire alcune considerazioni sui tempi di esecuzione. Sulla base dell'esperienza, considerate le varie fasi di installazione cantiere, generazione del campo magnetico, esecuzione del preforo, prealesatura e tiro del tubo, si ritiene cautelativamente che una perforazione di lunghezza di circa 500 m, del diametro di 110 mm, possa essere eseguita in un tempo di due settimane.

Pertanto, tenendo conto, da un lato, dei possibili imprevisti (intercettazione cavità, problemi tecnici, ecc.) e dall'altro, della ripetitività e "standardizzazione" delle operazioni, ipotizzando che da una postazione debbano essere effettuate ad esempio le 6+6 HDD profonde per le due gallerie, per una lunghezza tipo di 500 m, considerando di impiegare solo una macchina perforatrice per



postazione, il tempo necessario per la realizzazione totale delle HDD risulterebbe di ca. sei mesi. Se si considera che laddove sono state previste le HDD superficiali, qualora il programma lo richieda, possono essere eventualmente impiegate macchine aggiuntive, si può concludere che i tempi di esecuzione delle HDD non costituiscono assolutamente una potenziale criticità.

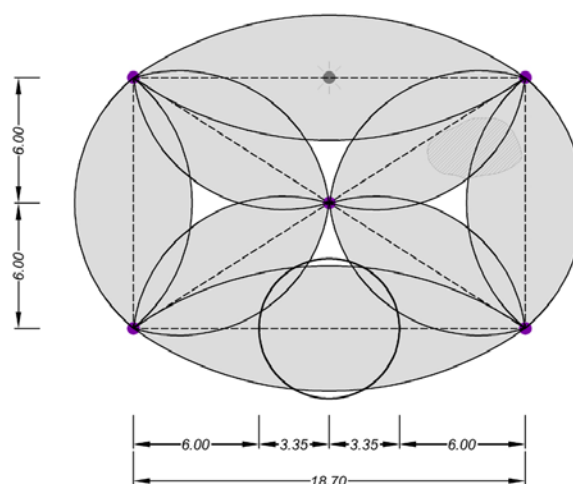
#### 4.1.2 Fase 2: prove sismiche cross-hole in orizzontale

##### a) CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA

Le perforazioni della Fase 1 costituiscono il sistema di base per l'esecuzione delle prove sismiche cross-hole. Queste richiedono non solo, come già accennato in precedenza, un ragionevole parallelismo dei fori tra cui eseguire le misure (o comunque una conoscenza delle deviazioni, cosa che la georeferenziazione effettuata dal metodo di guida magnetico consente), ma anche il *condizionamento* del foro, cioè la sua sostanziale aderenza, senza vuoti intermedi, al terreno circostante.

Ciò si ottiene attraverso la circolazione di fanghi, additivati in fase finale con prodotti agglomeranti, che garantiscono il perfetto intasamento tra terreno e tubo e, allo scopo, la punta perforante viene dotata di apposite cannette di iniezione.

Tale tecnica prevede generalmente l'utilizzo di due fori: dal primo si energizza il terreno limitrofo e nel secondo si registra il segnale per mezzo di una sonda geofonica. Conoscendo la geometria dei raggi e la distanza tra i fori, e misurando i tempi di arrivo dei vari impulsi alla sonda geofonica tridimensionale, si calcola la velocità media dei litotipi attraversati: gli scostamenti da tali valori (segnalato e graficizzato dal software di lettura, in grado di sviluppare un modello tridimensionale del terreno) indicano una discontinuità nelle caratteristiche del terreno compreso in un fuso avente i vertici nell'elemento energizzante e quello ricevente. Tale discontinuità, generalmente legata alla presenza di volumi di terreno aventi diversa densità, potrà, previa opportuna taratura del sistema, essere interpretata come presenza di cavità. Per evitare che le onde elastiche si smorzino troppo nel loro percorso tra la sonda energizzante e la sonda ricevente, è necessario che i due fori non si trovino ad una distanza superiore ai 15-20 m.



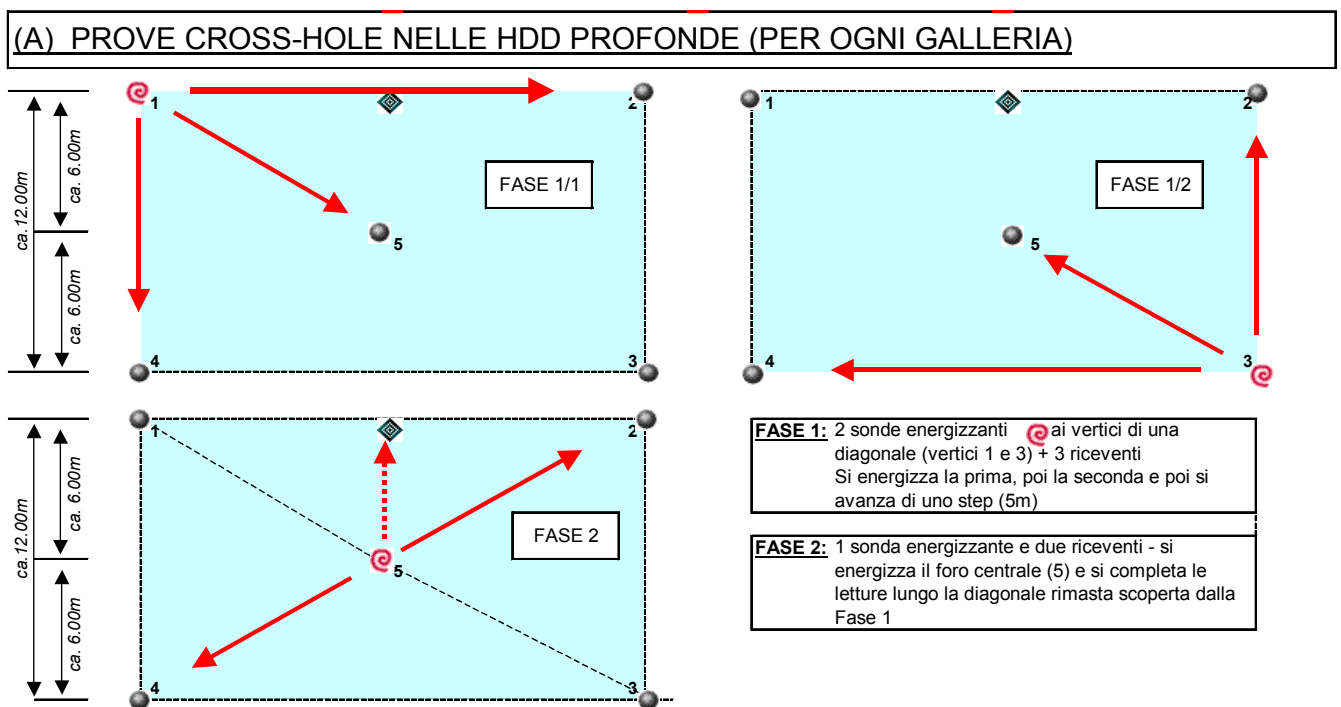
Lo schema studiato consentirà di indagare, con la sovrapposizione dei vari fusi che si vengono a determinare tra le diverse coppie di sonde energizzanti-riceventi, praticamente tutta l'area intorno

alla calotta della galleria, per una estensione decisamente maggiore rispetto a quella eventualmente esplorata con perforazioni eseguite in avanzamento dalla TBM.

Nel caso in esame il sistema di fori ipotizzato per le HDD profonde (5 per ogni galleria) consente di eseguire più letture contemporaneamente, dislocando in una prima fase le sonde energizzanti in due fori posti ai vertici di una diagonale e le riceventi negli altri tre.

In una seconda fase si potrà inserire la sonda energizzante nella HDD centrale (all'intersezione delle diagonali) e, con le relative letture, coprire le zone residuali non indagate in prima fase.

- La sequenza/combinazione di cross-hole eseguite dall'interno delle HDD profonde, per ogni galleria, per ogni sezione, risulta:
  - 1 prova F 1/1 (1 energizzante + 3 riceventi)
  - 1 prova F 1/2 (1 energizzante + 3 riceventi)
  - 1 prova F 2 (1 energizzante + 2 riceventi)

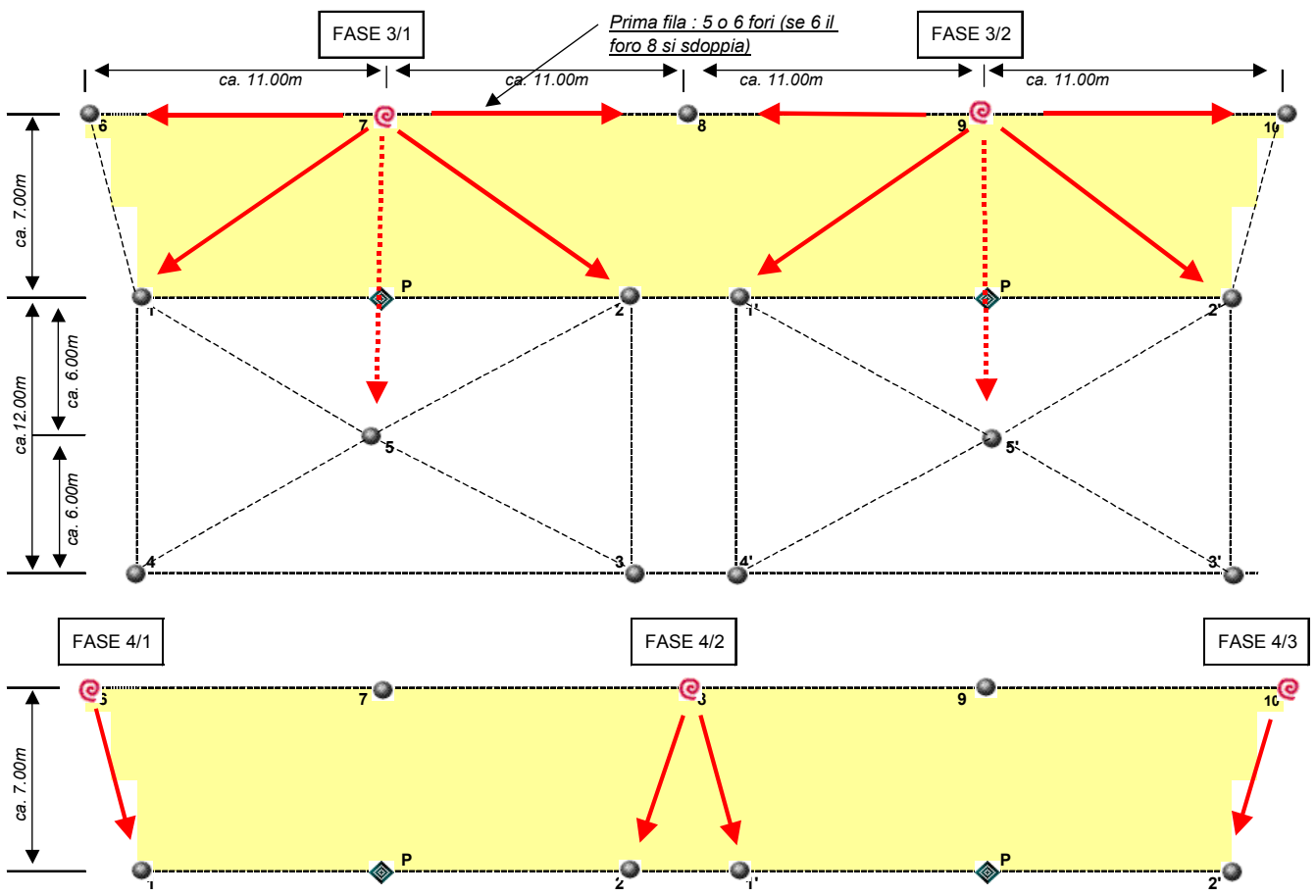


Nel caso delle prove cross-hole da eseguirsi dalle HDD superficiali (in numero di 5 fino ad interassi delle gallerie di circa 22 m e pari a 6 per interassi maggiori) si dovranno disporre, con lo stesso criterio, le sonde energizzanti e riceventi, sfruttando ovviamente i fori delle corrispondenti e sottostanti HDD profonde. Con opportune sequenze si riuscirà ad esplorare con continuità tutto il volume di terreno compreso, in altezza, tra gli assi delle gallerie e la superficie, ed in larghezza, per il corridoio delimitato dalle curve di isocedimento limite definite.

- La combinazione di cross-hole eseguite dall'interno delle HDD superficiali, per ogni galleria, per ogni sezione, risulta:

- 1 prova F 3/1 (1 energizzante + 4 riceventi)
- 1 prova F 3/2 (1 energizzante + 4 riceventi)
- 1 prova F 4/1 (1 energizzante + 1 ricevente)
- 1 prova F 4/2 (1 energizzante + 2 riceventi)
- 1 prova F 4/3 (1 energizzante + 1 ricevente)

**(B) PROVE CROSS-HOLE NELLE HDD SUPERFICIALI**




**FASE 3:** 2 sonde energizzanti (7-9) e 7 (o 8) riceventi  
 Si energizza la prima, poi la seconda e poi si avvanza di uno step (5m)

**FASE 4:** 3 sonde energizzanti (6-8-10) e 4 riceventi (1-2-1', 2')

*N.B. In caso di prima fila con 6 HDD, in Fase 3 l'HDD centrale (8) si sdoppia in due riceventi, ed in Fase 4 una delle due è energizzante*

Le varie prove eseguite nella generica sezione trasversale, al fine di ottenere una totale copertura anche in direzione longitudinale, andranno ripetute con passo di circa 5 m, per tutta la lunghezza del tratto da indagare. Tale procedura potrà essere attuata con un sistema di carrucole

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteri per l'individuazione delle cavità sotterranee

sincronizzate in grado di trascinare contemporaneamente le varie sonde energizzanti-riceventi, con opportuni cavi di acciaio già predisposti nei tubi in fase di posa.

Il requisito essenziale del sistema di energizzazione è costituito dalla sua ripetitività (o molteplicità): esso infatti deve essere in grado di energizzare il terreno più volte (in funzione della sequenza delle prove) in più sezioni in direzione longitudinale, al fine di evitare che la relativa sonda debba essere troppe volte estratta dal foro per essere "ricaricata". Sulla base dell'esperienza, considerato che sono state già eseguite prove multiple fino a 50 microcariche, e che quindi nel nostro caso ciò consentirebbe di energizzare tratti di galleria di 250 m (passo delle prove: 5 m), si ritiene che questo aspetto meramente tecnico-costruttivo non costituisca comunque un problema in fase di perfezionamento del sistema. A questo proposito si deve sottolineare come questo tipo di prova sismica in orizzontale, richieda una messa a punto di attrezzature specifiche e di procedure ad hoc, concettualmente semplici e facili da realizzare, volte ad ottimizzare l'efficienza di tutto il sistema di indagine. Ciò è giustificato dalla dimensione dell'operazione che consentirà, ad esempio, anche di utilizzare sonde di disegno particolare per poterle utilizzare in tubi Ø90.

#### **4.1.3 Fase 3: perforazioni a distruzione di nucleo ed ispezione televisiva**

Questo tipo di indagine si configura come terza ed ultima fase di indagine, complementare alle prime due, da effettuare esclusivamente laddove le medesime indagini di fase 1 e 2 abbiano rilevato la presenza di cavità.

Le perforazioni da effettuare saranno limitate a completare le informazioni (forma e dimensioni) sulle cavità già accertate con i suddetti metodi di indagine.

## 4.2 INDAGINI IN AVANZAMENTO

Come si è diffusamente descritto al precedente capitolo 4.1, il metodo proposto, basato sulle perforazioni direzionali e successive prove cross-hole, elimina totalmente la necessità di effettuare indagini mediante perforazione in avanzamento dalla TBM. Peraltro si è pure presa in considerazione un'ulteriore tecnologia di indagini in avanzamento, costituita dalla prospezione geofisica in avanzamento del tipo identificato dall'acronimo BEAM (Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring).

Questo tipo di indagine è basato sull'interpretazione delle misure in continuo dei parametri elettrici dei terreni che verranno attraversati dalla TBM, per una distanza dal fronte pari a 3-4 diametri del tunnel.

Queste misure sono effettuate tramite un'apparecchiatura, installata nella camera di guida, che mediante due elettrodi induce nell'ammasso roccioso una corrente polarizzata, la cui frequenza è condizionata dalle caratteristiche del terreno attraversato, e più specificamente dalla porosità dello stesso.

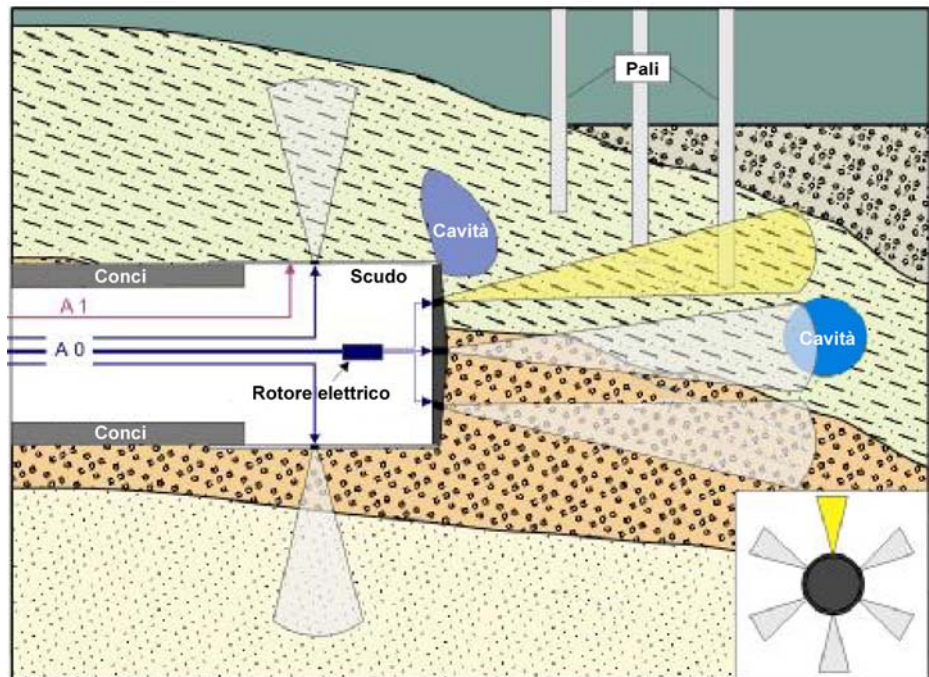
Un sofisticato software consente la valutazione e visualizzazione dei parametri geofisici la cui variabilità, interpretata sulla base di un modello tridimensionale del terreno preventivamente studiato, consente di risalire, nell'intorno coperto dal raggio di azione del sistema, alle diverse caratteristiche litologiche dei terreni, e più specificamente a rilevare discontinuità e fratture degli stessi e, in ultimo, eventuali cavità.


I parametri geofisici misurati dal sistema sono PFE (effetto frequenza percentuale) e R (resistività).

Una particolare caratteristica del sistema è che gli elettrodi sono costituiti da parte della macchina stessa, e cioè i taglienti della testa di perforazione ed il mantello dello scudo. Operando il sistema ad un voltaggio molto moderato (inferiore a 42 V), questo fatto non costituisce alcun pericolo per gli operatori e per la macchina stessa.

Il sistema è completato da un computer in superficie, che può essere ad esempio alloggiato in un camper, e da una stampante per la registrazione giornaliera dei dati misurati.

Il sistema, di recente sviluppo, è stato sperimentato con successo su importanti progetti di tunnelling, tra cui le metropolitane di Barcellona, Linea 9 e di Colonia (Lotto Nord), nonché su due lavori italiani: il tunnel di Prasnig, vicino Tarvisio ed il tunnel Ginori (9.3 km) della linea Alta Velocità tra Firenze e Bologna. Nel primo caso, dedicato all'installazione di una condotta gas di 6.2 km, mediante l'uso di una TBM da 5.80 m di diametro, l'utilizzo era particolarmente mirato



 CITTÀ DI PALERMO	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Criteria per l'individuazione delle cavità sotterranee

all'identificazione preventiva di faglie e caverne, data la natura calcareo-carsica dell'ammasso attraversato. Nel secondo, oltre a consentire l'accertamento di particolari zone di faglia, si sono potute monitorare in tempo reale le significative variazioni di condizioni geologiche ed idrogeologiche, con particolare riferimento all'individuazione di importanti strati ad alta permeabilità, saturi d'acqua.

Il sistema è di facile uso e non richiede alcuna particolare predisposizione della TBM. Inoltre, non rallenta in nessun modo l'avanzamento della TBM, contrariamente a quanto succede per le perforazioni di sondaggio in avanzamento. Tuttavia sebbene la prospezione geoelettrica venga condotta senza rallentare l'avanzamento della TBM; rimane il problema, eliminato invece nel primo metodo di indagine proposto (HDD preliminari), di dovere arrestare la macchina in caso di riscontro più o meno certo di cavità, nel qual caso si dovrà sempre ricorrere a successive ispezioni eseguite dall'alto per caratterizzare in maniera più compiuta il tipo e le dimensioni della cavità stessa.





Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Criteria per l'individuazione delle cavità sotterranee

		SOLUZIONE	DESCRIZIONE		VANTAGGI
GALLERIE TBM	INDAGINI DALLA SUPERFICIE	HHD SUPERFICIALI	FASE 1	Realizzazione di una serie di perforazioni direzionali teleguidate (per brevità <b>HDD superficiali</b> ) parallele fra loro e alla superficie, prima della fase d'avanzamento delle TBM	<ul style="list-style-type: none"> <li>Riduzione dell'impatto ambientale (interferenza edifici, viabilità, pubblici servizi, archeologia,...) grazie alla concentrazione delle aree di cantiere in pochi punti (generalmente all'interno di piazze o in aree non critiche)</li> <li>Combinazione di metodi complementari (diretto e indiretto) che consentono di indagare tutto il volume di terreno con continuità fino a quota gallerie</li> <li>Limitazione delle indagini con telecamera, attraverso perforazioni verticali dalla superficie, ai soli casi in cui le indagini di fase 1 e 2 hanno indicato la presenza di cavità</li> <li>Lunghezza totale di perforazione ridotta</li> <li>Semplicità e sicurezza (dalla superficie in aree "tranquille" anziché su strada o in aree private)</li> </ul>
			FASE 2	Realizzazione di indagini geofisiche mediante prove <b>cross-hole</b> in orizzontale attraverso le perforazioni realizzate in fase1 (comprese le HDD profonde)	
			FASE 3 (eventuale)	<b>Perforazioni dal p.c.</b> a distruzione di nucleo ed ispezione con <b>telecamera, esclusivamente</b> nei casi in cui le indagini di fase 1 e 2 hanno indicato la presenza di cavità	
	INDAGINI DALLA SUPERFICIE	HHD PROFONDE	FASE 1	Realizzazione di una serie di perforazioni direzionali teleguidate (per brevità <b>HDD profonde</b> ) parallele all'asse della galleria, prima della fase di avanzamento della TBM, disposte secondo un reticolo regolare ed indipendente da quello dell'altra galleria	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anticipo della fase di indagine che può essere eseguita preliminarmente (addirittura in fase di progetto definitivo o esecutivo)</li> <li>Combinazione dei metodi complementari (diretto e indiretto)</li> <li>Maggiore volume indagato e con maggiore continuità intorno alla galleria</li> <li>Lunghezza totale di perforazione molto ridotta</li> <li>Semplicità e sicurezza</li> <li>Riduzione dei rischi per la TBM e per i cedimenti degli edifici</li> <li>Indipendenza della fase di avanzamento della TBM da quella di indagine e di bonifica, con conseguente aumento della sua velocità.</li> </ul>
			FASE 2	Realizzazione di indagini geofisiche mediante prove <b>cross-hole</b> in orizzontale attraverso le perforazioni realizzate in fase1	
			FASE 3 (eventuale)	<b>Perforazioni dal p.c.</b> a distruzione di nucleo ed ispezione con <b>telecamera, esclusivamente</b> nei casi in cui le indagini di fase 1 e 2 hanno indicato la presenza di cavità	
			FASE 4	Indagine complementare col metodo <b>BEAM</b> dal fronte della TBM	
BONIFICA	Intervento di bonifica dal piano campagna	Intervento di bonifica dal piano campagna tramite perforazioni e successivo intasamento delle cavità	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anticipo della fase di bonifica che può essere eseguita preliminarmente all'avanzamento della TBM</li> </ul>		
MANUFATTI DI LINEA	INDAGINI DALLA SUPERFICIE	Perforazioni dal p.c. a distruzione di nucleo ed ispezione con <b>telecamera</b>	FASE 1	Realizzazione di una serie (n. 5 o 6) perforazioni direzionali teleguidate (per brevità <b>HDD superficiali</b> ) parallele fra loro e alla superficie, prima della fase di scavo dei manufatti di linea	<ul style="list-style-type: none"> <li>Riduzione dell'impatto ambientale (interferenza edifici, viabilità, pubblici servizi, archeologia,...) grazie alla concentrazione delle aree di cantiere in pochi punti (generalmente all'interno di piazze o in aree non critiche)</li> <li>Combinazione di metodi complementari (diretto e indiretto) che consentono di indagare tutto il volume di terreno con continuità fino a quota gallerie</li> <li>Limitazione delle indagini con telecamera, attraverso perforazioni verticali dalla superficie, ai soli casi in cui le indagini di fase 1 e 2 hanno indicato la presenza di cavità</li> <li>Lunghezza totale di perforazione ridotta</li> <li>Semplicità e sicurezza (dalla superficie in aree "tranquille" anziché su strada o in aree private)</li> </ul>
			FASE 2	Realizzazione di indagini geofisiche mediante prove <b>cross-hole</b> in orizzontale attraverso le perforazioni di fase1	
			FASE 3 (eventuale)	<b>Perforazioni dal p.c.</b> a distruzione di nucleo ed ispezione con <b>telecamera, esclusivamente</b> nei casi in cui le indagini di fase 1 e 2 hanno indicato la presenza di cavità	
	BONIFICA	Intervento di bonifica dal piano campagna	Intervento di bonifica dal piano campagna tramite perforazioni e successivo intasamento delle cavità	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anticipo della fase di bonifica che può essere eseguita preliminarmente all'avanzamento della TBM</li> </ul>	