

# **RISCHIO NELLE AREE CARSIICHE IN SICILIA: “CASE HISTORY” NELLA PIANA DI CINISI (PALERMO)**

**LIGUORI VINCENZO, MANNO GIORGIO,  
MORTELLARO DANIELA**

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Palermo

---

## **RIASSUNTO**

In Sicilia le aree Carsiche sono diffuse su quasi tutto il territorio, nei complessi carbonatici e nei depositi della serie Gessoso - Solfifera. L'ambiente carsico e il tipo di carsismo sono legati alle caratteristiche litologiche e tessiture dei terreni e alle successive deformazioni tettoniche.

Viene di seguito presentato un caso di studio di carsismo evidenziato nel complesso calcareo-detritico (Quaternario) della Piana di Cinisi compresa tra Torre Molinazzo e Torre dell'Orsa, dove sono localizzati l'aeroporto internazionale “Falcone-Borsellino” e il tratto finale della metropolitana che collega Palermo con lo stesso. L'area in studio, caratterizzata morfologicamente da un terrazzo lievemente degradante verso mare, ricade nella zona dei “Monti di Palermo”. La stratigrafia della zona è costituita dall'alto verso il basso da una panchina probabilmente di età Tirreniana piuttosto spessa, seguita da sabbie, calcarenite e calciruditi, talora vacuolari, con grado di cementazione variabile. Sotto si riscontra un altro complesso litologico quaternario costituito da ghiaie, breccie, sabbie e conglomerati. Segue la formazione di base costituita da calcari, calcari dolomitici e dolomie fossilifere del Trias-Lias. Le cavità presenti nel sottosuolo sono di duplice natura: primaria e carsica. Le prime sono sinsedimentarie e si localizzano nel complesso detritico. Le seconde sono legate ad un carsismo epidermico e discontinuo. I vuoti di origine primaria, di tipo interstiziale, sono generati dall'accatastamento di grossi blocchi o per fenomeni di compattazione differenziale. Le cavità carsiche sono prodotte principalmente dall'azione di decementazione e trasporto, operata dalle acque circolanti nel sottosuolo. Esse sono quindi condizionate dalla circolazione idrica sotterranea e dalla sua connessione con quella superficiale. Tali grotte sono legate a più cicli carsici e la loro disposizione a diverse altezze nel sottosuolo dipende dai movimenti relativi tra la terraferma e il mare. Lungo la pista aeroportuale principale si sono verificati, all'impatto dell'aeromobile, crolli con relativi sprofondamenti delle volte di alcune di queste cavità. Il problema è stato affrontato attraverso studi, indagini e interventi in seguito a sondaggi diretti (carotaggi e indagini geotecniche) e indiretti.

## **ABSTRACT**

In Sicily the karsts areas are spread almost all over the territory, in the carbonatic complex and in the deposits of gypsum and rock salt of the series “Gessoso-Solfifera”. The karstic environment is tied up to the characteristic litological and textural of the grounds and to the following tectonic deformations. In following paragraph it is introduced a case study of karst, in the limestone-detritic complex (Quaternary) of the Plain of Cinisi included between Tower Molinazzo and Tower of the Orsa, where are located the International Airport “Falcone-Borsellino” and the ending line of the subway connecting Palermo with the airport. The area object of study is included in the zone of the “Palermo Mountains”, characterized morphologically by a degrading balcony toward sea. The stratigraphy of the site in its main lines is composed from top to bottom of a

very thin "panchina", probably of Tirrenian age. It follows a sandy, calcarenitic-conglomeratic succession, sometimes well cemented, yellow to red coloured rich in fossils, passing to coarser levels vacuolar, with scarce calcitic cement. Underneath the calcarenites an older complex (Quaternary) is found consisting of breaches, conglomerates, calcirudites and, sometimes, calcarenites having a variable degree of cementation. It follows the formation of base constituted by limestone, dolomitic limestones and fossiliferous dolomites of the Trias-Lias age. The complex underground cavity are of double nature: primary and karstic. The first ones are formed during the sedimentation and they locate in the detritic complex. The seconds ones are tied to an epidermal and discontinuous karstic phenomena. The cavities of primary origin, of interstitial type, they are produced by the stacking of big blocks or for phenomena of differential compacting process. The karsts cavities are mainly produced by the action of decementation and transport, operated by the circulating waters in the subsoil. It is conditioned therefore by the underground water circulation and by connection with the superficial one. The placing of the cavities at different heights in the subsoil, depends on the relative movements between the sea and the land. Along the principal airport runway collapses with relative sinkholes of the vault of some cavities have occurred at the impact of the plane. The problem has been faced through studies, investigations and interventions following direct surveys (core borings and geotecnic investigations) and indirect ones.

## **PREMESSA**

Data la sua struttura litologica, in Sicilia si sono determinate le condizioni favorevoli alla formazione delle principali fenomenologie carsiche e speleogenetiche. Le principali aree carsiche siciliane che interessano affioramenti calcarei sono quelle: degli Iblei, delle Madonie, dei Monti di Palermo, e del Trapanese.

I calcari dotati di una certa porosità e fessurazione, si prestano ottimamente a questi fenomeni in quanto le acque superficiali, allargando le discontinuità, tendono ad aprirsi una via nella massa rocciosa. All'interno della stessa, l'instaurarsi di una circolazione idrica sotterranea conduce alla formazione e all'evoluzione di cavità. Per queste considerazioni, in generale, le aree con morfologia carsica sono prive di una idrografia superficiale, si differenziano da altri paesaggi naturali per la presenza di particolari micro e macro morfologie, quali scannellature (karren), vaschette, doline, polye, inghiottitoi e grotte, generate prevalentemente dall'azione aggressiva delle acque. Le grotte naturali sono elementi peculiari di un paesaggio carsico e si originano in tali rocce per effetto dell'azione solvente, esercitata dalle acque acide contenenti anidride carbonica, all'interno di fratture. Il clima siciliano fornisce le condizioni migliori per lo sviluppo e l'evoluzione di tale fenomeno.

Nella Piana di Cinisi (Fig.1) la presenza di aree a rischio è legata alla probabilità di rinvenire nel sottosuolo cavità carsiche di diverse dimensioni. Infatti nella zona ricadono l'aeroporto internazionale "Falcone-Borsellino" di Palermo e la metropolitana che collega la città con lo stesso. Il pericolo dovuto alla presenza di cavità è legato essenzialmente ai ripetuti collassi che, portando ad un assottigliamento delle volte, possono creare situazioni di rischio alle infrastrutture e alle persone. Tale problema è stato affrontato attraverso, indagini dirette e indirette e interventi, allo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche dei terreni sottoposti a sollecitazioni significative.

Nel presente lavoro verrà illustrata la geologia della Piana di Cinisi, fornendo un modello complessivo dell'evoluzione geologica e geomorfologica dell'area. Inoltre verranno fornite considerazioni preliminari di carattere idrogeologico e geomorfologico in relazione alla presenza di cavità sotterranee e circa la loro genesi. Si illustreranno le indagini

dirette e indirette (georadar, sondaggi elettrici verticali, sismica) e gli interventi eseguiti per mitigare e/o eliminare il rischio prodotto dall'evoluzione del fenomeno carsico.

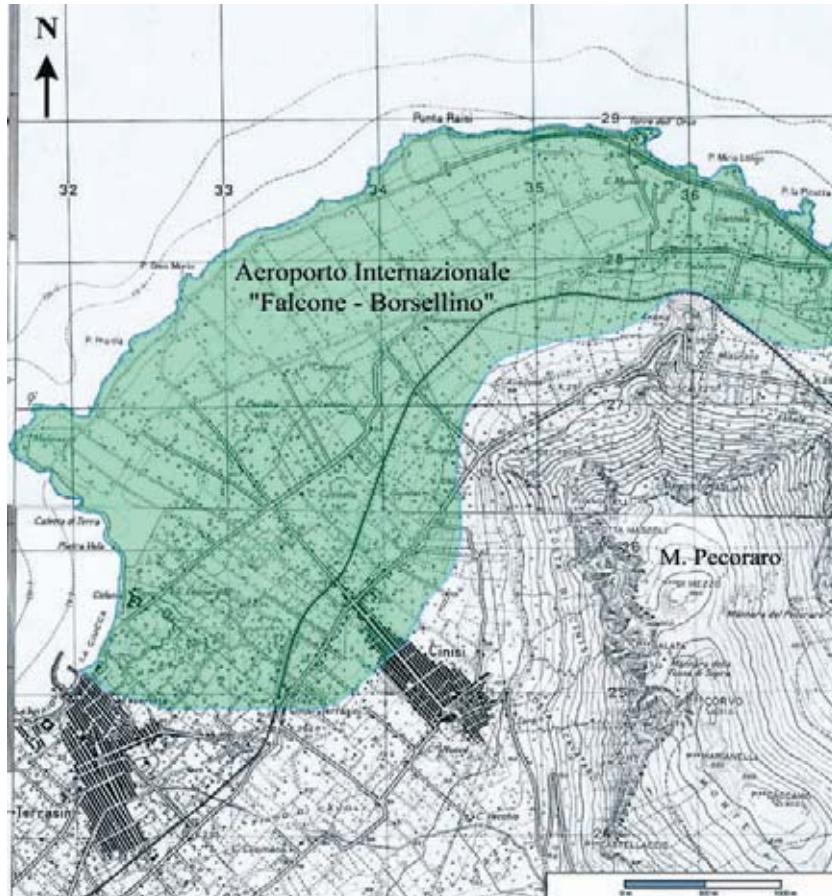


Fig. 1 - Ubicazione della Piana di Cinisi e dell'Aeroporto "Falcone Borsellino" (ex "Punta Raisi")

## 1. LINEAMENTI GEOLOGICI DELLA PIANA DI CINISI

### 1.1. Inquadramento geologico

La Piana di Cinisi si localizza sulla costa tirrenica siciliana, ad Ovest della città di Palermo, a circa 30 Km, e a NE dell'abitato di Terrasini. Essa comprende un'ampia fascia di territorio orientata in senso SW-NE, che si estende nell'entroterra a valle della linea ferroviaria sino a quote comprese tra 18 e 25 m s.l.m., mentre ad Est si estende sino in località Torre dell'Orsa e a SW sino in località Pietra Vela.

Dal punto di vista morfologico il settore d'interesse è caratterizzato da una pianura costiera lievemente degradante verso mare. L'area, geologicamente, appartiene ai "Monti di Palermo", i quali risultano formati da un complesso mesozoico-eocenico in facies di Piattaforma (Piattaforma Panormide) sovrascorso, da Nord verso Sud, su un complesso coevo in facies di Bacino (Bacino Imerese) (Fig.2).



Fig. 2- Monti di Palermo, carta litologica schematica modificata (da Liguori V. et alii 1982)

Il tetto di quest'ultimo è costituito dal complesso oligo-miocenico, noto come Flysch Numidico, su cui poggiano le Unità Stratigrafico Strutturali pertinenti alla Piattaforma Panormide. La Piana di Cinisi fa parte di un'ampia spianata costiera, posta poche decine di metri sul livello del mare, modellata dal mare quaternario che ha eroso i terreni panormidi. Questo antico mare ha raggiunto un livello più elevato rispetto all'attuale, come testimoniano i paleosolchi del battente visibili ad oltre 80 m s.l.m. lungo le falde di M. Pecoraro. Oltre l'azione di erosione vi è stato anche, durante il Quaternario, una fase di deposizione; ne sono testimonianza i terreni di copertura calcarenitici e calciruditi di vario spessore, all'interno dei quali sono stati riconosciuti due cicli di sedimentazione datati dal Calabriano al Siciliano. Andando verso l'interno i depositi di copertura quaternaria terminano sotto una spessa copertura detritica depositata ai piedi del rilievo montuoso di M. Pecoraro.

Attraverso alcune ipotesi si è cercato di fare una ricostruzione dell'evoluzione quaternaria degli eventi tettonici e sedimentari che hanno originato la Piana di Cinisi. Il tutto ha avuto inizio con una trasgressione marina che ha interessato i calcari mesozoici, già coinvolti nelle fasi tettoniche pre-quaternarie, raggiungendo livelli superiori rispetto a quello attuale. Il mare in questa fase diede origine con la sua erosione ad una spianata sulla quale si instaurò più tardi la successiva sedimentazione. Ai piedi del M. Pecoraro si riversarono gli apporti di materiale proveniente dall'erosione marina delle falesie e dal trasporto solido dei paleotorrenti; si ebbe così la deposizione di clasti calcarei di grosse dimensioni a spigoli vivi ed arrotondati misti ad una matrice sabbiosa-limosa. Invece nelle zone a minore energia si è avuta la deposizione di sabbie e ghiaie più fini. Con il proseguire della fase trasgressiva il livello medio marino si innalzò raggiungendo una quota di circa 80 m più alto dell'attuale.

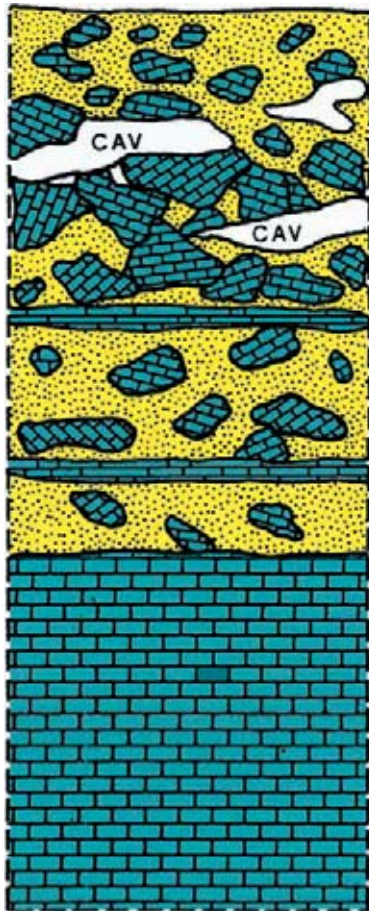
Successivamente a tale fase, una regressione marina, portò ad una parziale emersione dei sedimenti sciolti. Tali sedimenti si cementarono in un ambiente transizionale, originando processi tipo dissoluzione - rideposizione di calcite. I depositi sottostanti, che non emersero in tale fase, subirono parziale e discontinua compattazione per aumento del carico sovrastante. Con il proseguire della fase regressiva e con la formazione in ambiente continentale della coltre di copertura vegetale ricca di CO<sub>2</sub> organica, il processo carsico prese origine generando così le cavità.

## **1.2. Stratigrafia della Piana di Cinisi**

Il settore d'interesse rappresenta una piana costiera in cui sono presenti depositi quaternari che ricoprono un substrato costituito di rocce calcaree mesozoiche o argillose oligo-mioceniche. La formazione argillosa oligo-miocenica nell'area non affiora, ad eccezione di un limitato lembo in prossimità dell'abitato di Terrasini, mentre la formazione calcarea mesozoica è affiorante lungo tutto il versante a monte dell'area aeroportuale. In generale si possono distinguere nella Piana tre differenti sequenze litostratigrafiche:

a) Un deposito superficiale quaternario costituito da un complesso detritico prevalentemente carbonatico con elementi di dimensioni variabili, talora cementato da calcarenite; lo spessore è piuttosto elevato, superiore a circa 30 m. Si tratta di un'alternanza, qualche volta ciclica, di sedimenti a grana grossolana. Dall'alto verso il basso la serie litostratigrafica è data da una breccia poligenica con cemento calcareo composta di elementi calcarei, calcareo-dolomitici, dolomitici e calcareo marnosi di dimensioni variabili, da alcuni mm a 30-40 cm, che talvolta possono raggiungere il metro o più, al disotto si passa ad una breccia con le stesse caratteristiche, ma con elementi di dimensioni da qualche millimetro a 3-4 cm, passanti in alternanza a sabbie biancastre scarsamente cementate contenenti talvolta ciottoli calcarei. Al di sotto si rinviene un substrato carbonatico mesozoico (Fig.3).



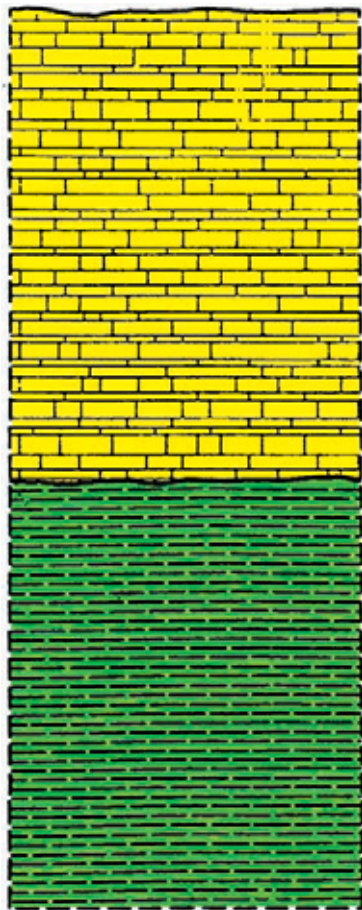


Complesso detritico prevalentemente carbonatico, cementato da calcarenite e con livelli calcarenitici intercalati; sono presenti cavità carsiche. (Quaternario)

Complesso carbonatico.  
(Trias superiore – Lias Inferiore)

Fig. 3 - Sequenza litostratigrafia (a)

b) Una serie litologica caratterizzata dalle calcareniti organogene quaternarie, aventi spessore variabile, all'incirca tra 10-20 m, poggianti su un substrato argilloso-marnoso oligo-miocenico (Flysch Numidico); quest'ultimo probabilmente viene in contatto tettonico per faglia con la formazione calcarea mesozoica presente ad Est della zona adiacente (Fig.4).

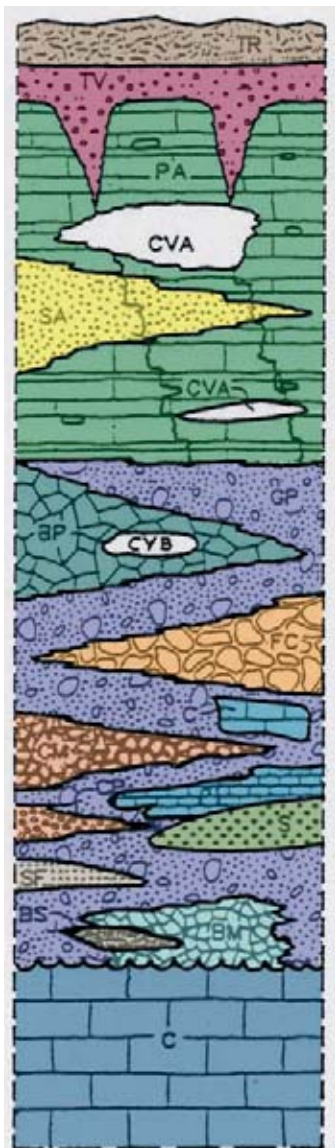


Complesso calcarenitico Quaternario

Complesso argilloso marnoso (Flysch Numidico)  
Oligocene – Miocene inferiore

Fig. 4 - Sequenza litostratigrafia (b)

c) Una serie litologica caratterizzata dall'alto verso il basso da una sottile copertura di terra rossa, che ricopre il deposito calciruditico quaternario tipo "Panchina". Sulla base di alcune indagini eseguite nell'area, la Panchina ha spessori variabili tra 2 m ed oltre 15 m; essa presenta a zone cavità da dissoluzione carsica con estensione planimetrica anche delle decine di metri ed altezze pari ad alcuni metri. Sotto la Panchina segue il complesso detritico (quaternario), costituito di brecce calcaree, sabbie e ghiaie, in alternanza; si tratta di breccia calcarea e ghiaia con elementi sia con spigoli vivi che arrotondati di dimensioni centimetriche. Il grado di cementazione è variabile. Lo spessore è anch'esso variabile, dai 2 m ad oltre 20 m. La variabilità dello spessore della formazione è connessa con la morfologia a gradoni del substrato carbonatico sottostante, che si presenta dislocato a varie altezze, presumibilmente a seguito di una serie di faglie neotettoniche che lo hanno interessato. I maggiori spessori si rinvencono, quindi, laddove i depositi quaternari hanno colmato le depressioni strutturali del substrato carbonatico. La formazione di base, sottostante al complesso di brecce, ghiaie e sabbie, è costituita, quindi, di calcari grigi del Trias sup.- Lias inf., interessati da una fitta rete di giunti ortogonali fra loro, saldati o meno da calcite (Fig. 5).



Terreno da riporto (TR) e terreno vegetale tipo Terra Rossa (TV).

Calciruditi tipo Panchina (PA) con microvuoti da dissoluzione e cavit  carsiche (CVA), passante a lenti di sabbia calcarea (SA).

Alternanze di ghiaia calcarea (GP), breccia (BP) o conglomerato (CYB)  
 Calcarea (CP), calcare in frammenti (FC), sabbia calcarea fine (SF) o grossolana (S), calcarenite giallastra (CL), ciottoli calcarei (CM), breccia di origine milonitica addensata (BM) o sciolta (BS), calcare compatto (C) in trovanti.

Calcare da grigio a nerastro, pi  o meno fratturato (C).

Fig. 5 - Sequenza litostratigrafia (c)

### 1.3. Idrogeologia

Nella Piana di Cinisi si identificano due complessi litologici che presentano una certa omogeneit  di comportamento nei riguardi della circolazione idrica sotterranea:

- Complesso carbonatico di M. Pecoraro: caratterizzato da un alto grado di permeabilit  per fratturazione e carsismo.
- Complesso quaternario calcarenitico-calciruditico: con permeabilit  bassa, variabile in funzione del grado di cementazione e della granulometria degli elementi che lo costituiscono.

La falda freatica nella Piana di Cinisi viene alimentata dall'unit  idrogeologica di M. Pecoraro, come   dimostrato dalla morfologia della superficie piezometrica e dai nume-



rosi sbocchi di acqua dolce individuati lungo la linea di costa. Il sottosuolo della piana è infatti caratterizzato da una falda idrica che si localizza pressoché al livello del mare. La falda ha sede nel substrato carbonatico fessurato ed è in comunicazione idraulica con quella superficiale contenuta nel complesso detritico o calcarenitico. Essa risente delle variazioni di marea in relazione alla presenza nel sottosuolo di condotti carsici in diretta comunicazione con il mare i quali sboccano lungo la linea di costa dando luogo a emergenze idriche a mare.

## **2. IL CARSIAMO E LE CAVITÀ NELLA PIANA DI CINISI**

I fenomeni carsici nella piana di Cinisi, sono molto frequenti per la presenza dei complessi calcarei e calcareo-dolomiti appartenenti ai "Monti di Palermo". Le morfologie osservabili sono diverse, e ciò è dovuto alla variabilità delle facies carbonatiche, alla diversa intensità delle fasi tettoniche, alle quali le varie unità sono state sottoposte, e al ringiovanimento del ciclo carsico.

Le morfologie carsiche prevalenti si impostano nei terreni carbonatici appartenenti alla facies di piattaforma e di margine, mentre nelle facies di bacino si manifestano con forme localizzate e riconducibili generalmente a voragini impostatesi su piani di faglia subverticali.

### **2.1. La tipologia delle cavità**

Le cavità presenti nel sottosuolo della Piana di Cinisi sono di duplice natura: cavità primarie e cavità carsiche.

Le cavità primarie sono sinsedimentarie e si localizzano nel complesso detritico; si tratta di vuoti interstiziali tra blocchi accatastati, laddove non c'è cementazione di natura calcarenitica; presentano dimensioni variabili, talvolta anche oltre il metro cubo.

Le cavità carsiche sono legate ad un carsismo superficiale e discontinuo, si distinguono:

- **Cavità lenticolari**: di dimensioni relativamente modeste, la cui configurazione geometrica è caratterizzata da ampiezza planimetrica dell'ordine di qualche decina di metri o più e da un'altezza dell'ordine del metro al massimo. Sono costituite in genere da un vano unico, solo raramente con diramazioni laterali.
- **Cavità antriformi**: corrispondenti a forme carsiche più evolute, la cui configurazione geometrica e morfologica è piuttosto articolata. Si presentano con grandi ambienti a forma variabile, estesi planimetricamente anche alcune decine di metri, ubicati a quote diverse e collegati tra di loro da cunicoli sub-orizzontali. Tali cavità presentano una ramificazione carsica piuttosto articolata e sono spesso in comunicazione diretta con il mare.

Tipologia	Genesi		Dimensioni Massime	Riempimenti	Ambiente
Microvuoti da dissoluzione	Dissoluzione di CaCO <sub>3</sub> ad opera di acque dolci circolanti in una rete di microfrazture	<b>Cavità da dissoluzione carsica</b>	Qualche centimetro	Calcite Spatica, granuli di sabbia frammenti di fossili.	Sub-aereo e sub-acqueo ad acqua salmastra.
Cavità a grandi ambienti	Successive anastomosi di livelli carsici sovrapposti legati ad un ciclo di regressione marina		Decine di metri in pianta. Altezze di alcuni metri	Concrezioni calcitiche, stalattiti e stalagmiti. Massi distaccatisi dalle volte.	Sub-aereo e sub-acqueo.
Cavità lenticolari	Scorrimento di acque dolci su un livello di base saturato ad acqua salmastra		Decine di metri in pianta. Altezze di 1 m max	Sabbie e ghiaie sciolte, residuo di dissoluzione delle pareti.	Sub-aereo e sub-acqueo ad acqua salmastra
Cavità tra clasti di grosse dimensioni	Vuoti tra blocchi di grosse dimensioni	<b>Cavità Primarie</b>	Qualche metro	Sabbie e ghiaie a granulometria omogenea.	Sub-acqueo ad acqua salmastra e marina.

Tab. 1 - Tipologia delle cavità

Nelle cavità sono presenti concrezioni stalattitiche e stalagmitiche e sono evidenti fenomeni di crolli dalle volte di blocchi di roccia. I materiali di riempimento sono quindi esclusivamente autoctoni di origine clastica o chimica.

## 2.2. La genesi delle cavità

I vuoti di origine primaria (cavità primarie - sinsedimentarie), sono stati generati dall'accatastamento di grossi blocchi ovvero per fenomeni di compattazione differenziale. Si tratta di vuoti interstiziali, localizzati nell'ambito del complesso detritico, la cui estensione è variabile.

Tali cavità presentano riempimenti di materiale sciolto a granulometria fine come sabbie o terra rossa.

Le cavità carsiche sono localizzate nei complessi quaternari, "Panchina", nel detrito carbonatico cementato e nella calcarenite. Il fenomeno carsico è dovuto principalmente all'azione di decementazione e trasporto, ad opera delle acque circolanti nel sottosuolo, degli elementi calcarei che li costituiscono. Esso è quindi, condizionato dalla circolazione idrica sotterranea e dalla sua connessione con quella superficiale. La carsificazione ipogea si sviluppa, infatti, lungo un reticolo di discontinuità di duplice natura:

- orizzontali: si tratta di discontinuità sinsedimentarie tra i livelli a differente contenuto di matrice sabbiosa e/o a diverso grado di cementazione, che presentano quindi differente grado di permeabilità.
- verticali: sono fratture ad andamento sub-verticale o variamente inclinato che interessano gli ammassi rocciosi. Tra esse sono comprese anche le discontinuità ad andamento variabile dovute al contatto tra i diversi blocchi e massi calcarei del complesso detritico.

Possono essere riconosciuti almeno due cicli carsici di età differente. Al primo ciclo, più antico, appartengono le grotte di grosse dimensioni con struttura ad antro, estese

decine di metri in pianta e con altezze dell'ordine di diversi metri. Il loro assetto è dovuto a processi di anastomosi di livelli carsici sovrapposti, la cui origine è legata ad un ciclo di regressione marina. Infatti con il procedere della regressione, la carsificazione, che tendeva a concentrarsi sul livello di base, costituito dalla zona saturata da acqua salmastra, si spostava a quote inferiori. I nuovi livelli di cavità, sviluppandosi, potevano intersecare quelli superiori, causando totali o parziali crolli del pavimento di quest'ultimi e dando così luogo alle cavità antriformi. Una volta terminato lo scorrimento attivo delle acque, sia in regime freatico che vadoso, le grotte si evolvevano per fenomeni gravitativi, quali i crolli di massi dalle volte e per deposizione di concrezioni calcitiche di diversa tipologia che tendevano a riempirle.

Il secondo ciclo carsico, che è tutt'ora attivo, è invece responsabile della presenza di cavità lenticolari site poco al di sopra del livello marino, in prossimità o poco al di sotto di esso. La forma lenticolare è coerente con una giacitura sub-orizzontale delle discontinuità iniziali; lo sviluppo in pianta delle cavità può raggiungere le decine di metri e l'altezza della volta è generalmente contenuta nell'ambito del metro.

Di queste cavità quelle ubicate sopra il livello marino si sono formate per scorrimento delle acque continentali sul livello di base costituito dalla roccia saturata da acqua salmastra ed in qualche caso sono in diretto collegamento con il mare.

Per quanto riguarda le cavità lenticolari, attualmente conosciute nella zona costiera, poco sotto il livello del mare, la loro genesi può essere legata allo spostamento di acqua marina ad opera delle acque dolci, circolanti in pressione nei condotti carsici. Le cavità inoltre si localizzano, al contatto dei livelli cementati–livelli sciolti e la loro genesi è legata a due cause concomitanti: la dissoluzione chimica della roccia e l'erosione meccanica dei sedimenti sciolti alla base, dovuta alle acque continentali che defluiscono verso mare.

### **3. "CASE HISTORY"**

Nella Piana di Cinisi insiste l'aeroporto internazionale "Falcone-Borsellino". Durante i lavori di manutenzione ordinaria delle piste, nel 1970, è stata rinvenuta una cavità carsica (Fig.6). La pista è stata subito chiusa al traffico aereo, a causa del rischio connesso al crollo della volta della grotta, e sono state effettuate accurate indagini della cavità e del sottosuolo circostante.

La cavità aveva una dimensione di circa 12.000 mc e una geometria molto complessa, con una lunghezza massima di circa 50 m, una larghezza massima di circa 30 m ed un'altezza massima di circa 6 m e uno spessore minimo di ricoprimento pari a circa 2 m. La volta e le pareti della caverna erano ricoperte da stalattiti e sul fondo, oltre a stalagmiti e terreno residuale, c'erano una serie di blocchi sparsi, di dimensione massima pari ad alcuni metri (Fig.7).



Fig. 6 - Immagini della cavità situata sotto la pista dell'Aeroporto "Falcone -Borsellino"

Il sottosuolo, sottoposto a una serie di sondaggi, si è rivelato costituito da breccia poligenica in numerose varietà, diverse per forma e dimensione dei costituenti e per tipo e grado di cementazione. La breccia è costituita da calcari, calcari dolomitici e dolomie, addossati gli uni agli altri con tessitura caotica, mentre gli spazi intergranulari sono riempiti da depositi di origine meccanica e chimica.

La cavità è stata creata da un processo di dissoluzione carsica, effettuata sui vuoti sin-diagenetici dallo scorrimento delle acque e successivo allargamento della stessa per

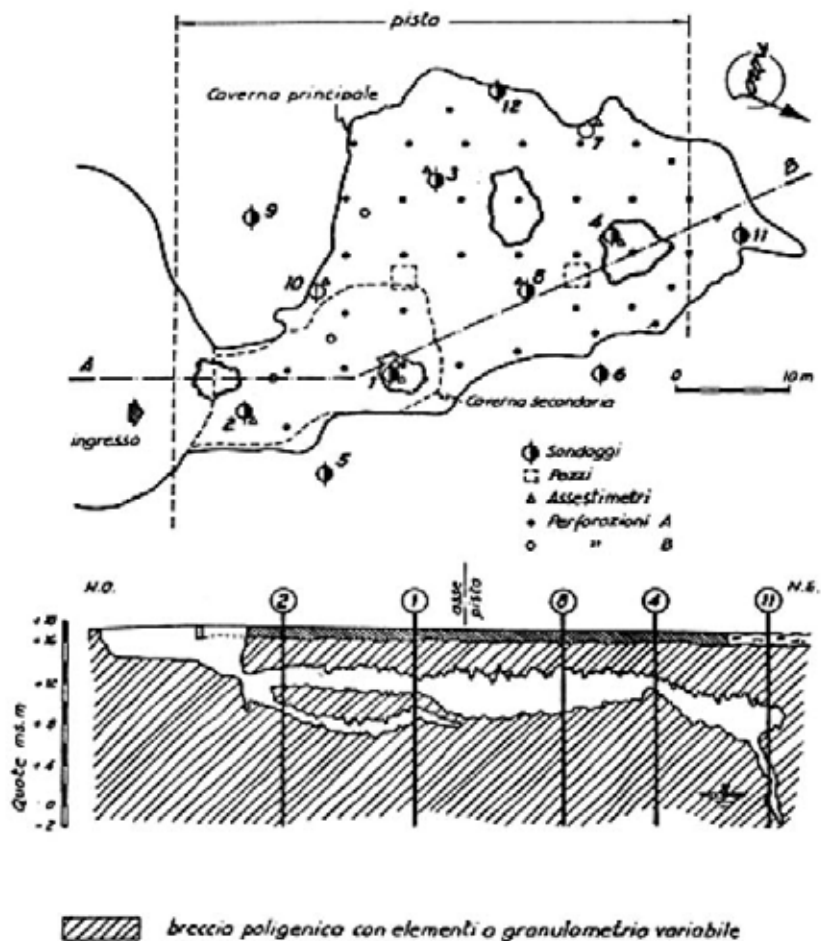


Fig. 7 - Pianta e sezione della cavità presente sotto una delle piste dell'aeroporto "Falcone-Borsellino".

ripetuti crolli della volta. I sondaggi hanno mostrato l'esistenza di diverse cavità sovrapposte e sviluppate orizzontalmente. Ciò è dovuto al susseguirsi dei cicli carsici in seguito ai movimenti relativi tra la terraferma e il mare.

Per ridurre al minimo o addirittura per cercare di eliminare il rischio di crollo, la cavità è stata riempita di calcestruzzo. Per scegliere il tipo di soluzione più opportuna, si è dato più peso a considerazioni relative alla sicurezza che a quelle di tipo economico.

Per la complessità del sottosuolo, costituito da materiale fortemente eterogeneo e con proprietà meccaniche molto diverse, e per la forma della cavità, sono sorti una serie di problemi legati al peso del calcestruzzo di riempimento. Quest'ultimo avrebbe generato delle sollecitazioni nel sottosuolo con conseguenti fenomeni di rottura locale e cedimenti del fondo della cavità.

Effettuando un accurato controllo dei cedimenti durante e dopo il riempimento della cavità, sono stati messi in evidenza cedimenti apprezzabili dell'ordine di  $\pm 1$  mm. Il problema posto dalla complicata geometria delle cavità e dall'elevata irregolarità della sua superficie interna, è stato risolto eseguendo il riempimento con un'elaborata sequenza di operazioni (Fig.8).



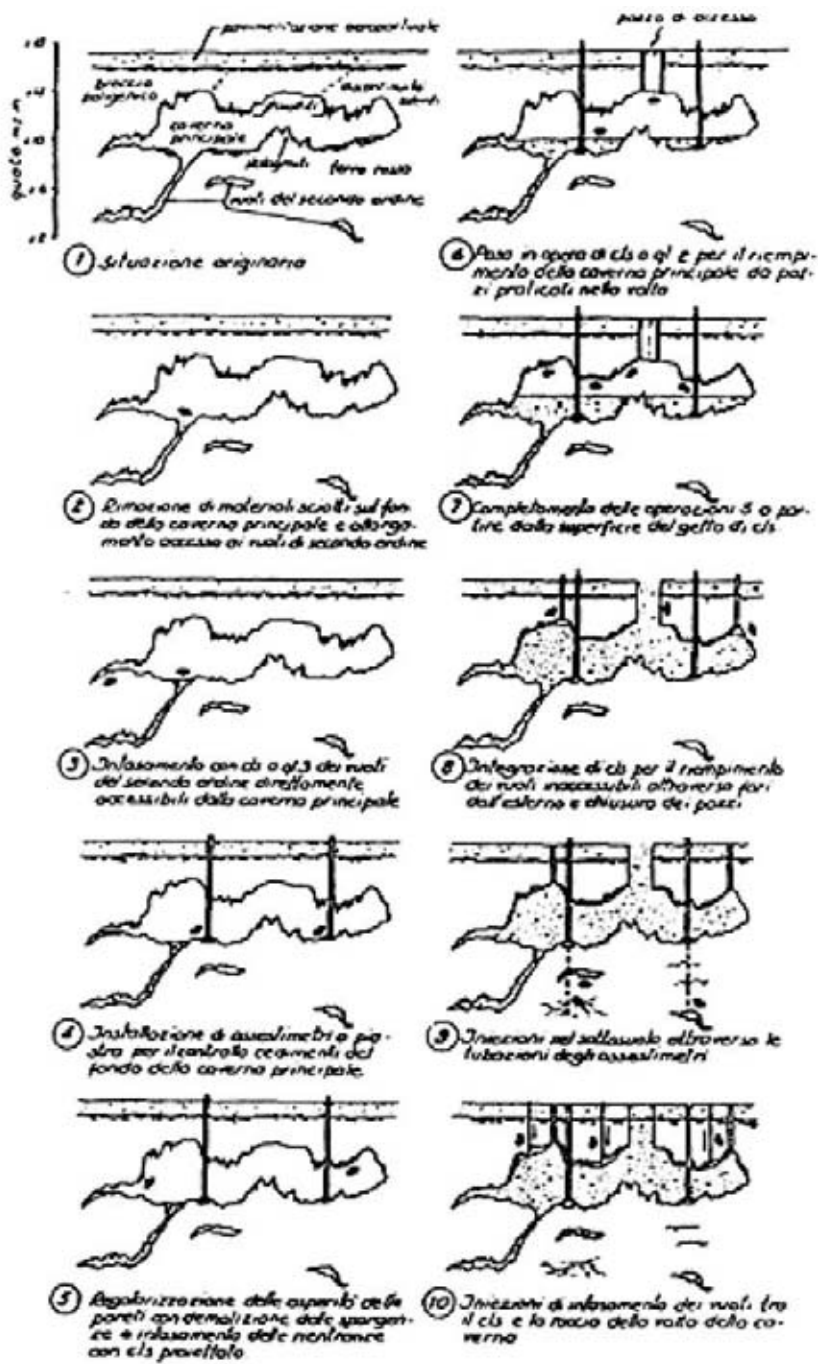


Fig. 8 - Fasi di riempimento della cavità

### 3.1. Metodologie applicate di indagini indirette e dirette

In seguito al rinvenimento della cavità di cui sopra, nel 1998, sotto le piste, sono state effettuate una serie di indagini dirette e indirette, al fine di verificare l'esistenza di eventuali situazioni a "rischio da cavità".

Tra le metodologie geofisiche, che generalmente si considerano utilizzabili nella ricerca di cavità, sono state scelte: metodologia georadar, metodologia geoelettrica per la realizzazione di mappe di resistività apparente e pseudosezioni dipolari, e profili sismici a rifrazione. Si è impostata quindi una campagna d'indagine indiretta che sfruttasse i vantaggi offerti da varie metodologie geofisiche, al fine di ottenere un numero di informazioni ritenuto il più possibile adeguato. Si è prevista una buona quantità di sondaggi meccanici che fungessero da verifica sulle situazioni sospette di cavità, e che al tempo stesso potessero essere utilizzati come taratura di risposte geofisiche anche quando non strettamente o chiaramente riconducibili a cavità, per ottenere una chiave di lettura dei vari tipi di risposta che si presentano.

#### 3.1.1. Indagini Georadar

La metodologia Georadar ha il vantaggio di consentire un'acquisizione rapida dei dati e una visualizzazione dei riflettori in qualche modo simile a certe sezioni litostratigrafiche di dettaglio.

La limitazione nell'uso del georadar nella ricerca di cavità, consiste nella limitata profondità di penetrazione delle onde elettromagnetiche specie se in presenza di acqua.

La campagna d'indagine è stata suddivisa in aree a maggiore e minore rischio e in particolare l'acquisizione dei dati è stata effettuata per tratti di 100 m lineari lungo allineamenti delimitati.

I tratti considerati maggiormente a rischio sono stati indagati con cinque allineamenti georadar paralleli con equidistanza 5 m, centrati sull'asse della pista, mentre in tratti di pista considerati meno a rischio, sono stati indagati con due soli allineamenti distanti 10 m e centrati rispetto all'asse della pista. Sulle parti delle testate tuttavia, la presenza di lastroni di cemento armato rettangolari di 6 m x 7,5 m, ha reso più problematico l'uso del georadar.

L'acquisizione dei dati georadar è avvenuta mediante un'antenna schermata a frequenza di 100 Mhz. L'uso di tale antenna consente un'operatività teorica compresa tra qualche metro e una decina di metri a seconda delle caratteristiche dei terreni attraversati e costituisce, per l'area in esame, il miglior compromesso possibile tra risoluzione e profondità d'indagine.

Sulla base dei tempi di propagazione delle onde in materiali come quelli interessati dall'indagine, è stata scelta una finestra di acquisizione di 250 nanosecondi che corrisponde ad una profondità di indagine che è stata ragionevolmente stimata in circa 8-10 m a seconda dei terreni attraversati.

I dati grezzi provenienti dalle acquisizioni di campagna sono stati sottoposti ad una serie di filtraggi tendenti a migliorare il segnale ed eliminare i disturbi relativi a rumori di fondo ed altri disturbi che potrebbero coprire gli echi causati da un potenziale bersaglio oggetto della specifica indagine. Per fare ciò sono state eseguite le seguenti operazioni: filtraggio dei rumori di fondo, applicazione guadagno automatico e applicazione di filtri infiniti. Tutti i profili georadar da 100 m sono stati elaborati e successivamente stampati (Fig. 9)

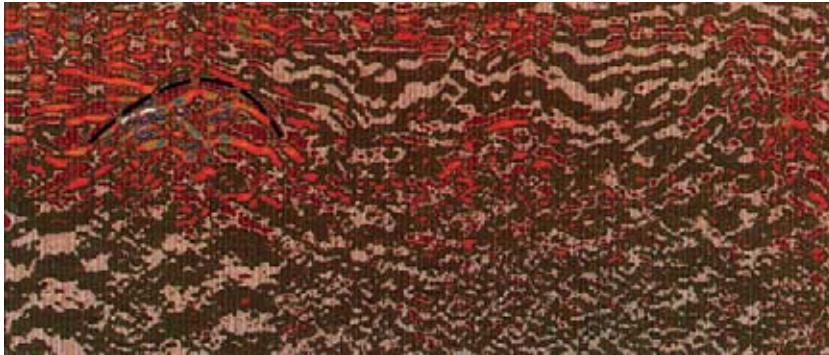


Fig. 9 - Esempio di cavità in terreni carbonatici fratturati

La maggior parte dei profili ha mostrato anomalie riconducibili ad una situazione geologica alquanto complessa, con frequentissime discontinuità sub-verticali spesso presenti su più profili paralleli alla stessa progressiva. A parte qualche eccezione, non potendo segnalare sulle strisciate georadar ogni minimo disturbo sulla continuità dei riflettori, è stato preferito evidenziare solo la presenza delle anomalie più intense e chiaramente riconducibili a fenomeni carsici. La gran parte delle anomalie di origine carsica presente nell'area sono state attribuite a fratture sub-verticali, a volte allargate dall'acqua che può avere generato rundkarren e piccoli inghiottitoi. Anche in questo caso sono state indicate le anomalie che mostravano le maggiori dimensioni in senso verticale e/o orizzontale, e quelle che presentano forme più allargate alla base.

Riassumendo, l'uso del georadar ha evidenziato la presenza di quattro tipi di anomalie:

- a sviluppo prevalentemente orizzontale dovute a cavità lenticolari o a diffusa vacuolarità nell'ammasso delle breccie carbonatiche;
- a sviluppo prevalentemente verticale attribuite a fenomeni di carsismo (Rundkarren);
- generate da discontinuità sub-verticali nell'ammasso roccioso;
- generate per variazioni laterali delle caratteristiche di consistenza del substrato carbonatico mesozoico.

### 3.1.2. Indagini Geoelettriche

Per la ricerca di cavità è risultata utile una geometria di acquisizione di tipo doppio dipolo, in cui le coppie di picchetti di corrente e di potenziale sono separati, allineati, con una distanza fissa di "a" metri e vengono spostati di volta in volta lungo l'allineamento di multipli interi della distanza "a". Sono stati prelevati i valori del potenziale e della corrente immessa nel terreno alle varie geometrie e, calcolati i relativi coefficienti geometrici, si determinano i valori di resistività apparente alle varie profondità su più allineamenti laterali.

Anche con il doppio dipolo si possono realizzare Sondaggi Elettrici Verticali, ma poiché lo scopo dell'indagine è stata la massimizzazione delle informazioni in senso areale, oltre che verticale, si è adottata questa metodologia per ottenere valori di resistività apparente alle varie profondità presunte lungo più allineamenti. I dati geoelettrici di tipo doppio dipolo sono stati trattati separatamente per le zone indagate. Dalla loro combinazione sono state ricavate mappe degli allineamenti longitudinali e trasversali alle varie quote, restituzione 3D di tali mappe e pseudosezioni dipolari.

Sono stati inoltre effettuati n°2 stendimenti SEV con geometria Schlumberger di lunghezza  $AB/2$  pari a 40 m, per la determinazione dei principali valori di resistività dei terreni. I dati provenienti dai SEV sono stati elaborati ed interpretati mediante l'ausilio di un software dedicato, che oltre alle colonne elettrostratigrafiche, ha fornito anche

curve di equivalenza, ossia i valori dei range resistività-profondità, entro i quali si possono considerare ancora attendibili i risultati elaborati. I sondaggi hanno mostrato una media correlazione tra i dati sperimentali e le curve teoriche di interpretazione, portando ad una scarsa dispersione delle curve di equivalenza; hanno coinciso i valori di ottimizzazione delle profondità e resistività dei vari elettrostrati con la profondità e le caratteristiche litologiche dei vari strati indagati con indagini meccaniche di taratura.

### 3.1.3. Sismica

Nel caso in esame la procedura di acquisizione utilizzata per la determinazione della velocità di attraversamento sismico dei terreni, si è basata principalmente sulla metodologia sismica a rifrazione.

Ai margini della pista di rullaggio sono stati acquisiti 6 sondaggi sismici a rifrazioni con 12 geofoni allineati, battute di andata, di ritorno e centrale con distanza intergeofonica di 5 e 8 m. Di essi si riportano le caratteristiche principali in tabella:

N° Sond.	Distanza interg. [m]	Ubicazione
SR1	5	Tra progr. 100-165 lato mare
SR2	5	Tra progr. 250-315 lato monte
SR3	5	Tra progr. 450-515 lato mare
SR4	8	Tra progr. 450-550 lato monte
SR5	8	Tra progr. 600-700 lato monte
SR6	8	Tra progr. 750-850 lato monte

Tab. 2 - Sondaggi sismici

Le registrazioni delle tracce sismiche sono state visualizzate direttamente in campagna, registrate su computer per le successive fasi di trattamento ed elaborazione con opportuni software. Una volta costruite le dromocrone si sono quindi eseguite tutte le elaborazioni possibili in modo da ottenere il migliore adattamento delle rette di velocità ai dati sperimentali. Sono state evidenziate le anomalie di velocità sulle dromocrone causate dalla presenza di variazioni laterali (eteropie) di velocità sismica e quindi da variazioni nelle caratteristiche litologiche e/o litotecniche dei terreni.

## 3.2. Verifica delle anomalie e correlazione dei dati geofisici e geologici

Al fine di caratterizzare puntualmente l'area aeroportuale sotto il profilo geologico, e sotto il profilo del rischio connesso con la presenza di cavità nel sottosuolo, sono state svolte tutte le indagini già citate in precedenza, secondo una specifica metodologia. Tutte le anomalie georadar evidenziate sono state classificate per tipologia e, all'interno di ogni classe, in ordine di intensità e distanza dalla superficie. Le anomalie geoelettriche, invece, non classificabili per tipologia, sono state distinte secondo il criterio della distanza dalla superficie e dall'estensione planimetrica. Su questa iniziale classificazione si è adottato il criterio di verificare innanzitutto le anomalie più prossime alla superficie della pista e quelle aventi maggiore intensità e caratteristiche più sospette. Le restanti anomalie non verificate, e comunque meno intense, in linea teorica sono riconducibili a fenomenologie fisiche analoghe a quelle riscontrate e aventi presumibilmente dimensioni inferiori.

Le metodologie, dirette e indirette, applicate hanno, progressivamente, confermato l'esistenza di cavità permettendo anche una correlazione tra i dati ottenuti.

In particolare per quanto riguarda la cavità posta al di sotto di una delle piste inizialmente è stato utilizzato il georadar che ha permesso il riconoscimento di quest'ultima.

Tale cavità dovuta ad un fenomeno carsico è risultata a sviluppo prevalentemente orizzontale e data la sua grandezza è stata anche studiata la risposta geoelettrica, che ha evidenziato una piccola anomalia di forma sospetta, sia verticale che orizzontale, ma di modestissima estensione. La coincidenza dell'anomalia georadar e geoelettrica sullo stesso punto, anche di modeste estensioni, ha portato a richiedere una verifica dell'informazione. Pertanto è stato effettuato il sondaggio meccanico di verifica che ha effettivamente evidenziato la presenza di un vuoto a profondità di circa 3.70 m per un'ampiezza di circa 40 cm. Infine la verifica con telecamera da pozzo ha consentito la conferma visiva del vuoto.

Per la caratterizzazione dello stato di consistenza dell'ammasso roccioso al di sopra della cavità, è stato eseguito un secondo sondaggio di verifica a carotaggio continuo. Anch'esso ha evidenziato la presenza di una cavità a una profondità compresa fra 3.60 - 3.80 m dal piano della pista, nonché la presenza di una certa vacuolarità nel deposito con piccoli vuoti riempiti di terra rossa e di calcite secondaria.

La breccia calcarea, sovrastante la cavità, si presenta ben cementata e quindi la cavità, di forma lenticolare e estensione di ordine metrico, non crea problemi ai fini della sicurezza dell'operatività della pista.

Come detto, scopo dell'utilizzo dei tre metodi di indagine, era quello di avere una "conferma" della presenza di cavità. I metodi diretti (perforazioni a carotaggio continuo, a distruzione di nucleo) da soli non rappresentano un metodo di indagine idoneo per la ricerca di cavità su grandi aree, anche se costituiscono l'unico mezzo di indagine diretta e certa per la individuazione di vuoti lungo la verticale di esplorazione, ma costituiscono un valido strumento di verifica e di taratura delle indagini indirette.

Tuttavia l'indagine georadar è risultata la più soddisfacente perché ha permesso di localizzare e distinguere i diversi tipi di cavità.

## **BIBLIOGRAFIA**

ABATE B. CATALANO R. RENDA P. (1978) - Schema geologico dei monti di Palermo. Boll. Soc. Geol. It., 98.

ANELLI F. (1975) - Nuove osservazioni sui fenomeni carsici, paracarsici e pseudocarsici. Le Grotte d'Italia s.IV, 4, 165 - 198.

CATALANO R. D'ARGENIO B. LO CICERO G. (1974) - I ciclotemi Triassici di Capo Rama (Monti di Palermo). Studi sulle piattaforme carbonatiche siciliane, Geologica Romana, 12, 125-145. Roma.

CIGNA A. (1978) - A classification of karstic phenomena. Int. J. Of Speleol., 10, 3-9.

CIGNA A. (1984-85) - Some remarks on phase equilibria of evaporites and other karstifiable rocks. In: Forti P. (Ed.), Atti del Simposio Internazionale sul carsismo nelle evaporiti. Le Grotte d'Italia, 12, 201-208.

CUCCHI F. FORTI P. (1986) - Karst areas in Italy. Suppl. Grotte d'Italia s.4, 12.

CUCCHI F. FORTI P. MARTINETTI E. (1996) - Surface degradation of carbonate rocks in the karst of Trieste (Classical Karst, Italy). In: Fornos J.J. & Gines A. (Eds), Karren landforms, Universitat de les Illes Balears, 41-52. Palma de Mallorca.

JAPPELLI R. LIGUORI V. (1977) - An unusually complex underground cavity. Int. Simp. The geotechnics of structurally complex formation, A. G. 1, 2. Capri.

LIGUORI V. MONGIOVI L. (1982) - Esperienze di consolidamento di terreni di fondazione in aree carsiche nei monti di Palermo. Geologia Applicata e Idrogeologia, 17.

MACALUSO T. MADONIA G. PALMERI A. SAURO U. (2001) - Atlante dei Karren delle evaporiti della Sicilia. In Quaderni del museo geologico G.G. Gemmellaro, 5.

ZEZZA F. (1975a) - Le facies Carbonatiche della Puglia ed il fenomeno carsico ipogeo. Geologia Applicata e Idrogeologia. 10, parte 1.