

ITINERARIO

TRAPANI - MAZARA DEL VALLO

VARIANTE ALLA S.S.115 "SUD OCCIDENTALE SICULA"
DALLO SVINCOLO "BIRGI" SULLA A29/DIR AL COLLEGAMENTO ALLA S.S. 115 AL KM 48+000
1° STRALCIO FUNZIONALE MARSALA SUD - MAZARA DEL VALLO

PROGETTO DEFINITIVO

COD. PA757

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

PROGETTISTA E RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE
DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Ing. Antonio Scalamandrè
Ordine ing. di Frosinone n. 1063

GEOLOGO:

Dott. Flavio Capozucca
Ordine geologi del Lazio n. 1599

COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Arch. Roberto Roggi

VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO

Ing. Luigi Mupo

GEOLOGIA

Relazione Geologica ed Idrogeologica

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA:
PROGETTO LIV. PROG. ANNO [D][P][P][A][0][7][5][7] [D] [2][2]		T00GE00GEORE01_A		A	-
CODICE ELAB.		T00GE00GEORE01			
D					
C					
B					
A	EMISSIONE	Gennaio 2022	Paone M.	Capozucca F.	Scalamandrè A.
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO



T00GE00GEORE01_A

Relazione Geologica ed Idrogeologica

ITINERARIO TRAPANI - MAZARA DEL VALLO

VARIANTE ALLA S.S.115 "SUD OCCIDENTALE SICULA"

Dallo svincolo "Birgi" sulla A29/dir al collegamento alla S.S. 115 al km 48+000

1° stralcio funzionale Marsala Sud - Mazara del Vallo

INDICE

1	PREMESSE	3
1.1	BREVE CRONISTORIA DEL PROGETTO	4
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO-TERRITORIALE E DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	5
2.1	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	7
3	METODOLOGIA DI STUDIO ED INDAGINI GEOLOGICHE E GEOTECNICHE	9
3.1	LA CAMPAGNA INDAGINI 2003	10
3.2	LO STUDIO DEL 2012	12
3.3	LA CAMPAGNA INDAGINI DEL 2021	14
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	17
4.1	SCHEMA GEOLOGICO GENERALE	17
4.2	GEOLOGIA DI DETTAGLIO	22
5	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	38
5.1	IL COMPLESSO CALCARENITICO DELLA PIANA DI MARSALA – MAZARA DEL VALLO	38
5.2	LE MISURE PIEZOMETRICHE ESEGUITE IN SITO E IL MODELLO IDROGEOLOGICO	43
5.3	QUALITÀ DELLE ACQUE	48
6	STUDIO SULLE CAVITÀ DI ORIGINE ANTROPICA	51
6.1	QUADRO STORICO	51
6.2	LE INDAGINI ESEGUITE NEL PROGETTO PRELIMINARE 2004	52
6.3	LE INDAGINI SPELEOLOGICHE	54
6.4	LE INDAGINI GEOELETTRICHE E I SONDAGGI A DISTRUZIONE DI NUCLEO 2012	60
6.5	LE INDAGINI GEOELETTRICHE ED ELETTROMAGNATOMETRICHE 2021	69
6.6	CONSIDERAZIONI SULLA PROBABILITÀ DI INTERFERENZA TRACCIATO/CAVITÀ	70
7	INQUADRAMENTO SISMICO	70
7.1	MACROSISMICITÀ DELL'AREA DI STUDIO	70
7.2	CARATTERISTICHE SISMICHE DI DETTAGLIO DELL'AREA DI STUDIO	76
7.3	APPROFONDIMENTI 2021 DI CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEI TERRENI	85
8	MGR, ASPETTI APPLICATIVI DEL TRACCIATO E SCELTE PROGETTUALI	86
8.1	VIADOTTO SOSSIO	87
8.2	GALLERIA ARTIFICIALE E MURI DI SOSTEGNO	88
8.3	CAVALCAVIA	90
8.4	RILEVATI E BONIFICHE	90
8.5	MATERIALI DI SCARTO DELL'ATTIVITÀ ESTRATTIVA	94
9	RIFERIMENTI NORMATIVI	96
10	BIBLIOGRAFIA	98

1 PREMESSE

Il tratto esistente della S.S. 115 da Trapani a Mazara del Vallo si sviluppa prevalentemente all'interno di centri abitati, ha una piattaforma di larghezza ridotta e presenta numerosi accessi ed intersezioni a raso. La strada esistente dunque, non possiede le caratteristiche geometriche e funzionali stabilite dalle vigenti norme tecniche per le strade extraurbane e non consente, pertanto, di collegare con adeguati livelli di servizio e di sicurezza i poli presenti lungo la costa occidentale della Sicilia.

Per colmare questa carenza infrastrutturale nel primo Programma delle Infrastrutture Strategiche della Legge Obiettivo (delibera CIPE n.121 del 21/12/2001) è stato inserito l'ammodernamento della SS 115 "Occidentale Sicula" da Trapani a Mazara del Vallo.

L'intervento consiste nella realizzazione di una variante esterna ai centri abitati della SS 115 "Sud Occidentale Sicula" da Trapani a Mazara del Vallo; la nuova strada prevista è di categoria C1.

Nel presente documento, redatto conformemente ai dispositivi di legge, in particolare al DM 17/01/2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni" ed alla compatibilità geologica, geomorfologica, idrogeologica dell'opera (art. 23 comma "i" del Codice degli Appalti Pubblici), vengono illustrati gli esiti dello studio geologico effettuato a supporto del Progetto Definitivo del "1° stralcio funzionale Marsala Sud - Mazara del Vallo, dallo svincolo Birgi sulla A29/dir al collegamento alla S.S. 115 al km 48+000 della Variante alla S.S.115 "SUD OCCIDENTALE SICULA, ITINERARIO TRAPANI - MAZARA DEL VALLO", affrontando tutte le tematiche di carattere geologico, geomorfologico ed idrogeologico a fini applicativi, per il corretto inquadramento del territorio in cui si inserisce l'intervento e necessarie alla progettazione definitiva delle opere previste.

L'individuazione delle problematiche di natura geologico-geotecnica, ben individuate nel Progetto Preliminare, in questa fase ha consentito di ridurne o minimizzarne gli effetti, identificando le soluzioni più idonee e fornendo inoltre gli elementi necessari per le scelte progettuali da esse derivate.

Vengono pertanto descritti a diverse scale i contesti geologico, geostrutturale, geomorfologico ed idrogeologico di riferimento, nonché analizzata la sismicità dell'area. Segue quindi l'analisi dell'intervento e delle opere previste in funzione del modello geologico-tecnico di riferimento (MGR), elaborato per la progettazione definitiva.

A sintesi e completamento del presente lavoro sono stati redatti i seguenti elaborati:

- ✓ Documentazione indagini pregresse 2003, Vol. 1 e 2
- ✓ Documentazione indagini pregresse 2012, Vol. 1 e 2
- ✓ Documentazione indagini 2021, Vol. 1 e 2
- ✓ Documentazione indagini geofisiche per cavità di origine antropica 2021
- ✓ Planimetria ubicazione indagini Tavv. da 1 a 7
- ✓ Planoprofilo Geologico geomorfologico Tavv. da 1 a 11

- ✓ Planoprofilo Geologico geomorfologico di dettaglio del Viadotto Sossio
- ✓ Carta idrogeologica Tavv. da 1 a 3
- ✓ Carta sullo studio delle cavità Tavv. 1 e 2

1.1 BREVE CRONISTORIA DEL PROGETTO

Si tratta di un Intervento nato nell'ambito della Legge Obiettivo. Nel 2004 ANAS ha avviato le relative procedure approvative, relative al Progetto Preliminare dell'intero intervento da Trapani a Mazara del Vallo, realizzato dalla Direzione Progettazione mediante gara di progettazione ed attività di indirizzo e controllo interno da parte del Gruppo di Lavoro istituito. Tutti gli Enti competenti hanno inviato al MIT i propri pareri favorevoli, ma il MIT non ha trasmesso il progetto al CIPE per mancanza di finanziamenti.

Ad agosto 2017 con l'APQ (Accordo di Programma Quadro) – Sicilia è stato finanziato il 1° stralcio funzionale "Marsala sud – Mazara del Vallo". Il primo stralcio funzionale è lungo circa 16,4 km e si sviluppa prevalentemente su rilevato basso. La nuova infrastruttura avrà due opere d'arte maggiori: un viadotto lungo 140 m sul fiume Sossio e la galleria artificiale "Ospedale", di circa 100 m.

Nell'ottobre 2017 ANAS ha chiesto al MIT di riavviare le procedure approvative di legge obiettivo, proponendo al CIPE l'approvazione del progetto preliminare del primo stralcio Marsala-Mazara del Vallo.

Il 15 gennaio 2018 il MIT ha comunicato ad ANAS che, prima della trasmissione al CIPE del progetto preliminare, occorre, fra le varie prescrizioni, sottoporre il progetto preliminare del primo stralcio Marsala Mazara del Vallo al parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

ANAS quindi a maggio 2018 ha richiesto al Consiglio Superiori dei Lavori Pubblici il parere sul progetto preliminare del primo stralcio Marsala – Mazara del Vallo, il quale ha imposto ad ANAS di rimettere tutti gli elaborati con data 2004, aggiornandoli alle norme tecniche in vigore.

Nell'ambito di questa fase sono stati riesaminati tutti i dati geologici e geotecnici disponibili e rivisitati i modelli geologici, geomorfologici ed idrogeologici, utilizzando i dati provenienti dalle indagini geologiche e speleologiche eseguite nel 2012 ed acquisendo alcuni dati ex novo, riguardanti l'idrogeologia della galleria Ospedale.

Nel 2021 è stata progettata e realizzata una nuova campagna di indagini geologiche, idrogeologiche, geofisiche e geotecniche volta ad approfondire il quadro conoscitivo, caratterizzare la parte nord del tracciato e ridurre od eliminare la maggiore pericolosità del tracciato, overossia la possibile interferenza con cavità di origine antropica nel tratto che attraversa l'area delle cave di calcarenite, nel comune di Petrosino.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO-TERRITORIALE E DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

L'area interessata dall'intervento in oggetto è ubicata nella Sicilia occidentale, in Provincia di Trapani, e ricade all'interno dei territori comunali di Marsala, Petrosino e Mazara del Vallo. L'opera, con uno sviluppo lineare complessivo di circa 16,6 km, ha inizio nel comune di Marsala, in corrispondenza del nuovo Ospedale "Paolo Borsellino", prosegue in direzione sud-est attraversando per circa 2,5 km il comune di Petrosino e termina a sud nel Comune di Mazara del Vallo, all'intersezione con il Km 48+500 dell'attuale SS 115, come illustrato in Fig. 2.1.

Da un punto di vista morfologico il tracciato si sviluppa all'interno Piana di Marsala, tra i due corsi d'acqua più importanti dell'area, il Fiume Sossio a nord e il Torrente Mazarò a sud-est e, ad eccezione delle incisioni relative ai due corsi d'acqua, l'intero territorio risulta essere completamente pianeggiante, con un leggero declivio verso la linea di costa e verso sud.

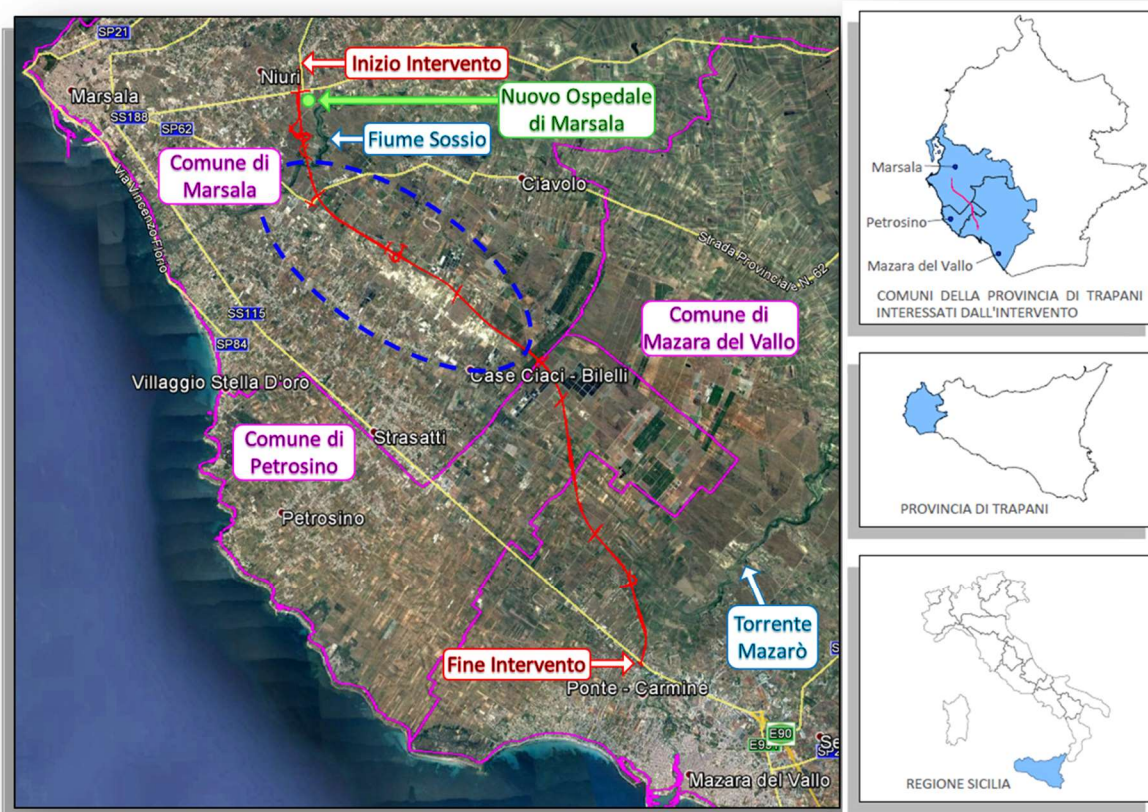


Fig. 2.1 – Ubicazione geografica dell'area di intervento. In rosso il tracciato del 1° stralcio; in magenta i limiti comunali; L'area circoscritta con il poligono blu tratteggiato evidenzia la zona caratterizzata dall'attività estrattiva.

Come verrà discusso più approfonditamente in seguito, il territorio attraversato dall'opera può essere suddiviso in due grandi aree in funzione, principalmente, dello sfruttamento e dell'utilizzo antropico che, nel corso degli anni, ha subito e che lo ha profondamente caratterizzato.

La parte settentrionale, corrispondente al Comune di Marsala, è stata negli anni ed è tuttora sede di numerose cave a cielo aperto, utilizzate per l'estrazione dei cosiddetti "conci di tufo", ovvero, blocchi di natura calcarenitica molto utilizzati nelle costruzioni e facili da estrarre e lavorare.

La parte meridionale invece, corrispondente ai territori comunali di Petrosino e Mazara del Vallo, è sede di un marcato sfruttamento agricolo, soprattutto caratterizzato dalla coltivazione della vite.



Fig. 2.2 – Esempi di utilizzo della calcarenite nelle costruzioni storiche locali. Resti della facciata della Chiesa di S. Ignazio edificata nel 1701;

2.1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

L'asse principale oggetto del primo stralcio funzionale inizia con il Km 0, coincidente con il Km 0+560 dell'asse "Scorrimento Veloce Trapani-Marsala".

L'intervento inizia sovrapponendosi, per 150 m circa, all'attuale sede della strada a scorrimento veloce, proseguendo poi verso sud su nuovo sedime. L'intersezione con la S.S.188 viene superata sottopassando la statale con una **galleria artificiale** denominata "**Ospedale**", delimitata da due tratti tra muri in appoggio a nord e sud della galleria ospedale.

Il collegamento della nuova infrastruttura con il tessuto stradale esistente è ripristinato attraverso lo svincolo a trombetta "Marsala Sud", ove è presente il cavalcavia CV01, la rotatoria "Marsala-Ospedale" sulla S.S.188, nei pressi del Polo Ospedaliero, e viabilità secondaria.

Il tracciato prosegue con l'unica opera in viadotto presente sull'asse principale, il **Viadotto "Sossio"**, che supera l'incisione dell'omonimo Fiume.

Collocato tra le progressive 2+156 e 2+291, ha un impalcato a struttura mista acciaio-calcestruzzo con schema statico a trave continua su tre campate di medesima luce, pari a 45.00 m, per una lunghezza complessiva di 145.00m

Prima di attraversare il Sossio, l'asse principale viene scavalcato dal cavalcavia CV2, mentre dopo il viadotto il tracciato prevede un breve tratto in scavo per poi proseguire principalmente in rilevato fino a fine intervento.

Lungo questo tratto sono previsti i due svincoli a livelli sfalsati di **Terrenove** e **Petrosino**, rispettivamente alle progressive 5+000 e 9+000 circa. Lo **svincolo di Petrosino** (SV03) oltre a connettere la nuova strada con la rete rurale esistente, consente l'interscambio tra le cave di calcarenite arenacea su un lato e sull'altro della nuova infrastruttura.

La ricucitura della viabilità locale sarà garantita attraverso la realizzazione sia di opere di attraversamento dell'asse principale sia di viabilità vicinale, VL, ed interpodereale, IN. Le opere di attraversamento sono costituite da 5 cavalcavia (**CV03, CV4, CV5, CV6, CV7**) e 5 sottopassi (**ST1, ST2, ST3, ST4, ST5**), di cui due, ST2 ed ST3, inseriti negli svincoli. La viabilità secondaria

Il tracciato ha termine alla progr.**16+670** con la rotatoria di fine intervento che si innesta sulla S.S.115 esistente.

Da un punto di vista altimetrico il contesto attraversato risulta decisamente pianeggiante. Il tracciato alla progressiva 0+000 presenta una quota di 76.37 m e alla progressiva 16+670 una quota di 20.47 m da cui si deduce una pendenza media pari allo 0.33%. La pendenza massima è invece pari al 2.88% presente in un tratto di circa 310 m dalla pk 0+242 e 0+551.

In ottemperanza ai criteri del D.M. 5/11/2001 sono state previste piazzole di sosta, ubicate ad intervalli di circa 1000 m lungo ciascuno dei sensi di marcia, di dimensioni pari a quelle indicate dalla normativa e cioè lunghezza totale di 65 m.

Alcune piazzole sono state previste oltre che per la sosta di emergenza, anche per accogliere le vasche di trattamento delle acque di prima pioggia.

3 METODOLOGIA DI STUDIO ED INDAGINI GEOLOGICHE E GEOTECNICHE

Lo studio contenuto nel presente lavoro si è articolato, come di consueto, per fasi successive e con progressivi approfondimenti.

Durante la prima fase si è effettuata una ricerca bibliografica che ha permesso di raccogliere tutto il materiale e la cartografia esistente sulla zona di interesse. Base di partenza è stato lo studio effettuato per il progetto Preliminare dell'intero lotto, effettuato nel 2003 nonché i dati e gli approfondimenti effettuati durante il 2012.

Si è provveduto, inoltre, allo studio delle foto aeree, al fine di individuare le forme e gli elementi presenti sul territorio, ed al loro confronto con le informazioni bibliografiche e di campagna reperite precedentemente.

Sulla scorta degli elementi acquisiti in precedenza, unitamente all'analisi dei risultati delle campagne d'indagine pregresse, durante la seconda fase si è proceduto all'elaborazione di un *Modello Geologico preliminare*.

Il modello così ottenuto ha rappresentato, dunque, il punto di partenza per i successivi approfondimenti sito specifici, mirati all'ottimizzazione del dato in funzione delle opere previste.

Diversi sopralluoghi in loco hanno infatti permesso la verifica delle analisi preliminari attraverso un attento rilevamento geologico-geomorfologico e l'individuazione dei punti del tracciato maggiormente complessi.

Durante l'ultima fase di studio si è provveduto ad una ulteriore rielaborazione del modello geologico in funzione dei dati ottenuti dalla campagna.

Il Modello Geologico di Riferimento (MGR) così ottenuto, rappresenta, dunque, la sintesi di tutte le informazioni contenute nel presente studio ed è stato rappresentato graficamente, a diverse scale di dettaglio, mediante la redazione di specifica cartografia.

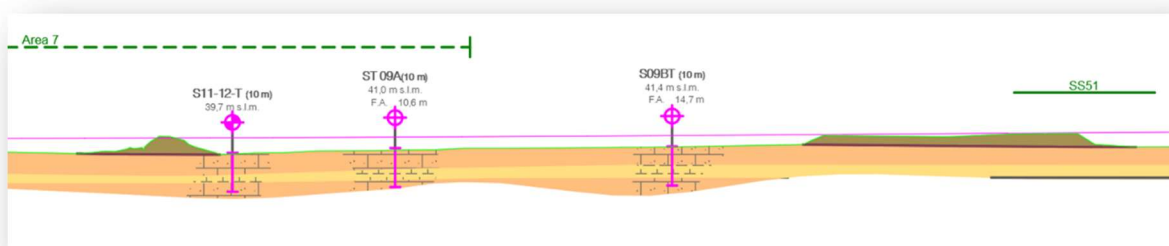


Fig. 3.1 – Stralcio del Modello Geologico di Riferimento.

Sulla base di questo modello è stata progettata la campagna indagini 2021, consistente in sondaggi a carotaggio integrale, prove in foro, prove di laboratorio, geofisica in foro ed in superficie, pozzetti esplorativi, monitoraggio piezometrico in continuo ed indagini ambientali.

Di seguito una breve sintesi delle campagne d'indagine e del rilevamento svolto. I risultati verranno invece commentati negli specifici capitoli.

3.1 LA CAMPAGNA INDAGINI 2003

La campagna del 2003 ha visto l'esecuzione di numerose indagini che hanno coperto l'intero tracciato della variante SS.115 "Sud Occidentale Sicula", compreso tra lo svincolo "Birgi" sulla A29/dir e il collegamento alla SS.115 al Km 48+500 in corrispondenza dell'abitato di Mazara del Vallo.

Per lo studio del 1° stralcio, da Marsala Sud a Mazara del Vallo, sono state dunque prese in considerazione solo le indagini inerenti l'intervento oggetto dell'attuale progettazione.

L'intenso sfruttamento del territorio a fini estrattivi, concentrato soprattutto nel comune di Marsala, ha fatto sì che numerose indagini fossero finalizzate alla ricerca ed alla individuazione di possibili cavità interferenti con il tracciato. A differenza delle attuali attività estrattive, che avvengono a cielo aperto, in passato l'estrazione della calcarenite avveniva in sotterraneo, generando di fatto un gran numero di gallerie. Tale particolare peculiarità dell'area di studio verrà trattata nello specifico capitolo.

La campagna del 2003 ha visto, per l'area di interesse, l'esecuzione di:

- ✓ **10 sondaggi geognostici a carotaggio integrale**, per complessivi 171 m, con prove in foro di tipo SPT e prelievo campioni, per la definizione delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche;
- ✓ **Installazione di n°2 piezometri tipo Casagrande (S20 ed S22)** per la definizione della falda di progetto;
- ✓ **prelievo di n° 8 campioni** direttamente dai cumuli di calcarenite presenti a p.c., per la caratterizzazione geotecnica-stradale del materiale.
- ✓ **78 profili con Georadar**, per un totale di 3.840 ml, suddivisi in 13 aree, per individuare possibili cavità di origine antropica e/o naturale interferenti con il tracciato;
- ✓ **7 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo**, per complessivi 75 m, per la verifica diretta della presenza di possibili cavità ;
- ✓ **n°78 sondaggi sismici a rifrazione**, per l'individuazione di possibili discontinuità litologiche e la definizione delle caratteristiche elastiche dei terreni.

Nelle tabelle a seguire una sintesi sulle indagini. La documentazione completa è contenuta nell'elaborato "T00GE00GEORE03B".

ID	Tipologia carotaggio	Lunghezza (m)	N. prove SPT	Profondità SPT (m)	Campioni terre indisturbati/rimaneggiati	Profondità (m)	Campioni lapidei	Profondità (m)
S20	continuo	20	5	4/6/10,5/16/18	2/1	5,4/10/15	1	4,8
S21	continuo	21	5	3/7/11/17/20	1/0	3,4	1	19,5
S22	continuo	20	5	1,5/4/10/15/19	-	-	2	2,1/5,1
S23	continuo	25	6	3/6,2/9/12/15/18	0/1	5,8	1	10,1
S24	continuo	25	6	3,3/5/7/11/16/22	-	-	2	3,0/3,5
S25	continuo	10	3	3,1/5/9	-	-	3	1,7/2,2/7,7
S26	continuo	10	3	1,5/3/8	0/1	7,7	1	9
S27	continuo	10	3	2/5/9,8	-	-	1	3,5
S28	continuo	15	3	2,5/6/11	-	-	-	-
S29	continuo	15	3	3,1/5/12	-	-	-	-
SD30	distruzione	10	-	-	-	-	-	-
SD31	distruzione	10	-	-	-	-	-	-
SD32	distruzione	10	-	-	-	-	-	-
SD33	distruzione	10	-	-	-	-	-	-
SD34	distruzione	10	-	-	-	-	-	-
SD35	distruzione	15	-	-	-	-	-	-
SD36	distruzione	10	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.1 – Tabella sinottica dei sondaggi, delle SPT in foro e dei campioni utilizzati per le indagini di laboratorio.

ID sondaggio	S20	S20	S20	S20	S21	S21	S22	S22	S23	S23	S24	S24	S25	S25	S25	S26	S26	S27
Campione	CR1	C1	C2	C3	C1	CR1	CL1	CL2	CR1	CL2	CL1	CL2	CL1	CL2	CL3	CR1	CL2	CL1
Profondità (m)	4,8	5,4	10,0	15,0	19,5	3,4	2,0	5,0	5,8	10,1	3,0	3,5	1,7	2,2	7,7	7,7	9,0	3,5
Peso dell'unità di volume naturale (γ_N)		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Peso specifico dei grani (γ_s)		X	X	X	X													
Contenuto d'acqua naturale (W_N)		X	X	X	X													
Analisi granulometrica	X	X	X	X	X	X			X							X		
Resistenza al penetrometro tascabile			X	X	X													
Vane test					X													
Prova di compressione triassiale CU				X	X													
Prova di compressione E.L.L.			X															
Prova di compressione su roccia D.L.							X	X			X	X			X		X	X
Prova triassiale su roccia										X			X					

Tab. 3.2 – Tabella sinottica delle prove di laboratorio.

3.2 LO STUDIO DEL 2012

Nel 2012, in attesa della dell'approvazione del Progetto Preliminare da parte del CIPE, visto il parere favorevole della Regione Sicilia e la disponibilità da parte di ANAS di somme a disposizione per il 1° stralcio, è stato eseguito uno studio integrativo lungo il tracciato oggetto della presente progettazione, finalizzato all'ottenimento di un adeguato approfondimento degli aspetti geologici s.l. ed alla definizione delle condizioni sito-specifiche necessarie alla definizione dell'interazione terreno struttura.

Lo studio è stato suddiviso in due fasi. Una prima fase caratterizzata da un dettagliato rilevamento geologico-geomorfologico, che ha consentito di acquisire una conoscenza più dettagliata circa le caratteristiche geologiche, strutturali, geomorfologiche e idrogeologiche dell'area di studio, ed una seconda fase di indagini in sito volta ad identificare le criticità geologico-geotecniche e geomorfologiche emerse sia dallo studio pregresso sia dal rilevamento di campagna.

I risultati del rilevamento verranno discussi nel capitolo successivo, unitamente all'analisi dei dati provenienti dalle campagne d'indagine.

CAMPAGNA INDAGINI

La campagna indagini del 2012 è stata suddivisa in funzione delle specifiche finalità per le quali le diverse indagini sono state eseguite. In particolare, si distinguono le indagini finalizzate alla definizione del modello geologico-tecnico, da quelle più specificatamente indirizzate all'individuazione delle cavità di origine antropica potenzialmente interferenti col tracciato stradale in progetto.

Le indagini prettamente geologico-geotecniche hanno visto l'esecuzione di:

- ✓ 11 sondaggi geognostici a carotaggio integrale, per complessivi 179 m;
- ✓ 5 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo, per complessivi 52 m;
- ✓ 2 prove penetrometriche S.P.T. in foro (S1bis – 12);
- ✓ prelievo di n. 5 campioni di terre indisturbati (CI);
- ✓ prelievo di n. 6 campioni lapidei (CL);
- ✓ 5 videoispezioni in foro, nei sondaggi contrassegnati dalla lettera T;
- ✓ 2 prove dilatometriche in foro (S5 – 12);
- ✓ 1 indagine simica down-hole (S1 – 12);
- ✓ 1 prova di permeabilità di tipo Lugeon (S4 – 12);
- ✓ 1 prova di permeabilità di tipo Lefranc (S6 – 12).

Le indagini finalizzate allo studio della possibile presenza di cavità hanno visto l'esecuzione di:

- ✓ Rilievo speleologico delle cavità accessibili;
- ✓ 14 Tomografie elettriche per una lunghezza totale degli stendimenti di 1.402,5 m;

Nelle tabelle a seguire una sintesi sulle indagini. La documentazione completa è contenuta nell'elaborato specifico.

ID	Tipologia carotaggio	Lunghezza (m)	N. prove SPT	Profondità SPT (m)	Campioni terre indisturbati	Profondità (m)	Campioni lapidei	Profondità (m)	Prova di permeabilità (Lugeon/Lefrac)	Prova dilatometrica
S1 - 12	continuo	30	-	-	3	10,5/15,5/25,2	-	-	-	-
S1bis - 12	continuo	25	2	10,2/15,2	2	13/24,5	-	-	-	-
S2 - 12	continuo	9	-	-	-	-	1	5,3	-	-
S3 - 12	continuo	15	-	-	-	-	1	13	-	-
S4 - 12	continuo	10	-	-	-	-	2	4,5/8,3	LU (6+8 m)	-
S5 - 12	continuo	10	-	-	-	-	1	3,7	-	DL1 (4m); DL2 (9,5 m)
S6 - 12	continuo	10	-	-	-	-	1	9,8	LE (3+8 m)	-
S7 - 12T	continuo	15	-	-	-	-	-	-	-	-
S8 - 12T	continuo	15	-	-	-	-	-	-	-	-
S9 - 12T	continuo	15	-	-	-	-	-	-	-	-
S10 - 12T	continuo	15	-	-	-	-	-	-	-	-
S11 - 12T	continuo	10	-	-	-	-	-	-	-	-
ST01	distruzione	11	-	-	-	-	-	-	-	-
ST05	distruzione	10	-	-	-	-	-	-	-	-
ST08	distruzione	6	-	-	-	-	-	-	-	-
ST09A	distruzione	15	-	-	-	-	-	-	-	-
ST09B	distruzione	10	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.3 – Tabella sinottica dei sondaggi, delle prove eseguite in foro e del prelievo di campioni (di terre e lapidei) per le indagini di laboratorio.

ID sondaggio	S1 - 12	S1 - 12	S1 - 12	S1bis - 12	S1bis - 12	S2 - 12	S3 - 12	S4 - 12	S4 - 12	S5 - 12	S6 - 12
Campione	Cl1	Cl2	Cl3	Cl1	Cl2	Cl1	Cl1	Cl1	Cl2	Cl1	Cl1
Profondità (m)	10,5	15,5	25,2	13,0	24,5	5,3	13,0	4,5	8,3	3,7	9,8
Caratteristiche fisiche	X	X	X	X	X						
Analisi granulometrica	X	X	X	X	X						
Classificazione A.G.I. (1977)	Limo con argilla, sabbioso	Argilla con limo, debolmente sabbiosa	Argilla con limo	Argilla con limo, debolmente sabbiosa	Argilla con limo						
Limiti di Atterberg [ASTM D 4318]					X						
Prova triassiale UU [ASTM D 2850]	X		X		X						
Prova di compressione su roccia D.L.						X	X	X	X	X	X

Tab. 3.4 - Tabella sinottica delle prove di laboratorio su campioni (di terre e lapidei) prelevati nei fori di sondaggio.

ID area di indagini GEORADAR	n. profili geoelettrici	Tomografia elettrica	Lunghezza (m)	Montaggio stendimenti
AREA 3	6	T1	127,5	Roll-along
		T4	94,0	
		T5	117,5	Roll-along
		T2	94,0	
		T3	94,0	
		T7	94,0	no
AREA 4	1	T6	117,5	no
AREA 5	1	T8	141,0	no
AREA 7	1	T9	141,0	no
AREA 13bis	5	T10	94,0	no
		T11	72,0	Elaborazione sezioni pseudo
		T12	72,0	
		T13	72,0	3D
		T14	72,0	no

Tab. 3.5 - Tabella sinottica delle indagini elettriche tomografiche realizzate, per il Progetto Definitivo, nelle diverse aree già investigate con il Georadar nel Progetto Preliminare.

3.3 LA CAMPAGNA INDAGINI DEL 2021

Nel 2021, la Direzione Progettazione e Realizzazione Lavori di Anas ha deciso di sviluppare internamente il Progetto Definitivo, nominando un Gruppo di progettazione costituito da vari Specialisti.

E' stata pertanto progettata ed eseguita una campagna di indagini molto articolata, che ha consentito di approfondire molteplici aspetti riguardanti varie Discipline, riguardanti la Geologia, idrogeologia e Geotecnica del tracciato, la presenza di cavità, il comportamento idrogeologico delle calcareniti, l'archeologia, il riutilizzo dei materiali di scarto presenti lungo il tracciato provenienti dalle cave di calcarenite, gli aspetti ambientali inerenti la vulnerabilità idrogeologica dell'area.

Sono state eseguite due specifiche campagne di geofisica, riguardanti rispettivamente la modellazione geologica e geotecnica dei terreni, il comportamento in fase dinamica dei terreni e l'approfondimento della ricerca di cavità di origine antropica.

La ricerca di cavità mediante tomografia elettrica, elemento chiave di questa fase di indagine, è stata preceduta da un rilievo particolarmente sofisticato, eseguito con drone Anas, eseguito come di seguito descritto.

Al fine di poter generare, per ogni area di intervento, un'ortofoto digitale a colori di tipo "A2" (ortofoto di precisione) sono stati eseguiti 2 voli tramite UAS (Unmanned Aircraft System), attuando le seguenti fasi, di seguito elencate:

1. Individuazione del sito e verifica delle eventuali restrizioni indicate dall'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile; Accertato che all'interno della zona geografica di interesse sono permesse operazioni UAS della categoria specifica o certificata, secondo quanto riportato nella circolare ATM-09, paragrafi 7,8 e 9, si è proceduto alla programmazione in sicurezza delle attività.
2. Programmazione del volo, con individuazione delle posizioni di decollo ed atterraggio e posizionamento della stazione GPS per la trasmissione dei dati RTK al velivolo;

La programmazione dei voli è stata effettuata utilizzando specifico software, il quale, utilizzando i seguenti parametri:

- ✓ Caratteristiche delle fotocamera (Sensore fotogrammetrico DJI P1)
 - Dimensioni del sensore (fotografie): 35,9×24 mm (Full-frame)
 - Pixel effettivi: 45 MP
 - Dimensione pixel: 4,4 µm
 - Obiettivo 35 mm
- ✓ Quota di volo
- ✓ Velocità di volo
- ✓ Coordinate dei waypoints

Permette di gestire tutte le fasi di acquisizione delle immagini, secondo le specifiche indicate in fase di progettazione.

3. Esecuzione del volo aerofotogrammetrico

Il volo è stato effettuato tramite il velivolo DJI Matrice 300 RTK, avente le seguenti caratteristiche principali:

- ✓ Quadricottero con interasse diagonale 895 mm
- ✓ Peso massimo al decollo 9 Kg ca.
- ✓ Accuratezza del volo +/- 0.1 m
- ✓ Accuratezza di posizionamento 1 cm + 1 ppm
- ✓ Autonomia di volo 55 minuti

4. Scarico ed elaborazione dei dati secondo le fasi di seguito brevemente elencate:

- ✓ Verifica congruenza radiometrica fotogrammi
- ✓ Verifica traiettoria e calcoli di posizionamento

- ✓ Gestione punti di controllo a terra
- ✓ Elaborazione DDSM
- ✓ Elaborazione ortofoto

In riferimento ai sistemi di riferimento e coordinate, per la produzione dei modelli altimetrici e delle ortofoto sono stati utilizzati i seguenti riferimenti:

- ✓ il sistema geodetico (datum) ETRS89 nella sua realizzazione ETRF2000 (epoca 2008.0) materializzato dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN) (coordinate geodetiche Latitudine, Longitudine, Altezza ellissoidica riferite all'Ellissoide WGS84);
- ✓ il geoide come superficie di riferimento delle quote (ortometriche);
- ✓ la rappresentazione cartografica conforme UTM (coordinate cartografiche Est, Nord UTMWGS84ETRF2000).

Il legame tra quote ellissoidiche e quote ortometriche è stato definito dal modello di geoide (ITALGEO) più recente (attualmente ITALGEO2005), messo a disposizione dall'Istituto Geografico Militare.

Il DDSM, paragonabile al livello 9 delle linee guida del Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali, ha un passo di griglia di 0.024 m

Le ortofoto a colori, per un'estesa totale di circa 180 Ha, sono state elaborate utilizzando circa 2000 fotogrammi per ogni area di interesse, determinando un valore di GSD di 0.012 m

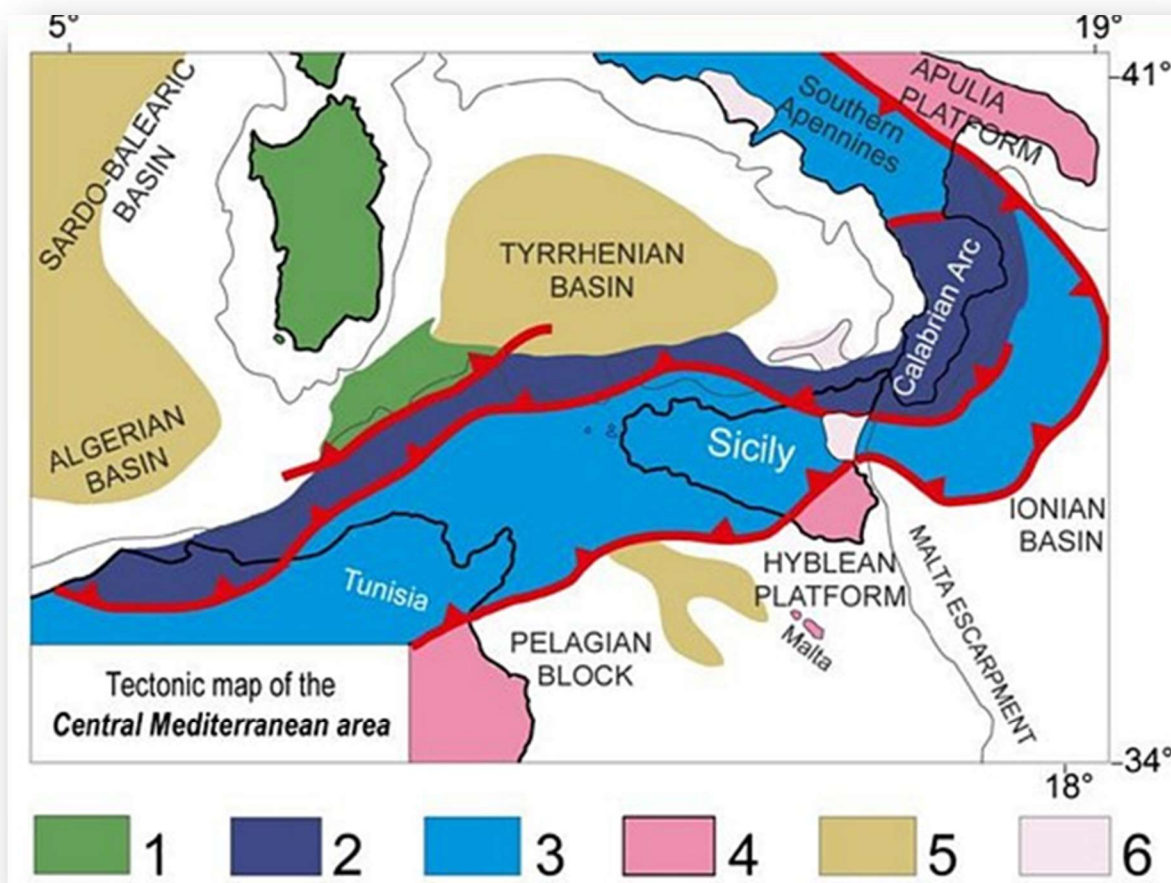
I vari documenti derivanti da questa campagna sono contenuti nei fascicoli della "Documentazione indagini 2021 – Vol. 1 e 2".

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

In questo capitolo verrà esposta sia una breve sintesi del contesto geologico-strutturale ad ampia scala, finalizzata alla lettura delle condizioni locali, sia una trattazione di dettaglio sulle litologie riscontrate nell'area di studio ed i loro rapporti stratigrafici.

4.1 SCHEMA GEOLOGICO GENERALE

La Sicilia occupa un settore del Mediterraneo centro-occidentale ed è un segmento del sistema alpino che si sviluppa lungo il limite di placca Africa-Europa. Questo segmento di catena collega le Maghrebidi africane con l'Ap-



pennino meridionale, attraverso il cuneo di accrezione della Calabria (Fig. 4.1).

Fig. 4.1 – Schema tettonico del Mediterraneo centrale 1) Corsica-Sardegna; 2) Arco Kabilo-Peloritano-Calabro; 3) Unità Appenninico-Maghrebidi e dell'avampaese deformato; 4) avampaese ed avampaese poco deformato; 5) aree in estensione; 6) vulcaniti plio-quadernarie.

Recenti indagini (Catalano et al., 1998 a, b; 2000 a, b) indicano che la catena siciliana (con l'esclusione dell'elemento calabro-peloritano) è caratterizzata da occidente ad oriente dalla sovrapposizione di corpi pellicolari derivanti dalla deformazione di originari domini meso-cenozoici di mare profondo (Sicilide, Imerese e Sicano) e delle loro coperture neogeniche, su un cuneo, spesso 8-9 km, di unità tettoniche derivanti dalla deformazione dell'originario dominio di piattaforma carbonatica. Il cuneo tettonico, così formato, poggia a sua volta sull'avampaese non deformato che affiora nel Plateau Ibleo e continua nel Canale di Sicilia (avampaese ibleo-pelagiano).

Facendo specifico riferimento alla Sicilia occidentale, l'edificio tettonico mostra, dal basso:

- ✓ un cuneo spesso 7-8 km di scaglie di piattaforma carbonatica mesocenozoica (Unità Panormidi, Trapanese-Saccensi);
- ✓ un complesso spesso da 1 a 3 km di rocce carbonatiche e clastiche di bacino del Giurassico sup.- Miocene medio (Unità PrePanormidi), che sovrascorrono le Unità Trapanesi;
- ✓ successioni del Tortoniano sup.-Pleistocene medio che riempiono bacini sintettonici.

La ricostruzione dei movimenti reciproci tra mare e terre emerse, ricavata anche dallo studio delle successioni sedimentarie plio-pleistoceniche, mostra che la Sicilia occidentale doveva essere totalmente sommersa a partire dal Pliocene inferiore, come testimoniato dalla sedimentazione dei trubi. Alla fine del Pliocene inferiore, il passaggio a sedimenti sabbiosi o ad intercalazioni di sedimenti franati negli stessi trubi è indice del sollevamento e dell'emersione di vaste aree, a causa di una fase tettonica compressiva indicata con il termine "*Orogenesi medio-pliocenica*", messa in evidenza dalla deformazione che subiscono i depositi a partire da quelli del Pliocene inferiore e più antichi. A questa fase in Sicilia sud-occidentale segue un periodo di quiete orogenica che dura fino all'inizio del Pleistocene inferiore, testimoniata dalla presenza della Formazione Marnoso-arenacea della valle del Belice, mentre nella Sicilia nord-occidentale la mancanza delle successioni nell'intervallo di tempo tra il Pliocene superiore e il Pleistocene inferiore suggerisce che, probabilmente, in quel periodo quell'area sia stata soggetta ad una più intensa erosione a causa di intense attività tettoniche.

Nel Selinuntiano medio la quiete orogenica termina ed inizia una lenta regressione cui segue un collasso, un'ampia invasione marina, e infine una deposizione di sedimenti (*Calcarenite di Marsala*) inizialmente di mare basso ma successivamente di ambiente più profondo. Successivamente, soprattutto nella Sicilia sud-occidentale, si verifica una nuova fase tettonica seguita da una lunga fase di quiete caratterizzata da un processo di peneplanazione della fascia costiera (*Regressione Romana*). A partire dal Crotoniano il livello del mare comincia a subire oscillazioni rapide e di notevole ampiezza, legate a fasi di espansione o di ritiro delle calotte glaciali (movimenti eustatici legati alle glaciazioni), ma anche a movimenti di sollevamento del suolo, testimoniati dalla presenza di depositi terrazzati a quote elevate (fino a 500 m) (Cosentino et al., 2008).

Dal punto di vista stratigrafico le sequenze dei terreni affioranti nella zona indagata sono rappresentate da rocce essenzialmente carbonatiche e, a partire dall'Oligocene inferiore, da depositi prevalentemente terrigeni. In discordanza su tali terreni, si sovrappone una formazione calcarenitica nota come "*Calcarenite di Marsala*" (Ruggieri e Unti, 1974). Questa formazione, costituita inferiormente da depositi di mare basso e superiormente talora da sedimenti di facies circa-litorale (D'Angelo et al., 1980), è deposta secondo una monoclinale inclinata di almeno 10° ed immersa verso SW, in relazione alla linea di costa del Siciliano. La "*Calcarenite di Marsala*" è costituita da clasti prevalentemente calcarei monometrici, di colore che va dal bianco al giallo al rossiccio, con scarsa presenza di fossili, intercalati da lenti sabbioso-argillose. La parte superiore, generalmente più compatta e ben cementata, viene ancora oggi cavata per la produzione di conci da costruzione.

La sedimentazione della Calcarenite di Marsala termina, alla fine del Pleistocene inferiore, a causa di una generale emersione che prelude alla "Regressione Romana". L'analisi delle strutture tettoniche presenti nella Sicilia Nord-occidentale mette in risalto una fase tettonica più antica che coinvolge i depositi miocenico pliocenici e ed una successiva fase che interessa anche i depositi quaternari. I sistemi di pieghe più evidenti assumono un orientamento prevalentemente NE-SW e, verso nord tendono a disporsi in direzione E - W. I depositi quaternari assumono invece una giacitura generalmente sub-orizzontale, dovuta essenzialmente alle fasi tettoniche post-siciliane, che causano un generale sollevamento dell'area (Cosentino et al., 2008).

La Fig. 4.2 rappresenta la più dettagliata cartografia tematica geologica dell'area in esame: *Carta Geologica del Foglio 617 "Marsala"*, in scala 1:50.000 (D'Angelo & Vernuccio, 1994). Questi autori distinguono ben otto ordini di terrazzi che si rinvencono a diverse altezze topografiche fino a quote prossime a quelle del livello del mare, la cui formazione è legata ad un sostanziale abbassamento del livello marino a partire dal tardo Pleistocene.

In dettaglio, gli autori di questa carta, concordemente con quanto riportato nella altre cartografie e in gran parte della letteratura specifica, individuano un numero limitato di formazioni geologiche, come quelle caratterizzanti, sia in superficie che in profondità, la piana tra Marsala e Mazara del Vallo, sede del tracciato stradale in progetto.

Le formazioni geologiche individuate sono, dalla più antica alla più recente:

- ✓ *TRUBI* – Alternanza di calcari teneri e marne calcaree a globigerine. (*Pliocene Inferiore*);
- ✓ *FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA DELLA VALLE DEL BELICE* – Depositi terrigeni pelitico-arenacei in strati di spessore decimetrico, nei quali si riscontrano, talora, intercalazioni torbiditiche e slumpings. La fauna è caratterizzata dalla presenza di foraminiferi e ostracodi. (*Pliocene Superiore*);
- ✓ *FORMAZIONE MONTE NARBONE* – argille e marne sabbiose, di colore giallastro, con brachiopodi, lamelli-branchi e foraminiferi planctonici (*Pliocene Superiore – Pleistocene inferiore*);
- ✓ *CALCARENITE DI MARSALA* – Sintema di Marsala, Calcareniti bioclastiche a stratificazione incrociata, inferiormente tenere, giallastre, con lenti sabbioso argillose, superiormente più compatte, a luoghi fossilifere (la

fauna è caratterizzata dalla presenza di anellidi e lamellibranchi). Generalmente di colore giallo chiaro, con rari livelli argilloso-sabbiosi di spessore decimetrico. (*Pleistocene Inferiore – Emiliano – Siciliano*);

- ✓ GRANDE TERRAZZO SUPERIORE (G.T.S.) – Depositi terrazzati costituiti da calcareniti di spessore relativamente esiguo (non più di un paio di metri), evolventi verso l'alto ad un conglomerato poligenico durissimo la cui potenza non supera il metro. La calcarenite costituisce una superficie orizzontale o debolmente inclinata verso mare, ed è compresa tra le quote 127 m di Ciavolo ed i 169 m di Case Chiuppu. (*Pleistocene Superiore – Crotoniano?*);
- ✓ DEPOSITI MARINI TERRAZZATI – Depositi terrazzati di quota compresa tra 0 e 35 m, con superfici riconducibili a due principali ordini di terrazzi marini, costituiti da calcareniti di colore giallo, di spessore decimetrico, ricchi di faune banali (gasteropodi, lamellibranchi, briozoi). (*Tirreniano*);
- ✓ ALLUVIONI RECENTI – Depositi di fondovalle e terrazzi alluvionali in evoluzione. (*Olocene*);
- ✓ DEPOSITI ELUVIALI E COLLUVIALI – (*OLOCENE*);

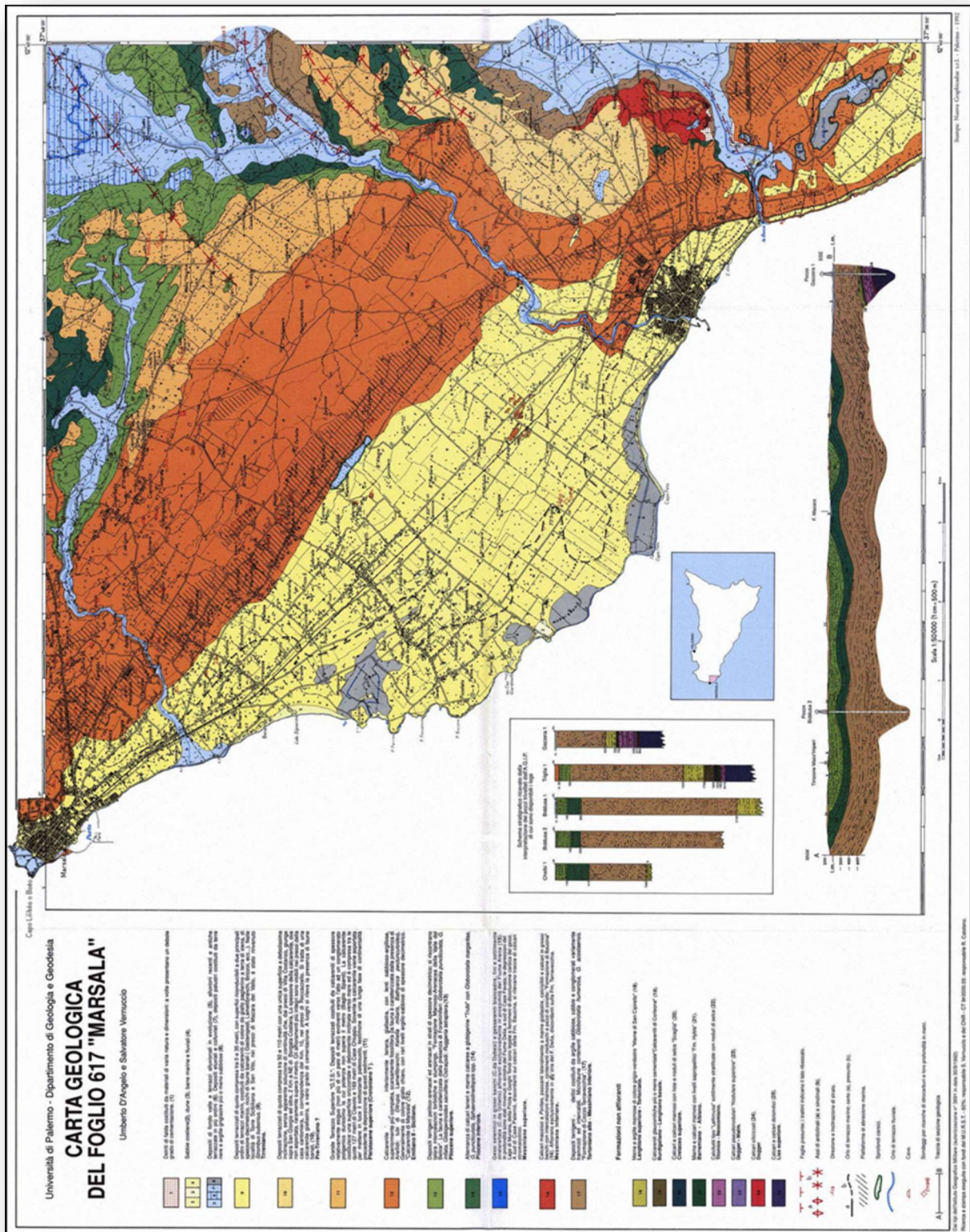


Fig. 4.2 – Carta Geologica del Foglio 617 “Marsala” (D’Angelo & Vernuccio, 1994).

L'area interessata più direttamente dall'opera in oggetto, è caratterizzata dalla presenza, quasi esclusiva, della Calcarenite di Marsala, che poggia in discordanza sulla Formazione di Monte Narbone, sulla Formazione marnoso-arenacea della Valle del Belice e sui Trubi, aventi spessori notevoli (superiori spesso ai 500 m e fino a 1.500 m).

Si tratta, come già sinteticamente descritto, di depositi di colmamento di una depressione tettonica di vaste dimensioni che interessa la struttura geologica profonda caratteristica di tutta l'area Trapanese.

4.2 GEOLOGIA DI DETTAGLIO

In questo paragrafo verranno descritte le evidenze di campo scaturite del rilievo in sito unitamente ai dati riscontrati dalle indagini dirette ed indirette delle campagne eseguite nel 2003, nel 2012 e nel 2021 nonché, discussi gli aspetti geologici di dettaglio per l'analisi delle criticità interferenti con le opere in progetto.

L'intera area d'interesse, eccezion fatta per i primi 700 metri circa del tracciato e dei terreni alluvionali del Fiume Sossio, è caratterizzata dalla presenza della formazione denominata "Calcarenite di Marsala", di età pleistocenica, diffusamente affiorante su tutto il territorio e recentemente inserita nel SINTEMA DI MARSALA (foglio 605, PACECO).

Nell'area di studio la *Calcarenite di Marsala* è costituita principalmente da una calcarenite organogena di colore avana, a granulometria variabile, prevalentemente grossolana, contraddistinta da una spiccata eterogeneità litologica.

In tutti i sondaggi che hanno attraversato la formazione, dalla progressiva 0+700 circa, in corrispondenza della rotatoria "Marsala Sud", e fino al termine dell'intervento, alla progressiva 16+670, è stato infatti possibile riscontrare una significativa variabilità, soprattutto verticale, dei caratteri tessiturali e del grado di cementazione nonché delle caratteristiche meccaniche.

Sebbene la variabilità litologica e geomeccanica di tali caratteristiche risulti piuttosto articolata, dall'analisi delle stratigrafie ed il confronto con quanto osservato sugli ampi affioramenti in corrispondenza dei versanti del Fiume Sossio e lungo i numerosi fronti di cava è stato possibile identificare due facies principali. La facies **CA1**, *ubicata a tetto e a letto*, e la facies **CA2**, ubicata nella porzione centrale della formazione, come sintetizzato nel modello geologico di riferimento.

La fase di indagini 2021 ha confermato la variabilità litologica e geomeccanica su tutto il tracciato in entrambe le facies, rendendone spesso difficile l'attribuzione, durante l'analisi dei dati stratigrafici.

La facies denominata **CA1** è costituita da una calcarenite bioclastica di colore giallo-avana, con una granulometria da grossolana a fine, scarsamente fossilifera, ben cementata, dall'aspetto litoide e con ottime caratteristiche geomeccaniche. I sondaggi hanno evidenziato un alto valore dell'Indice RQD (*Rock Quality Designation Index*), che si attesta

in media tra il 70- 80% e molto spesso è pari al 100%, testimoniando l'assenza di superfici di discontinuità sia primarie, dovute a piani di stratificazione, sia secondarie, fratturazione dovuta a tettonica od altri fattori.

La facies denominata **CA2** è costituita da una calcarenite organogena debolmente cementata, di colore giallastro, a luoghi fossilifera, frequentemente costituita da sabbie ben addensate o scarsamente cementate. Presenta una stratificazione spesso ben marcata, con strati generalmente decimetrici e banchi superiori al metro. Alcuni strati sono caratterizzati da sabbie fini. Questa facies è molto ricca di malacofauna, con riconoscibili ostracodi, echinidi e bivalvi. I valori di RQD difficilmente raggiungono il 20%, risultando spesso pari a zero. In due sondaggi 2012, S3-12 ed S9-12T rispettivamente tra 10,9 e 11,7 e tra 8,8 e 9,8 metri di profondità, sono stati inoltre rinvenuti dei livelli limoso-argillosi con debole presenza di sabbia, di color grigio-avana, debolmente plastici e generalmente ubicati nella parte inferiore della facies CA2 (**b**).

La differenza, anche in termini geotecnici tra le due facies, CA1 e CA2, generalmente, ma non sempre, è ben rappresentata dai risultati delle prove S.P.T., che vanno a rifiuto nella parte più cementata, mentre presentano valori modesti negli intervalli più sabbiosi.

Nei primi 700 metri di tracciato, dunque, in accordo con quanto emerso dal rilevamento geologico, i sondaggi S20 (pk 0+200) e S21 (pk 0+600) del 2003, profondi 20 metri, hanno infatti riscontrato la presenza, fino alle profondità rispettivamente di 10 e 12 metri circa, di sabbie giallastre Pleistoceniche, da poco a mediamente addensate, costituite da elementi biocalcarenitici granulometricamente piuttosto omogenei, con intercalati livelli debolmente cementati di spessore centimetrico. Queste sabbie, ascrivibili presumibilmente alla Formazione di Monte Narbone ed in contatto erosivo con le calcareniti affioranti poco più a sud, poggiano in discordanza su terreni sabbioso-limosi, del Pliocene superiore e progressivamente più plastici con la profondità, riferibili alla "Formazione Marnoso Arenacea della Valle del Belice" (Ruggeri & Torre, 1973), i cui affioramenti in superficie si rinvencono in un'area più a nord rispetto a quella in questa sede investigata.

La Formazione Pliocenica del Belice è stata individuata anche nei sondaggi S1 e S1 bis, eseguiti nel 2012 in corrispondenza del fondovalle del fiume Sossio, ad una profondità, rispettivamente, di 12,40 e 14,90 metri dal piano campagna. La presenza di questi terreni a quote assolute s.l.m. inferiori a quelle riscontrate nel tratto iniziale del tracciato, testimonia un il graduale approfondimento del tetto della formazione argilloso-sabbiosa, i cui termini, effettivamente, non vengono più incontrati in alcun sondaggio.

I sondaggi S1 e S1 bis, che hanno attraversato la formazione pliocenica per una lunghezza maggiore rispetto a quelli del 2003, hanno permesso, inoltre, di differenziare questi materiali in due facies. La parte superiore, in accordo con quanto emerso nei sondaggi S20 e S21, è costituita da sabbie medio fini, limose, debolmente cementate, passanti

a livelli di argille con limo, debolmente sabbiose, contenenti frammenti conchigliari. La parte inferiore, invece, è caratterizzata da argille limose contenenti inclusi carboniosi nerastri millimetrici.

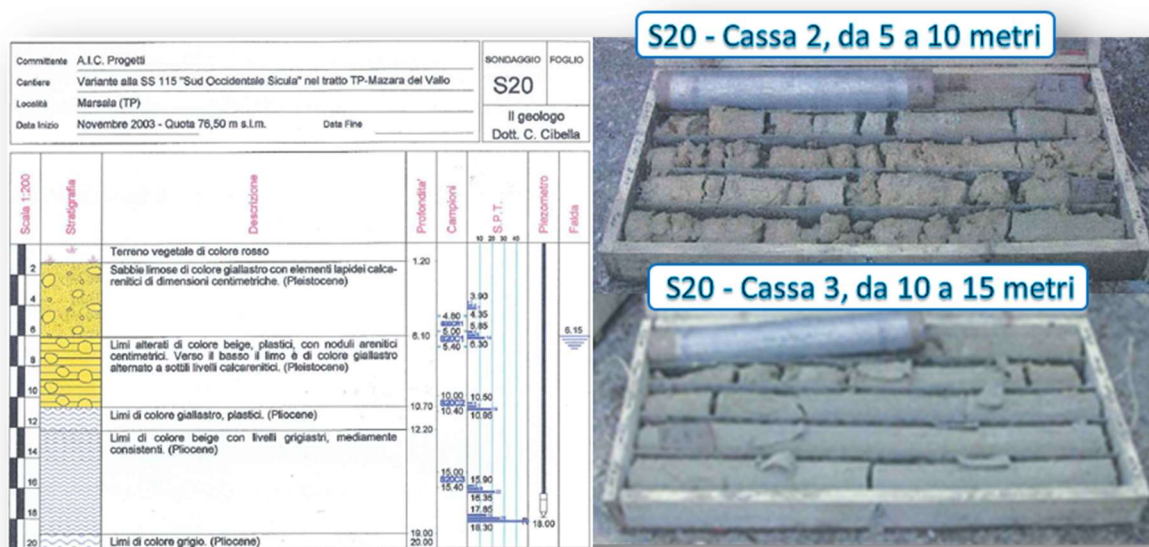


Fig. 4.3 – Sondaggio S20 del 2003. Stratigrafia; cassa 2, da 5 a 10 metri, in cui sono presenti le sabbie; cassa3, da 10 a 15 metri, in cui sono presenti le argille sabbiose grigie.

Dalla progressiva 0+700 circa fino a fine tracciato, la formazione calcarenitica affiora estesamente a piano campagna per lunghi tratti, mentre in corrispondenza dei campi coltivati, è presente uno strato di suolo vegetale il cui spessore, come esposto in dettaglio nel paragrafo relativo alle bonifiche, risulta essere, mediamente, di almeno un metro. Lo strato calcarenitico superficiale è rappresentato generalmente dalla facies CA1, la quale, ove non sia stata interessata da attività estrattiva, si presenta di colore grigiastro, molto dura e compatta, difficilmente scalfibile anche tramite il martello. In alcuni tratti, la campagna 2021 ha evidenziato la presenza in affioramento della facies CA2.

Data la peculiarità, anche naturalistica, di questo territorio, caratterizzato dalla presenza di comunità microfittiche di gariga a *Thymus Capitatus*, meglio nota come *Palma nana*, è stato istituito un Sito di Interesse Comunitario (SIC) della Rete Natura 2000, denominato "Sciare di Marsala" (cod. ITA010014) avente un'estensione areale, complessivamente pari a circa 4.500 ha. Il nome deriva da "sciara", termine di origine araba che sta ad indicare un paesaggio "arido e desolato", è riportata in Fig. 4.4. Il tracciato attraversa per brevi tratti quest'area.

Ad interrompere la monotonia del paesaggio calcarenitico è l'incisione del fiume Sossio, che nel settore interessato dal tracciato, è rappresentata da un'ampia valle di circa 60-70 metri di larghezza, incastonata nei depositi calcarenitici. Presenta un fondovalle completamente pianeggiante e versanti morfologicamente differenti.



Fig. 4.4 – In rosso è perimetrata l'area in cui è stato istituito il SIC delle "Sciare di Marsala" (ITA010014). Il tracciato attraversa quest'area per brevi tratti.

Il versante in destra idrografica (Figg. 4.5 e 4.6) risulta essere poco acclive ed il substrato calcarenitico è ben esposto, soprattutto in corrispondenza di piccole scarpate, sia naturali che antropiche. Diffusa è la presenza di depositi eluvio-colluviali, tipicamente sfruttati ad uso agricolo.



Fig. 4.5– Panoramica della valle del fiume Sossio. Foto scattata spalle alla foce.



Fig. 4.6 – Versante in destra idrografica del Fiume Sossio.

E' presente, inoltre, un piccolo invaso artificiale (Fig. 4.7) alimentato dalla falda freatica di base, completamente scavato nelle calcareniti, ed utilizzato a scopi irrigui. Lungo le pareti di questo piccolo bacino è possibile apprezzare il passaggio tra le due facies calcarenitiche e la loro stratificazione, con piani generalmente immergenti verso mare.



Fig. 4.7 – Versante in destra idrografica del Fiume Sossio: piccolo invaso nei termini calcarenitici, sulle cui pareti è possibile apprezzare la stratificazione immergente verso l'attuale linea di costa.

Il versante in sinistra idrografica presenta una morfologia molto acclive ed è caratterizzato da un'estesa scarpata verticale, priva di vegetazione, che ha consentito, anche su questo lato della valle, di osservare e rilevare il contatto tra la facies calcarenitica più competente a tetto e la facies meno competente in basso (Fig. 4.8).

Le quote del limite intraformazionale CA1-CA2 rilevate sui due versanti sono concordi tra loro, così come l'inclinazione della stratificazione verso mare, che risulta essere pari a 240/10 (dip direction/dip).

Si evidenzia in ultimo, la presenza di un detrito di frana, costituito essenzialmente da blocchi e ciottoli di natura calcarenitica, immersi in matrice sabbioso-limoso. A tergo di tale detrito, l'ammasso presenta segni di lieve detensio-namento, con una morfologia a gradini (Fig. 4.9).



Fig. 4.8 – Versante in sinistra idrografica del Fiume Sossio: parete verticale in calcareniti. Netamente riconoscibile il contatto stratigrafico tra la sovrastante facies molto competente, con aspetto litoide, e la sottostante facies, più sabbiosa, debolmente cementata, di colore giallastro e con presenza di fossili (foto D). Archivio 2012



Fig. 4.9 – Versante in sinistra idrografica del Fiume Sossio: evidenziato in rosso, presenza di detrito di frana, con un blocchi calcarenitici immersi in matrice prevalentemente sabbiosa. Immediatamente a tergo di tale detrito, l'ammasso si presenta detensionato, con una morfologia a gradini.

Nel fondovalle del fiume Sossio sono stati eseguiti i già citati sondaggi S1ed S1bis del 2012 aventi una lunghezza, rispettivamente, di 30 e 25 metri. Nel 2021 sono state eseguite indagini sismiche per integrare la modellazione geologica e, considerato il contesto morfologico, valutare l'esigenza di una analisi dinamica 2D.

Realizzati all'interno dei depositi alluvionali del Fiume Sossio, le perforazioni non hanno mai intercettato i termini riferibili al complesso calcarenitico di Marsala. Da piano campagna e fino ad una profondità variabile da 12 a circa 15 metri, sono stati, infatti, attraversati terreni di natura argilloso-limosa a luoghi sabbiosi, la cui deposizione è attribuibile agli alluvionamenti del Fiume Sossio. I depositi alluvionali poggiano con contatto erosivo sui terreni argilloso-sabbiosi ascrivibili alla formazione "Formazione Marnoso Arenacea della Valle del Belice", di cui si è parlato in precedenza. Nel sondaggio S1, al passaggio tra le alluvioni ed i depositi della formazione pliocenica, è stato, inoltre, attraversato un deposito di ciottoli calcarenitici color avana con resti vegetali, spesso circa 40 cm, presumibilmente riconducibile ad un evento gravitativo durante una delle prime fasi erosive del fiume Sossio

Oltrepassato il Fiume Sossio, il tracciato si sviluppa interamente all'interno del territorio pianeggiante che collega gli abitati di Marsala, a nord, e Mazara del Vallo, a sud. Salvo piccole ondulazioni, esso ha un andamento planimetrico debolmente degradante verso Mazara, passando da circa 50 m s.l.m. a circa 20 m in corrispondenza con la fine del tracciato (rotonda di innesto alla S.S. 115).

Come accennato in precedenza, quest'area, seppure morfologicamente omogenea, può essere suddivisa in due settori in funzione dello sviluppo e dell'utilizzo antropico che ha subito nel corso dei secoli. Il differente sfruttamento del territorio si riflette di conseguenza anche sulla tipologia delle problematiche e delle criticità geologiche che caratterizzano le due aree.

In entrambe la Formazione geologica della Calcarenite di Marsala costituisce il substrato, spesso affiorante.

Il primo settore, corrisponde al comune di Marsala, ed è caratterizzato dalla presenza di numerose aree di cava. La calcarenite di Marsala, storicamente utilizzata come materiale da costruzione, è stata oggetto sin dall'antichità di una intensa attività estrattiva che ad oggi si esplica con la presenza di numerose cave a cielo aperto sia attive sia abbandonate, nonché da numerosi accumuli di materiale di risulta delle cave stesse (Figg. 4.10, 4.11, 4.12, 4.13).

Dislocati in diversi punti dell'area di intervento, molto spesso questi cumuli si ritrovano ai bordi delle cave abbandonate o nelle zone più prossime ad esse e solo in pochissimi casi superano l'altezza media che si aggira intorno ai 2-3 metri circa da piano campagna.

Come evidenziato nel Planoprofilo Geologico, elaborati da T00GE00GEOPL01 a T00GE00GEOPL11, alcuni di questi cumuli verranno intercettati dal tracciato e verranno dapprima asportati, per consentire la realizzazione dell'opera, e successivamente riutilizzati all'interno dello stesso cantiere in quanto il materiale, adeguatamente miscelato e costipato, risulta avere buone caratteristiche geotecniche.

Per i dettagli sul riutilizzo del materiale di risulta si rimanda al PUT, elaborato T00GE01GEORE01A.

Nel corso degli ultimi anni, alcune delle vecchie cave in disuso sono state riempite, interamente o parzialmente, con materiali di varia natura per essere fruttate a fini vivaistici o agricoli, risultando spesso poco riconoscibili in sito (Fig. 4.13).



Fig. 5.10 – Cave di calcarenite attualmente coltivate. I volumi sono spesso impressionanti e rappresentano una particolarità dell'area.



Fig. 5.11 – Cave di calcarenite abbandonate e spesso adibite a discariche abusive. Il tracciato ne sfiora una, che dovrà essere ritombata.



Fig. 5.12 – Cumuli dei materiali di scarto delle lavorazioni provenienti dalle cave di calcarenite, e dislocati in diversi punti al di sopra del piano campagna naturale. Archivio 2012 (A. Montana, V. Passarella, F. Capozucca)



Fig. 4.13 – Cava di calcarenite quasi interamente ritombata e adibita a campo coltivato.

L'estrazione della Calcarenite però, non è sempre avvenuta a cielo aperto. Anticamente l'attività di avanzamento e di estrazione dei "conci di tufo" veniva eseguita in sotterraneo, attraverso lo scavo di numerosi cunicoli. Questi venivano realizzati a profondità variabili tra i 3 ed i 10 m dal piano campagna in funzione delle caratteristiche di consistenza della calcarenite (minore o maggiore qualità e facilità di estrazione), e sebbene avessero delle geometrie

piuttosto regolari, con angoli perfettamente a 90°, seguivano uno sviluppo in pianta piuttosto articolato.

La presenza di possibili cavità interferenti con l'intervento in oggetto ha dunque rappresentato, sin dallo studio preliminare del 2003, un'importante criticità, che ha fortemente condizionato la scelta del tracciato nonché lo studio geologico e le metodologie d'indagine.

Nel 2003, per valutare la presenza di possibili cavità di origine antropica interferenti con il tracciato, è stata effettuata una campagna di indagini georadar su 13 aree identificate come a rischio, la quale ha evidenziato alcune zone anomale, potenzialmente ascrivibili a cavità di origine antropica. Nelle aree in cui è stata riscontrata l'anomalia, sono stati successivamente eseguiti dei sondaggi a distruzione di nucleo per verificare l'effettiva presenza o meno di cavità. Nessun sondaggio ha rilevato l'esistenza di cavità.

Nel 2012, a seguito della localizzazione di alcuni ingressi di cunicoli e camini di areazione di vecchie cave, orientati verso il tracciato di progetto, si è deciso dapprima di effettuare una campagna geoelettrica per valutare possibili indizi di interferenze, e successivamente di eseguire uno studio speleologico per confutarne la reale presenza. Sia lo studio geoelettrico che l'indagine speleologica non hanno individuato alcuna cavità interferente con l'opera.

La sintesi degli studi sulle cavità effettuati nel 2003 e nel 2012 è rappresentata nella *"Carta sullo studio delle cavità"*, elaborati TOOGE00GEOCC01-02 A, mentre per i dettagli si rimanda al Capito 6, *Studio sulle Cavità di Origine Antropica*.

Il particolare assetto geomorfologico morfologico di questa porzione di territorio è ben definito anche nel *Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana*. Sebbene infatti, non riporti alcun dissesto nell'area limitrofa al tracciato, esso individua la zona delle cave di calcarenite come *"Sito di Interesse"*. Identificato con la sigla 052-9MA-005, tale area è *"da intendere come un'area per la quale è necessario approfondire gli studi e le indagini puntuali per la verifica e l'esatta perimetrazione di eventuali cavità sotterranee, nel caso si vogliano realizzare interventi di nuova edificazione, infrastrutture, servizi etc., al fine di prevenire il verificarsi di altri cedimenti o sprofondamenti superficiali. Tali siti di attenzione, come riportato nella Relazione Generale allegata ai Piani per l'Assetto Idrogeologico della Sicilia, sono pertanto da intendere come aree dove allo stato attuale non si riscontrano dissesti, ma che potenzialmente, per le loro caratteristiche litologico-strutturali e per le informazioni ad oggi disponibili, possono essere soggette a fenomeni di dissesto. Pertanto sono delle aree che necessitano di ulteriori studi, verifiche ed approfondimenti ed all'interno delle quali, seppure non risultano soggette a condizioni di pericolosità e rischio, qualsiasi intervento di nuova edificazione è subordinato ad approfonditi e dettagliati studi di carattere geologico e tecnico"*.

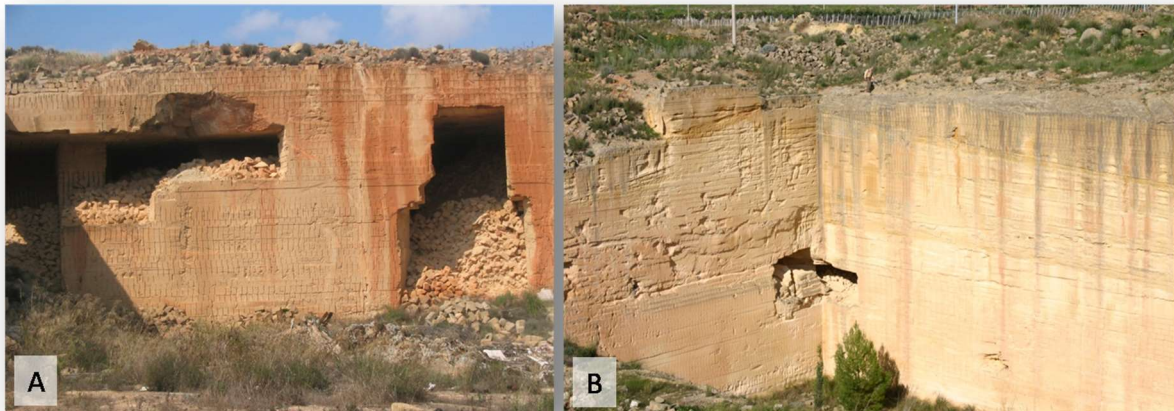


Fig. 5.14 – Ingressi ai cunicoli di cava, dalle pareti verticali delle cave a cielo aperto.

La presenza delle cave a cielo aperto con le loro enormi pareti esposte, in alcuni casi alte anche più di 20 metri, ha rappresentato un'occasione unica per lo studio delle caratteristiche sedimentarie e stratigrafiche del complesso calcarenitico ed il confronto dei dati diretti ed indiretti acquisiti durante le campagne d'indagine.

Come testimoniato dalla documentazione fotografica di seguito riportata, ed in accordo con quanto riscontrato dai sondaggi, la Calcarenite di Marsala presenta una stratificazione pressoché tabulare con un'inclinazione a grande scala verso SW, ovvero verso l'attuale linea di costa, e la giacitura misurata in più siti di 210/15 (dip direction/dip) è coerente con quella misurata in sinistra idrografica del Sossio.

Questa deposizione di tipo monoclinale è strettamente connessa alla posizione della linea di costa del Siciliano e all'ubicazione delle aree di alimentazione di questi depositi terrigeni (D'Angelo & Vernuccio, 1994). Al tetto e al letto della formazione è presente la litofacies CA1, mentre la parte centrale è costituita dalla facies CA2, che spesso è rappresentata da una biocalcarenite a diverso grado di cementazione, con fossili appartenenti a diverse famiglie. E' possibile, inoltre, apprezzare livelli a stratificazione incrociata, che interrompono il trend stratigrafico verso SW e testimoniano particolari fasi deposizionali.



Fig. 4.15 – Pareti di calcarenite con stratificazione monoclinica, immergente verso SW di circa 10° (sinistra) e con stratificazione incrociata all'interno della facies CA2 (destra). Archivio 2012

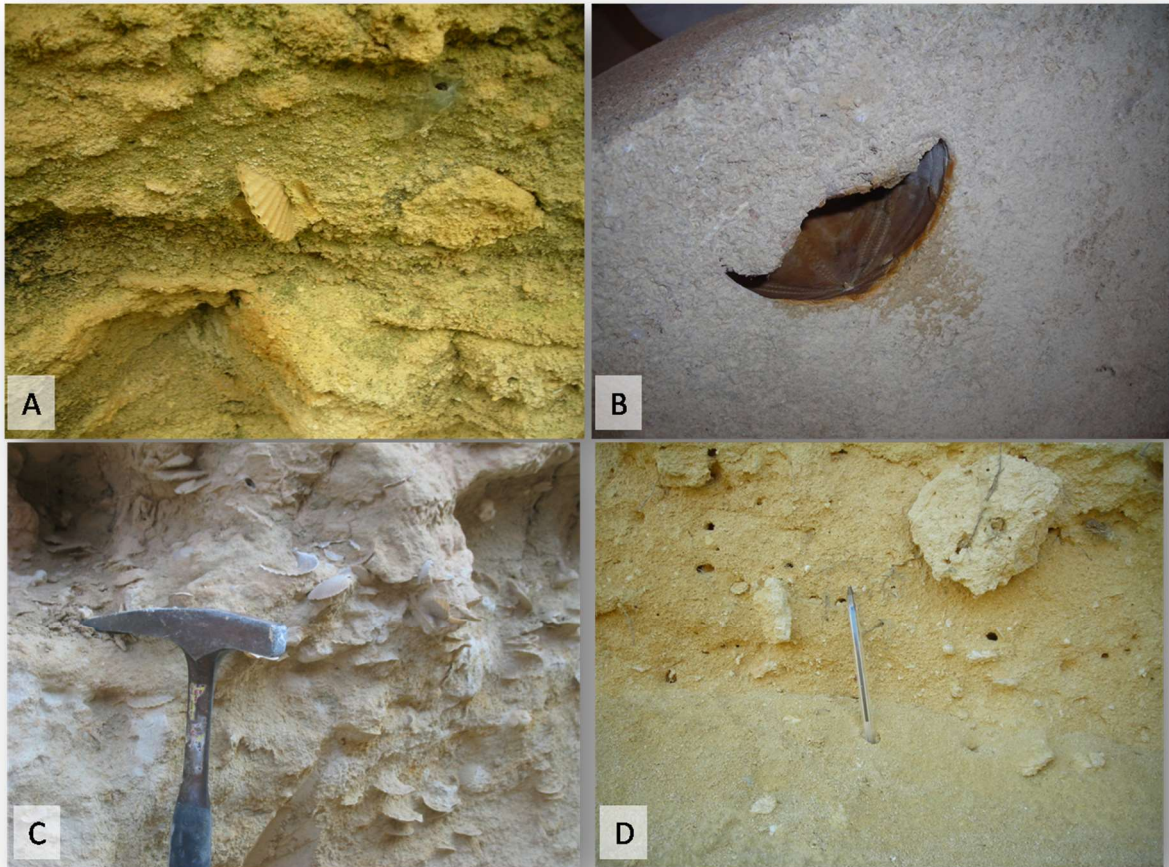


Fig. 4.16 – Particolari di strati di calcarenite, prevalentemente in facies sabbiosa, ricchi in fossili quali bivalvi (A e C) o echinidi (B). Archivio 2012

Il secondo settore, corrispondente ai comuni di Petrosino e Mazara del vallo, è invece caratterizzato da numerose attività agricole che negli anni hanno sfruttato il territorio con coltivazioni di vario genere, dai vigneti agli agrumeti, fino alle serre (Fig. 4.17) La morfologia è completamente pianeggiante, con dislivelli minimi, ovviamente tali da non poter essere sede di alcun movimento gravitativo. L'intensa attività agricola ha portato nel tempo alla formazione di un suolo piuttosto spesso, a luoghi, anche più di un metro.



Fig. 4.17 – Terreni coltivati in corrispondenza della PK 13+340.

Dal punto di vista progettuale, la presenza di uno spessore di suolo più o meno importante si riflette sulla scelta degli eventuali spessori di bonifica laddove sia prevista la realizzazione di un rilevato.

Durante il rilevamento di campagna eseguito nel 2012, sono stati effettuati numerosi saggi speditivi che, in funzione degli spessori riscontrati, hanno permesso di suddividere l'intervento in tratte omogenee.

Successivamente la campagna 2021, con ben 117 pozzetti esplorativi a fini progettuali ed ambientali, ha permesso una dettagliata definizione degli spessori di suolo.

I dettagli dei risultati di questa attività di campagna e la conseguente definizione degli spessori di bonifica sono trattati nello specifico paragrafo del Capitolo 8.

5 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

5.1 IL COMPLESSO CALCARENITICO DELLA PIANA DI MARSALA – MAZARA DEL VALLO

L'area oggetto di studio, secondo la suddivisione adottata dal Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana (PAI, 2006), ricade all'interno dell'Area Territoriale tra il Bacino Idrografico del Fiume Birgi e il Bacino Idrografico del Fiume M̀azaro, identificata col codice R19 052. La stessa area è identificata col medesimo codice nel Piano di Tutela delle Acque della Sicilia (PTA, 2008), con la dicitura "Bacini minori tra Birgi e M̀azaro" (Elaborato B.14), mentre, per quanto riguarda le acque sotterranee nello stesso piano si fa riferimento al Bacino Idrogeologico della Piana di Marsala- Mazara del Vallo (cod. R19MM).

La zona della Piana di Marsala- Mazara del Vallo più importante dal punto di vista idrogeologico, per spessore e potenzialità dell'acquifero, è limitata ad est dalla Fiumara di M̀azaro, a nord dalla Fiumara di Marsala (Sossio), a sud e a sud ovest dal Canale di Sicilia. In pratica, si tratta dell'area interessata dal tracciato stradale in progetto.

E' stato già ampiamente evidenziato come essa sia caratterizzata dalla presenza del complesso calcarenitico di Marsala, poggiate, ad elevate profondità, sui termini argilloso-sabbiosi della Formazione Marnoso Arenacea della Valle del Belice. Da un punto di vista geomorfologico, il tratto caratteristico è dato da "spianate" molto dolci, con andamento sub-orizzontale o debolmente pendenti verso mare, la cui monotonia è solo occasionalmente interrotta dalla presenza di cave a cielo aperto. Un altro aspetto morfologico degno di nota è dato, se si escludono le incisioni torrentizie del Fiume M̀azaro e del Fiume Sossio, *dalla totale assenza d'idrografia superficiale*, legata all'alta permeabilità dei litotipi presenti nella piana (calcareniti).

La Piana di Marsala- Mazara del Vallo è sede di un acquifero calcarenitico in cui la circolazione idrica sotterranea si espleta essenzialmente grazie alla porosità primaria che tali litotipi mostrano, a cui si aggiunge la circolazione preferenziale lungo i giunti di stratificazione e la rete di fratturazione e fessure per neotettonica ed associati fenomeni erosivi. Si tratta di un acquifero multifalda, caratterizzato dalla presenza di diversi livelli idrici comunicanti.

In particolare, secondo Calvi et al. 2001, è possibile distinguere almeno due falde idriche:

- ✓ una profonda, impostata sulla Calcarenite di Marsala parzialmente semiconfinata da livelli discontinui poco permeabili;
- ✓ una superficiale di tipo libera, ospitata nei depositi terrazzati tirreniani, alimentata dalle precipitazioni efficaci e in condizioni idrodinamiche di interscambio idrico con la falda profonda in funzione delle rispettive altezze piezometriche.

Il differente ruolo nella circolazione idrica sotterranea fra orizzonti a differente permeabilità presenti nella Calcarenite di Marsala (i livelli meno permeabili si comportano da veri e propri aquitard), si deduce sia dalla presenza fino dagli anni settanta della sorgente Samperi, sia da informazioni su rinvenimenti di falde in pressione.

I termini prevalentemente argillosi costituenti la Formazione Marnoso Arenacea della Valle del Belice, riscontrati nei sondaggi S1 – 12 ed S1bis – 12, presenti al di sotto del complesso calcarenitico, costituiscono il livello impermeabile (aquiclude) basale della falda principale.

Cosentino et al. (2003) hanno ricostruito, per l'intera piana compresa tra i fiumi Sossio e Mazarò, l'andamento di questo substrato argilloso (Fig. 5.1), grazie all'interpretazione dei dati di campagna disponibili, di dati geofisici e di dati stratigrafici di alcuni pozzi presenti nell'area.

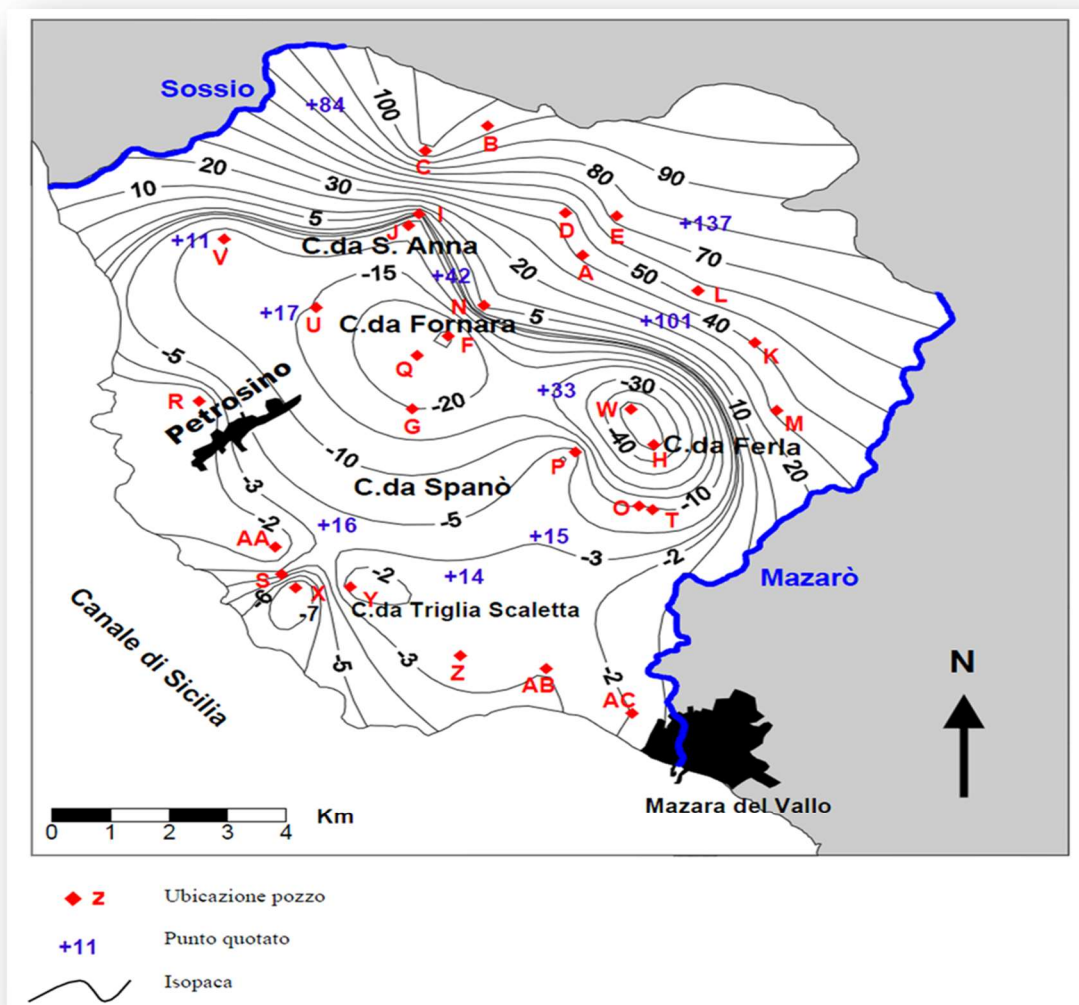


Fig. 5.1 – Carta del tetto del substrato argilloso (da Cosentino et al., 2003, modificata).

Questa carta, molto dettagliata, evidenzia che il tetto del substrato argilloso ha un andamento molto irregolare, così come lo spessore del complesso calcarenitico varia da pochi metri fino ad oltre 70-75 m. Si notano, inoltre, nella parte centrale della piana, due zone di approfondimento accentuato della formazione argillosa: uno nella zona di

contrada Ferla, l'altra nei pressi di contrada Fornara.

La ricostruzione della superficie piezometrica (Fig. 5.2), necessaria per poter analizzare le modalità di circolazione idrica sotterranea nell'acquifero calcarenitico della Piana di Marsala – Mazara del Vallo, è stata effettuata utilizzando i dati dei livelli piezometrici misurati nel 2001 (Cosentino et al., 2003).

Considerato l'intenso sfruttamento ad uso agricolo ed idropotabile, questi livelli devono considerarsi non più rappresentativi del contesto attuale.

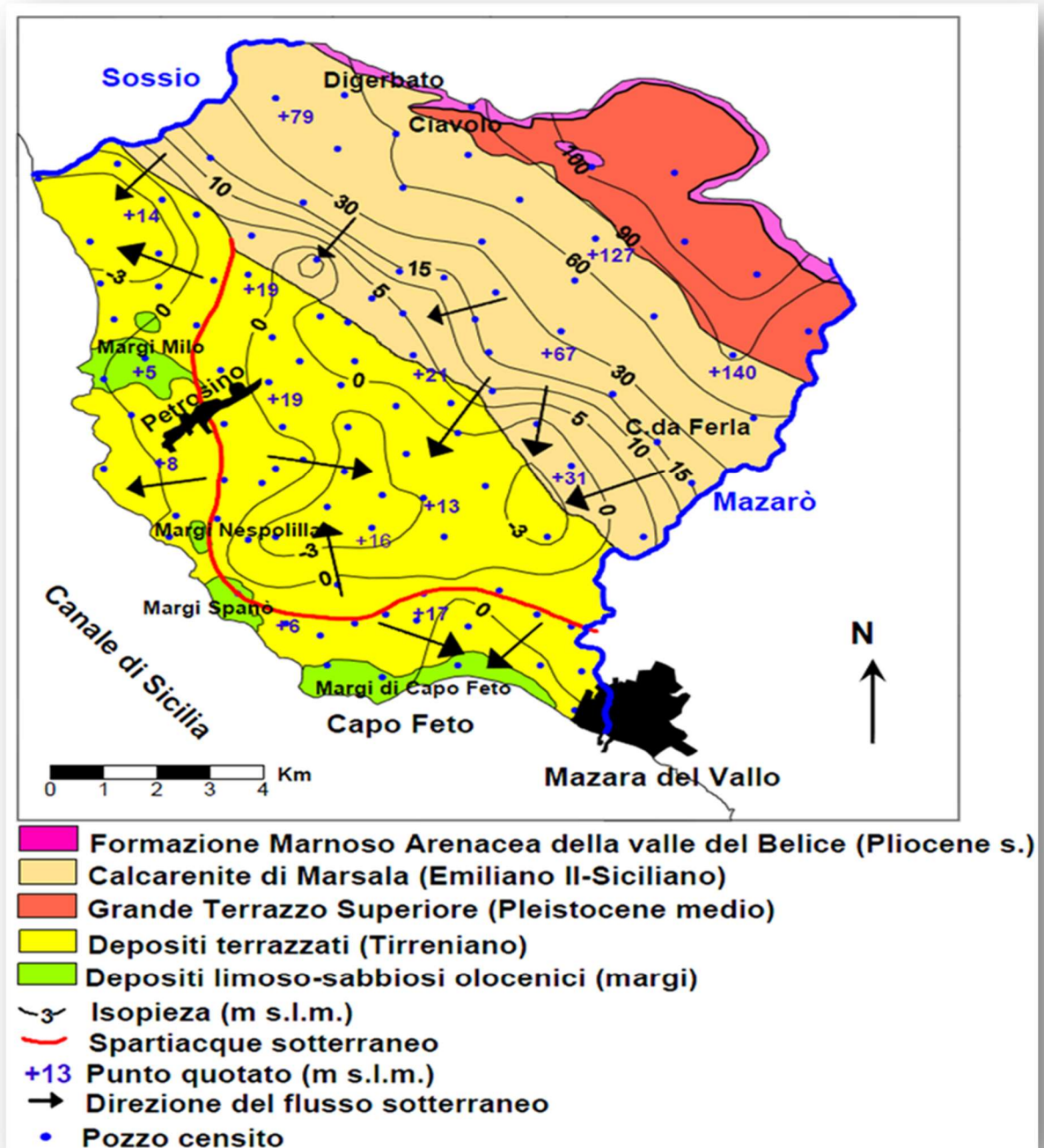


Fig. 5.2 – Carta della superficie piezometrica della falda principale, ricostruita dai dati raccolti nel 2001 (da Cosentino et al., 2003, modificata).

Le isopiezie mostrano come l'acquifero non si trovi più in condizioni di equilibrio, a causa di intensi prelievi concentrati in diversi campi pozzi, ad uso idropotabile, gestiti dai comuni di Marsala, Petrosino e Mazara del Vallo. E' stato stimato che complessivamente la portata emunta è superiore ai 300 l/s.

L'acquifero della Piana di Marsala – Mazara del Vallo è, infatti, soggetto ad un intenso sovra sfruttamento. Già negli anni settanta uno studio eseguito dalla SOGESTA nell'intera area trapanese aveva evidenziato diffusi abbassamenti dei livelli piezometrici che obbligavano gli utilizzatori ad un continuo approfondimento dei pozzi. Il depauperamento della risorsa idrica era anche allora causato dalla presenza di un elevatissimo numero di pozzi per uso irriguo ed idropotabile, i cui emungimenti superavano di gran lunga la disponibilità di ricarica annuale della risorsa, intaccando le risorse idriche sotterranee (Calvi et al., 2001).

Questo ha provocato un vistoso abbassamento del livello piezometrico e, in alcuni casi, il dimezzamento della capacità produttiva dei pozzi, che periodicamente vengono approfonditi dagli utilizzatori. A conferma di ciò si può portare come riferimento quanto misurato nei pozzi S. Miceli, gestiti fino a pochi anni fa dall'EAS (Ente Acquedotti Siciliano, oggi in dismissione) e attualmente dal Comune di Mazara del Vallo. Quando nel 1958 furono realizzati i pozzi S. Miceli, si registravano valori di livelli dinamici di 28 m dal p.c. e portate di 60 l/s, mentre nel 2008 tali livelli si attestavano a circa 50 m dal p.c., con portate si sono dimezzate a 30 l/s. In 50 anni, dunque, si è evidenziato un abbassamento dei livelli dinamici di circa 22 m.

Il particolare approfondimento in corrispondenza dei principali campi pozzi ha portato, come è ben evidenziato in Fig. 5.2, ad una inversione di direzione del flusso in falda, portando alla definizione di uno spartiacque sotterraneo che separa la zona in cui le linee di flusso seguono il naturale flusso idrico verso il mare dall'altra in cui il flusso idrico naturale viene deviato perché intercettato proprio dai pozzi idropotabili.

In condizioni naturali, la direzione preferenziale del flusso idrico sotterraneo sarebbe stata diretta verso la linea di costa, dove in passato si formavano, per affioramento della piezometrica, alcune zone umide denominate "margi". Il depauperamento della risorsa idrica ha provocato una drastica riduzione degli apporti al mare generando non solo il prosciugamento dei "margi", ma soprattutto fenomeni di intrusione marina che creano un vistoso peggioramento della qualità delle acque sotterranee.

Sintetizzando, si può concludere che, da un punto di vista strettamente quantitativo, la Piana di Marsala – Mazara del Vallo costituisce un corpo idrico significativo, tra i più importanti in Sicilia, la cui ricarica è data essenzialmente dalle piogge ricadenti sulla stessa area, non essendo l'acquifero in contatto con i bacini idrogeologici dei rilievi carbonatici che bordano la piana.

Tale ricarica non riesce a compensare gli elevati prelievi dai pozzi, sia privati che pubblici, presenti nell'area, causando, nel corso degli anni, un continuo depauperamento della risorsa idrica, e un conseguente abbassamento del livello, sia statico che dinamico, della falda freatica. A causa di questo progressivo depauperamento, si verificano, inoltre, fenomeni di intrusione marina, con conseguente peggioramento della qualità delle acque sotterranee.

5.2 LE MISURE PIEZOMETRICHE ESEGUITE IN SITO E IL MODELLO IDROGEOLOGICO

La definizione del modello idrogeologico di riferimento ha consentito di verificare l'interazione tra i corpi idrici sotterranei e le opere di progetto. Il modello è stato elaborato utilizzando i dati del Progetto Preliminare del 2004, della campagna del 2012, le osservazioni di sito e nuovi dati, del 2019 e soprattutto del 2021\22, appositamente acquisiti mediante monitoraggio in continuo per la nuova galleria artificiale prevista ad inizio lotto, come di seguito descritto. Il modello è stato poi confrontato ed integrato con quanto riportato in letteratura, nei piani territoriali.

I rilievi piezometrici del 2004, riportati in *Tab. 5.1*, sono stati eseguiti negli unici due sondaggi che hanno riscontrato la presenza di una falda, S20 e S21, ubicati nei pressi del nuovo Ospedale di Marsala. La profondità del livello di falda è risultata essere modesta, essendo pari, rispettivamente, a 6 e 14 m dal piano campagna, ma coerente con il minore spessore che il complesso calcarenitico ha in questo tratto di progetto, ubicato a nord del Fiume Sossio. Tra il fiume Sossio ed il Fiume Mazzaro il letto delle calcareniti si approfondisce, il loro spessore aumenta e di conseguenza anche il livello di falda si approfondisce.

	Prof. Piezometro (m)	Lettura 1- 20/12/2003	Lettura 2- 06/01/2004	Lettura 3- 18/01/2004
S20	18,00	6,15	6,50	6,30
S21	18,00	14,50	14,60	14,10

Tab. 5.1 – Letture piezometriche effettuate durante la campagna 2004

Il tratto iniziale del progetto prevede, nella versione 2020, la progettazione di una galleria artificiale di inizio lotto, adiacente all'area dell'Ospedale di Marsala. Allo scopo di verificare i modelli geologici ed idrogeologici di questo tratto, è stata effettuata nell'ottobre 2019 la lettura di due pozzi privati, n°1 e n°2, ubicati in prossimità del tracciato, e raccolte le seguenti informazioni sul pozzo n°1, ubicato nel cortile di una abitazione lungo la strada statale:

- ✓ La profondità misurata della falda è stata di m 12,70 dal p.c.;
- ✓ L'escursione annua, a detta del proprietario, è piuttosto modesta, quindi ragionevolmente non superiore al metro circa;
- ✓ Il pozzo, eseguito a mano nel 1926, attraversa un primo strato calcarenitico più compatto di circa 80 cm e prosegue in materiali meno competenti che, tuttavia, ne hanno garantito stabilità ed utilizzo fino ai giorni nostri.

Il pozzo n. 2 (all'interno di un uliveto adiacente al tracciato) ha registrato una profondità falda di m 7.50 dal p.c.; è inoltre presente un terzo pozzo nelle vicinanze, misurabile previa autorizzazione del proprietario.

Entrambi i dati sono stati inseriti nel modello idrogeologico per verificarne la validità. In particolare, il dato del pozzo 2 ha mostrato una elevata coerenza con il modello idrogeologico ipotizzato.

Durante la campagna 2021, considerata la valenza progettuale, sono stati installati lungo il tracciato quattro datalogger piezometrici, che hanno consentito il monitoraggio dei livelli di falda nel periodo di maggiore risalita della stessa (dicembre 2021 – aprile 2022), confermando sostanzialmente il modello idrogeologico, elaborato con pochissimi dati.

Il settore compreso tra il Fiume Sossio e il Fiume Mázaro, proprio perché sede di una falda libera molto consistente, è sede di diversi campi pozzi pubblici, utilizzati per l'approvvigionamento idrico dei comuni di Marsala, Petrosino e Mazara.

Nel Progetto Preliminare 2004 sono stati acquisiti i dati di profondità della falda (livello statico medio), nei diversi pozzi dei campi più prossimi al tracciato (Tab. 5.2), tutti ubicati nel Comune di Marsala: campo pozzi Scacciaiazzo e campo pozzi Sinubio (Cozzogrande).

Questi dati evidenziano come il livello di falda in questo settore si attesti a profondità molto elevate, mai inferiori ai 30 m dal piano campagna, quindi a quote non interferenti con le opere in progetto. In termini assoluti, il livello di falda si trova a quote comprese tra i 2 e i 10 m s.l.m..

Comune	Campo Pozzi	N. Pozzo	Quota boccapozzo	Profondità falda (livello statico medio)	Quota falda
			<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>
Marsala	Scacciaiazzo	1	60	50	10
		2	45	40	5
		4	53	50	3
	Sinubio	1	41	38	3
		2	40	35	5
		3	37	30	7
		4	58	50	8
		5	42	40	2
		6	43	40	3
		7	45	40	5
		8	46	40	6
		9	45	40	5
		10	49	45	4
		11	53	50	3
		12	54	51	3
		13	54	50	4

Tab. 5.2 – Tabella riassuntiva dei dati piezometrici raccolti per il Progetto Preliminare 2004, relativi ai campi pozzi Scacciaiazzo e Sinubio (Cozzogrande). Archivio 2012

In seguito alla campagna indagini 2012, nel Febbraio 2013 sono stati acquisiti dati piezometrici del livello dinamico di falda (Fig. 5.3) in alcuni dei pozzi comunali di Marsala e Mazara del Vallo, grazie anche alla collaborazione con i rispettivi tecnici comunali.

Anche i dati raccolti in questa campagna di indagini dimostrano che i livelli di falda (Tab. 5.3), in questo caso dinamici, in quanto rilevati durante il pompaggio dei pozzi, si attestano a profondità elevate, superiori ai 30 m dal piano campagna. Solo i pozzi Ramisella, ubicati circa 3 km a SW rispetto alla parte terminale del tracciato, nel Comune di Mazara, presentano valori di profondità di falda più bassi (16 e 18 m), proprio perché essi si trovano più vicini alla linea di costa, dove anche lo spessore dei depositi calcarenitici si assottiglia. Il livello di falda statico sarà ovviamente superiore (meno profondo) rispetto a quello dinamico misurato, ma, pur considerando il recupero di qualche metro, si può concludere che la falda del complesso calcarenitico non interferisce in alcun modo con le opere in progetto in questo tratto. L'ubicazione di tutti i pozzi è riportata nella Carta Idrogeologica, unitamente ai livelli piezometrici dinamici misurati in sito nel 2012.

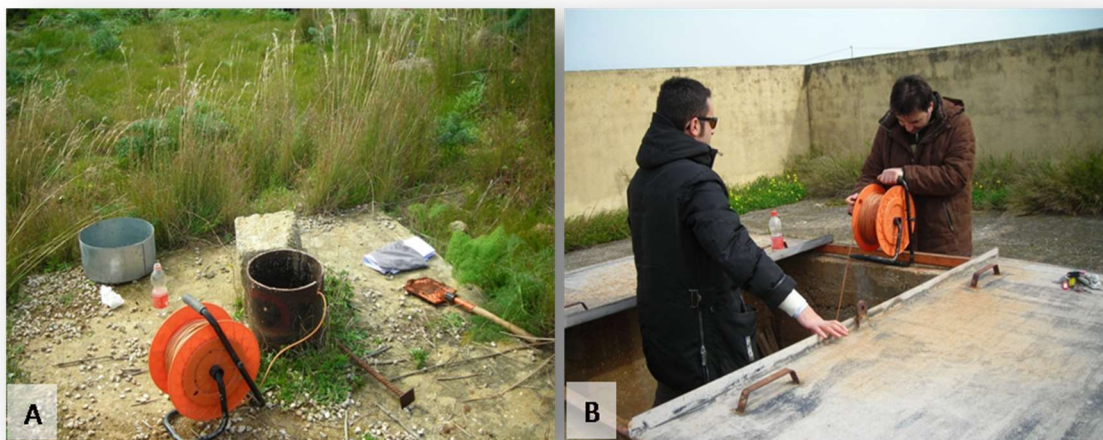


Fig. 5.3 – Foto dei rilievi piezometrici effettuati nei pozzi gestiti dal Comune di Marsala: A) Pozzo Sinubio n.5; B) Pozzo Scacciaiazzo n.2; (rilevamenti G. Ricci, A. Montagna)

Comune	Campo Pozzi	Pozzo	Quota boccapozzo	Profondità falda	Quota falda
			<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>
Marsala	Sinubio	n. 5	42	46	-4
	Sant'Anna	n. 1	38	44	-6
		n. 2	38	44	-6
	Scacciaiazzo	n. 2	45	35,5	9,5
Mazara del Vallo	Ramisella	n. 1	18,5	18	0,5
		n. 2	14,5	16	-1,5
	San Miceli	San Miceli	43	43,7	-0,7
		Safina	37	37	0

Tab. 5.3 – Tabella riassuntiva dei dati piezometrici raccolti per il Progetto Definitivo, relativi ai campi pozzi Sinubio, Scacciaiazzo e Sant'Anna nel Comune di Marsala, e ai campi pozzi Ramisella e San Miceli nel Comune di Mazara del Vallo.

Al fine di valutare l'effettiva permeabilità del complesso calcarenitico, nel 2012 sono state eseguite 2 prove in foro di sondaggio: una prova col metodo Lugeon nei termini più litoidi della formazione (litofacies A), ed una prova col metodo Lefranc nei termini più sabbiosi e meno competenti della stessa (litofacies A1).

Tutti i dati relativi a queste prove sono riportate nello specifico elaborato redatto dalla Società Geomerid s.r.l. di Melilli (SR).

La prova Lugeon è stata eseguita nel foro di sondaggio S4 – 12, tra i 6 e gli 8 m di profondità, mentre la prova Lefranc nel foro di sondaggio S6 – 12, tra i 3 e gli 8 m di profondità.

La prova di permeabilità col metodo Lugeon, che viene solitamente eseguita nei terreni litoidi, permette di determinare il grado di fratturazione di un ammasso roccioso, da cui si ricava anche la sua permeabilità. Quest'ultima viene espressa in Unità Lugeon; un Lugeon corrisponde alla permeabilità di un ammasso roccioso che assorbe 1 litro di acqua al minuto per ogni metro di foro, con una pressione di prova di 10 atm.

Nella prova eseguita nel foro S4 – 12, il valore di permeabilità è risultato pari a 13 UL, che corrispondono a **$1,3 \cdot 10^{-6}$ m/s** (1 UL = $1 \cdot 10^{-7}$ m/s).

La prova col metodo Lefranc è stata invece eseguita, a carico costante, nei terreni corrispondenti alla litofacies CA. In questo caso, il valore di permeabilità è stato ricavato direttamente, risultando pari a **$1 \cdot 10^{-5}$ m/s**.

Confrontando i risultati delle due diverse prove effettuate, si vede come l'intero complesso presenti un grado di permeabilità medio-alto, mentre tra le due litofacies individuate la differenza è inferiore ad un ordine di grandezza. In pratica, la parte più litoide risulta poco meno permeabile della litofacies CA2. Questo fatto può essere spiegato considerando che con la prova Lugeon ancor prima che la permeabilità si misura il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, che nel caso delle calcareniti risulta essere molto basso, facendo quindi diminuire il valore di permeabilità misurato.

Nella campagna 2021 è stata eseguita a fini di dimensionamento idraulico una estesa campagna di misure di permeabilità in sito in pozzetti realizzati ad hoc, che ha confermato sostanzialmente il range di valori sopra descritto.

Alla luce di tutti i dati sopra esposti è stato possibile definire il modello idrogeologico dell'area di interesse.

I termini argilloso-limosi, con debole presenza di sabbia, riferiti alla Formazione Marnoso Arenacea della Valle del Belice costituiscono il livello impermeabile di base di tutta la Piana di Marsala. La falda freatica principale si trova nel complesso calcarenitico spesso diverse decine di metri, nel territorio compreso tra il Fiume Sossio a nord e il Fiume Mázaro a sud. Questo corpo idrico sotterraneo viene considerato "significativo" in quanto ha una potenzialità tale da essere sfruttato sia per uso idropotabile, sia per uso irriguo.

I termini calcarenitici sono caratterizzati, generalmente, da una elevata permeabilità, principalmente per porosità e, solo secondariamente, per la presenza di fratture sub-verticali. Nel tratto a nord del Fiume Sossio, fino al nuovo Ospedale di Marsala, a causa del minore spessore del complesso calcarenitico (risalita del substrato impermeabile), sia lo spessore che la profondità della falda freatica diminuiscono, come dimostrano le misure effettuate nel corso del Progetto Preliminare 2004 in corrispondenza dei sondaggi S20 e S21, quelle eseguite nei pozzi n°1 e n°2 nel 2019 e quelle rilevate dai datalogger nel 2021\2022.

Al contrario, a sud del Fiume Sossio i livelli di falda misurati risultano sempre superiori ai 30 m dal piano campagna, sia riferendosi ai dati del Progetto Preliminare 2004, sia facendo riferimento alla campagna di rilievi eseguita nel 2012-2013.

Si evidenzia tuttavia che nella campagna 2021 il datalogger ubicato in S8 ha rilevato un livello di falda intorno i 19,50 m dal p.c.

Quanto riportato nel Piano di Tutela delle Acque della Sicilia, unitamente alle testimonianze locali, sia dei tecnici comunali, sia degli agricoltori che possiedono pozzi privati, indica come quello della Piana di Marsala sia un bacino idrogeologico in forte e continuo depauperamento a causa degli emungimenti che superano di gran lunga le possibilità di ricarica dell'acquifero stesso.

In ogni caso, nei terreni calcarenitici a sud del Sossio il livello di falda è tale da non influenzare in alcun modo le opere in progetto.

I terreni alluvionali della valle del Fiume Sossio sono caratterizzati da granulometrie prevalentemente fini, limi e argille, con debole presenza sabbiosa. Si tratta quindi di terreni poco permeabili, con variazioni in funzione della percentuale della frazione fine, data la bassa porosità efficace che caratterizza queste granulometrie. Questo complesso alluvionale è sede di falde superficiali, con variazione del livello di falda a carattere stagionale. Nel corso del sondaggio S1 – 12 è stata infatti intercettata la falda a circa 3 m di profondità dal piano campagna. Date queste caratteristiche e la presenza del corso d'acqua, è da considerare che il livello di falda, in alcuni periodi possa attestarsi pressoché in corrispondenza del piano campagna.

5.3 QUALITÀ DELLE ACQUE

In questo paragrafo verranno sintetizzati i risultati dell'analisi sugli aspetti qualitativi dell'acquifero della Piana di Marsala utili alla definizione delle scelte progettuali. Per i dettagli si rimanda alla Relazione Gestione Materie.

Purtroppo, infatti, l'eccessivo sfruttamento ed il depauperamento della risorsa idrica che caratterizzano negativamente l'acquifero della Piana di Marsala da un punto di vista quantitativo, influiscono e compromettono anche le caratteristiche qualitative.

Quello della Piana di Marsala è, a tutti gli effetti, un acquifero costiero, essendo in connessione diretta con le acque del mare. Una zona di mixing separa l'acqua dolce dall'acqua marina, avendo queste diversa densità. Considerando la risorsa idrica marina costante, l'ampiezza e la posizione di questa zona di mixing dipendono essenzialmente dal volume di acqua dolce che l'acquifero può riversare in mare. Se questo volume diminuisce,

l'equilibrio tra i due sistemi viene meno e le acque marine avanzano verso terra (*intrusione marina*) provocando la salinizzazione progressiva della falda.

La riduzione dell'apporto di acqua dolce in mare dipende dalla diminuzione delle acque di infiltrazione o dal sovra sfruttamento della falda idrica nelle aree a monte.

Nel caso dell'acquifero della Piana di Marsala- Mazara del Vallo, in assenza di sostanziali diminuzioni degli apporti idrici naturali, la causa principale della salinizzazione per intrusione marina è da attribuire allo sfruttamento delle acque sotterranee, ed in particolare al fatto che i prelievi superano la ricarica idrica annuale. Oltre ai problemi legati all'ingressione marina, l'acquifero presenta anche delle criticità legate alla presenza di elevate concentrazioni di nitrati, correlabili alla presenza di un'intensa attività agricola e vivaistica.

Per le considerazioni finora esposte, e soprattutto in relazione alle caratteristiche di permeabilità del complesso calcarenitico, si può affermare che **l'acquifero presenta una vulnerabilità molto elevata.**

Pur insistendo in un territorio dove non sono presenti attività industriali, il Piano di Tutela delle Acque della Sicilia, proprio a causa dell'elevata vulnerabilità, ha classificato lo stato ambientale dell'acquifero della Piana di Marsala come scadente (4C), ovvero, con un impatto antropico rilevante sulla qualità e/o quantità della risorsa, con necessità di specifiche azioni di risanamento, secondo il D.Lgs. 152/99.

E' evidente che, come accade per i nitrati, anche eventuali altri elementi possono essere causa di inquinamento, data l'elevata vulnerabilità, potendo andare a compromettere definitivamente lo stato ambientale di acque destinate ad uso potabile.

Relativamente alla tipologia di opera in progetto, a costituire la principale fonte di potenziale inquinamento per l'ambiente idrico sono le acque meteoriche di dilavamento e le acque di prima pioggia.

Il problema della raccolta, trattamento e smaltimento delle acque di piattaforma e degli sversamenti accidentali è stato quindi affrontato, definendo un sistema dinamico in condizioni di funzionare sia durante gli eventi di scarsa intensità e durata, sia per eventi eccezionali di forte intensità. In particolare sono previste:

- ✓ Opere di raccolta e allontanamento delle acque di piattaforma e di raccordo con le opere di drenaggio trasversale;
- ✓ Opere di trattamento e di mitigazione del potere inquinante delle acque di prima pioggia.

Il tracciato, in prossimità dello svincolo di Petrosino, attraversa un campo pozzi acquedottistico. La tutela di tale zona è assicurata mediante la presenza di un sistema di raccolta delle acque di piattaforma ed eventuale sversamenti che recapita al di fuori della zona del campo pozzi. A tal fine è stata realizzata una serie di prove in sito per determinare quantitativamente la conducibilità idraulica dei terreni superficiali, che ha consentito di ottimizzare il dimensionamento delle vasche previste.

Sarà quindi previsto, al fine di valutare l'incidenza dell'opera sullo stato qualitativo delle acque, un monitoraggio dell'acquifero in punti significativi, come i campi pozzi comunali e gli impianti di raccolta e trattamento delle acque di piattaforma.

6 STUDIO SULLE CAVITA' DI ORIGINE ANTROPICA

6.1 QUADRO STORICO

Come evidenziato nel Progetto Preliminare 2004, la calcarenite di Marsala è stata, sin dal periodo dei Greci, oggetto di intensa attività estrattiva come materiale di costruzione. Infatti, tutti i manufatti della zona intorno a Marsala, ad esclusione di quelli recenti in c.a., sono stati realizzati con i già menzionati "conci di tufo", provenienti da tali attività.

Nella Relazione "INDAGINE SPELEOLOGICA" presente nei documenti relativi alle indagini pregresse viene descritto in dettaglio il metodo utilizzato dai tempi più antichi e fino anche all'ultimo dopoguerra.

Quasi tutto il materiale non utilizzato (scarto di lavorazione) veniva lasciato a tergo e sistemato in maniera casuale. Questi scavi hanno portato, quindi, ad avere, oggi, un complesso "dedalo" di gallerie sotterranee, a diverse profondità dal piano campagna, la cui conoscenza è di fondamentale importanza ai fini della progettazione e realizzazione della nuova infrastruttura viaria.

Questa tecnica di scavo in cui si sfruttava il giacimento come una vera e propria miniera, è stata negli ultimi decenni abbandonata, lasciando spazio alla realizzazione di cave a cielo aperto, molto più funzionali e produttive, anche in considerazione dell'evoluzione nei metodi di scavo e realizzazione dei "conci di tufo". La realizzazione di queste cave a cielo aperto nelle stesse aree già interessate dai cunicoli ha generato, di fatto, degli ingressi laterali ai vecchi cunicoli, costituiti da imbocchi orizzontali ad oggi ben visibili lungo alcune delle pareti di cava. Tali intersezioni tra cunicoli e pareti di cava presentano, evidentemente, differenti angolazioni, creando delle aperture definite, nella Relazione Speleologica allegata al progetto 2012, a "fette di salame".

Se la presenza delle cave a cielo aperto costituisce una pericolosità geomorfologica ben visibile in sito, definibile in tutti i suoi aspetti e quindi facilmente affrontabile in tutte le fasi della progettazione, la presenza e la distribuzione spaziale degli antichi cunicoli di cava risulta di più complessa definizione, e per tale motivo essa ha costituito, sin dal Progetto Preliminare 2004, uno dei più importanti aspetti inerenti la caratterizzazione geologica l.s. del territorio investigato, sia in termini di scelta del tracciato, sia per le specifiche scelte progettuali.

Di seguito si riportano, secondo la sequenza sia cronologica, sia concettuale, le varie fasi e le diverse indagini attraverso le quali, a partire dal Progetto Preliminare del 2004, si è tentato di definire l'ubicazione e lo sviluppo areale di queste gallerie sotterranee, e la loro eventuale interazione con tracciato stradale prescelto.



Fig. 6.1 – Vista della parte terminale di uno dei cunicoli sotterranei, nei pressi dell'intersezione della parete di una cava a cielo aperto, in fondo. Archivio 2012

6.2 LE INDAGINI ESEGUITE NEL PROGETTO PRELIMINARE 2004

Le indagini eseguite con il Georadar (Ground Penetrating Radar), per il Progetto Preliminare 2004, sono state descritte, in tutte le tre diverse fasi in cui si sono sviluppate le attività, nel Capitolo 3 della presente relazione.

In questa sede vengono riportate esclusivamente le anomalie elettromagnetiche riscontrate e riconducibili o alla presenza di cavità, eventualmente riempita di materiale incoerente, o da una locale ed accentuata variazione del grado di cementazione del complesso calcarenitico:

- 1) AREA 3 – Profili P10 e P11: a una profondità di 7 m dal p.c.);
- 2) AREA 3 – Profili P23 e P24: a una profondità di 6 m dal p.c.;
- 3) AREA 4 – Profilo P28: alla profondità di 5 m dal p.c.;
- 4) AREA 4 – Profilo P30: alla profondità di 5,5 m dal p.c.;
- 5) AREA 4 – Profilo P32: alla profondità di 4 m dal p.c.;
- 6) AREA 6 – Profilo P44: alla profondità di 4 m dal p.c.;
- 7) AREA 13 – Profilo P76: alla profondità di 3 m dal p.c..

L'Area di indagine n.13 si trova, comunque, distante dall'asse del tracciato del Progetto, per cui viene meno l'interesse per l'eventuale presenza di cavità in questo specifico settore.

In corrispondenza delle anomalie individuate sono stati eseguiti dei sondaggi meccanici a distruzione di nucleo, al fine di verificare l'effettiva presenza di cavità. In particolare, sono stati eseguiti i seguenti sondaggi:

- ✓ SD33 in corrispondenza dell'anomalia del profilo P10;
- ✓ SD30, SD34 ed SD35 in corrispondenza dei profili P22, P23 e P24;
- ✓ SD31 in corrispondenza dell'anomalia del profilo P28;
- ✓ SD32 in corrispondenza dell'anomalia del profilo P30;
- ✓ SD36 in corrispondenza dell'anomalia del profilo P44.

In nessuno di questi sondaggi è stata riscontrata la presenza di cavità, ad eccezione del sondaggio SD31 in cui una microcavità di circa 40 cm è stata intercettata a 5,7 m di profondità. Questi sondaggi hanno però evidenziato la presenza di materiale meno competente, alle profondità in cui sono state individuate le anomalie elettromagnetiche.

Nell'Area 3, in corrispondenza delle anomalie precedentemente elencate, sono state condotte delle indagini, con la stessa metodologia, di maggiore dettaglio, finalizzate all'ottenimento di maggiori informazioni circa le geometrie e lo sviluppo delle stesse.

Nella "Relazione sulle cavità e sulle modalità di superamento" del Progetto Preliminare 2004 si è messo in evidenza come per le anomalie n. 1 e n. 2 fosse possibile ipotizzare la presenza di cavità riempite di materiale incoerente (forse in fase di realizzazione della provinciale esistente), o da una locale e notevole variazione del grado di cementazione della calcarenite. Questa ipotesi è stata confermata dai sondaggi a distruzione di nucleo effettuati in queste aree.

Nello stesso elaborato si è evidenziato come per le anomalie n. 3 e n. 6, i relativi sondaggi a distruzione di nucleo abbiano riscontrato la presenza di lenti sabbiose all'interno del complesso calcarenitico. Per l'anomalia n. 4, invece, nel sondaggio a distruzione di nucleo è stata effettivamente riscontrata la presenza di una cavità, alla profondità di circa 5,7 m dal p.c., della lunghezza complessiva di 40 cm. Infine, per le anomalie n. 5 e n. 7 non è stato possibile acquisire ulteriori e dirette informazioni data l'impossibilità di accedere al sito.

In conclusione, nel Progetto Preliminare 2004 si è giunti ad una valutazione della probabilità di interferenza di cavità con il tracciato, in funzione delle diverse informazioni raccolte in sito e delle indagini, dirette ed indirette, condotte. In pratica, sono state definite tre classi di probabilità di intercettare cunicoli o cavità sotterranee:

- ✓ scarsa;
- ✓ media;
- ✓ elevata.

In particolare, per quanto riguarda le probabilità di intercettare cunicoli o cavità di dimensioni ridotte (sia vuoti che parzialmente riempiti) esse sono state così suddivise:

- ✓ scarsa: 5.000 m di tracciato;

- ✓ media: 9.000 m di tracciato;
- ✓ elevata: 3.000 m di tracciato.

Per quanto riguarda, invece, le probabilità di intercettare camere di coltivazioni o comunque cavità superiori di 600 m³, esse sono così suddivise:

- ✓ scarsa: 11.300 m di tracciato;
- ✓ media: 4.000 m di tracciato;
- ✓ elevata: 1.000 m di tracciato.

Nel Progetto Preliminare 2004 è stata quindi posta una adeguata attenzione a questa problematica, ponendo le basi per una più dettagliata analisi da svolgersi nelle successive fasi progettuali quali quella cui fa riferimento la presente relazione. Nell'ambito delle indagini 2012, verificata la possibilità di accesso a diversi cunicoli, soprattutto dagli imbocchi laterali lungo le pareti delle cave a cielo aperto, come precedentemente descritto, si è deciso, prima di procedere con indagini geologiche e geofisiche, di ispezionare direttamente tali cavità, tramite rilievi speleologici, appositamente commissionati ad Associazioni locali specializzate.

6.3 LE INDAGINI SPELEOLOGICHE

I rilievi speleologici sono stati eseguiti dal "Gruppo Speleologico Le Talpe" di Mazara del Vallo, data la loro specifica esperienza nell'esplorazione di questa particolare tipologia di cavità di origine antropica. Le tecniche utilizzate per la mappatura delle cavità che è stato possibile esplorare sono descritte nella specifica Relazione Tecnica. In questa sede si riportano gli aspetti salienti di queste indagini, in relazione alla possibilità di interferenza tra cunicoli sotterranei e tracciato di progetto.

In primo luogo è stato necessario individuare gli accessi ai diversi cunicoli. Come già evidenziato, questi accessi sono di due tipologie: i pozzi di areazione verticali, scavati durante le fasi di coltivazione dei cunicoli stessi, e gli accessi laterali dalle pareti verticali delle cave a cielo aperto che hanno intersecato gli antichi cunicoli. Le indagini condotte hanno portato ad individuare circa **170 pozzi di areazione**, in un intorno di circa 1 km rispetto al settore di tracciato interessato dalla presenza di cave. Sono stati mappati 20 ingressi laterali, di cui 13 con sviluppo delle gallerie potenzialmente interferente con l'asse stradale in progetto. In più, sono state riconosciute 17 aree in cui si è verificato uno sprofondamento o un crollo della volta della cavità sotterranea.

In particolare, è stata individuato un crollo della volta di quattro gallerie, in corrispondenza dell'Area 3, come indicato in Fig. 6.2. L'altezza della volta di queste gallerie è risultata essere pari a 7,5 m (Fig. 6.3).

L'analisi speleologica è stata condotta nelle diverse aree individuate e distinte nel Progetto Preliminare 2004: **Area 3, Area 4, Area 5, Area 6, Area 7** e l'**Area 13bis**, che non interessa più il tracciato, in quanto l'innesto avviene più a nord, con rotatoria sulla SS 115, in corrispondenza dell'**Area 13**. Per ognuna delle esplorazioni condotte è stata redatta una scheda sintetica, riportante il codice identificativo della grotta, le unità impegnate, le attrezzature utilizzate, le coordinate del punto di ingresso e di uscita (se differenti), lo spessore della volta.



Fig. 6.2 – Immagine Google Earth dello sprofondamento, in Area 3, denominato ANAS001, con l'indicazione delle gallerie denominate ANAS008, 009, 010 e 011, e l'accesso verticale n. 15. Archivio 2012



Fig. 6.3 – Foto dello sprofondamento, in Area 3, denominato ANAS001. In basso si notano due delle gallerie individuate in questo punto. Archivio 2012

L'Area 3 è stata quella in cui è stato possibile effettuare i rilievi più significativi, potendo giungere ad una mappatura delle cavità sotterranee che ha evidenziato uno sviluppo abbastanza complesso, e a luoghi estremamente elevato. Per tale motivo, il reticolo di cunicoli sotterranei nei pressi del sondaggio S8-12-T, è stato denominato dagli stessi speleologi "Città Azteca". Le Figure 6.4 e 6.5 mostrano, rispettivamente, lo sviluppo planimetrico di questi cunicoli, riportato anche nello specifico elaborato di progetto, e la vista 3D realizzata attraverso uno specifico software.

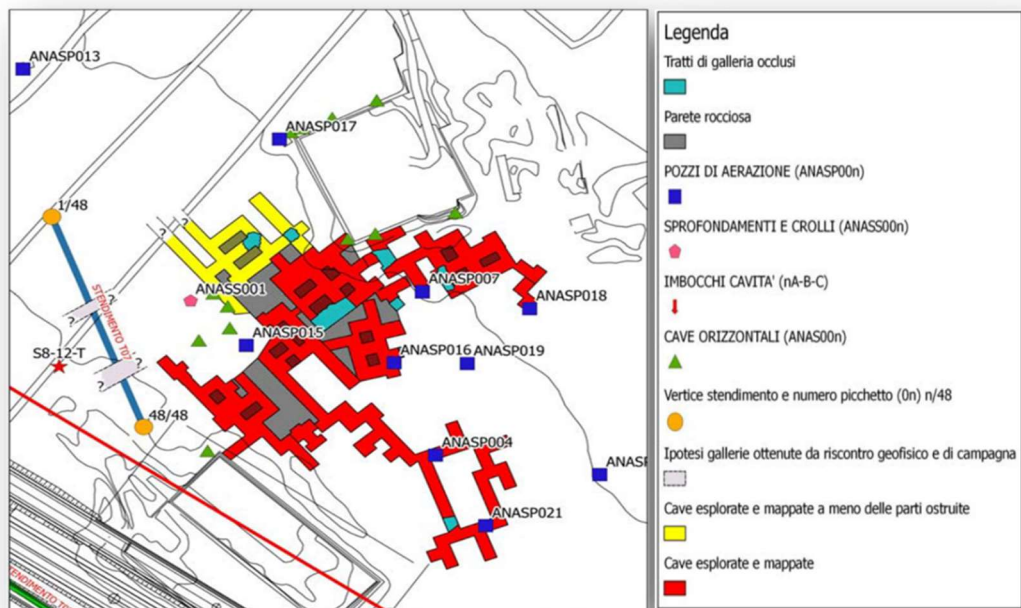


Fig. 6.4 – Planimetria dei cunicoli facenti parte della cosiddetta “Città Azteca” nell’Area di indagine 3 e relativa legenda. In basso a sinistra l’asse del tracciato in progetto. Archivio 2012

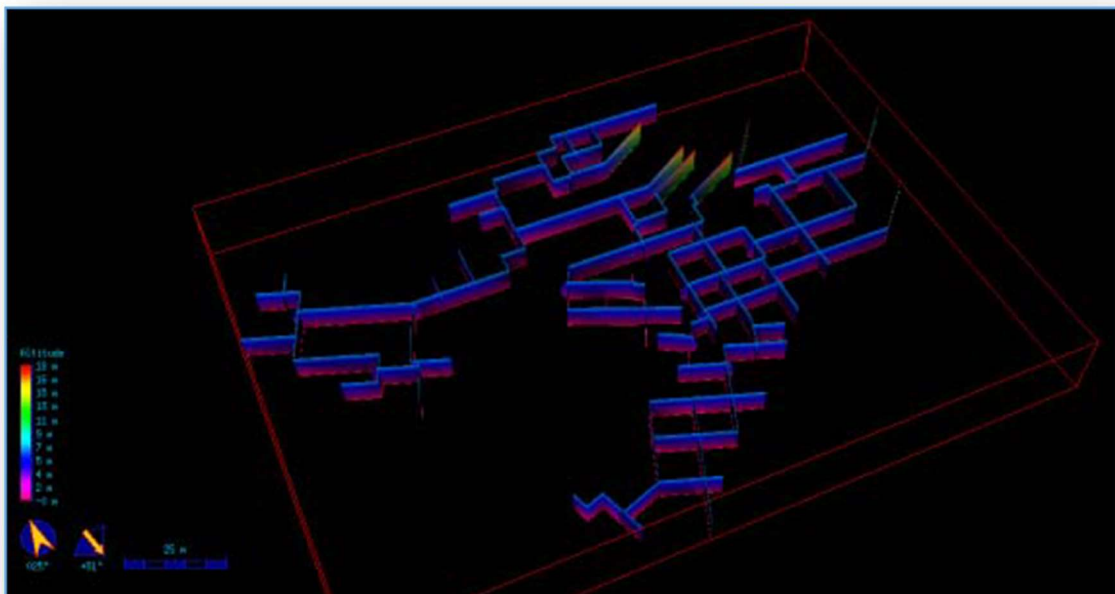


Fig. 6.5 – Diversa rappresentazione dell’area della “Città Azteca”, attraverso il software di restituzione 3D, con rotazione orizzontale di 51°.

Dall'analisi condotta in questa area è stato possibile individuare, basandosi sulla direzione di sviluppo delle gallerie, ben 6 diversi cantieri di estrazione, sia coevi tra loro, sia di epoche differenti. La presenza, in molti casi, di materiale di scavo lasciato all'interno dei cunicoli, ha reso più difficoltosa l'esplorazione, e in alcuni casi ha reso impossibile procedere oltre, come evidenziato anche nelle restituzioni cartografiche. In ogni caso, tale indagine ha permesso di valutare una larghezza delle gallerie pressoché costante, compresa tra i 4,85 e i 5,25 metri, con un'altezza massima di 7 m.

Nella stessa **Area 3** è stato possibile effettuare dei rilievi speleologici anche in un altro settore, ubicato in corrispondenza del sondaggio S7-12-T, laddove la grotta denominata ANAS013 presenta una direzione N54E, tale da poter essere considerata potenzialmente interferente col tracciato in progetto. Questa cavità è risultata però occlusa dopo pochi metri da materiale di riporto, probabilmente dovuto o a riempimento di un pozzo di areazione, o alla parte terminale di una cava a cielo aperto successivamente riempita (Figg. 6.6 e 6.7).

Una dettagliata analisi dei bordi superiori della volta terminale al cono di risulta, ha consentito di identificare una discontinuità dei tagli per l'estrazione dei conci di tufo ipotizzando l'esistenza di cava a cielo aperto riempita con materiale. Ortogonalmente alla direzione anzidetta (54°), salendo per un gradone, è stata esplorata una galleria con direzione 144°; tale galleria termina in una sala con colonna centrale e un cono di risulta con corrispondente pozzo di aerazione in superficie (attualmente occluso). Tale occlusione identificava anch'essa una probabile galleria a tergo, orientata a 54° e quindi potenzialmente interferente con l'asse stradale (Fig. 8.8).



Fig. 6.6 – Area di indagine in cui sono stati riconosciute due direzioni preferenziali di scavo: N54E e N114E. L'area in verde

con bordo rosso identifica il settore effettivamente esplorato, mentre l'area in verde con bordo arancione il settore probabilmente sede di una vecchia cava a cielo aperto, successivamente riempita. Le linee arancioni rappresentano un'ipotesi di sviluppo dei cunicoli occlusi, in direzione del tracciato in progetto, e dell'attuale sede della SP 62, dove è stata eseguita la tomografia elettrica T1. Archivio 2012



Fig. 6.7 – Ingresso della galleria ANAS013 in cui sono stati riconosciute due direzioni preferenziali di scavo: N54E e N114E. Si evidenzia l'occlusione della galleria in direzione dell'asse stradale in progetto. Archivio 2012

Nell'**Area 4**, l'analisi di superficie volta ad individuare eventuali imbocchi, sia verticale (pozzi di areazione), sia orizzontali (pareti di cave a cielo aperto), ha evidenziato l'assenza di accessi di galleria il cui sviluppo potesse in alcun modo interferire con il tracciato. Sono stati comunque riconosciuti 4 pozzi di areazione, completamente occlusi (denominati ANASP045, ANASP048, ANASP049 e ANASP050), nel settore nord-ovest dell'area, indicanti una possibile attività di cava, in passato.

Anche nell'**Area 5** non sono stati trovati accessi a cavità sotterranee, in quanto i due pozzi di areazione individuati (ANASP024 e ANASP025) sono risultati occlusi. Nell'**Area 6**, come anche nell'**Area 7**, invece, non è stato individuato alcun pozzo di areazione.

6.4 LE INDAGINI GEOELETTRICHE E I SONDAGGI A DISTRUZIONE DI NUCLEO 2012

Le indagini e i rilievi speleologici, insieme alle informazioni desunte dalle attività svolte per il Progetto Preliminare 2004, hanno consentito di pianificare nel 2012 delle indagini, dirette e indirette, volte ad individuare l'eventuale presenza di cavità sotterranee, mirate alle aree in cui essa è risultata più probabile.

A tal fine si è deciso di procedere all'esecuzione di 14 stese elettrotomografiche, suddivise nelle diverse aree di indagini, per una lunghezza totale di 1.402,5 m (cfr. Capitolo 5 e specifica relazione). La tomografia elettrica, attraverso la restituzione dei profili di resistività dei terreni investigati, consente, infatti, di individuare la presenza di livelli con caratteristiche di conducibilità elettrica molto differenti, quali i vuoti, essendo l'aria un mezzo scarsamente conduttivo, e pertanto, ad elevata resistività. E' comunque fondamentale rilevare, anche in questa sede, come queste indagini, come tutte quelle di tipo indiretto, presentano un grado di incertezza tale che esse possono essere considerate come indicative di una determinata situazione (ad esempio presenza di cavità), ma la cui effettiva presenza deve essere confermata da indagini di tipo diretto, quali, ad esempio, i sondaggi a distruzione di nucleo successivamente eseguiti.

Nell'**Area 3** sono state effettuate 6 stese elettrotomografiche, suddivise nelle due aree individuate tramite rilievi speleologici, come quelle a maggiore probabilità di interferenza cavità/tracciato.

Nei pressi della cosiddetta "Città Azteca" sono stati effettuati gli stendimenti **T07**, **T05**, **T02** e **T03**. Questi ultimi tre sono stati successivamente montati col sistema roll-along, in modo da ottenere una sezione elettrica longitudinale al tracciato della lunghezza complessiva di circa 300 m (Fig. 6.9).

Lo stendimento **T07** è stato, invece, utilizzato come rilievo di taratura, essendo stato realizzato al di fuori dell'area di tracciato, laddove le indagini speleologiche avevano già evidenziato la presenza di cavità nel sottosuolo. Le due principali anomalie resistive individuate tra le progressive 36 e 44 m, tra le profondità di 5 e 13 m dal p.c., e tra le progressive 64 e 70 m, oltre gli 8,5 m di profondità (Fig. 6.8), aventi forme sub-arrotondate e circoscritte, nonché i valori caratteristici di resistività misurati, sono compatibili con la presenza dei cunicoli individuati dai rilievi speleologici. Tuttavia non si può escludere che, come per altre anomalie individuate in questa sezione tomografica, esse non possano essere ricondotte a variazioni delle caratteristiche fisiche e meccaniche del complesso calcarenitico, che, come ampiamente descritto, presenta notevoli e significative variazioni al suo interno.

Lo stendimento elettrico **T02** non ha evidenziato anomalie significative, salvo un decremento dei valori di resistività con la profondità, probabilmente dovuto ad un miglioramento delle qualità tecniche dei depositi calcarenitici (Fig. 6.10). Le anomalie resistive di forma lenticolare nella porzione di terreno investigato più superficiale, possono essere associate a litotipi calcarenitici poco cementati, o a tentativi di scavo, successivamente ritombati.

Lo stendimento **T03** presenta una distribuzione dei valori di resistività del tutto analoga a quella descritta per lo stendimento T02 (Fig. 6.11).

Lo stendimento **T05**, invece, evidenzia la presenza di due anomalie elettriche, piuttosto marcate: la prima si estende tra le progressive 45 e 57,5 m, con profondità compresa tra 3,5 e 7,5 m dal p.c.; la seconda si estende tra le progressive 70 e 82,5 m, con profondità compresa tra 7,5 e 12,5 m dal p.c.

Queste anomalie sono del tutto confrontabili con quelle già descritte per lo stendimento **T07**, sia per forma che per valori di resistività, e pertanto compatibili con la presenza di cavità nel sottosuolo. In particolare, la prima anomalia è ubicata a basse profondità, essendo la volta dell'ipotetica cavità ubicata a 3,5 m dal p.c. Al fine di verificare direttamente l'effettiva presenza di questa cavità, si è pertanto deciso di eseguire un sondaggio a distruzione di nucleo (ST05), nel punto centrale rispetto allo sviluppo dell'anomalia (Fig. 6.12). **Questo non ha riscontrato la presenza di alcuna cavità, evidenziando solamente un minor grado di cementazione della calcarenite a partire dai 4,4 m di profondità.**

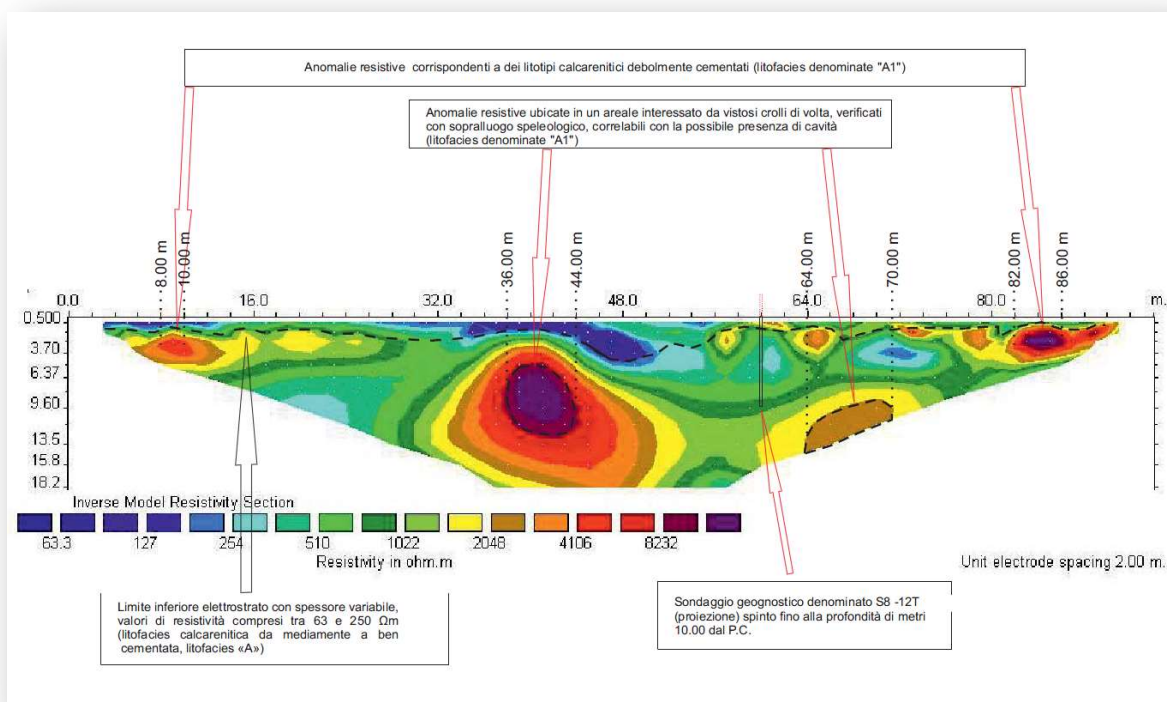


Fig. 6.8 – Sezione elettrotomografica dello stendimento ST07, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

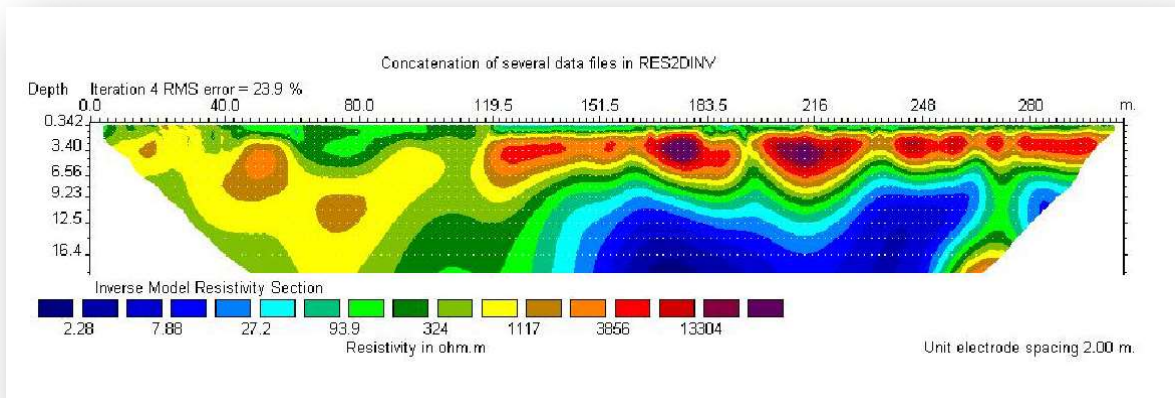


Fig. 6.9 – Sezione elettrotomografica roll-along degli stendimenti T05, T02 ed T03 (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

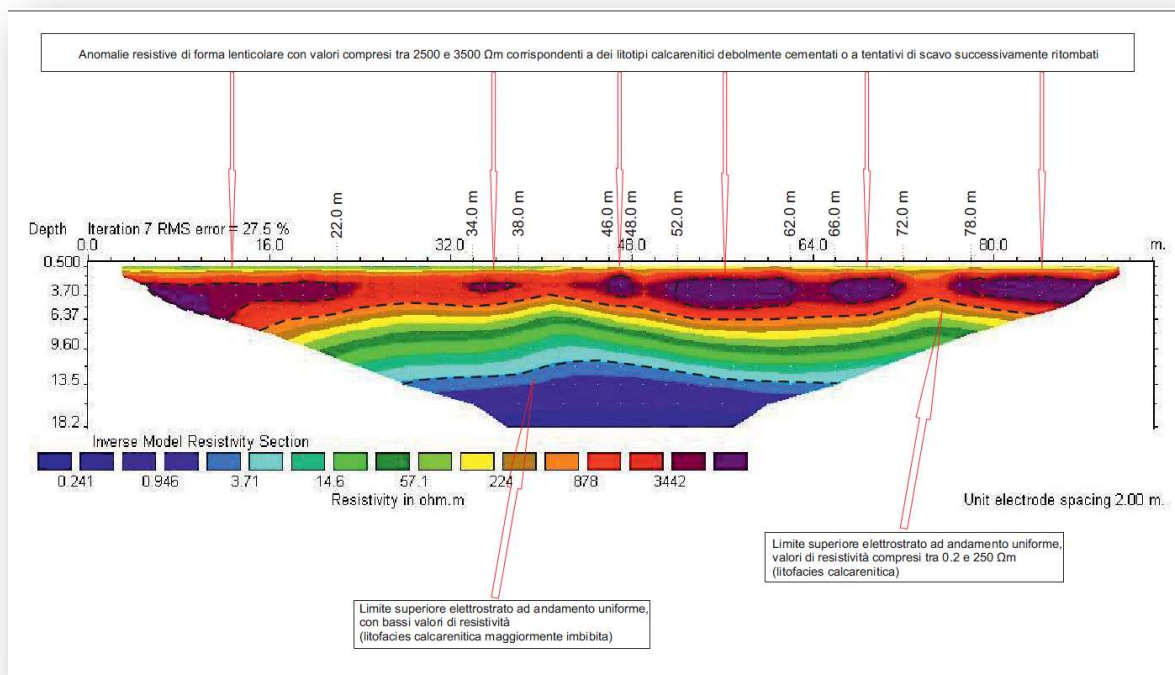


Fig. 6.10 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T02, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

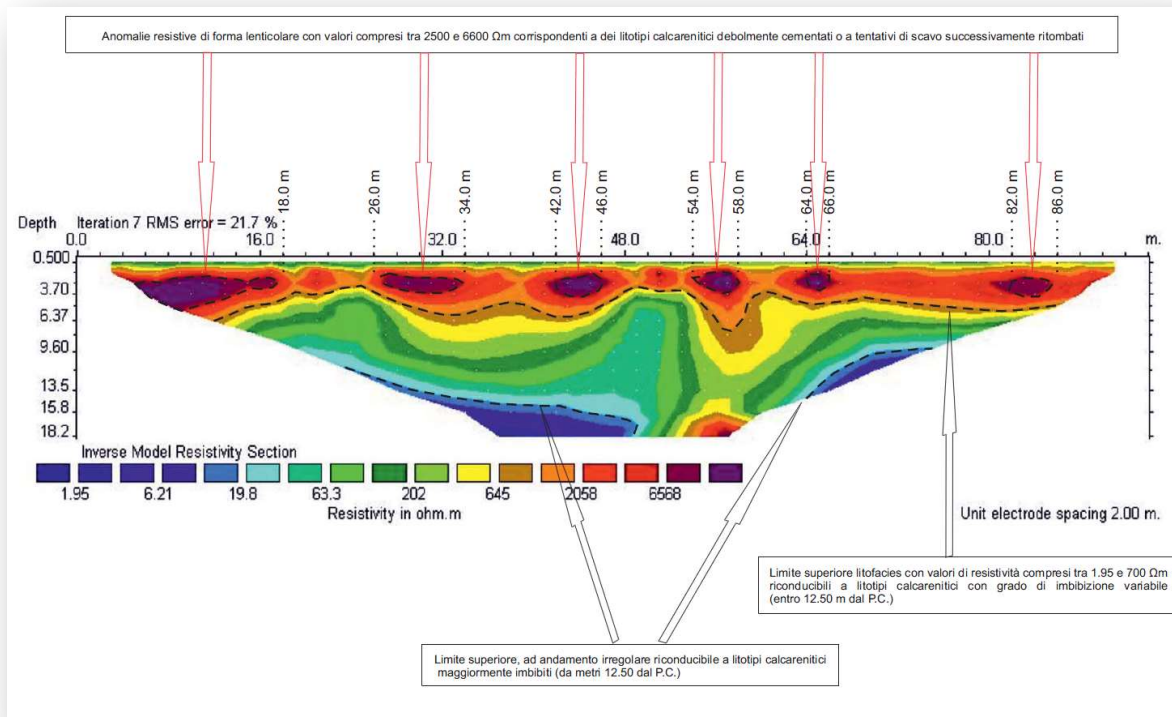


Fig. 6.11 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T03, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

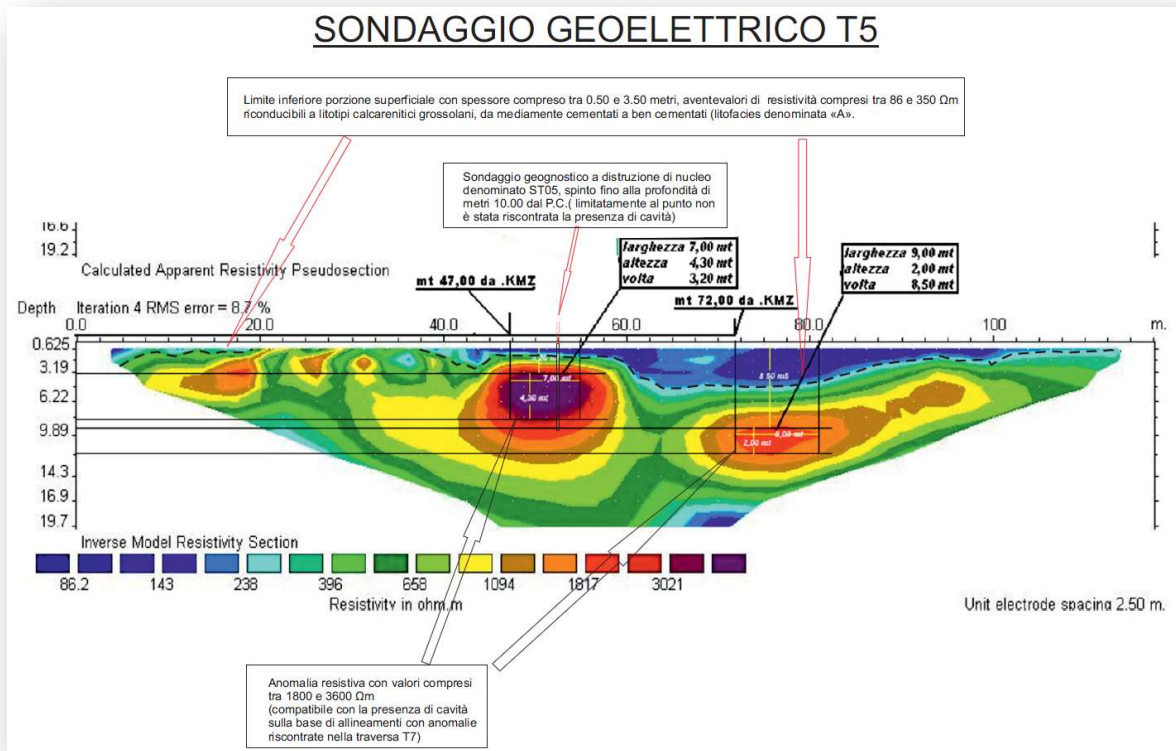


Fig. 6.12 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T05, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

Sempre nell'Area di indagine 3 sono state condotte altre indagini geoelettriche, con due stendimenti, T01 e T04, al fine di verificare l'effettiva presenza di cunicoli sotterranei, così come ipotizzato dall'indagine speleologica.

Lo stendimento T01 (Fig.6.13) ha evidenziato la presenza di un'unica anomalia resistiva, molto marcata, tra le progressive 37,5 e 60 m, a profondità dal p.c. compresa tra 6 e 12 m.

Anche sulla base delle considerazioni di carattere speleologico, illustrate nel precedente paragrafo, basate sul fatto che quest'ultima anomalia risulta essere perfettamente allineata rispetto ad un cunicolo occluso, ubicato a SO del tratto stradale in questione (Fig. 6.14; area in rosso/giallo) e probabilmente collegato con un fronte di cava posto in direzione NE, a monte del tratto stradale, si è deciso, anche in questo caso, di procedere all'esecuzione di un sondaggio meccanico, a distruzione di nucleo.

Questo sondaggio (ST01) è stato ubicato in corrispondenza dell'asse centrale dell'anomalia. Esso non ha intercettato alcuna cavità, evidenziando, unicamente, la presenza di uno strato all'interno del complesso calcarenitico, a minore cementazione, tra i 7,3 e i 9 m dal p.c..

Lo stendimento **T04**, eseguito in continuità con quello T01, non ha evidenziato, invece, anomalie particolari (Fig. 6.15). Questi due stendimenti sono stati successivamente montati col sistema roll-along.

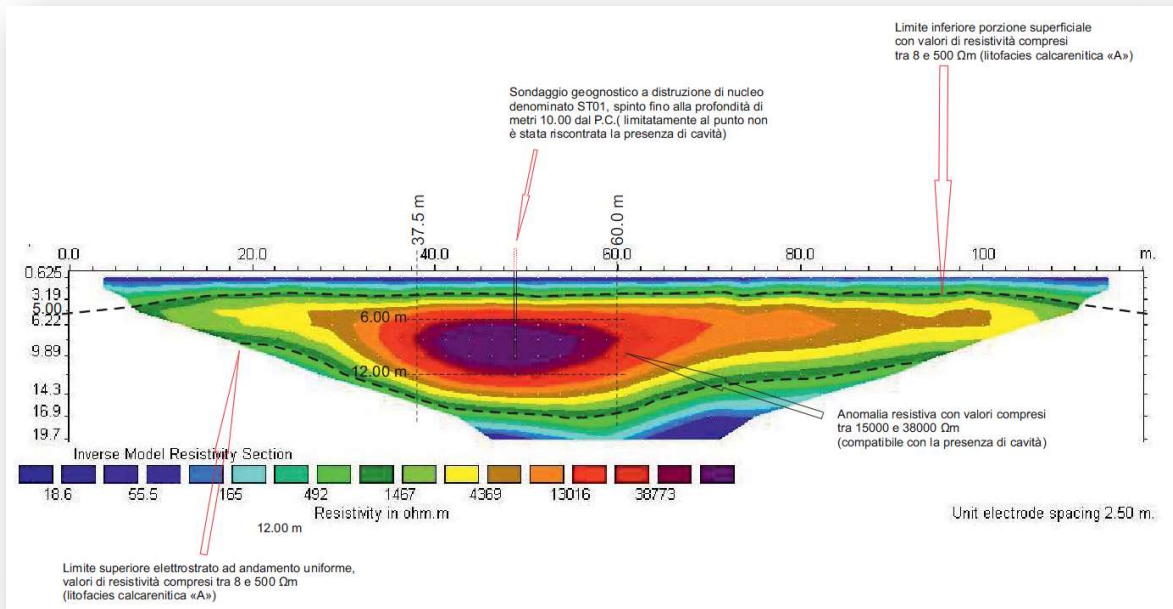


Fig. 6.13 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T01, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).



Fig. 6.14 – Immagine tratta da Google Earth dell'area investigata tramite rilievi speleologici e con gli stendi menti elettrotomografici T01 e T07 (linee rosse parallele alla sede stradale esistente). Le linee arancioni, circa perpendicolari all'asse stradale, mostrano l'ipotetico andamento di un cunicolo sotterraneo, congiungente la cava a NE con i cunicoli effettivamente ispezionati dagli speleologi, a SW. Il sondaggio ST01, ubicato in corrispondenza dell'anomalia riscontrata nello stendimento T01, non ha intercettato cavità.

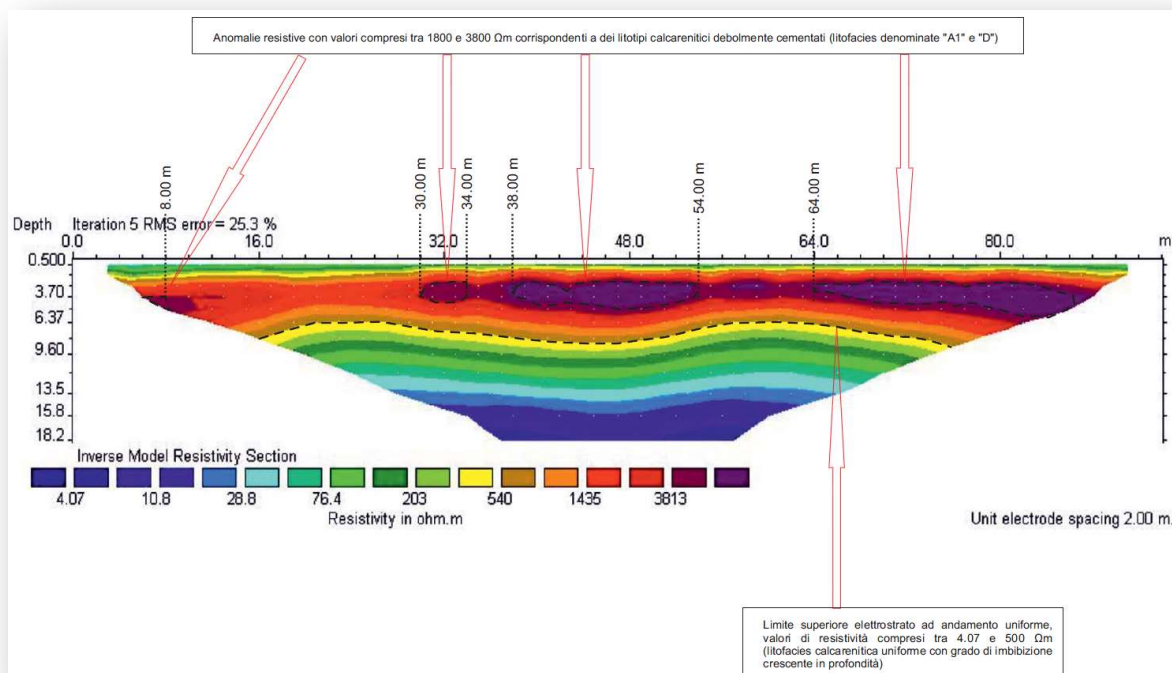


Fig. 6.15 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T04, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

Nell'Area 4 è stato realizzato lo stendimento T06, che non ha evidenziato la presenza di anomalie resistive riconducibili a presenza di cavità, ma unicamente uno strato superficiale più resistivo, dovuto alla presenza di calcareniti debolmente cementate, o, in qualche caso, a tentativi di apertura di fronti di scavo, successivamente ritombati (Fig. 6.16).

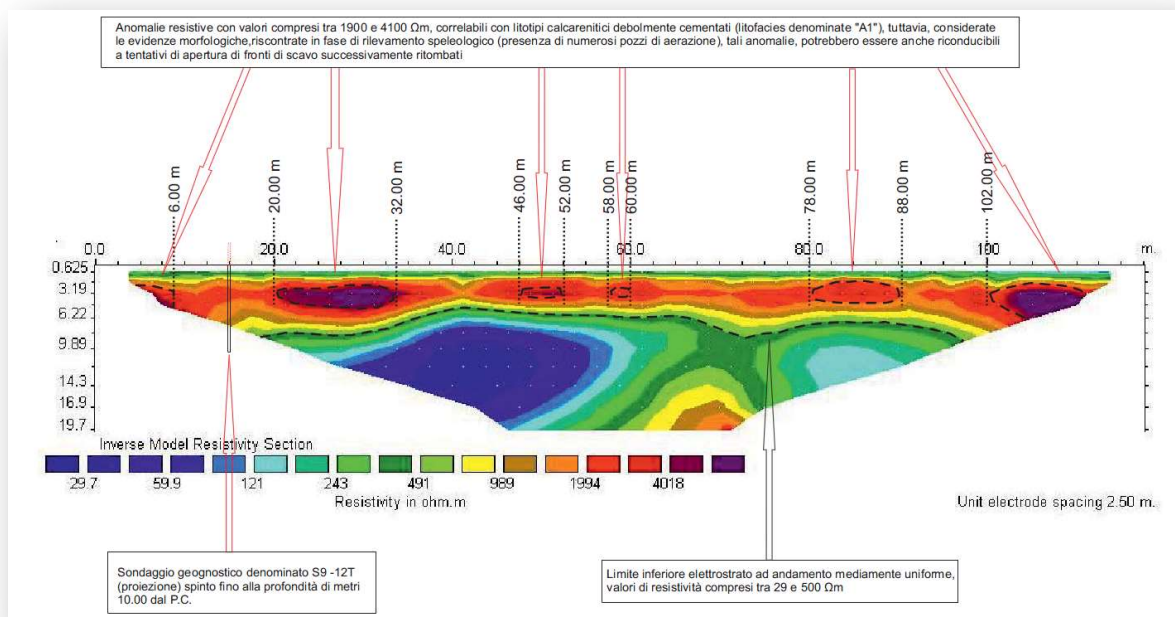


Fig. 6.16 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T06, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

Nell'Area 5 è stato eseguito il rilievo elettrotomografico T08, che ha evidenziato alcune anomalie resistive significative ben localizzate e circoscritte (Fig. 6.17). Tali anomalie, sulla base dell'esperienza diretta constatata in ambienti analoghi e di alcuni allineamenti tra pozzi di aerazione e fronti di cava occlusi, rilevanti in fase speleologica, sono stati correlati alla presenza di porzioni calcarenitiche debolmente cementate nonché possibili cavità di origine antropica.

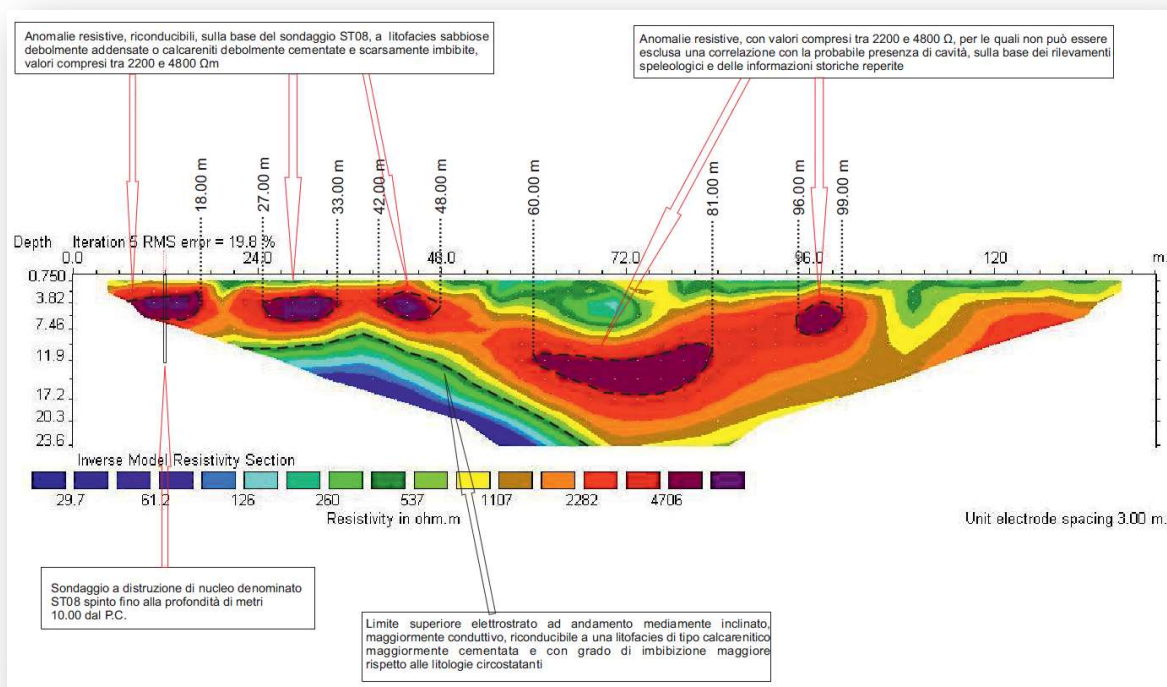


Fig. 6.17 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T08, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

In particolare, le anomalie più superficiali, ed ubicate nella parte iniziale dello stendimento, sono state associate alla presenza di livelli più sabbiosi, debolmente cementati, del complesso calcarenitico. **Il sondaggio a distruzione di nucleo (ST08) ha confermato tale ipotesi, non avendo esso intercettato alcuna cavità, ma evidenziando un minore grado di cementazione oltre i 3 m di profondità.** L'anomalia riscontrata, invece, tra le progressive 60 e 81 m, a circa 10 m di profondità dal p.c. presenta caratteristiche, sia geometriche che di valori di resistività, tali da poter essere correlata alla presenza di una cavità di origine antropica. Essa non è stata investigata con metodi diretti (sondaggio meccanico).

Nell'Area 6 non sono state condotte analisi né con metodi indiretti, né con metodi diretti, mentre nell'Area 7 è stato effettuato lo stendimento T09 e i sondaggi a distruzione di nucleo ST09A e ST09B. Lo stendimento T09 ha riscontrato la presenza di una serie di anomalie di resistività, tutte allineate lungo la sezione elettrotomografica, a profondità comprese tra i 3 e gli 8 m dal p.c.. I sondaggi a distruzione di nucleo denominati ST09A e ST09B (eseguiti rispettivamente nel settore centrale dell'anomalia riscontrata tra le progressive 30 e 45 m e nel settore centrale dell'anomalia riscontrata tra le progressive 117 e 132 m della traversa elettrica T9) **hanno evidenziato la presenza di livelli calcarenitici debolmente cementati in corrispondenza delle anomalie resistive, non intercettando alcuna cavità (Fig. 6.18).**

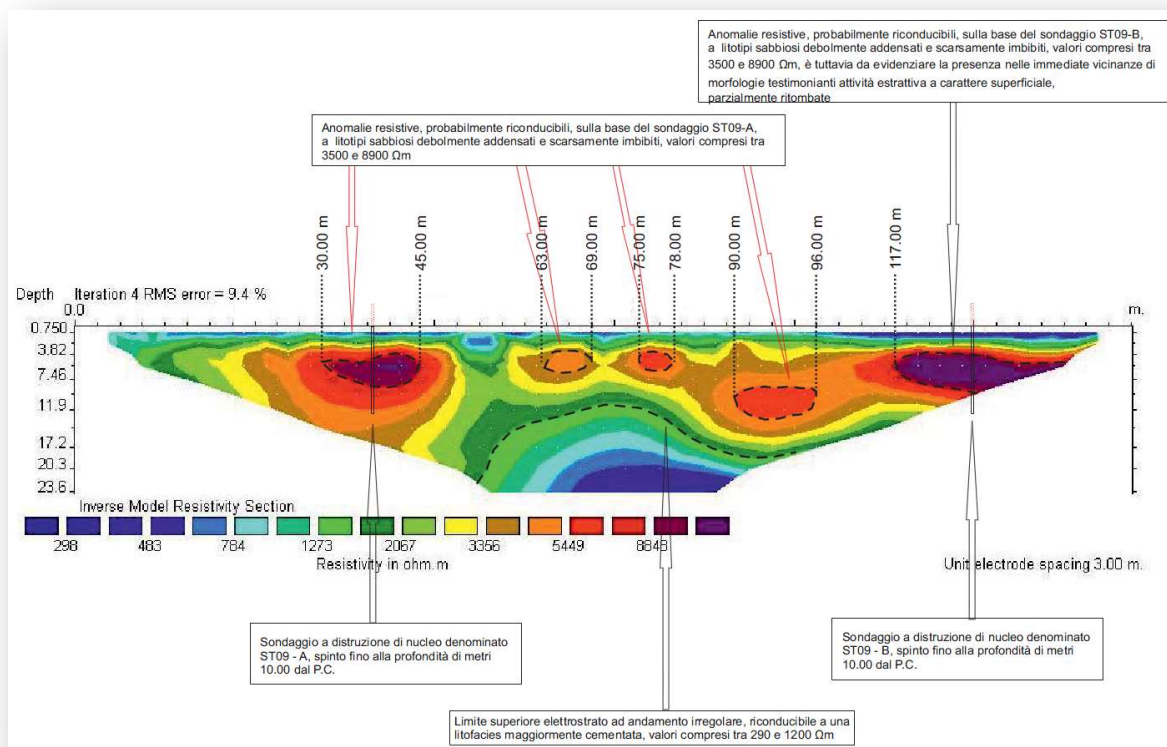


Fig. 6.18 – Sezione elettrotomografica dello stendimento T09, con relativa interpretazione (cfr. Relazione Generale – Indagine Geoelettrica-tomografica).

6.5 LE INDAGINI GEOELETTRICHE ED ELETTROMAGNATOMETRICHE 2021

Nel 2021, in relazione a quanto sopra descritto, nell'ambito delle indagini integrative è stata particolarmente analizzata la criticità residua inerente la possibile, ancorché poco probabile, presenza di cavità\cunicoli in asse tracciato. Pertanto, sono state attentamente valutate tutte le possibili modalità di analisi di dettaglio dell'area a maggior rischio, individuata dalle fasi precedenti.

Dopo aver escluso altre modalità di indagine per particolari condizioni sito specifiche, si è quindi optato per una indagine geoelettrica tomografica di dettaglio, affiancata da una indagine elettromagnetometrica opportunamente tarata, poggiante sul rilievo mediante drone precedentemente descritto.

In particolare, si è prevista l'esecuzione di due linee tomografiche elettriche parallele, distanziate 4 m l'una dall'altra, ed approfondimenti specifici ai lati del tracciato indagato, mediante tomografia elettrica 3D, per tratti di circa 65 m di lunghezza e 6 m di larghezza.

Si è deciso inoltre di effettuare gli approfondimenti mediante elettromagnetometro multi frequenza, previa verifica in situ della fattibilità e della risposta dello strumento. La verifica è stata condotta con successo in situazioni di presenza di cavità poste a circa 5 m da p.c. e anche in assenza di cavità, sulle stesse formazioni presenti nell'area di studio. Grazie a questa verifica la risposta dello strumento è stata tarata alla massima sensibilità.

L'utilizzo dell'elettromagnetometro ha dunque consentito di coprire la totalità della tratta prevista e, nel contempo, di verificare con metodologia complementare, anche i risultati ottenuti con la tomografia elettrica. Tutti i risultati sono riportati nello specifico elaborato.

6.6 CONSIDERAZIONI SULLA PROBABILITÀ DI INTERFERENZA TRACCIATO/CAVITÀ

Alla luce di quanto emerso nelle varie fasi e delle diverse tipologie di indagine precedentemente illustrate, si possono evidenziare i seguenti aspetti:

- 1) Non sono state riscontrate, nel corso delle indagini speleologiche e geofisiche, cavità antropiche al di sotto dell'area direttamente interessata dal tracciato in progetto;
- 2) I sondaggi eseguiti in corrispondenza delle anomalie di resistività 2012 non hanno intercettato vuoti, ad eccezione del sondaggio a distruzione di nucleo (SD23) del Progetto Preliminare, dove una piccola cavità naturale di circa 40 cm è stata intercettata alla profondità di 5,7 m dal p.c..
- 3) La campagna 2021, eseguita con metodiche ed attrezzature altamente specialistiche nella zona a maggior rischio, **ha escluso la presenza di cavità.**

La variabilità del valore di resistività, ben evidente negli elaborati, è ascrivibile alle peculiarità di questo litotipo, quale ad esempio la notevole variabilità del grado di cementazione delle calcareniti, testimoniato dai sorprendenti valori di peso di volume emersi dalle indagini di laboratorio.

7 INQUADRAMENTO SISMICO

7.1 MACROSISMICITÀ DELL'AREA DI STUDIO

L'assetto strutturale della Sicilia occidentale, così come quello dell'intera isola (Fig.7.1), è il risultato di una complessa evoluzione geodinamica legata alla convergenza tra la placca africana e quella euroasiatica.

La catena di sovrascorrimenti che caratterizza la Sicilia (*fold-and-thrust belt*), Sud-vergente, si è sviluppata a partire dall'inizio del Miocene all'interno della struttura convergente (circa N-S) della placca Africa-Europa. Il fronte più esterno e più recente del sovrascorrimento Maghrebide forma un ampio arco convesso verso sud, percorrendo per gran parte della sua lunghezza la costa meridionale della Sicilia off-shore. Sull'isola affiora solamente nella porzione più orientale tra Gela e Catania. Nel settore continentale la recente attività del fronte del sovrascorrimento è testimoniata dalla deformazione dei depositi di Plio-quadernari di avanfossa, e a sud dell'Etna, dei depositi marini e fluviali dal tardo Pleistocene all'Olocene.

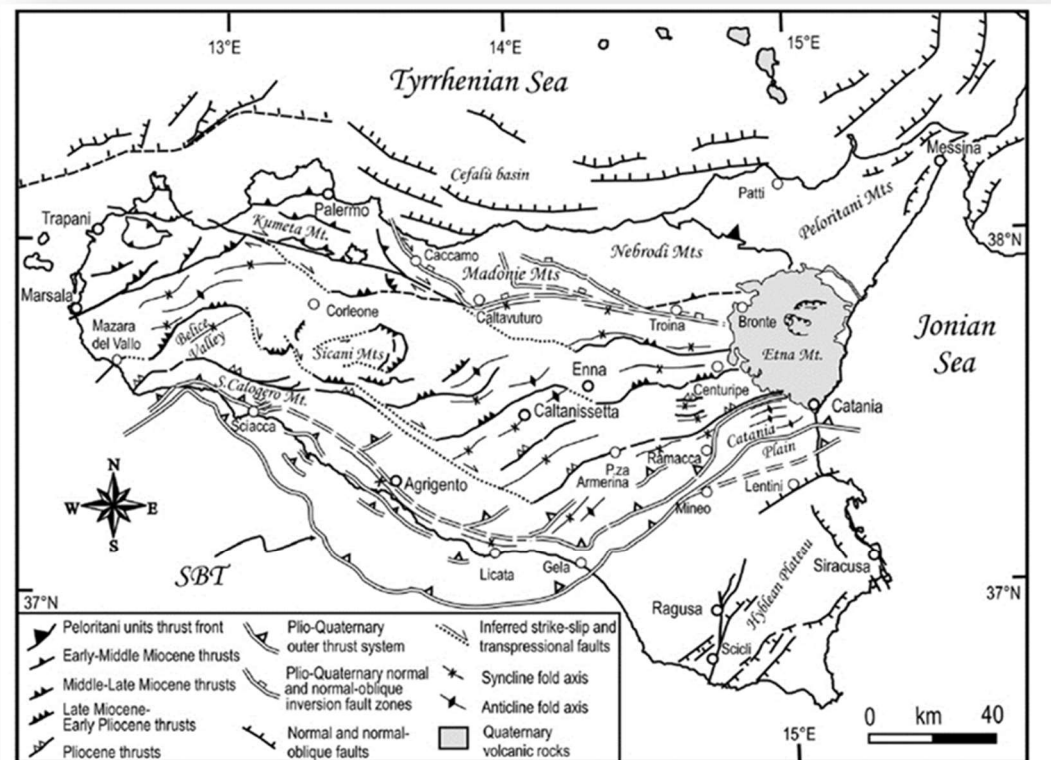


Fig. 7.1 – Mappa strutturale della Sicilia. I diversi elementi tettonici sono stati per lo più ripresi dal Modello Strutturale dell'Italia, in scala 1:500.000 (Bigi et al., 1991), integrati ed implementati dalle informazioni derivanti da mappe locali più dettagliate (da Lavecchia et al., 2007).

Alla presenza di questi sovrascorrimenti, Sud-vergenti, è associata gran parte della storia sismica che ha interessato la Sicilia, e quindi il settore in esame, come rappresentato nelle Figg. 7.2 e 7.3, che mostrano la distribuzione dei terremoti connessi ai piani di sovrascorrimento immergenti verso Nord.

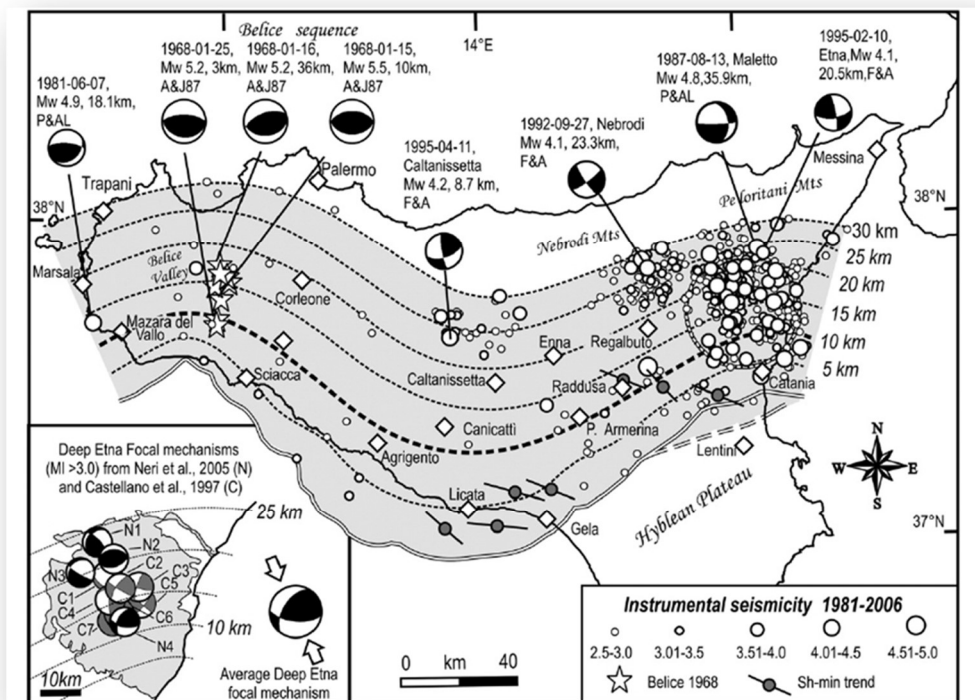


Fig. 7.2 – Terremoti strumentali con $M_I > 2.5$, avvenuti tra il 1981 ed il 2006 nell'area in grigio al di sopra delle isolinee rappresentanti profondità comprese tra gli 0 ed i 30 km (da Lavecchia et al., 2007).

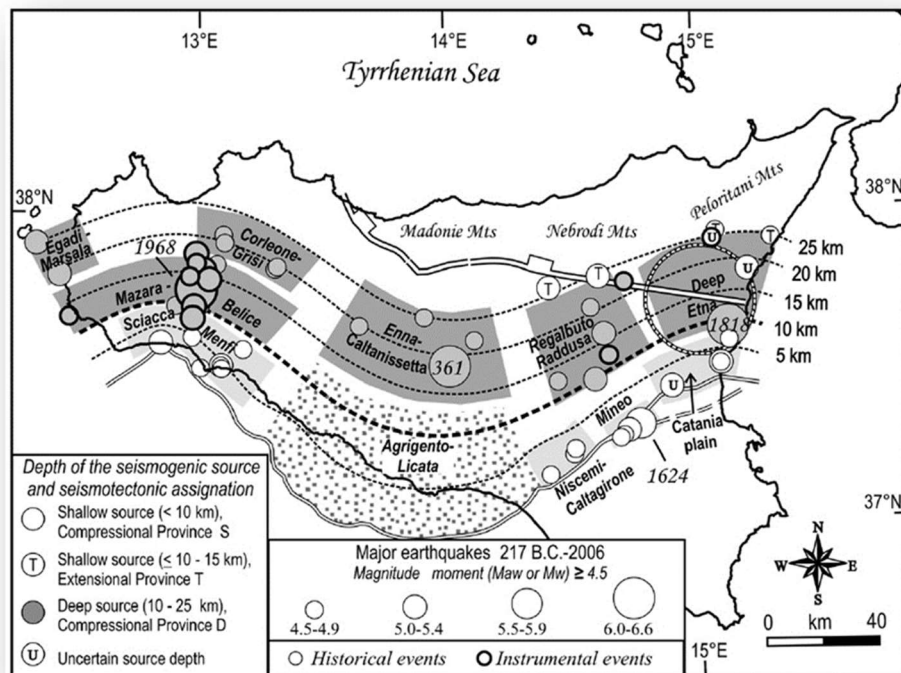


Fig. 7.3 – Distribuzione epicentrale degli eventi sismici, suddivisi in funzione della profondità della sorgente (superficiale o profonda) e del meccanismo focale (compressivo o estensionale). Le aree in grigio scuro e in grigio chiaro, lungo le isobate, distinguono le zone sismiche situate sopra la crosta superficiale e la crosta inferiore. L'area puntinata corrisponde alla zona sismica Agrigento - Licata (da Lavecchia et al., 2007).

L'area del Belice, così come la Piana compresa tra Marsala e Mazara del Vallo, è localizzata nel settore della catena a thrust siciliana nota come Catena Sicana (Fig. 7.4). In quest'area l'attività tettonica compressiva ha interagito con quella trascorrente legata al proseguimento in terra della linea di trascorrenza N-S. Due lineamenti tettonici, la faglia del Belice e quella di Sciacca, che sono connesse con le strutture distensive del Canale di Sicilia, sono stati attivi nel tardo Pleistocene con cinematica traspressiva (Rigano et al., 2004).

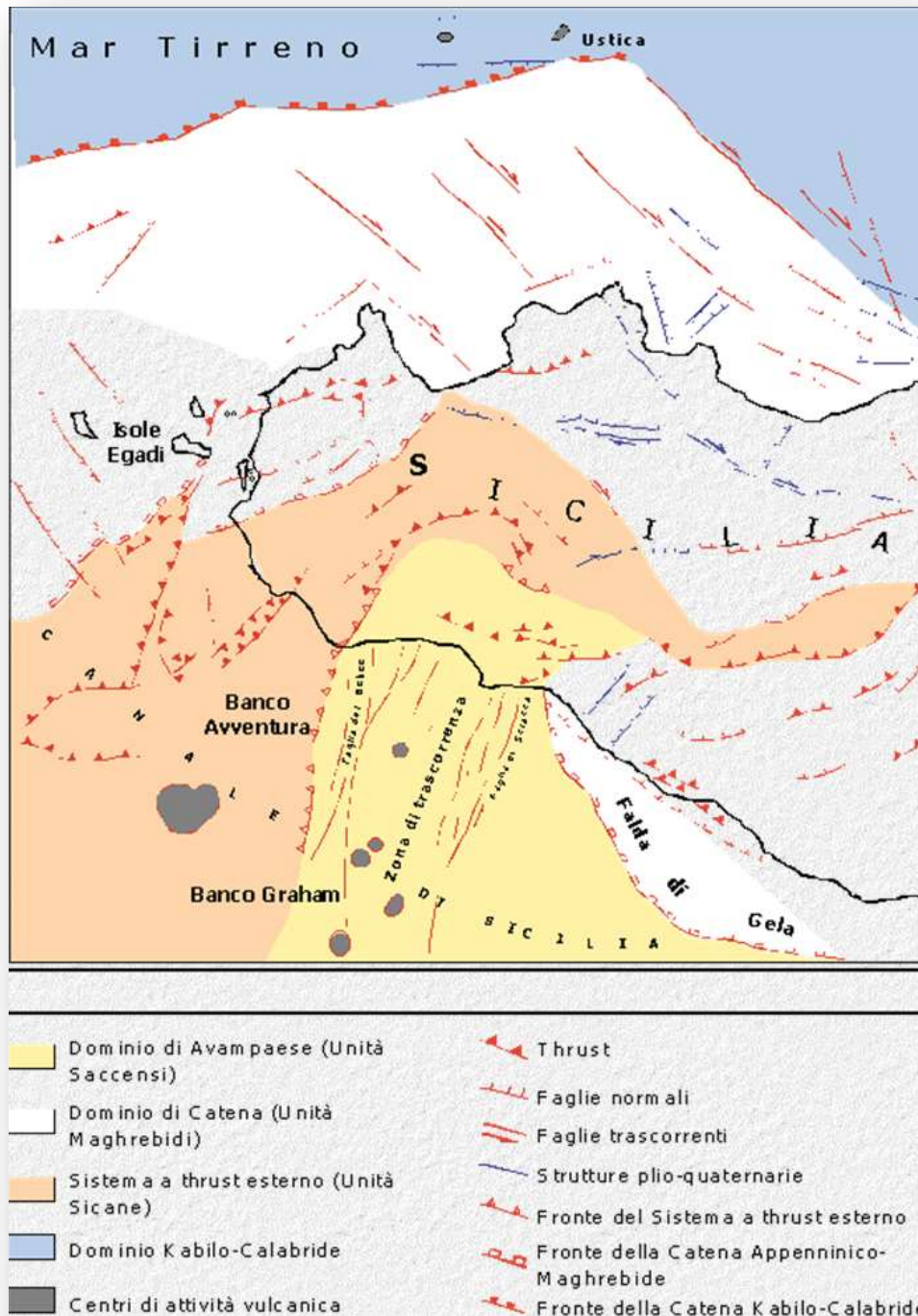


Fig. 7.4 – Schema strutturale della Sicilia occidentale (da Rigano et al., 2004).

Queste considerazioni di carattere geodinamico generale hanno consentito di definire il quadro delle sorgenti sismogenetiche che caratterizzano l'intera isola. Come avviene per l'intero territorio nazionale, esse sono contenute

nel database DISS (Database of Individual Seismogenic Sources - Vers. 3.1.1) redatto dall'INGV e consultabile sul suo sito istituzionale (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>).

In questo database, vengono distinte le sorgenti sismogenetiche "individuali" da quelle "composita" (Individual and Composite sismogenetic sources). In particolare, una sorgente sismogenetica "composita" è una struttura, desunta sulla base di considerazioni di carattere regionale e dati geologici di sottosuolo, che abbraccia un numero imprecisato di sorgenti individuali. Queste sorgenti non vengono considerate come capaci di un terremoto di specifica magnitudo, mentre le caratteristiche strutturali sono in genere documentate da attività dal Pleistocene superiore all'Attuale. L'intero lavoro di definizione di questo database è finalizzato all'analisi di pericolosità sismica con approccio probabilistico, che trova applicazione negli studi di risposta sismica locale.

La Fig. 7.5 rappresenta uno stralcio della Mappa di queste Zone Sismogenetiche, relativa alla zona di indagine (viene riportato il tracciato in progetto). In essa, infatti, sono rappresentate le principali sorgenti sismogenetiche capaci di generare terremoti nell'area tra Marsala e Mazara, e rappresentate dalle linee e dalle aree in arancione. Nella figura si distinguono tre diverse sorgenti di tipo "composito", elencate dalla più settentrionale alla più meridionale:

- ✓ *ITCS014 del Tirreno Meridionale*, con direzione E-W dal Canale di Sicilia alle Isole Eolie, circa 50 km a nord delle coste siciliane, responsabile, negli ultimi 30 anni, di molti eventi con $M > 5$, tra cui il Terremoto di Palermo del 2002 (MW 5.9). Massima Magnitudo attesa 6.2;
- ✓ *ITCS021 Marsala-Belice*, che, nel suo settore più occidentale, attraversa il territorio della Piana di Marsala-Mazara, responsabile anche del terremoto di Mazara del 1981. Massima magnitudo attesa 5.6;
- ✓ *ITCS006 Castelvetro-Gela*, che rappresenta l'affioramento del sistema di sovrascorrimenti della catena Appennino-Maghrebide lungo la costa meridionale della Sicilia. Massima Magnitudo attesa 5.5.

Trattandosi di una sorgente sismogenetica ricadente sul territorio in esame, si ritiene in questa sede opportuno soffermarsi sulle caratteristiche della *ITCS021 Marsala-Belice*. Tale sorgente "composita" appartiene al sistema di sovrascorrimento Appennino-Maghrebide più occidentale della Sicilia. Si ritiene che la sorgente ITCS021 si estenda come un sovrascorrimento in direzione E-W, localizzato nell'entroterra del fronte esterno del sovrascorrimento Maghrebide.

I cataloghi storici e strumentali mostrano fenomeni sismici dispersi e a bassa magnitudo nella Sicilia occidentale. L'unico terremoto distruttivo è occorso nel settore più orientale di questa sorgente "composita", nella Valle del Belice, durante la sequenza sismica del 1968, con il mainshock del 15 gennaio 1968 (MW = 5.6). E' quindi presumibile che questo settore del sistema di sovrascorrimenti Appennino-Maghrebide sia caratterizzato da infrequenti terremoti di moderata intensità, generati da segmenti sepolti del sistema stesso.

La direzione di questa sorgente "composita" è stata dedotta dall'orientazione complessiva delle strutture tettoniche mappate (N 250°-290°). L'immersione è stata dedotta da considerazioni di geologia regionale, concernenti il

piano di sovrascorrimento ($40^\circ - 60^\circ$). Basandosi su considerazioni geodinamiche generali, si può parlare di un sovrascorrimento avente una componente di movimento laterale destra. Il tasso di scorrimento è stato dedotto da dati geodinamici regionali, ed è stato stimato variabile tra 0,1 e 0,5 mm/anno. La massima magnitudo attesa e associata a tale sorgente è pari a 5.6.

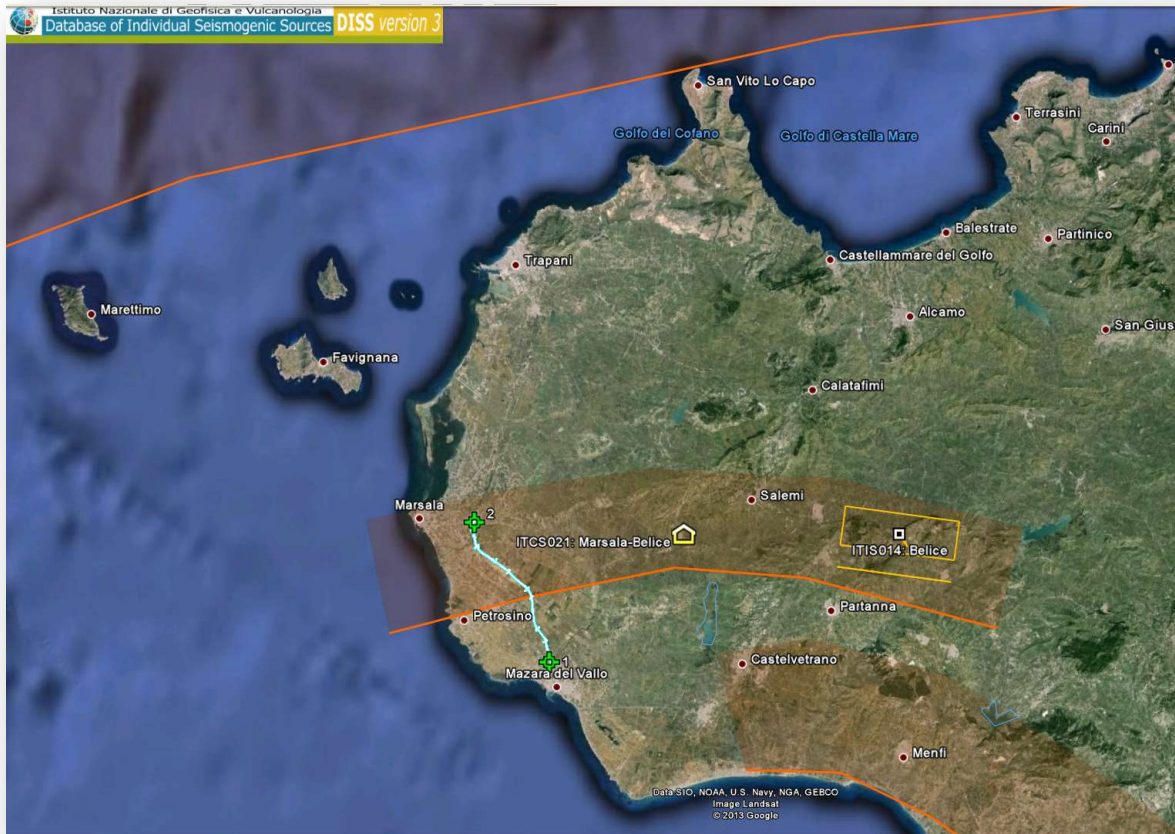


Fig. 7.5 – Mappa delle sorgenti sismogenetiche (in arancione) dell'area di studio (fonte: DISS - Database of Individual Seismogenic Sources - Vers. 3.1.1).

7.2 CARATTERISTICHE SISMICHE DI DETTAGLIO DELL'AREA DI STUDIO

Secondo le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018), è necessario tener conto di un quadro sismico a livello locale.

A tal fine sono stati presi in considerazione l'attuale classificazione sismica in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido (O.P.C.M. 3519 del 28/04/2006) dei comuni interessati dal tracciato stradale in progetto (Marsala,

Petrosino e Mazara del Vallo, tutti in Provincia di Trapani), la loro storia sismica, la Mappa di pericolosità sismica di riferimento per l'intero territorio nazionale, nonché i parametri spettrali di risposta elastica relativi agli stessi comuni.

I tre comuni presi in considerazione ricadono tutti nella zona sismica 2 (Fig. 7.6), secondo la normativa regionale vigente della Regione Siciliana (D.G.R. 19 dicembre 2003, n. 408), denominata "Individuazione, formazione ed aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche ed adempimenti connessi al recepimento ed attuazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20 marzo 2003, n. 3274".

L'Allegato 1b dell'Ordinanza P.C.M. 3519/2006 presenta i valori di pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Le mappe di pericolosità sismica, Gruppo di Lavoro MPS (2004), riportano le accelerazioni di cui prima, per ogni comune (Fig. 7.7).

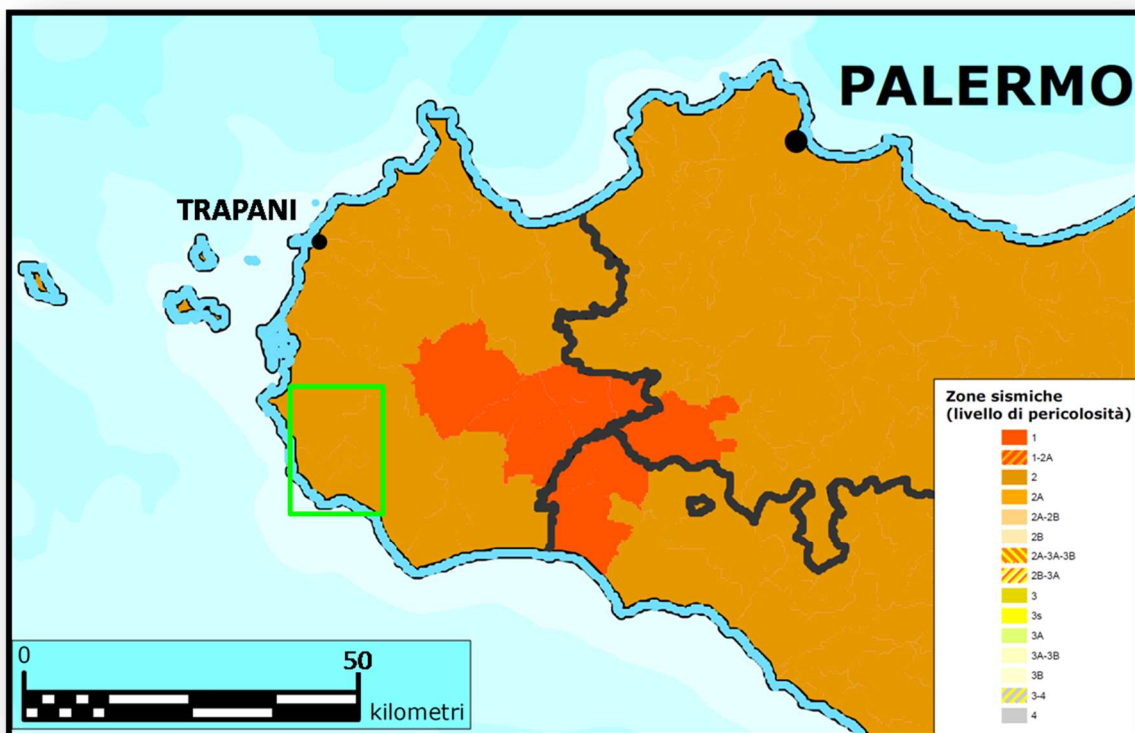


Fig. 7.6 - Stralcio della Mappa di classificazione sismica della provincia di Trapani; nel riquadro in verde l'area interessata dalla opere in progetto (http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/class2012_02prov.pdf).

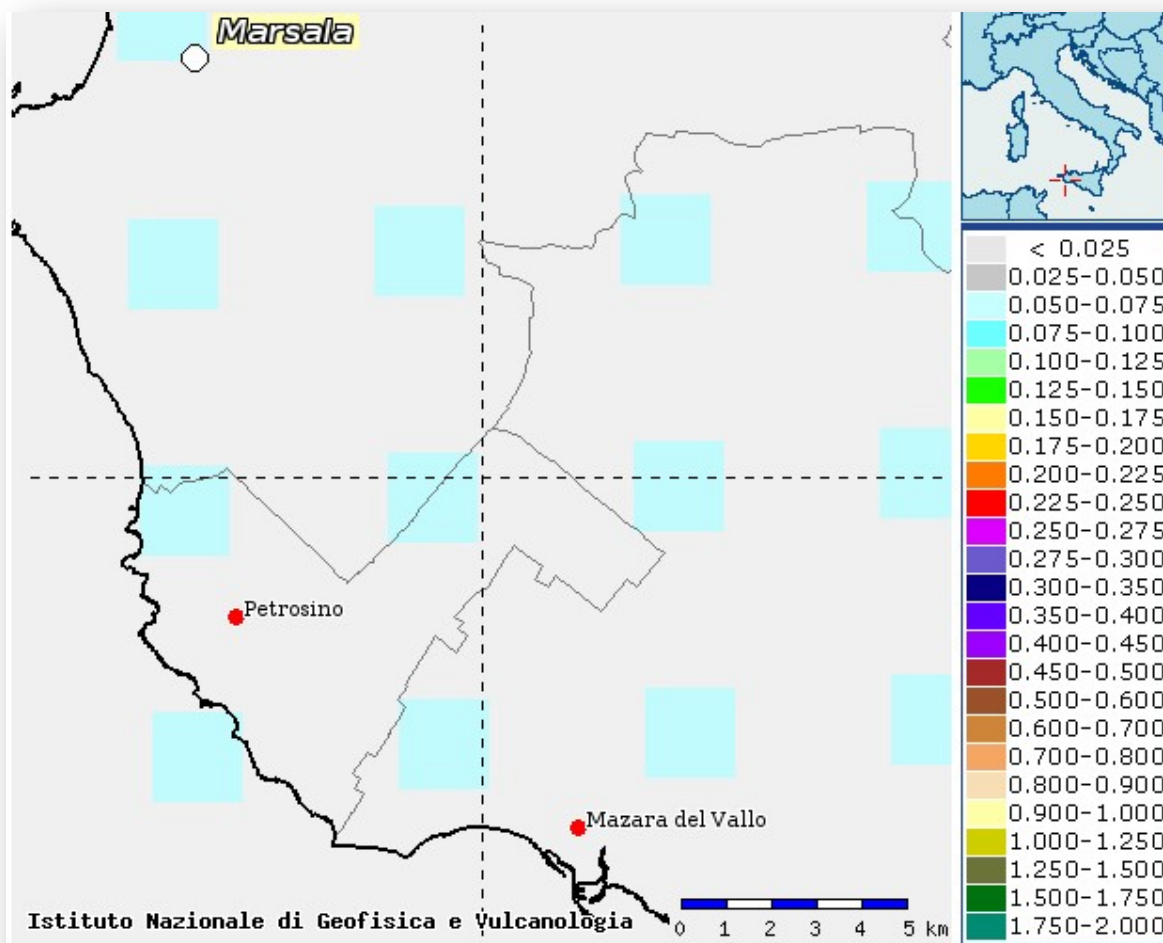


Fig. 7.7 - Stralcio riferito all'area oggetto di studio (dal sito <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) della Mappa di pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale (prevista dall'Ordinanza PCM 3519 del 28 aprile 2006, All. 1b), espressa in termini di accelerazione massima (ag) del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a suoli rigidi ($V_{s30} > 800$ m/s; cat. A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005).

La storia sismica dei Comuni di Marsala e Mazara del Vallo è stata ricavata dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (versione CPTI11) (disponibile sul sito dell'INGV all'indirizzo: <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>), che rappresenta il più completo e aggiornato database dei parametri macrosismici e strumentali dell'intero territorio nazionale.

Nelle Figg. 7.8 e 7.9 vengono riportate sia la tabella riassuntiva della storia sismica che i grafici intensità macrosismica/tempo per il comune preso in considerazione.

L'azione sismica di riferimento per la progettazione viene definita sulla base dei valori di pericolosità sismica proposti nel sito ufficiale dell'INGV (<http://esse1.mi.ingv.it/>). Queste stime di pericolosità sismica sono state in seguito elaborate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per ottenere i parametri che determinano la forma dello spettro

di risposta elastica; tali parametri, elaborati tramite il software "Spettri 1.03" (disponibile sul sito istituzionale del C.S.L.P.) sono riportati per i Comuni presi in considerazione nelle tabelle in basso a destra delle Figg. 7.8 e 7.9. In questa tabella, così come nelle Figg. 7.10 e 7.11 per il Comune di Marsala, e nelle Figg. 7.12 e 7.13 per il Comune di Mazara del Vallo, vengono riportati i valori dei seguenti parametri per i diversi tempi di ritorno (TR espressi in anni) previsti:

- ✓ a_g : accelerazione iniziale massima al sito (unità di misura: g);
- ✓ f_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- ✓ T_c : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (secondi).

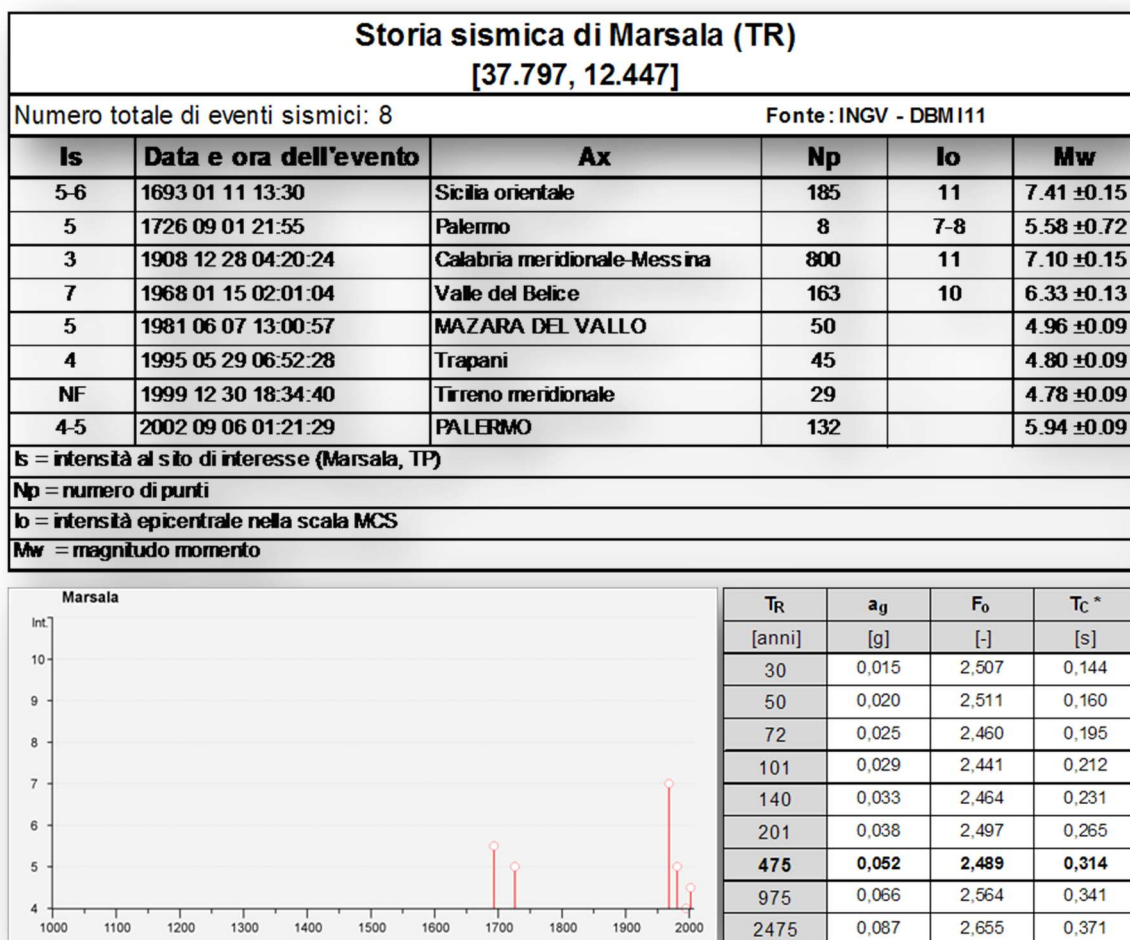


Fig. 7.8 - Storia sismica del Comune di Marsala (TP) e tabella dei parametri spettrali di risposta elastica (elaborato da Software "Spettri 1.3", Consiglio Sup. LL. PP.).

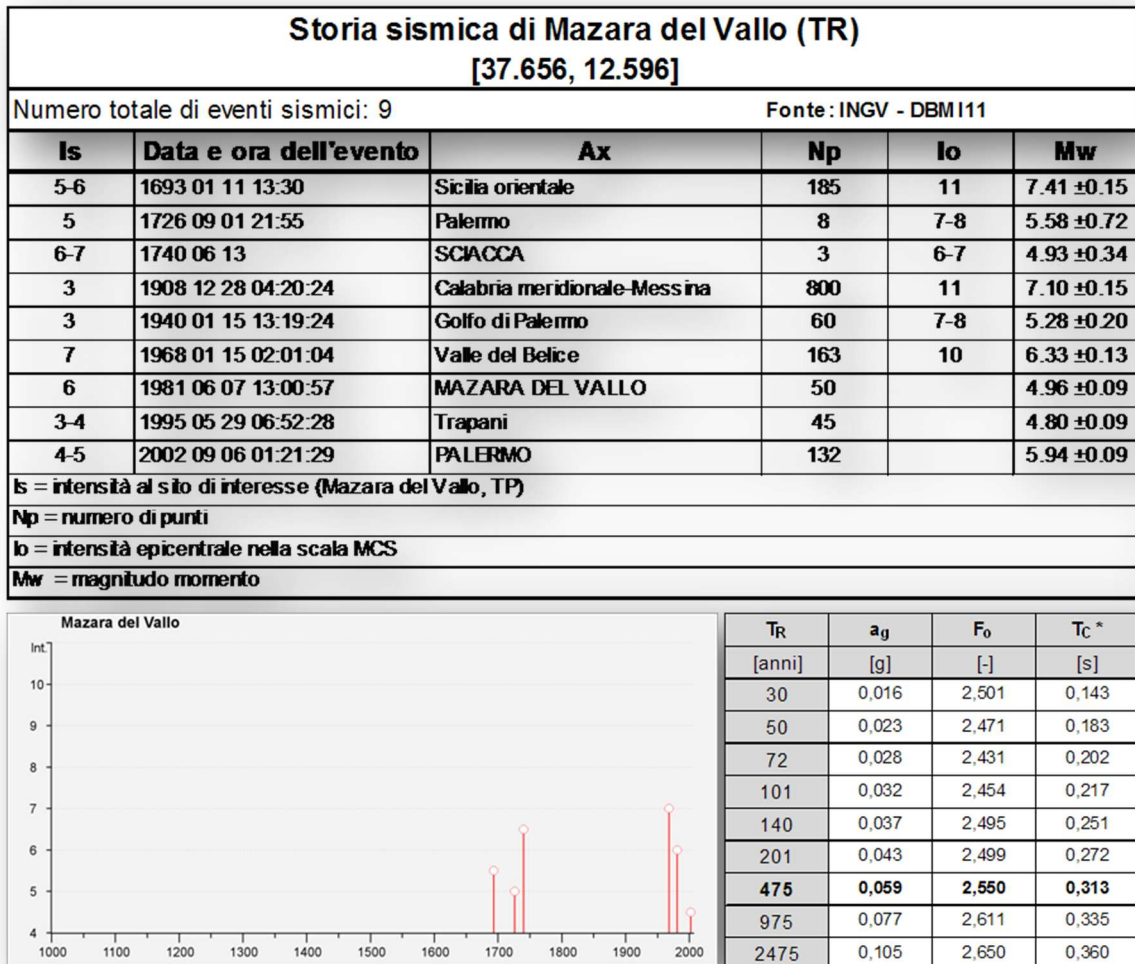


Fig. 7.9 - Storia sismica del Comune di Mazara del Vallo (TP) e tabella dei parametri spettrali di risposta elastica (elaborato da Software "Spettri 1.3", Consiglio Sup. LL. PP.).

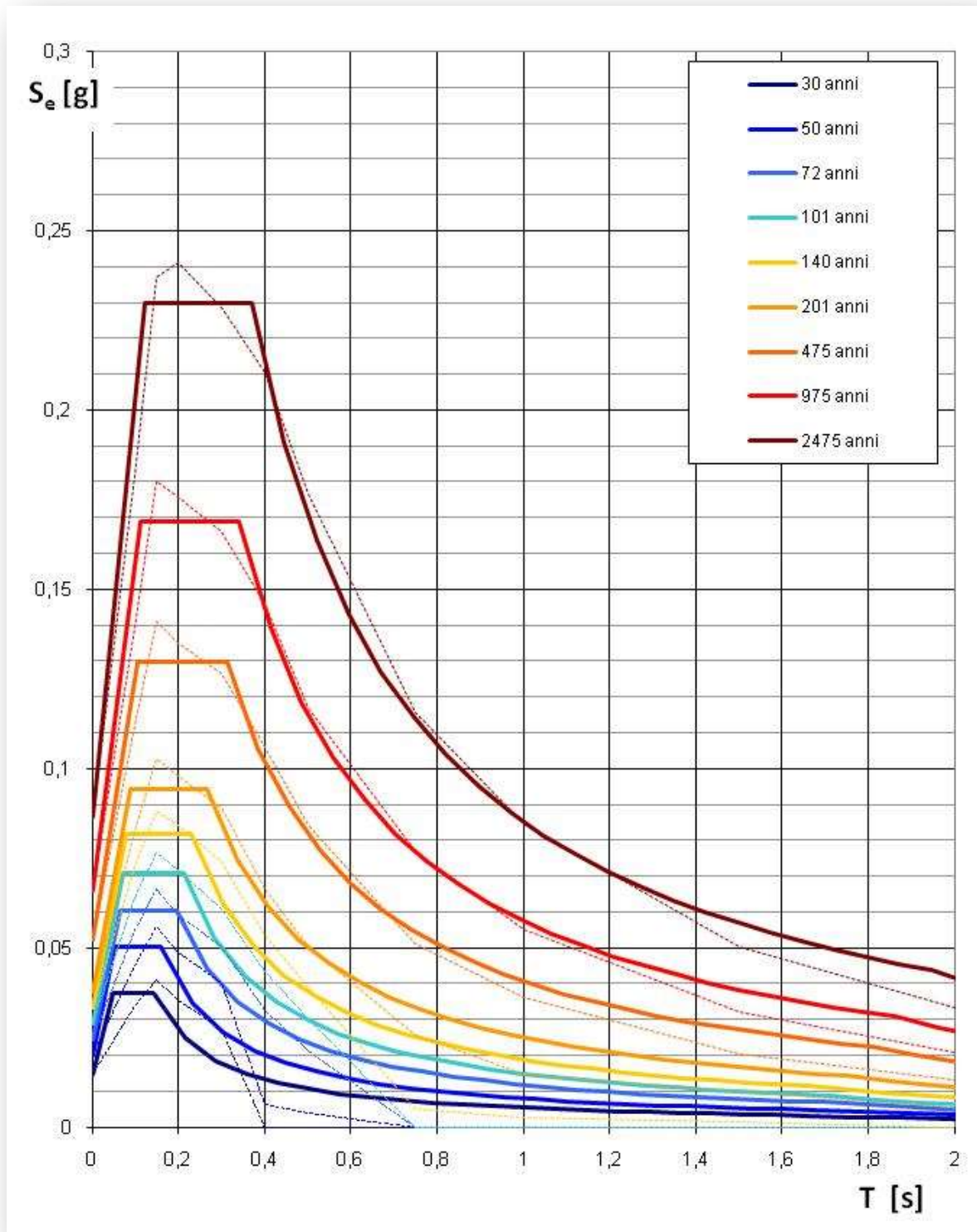


Fig. 7.10 - Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno T_R di riferimento, per il territorio comunale di Marsala (elaborati da Software "Spettri 1.3", Consiglio Sup. LL. PP.). Con la linea continua sono rappresentati gli spettri di normativa, mentre con linea tratteggiata gli spettri del progetto S1-INGV da cui sono derivati.

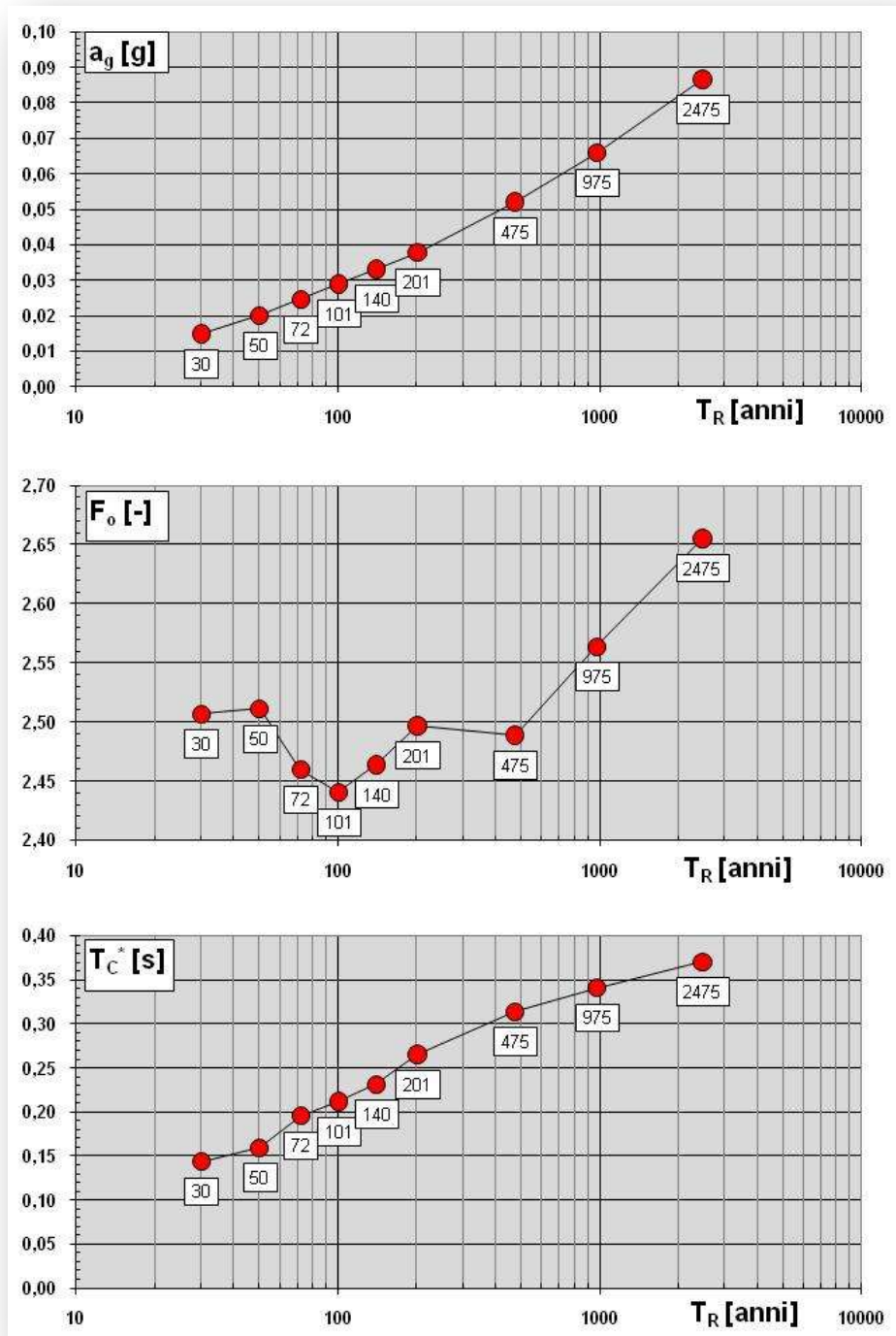


Fig. 7.11 - Valori dei parametri a_g , F_0 e T_C in funzione dei periodi di ritorno T_R di riferimento, riferiti al territorio comunale di Marsala (elaborati da Software "Spettri 1.3", Consiglio Sup. LL. PP.).

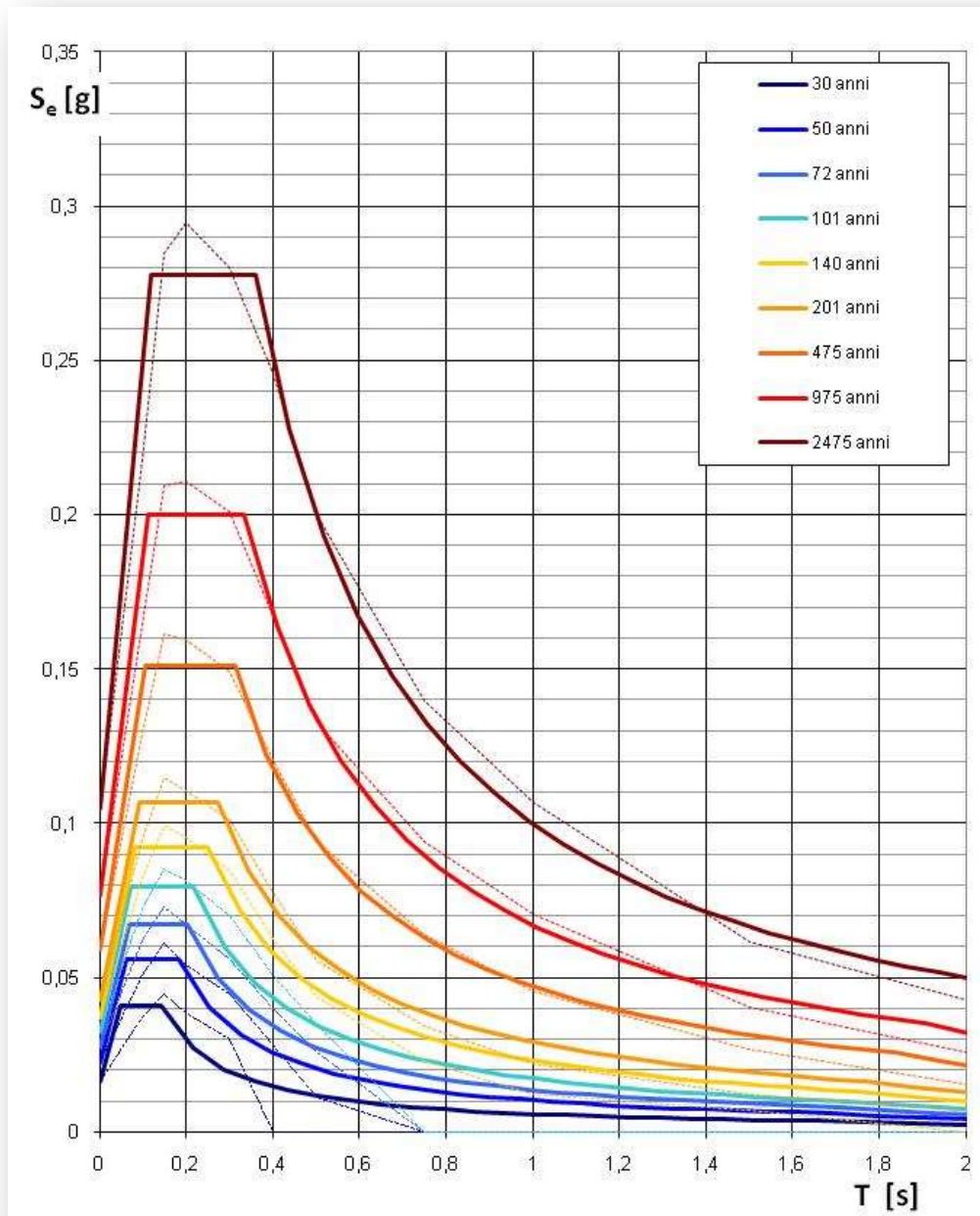


Fig. 7.12 - Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno TR di riferimento, per il territorio comunale di Mazara del Vallo (elaborati da Software "Spettri 1.3", Consiglio Sup. LL. PP.). Con la linea continua sono rappresentati gli spettri di normativa, mentre con linea tratteggiata gli spettri del progetto S1-INGV da cui sono derivati.

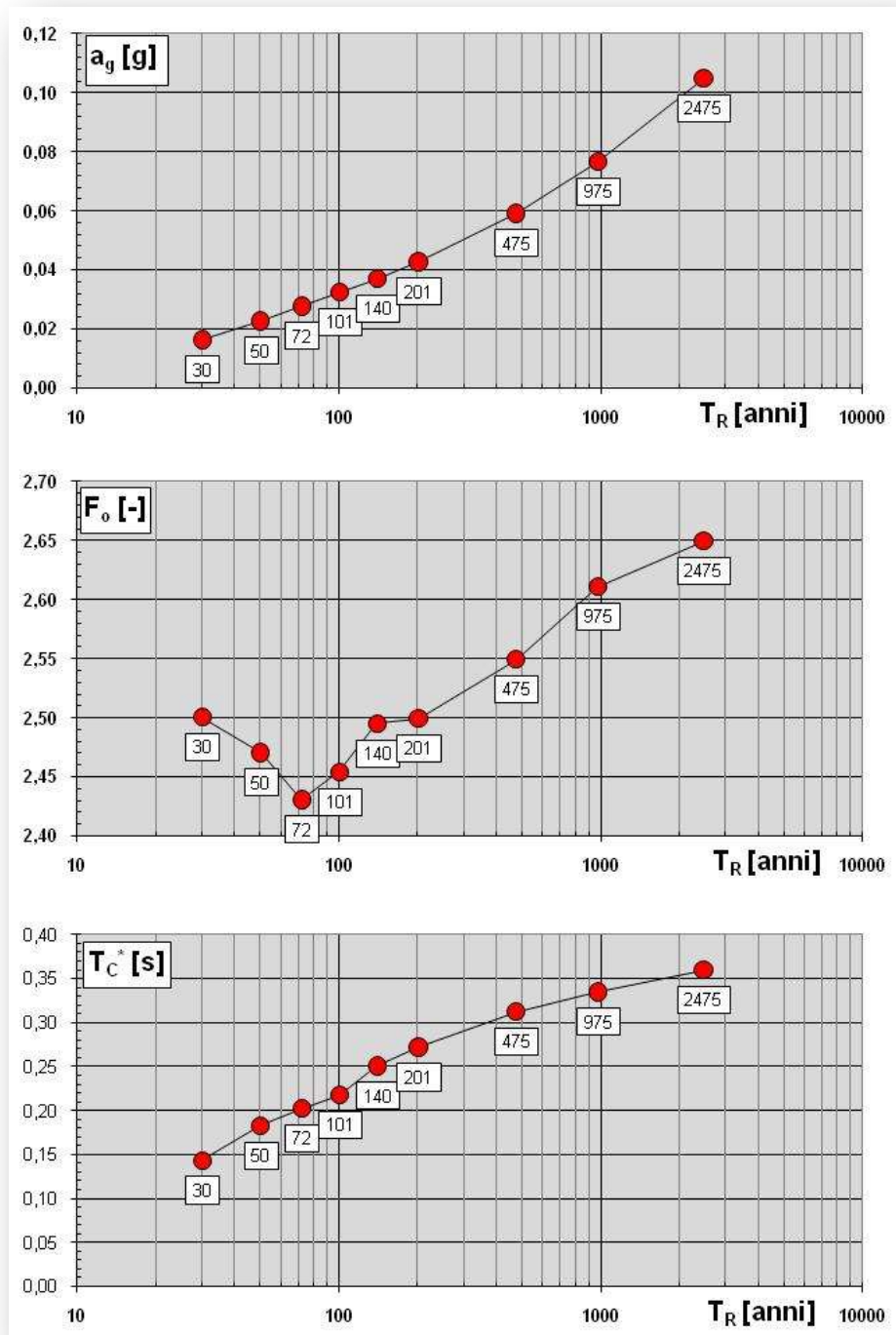


Fig. 7.13 - Valori dei parametri a_g , F_0 e T_C in funzione dei periodi di ritorno T_R di riferimento, riferiti al territorio comunale di Mazara del Vallo (elaborati da Software "Spettri 1.3", Consiglio Sup. LL. PP.).

7.3 APPROFONDIMENTI 2021 DI CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEI TERRENI

Durante la campagna indagini 2021 sono stati approfonditi gli aspetti di risposta sismica locale mediante indagini volte ad una maggior caratterizzazione dinamica dei terreni interessati dalle opere d'arte.

In particolare, sono state svolte indagini sismiche tomografiche in onde S e prove Cross-Hole per l'individuazione dell'eventuale presenza di bedrock sismico sia per la valle del fiume Sossio, in cui ricade una delle opere d'arte principali, sia per la galleria artificiale Ospedale che per le zone d'imposta dei vari cavalcavia.

Le indagini hanno confermato la presenza di bedrock affiorante per gran parte del tracciato, ad esclusione dell'area del viadotto e della galleria artificiale. Per i particolari ed i dati delle varie indagini eseguite (CH, DH e sismica in onde S) si rimanda agli elaborati Indagini 2021 ed alla apposita Relazione Sismica di progetto.

Riguardo le campagne precedenti, nel 2012, per determinare la categoria di sottosuolo per i depositi alluvionali del Fiume Sossio, è stata eseguita una prova Down-Hole nel foro di sondaggio S1 – 12 (Fig. 7.15). Da tale prova, i cui dettagli sono riportati nell'elaborato "Documentazione indagini 2012 – Vol. 1 di 2", risulta che la Vs30 è pari a 304,7 m/s, con un incremento generalmente regolare e costante dalla superficie scendendo man mano in profondità, che corrisponde alla categoria di sottosuolo "C".

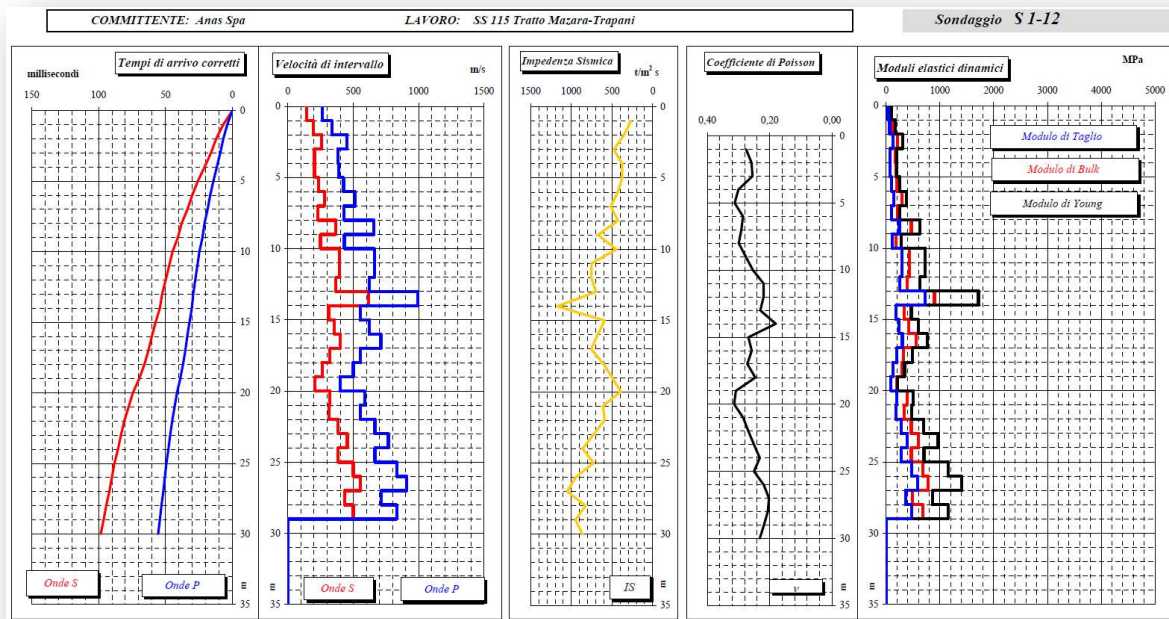


Fig. 7.15 – Grafici riassuntivi della prova Down-Hole eseguita nel foro di sondaggio S1 – 12, all'interno dei depositi alluvionali del Fiume Sossio. Vengono riportati i tempi di arrivo delle onde P ed S, le loro velocità per ogni intervallo di profondità, il valore di Impedenza sismica, il Coefficiente di Poisson e i moduli elastici dinamici (di taglio, di Bulk e di Young). Il valore di Vs30 è risultato essere pari a 304,7 m/s. Archivio 2012

8 MGR, ASPETTI APPLICATIVI DEL TRACCIATO E SCELTE PROGETTUALI

Le informazioni di carattere geologico, geomorfologico e litotecnico acquisite nelle varie fasi di indagine e descritte nei precedenti paragrafi, hanno consentito di definire un Modello Geologico di Riferimento di dettaglio dell'area di studio, sintetizzato nella cartografia di dettaglio e nella sezione geologica longitudinale all'asse del tracciato, riportate negli specifici elaborati.

La struttura geologica e geomorfologica dell'area è, come descritto, poco articolata, non essendo in primo luogo presenti elementi tettonici significativi all'interno della piana compresa tra gli abitati di Marsala e Mazara del Vallo, dove il tracciato si sviluppa.

Riassumendo, in estrema sintesi l'intero tracciato poggia sulla *Calcarenite di Marsala* (Pleistocene Inferiore – Emiliano-Siciliano), ad eccezione del viadotto Sossio, le cui fondazioni interessano le successioni sottostanti le calcareniti, riferibili alla *Formazione Marnoso Arenacea, della Valle del Belice* e le alluvioni recenti del fiume (Olocene).

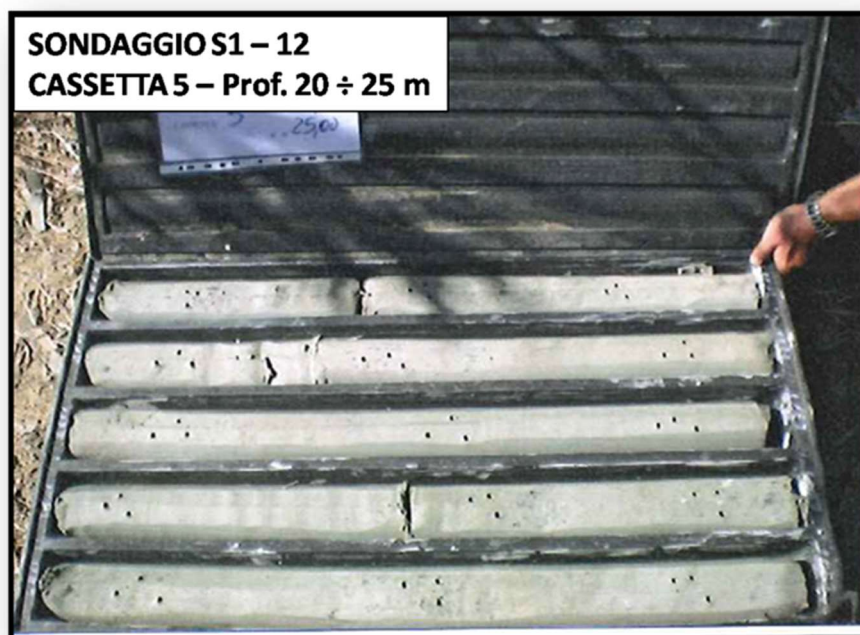


Fig. 8.1 – Foto della cassetta 5 del sondaggio S1 - 12, nella quale si riscontra la presenza delle sole argille plioceniche appartenenti alla Formazione Marnoso Arenacea della Valle del Belice. Archivio 2012

Infine, come ampiamente descritto negli specifici paragrafi dedicati a questo argomento, un elemento peculiare del territorio di natura antropica e storica è rappresentato dalla presenza di numerosissime cave anche ipogee e relativi cumuli di materiale di scarto della calcarenite da cava, sia all'interno delle cave stesse, sia sul piano campagna naturale, dove sono divenuti, nel tempo, elementi significativi del paesaggio locale.

Questo ambiente ha condizionato significativamente la progettazione, sia per la collocazione planoaltimetrica del tracciato, che per il possibile riutilizzo dei materiali di scarto di questa lavorazione secolare. Di seguito si analizzano quindi le scelte progettuali effettuate, strettamente correlate al contesto geologico-applicativo delineato.

8.1 VIADOTTO SOSSIO

È l'opera più importante, costituisce l'attraversamento del fiume Sossio nella parte settentrionale del tracciato. A riguardo, è stato elaborato un modello geologico di dettaglio che ha fornito le indicazioni progettuali più idonee alle condizioni di sito, con differenze significative tra appoggi spalle e pile in alveo. La campagna 2021 non ha indotto variazioni al modello, salvo una più approfondita ed estesa caratterizzazione dinamica dei terreni.

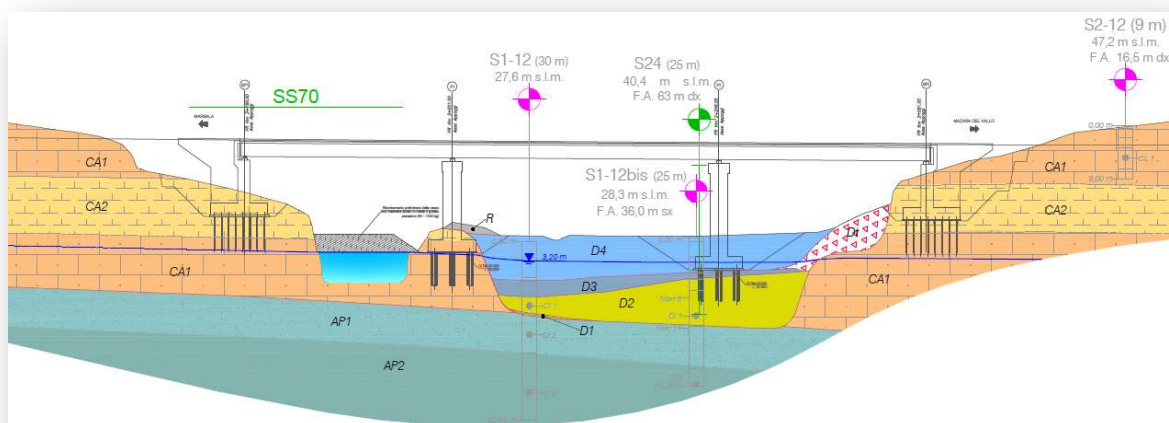


Fig. 8.2 – Stralcio del modello di dettaglio in corrispondenza del Viadotto Sossio.

✓ SPALLE

Le spalle sono collocate entrambe nelle calcareniti di Marsala, verosimilmente in gran parte nella litofacies CA2, a minor grado di cementazione. A seguito delle osservazioni del CSLP, sono state entrambe arretrate di alcuni metri, ampliando le campate di riva. In questo tratto sono pressoché assenti giunti strato o di altro tipo, si individuano esclusivamente forme antiche di erosione fluviale. Si è optato pertanto per fondazioni dirette, su sedime trattato mediante cucitura con micropali di consolidamento di breve lunghezza (6 m, c.f.r. elaborato specifico).

Le elevate caratteristiche geomeccaniche delle calcareniti sono state utilizzate anche nella progettazione degli angoli di scarpata relativi agli scavi delle aree di imposta delle fondazioni, prevedendo tagli ad elevata pendenza, con conseguente minor impatto e riduzione dei volumi di scavo.

✓ *PILE*

Le pile sono ubicate sul materasso alluvionale del Sossio, costituito da depositi limo-argillosi da recenti ad attuali, poggiante direttamente sui depositi sabbioso-limosi pliocenici in quanto il pacco calcarenitico sovrastante è stato, in questo tratto, totalmente eroso. Sono stati pertanto previste fondazioni indirette su pali di grande diametro, ammorzati nei depositi pliocenici. La campagna 2021 non ha indotto variazioni significative.

Gli angoli di scarpata relativi agli scavi delle aree di imposta delle fondazioni sono in questo caso meno acclivi (2\3), trattandosi di sedimenti recenti. In prossimità della pila 1, una fossa utilizzata a scopi irrigui dovrà essere riempita con materiali provenienti dagli scavi. Malgrado la scarsissima portata abituale del corso d'acqua, la spiccata stagionalità suggerisce l'esecuzione degli interventi in alveo durante la stagione asciutta, che in queste zone ha comunque durata di diversi mesi.

8.2 GALLERIA ARTIFICIALE E MURI DI SOSTEGNO

L'unica galleria presente lungo il tracciato è la galleria artificiale "Ospedale", collocata tra le progressive 0+550 e 0+675 di sviluppo 125 m e necessaria a sottopassare la S.S.188 nei pressi dell'Ospedale di Marsala. In questo tratto, come illustrato nei capitoli dedicati alle campagne geologiche e geotecniche realizzate, furono effettuate scarse indagini dirette ed indirette nel 2004, relative alla progettazione preliminare dell'intero tratto Trapani – Mazara del Vallo. Per questo motivo nella campagna 2021 sono stati progettati ed eseguiti sondaggi a carotaggio integrale, prove in foro, sismica tomografica ed installazione di datalogger piezometrici per l'individuazione esatta della falda, mediante monitoraggio, , con relativa escursione stagionale.

La geologia della parte nord del tracciato si discosta alquanto dal resto in quanto, in quest'area, al posto delle calcareniti troviamo delle sabbie mediamente addensate, costituite anch'esse da elementi biocalcarenitici, con intercalazioni, di spessore centimetrico\decimetrico, di livelli debolmente cementati.

Le sabbie poggiano direttamente sulla formazione sottostante, costituita dalle Argille sabbiose grigio-azzurre. Queste sono costituite: nella parte superiore da sabbie medio fini, limose, debolmente cementate, passanti a livelli di argille con limo, debolmente sabbiose, contenenti frammenti conchigliari; nella parte inferiore da argille limose contenenti inclusi carboniosi nerastri millimetrici.

Le perforazioni 2021 hanno confermato il MGR ipotizzato in termini di litotipi coinvolti, mostrando tuttavia una maggiore complessità dei rapporti fra litofacies, come evidenziato dal modello di dettaglio.

In questa zona la falda acquifera, poggiante sui depositi limoso-argillosi a scarsa permeabilità, risale leggermente rispetto il resto del tracciato, interferendo con le quote progetto della prevista galleria artificiale. La presenza di una falda è stata riscontrata sia dalle misure piezometriche effettuate nella strumentazione installata nei sondaggi del 2004, sia da letture recenti (2019) in alcuni pozzi per abitazioni presenti nell'area.

Le citate misurazioni con datalogger, per il momento disponibili nell'arco temporale dicembre 2021 – aprile 2022, hanno confermato il modello idrogeologico e presumibilmente delineato la quota "di morbida" della falda, che corrisponde all'incirca a quota progetto.

L'opera in oggetto, al fine di ridurre gli scavi e considerato il contesto geologico sopra descritto, è costituita da una galleria artificiale realizzata in modalità "top down"; le pareti laterali sono costituite da due paratie di pali secanti, costruite in prima fase, mentre la copertura gettata in opera, eseguita in seconda fase, realizza il contrasto delle opere di sostegno durante le operazioni di scavo.

Le rampe di approccio alla galleria sono delimitate da muri di sostegno ad "U"; lungo lo sviluppo longitudinale del muro, l'altezza delle pareti è variabile in funzione delle caratteristiche litologiche dei terreni, in quanto in questa zona si passa gradualmente, secondo il modello geologico di riferimento, dalle sabbie addensate alle calcareniti ben cementate.

Nella Fig. 8.3 sono rappresentate le due sezioni tipo con relativi angoli di scarpata, in funzione dei terreni retrostanti (scarpata 2\3 per sabbie addensate, 3\1 o 5\1 per calcareniti ben cementate).

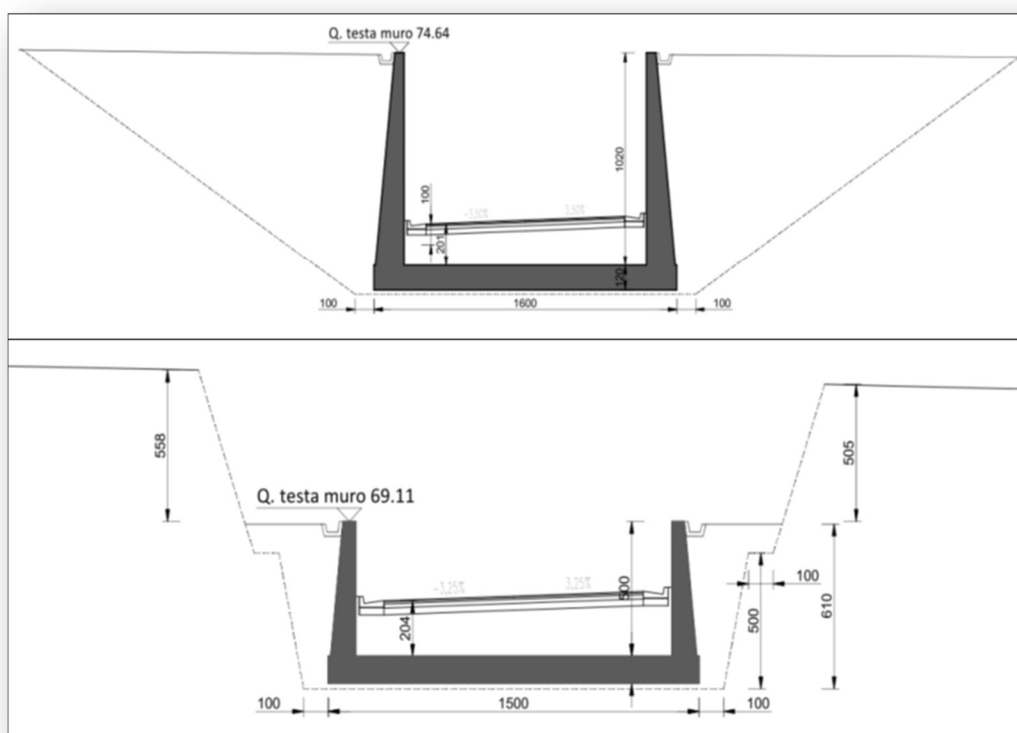


Fig. 8.3 – Sezione tipo con muro Hmax = 10.20 m (in alto) e sezione tipo con muro Hmax = 5.00 m (in basso).

8.3 CAVALCAVIA

Lungo il tracciato è prevista la realizzazione di 7 cavalcavia, costituiti da un ponte su una luce complessiva di 56 m, sorretto da 4 stampelle longitudinali a forma di doppia V. La struttura è costituita da un impalcato a struttura mista acciaio-calcestruzzo.

Considerate le condizioni pressoché uniformi dei piani di posa, tutti in calcarenite a vario grado di cementazione, si è optato per fondazioni dirette a plinto in cemento armato. I plinti avranno una dimensione in pianta 6.0x13.2 m. Si rimanda alla Relazione Geotecnica per le verifiche di tipo geotecnico e per la caratterizzazione assunta per il terreno.

Le indagini 2021 non hanno introdotto variazioni significative al contesto locale dei vari cavalcavia.

8.4 RILEVATI E BONIFICHE

L'intero territorio interessato dal tracciato è caratterizzato da una morfologia pressoché pianeggiante, dove affiorano estesamente i termini calcarenitici della Formazione di Marsala, che costituiscono il substrato roccioso dell'area.

Allo stato naturale, al di sopra del substrato si è formata localmente una sottile coltre di terreno vegetale, i cui spessori sono generalmente modesti. Per lo sfruttamento del terreno a fini agricoli e vivaistici, in molti appezzamenti di terreno, nel corso degli anni, si è proceduto alla creazione di uno strato di suolo (terreno vegetale) attraverso l'utilizzo di particolari "aratri da scasso", che, disgregando la parte superficiale di roccia (calcarenite), la rendono, nel tempo, un supporto facilmente lavorabile.

Questo processo ha fatto sì che laddove oggi sono presenti terreni coltivati, lo spessore di suolo risulti notevolmente superiore rispetto alla situazione originaria (suolo naturale). Alla luce di ciò, si possono distinguere, in funzione di spessore e caratteristiche, due diverse tipologie di suolo: una riconducibile allo stato naturale del terreno e una ascrivibile alle lavorazioni antropiche successivamente intervenute.

Durante la campagna indagini del 2012, al fine di individuare gli spessori di terreno vegetale presente nei terreni intercettati dal tracciato, sono stati condotti sia saggi diretti sia interviste con i proprietari di terreni. In entrambe i casi, lo spessore di suolo è risultato essere sempre superiore al mezzo metro, con una profondità del substrato calcareo generalmente compresa tra gli 80 e 150 cm (Fig. 8.4).



Fig. 8.4 – Rilievo in corrispondenza di campi coltivati. In questo punto il substrato è stato intercettato ad una profondità di 1,3 m dal p.c. Archivio 2012

Oltre alle zone coltivate, o comunque interessate dagli interventi antropici, il tracciato intercetta diverse aree di terreno “naturale”, nelle quali lo spessore di terreno vegetale risulta essere limitato e dunque più facilmente valutabile attraverso misure speditive in sito.

I saggi 2012 eseguiti (Fig. 8.5), hanno evidenziato che in queste aree naturali lo spessore di suolo è generalmente compreso tra i 10 ed i 30 cm ed a volte risulta completamente assente per vasti tratti (roccia a piano campagna, caso quasi unico in Italia a queste quote), mentre solo in rari casi lo spessore raggiunge o supera i 40-50 cm.



Fig. 8.5 – Rilievi in corrispondenza di aree con substrato a ridotta profondità (20-30 cm) ed affiorante. Archivio 2012

La campagna 2021, sulla scorta di ben 117 pozzetti esplorativi, tra pozzetti per fini geologico-geotecnici ed ambientali, ha confermato ampiamente questo modello, definendone in dettaglio le caratteristiche.

Si può concludere, dunque, quanto segue:

- ✓ Le aree costituite da terreno naturale sono caratterizzate da uno spessore delle coperture che va da 0 a 0,5 metri, con una media a circa 0,20-0,30 metri;
- ✓ Le aree costituite da terreno coltivato sono caratterizzate da uno spessore delle coperture che va da 0,5 a 1,5 metri, con una media a circa 1-1,2 metri;

Integrando l'analisi dei dati acquisiti sul terreno con lo studio dei rilievi aerofotogrammetrici, è stato possibile suddividere il territorio su cui insiste il tracciato di progetto in intervalli discreti in base alla presenza di terreno coltivato o meno.

Questa suddivisione ha permesso di individuare gli spessori di scotico e bonifica lì dove l'intervento prevede una sezione in rilevato, sia per l'asse principale sia per la viabilità secondaria.

Ove presente una sezione in rilevato verrà eseguito uno scotico di 20 cm sia su terreno naturale che coltivato, mentre è prevista una bonifica di 100 cm nei soli tratti caratterizzati da coltivo. E' stata inoltre prevista una bonifica di 50 cm nei tratti ove prevista una trincea con altezza non superiore al metro.

I risultati di questo lavoro sono riportati nelle Tabb. 8.1 e 8.2. Dalle tabelle è anche possibile evincere, per il solo asse principale, che il tracciato, lungo quasi 17 km, si imposta, ad esclusione dei 150 m della lunghezza del viadotto Sossio, per circa 6 km su suoli "naturali", e per i restanti 11 km circa in aree interessate da diverse tipologie di coltivazioni.

ASSE PRINCIPALE						ASSE PRINCIPALE						
da km	a km	TIPOLOGIA DI OPERA	TIPO DI TERRENO	SCOTICO	BONIFICA	da km	a km	TIPOLOGIA DI OPERA	TIPO DI TERRENO	SCOTICO	BONIFICA	
0+000	0+150	trincea 1m	coltivato	-	50	6+200	7+375	trincea >1		-	-	
0+150	0+200	rilevato a p.c.	coltivato	20	100	7+375	8+120	rilevato 2 - 4m	coltivato	20	100	
0+200	0+300	trincea 1m	coltivato	-	50	8+120	8+400	rilevato 0 - 4m	t. naturale	20		
0+300	1+000	trincea e sottopasso				8+400	8+700	rilevato 3 - 4m	coltivato	20	100	
1+000	1+400	rilevato da 0 a 3,5m	t. naturale	20		8+700	8+920	rilevato 4 - 5m	t. naturale	20		
1+400	1+600	rilevato da 1 a 3,5	coltivato	20	100	8+920	9+750	rilevato 0 - 5m	coltivato	20	100	
1+600	1+850	rilevato da 0 a 1,5m	t. naturale	20		9+750	9+800	trincea <1m	coltivato		100	
1+850	1+900	rilevato da 0 a 0,5	coltivato	20	100	9+800	10+000	trincea <1m	t. naturale	-	-	
1+900	2+166	trincea > 1m				10+000	10+050	rilevato	t. naturale	20		
2+166	2+281	VIADOTTO SOSSIO					10+050	10+230	trincea	t. naturale	-	-
2+281	2+760	trincea > 1m				10+230	10+425	rilevato 0 - 4m	coltivato	20	100	
2+760	2+860	rilevato da 0 a 1m	coltivato	20	100	10+425	10+600	rilevato 0 - 4m	t. naturale	20		
2+860	2+960	rilevato da 0 a 1,5m	t. naturale	20		10+600	10+860	rilevato 1 - 3m	coltivato	20	100	
2+960	3+530	rilevato 2 - 3m	coltivato	20	100	10+860	10+960	rilevato 1 - 3m	t. naturale	20		
3+530	3+650	rilevato 2 - 3m	t. naturale	20		10+960	12+010	rilevato 1 - 3m	coltivato	20	100	
3+650	3+900	rilevato 2 - 3m	coltivato/ t. naturale	20	50	12+010	12+150	rilevato 1 - 8m	t. naturale	20		
3+900	4+259	rilevato 1 - 2m	t. naturale	20		12+150	12+300	rilevato 1 - 3m	coltivato	20	100	
4+259	4+450	rilevato 2 - 3m	coltivato	20	100	12+300	12+550	trincea <1m	coltivato	-	50	
4+450	4+820	rilevato 3 - 6m	t. naturale	20		12+550	12+600	rilevato 0 - 1m	coltivato	20	100	
4+820	4+900	rilevato 5 - 6m	coltivato	20	100	12+600	13+270	rilevato 0 - 2m	t. naturale	20		
4+900	4+980	rilevato 4 - 5m	t. naturale	20		13+270	16+670	rilevato 0 - 4m	coltivato	20	100	
4+980	6+100	rilevato da 0 a 4m	coltivato	20	100							
6+100	6+200	trincea <1m	coltivato		100							

Tab. 8.1 – Sintesi dei dati degli spessori di scotico e bonifica per l'asse principale.

VIABILITA' SECONDARIA				VIABILITA' SECONDARIA			
TRACCIATO	SCOTICO	BONIFICA	TIPOLOGIA DI TERRENO	TRACCIATO	SCOTICO	BONIFICA	TIPOLOGIA DI TERRENO
1) ROTATORIA Km 0+ 600 AP				7) SVINC. TERRENOVE			
Lato est			su sede esistente	area nord - ovest	20		t. naturale
rotatoria	20		t. naturale	area sud est	20	100	coltivato
lato ovest	20		sede/ t. naturale	8) CV04			
lato sud da 0+000 a 0+460	20		t. naturale	area nord - ovest	20		t. naturale
lato sud da 0+460 a 0+725	20	100	coltivato	area sud est	20	100	coltivato / esistente
lato sud da 0+725 a rotatoria	20		t. naturale	9) VL14			
2) ROTATORIA				10) SVINC: PETROSINO			
tratto sud ovest	20	100	coltivato	area nord - ovest	20	100	coltivato
tratto sud est	20	100	coltivato	area sud est fino a km 0+100	20	100	coltivato
3) VIAB. Km 2 + 325 AP				da 0 + 000 a 0 +100	20		t. naturale
da 0+000 a 0+080	20		t. naturale	11) CV05			
da 0+080 a 0+538	20	100	coltivato	12) VL15	20	100	coltivato
4) ATTR CV03				13) VL16	20	100	coltivato
fino alla rotatoria in sx	20		t.naturale /in parte su sede esistente	14) VL05 e VL17	20	100	coltivato
5) VIAB. Km 3 + 500				15) ST04	20	100	coltivato
da 0 + 000 a 0 + 395	20	100	coltivato	16) VL18	20	100	coltivato
6) VIAB. Km 3 + 925 AP				17) VL19	20		t. naturale
da 0 + 000 a 0 + 338	20		t. naturale	18) CV06			
da 0 + 338 a 0 + 525	20	100	coltivato	19) VL20	20	100	coltivato
da 0 + 525 a 0 + 960	20		t. naturale	20) IN09	20	100	coltivato
da 0 +960 a 0 + 960	20	100	coltivato	21) VL09	20	100	coltivato

Tab. 8.1 – Sintesi dei dati degli spessori di scotico e bonifica per la viabilità secondaria.

8.5 MATERIALI DI SCARTO DELL'ATTIVITÀ ESTRATTIVA

Infine, come già descritto, un elemento peculiare del territorio è rappresentato dalla presenza di numerosi cumuli di materiale di scarto della calcarenite da cava, sia all'interno delle cave stesse, sia sul piano campagna naturale. Spesso questi cumuli circondano le pareti verticali esterne delle cave e sono costituiti sia da blocchi lavorati di calcarenite, noti come "conci di tufo", di forma rettangolare, sia da blocchi irregolari dello stesso materiale.

I blocchi presentano pezzature molto varie, essendo in alcuni casi di dimensioni superiori al metro cubo, mentre in altri le dimensioni non superano i pochi centimetri. La matrice sabbiosa è generalmente scarsa, e presentano un colore grigiastro sulle pareti esterne, dovuto all'alterazione (weathering), mentre all'interno mantengono il colore giallastro della calcarenite. La loro dislocazione planimetrica è riportata nella cartografia geologica.

Nel corso del Progetto Preliminare del 2004 sono state effettuate alcune prove geotecniche che hanno consentito di definire tali materiali come "assolutamente conformi per essere utilizzati come rilevati". Date le medesime caratteristiche, anche i cumuli di materiale di scarto attualmente ubicati all'interno delle aree di cava, che presentano volumetrie nettamente superiori, possono essere considerati altrettanto idonei ad essere utilizzati come rilevati stradali.

Durante la campagna 2021, cogliendo l'opportunità di lavori stradali nelle vicinanze, sono state eseguite prove di carico su piastra e di classificazione ad uso stradale su una bonifica profonda, effettuata con scarti di cava calcarenitici. I risultati sono stati ampiamente soddisfacenti, malgrado le precarie condizioni di costipamento ed umidità presenti alla data delle prove.

Inoltre, la campagna 2021 ha di fatto escluso la presenza di sostanze inquinanti nei cumuli presenti lungo l'asse stradale grazie ad un campionamento molto frequente. In questo progetto si prevede, pertanto, per la realizzazione di parte dei rilevati, il riutilizzo dei materiali di scarto della calcarenite presenti lungo l'asse e provenienti dagli scavi di progetto, con la possibilità di estendere il reimpiego della calcarenite a tutto il fabbisogno di progetto per la realizzazione dei rilevati.

9 RIFERIMENTI NORMATIVI

- ✓ Decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50. "Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture (G.U. n. 91 del 19 aprile 2016);
- ✓ D.P.R. 5 ottobre 2010, n. 207 "Regolamento di esecuzione ed attuazione del decreto legislativo 12 aprile 2006, n. 163, recante «Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE»";
- ✓ D.M. 14/01/2008 - "Nuove Norme tecniche per le costruzioni";
- ✓ Decreto Ministero Infrastrutture 14/01/2008 – "Nuove norme tecniche per le costruzioni".
- ✓ Circolare Ministero dei LL.PP. 02/02/09 n. 617 - Istruzione per l'applicazione delle "Nuove Norme tecniche per le costruzioni";
- ✓ DM N 6792 del 05/11/2001 – Nuovo Codice della strada - Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (S.O. n. 5 alla Gazzetta Ufficiale 4 gennaio 2002, n. 3);
- ✓ D. Lgs. n.163 del 12 aprile 2006: "Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE";
- ✓ Ordinanza P.C.M. 3274 del 20/03/03 del Consiglio dei ministri – "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica";
- ✓ Ordinanza n. 3316 - Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 20.03.03;
- ✓ D.P.R. 21 dicembre 1999 n. 554 "Regolamento di attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici 11 febbraio 1994, n.109 e successive modificazioni";
- ✓ D.M. 16.01.1996 "Norme Tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi";
- ✓ Eurocodice 1 "Basi di calcolo ed azioni sulle strutture - Parte 1: Basi di calcolo", ottobre 1996;
- ✓ Eurocodice 7.1 (1997): Progettazione geotecnica – Parte I: Regole Generali. UNI;
- ✓ Eurocodice 8 (1998): Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici;
- ✓ Decreto Legislativo 03 aprile 2006 n. 152 e s.m.i. "Norme in materia ambientale";
- ✓ Legge 9 agosto 2013 n. 98 "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 21 giugno 2013, n. 69, recante disposizioni urgenti per il rilancio dell'economia".
- ✓ Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 617 del 2/02/09, "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14/01/08";
- ✓ D. Lgs. 161/2012 – "Regolamento recante la disciplina dell'utilizzazione delle terre e rocce da scavo";
- ✓ D.G.R. 19 dicembre 2003, n. 408 – "Individuazione, formazione ed aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche ed adempimenti connessi al recepimento ed attuazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20 marzo 2003, n. 3274".

- ✓ Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana (Relazione Generale) – Dipartimento Territorio e Ambiente – Anno 2004.
- ✓ Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana – Dipartimento Territorio e Ambiente – Anno 2004. Area territoriale tra il Bacino Idrografico del Fiume Birgi e il Bacino Idrografico del Fiume Màzaro (cod. 052) – Relazione Generale + allegati.
- ✓ Schema di Piano dei Materiali di cava e Schema di Piano dei Materiali lapidei di pregio – a cura dell'Ente Minerario Siciliano in L. redatto dal R.T.I. GEO – CEPA S.r.l.
- ✓ Piano di Tutela della Acque della Sicilia – a cura del Commissario Delegato per l'Emergenza Bonifiche e la Tutela delle Acque in Sicilia – Relazione Generale + cartografia + allegati – Dicembre 2007.
- ✓ Piano di Gestione del Distretto Idrografico della Sicilia – Regione Siciliana - Marzo 2010.

10 BIBLIOGRAFIA

- ✓ BIGI G., COSENTINO D., PAROTTO M., SARTORI R., SCANDONE P., (1991). Structural model of Italy. Scala 1:500.000. CNR-PFG.
- ✓ CATALANO R., DI STEFANO E., INFUSO S., SULLI A., VAIL P.R., VITALE F.P. (1998 a). Sequences and systems tracts calibrated by high-resolution bio-chronostratigraphy, the Central Mediterranean Plio-Pleistocene record. De Graciansky F. Ed., Mesozoic and Cenozoic Sequence stratigraphy of European Basins. Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists Special Publication, 60, pp. 155 – 177.
- ✓ CATALANO R., FRANCHINO A., MERLINI S., SULLI A. (1998 b). Geologia della Sicilia occidentale. Catalano R. & Lo Cicero G. (eds): Guida alle escursioni del 79° Congresso Soc. Geol. It., v. 1, pp. 143 – 155.
- ✓ CATALANO R., FRANCHINO A., MERLINI S., SULLI A. (2000 a). Central western Sicily structural setting interpreted from seismic reflection profiles. Mem. Soc. Geol. It., v. 55, pp. 5 – 16.
- ✓ CATALANO R., FRANCHINO A., MERLINI S., SULLI A. (2000 b). A crostal section from the Eastern Algerian basin to the Ionian ocean (Central Mediterranean). Mem. Soc. Geol. It., v. 55, pp. 71 – 85.
- ✓ COSENTINO P.L., CARAPEZZA E., FRADELLA P., GAGLIANO CANDELA E. (1985). Macro seismic study and seismic micro zoning of the damaged by the 1981 earthquake (Mazara del Vallo, Sicily). Estratto dalla Collana Studi e Ricerche dell'Accademia Ligure di Scienze e lettere, Vol. VI, Genova, pp. 129-148.
- ✓ Cosentino P.L., Capizzi P., D'Angelo U., Fiandaca G., Martorana R., Messina P. (2008). Metodi geofisici per la ricerca di cavità: caso di studio alle cave di Marsala (TR). Bollettino dell'Ordine dei Geologi della Sicilia, anno XVI, n.2, pp. 7-12.
- ✓ D'ANGELO U., RUGGIERI G., UNTI M., VERNUCCIO S. (1980). Neotettonica dei Fogli 248 (Trapani), 249 (Palermo), 250 (Bagheria), 258 (Alcamo), 259 (Termini Imerese) e 266 (Sicacca). - Nuovi contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia, Pubbl. n. 356 del Progetto Finalizzato Geodinamica, parte I, pp. 203-236, 18 carte, 1 tav. - C.N.R. - Roma.
- ✓ D'ANGELO U., VERNUCCIO S. (1994). Carta Geologica del foglio 617 "Marsala" scala 1:50.000. Dipartimento di Geologia e Geodesia della Università di Palermo. - Boll. Soc. Geol. It., 113, Roma.
- ✓ D'ANGELO U., VERNUCCIO S. (1994). Note illustrative della carta geologica Marsala (F° 617 - scala 1:50.000). Bollettino della Società Geologica Italiana, v. 113, pp. 55-67.
- ✓ DISS WORKING GROUP (2010). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2010 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - All rights reserved; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1.
- ✓ LAVECCHIA G., FERRARINI F., DE NARDIS R., VISINI F., BARBANO M. S., (2007). Active thrusting as a possible seismogenic source in Sicily (Southern Italy): Some insights from integrated structural-kinematic and seismological data. Tectonophysics, 445, 145-167, 10.1016/j.tecto.2007.07.007.
- ✓ RIGANO R., ANTICHI B., ARENA L., AZZARO R., BARBANO M.S., (2004). Sismicità e zonazione sismogenetica in Sicilia occidentale. GNGTS – Atti del 17° Convegno Nazionale.
- ✓ RUGGIERI G., UNTI A., UNTI M. E MORONI M.A. (1977). La calcarenite di Marsala (pleistocene inferiore) e i terreni contermini. Estratto dal Bollettino Società Geologica Italiana, 94, pp. 1623-1655, Roma.
- ✓ RUGGIERI G., UNTI M. (1974). Pliocene e Pleistocene nell'entroterra di Marsala. Boll. Soc. Geol. It., 93, pp. 723 – 733, Roma.
- ✓ Regione Siciliana – Sito Istituzionale (http://pti.regione.sicilia.it/portal/page/portal/PIR_PORTALE);

- ✓ Regione Siciliana – Dipartimento Urbanistica – Sistemi Integrativi Territoriali e cartografia (S.I.T.R.) (http://www.sitr.regione.sicilia.it/component/option,com_frontpage/Itemid,1/);
- ✓ Regione Siciliana – Dipartimento dell’Acqua e dei Rifiuti – Osservatorio delle Acque (<http://www.osservatorioacque.it/>);
- ✓ Regione Siciliana – Dipartimento dell’Ambiente – Piano Stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico (<http://www.sitr.regione.sicilia.it/pai/>);
- ✓ INGV – Sito Istituzionale (<http://www.ingv.it/it/>);
- ✓ DISS (Database of Individual Seismogenic Sources - Vers. 3.1.1) (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>);
- ✓ Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (versione CPTI11) (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>);
- ✓ ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – Sito Istituzionale (<http://www.isprambiente.gov.it/it/>);
- ✓ Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Sito Istituzionale (<http://www.cslp.it/cslp/>).