

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



NODO DI BARI

U.O.: OPERE GEOTECNICHE

PROGETTO PRELIMINARE

NODO DI BARI

BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE

Relazione geotecnica generale

SCALA:

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

IA7X 00 R 11 GE GE0006 001 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|------|---------------------|------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------------------------|
| A | Emissione esecutiva | L. Dinelli | Luglio 2021 | L. Giannini <i>L. Giannini</i> | Luglio 2021 | G. Dimaggio <i>G. Dimaggio</i> | Luglio 2021 | L. Berardi Luglio 2021 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

File: IA7X00R11GEGE0006001A

n. Elab.:

INDICE

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUZIONE..... | 5 |
| 2 | NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 7 |
| 2.1 | NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO | 7 |
| 2.2 | BIBLIOGRAFIA..... | 7 |
| 2.3 | DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO..... | 9 |
| 3 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO | 11 |
| 3.1 | GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA..... | 11 |
| 3.2 | INQUADRAMENTO SISMICO | 13 |
| 3.2.1 | <i>Vita Nominale, Classe d'Uso, Tempo di Ritorno</i> | 14 |
| 3.2.2 | <i>Stati limite, probabilità di superamento e periodi di ritorno.....</i> | 16 |
| 3.2.3 | <i>Accelerazione di Riferimento su Suolo Rigido.....</i> | 17 |
| 3.2.4 | <i>Risposta Sismica Locale.....</i> | 20 |
| 3.2.5 | <i>Considerazioni sulla liquefazione</i> | 22 |
| 4 | CAMPAGNE DI INDAGINE UTILIZZATE PER LO STUDIO GEOTECNICO..... | 23 |
| 5 | CARATTERISTICHE DELLA FALDA ACQUIFERA | 28 |
| 6 | UNITÀ GEOTECNICHE..... | 30 |
| 6.1 | CONSIDERAZIONI GENERALI | 30 |
| 6.2 | CONSIDERAZIONI SULLA BASE DELLE PROVE GEOFISICHE..... | 31 |
| 6.3 | DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE..... | 35 |
| 7 | CRITERI E CORRELAZIONI UTILIZZATI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA..... | 36 |
| 7.1 | TERRENI GRANULARI | 36 |
| 7.1.1 | <i>Caratteristiche fisiche e parametri di stato.....</i> | 36 |
| 7.1.1.1 | Peso di volume..... | 36 |
| 7.1.1.2 | Densità relativa da correlazioni con N_{SPT} | 36 |
| 7.1.2 | <i>Angolo di resistenza al taglio</i> | 37 |
| 7.1.2.1 | Correlazione con densità relativa | 37 |
| 7.1.2.2 | Correlazione da SPT | 38 |

| | | |
|---------|--|----|
| 7.1.3 | <i>Parametri di rigidezza</i> | 38 |
| 7.1.3.1 | Modulo elastico operativo a basse deformazioni | 38 |
| 7.1.3.2 | Modulo elastico operativo da colpi SPT | 39 |
| 7.1.4 | <i>Permeabilità</i> | 40 |
| 7.2 | FORMAZIONI ROCCIOSE | 41 |
| 7.2.1 | <i>Parametri della roccia intatta</i> | 41 |
| 7.2.2 | <i>Parametri dell'ammasso roccioso e stima del Geological Strength Index (GSI)</i> | 43 |
| 7.2.3 | <i>Resistenza dell'ammasso roccioso</i> | 44 |
| 7.2.4 | <i>Caratteristiche di deformabilità</i> | 45 |
| 7.2.4.1 | Moduli elastici iniziali | 45 |
| 7.2.4.2 | Moduli operativi | 46 |
| 7.2.5 | <i>Permeabilità</i> | 47 |
| 8 | DETERMINAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI | 48 |
| 8.1 | UNITÀ TC | 48 |
| 8.2 | UNITÀ CAL E CALT | 49 |
| 8.2.1 | <i>Caratteristiche fisiche e parametri di stato</i> | 50 |
| 8.2.2 | <i>Caratteristiche di Resistenza</i> | 51 |
| 8.2.3 | <i>Caratteristiche di Deformabilità</i> | 52 |
| 8.2.4 | <i>Permeabilità</i> | 53 |
| 8.3 | UNITÀ C1 E C2 | 54 |
| 8.3.1 | <i>Parametri della roccia intatta</i> | 54 |
| 8.3.2 | <i>Parametri dell'ammasso roccioso e stima del GSI</i> | 61 |
| 8.3.2.1 | Rock Quality Design (RQD) | 61 |
| 8.3.2.2 | Spaziatura media | 62 |
| 8.3.2.3 | Condizione delle Discontinuità | 64 |
| 8.3.2.4 | Geological Strength Index (GSI) | 67 |
| 8.3.3 | <i>Resistenza dell'ammasso roccioso</i> | 70 |
| 8.3.4 | <i>Caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso</i> | 75 |
| 8.3.5 | <i>Permeabilità</i> | 77 |
| 9 | ANALISI DEI DATI DELLE STAZIONI GEOMECCANICHE | 80 |



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|---------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 4 di 90 |

| | | |
|----|--|----|
| 10 | SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI E DEI LIVELLI DI FALDA..... | 88 |
| 11 | SINTESI DEGLI ASPETTI PROGETTUALI GEOTECNICI..... | 89 |

1 INTRODUZIONE

Nella presente relazione vengono descritti i risultati dello studio geotecnico svolto nell'ambito del Progetto Preliminare della "Variante di tracciato tra Palese e Santo Spirito", parte di un più vasto complesso progettuale relativo all'evoluzione del Nodo ferroviario di Bari.

L'area interessata dal progetto ricade nella zona a nord - ovest della città di Bari, nell'area compresa tra l'aeroporto internazionale di Bari e il comune di Giovinazzo.



Figura 1-1: planimetria del tracciato in progetto - Google Earth.

Il documento si articola come segue:

- nel capitolo 2 sono elencate le normative, i riferimenti bibliografici e i documenti di riferimento;
- nel capitolo 3 è riportata una sintesi del quadro geologico di riferimento
- nel capitolo 4 è riportata una descrizione delle campagne di indagini geognostiche prese a riferimento nello studio;
- nel capitolo 5 sono riportate le caratteristiche della falda;
- nel capitolo 6 sono definite le unità geotecniche e i modelli geotecnici di riferimento;

- nel capitolo 7 sono descritti criteri e correlazioni adottati per l'interpretazione delle indagini in sito e di laboratorio;
- nel capitolo 8 sono definiti i valori caratteristici dei parametri meccanici associati alle unità geotecniche;
- nel capitolo 9 è riportata l'analisi delle stazioni geomeccaniche;
- nel capitolo 10 è riportata la sintesi dei valori dei parametri geotecnici e dei livelli di falda assunti;
- nel capitolo 11 è riportata una sintesi dei principali aspetti progettuali geotecnici affrontati.

2 **NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

2.1 **NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO**

- [1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30;
- [2] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;
- [3] RFI DTC SI CS MA IFS 001 del 2021 - “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”;
- [4] RFI DTC SI CS SP IFS 004 del 2021- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi” – RFI.
- [5] UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [6] UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.
- [7] AGI (1977) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.
- [8] AGI (2005) Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee guida.

2.2 **BIBLIOGRAFIA**

- [9] Brown E.T., Hoek E. (1988) “Discussion on paper n° 20431 by R. Ucae entitled “Determination of shear failure envelope in rock masses” Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 114, n° 3.
- [10] Clayton C.R.I. (1995) “The Standard Penetration Test (SPT): Methods and use” CIRIA Report n° 143, 1995.
- [11] Hoek E., Brown E.T. (1988) “The Hoek-Brown failure criterion – A 1988 update” Proc. of 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada.

- [12] Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. (1997) "Support of underground excavations in hard rock" Rotterdam, A.A. Balkema.
- [13] Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B. (2002) "Hoek-Brown failure criterion- 2002 edition" Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto, July.
- [14] Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellotta R., Pasqualini E. (1988) "New correlations of penetration tests for design practice" Proceedings of I International Symposium on Penetration Testing, ISOPT I, Orlando.
- [15] Lancellotta, R (2009). Geotechnical Engineering – Second Edition. Taylor & Francis.
- [16] Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation, GEOENG 2000, Melbourne, Australia.
- [17] Ohta Y., Goto N. (1978) "Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes" Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.6.
- [18] Skempton A.W. (1986) "Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation" Geotechnique 36, n° 3.
- [19] Stroud M.A. (1974) "The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks" Proceedings ESOPT I.
- [20] Stroud M.A. (1988) "The Standard Penetration Test – Its application and interpretation" Penetration Testing in UK, Proceedings of the Geotechnical Conference organized by ICE, Birmingham.



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|---------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 9 di 90 |

2.3 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

- [21] ITALFERR – Progetto Preliminare – Riassetto Nodo di Bari – Relazione Geologica e Idrogeologica (Doc. IAY100R69RGGE0001001)
- [22] ITALFERR – Progetto Preliminare – Riassetto Nodo di Bari – Planimetria ubicativa sondaggio XIA32D003 (Doc. IAY100R78P5GE0001001)
- [23] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Indagini geognostiche e prove in situ (Doc. IA7X00R69SGGE0005001)
- [24] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Indagini geofisiche (Doc. IA7X00R69IGGE0005001)
- [25] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Schede di rilevamento degli stop geologici e geomeccanici (Doc. IA7X00R69RHGE0005001)
- [26] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Prove geotecniche di laboratorio (Doc. IA7X00R69PRGE0005001)
- [27] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica (Doc. A7X00R69RGGE0001001)
- [28] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Carta e profilo geologico (Doc. IA7X00R69NZGE0001001)
- [29] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Carta e profilo idrogeologico (Doc. IA7X00R69NZGE0002001)
- [30] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Profilo geotecnico - tav. 1 (Doc. IA7X00R11F6GE006001)
- [31] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Profilo geotecnico - tav. 2 (Doc. IA7X00R11F6GE006002)
- [32] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Profilo geotecnico - tav. 3 (Doc. IA7X00R11F6GE006003)
- [33] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese – Profilo geotecnico - tav. 4 (Doc. IA7X00R11F6GE006004)



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 10 di 90 |

[34] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese –
Profilo geotecnico - tav. 5 (Doc. IA7X00R11F6GE006005)

[35] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese –
Profilo geotecnico - tav. 6 (Doc. IA7X00R11F6GE006006)

[36] ITALFERR – Progetto Preliminare – Nodo di Bari - Bari Nord – Variante Santo Spirito - Palese –
Profilo geotecnico - tav. 7 (Doc. IA7X00R11F6GE006007)

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO

3.1 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Con riferimento alla Relazione Geologica (doc. [27]) viene qui richiamato un breve inquadramento geologico e sismico dell'area oggetto di studio.

Il territorio ove si colloca il progetto occupa circa 11 km della costa adriatica, attraversando il territorio delle Murge. La tratta si estende quasi totalmente sul calcare di Bari (CBA); l'ultimo tratto a sud est intercetta la calcarenite di Gravina (GRA); nell'area di progetto sono presenti depositi alluvionali recenti (b), non interessanti però direttamente il tracciato.

Le unità geologiche menzionate vengono brevemente riportate nel seguito. Si riporta la descrizione estrapolata dalla Relazione Geologica, procedendo dalla più recente alla più antica.

| | |
|--|--|
| <u>Depositi alluvionali recenti ed attuali</u> | |
| b | Ghiaie formate da clasti calcarei subarrotondati in matrice siltoso-terrosa rossastra, con rare intercalazioni di silt argillosi. Spessore massimo di 10 m vicino al mare. Pleistocene sup. - Olocene |
| <u>Unità della Fossa Bradanica</u> | |
| Calcarenite di Gravina | |
| GRA | Calcareniti e calciruditi bioclastiche caratterizzate in alcuni casi da depositi siltoso sabbiosi alla base. Spessore massimo 20 m. Pleistocene inf. |
| <u>Unità della Piattaforma carbonatica apula</u> | |
| Calcarea di Bari | |
| CBA | Calcarei detritici a grana fine, di colore bianco o nocciola, generalmente in strati o in banchi decimetrici e metrici. Frequenti intercalazioni di calcari dolomitici e dolomie. Spessore affiorante di 470 m. Cretacico sup. |

Figura 2 Legenda unità geologiche.

Depositi recenti:

- *Deposito alluvionale recente e attuale (b)*: Si tratta di sedimenti di origine alluvionale che occupano il fondo di numerosi solchi erosivi e ampie aree a ridosso del sistema di San Pasquale e del sistema di San Girolamo. Sono costituiti da ghiaie formate da clasti calcarei subarrotondati in matrice siltoso-terrosa rossastra, con rare intercalazioni di silt argillosi. Il loro spessore varia notevolmente da luogo a luogo, raggiungendo nelle zone più prossime al mare i 10 m. L'età è riferibile al Pleistocene superiore-Olocene.



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 12 di 90 |

Unità della Fossa Bradanica

- *Calcarenite di Gravina (GRA)*: la calcarenite di Gravina affiora in lembi più o meno estesi sia nella fascia costiera che nelle zone più elevate del foglio 438 "Bari". Lo spessore massimo affiorante è molto variabile, da pochi decimetri fino a un massimo di circa 20 m. Comprende calcareniti bianche o giallastre, più o meno cementate, con frammenti di Coralli, Echini, Ostreidi e Pettinidi. Le facies tipiche della Calcarenite di Gravina sono costituite da calcareniti e calciruditi litobioclastiche che, tranne eccezioni rappresentate da sedimenti siltoso-sabbiosi a luoghi presenti alla base, poggiano direttamente sui calcari cretaci. In questo caso il contatto è rappresentato da una superficie di abrasione marina, frequentemente marcata da discordanza angolare. Il contatto trasgressivo è ovunque ben evidente per il contrasto litologico fra i sottostanti calcari micritici del Cretacico e la soprastante unità calcarenitica, dovuto ai diversi caratteri tessiturali e al diverso grado di cementazione. Lo spessore massimo affiorante è di circa 20 m. L'età è riferibile al Pleistocene inferiore.

Unità della Piattaforma carbonatica apula

- *Calcarea di Bari (CBA)*: la successione del Calcarea di Bari affiora estesamente in tutta l'area del Foglio 438 "Bari" e rappresenta il substrato sedimentari su cui poggiano tutte le unità più recenti. È rappresentata da calcari detritici a grana fine, di colore bianco o nocciola, generalmente in strati o in banchi. Il Calcarea di Bari è costituito da calcari microfossiliferi bianchi e grigio chiari in strati di spessore decimetrico e metrico costituiti da litofacies a tessitura prevalentemente fango-sostenuta (*mudstone/wackestone* biopeloidali e *bindstone* stromatolitici) e subordinatamente granulo-sostenuta (*packstone/grainstone* bioclastici e biopeloidali) a luoghi interessati da diagenesi meteorica e/o da pedogenesi (*floatstone/rudstone* intraclastici in matrice argillosa residuale) con frequenti intercalazioni di calcari dolomitici e di dolomie grigie. Nella parte inferiore ed intermedia della successione si intercalano bancate massive di calcari dolomitici grigi e di dolomie grigio scuro con tessitura dolomicritica e dolosparitica. Inoltre, nella parte inferiore e superiore del Calcarea di Bari, sono stati riconosciuti calcari macrofossiliferi a molluschi (prevalentemente rudiste); si tratta di gruppi di strati costituiti da accumuli conchigliari autoctoni o paraautoctoni con tessitura prevalente di tipo *floatstone/rudstone*, corrispondenti, dal più antico al più recente, al "livello Palese", al "livello Sannicandro" e al "livello Toritto". Tali livelli rappresentano alcuni dei noti "livelli guida" dell'intera successione del Calcarea di Bari affiorante nel

territorio delle Murge e sono da intendersi, più propriamente, come gruppi di strati in cui la medesima litofacies (*floatstone/rudstone* a rudiste) si ripete, mostrando continuamente gli stessi caratteri e la stessa associazione di specie, per spessori variabili da pochi metri a poche decine di metri intercalandosi anche ciclicamente ad altre facies carbonatiche di piattaforma. L'assetto generale degli strati del calcare di Bari è quello di una monoclinale complicata da faglie e pieghe che immerge verso i quadranti meridionali. (Cretacico superiore).

3.2 INQUADRAMENTO SISMICO

Richiamando quanto già riportato nella Relazione Geologica, Geomorfologica e Sismica (doc. [27]), nel presente paragrafo vengono riassunti gli aspetti principali relativi alla sismicità dell'area oggetto di studio.

L'azione sismica che governa il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto (di esercizio – SLE e Ultimi - SLU) è qui definita in accordo alle Norme Tecniche 2018 (NTC2018), a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sottosuolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

La definizione dell'azione sismica include le ordinate dello spettro di risposta elastico di accelerazione $S_e(T)$ corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R per la vita utile della struttura.

In sintesi, la forma degli spettri di risposta di progetto (considerati su sottosuolo rigido di riferimento) è definita dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima per sito rigido e superficie topografica orizzontale;
- 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.

Nei paragrafi seguenti verrà dapprima stabilito il periodo di riferimento per l'azione sismica (V_R), in base alla classificazione delle opere in progetto. Successivamente, verranno definiti gli stati limite di interesse per la verifica strutturale, arrivando a definire i periodi di ritorno (T_R) corrispondenti dell'azione

sismica da considerare, determinata a sua volta per condizioni di suolo rigido ed a livello del piano campagna in corrispondenza di alcuni punti di interesse.

3.2.1 Vita Nominale, Classe d'Uso, Tempo di Ritorno

La Vita Nominale V_N di un'opera, intesa come il periodo temporale entro cui l'opera stessa può essere usata per lo scopo al quale è destinata purché soggetta alla manutenzione ordinaria, è così definita dalle NTC2018:

- $V_N \leq 10$ anni, per opere provvisorie e opere provvisionali;
- $V_N \geq 50$ anni, per opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale;
- $V_N \geq 100$ anni, per grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di importanza strategica.

Nel caso in esame, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, concordemente a quanto riportato nel Manuale di progettazione RFI 2021 (sezione Ponti e Strutture) per opere nuove su infrastrutture a velocità $V < 250$ km/h, si considera $V_N = 75$ anni.

Le opere sono suddivise dalle NTC2018 in classi d'uso, la cui appartenenza è stabilita sulla base dell'importanza dell'opera rispetto alle esigenze di operatività a valle di un evento sismico. In particolare, le classi d'uso sono così definite:

- Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. Per le quali si ha un coefficiente d'uso $C_U = 0.7$.
- Classe II: ... *omissis* ... Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso III o IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza ... *omissis* Per le quali $C_U = 1.0$.
- Classe III: ... *omissis* ... Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso IV, e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 1.5$.



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 15 di 90 |

- Classe IV: ... *omissis* ... Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 2$.

Nel caso in esame si assume:

- Per la linea (eccetto punti singoli specificati successivamente) e le interferenze minori: Classe d'Uso III ($C_U = 1.5$);
- Per opere relative all'interferenza con SS16 e i fabbricati di pertinenza RFI: Classe d'Uso IV ($C_U = 2.0$).

Pertanto, nel caso in esame, l'azione sismica di verifica viene associata ad un periodo di riferimento pari a:

- $V_R = V_N \times C_U = 75 \times 1.5 = 112.5$ anni per la linea (eccetto punti singoli specificati successivamente), e interferenze minori;
- $V_R = V_N \times C_U = 75 \times 2 = 150$ anni per l'interferenza con SS16 e i fabbricati di pertinenza RFI.

3.2.2 Stati limite, probabilità di superamento e periodi di ritorno

L'azione sismica di progetto deve essere determinata in funzione della probabilità di superamento P_{VR} dipendente dagli Stati Limite di verifica e correlata a periodo di ritorno (T_R) e periodo di riferimento (V_R) attraverso la seguente formulazione

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Gli Stati Limite di riferimento per verifiche in presenza di sisma, così come definiti nelle NTC2018 al par. 3.2.1 sono:

Stato Limite Ultimo (SLU)

- Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, SLV, definito come lo stato limite in corrispondenza del quale la struttura subisce una significativa perdita della rigidità nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontale. Ad esso è associata una probabilità di superamento $P_{VR}=10\%$;
- Stato Limite di Prevenzione del Collasso, SLC, stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali, mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali. Ad SLC è associata una $P_{VR}=5\%$.

Stato limite di Esercizio (SLE)

- Stato Limite di immediata Operatività SLO per le strutture ed apparecchiature che debbono restare operative a seguito dell'evento sismico ($P_{VR}=81\%$);
- Stato Limite di Danno SLD definito come lo stato limite da rispettare per garantire la sostanziale integrità dell'opera ed il suo immediato utilizzo ($P_{VR}=63\%$).

Considerando i periodi di riferimento assunti ($V_R=112.5$ anni e $V_R=150$ anni), ai quattro stati limite sopra descritti corrispondono i tempi di ritorno T_R riportati in Tabella 3-1.

Tabella 3-1: periodi di ritorno per l'azione sismica, per i diversi stati limite e relativi alla VR assunta in progetto.

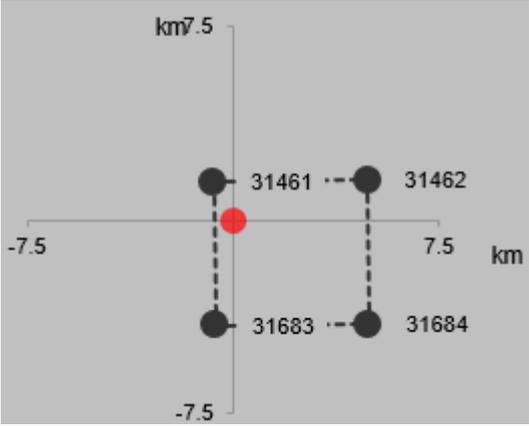
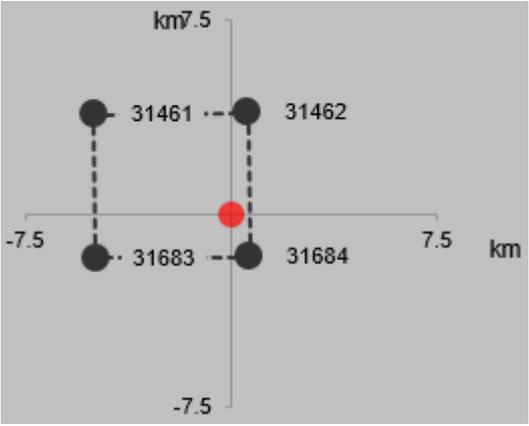
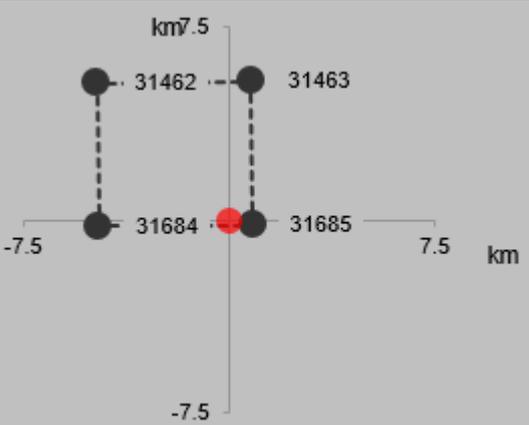
| STATO LIMITE | T_R (anni) | |
|--------------|--------------------|------------------|
| | $V_R = 112.5$ anni | $V_R = 150$ anni |
| SLO | 68 | 90 |
| SLD | 113 | 151 |
| SLV | 1068 | 1424 |
| SLC | 2193 | 2475 |

3.2.3 Accelerazione di Riferimento su Suolo Rigido

In allegato alle NTC2008, i valori a_g , F_0 e T_c^* sono forniti per ognuno dei 10751 nodi di un reticolo di riferimento che copre il territorio nazionale. I valori corrispondenti a punti intermedi ai nodi di griglia si ottengono per interpolazione sui quattro punti adiacenti.

Per definire i valori della pericolosità sismica di base, sono stati scelti 3 punti di riferimento (P1, P2 e P3) in corrispondenza dell'inizio, della metà e della fine dell'intervento (Tabella 3-2).

Tabella 3-2: nodi del reticolo di riferimento nell'intorno dei tracciati oggetto di studio. Elaborazione da foglio di calcolo Spettri di Risposta SPETTRI-NTC v. 1.0.3b, distribuito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2009.

| TRATTO DI INTERESSE | LONGITUDINE | LATITUDINE | LOCALIZZAZIONE PUNTI DI GRIGLIA |
|-----------------------|-------------|------------|--|
| P1 (inizio tracciato) | 16.687340° | 41.176847° |  |
| P2 (metà tracciato) | 16.736656° | 41.153669° |  |
| P3 (fine tracciato) | 16.799857° | 41.138622° |  |



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
 PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| | | | | | |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 19 di 90 |

Tabella 3-3: valori di a_g per punti diversi nel tracciato di interesse (ottenuti mediante il foglio di calcolo Spettri- NTCver.1.0.3.xls, CSLLPP (2009)) per $V_R = 112.5$ anni (la linea ferroviaria).

| STATO LIMITE | T_R (anni) | a_g (g) | | |
|--------------|--------------|-----------|-------|-------|
| | | P1 | P2 | P3 |
| SLO | 68 | 0.040 | 0.038 | 0.037 |
| SLD | 113 | 0.049 | 0.047 | 0.044 |
| SLV | 1068 | 0.121 | 0.111 | 0.101 |
| SLC | 2193 | 0.160 | 0.142 | 0.127 |

Sono stati quindi individuati due tratti della linea per la definizione della pericolosità sismica di progetto lungo il tracciato:

- Il tratto A1 da P1 a P2 con il punto P1 preso come punto di riferimento;
- Il tratto A2 da P2 a P3 con il punto P2 preso come punto di riferimento.

Il risultato dell'interpolazione per i parametri a_g , F_o e T_c^* per i due tratti individuati è riportato in Tabella 3-4.

Tabella 3-4: valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* per gli stati limite di riferimento per i due tratti lungo la linea ferroviaria e per le diverse V_R delle opere.

| TRATTO | V_R (anni) | STATO LIMITE | T_R (anni) | a_g (g) | F_0 (-) | T_c^* (s) |
|--------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-------------|
| A1 | 112.5 | SLO | 68 | 0.040 | 2.488 | 0.317 |
| | | SLD | 113 | 0.049 | 2.517 | 0.357 |
| | | SLV | 1068 | 0.121 | 2.626 | 0.521 |
| | | SLC | 2193 | 0.160 | 2.616 | 0.515 |
| | 150 | SLO | 90 | 0.045 | 2.486 | 0.344 |
| | | SLD | 151 | 0.055 | 2.586 | 0.374 |
| | | SLV | 1424 | 0.135 | 2.622 | 0.519 |
| | | SLC | 2475 | 0.167 | 2.614 | 0.515 |
| A2 | 112.5 | SLO | 68 | 0.038 | 2.478 | 0.316 |
| | | SLD | 113 | 0.047 | 2.485 | 0.368 |
| | | SLV | 1068 | 0.111 | 2.649 | 0.539 |
| | | SLC | 2193 | 0.142 | 2.682 | 0.536 |
| | 150 | SLO | 90 | 0.043 | 2.492 | 0.343 |
| | | SLD | 151 | 0.053 | 2.490 | 0.401 |
| | | SLV | 1424 | 0.123 | 2.662 | 0.538 |
| | | SLC | 2475 | 0.148 | 2.687 | 0.535 |

3.2.4 Risposta Sismica Locale

Per i fini del presente studio, gli effetti di amplificazione stratigrafica e topografica sono stati valutati sulla base dell'approccio semplificato fornito dalle NTC2018, le quali definiscono un fattore di sito S di amplificazione sismica come funzione sia della categoria di sottosuolo (S_S), sia dell'andamento della superficie topografica (attraverso il coefficiente S_T):

$$S = S_S \cdot S_T$$

In particolare, il sottosuolo viene categorizzato a fini sismici in base alla velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ (in m/s) definita come:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove:

- h_i = spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ = valore di velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N = numero di strati;
- H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da $V_s \geq 800$ m/s.

Nel caso in esame, si considera la categoria di sottosuolo riportata nella Relazione Geologica (Doc. [27]), individuata a partire dalle evidenze delle prove Down-Hole. Vista l'eterogeneità dei materiali rocciosi lungo il tracciato di interesse, in via cautelativa è stata assunta lungo tutto il tracciato di interesse come categoria di suolo E.

I coefficienti S_S per la categoria di sottosuolo E si ottengono dalla seguente espressione (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_S = 1.00 \leq 2.00 - 1.10 \cdot F_o \cdot a_g/g \leq 1.60$$

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, sempre sulla base delle informazioni fornite nella Relazione Geologica (Doc. [27]), il tracciato corre all'interno di un sito sostanzialmente pianeggiante e viene classificato in categoria topografica T1 (Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, v. Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018). Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta $S_T = 1$.

Il fattore di sito S e l'azione sismica di progetto $a_{max} = S \cdot a_g$ ottenuti per i diversi periodi di ritorno sono riportati in Tabella 3-5.

Tabella 3-5: valori dei coefficienti di sito S e dell'accelerazione di progetto a_{max} .

| TRATTO | V_R (anni) | STATO LIMITE | T_R (anni) | a_g (g) | S (-) | a_{max} (g) |
|--------|--------------|--------------|--------------|-----------|-------|---------------|
| A1 | 112.5 | SLO | 68 | 0.040 | 1.600 | 0.064 |
| | | SLD | 113 | 0.049 | 1.600 | 0.079 |
| | | SLV | 1068 | 0.121 | 1.600 | 0.194 |
| | | SLC | 2193 | 0.160 | 1.541 | 0.246 |
| | 150 | SLO | 90 | 0.045 | 1.600 | 0.072 |
| | | SLD | 151 | 0.055 | 1.600 | 0.088 |
| | | SLV | 1424 | 0.135 | 1.600 | 0.217 |
| | | SLC | 2475 | 0.167 | 0.159 | 0.254 |
| A2 | 112.5 | SLO | 68 | 0.038 | 1.600 | 0.061 |
| | | SLD | 113 | 0.047 | 1.600 | 0.075 |
| | | SLV | 1068 | 0.111 | 1.600 | 0.177 |
| | | SLC | 2193 | 0.142 | 1.580 | 0.225 |
| | 150 | SLO | 90 | 0.043 | 1.600 | 0.069 |
| | | SLD | 151 | 0.053 | 1.600 | 0.084 |
| | | SLV | 1424 | 0.123 | 1.600 | 0.196 |
| | | SLC | 2475 | 0.148 | 1.561 | 0.232 |

3.2.5 Considerazioni sulla liquefazione

Come indicato nella relazione geologica (doc. [27]), data la natura dei terreni presenti nell'area in esame, la verifica a liquefazione viene omessa.

4 CAMPAGNE DI INDAGINE UTILIZZATE PER LO STUDIO GEOTECNICO

Per la redazione del presente studio sono stati utilizzati i risultati delle indagini geognostiche in sito e geotecniche di laboratorio della campagna eseguita da Italferr tra dicembre 2020 e febbraio 2021, ovvero:

- n. 11 sondaggi geognostici spinti sino alla profondità massima di 40.0 m dal p.c., con esecuzione di prove in foro SPT, prove di permeabilità Lefranc e Lugeon, prove dilatometriche, installazione di piezometri a “tubo aperto” per il monitoraggio della falda e di tubi in PVC per l’esecuzione di prove geofisiche di tipo Down-Hole (Tabella 4-1);
- n. 2 prove geofisiche MASW 2D, n.2 sezioni sismiche a rifrazione, n.2 sezioni sismiche a riflessione, n.2 sezioni Georadar e n.12 Tomografie Elettriche.

Tabella 4-1: sondaggi a carotaggio continuo relativi alla campagna ITALFERR del 2020-2021.

| | | TR01_20_PZ | GA01_25_PZ | TR04_1_30_DH | TR04_3_20_PZ | GA02_30_PZ | GA03_30_DH |
|-----------------------|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| QUOTA (m s.l.m.) | | 9.613 | 20.437 | 22.395 | 14.384 | 30.076 | 33.811 |
| COORDINATE UTM | E | 642370.092 | 642975.630 | 643516.099 | 645206.062 | 645351.749 | 645905.063 |
| | N | 4559432.172 | 4558674.350 | 4558299.569 | 4558468.483 | 4557394.067 | 4557148.099 |
| PROFONDITÀ (m) | | 20 | 25 | 30 | 20 | 30 | 30 |
| CAMPIONI RIMANEGGIATI | | - | - | 1 | - | - | - |
| CAMPIONI LITOIDI | | 4 | 4 | 4 | - | 4 | 4 |
| PROVE SPT | | - | - | - | - | - | - |
| PROVE DILATOMETRICHE | | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 |
| PROVE PERMEABILITÀ | LUGEON | 2 | 2 | 1 | - | 3 | 3 |
| | LEFRANC | - | - | - | - | - | - |
| ATTREZZATURA | | T.A. 3" | T.A. 3" | D.H. | T.A. 2.5" | T.A. 2.5" | D.H. |

| | | GA04_40_PZ | TR07_14 | GA05_1_30_DH | GA05_2_30_PZ | TR08_20_PZ |
|-----------------------|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| QUOTA (m s.l.m.) | | 38.750 | 39.071 | 29.097 | 13.959 | 11.269 |
| COORDINATE UTM | E | 646478.406 | 647032.160 | 649034.288 | 649977.094 | 650080.728 |
| | N | 4556884.914 | 4556529.306 | 4556411.277 | 4556302.513 | 4556288.870 |
| PROFONDITÀ (m) | | 40 | 14 | 30 | 30 | 20 |
| CAMPIONI RIMANEGGIATI | | - | - | 1 | 1 | - |
| CAMPIONI LITOIDI | | 6 | 4 | 5 | 7 | 7 |
| PROVE SPT | | - | - | 1 | 1 | - |
| PROVE DILATOMETRICHE | | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| PROVE PERMEABILITÀ | LUGEON | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | LEFRANC | - | - | 1 | - | - |
| ATTREZZATURA | | T.A. 3" | | D.H | T.A. 2.5" | T.A. 2.5" |

In Tabella 4-2 sono riportati gli identificativi dei campioni prelevati all'interno dei suddetti sondaggi e le relative profondità di prelievo (i colori corrispondono alle unità geotecniche descritte successivamente al paragrafo 6.3)

Tabella 4-2: identificativi dei campioni prelevati e relative profondità di prelievo.

| SONDAGGIO | CAMPIONE | PROFONDITÀ | |
|--------------|----------|------------|-------|
| | | da | a |
| TR01-20-PZ | CL1 | 3.20 | 3.50 |
| | CL2 | 8.25 | 8.50 |
| | CL3 | 11.50 | 11.95 |
| | CL4 | 17.50 | 17.75 |
| GA01-25-PZ | CL1 | 4.80 | 5.00 |
| | CL2 | 10.00 | 10.35 |
| | CL3 | 15.30 | 15.60 |
| | CL4 | 21.20 | 21.50 |
| TR04-30-1-DH | CL1 | 4.10 | 4.50 |
| | CL2 | 9.00 | 9.20 |
| | CL3 | 14.00 | 14.30 |
| | CL4 | 19.50 | 19.65 |
| | CR1 | 10.00 | 10.20 |
| GA02-30-PZ | CL1 | 6.50 | 6.80 |
| | CL2 | 11.00 | 11.30 |
| | CL3 | 15.80 | 16.00 |
| | CL4 | 26.0 | 26.30 |
| GA03-30-DH | CL1 | 5.60 | 5.95 |
| | CL2 | 7.50 | 7.85 |
| | CL3 | 13.50 | 13.90 |
| | CL4 | 18.05 | 18.35 |
| GA04-40-PZ | CL1 | 4.40 | 4.80 |
| | CL2 | 8.25 | 8.60 |
| | CL3 | 10.50 | 10.80 |
| | CL4 | 19.30 | 19.60 |
| | CL5 | 23.20 | 23.40 |
| | CL6 | 32.30 | 32.50 |

| SONDAGGIO | CAMPIONE | PROFONDITÀ | |
|--------------|----------|------------|-------|
| | | da | a |
| TR07-14 | CL1 | 3.05 | 3.20 |
| | CL2 | 5.50 | 5.80 |
| | CL3 | 8.30 | 8.50 |
| | CL4 | 12.40 | 12.70 |
| GA05-1-30-DH | CL1 | 4.00 | 4.30 |
| | CL2 | 7.70 | 8.00 |
| | CL3 | 8.40 | 8.80 |
| | CL4 | 14.20 | 14.40 |
| | CL5 | 17.10 | 17.40 |
| | CR1 | 1.20 | 1.50 |
| | SPT1 | 1.50 | 1.73 |
| GA05-2-30-PZ | CL1 | 3.10 | 3.40 |
| | CL2 | 5.40 | 5.70 |
| | CL3 | 9.00 | 9.30 |
| | CL4 | 13.40 | 13.70 |
| | CL5 | 18.00 | 18.30 |
| | CL6 | 24.00 | 24.30 |
| | CL7 | 29.40 | 29.70 |
| | CR1 | 1.20 | 1.50 |
| | SPT1 | 2.00 | 2.45 |
| TR08-20-PZ | CL1 | 2.40 | 2.70 |
| | CL2 | 4.00 | 4.30 |
| | CL3 | 6.30 | 7.00 |
| | CL4 | 10.70 | 11.00 |
| | CL5 | 14.00 | 14.30 |
| | CL6 | 16.40 | 16.70 |
| | CL7 | 19.40 | 19.70 |

L'ubicazione dei sondaggi è riportata in Figura 4-1. Per il dettaglio delle prove si rimanda agli specifici elaborati (Doc. [23]).



Figura 4-1: ubicazione sondaggi - Google Earth.

Si è fatto inoltre riferimento a quanto emerso dal sondaggio XIA32D003, sito in corrispondenza della parte più a sud del tracciato in esame ((si veda doc.[22]), effettuato nel corso di una precedente campagna di indagini relativa al Progetto Preliminare del Riassetto del Nodo Ferroviario di Bari.

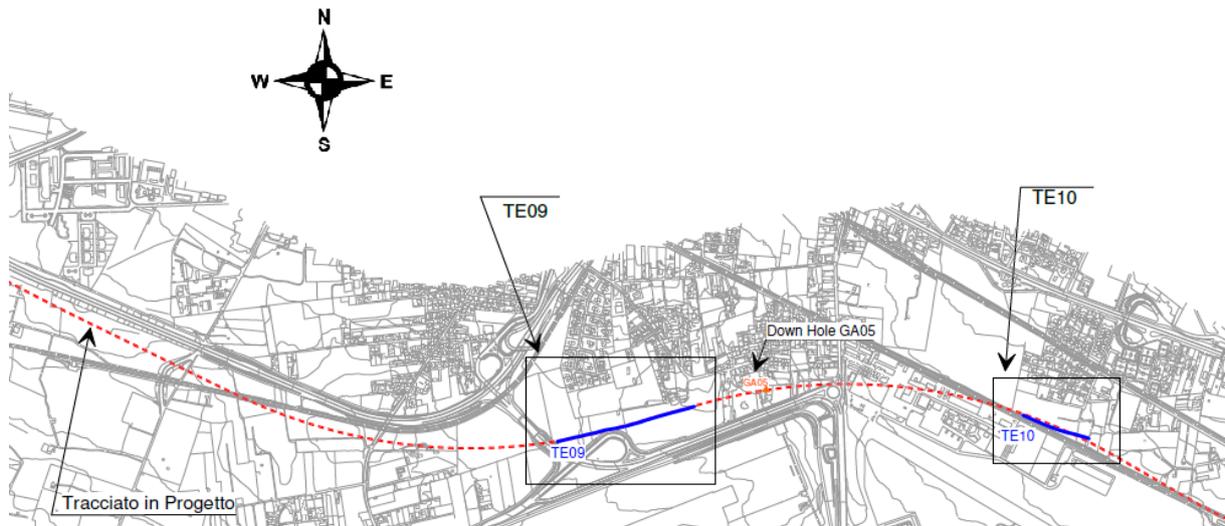
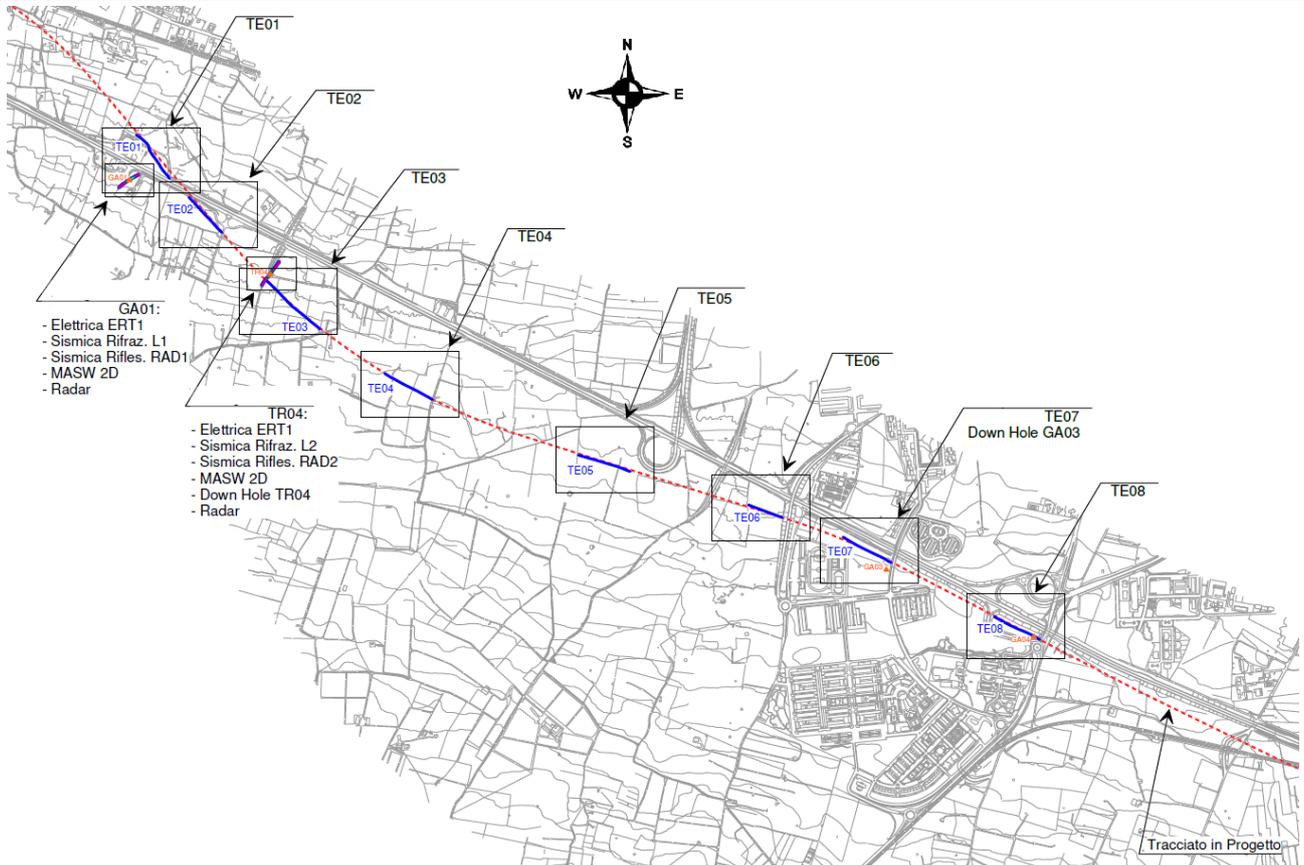


Figura 4-2: corografia indagini geofisiche.

5 CARATTERISTICHE DELLA FALDA ACQUIFERA

Le caratteristiche idrogeologiche generali dell'area in esame sono descritte in uno specifico capitolo della Relazione Geologica.

I livelli di falda sono stati definiti in primo luogo sulla base delle letture piezometriche disponibili effettuate nell'ambito della campagna Italferr 2020/2021. Ove possibile si è fatto riferimento anche a sondaggi disponibili da altri progetti nell'area in esame.

In particolare, la Tabella 5-1 contiene una sintesi dei dati raccolti durante le operazioni di perforazione e in corrispondenza di successive misurazioni. I valori dei livelli di falda z_w sono espressi in metri come soggiacenza della stessa dal piano campagna. In tutti i piezometri la falda è risultata trovarsi a circa 0 m s.l.m. e pertanto non interferente con le profondità di scavo previste in progetto.

Tabella 5-1: letture piezometriche – sondaggi.

| SONDAGGIO | QUOTA (m s.l.m.) | TRATTO FENESTRATO (m da p.c.) | SOGGIACENZA FALDA FREATICA (m da p.c.) |
|--------------|---------------------|-------------------------------------|--|
| TR01_20_PZ | 9.613 | 8.00-20.00 | 9.60 |
| GA01_25_PZ | 20.437 | 15.00-25.00 | 21.00 |
| TR04_3_20_PZ | 14.384 | 10.00-20.00 | 14.20 |
| GA02_30_PZ | 30.076 | 24.00-30.00 | 28.80 |
| GA04_40_PZ | 38.750 | 31.00-40.00 | 38.60 |
| GA05_2_30_PZ | 13.959 | 12.00-30.00 | 13.80 |
| TR08_20_PZ | 11.269 | 7.00-20.00 | 11.30 |

Sono inoltre state eseguite delle misure in due piezometri S4 e S9 già esistenti (installati nel 2017) e distanti circa 1 km dalla linea in progetto. Anche in questi casi la falda è stata rilevata a circa 0 m s.l.m..

Tabella 5-2: letture piezometriche – piezometri esistenti.

| SONDAGGIO | QUOTA (m s.l.m.) | SOGGIACENZA FALDA FREATICA (m da p.c.) |
|-----------|---------------------|--|
| S4 | 15.00 | 14.70 |
| S9 | 22.00 | 22.90 |



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 30 di 90 |

6 UNITÀ GEOTECNICHE

6.1 CONSIDERAZIONI GENERALI

A partire dal modello geologico locale e sulla base dell'interpretazione dei risultati delle indagini disponibili, sono state identificate le unità geotecniche di riferimento, cioè unità aventi comportamento omogeneo dal punto di vista meccanico.

Per l'individuazione delle unità geotecniche sono stati analizzati e correlati i dati stratigrafici corrispondenti alle verticali di sondaggio delle diverse campagne di indagine e i risultati delle prove in sito e di laboratorio disponibili.

Al di sotto di uno strato di terreno vegetale, di spessore medio di circa 0.5m, i Calcari di Bari sono risultati presenti in tutti i sondaggi eseguiti lungo il tracciato e sono stati analizzati dunque sia tramite gli esiti delle indagini in sito, sia tramite le risultanze delle prove di laboratorio, sia nelle porzioni in affioramento lungo la trincea della Strada Statale SS16 (nei pressi del cavalcavia dell'intersezione con via Modugno), con sei stazioni geomeccaniche effettuate in prossimità del sondaggio TR07,.

Al di sotto del terreno vegetale, la parte più superficiale dei calcari, costituita da una fascia molto alterata e allentata e avente mediamente spessore di 1m, è stata invece assimilata a un terreno granulare di buone caratteristiche meccaniche.

La restante formazione dei calcari di Bari, sulla base di quanto emerso dalla campagna di indagini effettuata, è stata suddivisa in 2 sub-unità geotecniche (C1 e C2): C1, definito *calcare alterato*, più superficiale e C2, definito *calcare moderatamente alterato*, presente più in profondità. La suddivisione è stata effettuata sia tramite l'analisi delle indagini geofisiche svolte, commentate al par. 6.3., sia sulla base delle evidenze dei parametri meccanici e dei valori di GSI riportati al capitolo 8, che individuano i calcari C1 fino a circa 8m da pc, aventi buone caratteristiche meccaniche, e i calcari C2 a partire da - 8m da pc, aventi caratteristiche meccaniche significativamente migliori.

Si osserva che, nel tratto più a sud del tracciato ferroviario (pk 8+400÷8+700 ca, 9100÷9575 ca, 10500÷fine tracciato), è inoltre emersa la presenza discontinua, al di sotto della copertura di terreno vegetale, di uno strato di calcarenite di spessore massimo non superiore a 2 m, assimilabile nel comportamento meccanico ad un terreno a grana grossa.

I criteri e le correlazioni utilizzate per la interpretazione delle prove geotecniche in sito e di laboratorio e la definizione dei valori caratteristici dei parametri meccanici delle singole unità geotecniche sono illustrati rispettivamente ai capitoli 7 e 8.

6.2 CONSIDERAZIONI SULLA BASE DELLE PROVE GEOFISICHE

Nel corso della campagna di indagine sono state svolte numerose prove geofisiche i cui risultati sono riportati nell'elaborato specifico (doc. [24]). Nel dettaglio, le indagini eseguite e i risultati, utili anche all'individuazione del modello geotecnico generale, sono sintetizzati nella seguente Tabella 6-1.

Tabella 6-1: dettaglio prove geofisiche.

| PROVA | RISULTATI |
|--------------------------|--|
| 12 Tomografie elettriche | definizione di struttura, stratificazione ed eventuali cavità/aree vacuolate |
| 2 Sismica a Rifrazione | stima dei moduli elastici dinamici a partire dalle velocità V_p e V_s |
| 2 Sismica a Riflessione | Individuazione di eventuali cavità/aree vacuolate |
| 2 sezioni Georadar | Individuazione di eventuali cavità superficiali/aree vacuolate |
| 2 MASW 2D | Individuazione di eventuali cavità/aree vacuolate; stima di $V_{s,eq}$ e della categoria di sottosuolo |
| 3 Down Hole | Individuazione di eventuali cavità/aree vacuolate; stima di $V_{s,eq}$ e della categoria di sottosuolo |

In particolare le tomografie elettriche, acquisite con configurazione elettrodica dipolo-dipolo, hanno permesso di valutare le variazioni verticali potenzialmente riconducibili a cavità/aree vacuolate nella formazione dei Calcari di Bari. La possibile presenza di cavità/aree vacuolate all'interno dell'ammasso calcareo micritico può infatti essere individuata mediante:

- aree localizzate ad alta resistività. L'eventuale presenza di grandi cavità comporta contrasti di resistività molto marcati (3-4 volte) rispetto ai valori circostanti. Differenze di minore entità possono invece essere attribuiti a zone maggiormente fratturate o con presenza di carsismo di bassa entità (aree vacuolate);
- presenza di anomalie a bassa resistività possono essere invece riferibili a cavità riempite con materiali fini (limi argillosi) derivanti dal disfacimento dei calcari.



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 32 di 90 |

Anomalie a bassa resistività potenzialmente riconducibili a cavità riempite con materiale fine sono state riscontrate:

- nella sezione TE01 nel tratto compreso tra gli elettrodi e17 ed e29 ad una profondità di circa 10 m da piano campagna;
- nella sezione TR04_ERT2 nei tratti tra gli elettrodi e10 - e16 ed e20 – e 35 ad una profondità di circa 9 – 12 m da piano campagna. In questo caso la presenza di una cavità riempita con materiale fine è confermata dal sondaggio geognostico TR04_DH dal quale è emersa la presenza di limi intorno a 10-12 m dal piano campagna. In Figura 6-2 è riportato l'andamento delle velocità delle onde di taglio determinate con la prova Down – Hole che, in linea con quanto detto, mostra una sensibile riduzione intorno a 9-12 m di profondità;
- nella sezione TE03 è presente un'ampia area a bassa resistività individuata come "anomalia" nei tratti tra gli elettrodi e19 – e68, a partire da una profondità di -5m da pc
- nella sezione TE08 è presente una fascia a bassa resistività in quasi tutta la sezione ad una profondità tra i 3m ai 7 m dal piano campagna.

Le sezioni TE04 e TE06 presentano nel complesso una resistività molto più bassa rispetto alle restanti sezioni acquisite. Tale differenza può coincidere con una maggiore fratturazione nei calcari micritici di questi siti, che riempite di materiali fini di disfacimento del calcare rendono l'ammasso roccioso molto più conduttivo.

Anomalie ad alta resistività potenzialmente riconducibili a zone calcaree vacuolate sono state riscontrate:

- nella sezione TR04_ERT2 nel tratto compreso tra gli elettrodi e5 ed e15 ad una profondità di circa 5 m da piano campagna;
- nella sezione TE09 nei tratti compresi tra gli elettrodi e58 -e70, e74-e81, e124-e126, rispettivamente ad una profondità media di circa 1 m, 20m, 5m da piano campagna.

Le tomografie elettriche hanno quindi complessivamente evidenziato la notevole variabilità che caratterizza i calcari presenti lungo il tracciato progettuale con presenza di numerose aree particolarmente fratturate o interessate da carsismo di bassa entità (aree vacuolate) e possibili cavità

riempite da materiali fini. Tutte le anomalie evidenziate dalle prove geofisiche sono state riportate negli elaborati dei profili geotecnici (Doc [30]-[36])

Nella figura seguente è riportato un esempio di sezione che ha intercettato una cavità riempita di materiale fine, evidenziata sia dalla tomografia elettrica che dalla Down-Hole ivi eseguita.

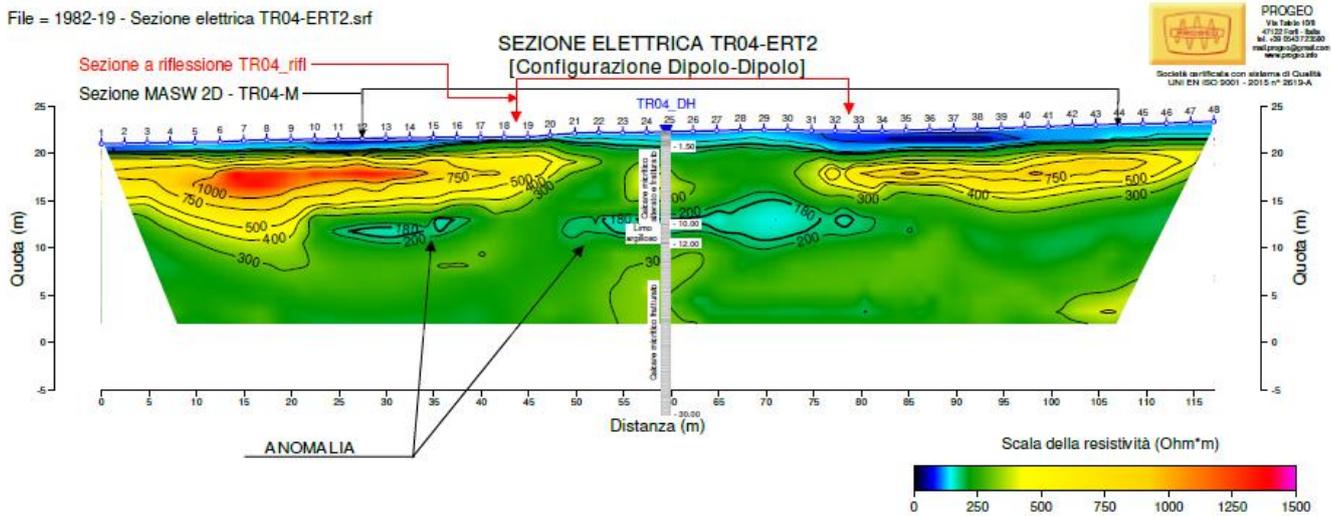


Figura 6-1: tomografia elettrica TR04.



Figura 6-2: TR04-DH velocità onde di taglio.

6.3 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

Le **unità geotecniche** individuate sono di seguito elencate:

- **unità geotecnica TC:** *Terreni di copertura* corrispondenti ai materiali di riporto e al terreno vegetale presenti nel profilo geologico;
- **unità geotecnica CAL / Calt:** *calcarenite e calcari alterati* assimilati ad un terreno a comportamento granulare. Corrispondono rispettivamente all' unità geologica **GRA** e alla parte estremamente superficiale (fino a circa 1.5m da pc) e alterata dell'unità geologica **CBA**. Nonostante siano unità geologiche diverse, si è ritenuto opportuno accorparle in un'unica unità geotecnica vista l'omogeneità in termini di comportamento geotecnico tra queste due formazioni geologiche. Per la caratterizzazione geotecnica di tale unità si fa riferimento ai dati disponibili per le calcareniti dell'unità geologica GRA, riscontrate nella parte terminale del tracciato;
- **unità geotecnica C:** *calcari* corrispondenti all' unità geologica denominata **CBA**. Tale unità è stata suddivisa in due sottounità **C1** e **C2**, per quanto detto all'inizio del cap. 6

In Figura 6-3 si riporta uno schema riassuntivo delle unità geotecniche individuate: l'assetto stratigrafico è illustrato nei profili geotecnici (Doc. [30][31][32][33][34][35]).

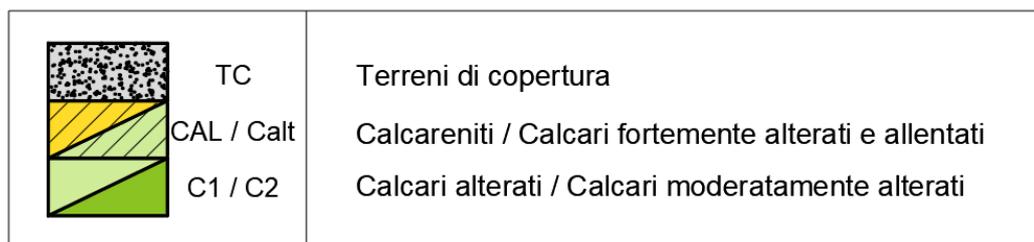


Figura 6-3: schema riassuntivo delle unità geotecniche.

7 CRITERI E CORRELAZIONI UTILIZZATI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

7.1 TERRENI GRANULARI

In questa sezione si riportano i criteri utilizzati per caratterizzare i terreni prevalentemente granulari.

In conseguenza del fatto che in tali materiali risulta difficile prelevare campioni indisturbati, la caratterizzazione geotecnica è affidata principalmente all'interpretazione delle prove in situ (mediante correlazioni empiriche) e delle prove di classificazione di laboratorio effettuate su campioni rimaneggiati.

L'interpretazione delle prove in situ è finalizzata a determinare principalmente le seguenti caratteristiche:

- caratteristiche fisiche e parametri di stato del deposito;
- parametri di resistenza al taglio;
- parametri di deformabilità;
- coefficienti di permeabilità.

7.1.1 Caratteristiche fisiche e parametri di stato

7.1.1.1 Peso di volume

Per la valutazione del peso di volume si fa riferimento ai risultati delle specifiche prove di laboratorio ove disponibili.

7.1.1.2 Densità relativa da correlazioni con N_{SPT}

In accordo a quanto indicato da Skempton (1986) la densità relativa D_r può essere correlata al valore N_{SPT} con la seguente legge:

$$D_r = \left(\frac{1}{A + B \cdot \sigma_{v0}'} \cdot N_{SPT} \right)^{0.5}$$

essendo:

- A, B = costanti empiriche indicate in Tabella 7-1;

- σ_{vo}' = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota di esecuzione della prova SPT (kg/cm²);
- N_{SPT} = numero di colpi per 30 cm di infissione;
- $(K_o)_{nc} = 1 - \sin\phi'$ = coefficiente di spinta a riposo per terreni normalmente consolidati (-);
- $(k_o)_{sc} = (K_o)_{nc} \cdot (GSC)^{0.5}$ = coefficiente di spinta a riposo per terreni sovra consolidati (-);
- GSC = grado di sovra consolidazione (-).

Tabella 7-1: costanti empiriche A e B (Skempton, 1986).

| Tipo di materiale | A | B |
|---------------------------------------|-----------|--|
| Sabbie fini normalmente consolidate | 27.5 | 27.5 |
| Sabbie grosse normalmente consolidate | 43.3 | 21.7 |
| Sabbie sovra consolidate | 27.5÷43.3 | $(21.7 \div 27.5) \cdot \frac{1 + 2 \cdot (k_o)_{sc}}{1 + 2 \cdot (k_o)_{nc}}$ |

7.1.2 Angolo di resistenza al taglio

7.1.2.1 Correlazione con densità relativa

A partire dai valori della densità relativa ottenuti come precedentemente descritto, l'angolo di attrito delle unità relative potrà essere stimato con le seguenti correlazioni di Schmertmann (1977):

- ϕ (°) = 28 + 0.14 · D_R sabbia fine uniforme
- ϕ (°) = 31.5 + 0.115 · D_R sabbia media uniforme e sabbia fine ben gradata
- ϕ (°) = 34.5 + 0.10 · D_R sabbia grossa uniforme e sabbia media ben gradata
- ϕ (°) = 38 + 0.08 · D_R Ghiaia media e fine e sabbia e ghiaia poco limosa

7.1.2.2 Correlazione da SPT

Per la valutazione dell'angolo di attrito tramite correlazioni dirette con i dati di N_{SPT} si fa riferimento a quanto proposto da Wolff (1989), cioè:

$$\varphi (^{\circ}) = 27.1 + 0.3 \cdot C_N \cdot N_{SPT} - 0.00054 \cdot (C_N \cdot N_{SPT})^2$$

con:

- $C_N = 2 / (1 + \sigma'_{vo}/p_a)$ per sabbie fini
- $C_N = 3 / (2 + \sigma'_{vo}/p_a)$ per sabbie grosse

7.1.3 Parametri di rigidezza

7.1.3.1 Modulo elastico operativo a basse deformazioni

I criteri per la stima del modulo elastico a basse deformazioni sono riferiti al calcolo di E_0 e G_0 a partire dai valori delle velocità delle onde di taglio V_s .

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

La velocità delle onde di taglio da prove SPT in sabbie e ghiaie può essere ricavata sulla base alla correlazione proposta da Ohta & Goto (1978) (vedi anche Baldi et al. 1989); in base a tale correlazione vale quanto segue:

$$V_s = C \cdot (N_{SPT})_{60\%}^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \quad (\text{m/s})$$

essendo:

- $C = 67.3$;
- z = profondità dal p.c. in metri;
- f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedi Tabella 7-2), nel caso in esame assunto pari a 1.3;
- f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedi Tabella 7-3), nel caso in esame assunto pari a 1.15 per l'unità CAL.

Tabella 7-2: relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente f_A
(funzione dell'epoca geologica del deposito).

| f_A | Olocene | Pleistocene |
|-------|---------|-------------|
| | 1.0 | 1.3 |

Tabella 7-3: relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente f_G
(funzione della composizione granulometrica del deposito).

| f_G | Ghiaie | Sabbie ghiaiose | Sabbie grosse | Sabbie medie | Sabbie fini |
|-------|--------|-----------------|---------------|--------------|-------------|
| | 1.45 | 1.15 | 1.14 | 1.09 | 1.07 |

Dai valori della velocità delle onde di taglio V_s si ottiene il modulo di taglio iniziale G_0 secondo quanto segue:

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

essendo:

- ρ = Densità del materiale.

7.1.3.2 Modulo elastico operativo da colpi SPT

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi incoerenti possono essere stimate a partire dall'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT applicando il metodo di Denver (1982) secondo il quale il modulo di Young E' può essere calcolato come:

$$E' = S_1 \cdot N_{SPT} + S_2$$

dove S_1 e S_2 sono costanti che assumono valori in funzione della granulometria e della litologia, come in tabella sottostante.

Tabella 7-4: parametri metodo di Denver.

| Tipo di terreno | S₁ | S₂ |
|------------------------|----------------------|----------------------|
| Sabbie argillose | 0,316 | 1,58 |
| Sabbie sature | 0,478 | 7,17 |
| Sabbie NC | 0,756 | 18,75 |
| Sabbie OC | 1,04 | 36,79 |

7.1.4 Permeabilità

I coefficienti di permeabilità k sono determinabili sulla base dei risultati delle prove di permeabilità *Lefranc* in foro di sondaggio; in alternativa o per conferma essi possono essere stimati sulla base della letteratura disponibile.

7.2 FORMAZIONI ROCCIOSE

La caratterizzazione geotecnica delle formazioni rocciose viene effettuata facendo riferimento ai criteri di rottura proposti e aggiornati da Hoek & Brown a partire dal 1980. In particolare:

- vengono dapprima estratti i parametri relativi alla roccia intatta;
- viene stimato il GSI (Geological Strength Index);
- l'inviluppo delle resistenze dell'ammasso roccioso viene valutato sulla base di quanto riportato in Hoek et al (2002) e poi approssimato attraverso una relazione lineare (Mohr-Coulomb) nell'intervallo di pressione di confinamento che è più appropriata per il problema in esame; in questa fase progettuale preliminare, quindi, l'ammasso è preliminarmente considerato come continuo omogeneo;
- vengono stimate le caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso attraverso note correlazioni fornite dalla letteratura.

7.2.1 Parametri della roccia intatta

I principali parametri che consentono la caratterizzazione della roccia intatta sono:

- la densità;
- la resistenza a compressione;
- i moduli di rigidezza.

Per la definizione dei valori da assegnare alle sopra elencate grandezze si fa riferimento generalmente ai risultati delle prove di laboratorio disponibili (prove uniassiali, prove triassiali, *Point-Load test*, prove soniche, ecc.) In particolare la resistenza a compressione è stata ricavata da prove di compressione monoassiale e da point load. In quest'ultimo caso, come riportato nel doc. [26], σ_c è stata ottenuta attraverso la relazione $\sigma_c = 24 I_{s50}$.

I dati assunti sulla base di queste informazioni vengono anche posti a confronto con dati di letteratura al fine di verificarne l'attendibilità rispetto a quanto proposto dalla bibliografia.

A titolo di esempio si riportano in Figura 7-1 i grafici di Deere e Miller (1996) che forniscono utili indicazioni sul "rapporto di modulo", definito come il rapporto tra la resistenza a compressione (σ_t) ed il modulo tangente (E_t), per vari tipi di rocce.

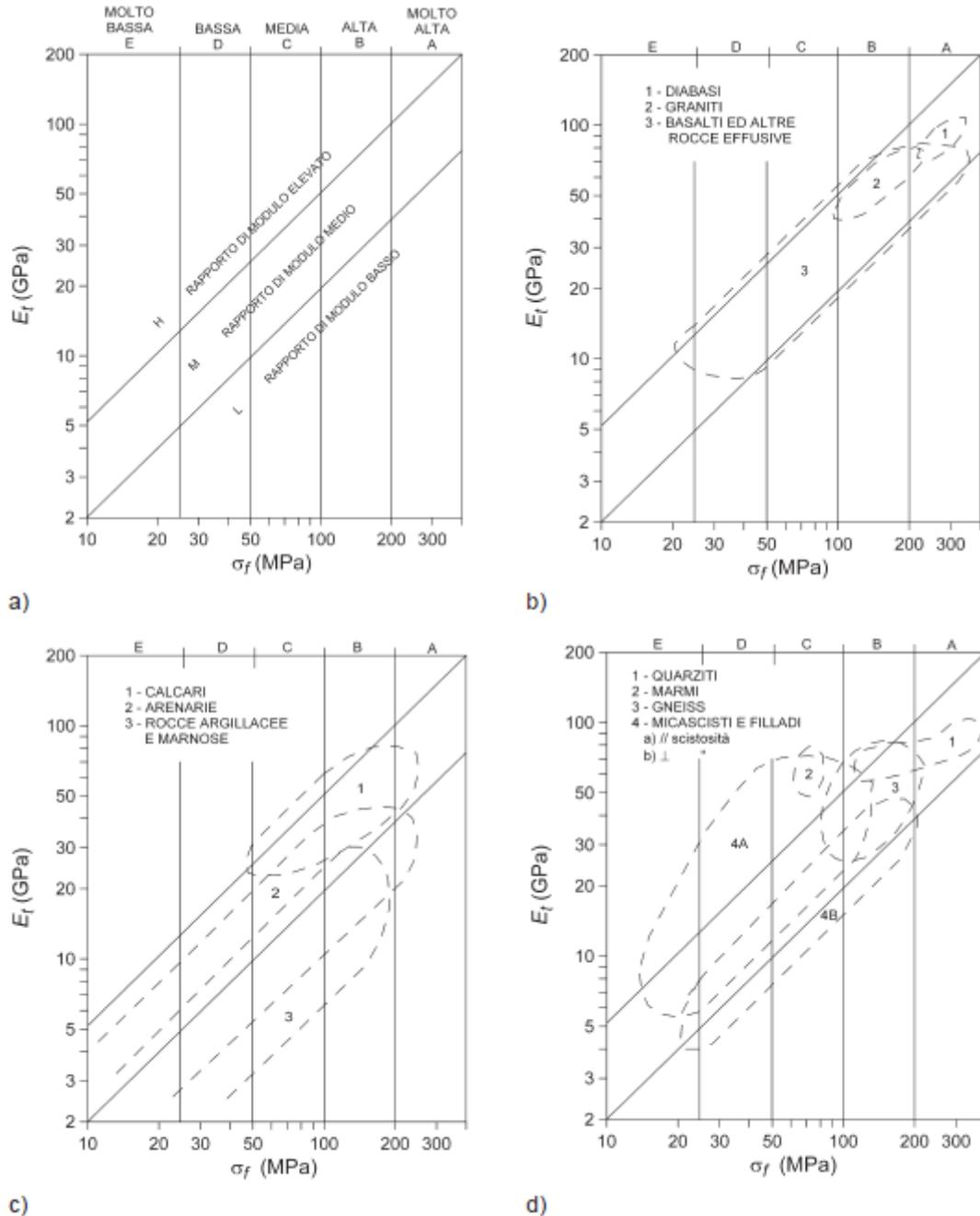


Figura 1.2. Classificazione dei materiali rocciosi [Deere & Miller 1966, modificata].
Il modulo di Young tangente è il valore per un carico pari al 50 % di quello di rottura.

Figura 7-1: classificazione materiali rocciosi.

7.2.2 Parametri dell'ammasso roccioso e stima del Geological Strength Index (GSI)

La valutazione del parametro GSI viene qui effettuata sulla base dello schema suggerito da Hoek et al. (1995), utilizzando i dati a disposizione dalle prove di laboratorio e i valori di RQD, di spaziatura, condizione delle discontinuità e condizioni idrauliche dai rilievi geomeccanici.

A partire dai valori dei vari parametri di interesse vengono quindi attribuiti i rispettivi indici parziali in modo da poter ottenere il GSI come somma degli stessi.

| Parametro | Misura o descrizione | | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|--|---|---|--------|-------|
| | Indice | | | | | | |
| 1. σ_f (MPa) | > 200 | 200 ÷ 100 | 100 ÷ 50 | 50 ÷ 25 | 25 ÷ 10 | 10 ÷ 3 | 3 ÷ 1 |
| | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 2. RQD (%) | 100 ÷ 90 | 90 ÷ 75 | 75 ÷ 50 | 50 ÷ 25 | < 25 | | |
| | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| 3. \bar{s} (m) | > 2 | 2 ÷ 0.6 | 0.6 ÷ 0.2 | 0.2 ÷ 0.06 | < 0.06 | | |
| | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| 4. Condizione delle discontinuità | Pareti molto scabre, giunti non continui, chiusi, roccia non alterata | Pareti poco scabre, apertura < 1 mm, roccia poco alterata | Pareti poco scabre, apertura < 1 mm, roccia molto alterata | Pareti laminate, riempimento < 5 mm, apertura 1 ÷ 5 mm, giunti continui | Riempimento mat. sciolto > 5 mm, apertura > 5 mm, giunti continui | | |
| | 25 | 20 | 12 | 6 | 0 | | |
| 5. Condizioni idrauliche | | | | | | | 10 |

Figura 7-2: schema per la valutazione degli indici parziali del sistema di classificazione GSI (da Hoek et al, 1995 modificata).

Una volta selezionato il valore di GSI viene comunque considerato un campo di variazione di ± 5 punti nell'intorno dello stesso, corrispondente ad un intervallo di confidenza del 90% (Hoek, 1998).

7.2.3 Resistenza dell'ammasso roccioso

La resistenza dell'ammasso roccioso viene stimata attraverso l'applicazione del metodo descritto da Hoek et al. (2002) che utilizza l'indice GSI per passare dal criterio di Hoek-Brown della roccia intatta a quello per l'ammasso.

La formulazione del citato criterio è:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

in cui

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

con

- GSI = Geological Strength Index (par. 6.4.1);
- m_i = coefficiente relativo alla roccia intatta;
- σ_1 = tensione principale efficace maggiore;
- σ_3 = tensione principale efficace minore;
- σ_{ci} = resistenza alla compressione semplice della roccia intatta ottenuta dalle prove di laboratorio;
- D= fattore di disturbo.

Per ogni litotipo il coefficiente m_i in generale viene valutato sulla base dei risultati di prove uniassiali e triassiali su provini di roccia intatta e di un criterio di rottura analogo a quello dell'ammasso roccioso,

con GSI=100 (cioè applicabile per roccia intatta). In mancanza di dati sperimentali si fa riferimento a valori da bibliografia (Tabella 7-5).

Tabella 7-5: Valori tipici e campo di parametri di resistenza secondo il criterio di Hoek-Brown per vari tipi di rocce

| | σ_{ci} (MPa) | m_i |
|------------------------|---------------------|------------|
| Marne - Siltiti | 10÷60 | 10 (7÷11) |
| Arenarie | 40÷200 | 14 (7÷22) |
| Calcari | 50÷200 | 8 (5.5÷14) |
| Graniti - Granodioriti | 100÷300 | 28 (26÷32) |

Per quanto riguarda il fattore di disturbo D (variabile da 0 a 1), che in generale dipende dall'allentamento causato dalle metodologie di scavo, viene assunto un valore $D > 0.7$ per pendii naturali e fronti di scavo aperti, per tener conto della mancanza di confinamento laterale.

Ai fini applicativi, come da pratica comune, il criterio curvilineo precedentemente descritto viene approssimato con la relazione lineare di Mohr-Coulomb nell'intervallo di pressione di confinamento correlato al problema in esame. Tale criterio diviene, nel piano σ_1 - σ_3 ,

$$\sigma_1' = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_3'$$

In cui c' e ϕ' sono rispettivamente la coesione e l'angolo di attrito attribuiti all'ammasso roccioso per le condizioni assunte.

7.2.4 Caratteristiche di deformabilità

7.2.4.1 Moduli elastici iniziali

I moduli iniziali di taglio (G_0) e di Young (E_0) possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio V_s utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 46 di 90 |

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$
 (kPa)

essendo:

γ_t = peso di volume naturale della roccia in kN/m³;

ν' = rapporto di Poisson;

V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s.

La velocità di propagazione delle onde di taglio V_s può essere ricavata direttamente da prove geofisiche “down hole”, “cross hole”, sismiche a rifrazione, MASW, ecc.

7.2.4.2 Moduli operativi

Per i moduli di Young “operativi” si fa riferimento a quanto disponibile dalle prove dilatometriche, in particolare facendo riferimento al secondo ciclo di carico.

Inoltre i moduli di Young “operativi” $E_{op}=E_{rm}$ dell’ammasso roccioso possono essere stimati per confronto anche sulla base della seguente espressione (Hoek and Diederichs, 2006) in funzione del GSI:

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

In cui E_i è il modulo relativo alla roccia intatta.

Per un ulteriore confronto sono stati valutati inoltre i valori dinamici dei moduli derivanti dalle prove down-hole. Negli ammassi rocciosi fratturati i moduli statici sono sempre più bassi dei moduli dinamici. Misure effettuate in Italia in numerosi siti, evidenziano che vi è una notevole dispersione dei valori dei rapporti tra modulo statico e dinamico e pertanto risulta complesso determinare il modulo statico a partire da quello dinamico. Pertanto nella caratterizzazione si è fatto riferimento solamente ai valori ricavati dai primi due metodi enunciati (moduli da dilatometriche e da GSI).

7.2.5 Permeabilità

I coefficienti di permeabilità k sono determinabili sulla base dei risultati delle prove di permeabilità (es: *Lugeon*) in foro di sondaggio; in alternativa o per conferma essi possono essere stimati sulla base dei valori disponibili in letteratura, come da esempi in Figura 7-3.

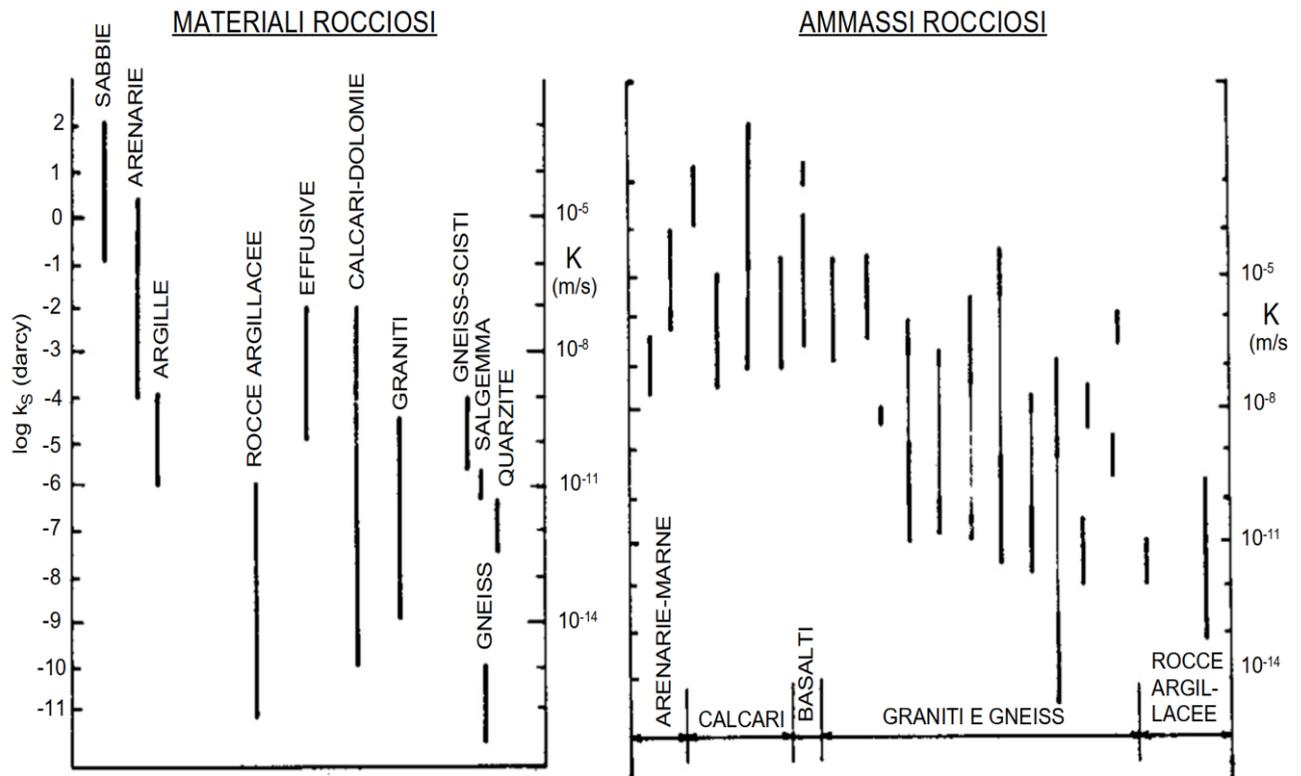


Figura 7-3: valori di riferimento della permeabilità per ammassi rocciosi (Brace, 1980).

8 DETERMINAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI

La definizione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici è stata effettuata con i criteri e le correlazioni illustrati al precedente capitolo. Nel seguito si riportano e discutono i dati relativi a ciascuna unità geotecnica, differenziando l'approccio di caratterizzazione in base alla natura incoerente o rocciosa ad essa associata.

La presente relazione descrive la caratterizzazione geotecnica generale corrispondente alla stima dei range dei valori caratteristici dei parametri meccanici associati alle unità geotecniche rappresentate nel modello geotecnico generale (cfr profilo geotecnico da [30] a [36]). Si rimanda alle specifiche relazioni di calcolo incluse in progetto per la descrizione dei singoli modelli geotecnici definiti per lo studio di specifici aspetti progettuali.

8.1 UNITÀ TC

Dalla campagna di indagini effettuata nell'ambito del presente progetto non sono disponibili dati a disposizione per la caratterizzazione dei terreni di copertura. Data la natura prettamente superficiale di tale unità e i modesti spessori, si considerano cautelativamente i seguenti parametri, considerati tipici per tali terreni:

- Peso specifico $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- Angolo di attrito $\varphi' = 28^\circ - 30^\circ$
- Coesione efficace $c' = 0 - 5 \text{ kPa}$
- Modulo di Young $E = 10 \text{ MPa}$

Tali valori sono in linea con quanto emerso nel corso di un'altra campagna di indagini effettuata nel corso del Progetto Preliminare del Riassetto del Nodo Ferroviario di Bari. In tale occasione infatti era stato effettuato, tra gli altri, un sondaggio, denominato XIA32D003, sito in corrispondenza della parte più a sud del tracciato in esame ((si veda doc.[22]). A seguire si riporta uno stralcio della Relazione Geologia e Idrogeologia (doc. [21]) del suddetto progetto.

"... in corrispondenza del sondaggio XIA32D003 viene riscontrata la presenza di una sottile copertura di terreno sabbioso-limoso, identificabile con la formazione trasgressiva dei "depositi marini terrazzati".

All'interno di questo deposito è stato possibile effettuare, ad una profondità compresa tra m 1.50 e m 1.95, una prova SPT (7-10-9) che ha fornito un valore normalizzato di N_{SPT} pari a 10 (valutato secondo la formula di Liao e Whitman), il quale ha permesso di conferire a tale orizzonte sabbioso-ghiaioso, in base a delle relazioni empiriche del tipo $E' = 600 * (NSPT + 6)$ (Bowles, 1998: Fondazioni – p. 278 – Ed. Mc Graw-Hill) di uso comune nella pratica geotecnica, un parametro delle caratteristiche deformative piuttosto scadenti e quantificabile in circa 10 MPa.”

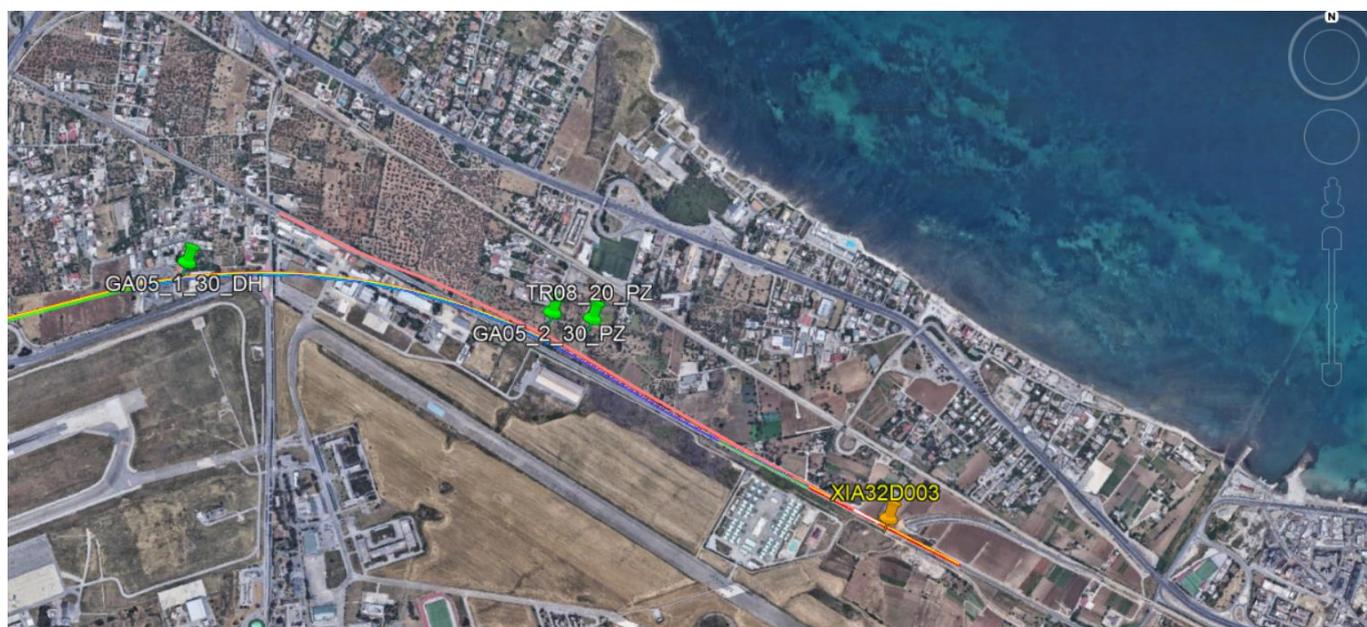


Figura 8-1: ubicazione sondaggio XIA32D003 - Google Earth.

8.2 UNITÀ CAL E CALT

Nel presente capitolo si riporta la caratterizzazione delle unità in questione, con riferimento ai pochi dati disponibili (prove SPT) per la calcarenite (identificata come CAL). A tali valori si fa riferimento, in assenza di indagini, anche per i calcari alterati (identificati come Calt) assumendo che calcareniti e calcari alterati abbiano un comportamento geotecnico omogeneo.

8.2.1 Caratteristiche fisiche e parametri di stato

In Figura 8-2 sono riportate le percentuali di ghiaia, sabbia, limo e argilla ottenute dalle analisi granulometriche eseguite sui campioni rimaneggiati prelevati all'interno dell'unità CAL. Ne risulta una presenza di ghiaia + sabbia superiore al 60% con una percentuale di argilla pari a circa il 6%.

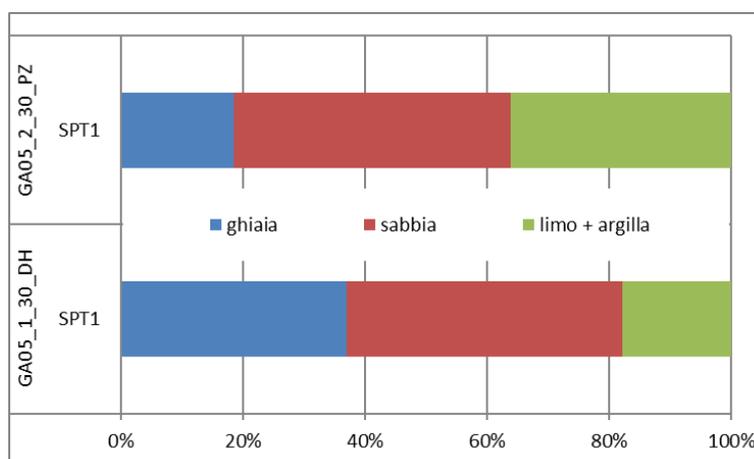


Figura 8-2: unità CAL - distribuzione granulometrica.

La densità relativa (Figura 8-3) è stata ricavata in accordo con quanto indicato da Skempton (1986), come indicato al 7.1.1, assumendo i valori di A e B per le sabbie grosse normalmente consolidate. Delle due prove SPT effettuate, una ha dato esito "rifiuto" (con $N_{SPT} = 100$ si indica appunto che la prova è andata a rifiuto). Dall'altro valore di N_{SPT} disponibile è stato ricavato un valore di D_r pari a 98%.

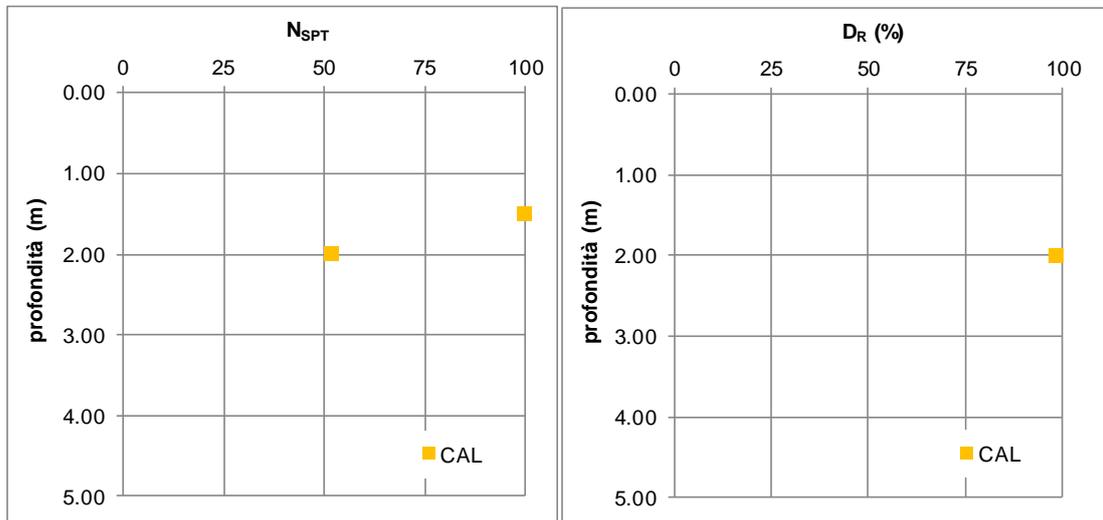


Figura 8-3: unità CAL - densità relativa da correlazioni con N_{SPT}.

8.2.2 Caratteristiche di Resistenza

In Figura 8-4 è riportato il valore dell'angolo di attrito ottenuto, a partire dal valore di N_{SPT}, ricorrendo alla formulazione di Schmertmann e Wolff come indicato al 7.1.2. Ne è derivato un angolo di attrito $\varphi' = 44^\circ$. Dati i pochi valori disponibili e l'elevato grado di fratturazione e alterazione riscontrati, cautelativamente si assume $\varphi' = 35^\circ - 37^\circ$.

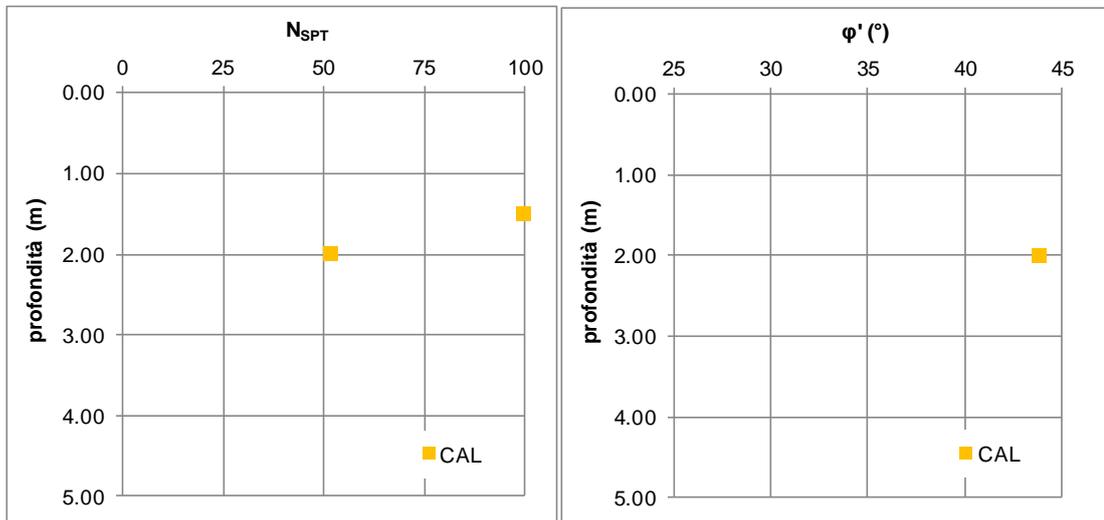


Figura 8-4: unità CAL- angolo di attrito da correlazione con N_{SPT} .

8.2.3 Caratteristiche di Deformabilità

I valori dei moduli operativi sono stati sia ricavati direttamente dalle prove SPT, attraverso la correlazione proposta da Denver, sia estratti a partire dai dati di G_0 ottenuti dai valori di V_s (determinati con le correlazioni da N_{SPT}).

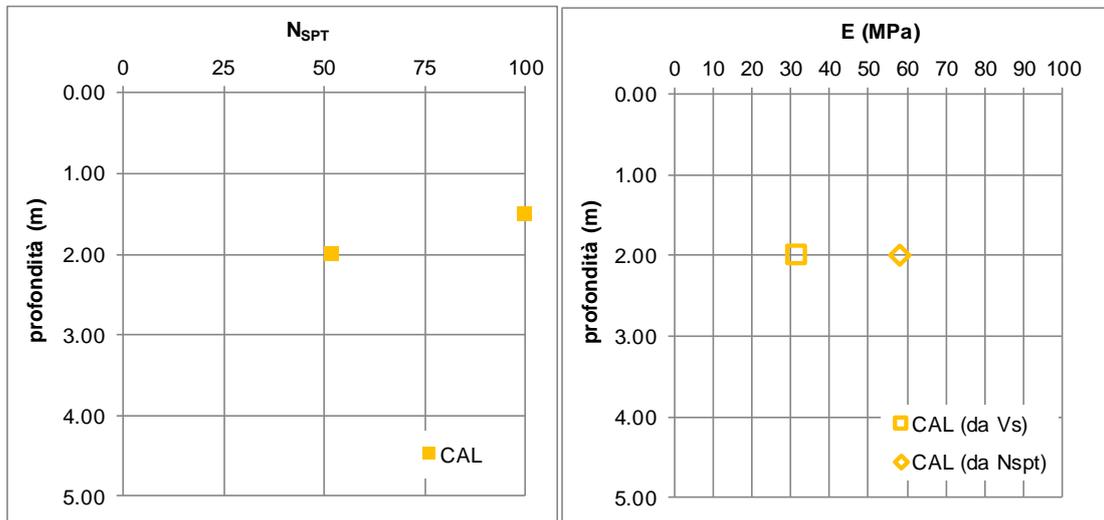


Figura 8-5: valori di E.

8.2.4 Permeabilità

Nell'ambito della campagna d'indagine all'interno delle calcareniti è stata eseguita una prova di permeabilità tipo Lefranc a carico variabile i cui risultati sono riportati in Tabella 8-1.

Tabella 8-1: risultati delle prove Lefranc.

| sondaggio | Prof. (m) | Unità | k (m/s) |
|-----------|-----------|-------|----------|
| GA05_1_DH | 1.5 - 3.0 | CAL | 1.62E-03 |

In ogni caso, come evidenziato dalla carta idrogeologica (doc. [29]), a tale unità può esser attribuita una permeabilità compresa tra 10^{-3} m/s e 10^{-5} m/s.



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 54 di 90 |

8.3 UNITÀ C1 E C2

8.3.1 Parametri della roccia intatta

Sui campioni di roccia intatta sono state eseguite complessivamente n.40 prove di densità, 15 prove di compressione uniassiale con misura del modulo, 17 prove point load e 5 prove di compressione triassiale. I risultati sono sintetizzati in Tabella 8-2, Tabella 8-3 e Tabella 8-4, nelle quali vengono anche distinti i campioni tra le subunità C1 (in verde chiaro) e C2(in verde scuro).

Tabella 8-2: valori di densità ottenuti su campioni di roccia intatta.

| SONDAGGIO | CAMPIONE | PROFONDITÀ | | PESO VOLUME APP. | POROSITÀ EFFICACE | ASSORB. ACQUA |
|--------------|----------|------------|--------|-------------------------------|-------------------|---------------|
| | | DA m | A m | γ kN/m ³ | % | % |
| TR01-20-PZ | CL1 | 3.20 | 3.50 | 25.43 | 2.9 | 1.13 |
| | CL2 | 8.25 | 8.50 | 25.32 | 4.5 | 1.78 |
| | CL3 | 11.50 | 11.95 | 24.84 | 5.2 | 2.07 |
| | CL4 | 17.50 | 17.75 | 22.29 | 9.2 | 4.12 |
| GA01-25-PZ | CL1 | 4.80 | 5.00 | 24.79 | 5.3 | 2.68 |
| | CL2 | 10.00 | 10.35 | 25.35 | 3.7 | 1.47 |
| | CL3 | 15.30 | 15.60 | 24.33 | 7.2 | 2.96 |
| | CL4 | 21.20 | 21.50 | 24.12 | 7.7 | 3.18 |
| TR04-30-1-DH | CL1 | 4.10 | 4.50 | 25.32 | 4.5 | 1.77 |
| | CL2 | 9.00 | 9.20 | 25.30 | 4.2 | 1.66 |
| | CL3 | 14.00 | 14.30 | 22.70 | 12.9 | 5.70 |
| | CL4 | 19.50 | 19.65 | 25.24 | 4.1 | 1.64 |
| GA02-30-PZ | CL1 | 6.50 | 6.80 | 21.99 | 12.5 | 5.67 |
| | CL2 | 11.00 | 11.30 | 23.71 | 9.5 | 4.03 |
| | CL3 | 15.80 | 16.00 | 24.11 | 7.8 | 3.22 |
| | CL4 | 26.00 | 26.30 | 21.55 | 14.9 | 6.91 |
| GA03-30-DH | CL1 | 5.60 | 5.95 | 25.01 | 5.9 | 2.38 |
| | CL2 | 7.50 | 7.85 | 25.08 | 5.8 | 2.32 |
| | CL3 | 13.50 | 13.90 | 25.40 | 4.1 | 1.63 |
| | CL4 | 18.05 | 18.35 | 25.14 | 5.9 | 2.35 |
| GA04-40-PZ | CL1 | 4.40 | 4.80 | 26.24 | 2.1 | 0.79 |
| | CL2 | 8.25 | 8.60 | 25.59 | 2.9 | 1.12 |
| | CL3 | 10.50 | 10.80 | 25.32 | 3.7 | 1.46 |
| | CL4 | 19.30 | 19.60 | 25.20 | 4.3 | 1.70 |
| | CL5 | 23.20 | 23.40 | 24.92 | 4.7 | 2.28 |
| | CL6 | 32.30 | 32.50 | | | |
| TR07-14 | CL1 | 3.05 | 3.20 | | | |
| | CL2 | 5.50 | 5.80 | 25.64 | 3.4 | 1.33 |
| | CL3 | 8.30 | 8.50 | 25.61 | 3.4 | 1.32 |
| | CL4 | 12.40 | 12.70 | 25.84 | 3.5 | 1.36 |
| GA05-1-30-DH | CL1 | 4.00 | 4.30 | 25.84 | 2.3 | 0.88 |
| | CL2 | 7.70 | 8.00 | | | |
| | CL3 | 8.40 | 8.80 | 22.73 | 10.4 | 4.57 |
| | CL4 | 14.20 | 14.40 | 25.06 | 5.0 | 1.98 |
| | CL5 | 17.10 | 17.40 | 24.65 | 6.8 | 2.76 |
| GA05-2-30-PZ | CL1 | 3.10 | 3.40 | | | |
| | CL2 | 5.40 | 5.70 | 22.25 | 15.1 | 6.78 |
| | CL3 | 9.00 | 9.30 | 23.28 | 12.2 | 5.23 |
| | CL4 | 13.40 | 13.70 | 24.69 | 6.9 | 2.77 |
| | CL5 | 18.00 | 18.30 | 24.12 | 7.3 | 3.01 |
| | CL6 | 24.00 | 24.30 | | | |
| | CL7 | 29.40 | 29.70 | | | |
| TR08-20-PZ | CL1 | 2.40 | 2.70 | 20.18 | 19.9 | 9.88 |
| | CL2 | 4.00 | 4.30 | 23.09 | 12.9 | 5.57 |
| | CL3 | 6.30 | 7.00 | | | |
| | CL4 | 10.70 | 11.00 | 25.10 | 5.8 | 2.31 |
| | CL5 | 14.00 | 14.30 | | | |
| | CL6 | 16.40 | 16.70 | 24.39 | 7.2 | 2.94 |
| | CL7 | 19.40 | 19.70 | | | |

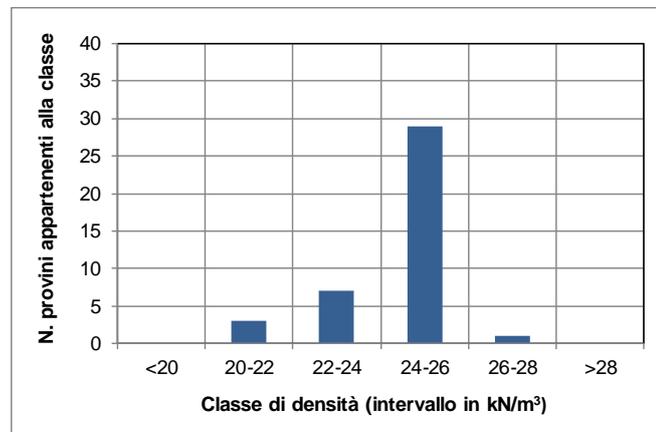
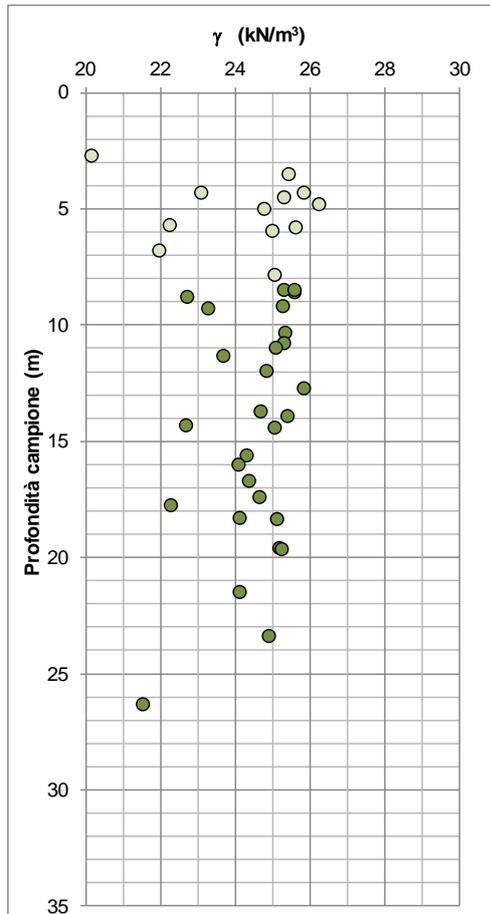


Figura 8-6: valori di densità.

I valori della densità, riportati in Figura 8-6 sono compresi sostanzialmente tra 22 e 26 kN/m^3 con la quasi totalità dei valori compresi nell'intervallo 24-26 kN/m^3 , senza manifestare differenze significative con la profondità. I valori nel loro complesso restituiscono un valore medio di 24 kN/m^3 .

Nel seguito si riportano i valori di resistenza e rigidezza ottenuti dalle prove di laboratorio.

Tabella 8-3: valori di resistenza uniassiale e moduli ottenuti su campioni di roccia intatta da prove monoassiali e PLT.

| SONDAGGIO | CAMPIONE | PROFONDITÀ | | MONOASSIALE STRUMENTATA | | | | POINT LOAD | |
|--------------|----------|------------|--------|-------------------------|------------|------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| | | DA m | A m | σ_c MPa | ν - | E_{tan} GPa | E_{sec} Gpa | $\sigma_c = 24 * I_{s50}$ MPa | I_{s50} MPa |
| TR01-20-PZ | CL1 | 3.20 | 3.50 | | | | | 104.56 | 4.36 |
| | CL2 | 8.25 | 8.50 | | | | | 68.60 | 2.86 |
| | CL3 | 11.50 | 11.95 | 47.37 | 0.359 | 63.05 | 38.84 | | |
| | CL4 | 17.50 | 17.75 | | | | | 63.37 | 2.64 |
| GA01-25-PZ | CL1 | 4.80 | 5.00 | 40.32 | 0.166 | 20.39 | 23.81 | | |
| | CL2 | 10.00 | 10.35 | 69.87 | 0.263 | 44.83 | 41.23 | | |
| | CL3 | 15.30 | 15.60 | | | | | 84.07 | 3.50 |
| | CL4 | 21.20 | 21.50 | | | | | 84.52 | 3.52 |
| TR04-30-1-DH | CL1 | 4.10 | 4.50 | | | | | | |
| | CL2 | 9.00 | 9.20 | 68.49 | 0.288 | 59.00 | 58.28 | | |
| | CL3 | 14.00 | 14.30 | | | | | 54.39 | 2.27 |
| | CL4 | 19.50 | 19.65 | | | | | 79.33 | 3.31 |
| GA02-30-PZ | CL1 | 6.50 | 6.80 | 44.89 | 0.235 | 30.38 | 30.48 | | |
| | CL2 | 11.00 | 11.30 | | | | | 51.63 | 2.15 |
| | CL3 | 15.80 | 16.00 | | | | | 77.44 | 3.23 |
| | CL4 | 26.00 | 26.30 | | | | | 41.77 | 1.74 |
| GA03-30-DH | CL1 | 5.60 | 5.95 | | | | | | |
| | CL2 | 7.50 | 7.85 | | | | | 75.93 | 3.16 |
| | CL3 | 13.50 | 13.90 | | | | | 74.71 | 3.11 |
| | CL4 | 18.05 | 18.35 | 103.66 | 0.273 | 44.46 | 48.24 | | |
| GA04-40-PZ | CL1 | 4.40 | 4.80 | | | | | | |
| | CL2 | 8.25 | 8.60 | | | | | | |
| | CL3 | 10.50 | 10.80 | | | | | 101.68 | 4.24 |
| | CL4 | 19.30 | 19.60 | | | | | 94.41 | 3.93 |
| | CL5 | 23.20 | 23.40 | 105.22 | 0.268 | 48.05 | 45.91 | | |
| | CL6 | 32.30 | 32.50 | | | | | | |
| TR07-14 | CL1 | 3.05 | 3.20 | | | | | | |
| | CL2 | 5.50 | 5.80 | 107.17 | 0.152 | 49.22 | 34.58 | | |
| | CL3 | 8.30 | 8.50 | | | | | 74.09 | 3.09 |
| | CL4 | 12.40 | 12.70 | 136.12 | 0.282 | 58.03 | 58.55 | | |
| GA05-1-30-DH | CL1 | 4.00 | 4.30 | | | | | | |
| | CL2 | 7.70 | 8.00 | | | | | | |
| | CL3 | 8.40 | 8.80 | | | | | | |
| | CL4 | 14.20 | 14.40 | 150.91 | 0.27 | 49.75 | 52.14 | | |
| | CL5 | 17.10 | 17.40 | | | | | 85.33 | 3.56 |
| | CL1 | 3.10 | 3.40 | | | | | | |
| GA05-2-30-PZ | CL2 | 5.40 | 5.70 | 36.94 | 0.232 | 27.79 | 28.76 | | |
| | CL3 | 9.00 | 9.30 | 57.29 | 0.325 | 39.38 | 55.36 | | |
| | CL4 | 13.40 | 13.70 | | | | | 72.38 | 3.02 |
| | CL5 | 18.00 | 18.30 | | | | | | |
| | CL6 | 24.00 | 24.30 | | | | | | |
| | CL7 | 29.40 | 29.70 | | | | | | |
| | CL1 | 3.10 | 3.40 | | | | | | |
| TR08-20-PZ | CL1 | 2.40 | 2.70 | 25.76 | 0.271 | 20.22 | 21.07 | | |
| | CL2 | 4.00 | 4.30 | 39.40 | 0.109 | 24.56 | 18.62 | | |
| | CL3 | 6.30 | 7.00 | | | | | | |
| | CL4 | 10.70 | 11.00 | 116.37 | 0.278 | 53.87 | 56.11 | | |
| | CL5 | 14.00 | 14.30 | | | | | | |
| | CL6 | 16.40 | 16.70 | | | | | | |
| | CL7 | 19.40 | 19.70 | | | | | | |

Tabella 8-4: valori di resistenza e moduli da prove triassiali ottenuti su campioni di roccia intatta.

| SONDAGGIO | CAMPIONE | PROFONDITÀ | | COMPRESIONE TRIASSIALE | | | | |
|--------------|----------|------------|--------|---------------------------------|---------------------------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | DA m | A m | σ_1 N/mm ² | σ_3 N/mm ² | ν - | E_{tan} kN/mm ² | E_{sec} kN/mm ² |
| TR04-30-1-DH | CL1 | 4.10 | 4.50 | 126.51 | 1.50 | 0.223 | 84.19 | 85.73 |
| | | | | 175.04 | 3.00 | 0.263 | 64.85 | 62.72 |
| | | | | 204.04 | 4.50 | 0.407 | 47.04 | 52.13 |
| GA04-40-PZ | CL2 | 8.25 | 8.60 | 91.39 | 1.00 | 0.265 | 50.22 | 56.5 |
| | | | | 105.03 | 2.50 | 0.262 | 52.99 | 41.55 |
| | | | | 169.11 | 4.00 | 0.196 | 59.15 | 59.84 |
| GA05-1-30-DH | CL3 | 8.40 | 8.80 | 30.3 | 1.00 | 0.326 | 52.91 | 54.71 |
| | | | | 43.17 | 2.50 | 0.370 | 21.88 | 21.49 |
| | | | | 54.43 | 4.00 | 0.273 | 41.41 | 42.95 |
| GA05-2-30-PZ | CL5 | 18.00 | 18.30 | 64.08 | 1.50 | 0.177 | 34.58 | 27.47 |
| | | | | 79.7 | 3.00 | 0.199 | 36.78 | 34.5 |
| | | | | 100.38 | 4.50 | 0.267 | 49.02 | 50.61 |
| TR08-20-PZ | CL6 | 16.4 | 16.7 | 100.63 | 1.50 | 0.362 | 35.34 | 34.1 |
| | | | | 118.32 | 3.00 | 0.192 | 41.35 | 42.54 |
| | | | | 133.63 | 4.50 | 0.240 | 43.25 | 46.6 |

I valori di resistenza a compressione e del modulo tangente E_{t50} ricavati dalle prove di compressione sono stati inseriti in Figura 8-7, a titolo di confronto, nel grafico di Deere e Miller (1996), evidenziando che si tratta di valori tipici per l'unità in esame, riscontrabili anche in letteratura.

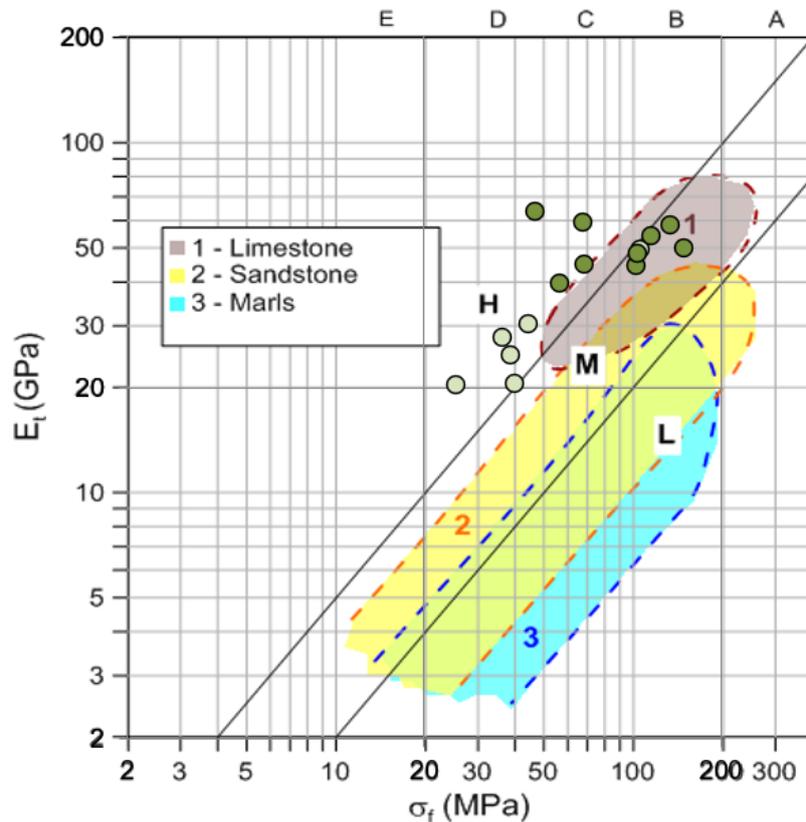


Figura 8-7: valori indicativi di resistenza uniaassiale e modulo tangente secondo Deere e Miller (1996).

In Figura 8-8 sono quindi riportati i valori di resistenza a compressione ricavati da prove di compressione monoassiale e da point load in funzione della profondità del campione. Da tale grafico si può riscontrare come a partire da circa 8 m ci sia un incremento dei valori di σ_c , pertanto si è deciso di considerare per il materiale roccioso due valori diversi di σ_c , rispettivamente per profondità inferiori e superiori a 8 m. In particolare sono stati calcolati i valori medi, escludendo i valori particolarmente dispersi (ovvero superiori a 100 MPa per $z \leq 8.0$ m e superiori a 110 MPa per $z > 8.0$ m), ottenendo:

- Sottounità C1 $z \leq 8.0$ m $\sigma_c = 40$ MPa
- Sottounità C2 $z > 8.0$ m $\sigma_c = 70$ MPa

Tali valori classificano i calcari in esame rispettivamente tra le rocce di classe D (resistenza bassa) e classe C (resistenza media) secondo la suddivisione proposta da Deere e Miller in Tabella 8-5, con punte localizzate di resistenza alta (>100 MPa).

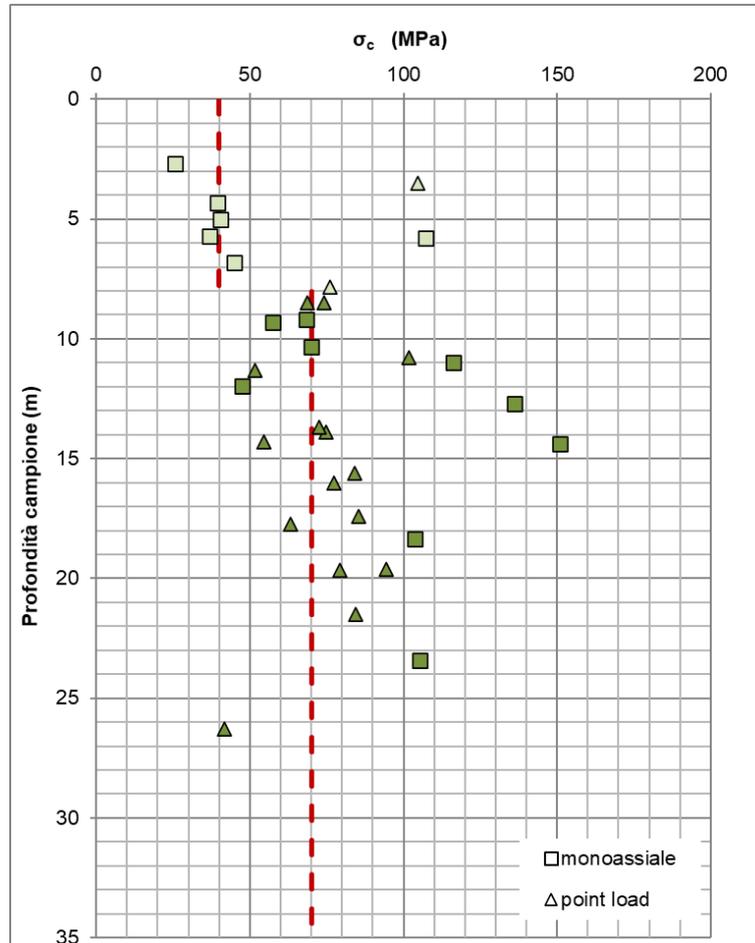


Figura 8-8: resistenza da prove di compressione uniassiale e point load.

Tabella 8-5: Classificazione delle rocce in base alla resistenza a compressione uniassiale secondo Deere e Miller (1996).

| Classe | Descrizione | σ_f (MPa) |
|--------|------------------------|------------------|
| A | Resistenza molto alta | > 200 |
| B | Resistenza alta | 100 ÷ 200 |
| C | Resistenza media | 50 ÷ 100 |
| D | Resistenza bassa | 25 ÷ 50 |
| E | Resistenza molto bassa | < 25 |

Per le due sottounità C1 e C2 risulta mediamente un valore del modulo tangente E_{t50} rispettivamente pari a 28 GPa e 51 GPa. Tali valori sono compatibili con quanto riportato nel grafico di Deere e Miller (Figura 8-7).

8.3.2 Parametri dell'ammasso roccioso e stima del GSI

Di seguito si riportano i parametri dell'ammasso roccioso utilizzati per la stima del GSI, associando ad ognuno di essi un punteggio (rating) sulla base di quanto descritto al Capitolo precedente.

8.3.2.1 Rock Quality Design (RQD)

Nella Figura 10-4 che segue sono riportati valori di RQD indicati nelle stratigrafie dei sondaggi (Doc. [23]).

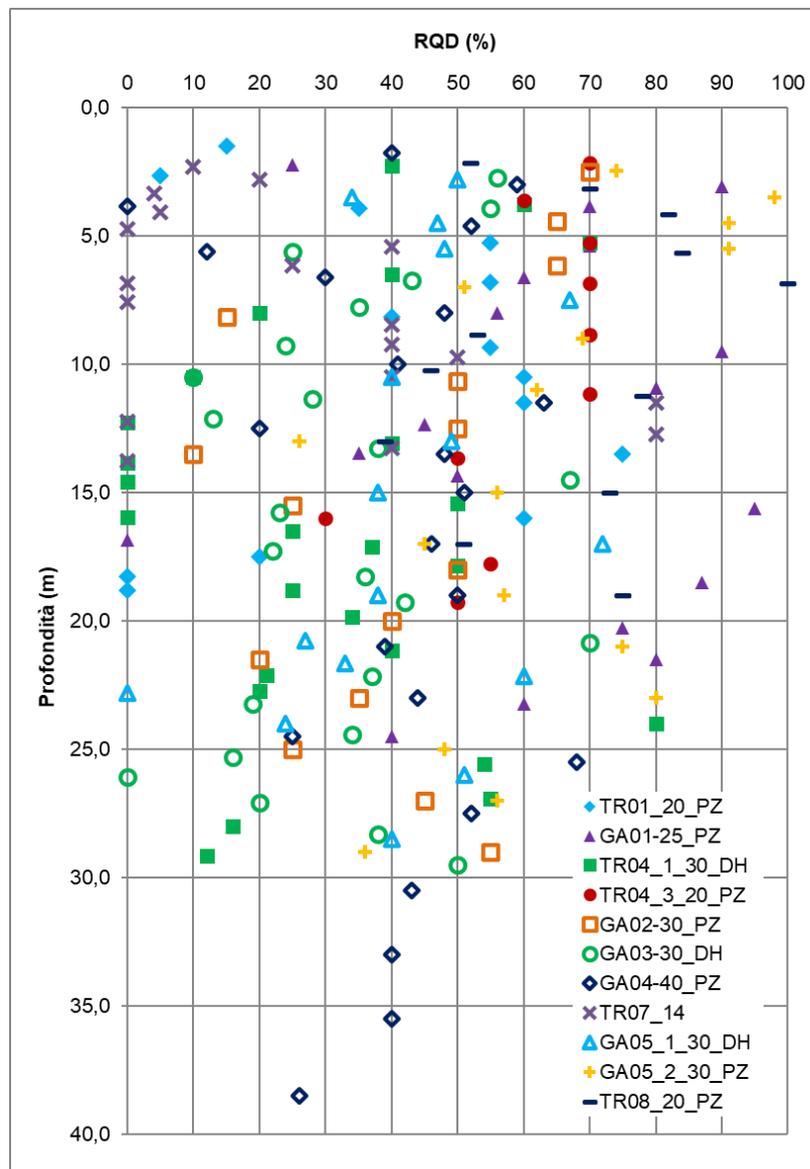


Figura 8-9: valori di RQD estratti dai sondaggi.

8.3.2.2 Spaziatura media

I valori di spaziatura media sono stati determinati sulla base del rilievo geomeccanico eseguito osservando il materiale in cassetta dei sondaggi, per ogni metro di carota estratta e riportati nel Report delle indagini geognostiche e prove in situ sondaggi (Doc. [23]). A titolo di esempio in Figura 8-10 si riporta il rilievo geomeccanico con indicati i valori di spaziatura media relativi alla prima cassetta del sondaggio TR01_20_PZ.

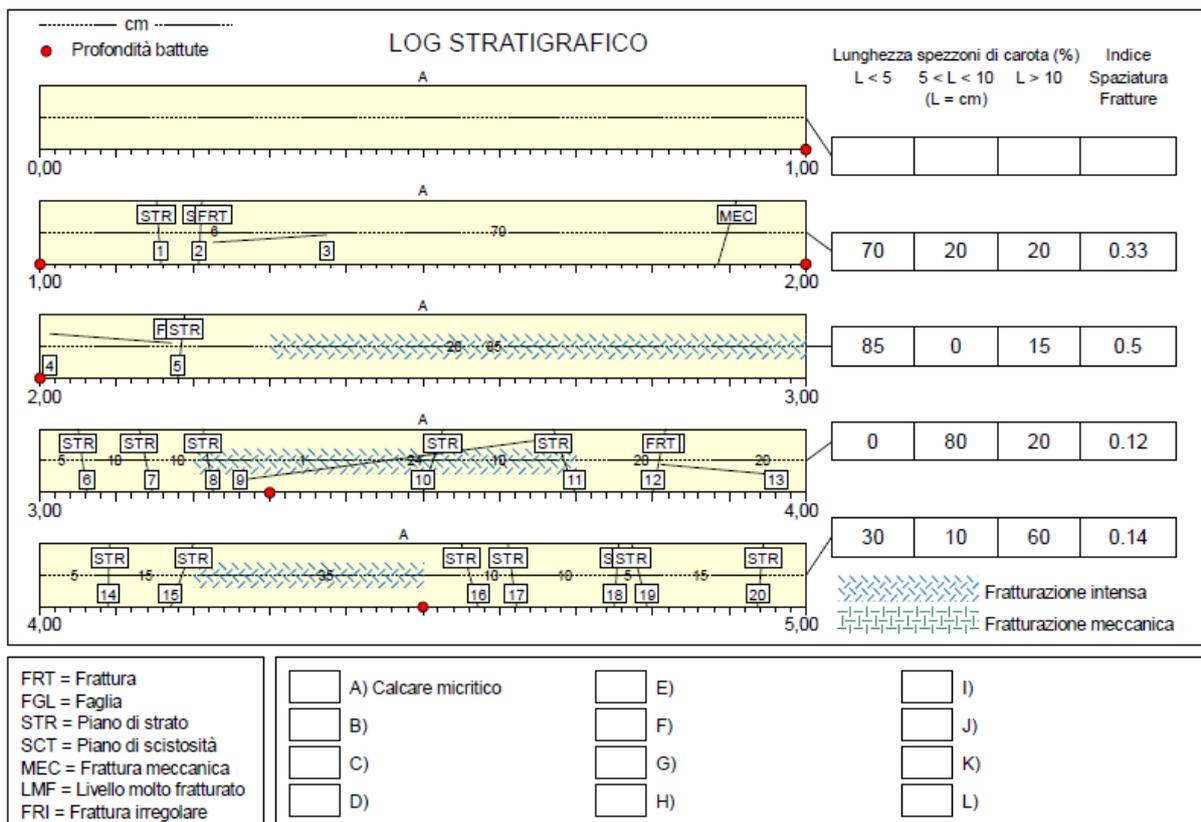


Figura 8-10: rilievo geomeccanico con valori di spaziatura media dei primi 5 m del sondaggio TR01_20_PZ (Doc. [23]).

A partire quindi da questi valori di spaziatura, per gli stessi intervalli di profondità in cui è disponibile il valore di RQD, è stato ricavato il valore medio dell'indice I_3 riportato in Figura 8-11.

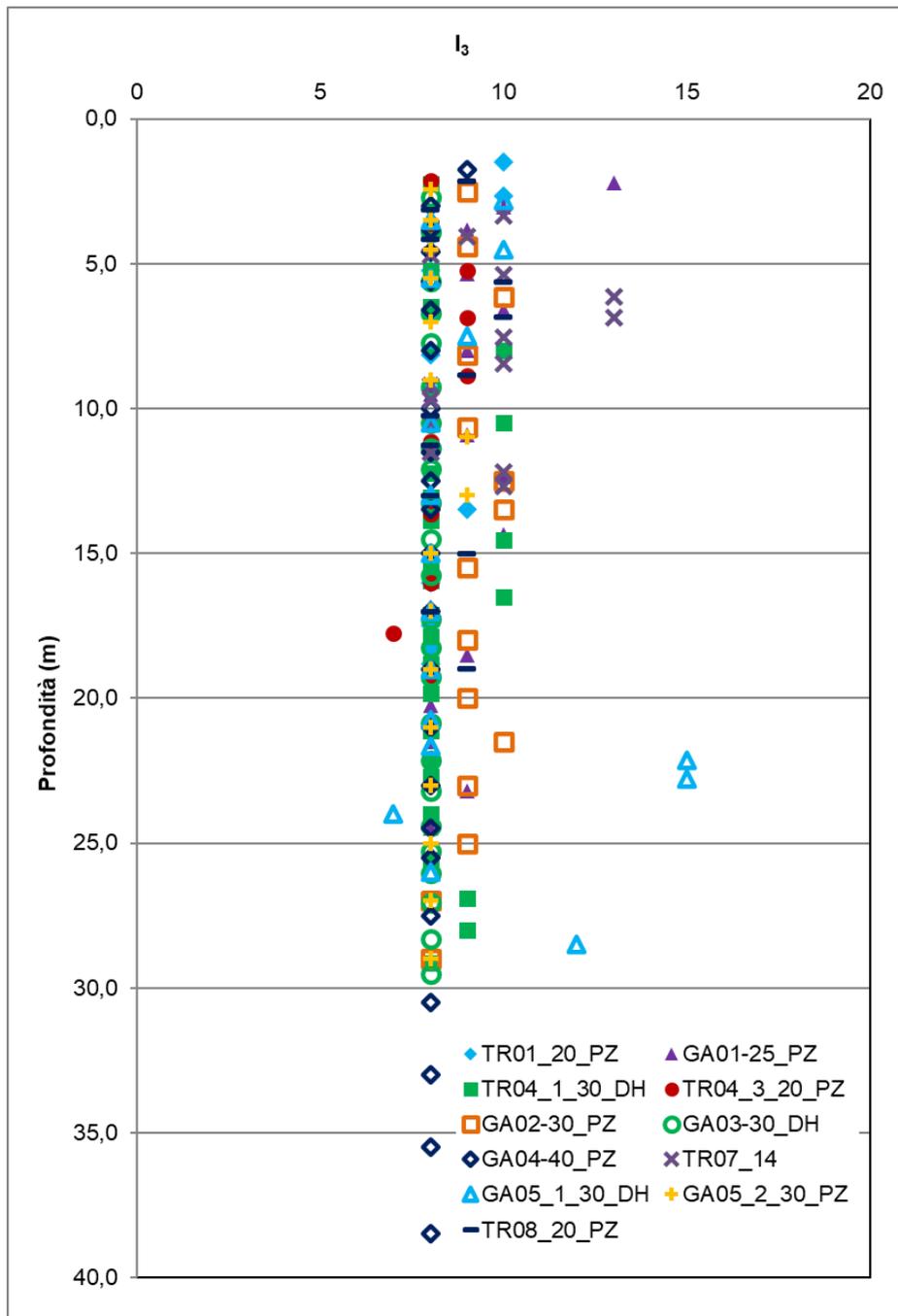


Figura 8-11: valori di I_3 .

8.3.2.3 Condizione delle Discontinuità

Il rilievo geomeccanico in cassetta comprende una descrizione della discontinuità, come riscontrabile ad esempio dalla scheda riportata in Figura 8-12 riferita alla prima cassetta del sondaggio TR01_20_PZ, riportata nel Report delle indagini geonostiche e prove in situ sondaggi (Doc. [23]).

RILIEVO GEOMECCANICO

Cassetta n° 1

QUALITA' DELLA ROCCIA

| Profondità metri | T.C.R. % | S.C.R. % | R.Q.D. % | Profondità metri | T.C.R. % | S.C.R. % | R.Q.D. % | Profondità metri | T.C.R. % | S.C.R. % | R.Q.D. % |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,00 ÷ 1,00 | 100 | | | 2,00 ÷ 3,30 | 100 | 5 | 5 | | | | |
| 1,00 ÷ 2,00 | 100 | 15 | 15 | 3,30 ÷ 4,50 | 100 | 35 | 35 | | | | |

DESCRIZIONE DELLE DISCONTINUITA'

| N° | Profondità metri | Tipo | Inclinazione ° | Forma | Rugosità classe JRC | Resistenza Ind. Schmidt | Alterazione | Apertura | Riempimento |
|----|---------------------|------|-------------------|------------|------------------------|----------------------------|-------------|----------|-------------|
| 1 | 1,10 | STR | 3 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 2 | 1,15 | STR | 2 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 3 | 1,16 | FRT | 87 | Ondulata | 10 | | Media | Aperta | Patine ox |
| 4 | 2,01 | FRT | 85 | Ondulata | 10 | | Intensa | Aperta | Patine ox |
| 5 | 2,15 | STR | 6 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 6 | 3,05 | STR | 7 | Piana | | | Debole | Aperta | Patine ox |
| 7 | 3,15 | STR | 10 | Piana | | | Debole | Aperta | Patine ox |
| 8 | 3,25 | STR | 8 | Piana | | | Debole | Aperta | Patine ox |
| 9 | 3,26 | FRT | 89 | Irregolare | 6 | | Debole | Aperta | Limo + ox |
| 10 | 3,50 | STR | 16 | Irregolare | | | Intensa | Aperta | Patine ox |
| 11 | 3,60 | STR | 17 | Piana | | | Debole | Aperta | Patine ox |
| 12 | 3,78 | STR | 10 | Piana | | | Debole | Aperta | Patine ox |
| 13 | 3,80 | FRT | 89 | Irregolare | 6 | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 14 | 4,05 | STR | 1 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 15 | 4,20 | STR | 18 | Irregolare | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 16 | 4,55 | STR | 13 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 17 | 4,65 | STR | 7 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 18 | 4,75 | STR | 3 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 19 | 4,80 | STR | 12 | Piana | | | Moderata | Aperta | Patine ox |
| 20 | 4,95 | STR | 5 | Piana | | | Elevata | Aperta | Patine ox |

Figura 8-12: rilievo geomeccanico con descrizione delle discontinuità relativo ai primi 5 m del sondaggio TR01_20_PZ (Doc. [23]).

A partire quindi da queste informazioni sono stati ricavati i valori dei 5 parametri che vanno a formare l'indice I_4 relativo appunto alla condizione delle discontinuità. Si precisa che i range di variabilità, riportati in Figura 8-13, sono stati ridistribuiti in modo che il massimo valore ottenibile da assegnare all'indice I_4 fosse 25 (e non 30) in accordo a quanto riportato in Figura 7-2.

| Parametro | Misura o descrizione | | | | |
|---|----------------------|---------------------------------|----------|---------------------------------|------------|
| | Indice | | | | |
| Lunghezza discontinuità, (persistenza/continuità) (m) | < 1 | 1 ÷ 3 | 3 ÷ 10 | 10 ÷ 20 | > 20 |
| | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| Apertura (mm) | 0 | < 0.1 | 0.1 ÷ 1 | 1 ÷ 5 | > 5 |
| | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| Scabrezza | molto scabra | scabra | scabra | liscia | laminata |
| | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| Spessore riempimento (mm) | assente | riempimento materiale attritivo | | riemp. materiale sciolto tenero | |
| | | < 5 | > 5 | < 5 | > 5 |
| | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| Alterazione pareti | assente | leggera | moderata | elevata | decomposto |
| | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |

Figura 8-13: schema per la valutazione dell'indice parziale I4 condizione delle discontinuità.

Per gli stessi intervalli di profondità in cui è disponibile il valore di RQD, è stato quindi ricavato il valore medio dell'indice I₄ riportato in Figura 8-14.

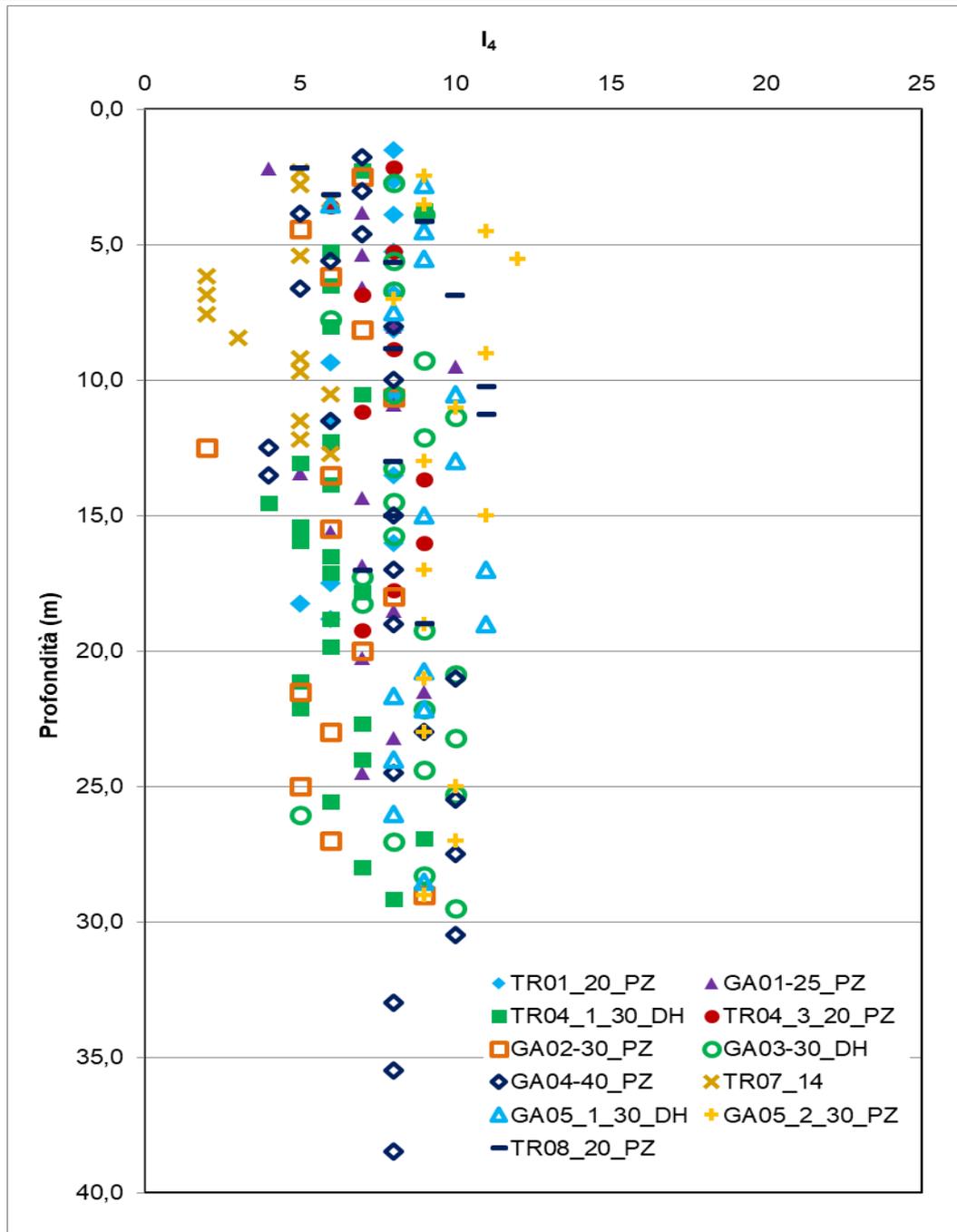


Figura 8-14: valori di I_4 .



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 67 di 90 |

8.3.2.4 Geological Strength Index (GSI)

Sulla base di quanto fin qui discusso, riferendosi agli indici parziali suggeriti da Hoek (vedi par. 7.2.2), sono stati calcolati i valori di GSI riportati in Figura 8-15. Come è possibile notare i valori di GSI ottenuti dai sondaggi GA04-40_PZ e TR07_14 risultano, ameno per i primi 8 metri circa, mediamente più bassi di quelli ottenuti dagli altri sondaggi e pertanto si è ritenuto opportuno per questo tratto (esteso circa tra le pk 5+500 e 8+000) considerare dei valori di GSI specifici. In Figura 8-15 e Figura 8-16 sono quindi riportati rispettivamente i valori di GSI utilizzati per la caratterizzazione generale (sottunità C1a) e per la caratterizzazione del tratto in corrispondenza dei sondaggi GA04-40_PZ e TR07_14 (sottunità C1b). Nelle stesse figure sono evidenziati gli intervalli di variabilità di GSI riepilogati inoltre in Tabella 8-6.

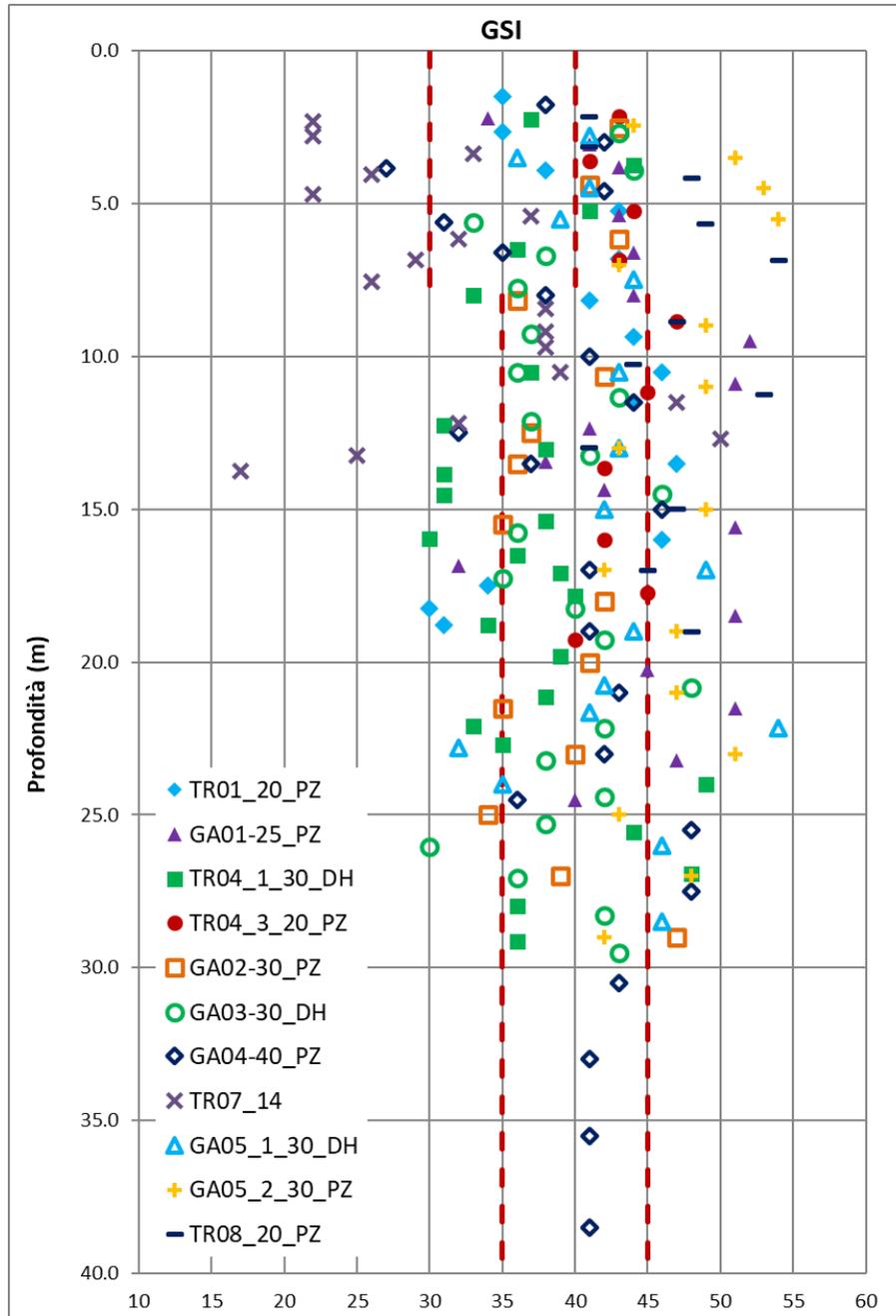


Figura 8-15: valori di GSI utilizzati per la caratterizzazione generale (valida da inizio intervento a pk 5+500 e da pk 8+000 a fine intervento).

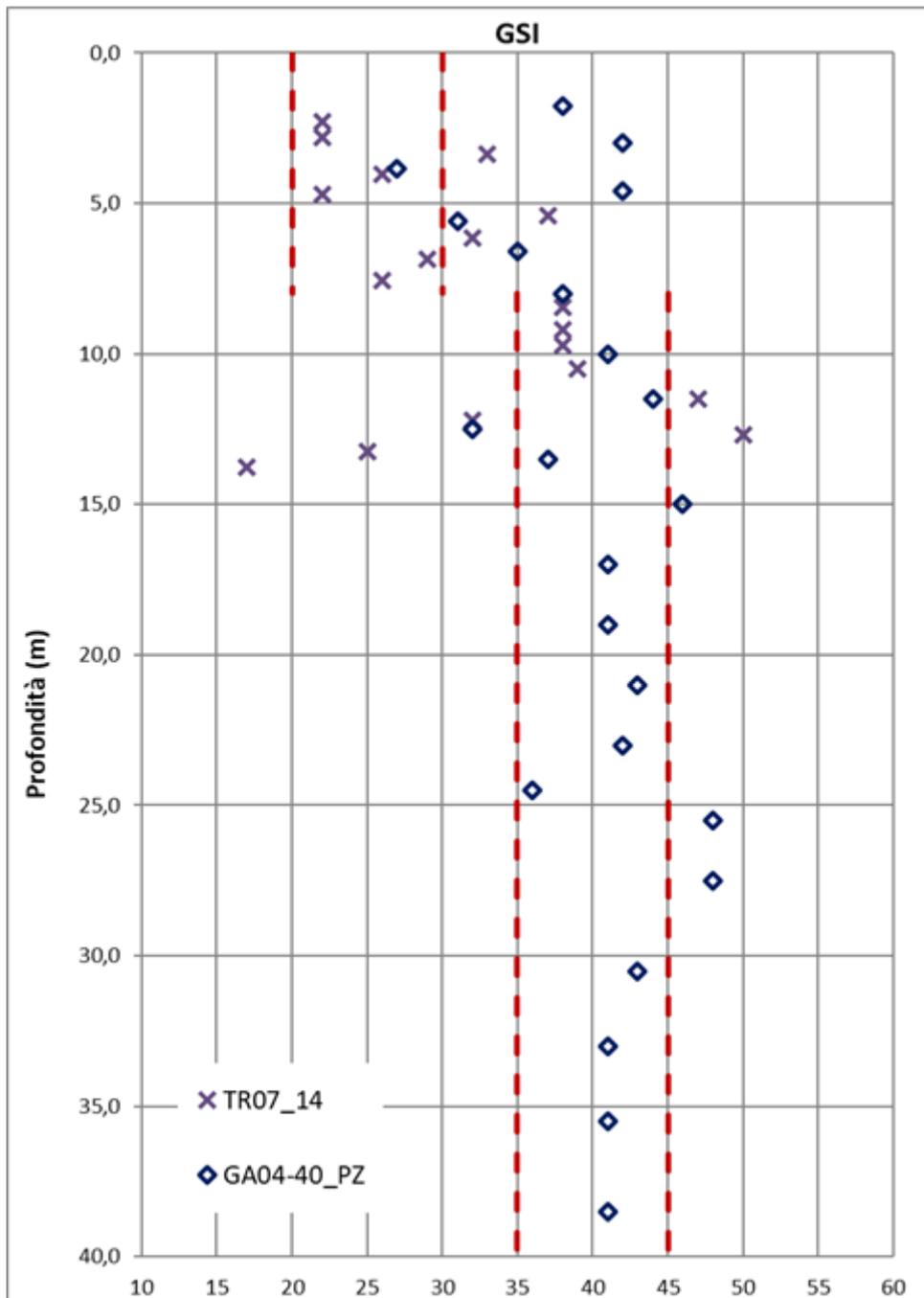


Figura 8-16: valori di GSI utilizzati per la caratterizzazione localizzata in corrispondenza dei sondaggi GA04-40_PZ e TR07_14 (pk da 5500 a 8000).

Tabella 8-6: riepilogo valori di GSI.

| GSI | | | |
|--|-----------|--|-----------|
| C1a | C2 | C1b | C2 |
| z ≤ 8 m | z > 8 m | z ≤ 8 m | z > 8 m |
| 30 ÷ 40 | 35 ÷ 45 | 20 ÷ 30 | 35 ÷ 45 |
| Caratterizzazione generale (da inizio a pk 5+500 e da pk 8+000 a fine) | | Caratterizzazione in corrispondenza di GA04-40_PZ e TR07_14 (da pk 5+500 a pk 8+000) | |

Inoltre, per tenere in conto della possibile presenza di cavità diffuse, come evidenziato dalle prove geofisiche (si veda paragrafo 6.2 e doc.[24]), si è deciso di assumere, in questa fase progettuale, in sede di calcolo, i valori minimi degli intervalli sopra riportati.

8.3.3 Resistenza dell'ammasso roccioso

La caratterizzazione dei Calcari di Bari è stata quindi effettuata sulla base dei parametri di seguito esplicitati:

- $m=9$ (Valore da letteratura. Non è stato tenuto di quanto ricavato dall'interpretazione delle prove di compressione triassiale in quanto ne è derivato un valore di m_i non realistico);
- GSI come da Tabella 8-6;
- Resistenze a compressione monoassiale:

| | |
|--------------------------|----------------------|
| Sottunità C1 (z ≤ 8.0 m) | $\sigma_c = 40$ MPa; |
| Sottunità C2 (z > 8.0 m) | $\sigma_c = 70$ MPa; |
- Fattore di disturbo D=0.7.

Con tali parametri si è proceduto dunque ad estrapolare i parametri meccanici relativi al criterio di Mohr-Coulomb. L'inviluppo di Mohr-Coulomb è stato effettuato per la sottunità **C1** assumendo un valore massimo di σ_{3max} pari a $\sigma_v'/2 = 96$ kPa, ottenuto considerando una profondità da piano campagna pari a 8.0m.

Per quanto riguarda i calcari più profondi (**C2**), l'inviluppo di Mohr-Coulomb è stato invece effettuato assumendo un valore massimo di $\sigma_{3\max}$ pari a $\sigma_v'/2 = 192$ kPa, ottenuto considerando una profondità da piano campagna pari a 16.0m.

I parametri dell'inviluppo di rottura, stimati come elencato al capitolo 7, sono riportati in Tabella 8-7.

Tabella 8-7: unità C – parametri inviluppo rottura.

| | C1a | C1b | C2 |
|----------------|------------|------------|-----------|
| GSI | 30 | 20 | 35 |
| m_b | 0.192 | 0.111 | 0.253 |
| s | 3.93E-5 | 9.22E-6 | 8.11E-5 |
| a | 0.522 | 0.544 | 0.516 |
| c' (kPa) | 44 | 27 | 106 |
| φ' (°) | 48 | 41 | 50 |

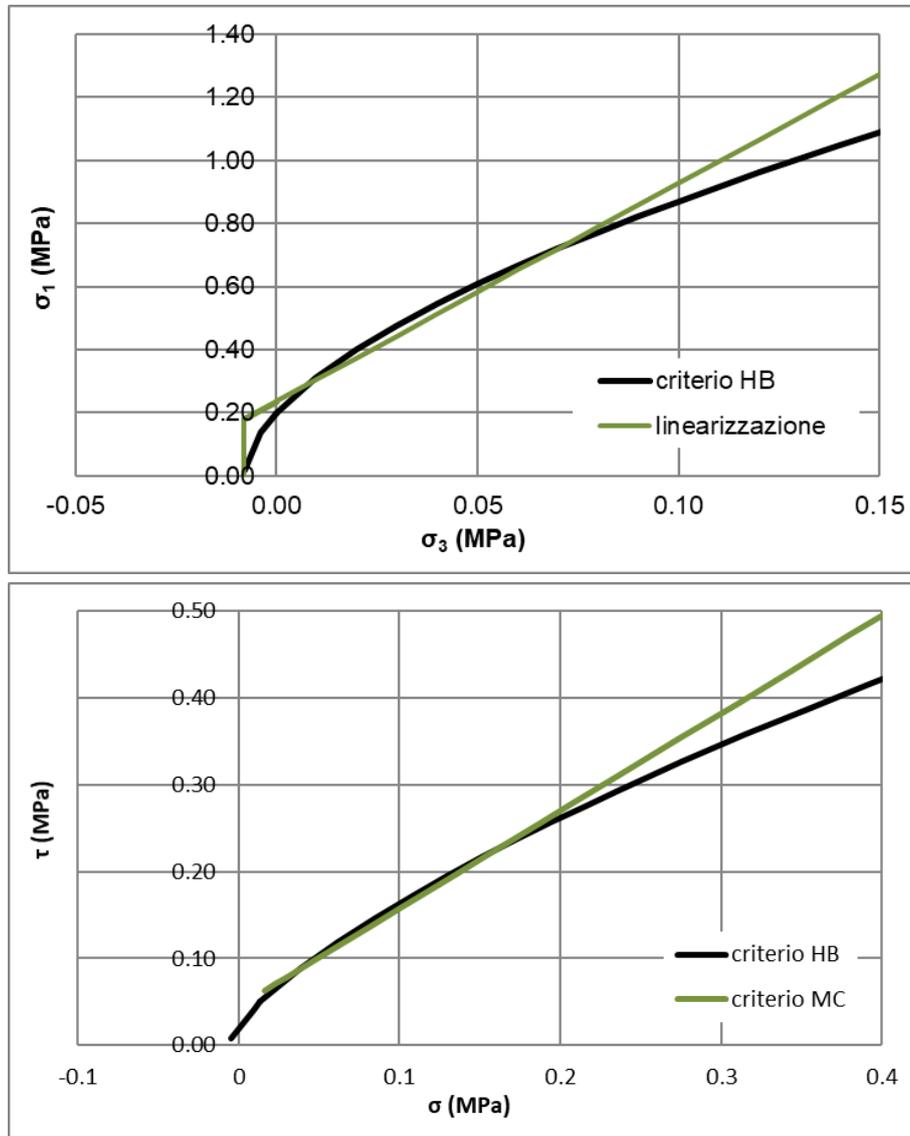


Figura 8-17: criterio di rottura Hoek-Brown e involucro di Mohr-Coulomb per la sottounità C1a.

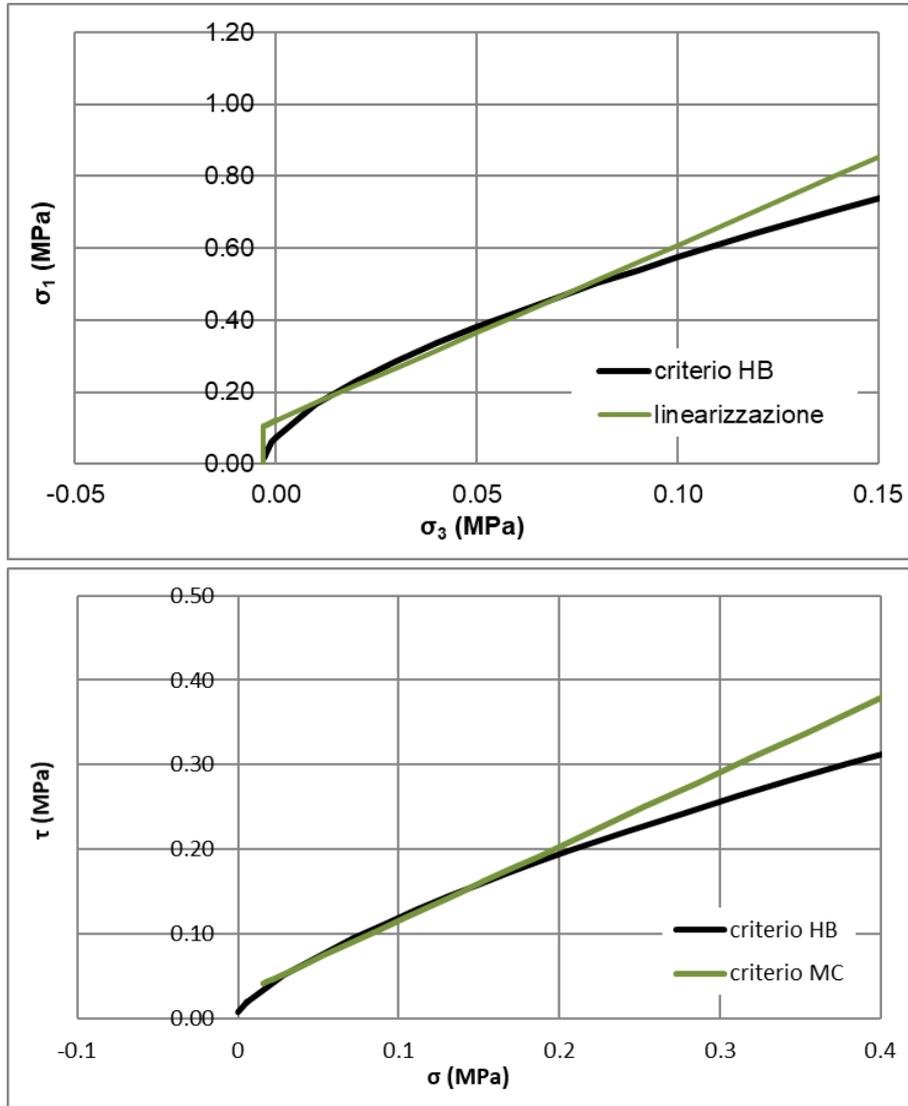


Figura 8-18: criterio di rottura Hoek-Brown e involucro di Mohr-Coulomb per la sottounità C1b.

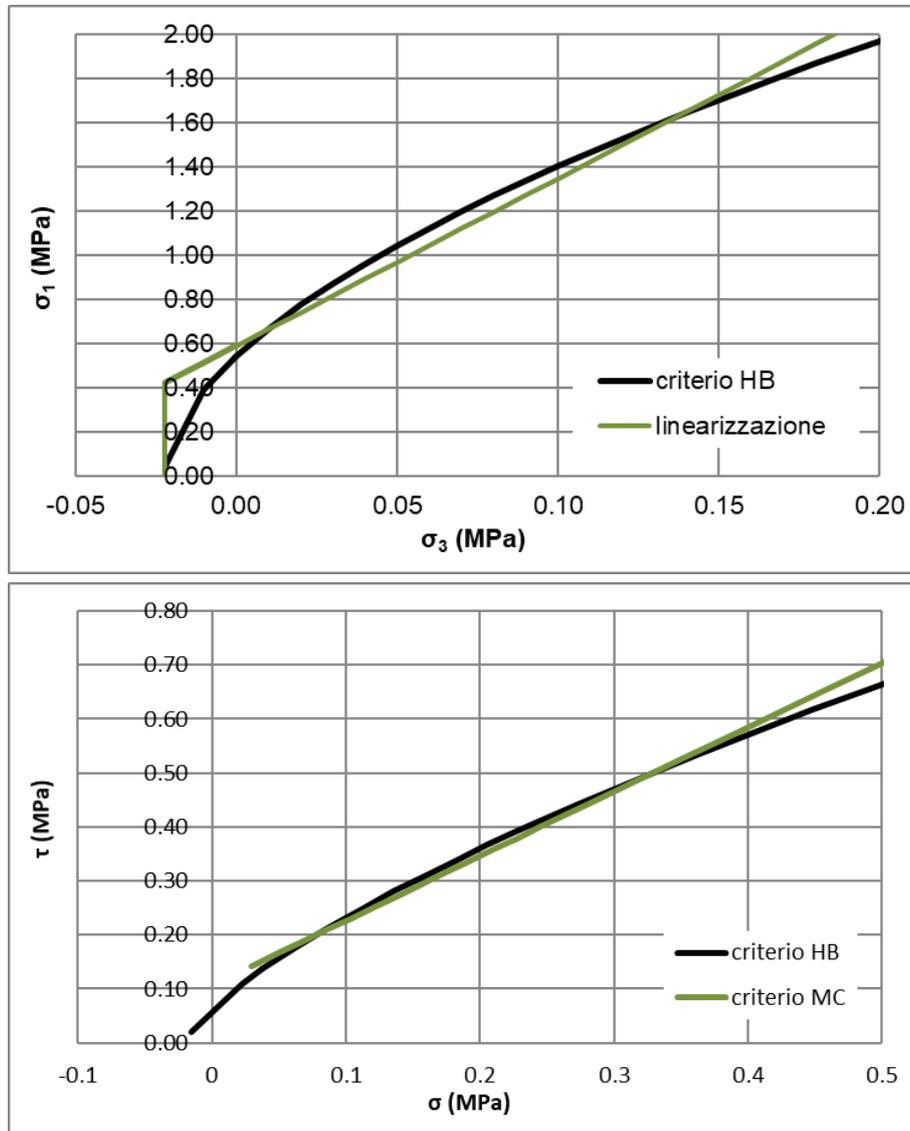


Figura 8-19: criterio di rottura Hoek-Brown e involucro di Mohr-Coulomb per la sottounità C2.

Facendo riferimento a quanto indicato in Figura 8-20 dove si riporta la variabilità tipica dei parametri di resistenza determinati in Italia per i calcari, si ritiene opportuno considerare per l'unità C un valore massimo dell'angolo di attrito pari a 43° (Tabella 8-8).

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-----------|---------------------|---------------------------|-----------|
|  | NODO DI BARI BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE PROGETTO PRELIMINARE | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA IA7X | REL 00 | CODIFICA R 11 GE | DOCUMENTO GE 00 06 001 | REV. A |

| | c (MPa) | N | φ (°) |
|-------------------|-----------|---------|---------------|
| Marne - Argilliti | 4÷16 | 3.2÷3.7 | 32÷35 |
| Arenarie | 12÷36 | 4.2÷6.0 | 38÷46 |
| Filladi | 9÷23 | 3.4÷3.8 | 33÷36 |
| Calcari | 13÷40 | 4.2÷5.8 | 38÷45 |
| Gneiss | 30÷37 | 4.2÷5.3 | 38÷43 |
| Graniti | 18÷50 | 4.2÷8.4 | 38÷52 |

Figura 8-20: Parametri di resistenza determinati in Italia su vari tipi di rocce.

Tabella 8-8: unità C – esempio di parametri di progetto.

| | C1a | C1b | C2 |
|----------------|------------|------------|-----------|
| GSI | 30 | 20 | 35 |
| m_b | 0.192 | 0.111 | 0.253 |
| s | 3.93E-5 | 9.22E-6 | 8.11E-5 |
| a | 0.522 | 0.544 | 0.516 |
| c' (kPa) | 40 | 20 | 100 |
| φ' (°) | 43 | 41 | 43 |

È opportuno evidenziare che i parametri di resistenza qui indicati vanno intesi come derivanti da una caratterizzazione generale dell'ammasso nelle condizioni geostatiche; i valori operativi andranno calibrati in relazione ai livelli di tensione previsti allo stato di progetto. Per cui i valori utilizzati effettivamente nei calcoli geotecnici, tarati sulla scala del problema esaminato, saranno riportati di volta in volta negli elaborati appositi.

8.3.4 Caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso

Per la valutazione della deformabilità dell'ammasso roccioso si è fatto riferimento ai valori dei moduli derivanti dalle prove dilatometriche ottenuti durante il secondo ciclo di carico nonché ai valori ricavati

applicando la formula di Hoek e Diederichs (2006), a partire dai moduli di Young della roccia intatta e dai valori di GSI determinati ai paragrafi precedenti.

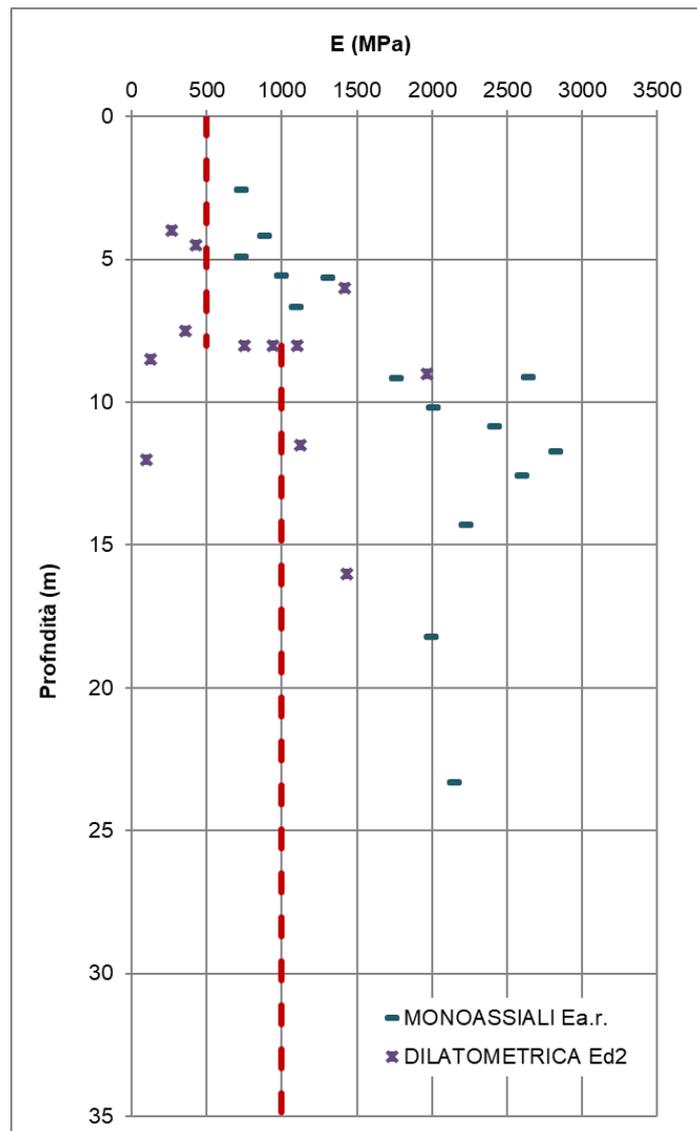


Figura 8-21: modulo di Young dell'ammasso roccioso.

Come mostrato in figura sono stati pertanto adottati i seguenti valori:

- Subunità C1 ($z \leq 8$ m) $E_{ar}=500$ MPa
- Subunità C2 ($z > 8$ m) $E_{ar}=1000$ MPa

8.3.5 Permeabilità

In merito alle caratteristiche di permeabilità, la relazione geologica (doc. [27]) evidenzia che la permeabilità della formazione del Calcarea di Bari calcolata nei sondaggi realizzati nel presente progetto è risultata compresa tra $2.6E-7$ e $8.4E-5$ m/s (Tabella 8-9); tali valori sono tuttavia più bassi di quelli riportati sulla Carta Idrogeologica della Regione Puglia. Le prove di permeabilità in foro hanno infatti carattere puntuale e sono rappresentative soltanto di uno spessore limitato di ammasso roccioso; la presenza di numerose fratture e di cavità carsiche porta ad attribuire al Calcarea di Bari valori di permeabilità complessivamente più alti di quelli ottenuti con le prove Lugeon, ipotizzando valori di coefficiente di permeabilità variabili da 10^{-6} a 10^{-4} m/s.

Tabella 8-9: prove Lugeon.

| Sondaggio | Profondità di prova m da p.c. | Permeabilità m/s | |
|-----------|----------------------------------|---------------------|----------|
| | | | |
| GA01 | 5,50-7,00 | | |
| | 10,00-11,50 | 7,97E-07 | |
| GA02 | 3,50-5,30 | 4,00E-06 | 8,40E-05 |
| | 7,00-9,30 | 3,20E-06 | 1,30E-05 |
| | 12,00-13,00 | 1,50E-05 | |
| GA03 | 4,00-6,00 | | |
| | 10,00-11,00 | 3,50E-06 | |
| | 15,00-16,00 | 9,10E-06 | |
| GA04 | 4,00-6,00 | | |
| | 11,00-13,00 | 1,30E-05 | |
| | 21,00-22,00 | 3,60E-06 | |
| GA05_1 | 10,00-14,00 | 2,70E-06 | |

| | | | |
|--------|-------------|----------|----------|
| | 18,00-21,50 | 2,80E-06 | |
| GA05_2 | 3,00-6,00 | 9,90E-07 | |
| | 6,00-9,00 | 3,20E-06 | |
| TR01 | 6,00-7,60 | 2,60E-07 | 5,20E-06 |
| | 13,00-16,00 | | |
| TR04_1 | 6,00-7,00 | | |
| | 12,00-13,50 | | |
| TR07 | 5,00-6,00 | 8,00E-06 | 1,10E-05 |
| | 13,00-16,00 | 3,30E-06 | 9,70E-06 |
| TR08 | 4,60-6,00 | 4,30E-07 | 1,10E-06 |
| | 12,00-16,00 | 1,10E-06 | |

In Figura 8-22 è riportato il confronto con tipici valori di permeabilità per ammassi rocciosi suggeriti da Brace (1980).

AMMASSI ROCCIOSI

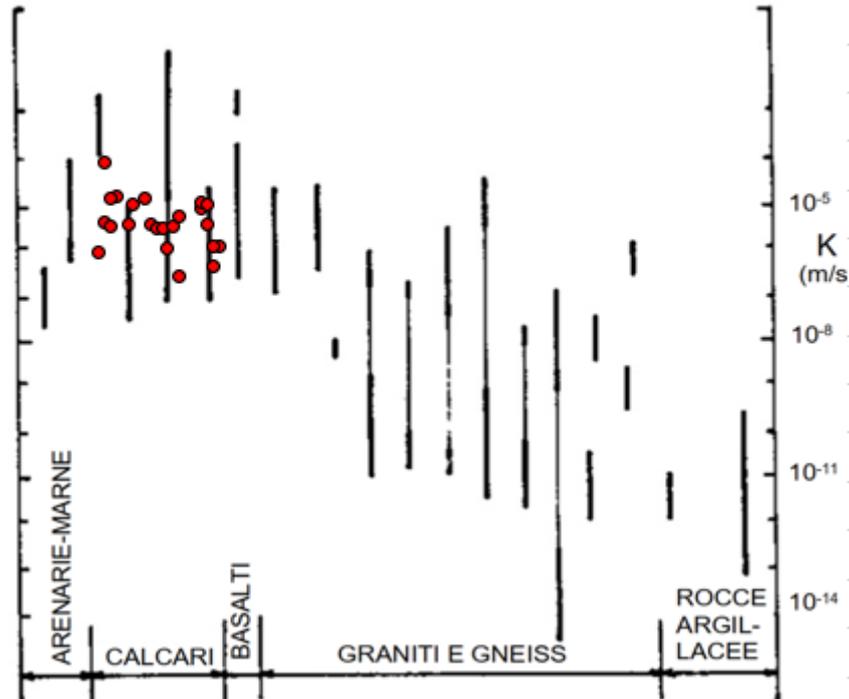


Figura 8-22: valori di riferimento della permeabilità per ammassi rocciosi (Brace, 1980) e confronto con dati misurati dalle prove in foro *Lugeon* (in rosso).

Per cui in accordo con quanto riportato nella relazione geologica (doc. [27]) per i calcari si assume una permeabilità pari a 10^{-6} a 10^{-4} m/s.

9 ANALISI DEI DATI DELLE STAZIONI GEOMECCANICHE

Per una porzione localizzata del tracciato, ubicata all'incirca tra la pk 7+300 e la pk 7+400, sono disponibili, come da Doc. [25] ("schede di rilevamento degli stop geologici e geomeccanici") alcuni rilevamenti geomeccanici sui calcari, in particolari su quelli in cui ricade la trincea stradale della SS16, ubicata in affiancamento alla nuova linea ferroviaria di progetto. Le posizioni delle stazioni sono illustrate nella figura seguente:

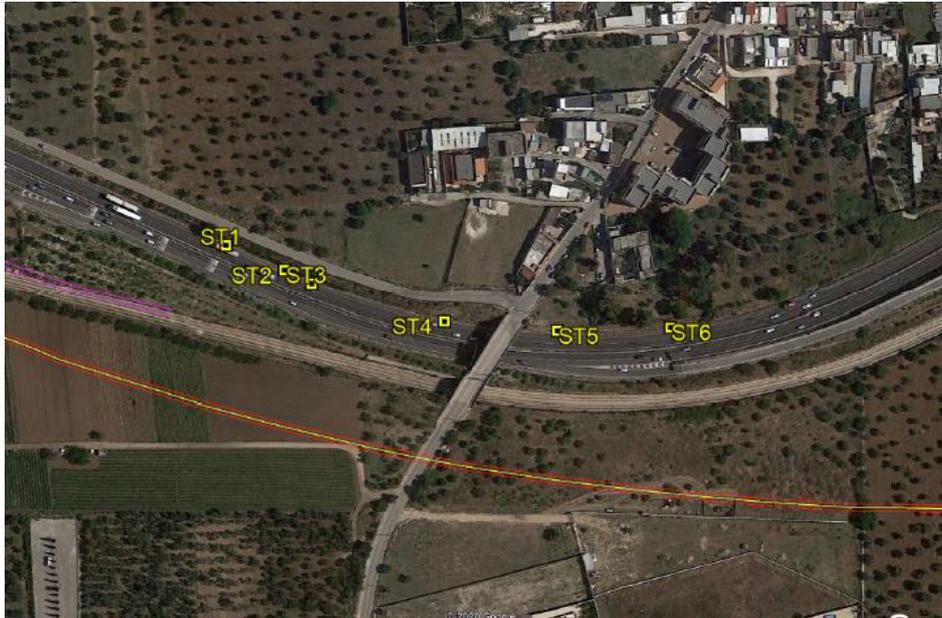


Figura 9-1: inquadramento planimetrico.



Figura 9-2: calcari della trincea stradale della SS16.

Nell'area in esame il progetto prevede lo scavo di trincee provvisorie di altezza pari a circa 16-17 metri, da realizzare nella formazione dei calcari di Bari (unità C), finalizzate alla realizzazione di gallerie artificiali, La sezione alla progressiva 7+350 è stata considerata come rappresentativa per la zona in studio.

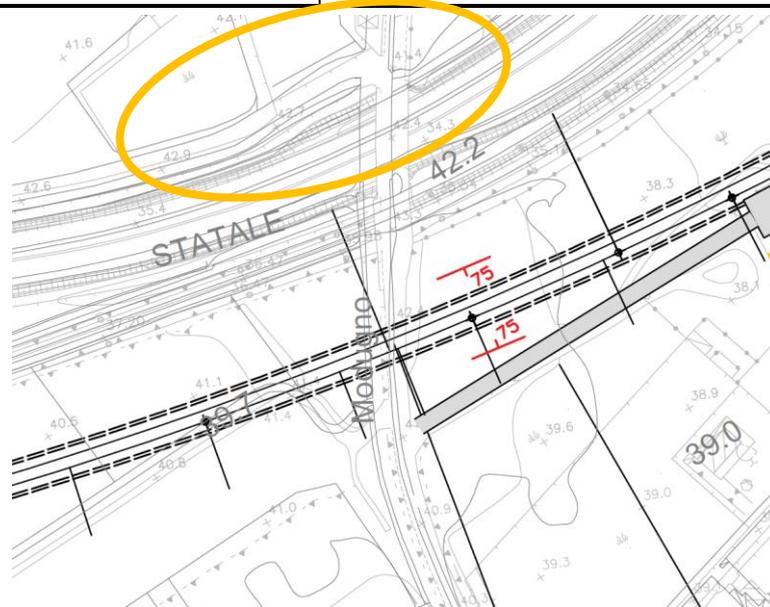


Figura 9-3: in rosso le trincee di progetto con relativa inclinazione; in arancione l'area oggetto di rilievi geomeccanici.

È opportuno evidenziare che per i rilievi geomeccanici denominati ST1 e ST6 non sono state fornite informazioni di dettaglio sulle discontinuità in quanto la condizione dell'ammasso, di elevata alterazione e fratturazione (GSI=25-30), non ha consentito misure significative in tal senso. Per quanto riguarda gli "stop" geomeccanici ST2-3-4-5, invece, sono stati estratti i dati di interesse in quanto riferibili ad una condizione dell'ammasso decisamente migliore (GSI=55).

Il confronto tra le diverse condizioni riscontrate, peraltro nell'ambito di un'area relativamente ristretta del tracciato, manifesta l'importante variabilità che caratterizza lo stato delle rocce in esame, per cui si ritiene opportuno rappresentare fin da ora che, per le fasi progettuali successive, sarà opportuno prevedere lo svolgimento di indagini che coprano in maniera adeguata lo sviluppo del tracciato in progetto.

Lo stato di elevata fratturazione evidenziato da alcuni rilevamenti conduce a ritenere adeguata l'assunzione per l'ammasso roccioso del modello continuo equivalente nello svolgimento delle analisi di stabilità incluse in progetto.

In ogni caso, sulla base dei dati disponibili, è stata valutata, la giacitura delle famiglie di discontinuità in relazione al fronte di scavo previsto in quest'area. A tal fine sono state rappresentate, su reticoli stereografici, le ciclografie delle principali famiglie di discontinuità individuate dai rilievi geomeccanici

(Doc. [25]) e quella dei fronti di scavo. In questa sede verranno effettuate valutazioni sulla base di quanto ad oggi disponibile nella zona indagata.

Nel reticolo stereografico di Figura 9-4 sono inserite tutte le famiglie di discontinuità individuate durante i rilievi geomeccanici (ST2-3-4-5), differenziando i giunti di stratificazione da quelli di fratturazione (vedi Tabella 9-1).

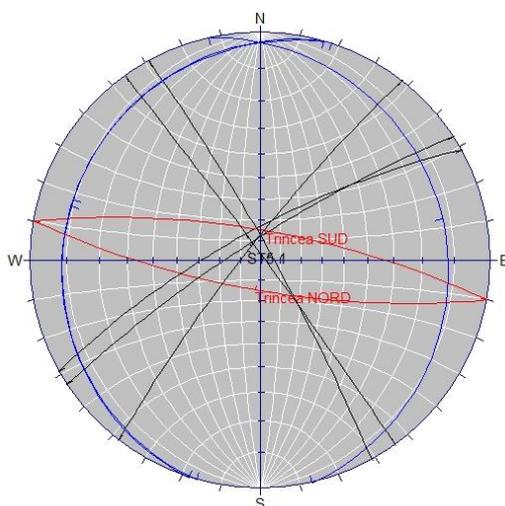


Figura 9-4: reticolo stereografico.

Tabella 9-1: famiglie di discontinuità.

| Codice STOP geomeccanico | Inclinazione/immersione | Tipo giunto |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| ST3 – Famiglia 1 | 9/288 | stratificazione |
| ST3 – Famiglia 2 | 84/61 | fratturazione |
| ST3 – Famiglia 3 | 75/331 | fratturazione |
| ST4 – Famiglia 1A | 9/286 | stratificazione |
| ST4 – Famiglia 1B | 12/77 | stratificazione |
| ST4 – Famiglia 2 | 88/54 | fratturazione |
| ST4 – Famiglia 3 | 80/327 | fratturazione |
| ST5 – Famiglia 3 | 82/308 | fratturazione |

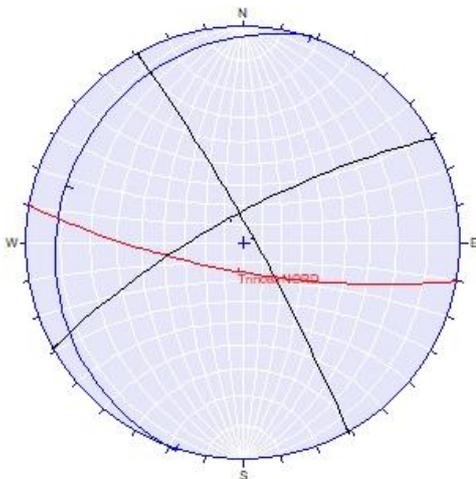
In rosso sono invece indicati i piani relativi ai fronti di scavo previsti per le trincee di progetto; i piani hanno stessa inclinazione ma immersioni opposte (vedi

Tabella 9-2).

Tabella 9-2: piani relativi ai fronti di scavo di progetto.

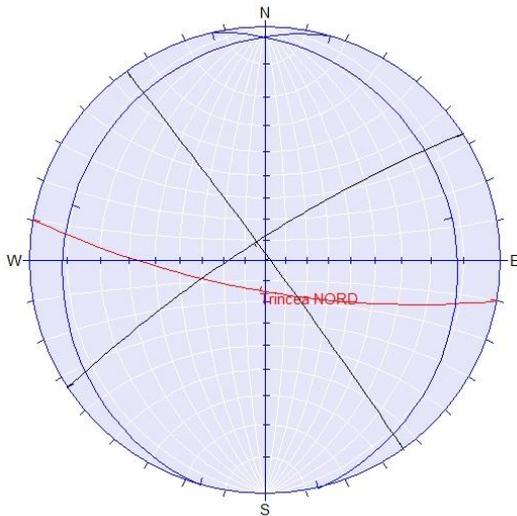
| Trincea | Inclinazione/immersione | Tipo giunto |
|-----------|-------------------------|-----------------|
| Lato Nord | 75/190 | Fronte di scavo |
| Lato Sud | 75/10 | Fronte di scavo |

Per una maggiore chiarezza di visualizzazione grafica e interpretabilità dei dati, i reticoli stereografici sono stati differenziati per valutare le condizioni di ciascuna delle due trincee rispetto agli “stop” più significativi e rappresentativi. Nello specifico, in Figura 9-5 e Figura 9-6, si riportano i piani relativi alla trincea Nord in relazione rispettivamente alle famiglie individuate in ST3 e ST4.



| STOP | Inclinazione/immersione | Tipo giunto |
|------------------|-------------------------|-----------------|
| Lato Nord | 75/190 | Fronte di scavo |
| ST3 – Famiglia 1 | 9/288 | stratificazione |
| ST3 – Famiglia 2 | 84/61 | fratturazione |
| ST3 – Famiglia 3 | 75/331 | fratturazione |

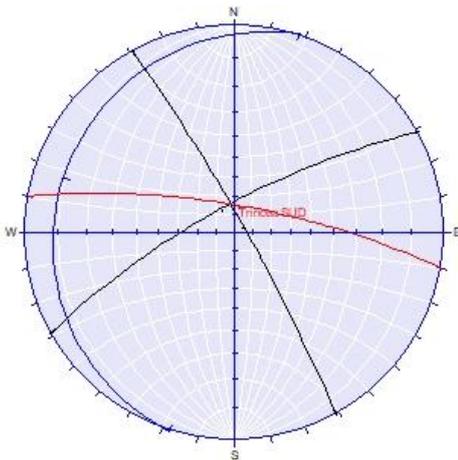
Figura 9-5: piani relativi alla trincea Nord – famiglie ST3.



| STOP | Inclinazione/ immersione | Tipo giunto |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|
| Lato Nord | 75/190 | Fronte di scavo |
| ST4 – Famiglia 1A | 9/286 | stratificazione |
| ST4 – Famiglia 1B | 12/77 | stratificazione |
| ST4 – Famiglia 2 | 88/54 | fratturazione |
| ST4 – Famiglia 3 | 80/327 | fratturazione |

Figura 9-6: piani relativi alla trincea Nord – famiglie ST4.

In Figura 9-7 e Figura 9-8 si riporta, invece, il confronto tra la trincea Sud e le ST3 e ST4.



| STOP | Inclinazione/ immersione | Tipo giunto |
|------------------|-----------------------------|-----------------|
| Lato Sud | 75/10 | Fronte di scavo |
| ST3 – Famiglia 1 | 9/288 | stratificazione |
| ST3 – Famiglia 2 | 84/61 | fratturazione |
| ST3 – Famiglia 3 | 75/331 | fratturazione |

Figura 9-7: piani relativi alla trincea Sud – famiglie ST3.

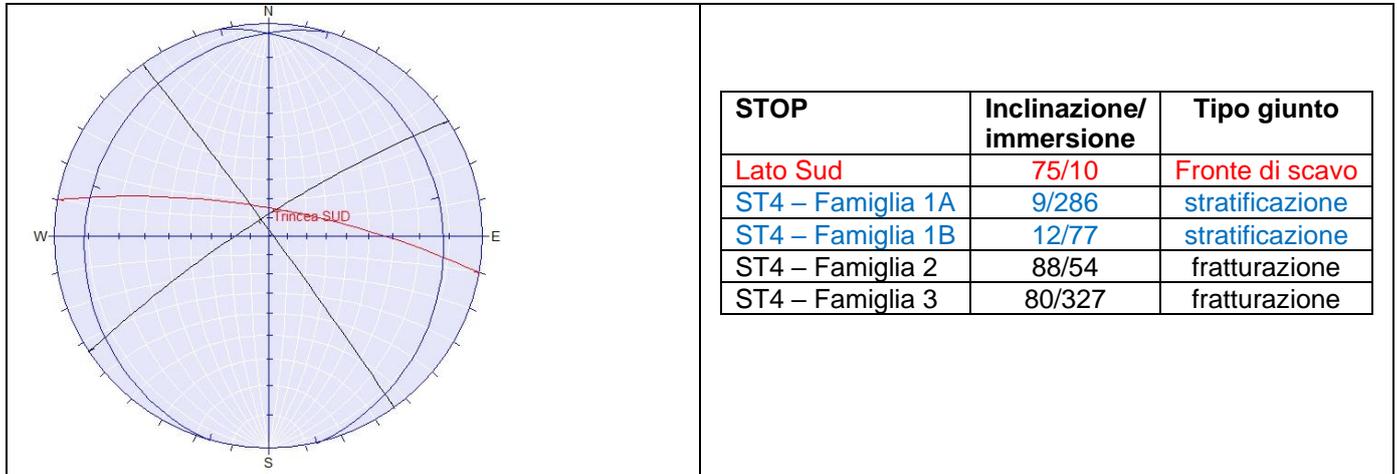


Figura 9-8: piani relativi alla trincea Nord – famiglie ST4.

L'analisi grafica consente una prima valutazione su potenziali meccanismi di scivolamento piano che può avvenire solo nei casi in cui discontinuità o intersezioni di discontinuità, che delimitano un cuneo, immergano come il fronte di scavo e abbiano inclinazione inferiore allo stesso.

Nei casi specifici, quindi, per la trincea Lato Nord (Figura 9-5 e Figura 9-6) sono escludibili tali fenomeni già per il solo fatto che le discontinuità di fratturazione immergono in direzione opposta a quella del fronte.

Per quanto riguarda la Trincea Lato Sud (Figura 9-7 e Figura 9-8), pur immergendo le discontinuità verso il fronte, la loro inclinazione risulta generalmente maggiore o confrontabile con quella del fronte della trincea, condizione anche questa che consente di escludere fenomeni di scivolamento piano.

Per quanto riguarda i giunti di stratificazione, questi presentano immersione circa perpendicolare a quella dei fronti di scavo e sono comunque caratterizzati da modeste inclinazioni di certo sostenibili dalle resistenze attribuibili ai piani di giunto stessi.

Per quanto detto, quindi, le condizioni esaminate portano ad escludere possibili cinematismi di scivolamento piano. Dovranno essere approfonditi, nelle successive fasi progettuali, gli aspetti riferibili a possibili fenomeni di crollo e ribaltamento, anche a seguito di una campagna di rilievi geomeccanici diffusa lungo il tracciato.



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 87 di 90 |

In ogni caso, nel presente progetto, sono stati individuati interventi differenziati per trincee provvisorie e definitive, comprendenti la posa in opera di reti e la realizzazione di drenaggi, che già rappresentano intervento di stabilizzazione delle pareti di scavo rispetto a meccanismi superficiali di rottura.

10 SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI E DEI LIVELLI DI FALDA

Dall'analisi delle prove ad oggi disponibili, condotte sia in sito che in laboratorio, e presentate ai paragrafi precedenti, sono stati determinati i valori caratteristici dei parametri geotecnici associati alle diverse unità geotecniche, come riportato nella successiva Tabella 10-1.

L'andamento della falda assunto nei calcoli, riportato nel profilo geotecnico (doc. [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36]), è quello ricostruito sulla base di quanto già discusso nel capitolo 5 e corrispondente ad una quota pari a circa 0 m s.l.m..

Tabella 10-1: parametri geotecnici caratteristici associati alle unità stratigrafiche.

| Unità Geotecnica | | γ | φ' | c' | GSI | σ_{ci} | m_i | E_{op} | k | |
|--|-------|----------------------|------------|-------|---|---------------|-------|----------|---------------|---------------|
| | | (kN/m ³) | (°) | (kPa) | | (MPa) | | (MPa) | (m/s) | |
|  | TC | 19.0 | 28-30 | 0-5 | - | - | - | 10 | - | |
|  | CAL | Calt | 20.0 | 35-37 | 0-10 | - | - | 50 | 1E-03 ÷ 1E-05 | |
| | C1a * | | 24.0 | 43 | 40 | 30 | 40 | 9 | 500 | 1E-04 ÷ 1E-06 |
| | C1b * | | 24.0 | 41 | 20 | 20 | 40 | 9 | 500 | 1E-04 ÷ 1E-06 |
| | C2 | | 24.0 | 43 | 100 | 35 | 70 | 9 | 1000 | 1E-04 ÷ 1E-06 |
| *C1a da pk 0 a 5+500 e da 8+000 a fine intervento; C1b da pk 5+500 a pk 8+000 | | | | | | | | | | |
| γ = peso specifico; c' = coesione m_i = coefficiente relativo alla roccia intatta; k = permeabilità. | | | | | φ' =angolo d'attrito GSI = Geological Strength Index; E= modulo di rigidezza; | | | | | |

Si osserva che i valori dei parametri di resistenza qui indicati vanno intesi come corrispondenti al modello geotecnico generale; i valori operativi da utilizzare nelle singole e specifiche analisi sono stati calibrati in relazione ai livelli di tensione previsti per le singole opere (cfr. relazione di calcolo rilevati e trincee Doc IA7X00R11RHGE0006001 e relazione di predimensionamento delle opere provvisionali Doc IA7X00R11RHGE0006002).



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 89 di 90 |

11 SINTESI DEGLI ASPETTI PROGETTUALI GEOTECNICI

Dal punto di vista geologico-stratigrafico la tratta ricade quasi totalmente nella formazione del calcare di Bari, costituito da calcari micritici microfossiliferi e calcari dolomitici stratificati in sequenze cicliche.

Il tracciato in progetto si sviluppa, per la quasi totalità completamente al di sotto del piano di campagna, in galleria artificiale o in trincea: in entrambi i casi è pertanto prevista l'esecuzione di scavi, rispettivamente provvisionali e definitivi, aventi altezze massime di poco inferiori a 20 m.

Nella fascia più superficiale degli scavi, fino a circa 2.5 m dal piano di campagna, caratterizzata dalla presenza di materiale classificabile come terreno a grana grossa, le scarpate hanno pendenza 1:1, mentre all'interno degli strati rocciosi la pendenza delle scarpate varia a seconda che lo scavo abbia carattere definitivo o provvisorio. In particolare, nel caso di trincee definitive è prevista una pendenza 4:1, mentre per le opere provvisorie è prevista una pendenza 6:1. In entrambi i casi ogni 6.0 m di scavo viene inserita una banca, di larghezza pari a 1.0 o 2.0 m, rispettivamente per trincee provvisorie o definitive. Unica eccezione si ha in corrispondenza delle TR03 e TR04 per le quali è prevista l'apertura di uno scavo senza banche intermedie (altezza massima 15.0 m e pendenza 6:1), presidiato in fase definitiva da un muro ad "U" in c.a.. In generale, nei casi in cui vincoli al contorno non permettono l'apertura degli scavi secondo lo schema standard sopra riportato è previsto l'inserimento di opere di sostegno.

Le scarpate definitive aventi scarpate con pendenza 4:1 vengono protette con un sistema di reti e funi metalliche opportunamente ancorate, mentre per le scarpate provvisorie è prevista l'esecuzione di uno strato di spritz beton, come indicato nell'elaborato di progetto "Interventi tipo di protezione/rinforzo delle scarpate di scavo" (Doc. IA7X00R11WXGE0006001).

Per le analisi di stabilità degli scavi si rimanda all'elaborato "Relazione di calcolo rilevati e trincee" (Doc. IA7X00R11RHGE0006001), mentre indicazioni sulle opere di sostegno e/o soluzioni di scavo puntuali sono riportate nella relazione tecnico-descrittiva "Relazione di predimensionamento delle opere provvisorie" (Doc. IA7X00R11RHGE0006002).

Per il tratto di linea che corre in rilevato, compreso tra le progressive 0+850 - 1+175 ca (cfr planoprofilo di progetto IA7X00R10L6IF0001001/7A), sono state eseguite analisi dei cedimenti e di stabilità del corpo in terra riportate nell'elaborato "Relazione di calcolo rilevati e trincee" (Doc. IA7X00R11RHGE0006001)



NODO DI BARI
BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE
PROGETTO PRELIMINARE

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

| COMMESSA | REL | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-----|----------|--------------|------|----------|
| IA7X | 00 | R 11 GE | GE 00 06 001 | A | 90 di 90 |

La presenza nota in letteratura nei pressi della tratta in progetto di alcune cavità sotterranee naturali, unitamente ai risultati delle indagini eseguite, non consentono di escludere la presenza di cavità di maggiori dimensioni lungo la linea in progetto. In particolare, le tomografie elettriche, effettuate lungo il tracciato di progetto, hanno messo in evidenza aree maggiormente fratturate o interessate da carsismo di bassa entità (aree vacuolate) e la presenza di cavità riempite da materiali fini, derivanti dal disfacimento dei calcari.

L'osservazione dell'affioramento roccioso di 450 m di sviluppo in corrispondenza della trincea della Strada Statale SS16, nei pressi del cavalcavia dell'intersezione con via Modugno, ha evidenziato una forte eterogeneità delle condizioni dell'ammasso, tanto che spesso le forme osservate in una delle pareti non trovano riscontro nelle altre pareti ubicate a breve distanza. Lungo l'affioramento è risultata evidente infatti la presenza di discontinuità di varia natura e dimensione, associate sia a processi di tipo carsico, sia di tipo tettonico.

Alla luce di quanto emerso dal presente studio relativamente ai fenomeni di carsismo, sono stati previsti interventi di consolidamento dell'ammasso roccioso lungo la linea ferroviaria in progetto mediante iniezioni cementizie per il trattamento delle cavità (anche quelle riempite con materiale fine) e delle aree vacuolate. Stante le condizioni di forte eterogeneità riscontrate per l'ammasso roccioso, ben evidenziate dall'affioramento lungo la trincea della SS16, detti interventi sono stati previsti per un'estensione superiore a quella delle cavità/aree vacuolate stimate sulla base dei risultati delle indagini svolte (sondaggi e indagini geofisiche). Si è voluto in tal modo mitigare il rischio di mancato rilievo di aree affette da carsismo collegato all'ampiezza della campagna di indagini geognostiche eseguita, il cui livello di approfondimento è ritenuto coerente con quanto richiesto dalla presente fase progettuale.

Nelle successive fasi progettuali, proporzionatamente agli approfondimenti richiesti dalle singole fasi progettuali, andrà pertanto previsto lo svolgimento di indagini tese a fornire un quadro più dettagliato della diffusione delle cavità/aree vacuolate all'interno dell'ammasso roccioso attraversato dalla nuova infrastruttura.