



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA (DICEA)

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

**Riciclaggio di sedimenti di dragaggio in miscele stradali
stabilizzate a calce e cemento**

**Recycling of dredged sediments in lime-cement stabilized
road mixes**

Relatore:

Prof. Ing. Andrea Graziani

Correlatore:

Ing. Andrea Grilli

Tesi di Laurea di:

Daniele Ugolini

A.A. 2022/ 2023

Sommario

| | |
|--|----|
| Introduzione | 1 |
| Capitolo 1. Miscele stradali stabilizzate e riciclaggio dei fanghi di dragaggio | 2 |
| 1.1 Miscele stradali stabilizzate con calce e cemento | 2 |
| 1.1.1 Introduzione al trattamento delle terre | 2 |
| 1.1.2 Materiali per miscele stabilizzate | 3 |
| 1.1.2.1 La classificazione delle terre..... | 3 |
| 1.1.2.1.1 Classificazione UNI 11531-1 | 4 |
| 1.1.2.1.2 Classificazione dell'USCS..... | 5 |
| 1.1.2.1.3 Argilla..... | 6 |
| 1.1.2.2 Calce..... | 8 |
| 1.1.2.3 Cemento..... | 9 |
| 1.1.2.4 Acqua | 11 |
| 1.1.2.5 Aggregati lapidei | 11 |
| 1.1.3 Azioni del trattamento dei terreni argillosi con calce o con calce e cemento | 12 |
| 1.1.3.1 Parametri di identificazione dei componenti della miscela..... | 12 |
| 1.1.3.2 Azioni immediate e a lungo termine | 13 |
| 1.1.3.3 Azioni del cemento | 17 |
| 1.1.4 Studio di formulazione delle miscele..... | 17 |
| 1.2 Progetto ECOSEDRA | 19 |
| 1.2.1 Contesto e obiettivi..... | 19 |
| 1.2.2 Programma del progetto | 20 |
| 1.2.3 Processo di trattamento e di caratterizzazione dei fanghi | 23 |
| Riferimenti bibliografici..... | 25 |
| Capitolo 2. Materiali e metodi..... | 27 |
| 2.1 Materiali..... | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.1 Sedimento “trattato” ECOSEDRA..... | 27 |
| 2.1.2 Misto granulare..... | 30 |
| 2.1.3 Calce..... | 34 |
| 2.1.4 Cemento..... | 34 |
| 2.2 Metodi..... | 35 |
| 2.2.1 Analisi granulometrica..... | 35 |
| 2.2.2 Stabilizzazione a calce..... | 39 |
| 2.2.3 Limiti di Atterberg..... | 41 |
| 2.2.3.1 Limite liquido..... | 43 |
| 2.2.3.2 Limite plastico..... | 46 |
| 2.2.4 Miscelazione e stabilizzazione a cemento..... | 47 |
| 2.2.5 Compattazione Proctor..... | 48 |
| 2.2.6 Prova CBR..... | 54 |
| 2.2.7 Prova di compressione semplice (UCS)..... | 61 |
| 2.2.8 Prova di trazione indiretta (ITS)..... | 66 |
| 2.3 Programma sperimentale..... | 69 |
| 2.3.1 Studio del sedimento ECOSEDRA..... | 69 |
| 2.3.2 Studio del misto granulare FIORI COSTRUZIONI..... | 70 |
| 2.3.3 Identificazione e studio delle miscele..... | 70 |
| 2.3.4 Prove meccaniche..... | 71 |
| Riferimenti bibliografici..... | 71 |
| Capitolo 3. Risultati..... | 73 |
| 3.1 Contenuto ottimale di calce..... | 73 |
| 3.2 Curve di costipamento..... | 76 |
| 3.3 Prove meccaniche..... | 77 |
| 3.3.1 Prova CBR..... | 77 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 3.3.2 Prova UCS e prova ITS | 79 |
| Conclusioni | 82 |

Introduzione

Negli ultimi anni è diventato sempre più importante in tutti i campi dell'ingegneria trovare metodi per riciclare materiale, per ridurre l'impatto ambientale seguendo i principi dello sviluppo sostenibile. Anche nell'ingegneria stradale sono fondamentali queste tematiche e, in particolare, questa tesi sperimentale è incentrata sul riciclaggio dei fanghi provenienti dal dragaggio del porto di Ancona e del loro possibile impiego nella costruzione di pavimentazioni stradali. Questo era il principale obiettivo di un progetto finanziato dalla Regione Marche chiamato ECOSEDRA, che vede la collaborazione dell'Università Politecnica delle Marche.

Le attività sperimentali si sono svolte presso il laboratorio di Strade e Trasporti del dipartimento DICEA. In particolare, si è studiato un sedimento proveniente dal porto di Ancona stabilizzandolo a calce e cemento per poterne incrementare le caratteristiche meccaniche. L'obiettivo è quello di trovare un possibile impiego in ambito stradale per questo materiale di scarto, valutandone le caratteristiche, soprattutto in termini di resistenza a compressione (UCS) e a trazione indiretta (ITS).

La presente tesi è suddivisa in tre capitoli, di cui si riporta brevemente il contenuto:

1. **Miscele stradali stabilizzate e riciclaggio dei fanghi di dragaggio:** si descrive la stabilizzazione a calce e cemento per le miscele stradali, i suoi vantaggi, i materiali di cui sono composte queste miscele e come agiscono in questi trattamenti. Si va poi ad illustrare più in dettaglio il progetto ECOSEDRA.
2. **Materiali e metodi:** nella prima parte vengono descritti i materiali e l'attrezzatura impiegati nella sperimentazione, le miscele e le varie prove di laboratorio eseguite nel rispetto delle norme tecniche di riferimento. La parte successiva è dedicata al programma sperimentale, in cui si elencano il tipo e il numero di prove eseguite per ogni materiale o miscela.
3. **Risultati:** si riportano i risultati delle prove eseguite in forma di tabelle e/o grafici, aggiungendo commenti e analisi di ciò che si è ottenuto.

Capitolo 1. Miscele stradali stabilizzate e riciclaggio dei fanghi di dragaggio

In questo capitolo verrà descritto il trattamento di stabilizzazione nelle costruzioni stradali, in particolare a calce e cemento, facendo anche una panoramica sui materiali coinvolti. In seguito, verrà delineato il progetto ECOSEDRA, il suo programma e le sue finalità.

1.1 Miscele stradali stabilizzate con calce e cemento

1.1.1 Introduzione al trattamento delle terre

I terreni spesso non sono adatti per le costruzioni stradali, in particolare se sono argillosi, e quindi è necessario sottoporli a trattamenti particolari per migliorare le loro caratteristiche.

Il trattamento di una terra consiste nel miscelarla con un additivo (calce, calce e cemento o altro legante idraulico), con eventuale apporto d'acqua, al fine di modificarne le caratteristiche fisico-meccaniche e renderla idonea all'impiego previsto (Santagata 2016). In relazione agli obiettivi ricercati, il trattamento viene distinto in:

1. **Miglioramento**, se l'obiettivo consiste nel migliorare le caratteristiche geotecniche del materiale per procedere alla corretta posa in opera. In questo caso per il materiale si ricercano modificazioni immediate e di breve termine, tali da migliorarne le caratteristiche di compattazione e di portanza e rendere possibile la circolazione dei mezzi di cantiere e il costipamento degli strati sovrastanti. Non si è interessati, invece, allo sviluppo di prestazioni elevate a lungo termine.
2. **Stabilizzazione**, se l'obiettivo è di migliorare le caratteristiche geotecniche del materiale, non solo per soddisfare le esigenze della fase di costruzione, ma anche per ottenere prestazioni meccaniche elevate e stabili in fase di esercizio dell'infrastruttura, pertanto, anche in condizioni di saturazione d'acqua e di gelo.

Il miglioramento dei terreni è riservato, normalmente, alla formazione del corpo dei rilevati e dei riempimenti per dare luogo a piazzali (industriali, commerciali ecc.), sia in ambito extraurbano sia urbano; la stabilizzazione è, invece, indispensabile per la formazione degli strati di sottofondazione delle pavimentazioni, sia in trincea, sia in rilevato.

In particolare, il trattamento con calce (o con calce e cemento) dei terreni limo-argillosi è una tecnologia avanzata, sperimentata da diversi anni, che, modificando le proprietà geotecniche di terreni di scavo di per sé non idonei, ne permette la riutilizzazione per

gli impieghi sopra elencati. In tal modo si minimizzano allo stesso tempo il fabbisogno di idonei materiali da cava di prestito e la necessità del trasporto a rifiuto delle materie non idonee. Per tali motivi esso si iscrive tra le principali misure di salvaguardia ambientale, rispondendo appieno ai principi dello sviluppo sostenibile cui deve essere informata la progettazione (in particolar modo alla minimizzazione dell'impegno di risorse materiali non rinnovabili e al massimo riutilizzo delle risorse naturali impegnate dall'intervento).

In aggiunta a quanto sopra evidenziato, il trattamento delle terre comporta ulteriori vantaggi di natura tecnica, economica e ancora ambientale che riguardano:

1. il miglioramento delle prestazioni meccaniche dei materiali che, in relazione all'impiego previsto, attraverso opportuna scelta degli additivi e formulazione delle miscele, possono acquistare dopo la posa in opera proprietà strutturali proprie dei materiali legati a cemento, ben più elevate di quanto possa essere reso possibile dall'impiego di misti granulari non legati, anche della migliore qualità fisico-meccanica;
2. la possibilità di ridurre la produzione di rifiuti e l'occupazione impropria delle discariche disponibili;
3. la riduzione dei trasporti a discarica e da cave di prestito (in andata e ritorno) e, di conseguenza, dei consumi energetici associati e degli effetti ambientali negativi indotti sull'aria, sul degrado strutturale e sulla sicurezza della circolazione delle strade interferite;
4. la riduzione dei costi di costruzione, con economie rispetto alle soluzioni classiche che, in relazione alle distanze delle discariche e delle cave di prestito, possono superare il 50% dei lavori interessati;
5. la riduzione dei tempi di costruzione, particolarmente in condizioni di stato idrico dei terreni sfavorevole per le tecniche tradizionali.

Si può affermare, inoltre, che il trattamento con calce è ormai una tecnica affidabile, relativamente facile da gestire in tutte le fasi di progetto e di realizzazione, tenuto conto dell'avanzamento delle conoscenze, degli strumenti (guide tecniche) a disposizione della professione e dello sviluppo tecnologico dei mezzi d'opera, soprattutto per quanto riguarda le macchine di spandimento e di miscelazione.

1.1.2 Materiali per miscele stabilizzate

1.1.2.1 La classificazione delle terre

Le classificazioni delle terre ad uso stradale servono a disporre in gruppi terre che hanno proprietà geomeccaniche simili. Tali classificazioni, sono basate su alcune caratteristiche che non cambiano per operazioni di scavo, di trasporto e di posa in

opera, cioè le caratteristiche di natura: granularità, plasticità e contenuto di materia organica (Santagata, 2016).

Le classificazioni più conosciute in Italia sono quella contenuta nella norma UNI 11531-1 e la classificazione USCS (Unifite Soil Classification System). Queste, non forniscono risultati perfettamente sovrapponibili per i gruppi tra loro corrispondenti e, per questo motivo, per utilizzare un certo terreno occorre confrontare le informazioni da tutte le classificazioni. Entrambe non consentono di discriminare opportunamente le terre fini per un possibile trattamento con calce e/o con leganti idraulici e tenere conto di materie diverse da quelle naturali, quali rifiuti e sottoprodotti industriali, che possono essere utilizzate, per esigenze ambientali, nelle costruzioni stradali grazie all'avanzamento delle conoscenze e delle tecniche costruttive.

1.1.2.1.1 Classificazione UNI 11531-1

Il sistema di classificazione normato in Italia con UNI 11531-1 trae origine da alcuni lavori di Terzaghi, successivamente normalizzati, con alcune modifiche di stampo americano da parte dell'HRB (Highway Research Board), dall'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) e quindi dalla ASTM (American Society for Testing and Materials).

L'obiettivo di tale classificazione è specificamente quello di valutare l'idoneità di una terra a costruire rilevati o strati di sottofondo di pavimentazioni stradali, aeroportuali e opere ferroviarie. Come riportato in Tabella 1, le terre sono suddivise in gruppi principali caratterizzati dalla lettera A, e seguiti da un numero da 1 a 8, sulla base principalmente della composizione granulometrica, della suscettività all'acqua e della presenza di sostanze organiche.

| Classificazione generale | Terre ghiaio-sabbiose Frazione passante allo staccio 0,063 mm ≤ 35% | | | | | | | Terre limo-argillose Frazione passante allo staccio 0,063 mm > 35% | | | | | Torbe e terre organiche palustri |
|---|---|-------------------|-------------------|------------------------------------|--------------|--------------|----------------|--|--------------------------|----------------------------|--|---|---|
| | A1 | | A3 | A2 | | | | A4 | A5 | A6 | A7 | | |
| Gruppo | A1 | | A3 | A2 | | | | A4 | A5 | A6 | A7 | | A8 |
| Sottogruppo | | | | | | | | | | | | | |
| Frazione passante allo staccio 2 mm 0,4 mm 0,063 mm | ≤ 50 ≤ 30 ≤ 15 | - ≤ 50 ≤ 25 | - > 50 ≤ 10 | ≤ 35 | ≤ 35 | ≤ 35 | ≤ 35 | > 35 | > 35 | > 35 | > 35 | > 35 | > 35 |
| Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0,4 mm w _L (limite liquido) IP (indice di plasticità) | - ≤ 6 | - ≤ 6 | - N.P. | ≤ 40 ≤ 10 | > 40 ≤ 10 | ≤ 40 ≤ 10 | > 40 > 10 | ≤ 40 ≤ 10 | > 40 ≤ 10 | ≤ 40 > 10 | > 40 > 10 IP ≤ w _L - 30 | > 40 > 10 | > 40 > 10 IP > w _L - 30 |
| Indice di gruppo | 0 | | 0 | 0 | | | | ≤ 4 | ≤ 8 | ≤ 12 | ≤ 16 | ≤ 20 | |
| Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo | Ghiaia o breccia ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane | | Sabbia fina | Ghiaia o sabbia limosa o argillosa | | | | Limi poco compressibili | Limi molto compressibili | Argille poco compressibili | Argille molto compressibili e mediamente plastiche | Argille molto compressibili e molto plastiche | Torbe di recente formazione, detriti organici |
| Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo | da eccellente a buono | | | | | | | da mediocre a scadente | | | | | Da scartare |
| Azione del gelo sulle qualità portanti | Nessuna o lieve | | Media | | | | Molto elevata | Media | Elevata | Media | | | |
| Ritiro e rigonfiamento | Nullo | | Nullo o lieve | | | | Lieve o medio | Elevato | Elevato | Molto elevato | | | |
| Permeabilità | Elevata | | Media o scarsa | | | | Scarsa o nulla | | | | | | |

Tabella 1- Classificazione delle terre secondo la norma UNI 11531-1 (Santagata 2016).

In particolare, vengono classificate come terre ghiaio-sabbiose le terre A1, A2 e A3 poiché la frazione passante al setaccio da 0,063 mm è non più del 35%; vengono classificate come terre limo-argillose le terre A4, A5, A6 e A7 poiché la frazione passante al setaccio da 0,063 mm è maggiore del 35%.

Invece, il gruppo A8 comprende terre con contenuto di sostanze organiche maggiore del 10% e per questo sono assolutamente da scartare per qualsiasi utilizzo nel corpo stradale a causa della loro elevata compressibilità e il loro potenziale di rigonfiamento.

1.1.2.1.2 Classificazione dell'USCS

Il Sistema Unificato di Classificazione dei Terreni (USCS), normato dall'ASTM, oltre ad essere utilizzato in campo geotecnico è largamente diffuso, talora con lievi modifiche, anche in campo stradale. Esso classifica la terra sulla base delle seguenti caratteristiche di natura: contenuto di sostanza organica, granulometria, limite liquido e indice di plasticità.

Secondo l'USCS le terre sono classificate in tre grandi gruppi.

- **Terre a grana grossa**, con più del 50% trattenuto al setaccio 200 ASTM (aperture da 0,075 mm) e suddivise in ghiaie (G) (trattenute al setaccio 4 ASTM con aperture da 4,76 mm) e sabbie (S) (passante al setaccio 4 ASTM). Sono ulteriormente suddivise in base alla distribuzione granulometrica e alla plasticità del passante al setaccio 40 ASTM

(aperture da 0,42 mm). La plasticità dipende dal valore di limite liquido e di indice di plasticità e si ricava dalla carta di plasticità (Figura 1).

- **Terre a grana fine**, con 50% o più di passante al setaccio 200 ASTM: sono terreni limosi e argillosi, suddivisi in sottogruppi in funzione del limite di liquidità (LL), dell'indice di plasticità (IP) e della presenza di sostanza organica. Per la loro classificazione si utilizza la carta di plasticità dove, in base ai valori di limite liquido e indice di plasticità, si individua una posizione nel grafico. L'IP viene valutato in relazione alla posizione assunta nei quadranti delimitati dalla linea "A", atta a discriminare le argille inorganiche dalle altre terre coesive e comunque al di sotto della linea "U", che delimita superiormente la regione delle condizioni di plasticità realistiche per una terra. Per valori di limite liquido minori del 50% le terre hanno da bassa a media plasticità, mentre per valori maggiori del 50% le terre hanno alta plasticità.

- **Terre ad alto contenuto di sostanza organica**: costituite fondamentalmente da materia organica fibrosa, come le torbe. Vengono rappresentate con il simbolo PT e sono facilmente identificabili dal colore marrone scuro e dall'odore di materia organica in decomposizione.

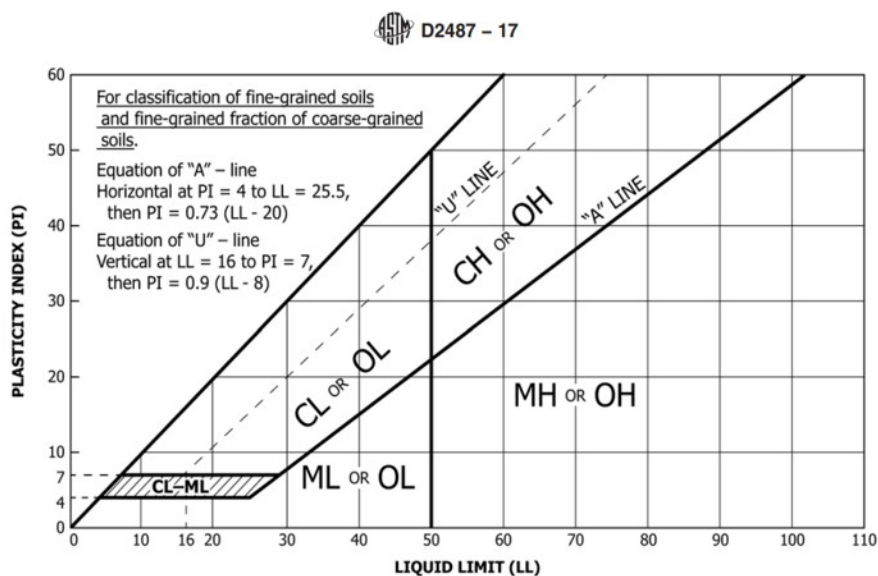


Figura 1- Carta di plasticità per la classificazione USCS.

1.1.2.1.3 Argilla

L'argilla è una terra i cui granuli hanno dimensioni inferiori a 2 μm , con particelle in gran parte colloidali dotate di grande affinità con l'acqua e di cariche elettriche superficiali (Santagata, 2016). I minerali, ovvero i materiali cristallini che rappresentano la parte solida della terra, sono silicati idrati di alluminio, ferro e magnesio, i quali possono contenere altri ioni come sodio, calcio e potassio in quantità

più o meno abbondante. I minerali di base delle argille sono i fillosilicati, le cui strutture elementari sono costituite da ioni idrogeno raggruppati insieme in “fogli” di tetraedri silicatici o ottaedrici. La combinazione di questi fogli dà origine a diverse tipologie di materiali argillosi:

- **Caolinite:** ha una struttura che consiste in un foglio di silicati e un foglio di allumina legati insieme da uno strato spesso circa 0,72 nm e impilati in modo ripetitivo (Figura 2a). Gli strati sono tenuti insieme da legami a idrogeno (Budhu, 2000);
- **Illite:** consiste in strati ripetuti di un foglio di allumina tra due fogli di silicati (Figura 2b). Gli strati, di spessore 0,96 nm, sono tenuti insieme da ioni potassio;
- **Montmorillonite:** ha una struttura simile a quella dell’illite, ma gli strati sono tenuti insieme dalle forze di van der Waals, cioè legami deboli, e appartiene al gruppo minerale della smectite. È costituito prevalentemente da allumina con una piccola aliquota di magnesio che sostituisce l’alluminio. Questo causa uno squilibrio di carica che viene bilanciato da cationi scambiabili Na^+ o Ca^{2+} e acqua (Figura 2c). Un’aggiunta di acqua può penetrare il legame e separare gli strati di montmorillonite causando rigonfiamento.

I minerali argillosi conferiscono alle terre le seguenti proprietà di interesse per l’ingegneria stradale:

- **la plasticità:** attitudine dei terreni a essere plasmati;
- **la coesione:** resistenza alle azioni di taglio conseguente alla presenza di cariche e di cationi flocculanti che vincolano saldamente le particelle di argilla tra loro;
- **la bassa permeabilità:** è dovuta alle forze di attrazione molecolare che mantengono l’acqua vincolata sulla superficie delle particelle, impedendone il deflusso, nonostante le argille siano mezzi alquanto porosi.

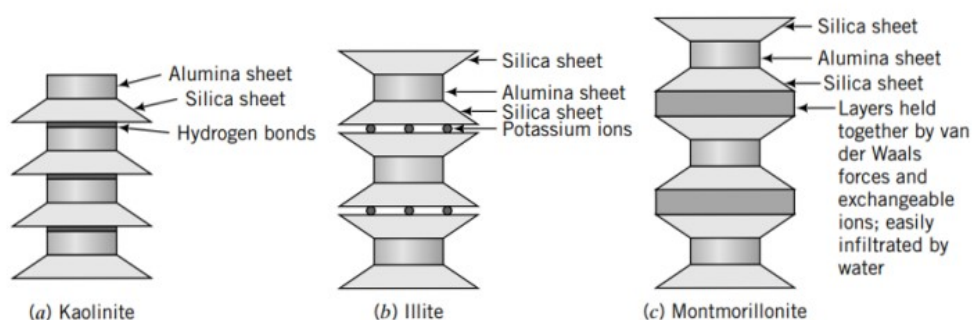


Figura 2- Struttura della caolinite (a), illite (b) e montmorillonite (c) (Budhu 2000).

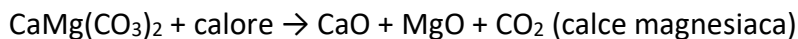
1.1.2.2 Calce

La calce è un legante prodotto dalla cottura di rocce calcaree. I componenti della calce sono i seguenti: ossidi e idrossidi di calcio (la maggior parte), magnesio, silicio, alluminio e ferro ($\leq 5\%$).

La calce si può distinguere in due tipologie:

- **Calce aerea:** indurisce a contatto con l'aria. Si distingue in:
 - I. calce viva o ossido di calcio CaO ;
 - II. calce idrata o calce spenta o idrossido di calcio Ca(OH)_2 .
- **Calce idraulica:** indurisce a contatto con l'acqua, come un altro grande legante idraulico, il cemento. Si distingue in:
 - I. calce idraulica naturale: prodotta dalla cottura di marne naturali oppure di mescolanze omogenee di pietre calcaree e di materie argillose.
 - II. calce idraulica artificiale: ottenuta dalla miscela di calce idrata con altri leganti come la pozzolana o idraulici (clinker, cemento, ceneri) e piccole quantità di additivi aeranti.

Dunque, il materiale di origine sono le rocce calcaree, contenenti principalmente CaCO_3 . Queste vengono sottoposte a cottura a $800/900^\circ\text{C}$, perdendo $1/3$ del proprio peso, secondo la seguente reazione:



Si ottiene la calce viva sotto forma di ossido di calcio CaO o di ossido di magnesio MgO e si presenta in zolle friabili, untuose e generalmente biancastre. È un composto molto caustico ed è difficile da maneggiare, per questo motivo per essere adoperato efficacemente va trasformato in calce idrata. Mediante irrorazione di acqua la calce viva produce calce idrata o idrossido di calcio mediante spegnimento. La reazione è fortemente esotermica ($15,5 \text{ Kcal/mole di CaO}$):



Se l'idrossido di calcio viene finemente frantumato e spento a secco, ovvero con poca acqua, viene prodotta calce idrata in polvere. Se si aggiunge in fase di idratazione un eccesso di acqua rispetto a quella necessaria a trasformare tutta la calce viva in calce idrata, viene prodotta la calce in pasta. Se si aggiunge molta acqua viene prodotto il grassello di calce, cioè un composto di consistenza cremosa a base di calce, una pasta morbida quasi untuosa al tatto. Se il grassello di calce è molto diluito (soluzione con $0,5\%$ di Ca(OH)_2) viene prodotto il latte di calce (EN 14227-15).

Le calce idrauliche invece sono dei prodotti derivanti dalla calcinazione di calcari marnosi o marne calcaree, (miscele naturali con tenore di argilla tra il 6 e il 22% o altri silicati idrati) cotti a temperature in genere comprese tra 1000 e 1250°C. Da tale processo viene prodotto l'ossido di calcio CaO, che successivamente si combina con la silice e l'allumina dell'argilla formando silicati e alluminati di calcio idraulici, composti cioè che reagendo chimicamente con l'acqua formando idrati stabili e insolubili in modo da permettere al materiale di indurire e rimanere stabile sott'acqua, anche in assenza di aria.

1.1.2.3 Cemento

Il cemento è una polvere che, mescolata con l'acqua con un rapporto 3:1, è in grado di produrre una massa (pasta) facilmente modellabile che nel giro di qualche ora diventa consistente perdendo la sua iniziale plasticità (presa) e, successivamente, assume la rigidità tipica di una pietra naturale, capace di resistere ad elevate sollecitazioni meccaniche (indurimento) (Collepari, 2014).

Il principale cemento utilizzato è il cemento Portland, il quale è prodotto secondo la seguente modalità: viene cotta una miscela di terreni naturali e/o artificiali come calcare, argilla, cenere di pirite a una temperatura fino a circa 1480°C in un cilindro orizzontale in modo che i minerali si aggregino ma non si fondano e vetrifichino; il prodotto della cottura è il clinker. Siccome la miscelazione del clinker con l'acqua comporta una presa rapida, il prodotto viene macinato insieme a gesso o anidrite, elementi che fungono da regolatori di presa e la macinazione viene eseguita in un mulino fino ad ottenere la polvere. Tale miscela è il cemento Portland.

Il cemento Portland, reagendo con l'acqua, si solidifica in alcune ore e si indurisce nell'arco di diverse settimane. A 28 giorni circa raggiunge la maturazione e il 90% delle sue prestazioni meccaniche.

Il clinker è composto dagli alluminati (C_3A e C_4AF), responsabili della rapida presa e quindi della perdita di plasticità reagendo con l'acqua e dai silicati (C_3S e C_2S), responsabili delle prestazioni meccaniche a lungo termine. Gli alluminati reagendo con l'acqua formano principalmente i calcio alluminati idrati C-A-H, mentre i silicati reagendo con l'acqua formano i calcio silicati idrati C-S-H e l'idrossido di calcio $Ca(OH)_2$. In particolare, il sistema composto dai silicati che reagiscono con l'acqua inizialmente si trova allo stato fluido, poi durante la reazione le fibre di C-S-H formatesi in precedenza entrano in contatto facendo perdere plasticità al sistema (presa) e poi si allungano per la loro progressiva idratazione e si intrecciano tra loro provocando l'irrigidimento del sistema (indurimento).

La classificazione del cemento di riferimento si trova nella norma UNI EN 197-1:2011. Il cemento, sulla base della norma citata, viene fornito con un codice alfanumerico, in cui vengono indicati il tipo di cemento e la classe di resistenza. Infatti, ci sono diverse tipologie di cemento che differiscono per quantità di clinker e di altri costituenti, che includono: pozzolana naturale, pozzolana artificiale, loppa d'altoforno, cenere volante, fumo di silice e calcare.

Di seguito si riportano i tipi di cemento:

- CEM I: cemento Portland (un tipo);
- CEM II: cemento Portland di miscela (17 sottotipi);
- CEM III: cemento d'altoforno (3 sottotipi);
- CEM IV: cemento pozzolanico (2 sottotipi);
- CEM V: cemento composito (2 sottotipi).

In particolare, il cemento utilizzato per la stabilizzazione delle terre è il cemento Portland o il cemento pozzolanico. Il cemento Portland è costituito principalmente dal clinker (> 95%) e da gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mentre quello pozzolanico è costituito in parte da clinker e gesso e in parte da microsilice, pozzolana naturale e artificiale e cenere volante silicica.

Ogni tipo di cemento si distingue in base alla classe di resistenza: 32.5N, 32.5R, 42.5N, 42.5R, 52.5N, 52.5R. Il numero della sigla indica il valore minimo di resistenza meccanica a compressione in N/mm^2 misurata a 28 giorni; la lettera N o R indica il comportamento meccanico del cemento alle brevi stagionature. Per esempio, il cemento 32.5N e 32.5R devono garantire entrambi il raggiungimento di una resistenza pari a $32,5 \text{ N/mm}^2$ in 28 giorni, ma il cemento 32.5N deve raggiungere una resistenza di 16 N/mm^2 in 7 giorni, invece il cemento 32.5R di 10 N/mm^2 in 2 giorni.

I tempi di inizio presa per ogni classe di resistenza normalizzata sono i seguenti:

- Classe 32,5: $t \geq 75 \text{ min}$;
- Classe 42,5: $t \geq 60 \text{ min}$;
- Classe 52,5: $t \geq 45 \text{ min}$.

Si riportano in Tabella 2 le classi di resistenza dei cementi.

| Classe di resistenza (sigla) | Resistenza a compressione minima in | | |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| | 2 giorni | 7 giorni | 28 giorni |
| | N/mm ² | N/mm ² | N/mm ² |
| 32.5N | | 16 | 32,5 |
| 32.5R | 10 | | 32,5 |
| 42.5N | 10 | | 42,5 |
| 42.5R | 20 | | 42,5 |
| 52.5N | 20 | | 52,5 |
| 52.5R | 30 | | 52,5 |

Tabella 2- Resistenza meccanica a compressione per le classi di resistenza del cemento.

1.1.2.4 Acqua

L'acqua deve essere esente da impurità, oli, acidi, alcali, materia organica e qualunque altra sostanza nociva che può compromettere lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche e le prestazioni meccaniche delle miscele. L'acqua adottata nelle miscele deve essere quella corrispondente all'umidità ottimale, in modo da raggiungere la massa volumica del secco massima. Inoltre, è fondamentale avere un contenuto di acqua libera minimo all'interno della terra per assicurare l'idratazione della calce, la flocculazione dell'argilla, la solubilizzazione della silice e dell'allumina, e le reazioni pozzolaniche.

1.1.2.5 Aggregati lapidei

Gli aggregati lapidei sono particelle granulari di origine minerale che trovano largo impiego nelle costruzioni stradali, sia in forma sciolta sia in combinazione con leganti di varia natura e tipologia. Alcuni esempi tipici di utilizzo riguardano i conglomerati cementizi, i conglomerati bituminosi, i trattamenti superficiali, i misti cementati o misti granulari non legati per strati di fondazione. Riguardo a ciò, in questa tesi si tratterà dell'utilizzo di aggregati lapidei miscelati con materiali legati con leganti idraulici, per creare miscele stabilizzate da testare in prove di laboratorio.

Il processo di qualificazione degli aggregati coinvolge diversi elementi. Questi comprendono, da un lato, la caratterizzazione del materiale attraverso lo svolgimento di prove sperimentali per la determinazione delle principali proprietà fisiche, chimiche e meccaniche e dall'altro, la definizione di opportuni criteri di classificazione e accettazione in relazione alla destinazione d'uso (Santagata 2016).

Gli aggregati lapidei hanno origine dalle rocce e possono trovarsi in depositi naturali (soprattutto sotto forma di sabbie e ghiaie) formati attraverso un complesso insieme di fenomeni chimico-fisici, oppure essere prodotti mediante estrazione (e successiva trasformazione) da cava. Oltre agli aggregati naturali esistono anche altri prodotti di origine artificiale o da riciclo, utilizzati in tutto o in parte come aggregati nelle costruzioni; si citano al riguardo le scorie ottenute da processi industriali (legate alla

lavorazione del ferro, acciaio, nickel), i detriti derivanti da demolizioni edilizie, il materiale fresato ricavato da pavimentazioni esistenti, i rifiuti di varia natura (vetro, prodotti da incinerazione dei rifiuti solidi urbani, polverino di gomma da pneumatici dismessi).

Le proprietà degli aggregati vengono divise in tre categorie:

- **caratteristiche geometriche:** dimensioni, granulometria, contenuto di fini, forma, percentuale di superfici frantumate, spigolosità dell'aggregato fine;
- **caratteristiche fisiche:** pulizia e qualità dei fini, massa volumica e assorbimento d'acqua, resistenza alla frammentazione, alla durabilità e alla levigazione (caratteristiche meccaniche), degradabilità da soluzioni solfatiche e resistenza al gelo-disgelo (caratteristiche di durabilità);
- **caratteristiche chimiche:** insolubilità, inerzia chimica verso la pasta cementizia, stabilità a contatto con gli agenti naturali durante l'esercizio.

Dal punto di vista dimensionale gli aggregati vanno distinti in grossi e fini. Esistono diversi criteri per definire ciascuna delle due categorie. La letteratura tradizionale indica come grossi gli aggregati trattenuti al vaglio di apertura pari a 4,75-5 mm (a seconda della serie di vagli adottata), mentre come fini quelli di dimensioni comprese tra il valore su indicato e il limite inferiore di 0,075 mm. La frazione minerale passante a quest'ultima dimensione costituisce una componente chiamata filler. Altre fonti più recenti indicano soglie diverse, uguali rispettivamente a 2 e 0,063 mm. Poiché gli aggregati sono formati da una molteplicità di elementi, ogni classe è contraddistinta da un intervallo nominale compreso tra due dimensioni caratteristiche entro cui è contenuta gran parte dei granuli (d/D).

1.1.3 Azioni del trattamento dei terreni argillosi con calce o con calce e cemento

1.1.3.1 Parametri di identificazione dei componenti della miscela

I principali fattori che governano questo tipo di trattamento riguardano i parametri di identificazione dei componenti che entrano in miscela: terra, calce ed eventuale legante idraulico.

I parametri più significativi sono:

- **per le terre:** la granulometria (occorre una quantità sufficiente di frazione fine passante a 0,063 mm per assicurare la reazione pozzolanica e la stabilizzazione con

calce), la plasticità (attraverso l'indice di plasticità), il tenore in sostanze nocive, il contenuto naturale d'acqua (fondamentale per quanto riguarda la scelta del tipo di calce e il suo dosaggio), la presenza di elementi lapidei di grosse dimensioni che, in fase esecutiva, possono ostacolare o rendere economicamente inaccettabile il processo di miscelazione;

- **per la calce** (aerea): la forma attraverso la quale essa è aggiunta alla terra (calce viva macinata, calce idrata in polvere, latte di calce), il suo tenore in calce libera, la granulometria e, per la calce viva, la sua reattività all'acqua. Va tenuto presente che nello stesso cantiere possono essere utilizzati tutti e tre i tipi di calce, in relazione alle condizioni ambientali e alla necessità di fare variare, in modo appropriato, il contenuto d'acqua presente nella terra al momento dell'esecuzione dei lavori;

- **per i leganti idraulici**: la proporzione e la natura dei costituenti che condizionano la cinetica della presa idraulica, i livelli di prestazione e la compatibilità con i componenti chimici della terra. Per quanto riguarda il cemento, la classe di resistenza ammissibile del cemento è 32.5 o 42.5 (C.N.R. N.29). Il peso del cemento generalmente deve essere tra il 2,5 % e il 3,5 % del peso dell'aggregato asciutto.

In Tabella 3 si riportano i valori limite delle grandezze che stabiliscono l'idoneità della terra al trattamento, secondo la norma europea EN 14227-11.

| | |
|--|-------|
| Frazione con dimensione inferiore a 63 mm | 95% |
| Frazione passante allo 0,063 mm | ≥ 12% |
| Indice di plasticità minimo | 5% |
| Rigonfiamento volumico (Gv) per strati di rilevato | ≤ 10% |
| Rigonfiamento volumico (Gv) per strati di sottofondo | ≤ 5% |

Tabella 3- Requisiti per le terre sottoposte a stabilizzazione secondo le norme attuali.

1.1.3.2 Azioni immediate e a lungo termine

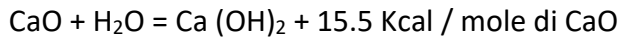
I meccanismi che governano l'interazione tra la terra e la calce di apporto vengono distinti, generalmente, in:

azioni immediate, che si producono nel momento stesso in cui la calce viene miscelata alla terra. Gli effetti delle azioni immediate facilitano le condizioni di posa in opera dei materiali e favoriscono l'utile avanzamento dei lavori anche in presenza di terreni in condizioni di consistenza plastica, poiché forniscono una capacità portante immediata sufficientemente elevata per il corretto costipamento degli strati soprastanti.

azioni a lungo termine, che si sviluppano nel tempo (diversi mesi o anche più anni), dopo la posa in opera delle miscele.

Rientrano tra le **azioni immediate**:

- **la variazione del contenuto d'acqua.** L'impiego di calce viva provoca una forte riduzione del contenuto d'acqua nella terra (circa un punto percentuale per ogni punto di calce aggiunto) per effetto combinato dell'idratazione della calce, dell'evaporazione dell'acqua prodotta dalla reazione fortemente esotermica



e per apporto di materia secca. L'impiego di calce idrata riduce l'umidità di circa lo 0,3% per ogni punto di calce di apporto. Il latte di calce provoca, invece, un aumento del tenore in acqua, funzione della quantità di apporto e della concentrazione di calce nella soluzione. Le variazioni appena descritte prescindono dagli effetti dovuti alle operazioni di miscelazione e all'aerazione della terra, che in condizioni di forte evapotraspirazione, possono dare luogo nei primi 5 cm dello strato di terra sciolta a 3 ÷ 4 punti percentuali di riduzione del contenuto d'acqua in meno di 3 ore, come sperimentalmente riscontrato nel range dei tenori in calce tipici per queste applicazioni;

- **la modificazione delle caratteristiche geotecniche della frazione argillosa.** Fin dal momento della sua aggiunta in una terra argillosa umida, la calce agisce sulle cariche elettriche delle particelle fini, modificando le interazioni elettriche interparticellari e causandone la flocculazione: gli ioni sodio (Na^+) e potassio (K^+) vengono sostituiti dallo ione calcio (Ca^{2+}). Ciò comporta l'immediata modificazione della plasticità della terra (limiti di plasticità, di liquidità e di ritiro) e la granulazione della frazione fine argillosa che, diventando friabile, favorisce la miscelazione e la posa in opera delle miscele.

In Figura 3 viene mostrato che, al decrescere del dosaggio di calce, si osserva una sensibile variazione del limite di plasticità della terra, che aumenta (fino a un certo valore) e una variazione più modesta del limite di liquidità, che può aumentare, ma anche rimanere invariato o diminuire. L'indice di plasticità (IP), in ogni caso diminuisce. Tuttavia, l'effetto che più interessa ai fini pratici è l'ampliamento del campo di stato solido della terra trattata e il miglioramento della consistenza. Pertanto, un terreno che per contenuto d'acqua si trova in uno stato di consistenza plastico, tale da essere difficilmente trafficabile per i mezzi di cantiere, mediante trattamento con calce può essere portato in condizioni di stato solido favorevoli alle operazioni di movimento di terra (Santagata 2016).

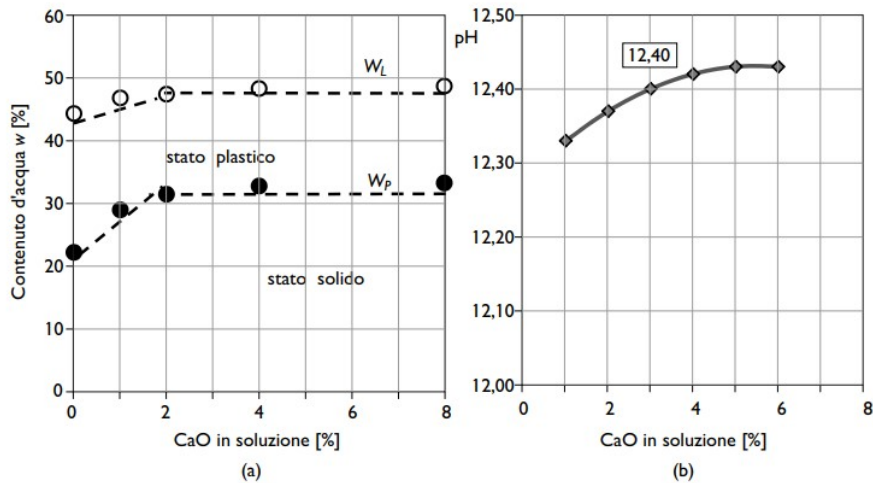


Figura 3- Effetto del dosaggio in calce viva nelle miscele: (a) variazione dei limiti di Atterberg; (b) variazione del pH (Santagata 2016).

- **la modificazione delle caratteristiche di costipamento.** Il trattamento con calce, per data energia di costipamento, riduce il valore massimo della massa volumica apparente del secco e fa aumentare il corrispondente tenore in acqua ottimale di costipamento. Risulta migliorata la compattabilità delle miscele; inoltre, l'aumento dell'umidità ottimale di costipamento, insieme alla riduzione del contenuto d'acqua della terra prodotta dall'aggiunta di calce, permette di compattare correttamente terre che si trovano in condizioni di umidità naturali altrimenti proibitive per l'avanzamento dei lavori;

- **l'aumento della resistenza al taglio**, messo in evidenza dall'aumento (col contenuto di calce) dell'indice di portanza immediata, IPI, la cui ampiezza dipende, a parità d'ogni altra cosa, dal contenuto d'acqua del terreno prima del trattamento.

Le **azioni di lungo termine**, invece, sono dovute all'azione pozzolanica della calce aerea, che, interagendo con i componenti chimici dell'argilla, dà luogo a specie minerali della stessa natura di quelli prodotti dai leganti idraulici. In ambiente reso fortemente basico dall'aggiunta di calce, infatti, l'argilla mette in soluzione, progressivamente nel tempo, i suoi costituenti chimici principali (SiO_2 e Al_2O_3), i quali, in presenza d'acqua, si combinano con gli ioni Ca^{2+} e OH^- , dando luogo a prodotti di idratazione (silicati e alluminati di calcio idrati) responsabili dello sviluppo di resistenza (reazione pozzolanica).

Per quanto attiene allo sviluppo della stabilizzazione meccanica, occorre considerare che:

1. la reazione pozzolanica delle miscele con calce (o con calce e cemento) evolve non in un'unica fase (come per le miscele cementizie) ma in tre fasi successive, in proporzione diretta col quantitativo di calce consumata. Inoltre, il

- rendimento meccanico del consumo in calce aumenta da una fase alla successiva e gli ultimi quantitativi di calce combinate sono quelli di maggiore effetto sulle prestazioni di lungo termine;
2. la microstruttura del suolo e, specialmente, la composizione mineralogica della frazione argillosa influenzano i tempi e le prestazioni finali delle miscele. Le argille montmorillonitiche sono le più reattive; le caoliniti, sono le meno reattive. Tuttavia, non bisogna confondere la velocità di reazione con l'entità delle prestazioni meccaniche che possono essere fornite a lungo termine dalle miscele. Si osserva, infatti, che gli alluminati di calcio idrati ben cristallizzati (C-A-H) che si formano dall'attacco delle montmorilloniti non permettono di raggiungere le prestazioni fornite, invece, dai silicati calcici idrati amorfi (C-S-H) originati dall'attacco delle caoliniti;
 3. l'intensità della reazione pozzolanica dipende dalla quantità e dalla composizione mineralogica della frazione argillosa della terra, dal tenore in acqua, dal dosaggio in calce, dal contenuto di materia organica e dal pH delle miscele. Contrariamente a quanto avviene per i leganti idraulici, tuttavia, per la calce esiste un dosaggio massimo (funzione della quantità massima di calce "consumabile" dall'argilla presente nella terra da trattare) oltre il quale le prestazioni meccaniche non crescono più, anzi, rischiano di diminuire per il fatto che la calce in eccesso aumenta la sensibilità all'acqua della miscela;
 4. la temperatura influenza la velocità della reazione pozzolanica dovuta all'azione della calce, in misura sensibilmente maggiore di quanto avviene per la presa idraulica dei materiali stabilizzati con cemento. A 40 °C la velocità di reazione è di 10 ÷ 20 volte più rapida che a 20 °C. Superando i 40 °C, la natura delle reazioni tra i minerali dell'argilla e la calce risulta modificata. L'evoluzione della resistenza meccanica rallenta col diminuire della temperatura (di circa 4 volte, passando da 20 °C a 10 °C) e si arresta quando scende al di sotto di 5 °C, per poi riprendere quando la temperatura supera la suddetta soglia.

Poiché le prestazioni meccaniche delle miscele terra-calce a lungo termine sono difficilmente valutabili con precisione in fase di progettazione, è opportuno considerare l'età di stagionatura delle miscele una variabile da prendere in conto nella pianificazione dei lavori, riservando alla fase esecutiva le prove e gli studi necessari per valutare i tempi entro i quali le prestazioni meccaniche ricercate, la stabilità all'acqua e, se necessario, al gelo possono essere acquisite.

Occorre tenere presente, infine, che la presenza nella terra di acqua libera in quantità sufficiente, è indispensabile per assicurare, inizialmente, l'idratazione della calce, la flocculazione dell'argilla e la solubilizzazione della silice e dell'allumina, oltre che per garantire la mobilità degli ioni che danno luogo alla formazione nel tempo dei composti pozzolanici e alla cementazione delle particelle. Si è potuto osservare, inoltre, che le migliori condizioni per lo sviluppo nel tempo delle reazioni pozzolaniche

si hanno quando il contenuto d'acqua nella terra prima del trattamento risulta prossimo al limite di plasticità.

1.1.3.3 Azioni del cemento

L'azione immediata del cemento nel trattamento delle terre è limitata ed è dovuta, essenzialmente, alla quantità di calce libera contenuta in alcuni leganti idraulici. Nel trattamento dei terreni fini, in particolare, esso è impiegato per ottenere uno sviluppo rapido e durevole delle prestazioni strutturali (portanza) e delle resistenze all'acqua e al gelo degli strati realizzati. I meccanismi di azione del cemento sui terreni sono dovuti essenzialmente all'idratazione dei silicati e degli alluminati di calcio anidri, alla formazione e all'accrescimento di microcristalli che, progressivamente, rivestono i granuli di terra e che indurendo formano legami tali da conferire al materiale caratteristiche meccaniche elevate e durevoli anche in presenza d'acqua e di gelo. Le dimensioni delle specie cristalline originate dall'idratazione dei cementi, ben maggiori delle particelle di argilla, non permettono di rivestire queste ultime e di formare legami stabili nel tempo. Per tale motivo la stabilizzazione con cemento (o con leganti idraulici) è scarsamente efficace per le terre fini argillose ed è riservata, normalmente, alle terre granulari, per ottenere prestazioni strutturali idonee alla realizzazione di strati di fondazione e di base delle sovrastrutture. Nella stabilizzazione mista (con calce e cemento) occorre tenere conto che il successivo apporto di cemento comporta una diminuzione del contenuto d'acqua della terra pretrattata con calce; tale effetto è dovuto all'ulteriore apporto di materia secca, al consumo d'acqua richiesto dallo sviluppo della presa idraulica e all'evaporazione d'acqua durante la miscelazione.

1.1.4 Studio di formulazione delle miscele

Gli studi di formulazione di laboratorio mirano a precisare, in funzione dell'impiego previsto, il prodotto di trattamento più idoneo (calce o calce e cemento) e i dosaggi da considerare per ottenere gli effetti ricercati. Essi vanno realizzati su campioni di terra rappresentativi delle condizioni in situ (sulla frazione 0/20 mm), utilizzando un prodotto di trattamento (calce o calce e cemento) rispondente ai requisiti di normativa (Santagata 2016).

Uno studio di formulazione di laboratorio comprende, generalmente:

- **l'identificazione dei prodotti di trattamento** utilizzati (in fase di progettazione, può bastare la marcatura CE del prodotto commerciale);
- **la verifica dell'idoneità della terra** a essere trattata con calce, attraverso prove granulometriche, di plasticità, chimiche e di rigonfiamento volumico (Gv);

- **la determinazione del dosaggio minimo in calce** necessario per garantire lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche attraverso prove di consumo iniziale di calce C.I.C. (come da norma ASTM C977- 00). Nei casi in cui interessa soltanto il miglioramento di terreni troppo umidi (per esempio, per la realizzazione delle bonifiche dei piani di posa dei rilevati) si può procedere come indicato dalla norma SN 640 503a, determinando il dosaggio in calce minimo necessario per modificare la plasticità della terra, superato il quale, il limite di plasticità delle miscele non subisce ulteriori significative variazioni (il valore minimo così determinato risulta generalmente inferiore al C.I.C che è quello necessario per lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche);

- l'esecuzione, di **prove di costipamento** Proctor normale e **prove di comportamento meccanico** in relazione al campo di variazione del contenuto d'acqua dei terreni in situ prevedibile nel periodo di esecuzione dei lavori. Per queste ultime si procede normalmente:

1. nel caso del trattamento con calce, eseguendo prove di laboratorio di portanza immediata IPI e prove di portanza CBR, dopo quattro giorni di immersione in acqua dei campioni compattati secondo Proctor normale, quando è necessario valutare la stabilità all'acqua delle miscele;
2. nel caso del trattamento misto con calce e cemento, o con altro legante idraulico, eseguendo prove di resistenza a rottura a compressione semplice a trazione diretta o a trazione indiretta.

Le prove di resistenza meccanica sono utilizzate per determinare l'evoluzione della stabilizzazione e, in particolare, i tempi di maturazione necessari perché le miscele possano acquisire, quando richiesto dalle particolari condizioni di impiego e climatiche, la resistenza all'immersione e la tenuta al gelo nei siti interessati dal fenomeno. Studi di questo tipo vanno affrontati in modo approfondito in fase di esecuzione dei lavori (in tempo utile prima di dare inizio ai lavori), per ogni gruppo di terreni omogenei che si intende impiegare e per ogni tipo di trattamento, tenendo conto delle diverse destinazioni d'uso delle miscele.

1.2 Progetto ECOSEDRA

1.2.1 Contesto e obiettivi

Come spiegato in precedenza, questa tesi sperimentale tratta lo studio di un particolare materiale di recupero di natura limo-argillosa, ovvero un sedimento derivante da fanghi di dragaggio provenienti dal porto di Ancona e i suoi possibili impieghi nella costruzione di strade.

La sperimentazione nasce dalla partecipazione del laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche al progetto ECOSEDRA ("Soluzioni tecnologiche, innovative ed ECO-efficienti per il trattamento e la valorizzazione circolare dei SEDIMENTI di DRAGAGGIO").

Quest'ultimo è finanziato dalla Regione Marche attraverso i fondi regionali 2017/2018 in un bando competitivo: Bando: L.R. 17 LUGLIO 2018, N.25 "IMPRESA 4.0: INNOVAZIONE, RICERCA E FORMAZIONE" - BANDO 2019 "Sostenere l'innovazione aziendale verso un modello di economia circolare" – Riapertura bando annualità 2020.

Il progetto ha la finalità di produrre, attraverso l'utilizzo di un impianto pilota, una soluzione tecnologica innovativa per la gestione ecosostenibile dei sedimenti provenienti dalle operazioni di dragaggio dei porti. Attraverso l'impianto si cerca di recuperare materiale da costruzione, in modo da trasformare un potenziale rifiuto in una risorsa sicura ai fini del risparmio energetico, della riduzione delle emissioni di gas inquinanti e, in generale, dell'impatto ambientale.

Il sito dimostrativo del progetto era originariamente individuato nel porto di Ancona, in quanto in questo luogo si è manifestata un'esigenza reale, verificata dall'Autorità Portuale di Ancona, che riguarda la gestione ecosostenibile dei sedimenti provenienti dalle operazioni di dragaggio portuali.

Il porto di Ancona gestisce migliaia di arrivi di navi all'anno e di conseguenza tonnellate di materiali e merci in transito, collaborando con gli altri porti dell'Adriatico centrale e non solo.

In questo contesto, i fanghi di dragaggio rappresentano un problema ambientale significativo, con un volume stimato nei prossimi anni per il solo porto di Ancona di oltre 300.000 m³.

In Figura 4 si riporta una vasca di colmata che è, convenzionalmente, la destinazione più comune, a causa della disponibilità limitata di tecniche o di soluzioni tecnologiche alternative, per i materiali derivanti dalle attività di dragaggio e di bonifica, se non pericolosi all'origine o a seguito di trattamenti finalizzati esclusivamente alla rimozione degli inquinanti. Da lì segue di solito un consolidamento, una volta raggiunta la capacità di ritenzione e una volta coperta la superficie, oppure vengono utilizzati in ripascimenti costieri secondo specifici regolamenti autorizzativi.

Il processo di trattamento nell'impianto di prova segue un modello tecnologico e organizzativo (filiera), per rendere sostenibile e replicabile il processo di recupero e di trattamento dei sedimenti portuali.

Questa tecnologia permette di recuperare una quantità di materiale dragato superiore all'80%, ottenendo così una netta riduzione dei rifiuti da gestire in tale luogo e minimizzando i volumi necessari per opere di confinamento costose e impattanti.

Inoltre, ci sono diversi studi (Pinto et al., 2011; Limeira et al., 2010; Zentar et al., 2008) che hanno dimostrato che è possibile riutilizzare l'aggregato ottenuto dal trattamento dei fanghi di dragaggio, identificati con il codice dell'elenco europeo dei rifiuti (codice EER) 170506, per la costruzione di rilevati e sovrastrutture stradali.

Tuttavia, il riutilizzo è condizionato da una serie di fattori qualitativi del prodotto ultimo. Infatti, se l'aggregato di recupero ha una granulometria fine (inferiore a 2 mm) esso può essere riutilizzato nelle tradizionali miscele stradali solo dopo opportuna stabilizzazione chimica (es. con calce e/o cemento) e granulometrica (miscelazione con pezzature grosse, anche di riciclo) e principalmente per impieghi negli strati profondi, nei sottofondi e rilevati.

In generale si segnala che, sebbene il recupero di materiali di dragaggio sia ampiamente documentato nella letteratura tecnico-scientifica, attualmente la normativa tecnica italiana, in particolare la norma UNI 11531-1, non prende ancora in considerazione la possibilità di recuperare questo tipo di materiali per le costruzioni stradali. Ciò perché la granulometria dei materiali di dragaggio è al di fuori del range preso in considerazione dalla norma.

I risultati del progetto potrebbero costituire pertanto una base per l'ampliamento delle possibilità di riciclaggio in ambito stradale.



Figura 4- Vasca di colmata del porto di Ancona.

1.2.2 Programma del progetto

Il progetto ECOSEDRA è costituito dalle seguenti fasi:

1. Caratterizzazione dei fanghi. Vengono elaborati i dati relativi alle analisi storiche effettuate dall'Autorità Portuale, nel porto di Ancona, riguardanti sia la caratterizzazione fisica, ovvero la granulometria, sia quella chimica. Per la

verifica delle caratteristiche dei sedimenti sono state effettuate caratterizzazioni fisiche (granulometria) e chimiche (metalli pesanti) su campioni prelevati nella vasca di colmata del porto di Ancona.

2. Prove funzionali per il dimensionamento dell'impianto di recupero. Viene eseguita un'approfondita analisi di letteratura tecnico-scientifica per determinare preliminarmente le rese di rimozione dei principali metalli tramite trattamenti di lavaggio chimico applicati a matrici solide contaminate. Inoltre, vengono eseguiti test in scala di laboratorio realizzati utilizzando matrici in modo da supportare le scelte di processo e di progettazione realizzate. I risultati dei test in laboratorio sono paragonabili con quelli riferiti agli studi di letteratura.
3. Progettazione dell'impianto di recupero e avvio degli ordini per le forniture.
4. Progettazione del sistema di controllo 4.0.
5. Autorizzazione dell'impianto di recupero. Il titolo autorizzativo per la realizzazione e gestione dell'impianto sperimentale è pervenuto a SO.GE.IN. S.r.l. (Società di Servizi di Ingegneria, che in questo caso si occupa della progettazione, installazione e verifica delle soluzioni impiantistiche per il riciclo dei sedimenti portuali).
6. Realizzazione, avviamento e fase di esercizio operativo dell'impianto di recupero.
7. Caratterizzazione dei rifiuti in ingresso e dei materiali recuperati. Una volta avviato l'impianto pilota ECOSEDRA si sono garantite numerose analisi per la caratterizzazione del rifiuto prima del trattamento, per completare il quadro analitico. I materiali recuperati, devono rispettare i limiti riportati in tabella 1 colonna B dell'All. 5 del Dlgs 152/2006 e nell'All. 3 del DM 5 febbraio 1998. I risultati dei test preliminari sul materiale trattato in impianto hanno rispettato i limiti esplicitati in Tabella 4, ad eccezione del contenuto di sostanza organica, il quale risulta essere superiore al 3% in peso. Tale limite, tuttavia, può essere superato nel caso in cui si dimostri il soddisfacimento dei requisiti meccanici richiesti per le miscele terra-calce.
8. Studio di miscele ed aggregati per la realizzazione di rilevati e sovrastrutture stradali. Vanno eseguite in laboratorio prove di tipo fisico (limiti di Atterberg) e di tipo prestazionale (prove di compattazione e di resistenza meccanica) su diverse miscele per determinare la composizione di miscele stradali contenenti il sedimento recuperato. I limiti di Atterberg devono essere eseguiti sul sedimento trattato tal quale e su miscele composte da sedimento con diverse percentuali di calce e cemento. Le prove prestazionali, infine, devono essere eseguite sulle miscele con i dosaggi preliminari degli agenti stabilizzanti e con l'aggiunta di materiale grossolano soggetto anch'esso al recupero (fresato stradale, macerie da costruzione e demolizione).
9. Validazione delle nuove miscele su rilevati e sovrastrutture stradali in scala dimostrativa. Terminato lo studio delle miscele in laboratorio, verrà realizzato un campo prova dove verranno messe in opera le suddette miscele costruendo

pavimentazioni modello. Il campo prova sarà costituito da diverse sezioni dimostrative (da 4 a 6 in funzione delle rese finali dell'impianto di recupero) in ciascuna delle quali sarà messo in opera (steso e compattato) uno strato realizzato con una diversa miscela ecosostenibile. Le dimensioni indicative di ciascuna sezione del campo prova saranno di circa 20 cm di spessore con una larghezza e una lunghezza rispettivamente comprese tra 3 e 4 m e tra 10 e 20 m. Le prestazioni in opera delle nuove miscele ecosostenibili saranno valutate mediante prove in sito (controlli non distruttivi) e prelievi (carotaggi), effettuati secondo una specifica sequenza temporale, fino alla chiusura del progetto. In particolare, la campagna di monitoraggio prevederà misure dello stato di degrado (indice PCI) e verifiche dei requisiti di accettazione riportati nei capitolati stradali correntemente in uso e riguardanti la capacità portante (moduli di rigidità e deformabilità) e la durabilità.

10. Individuazione degli indicatori di impatto energetico, di emissioni di CO₂ e di impatto ambientale delle configurazioni dell'impianto di recupero.
11. Sviluppo di una piattaforma web a supporto del recupero su scala territoriale dei materiali dragati e trattati dal nuovo impianto ECOSEDRA.
12. Svolgimento di conferenze per le figure coinvolte nel progetto.

| TEST | Metodica di riferimento nell'effettuare il test | Norma UNI di riferimento | Prestazioni attese |
|----------------------------------|---|--------------------------|---|
| Caratterizzazione granulometrica | ASTM D6913/D6913M | UNI 11531-1 | Passante al setaccio 63 micron > 35% |
| Limiti di Atterberg | ISO/TS 17892-12:2004 | UNI 11531-1 | Indice di plasticità > 10% |
| Contenuto di solfati | UNI EN 1744-1 | UNI 14227-15 | Contenuto di solfati inferiore allo 0,8% in peso (percentuale indicativa) |
| Contenuto di sostanza organica | UNI EN 1744-1 | UNI 14227-15 | Contenuto di sostanza organica inferiore al 3% in peso (percentuale indicativa) |

Tabella 4-Test funzionali al riutilizzo in ambito stradale (L.R. 17 luglio 2018, Allegato 15).

1.2.3 Processo di trattamento e di caratterizzazione dei fanghi

La portata in ingresso dei fanghi di dragaggio all'impianto è dell'ordine di 30-50 kg/h, per un totale giornaliero autorizzato massimo di 200 kg.

Nel processo di trattamento, il fango, caratterizzato dal codice identificativo di rifiuto EER 170506, arriva all'impianto in un cassone scarrabile. Poi, una volta caricato su un nastro trasportatore, viene trasportato a triturazione mediante un mulino a martelli e poi a grigliatura, in cui la frazione con diametro inferiore a 2 mm (sottovaglio) viene convogliata per gravità alla sezione di miscelazione e omogenizzazione, mentre la frazione con diametro superiore a 2 mm (sopravaglio) viene fatta ricircolare per un numero di volte necessario a ridurre la frazione grossolana che poi viene smaltita. Nel reattore di miscelazione e omogeneizzazione, per garantire un'efficienza elevata di rimozione degli inquinanti, il fango viene mescolato con acqua osmotizzata, proveniente da un serbatoio di accumulo di acqua della rete idrica di 20 m³ di capacità e successivamente sottoposta a trattamento di osmosi inversa. Dopodiché, il materiale viene fatto passare nel reattore di lavaggio con dosaggio di reagenti per eliminare il materiale organico, gli inquinanti e ioni come cloruri e solfati. Una volta garantita la miscelazione ed il tempo di contatto sufficiente per la rimozione dei diversi inquinanti, la fase solida viene fatta sedimentare nella parte inferiore e viene portata, grazie a delle pompe, nel serbatoio di accumulo fanghi, dove viene sottoposta a disidratazione su filtrazione a piastre, composta da 60 piastre da 500x500 mm.

In seguito alla disidratazione, il fango precipita nel cassone sottostante, da cui viene poi trasferito all'unità di essiccamento termico a 60°C. Terminato il ciclo di essiccamento, il materiale viene scaricato in un cassone di stoccaggio, mentre le acque di disidratazione del fango e di condensa da essiccamento termico vengono convogliate per gravità in un pozzetto di raccolta e vengono immagazzinate in serbatoi di stoccaggio. Opportune analisi di controllo vengono eseguite sulle acque finali in modo da rispettare i limiti normativi per lo scarico in accordo con la normativa ambientale vigente (D.Lgs. 152/06).

In Figura 5, 6 e 7 si riportano dei particolari dell'impianto di trattamento SO.GE.IN., evidenziando i nastri estrattori per le sezioni di triturazione e grigliatura, le sezioni di lavaggio e la vasca di raccolta del sopravaglio.

A partire da questo materiale si creeranno miscele stradali ecosostenibili, che saranno testate attraverso la realizzazione di una sperimentazione in scala rappresentativa.

Per la caratterizzazione dei fanghi all'ingresso dell'impianto si sono fatti dei campionamenti dal luogo in cui sono stoccati e ciascun campione è stato ridotto in pezzatura inferiore a 4 mm, per poi essere setacciato e miscelato. Un'aliquota di

campione è stata essiccata a 105°C, così da poter calcolare sia la percentuale di umidità, sia la percentuale di sostanza secca.

Successivamente si fa un test di cessione, rispettando la norma UNI EN 12457-2:2004, per poi passare a una sedimentazione di almeno 15 minuti, una filtrazione a 0.45 µm e in conclusione si misurano pH, conducibilità, COD, contenuto in metalli e contenuto di ioni.



Figura 5- Particolare dell'impianto di trattamento: nastri estrattori e sezioni di lavaggio e dosaggio reagenti.



Figura 6- Particolare dell'impianto di trattamento: nastri estrattori e sezione di triturazione.

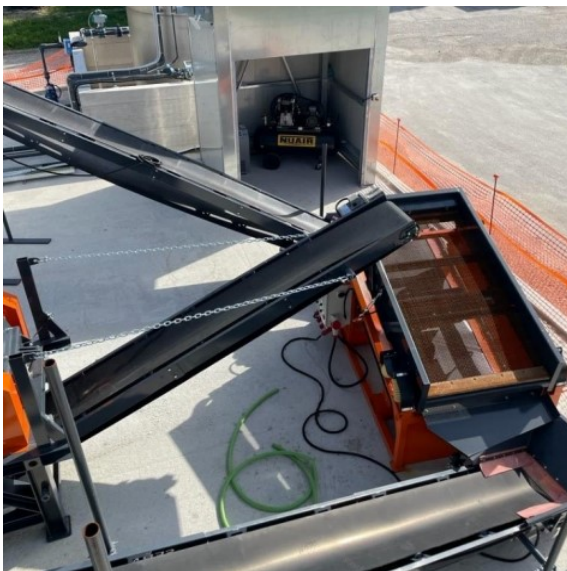


Figura 7- Particolare dell'impianto di trattamento: sezione di grigliatura e vasca di raccolta del sopravaglio.

Riferimenti bibliografici

F.A. Santagata et al. (2016). Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.1: Progettazione - Cap.5: Geotecnica stradale.

F.A. Santagata et al. (2016). Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.2: Costruzione, gestione e manutenzione – Cap 9: Costruzione del corpo stradale.

M. Budhu (2000). Soil mechanics and foundations, Third edition, John Wiley & sons, inc.

M. Collepari, S. Collepari, R. Troli (2014). Il nuovo calcestruzzo. Sesta edizione

EN 14227-11: Hydraulically bound mixtures – Specifications - Part 11: Soil treated by lime.

EN 14227-15: Hydraulically bound mixtures – Specifications - Part 15 (Hydraulically stabilized soils)

UNI EN 197-1: 2011: Cemento – Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.

UNI EN 12457-2: 2004: Test di cessione.

Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia ambientale. pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96

P. Pinto, S. Al-Abed, E. Barth, C. Loftspring, J. Voit, P. Clark, A. M. Ioannides (2011). Environmental impact of the use of contaminated sediments as partial replacement of the aggregate used in road construction.

J. Limeira, L. Agullo, M. Etxeberria (2010). Dredged marine sand in concrete: An experimental section of a harbor pavement.

R. Zentar, V. Dubois, N. Abriak (2008). Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments.

C.N.R. – A. VI - N. 29 – 7 novembre 1972 – Norme sui misti cementati.

Capitolo 2. Materiali e metodi

In questo capitolo verranno descritti i materiali utilizzati e testati presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche. In seguito, saranno esposti i metodi, quindi le procedure sperimentali impiegate e infine verrà illustrato il programma sperimentale.

2.1 Materiali

2.1.1 Sedimento "trattato" ECOSEDRA

Il sedimento trattato nell'impianto ECOSEDRA è arrivato nel Laboratorio di Strade e Trasporti in secchi di plastica. In Figura 8 si può notare come il sedimento sia arrivato in zolle con una certa umidità, più o meno consistente e per questo, prima del suo utilizzo nelle varie prove e miscele, è stato essiccato in forno a una temperatura di 110°C per un giorno, oppure a 60°C per due giorni. Poi il giorno successivo si verifica l'essiccamento del materiale tramite pesate, con un intervallo di almeno un'ora l'una dall'altra, fino a che i valori non differiscono fra di loro di più dello 0,1%.



Figura 8- Sedimento "trattato" ECOSEDRA.

Dopo l'essiccamento, per essere utilizzato, il sedimento è stato sbriciolato mediante il macchinario Los Angeles (Figura 9), costituito da:

- cilindro cavo, descritto nella norma UNI EN 1097-2;

- carica di sfere, composta da 11 sfere di acciaio aventi ciascuna diametro compreso fra 45 e 49 mm. Ciascuna sfera deve avere una massa compresa fra 400g e 445g, mentre la carica deve pesare in totale fra i 4690g e i 4860g;
- motore, che impartisce al cilindro una velocità di rotazione compresa fra 31 giri/min e 33 giri/min;
- vassoio, per recuperare il materiale e la carica di sfere dopo la prova;
- contagiri, che arresti automaticamente il motore dopo il numero di giri richiesto.

Quindi, si introduce con cura nella macchina dapprima le sfere, poi il campione di prova. Si chiude il coperchio e, avviando il cilindro rotante, si fa compiere alla macchina 500 giri a velocità costante e il materiale inserito entra in collisione con le sfere di acciaio frantumandosi. Quando la macchina si ferma, aprendo il coperchio si versa l'aggregato in un vassoio collocato sotto l'apparecchiatura facendo attenzione che l'apertura si trovi esattamente sopra il vassoio per evitare perdita di materiale. Poi si pulisce il cilindro rimuovendo tutti i fini e anche il carico di sfere dal vassoio, facendo attenzione a non perdere particelle di aggregato.

In Figura 10 e 11 è riportato il sedimento dopo la frantumazione nel macchinario Los Angeles.



Figura 9- Macchinario Los Angeles per frantumazione sedimento.

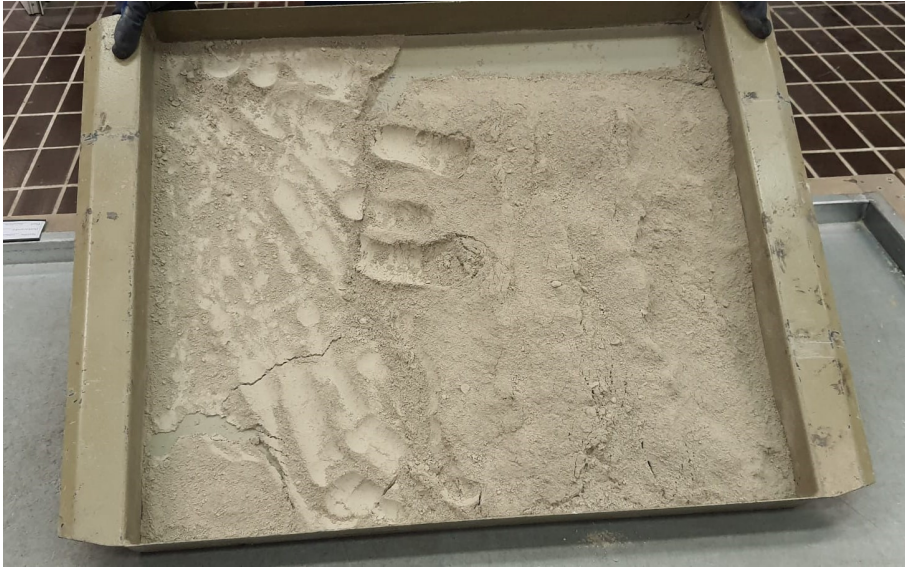


Figura 10- Sedimento in vassoio di raccolta da prova Los Angeles.

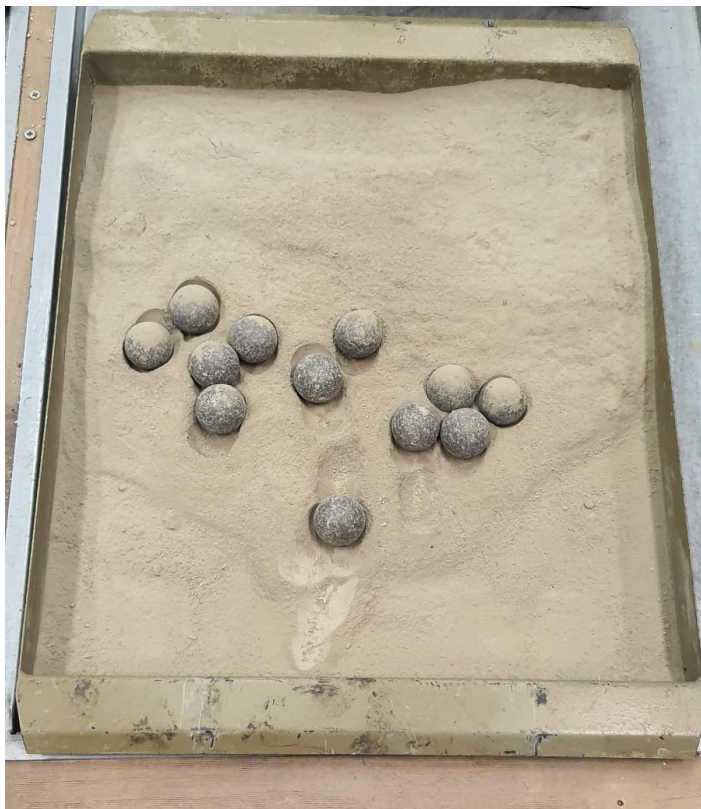


Figura 11- Sedimento nel vassoio di raccolta con sfere di acciaio da prova Los Angeles.

In Figura 12 viene illustrato il grafico relativo al limite liquido (LL) del sedimento studiato in laboratorio, mentre in Tabella 5 sono riportati i risultati dei limiti di Atterberg, la cui procedura verrà spiegata in dettaglio nel paragrafo 2.2.3.

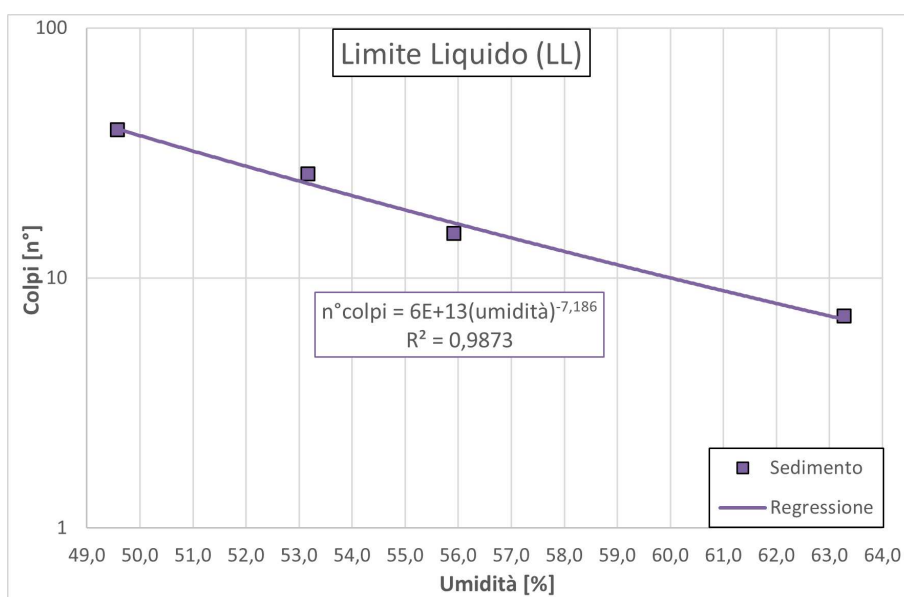


Figura 12- Grafico limite liquido sedimento.

| | |
|--------------------------|-------|
| Limite liquido (%) | 52,83 |
| Limite plastico (%) | 34,50 |
| Indice di plasticità (%) | 18,30 |

Tabella 5- Risultati limiti di Atterberg su sedimento ECOSEDRA.

2.1.2 Misto granulare

Il misto granulare per questo progetto è stato fornito da FIORI COSTRUZIONI S.r.l. ed è arrivato in laboratorio in una decina di sacchi da circa 25 kg ciascuno. Dai singoli sacchi questo materiale è stato poi steso sul banco di lavoro e, essendo umido, è stato messo ad asciugare in forno a 110°C per un giorno, prima di poter essere utilizzato nella sperimentazione. Come per il sedimento ECOSEDRA, anche in questo caso il giorno seguente si è verificata la perdita di acqua tramite pesate con la bilancia.

In Figura 13 è rappresentato il misto granulare umido messo a confronto con quello secco, entrambi sul piano di lavoro.



Figura 13- Misto granulare umido e secco.

In più, con la Figura 14 si vuole sottolineare che questo non è un materiale plastico. Infatti, dalla procedura per ricavare il limite plastico (che verrà spiegata nel paragrafo 2.2.3), umidificando con acqua una porzione di fino ricavata dal misto granulare, non si riesce a modellarla in alcun modo per creare un bastoncino su di una tavoletta di materiale assorbente. Da ciò si deduce che non è plastico.



Figura 14- Procedura per ricavare limite plastico del misto granulare.

Si riportano infine, in Figura 15 e 16, i risultati dell'analisi granulometrica eseguita sul misto granulare, la cui procedura verrà esplicitata nella descrizione dei metodi, in particolare nel paragrafo 2.2.1.

In Figura 15 è rappresentata la curva granulometrica del misto granulare della sperimentazione chiamato M0 che, come indicato nella norma CNR n.29 sui misti cementati, deve rientrare all'interno di fusi granulometrici, in questo caso si è scelto il fuso denominato A1.

In aggiunta a questo, in Figura 16 si mette a confronto la curva granulometrica M0 con altre due curve riguardanti le miscele M1 (M0 con l'aggiunta del 10% di sedimento) e M2 (M0 con l'aggiunta del 20% di sedimento). Inoltre, è presente nel grafico anche la curva di Fuller, cioè una curva granulometrica che caratterizza la massima compattezza di un aggregato. Essa si usa come metodo empirico, ma efficace, per determinare il rapporto fra le differenti frazioni granulometriche degli aggregati a disposizione e per realizzare un conglomerato con la massima densità possibile, cioè con il minor contenuto di vuoti interstiziali tra i singoli grani. In questo caso si è preso in considerazione una curva di Fuller partendo da una dimensione massima degli

aggregati di 20 mm, essendo questa una dimensione massima rappresentativa per le miscele studiate.

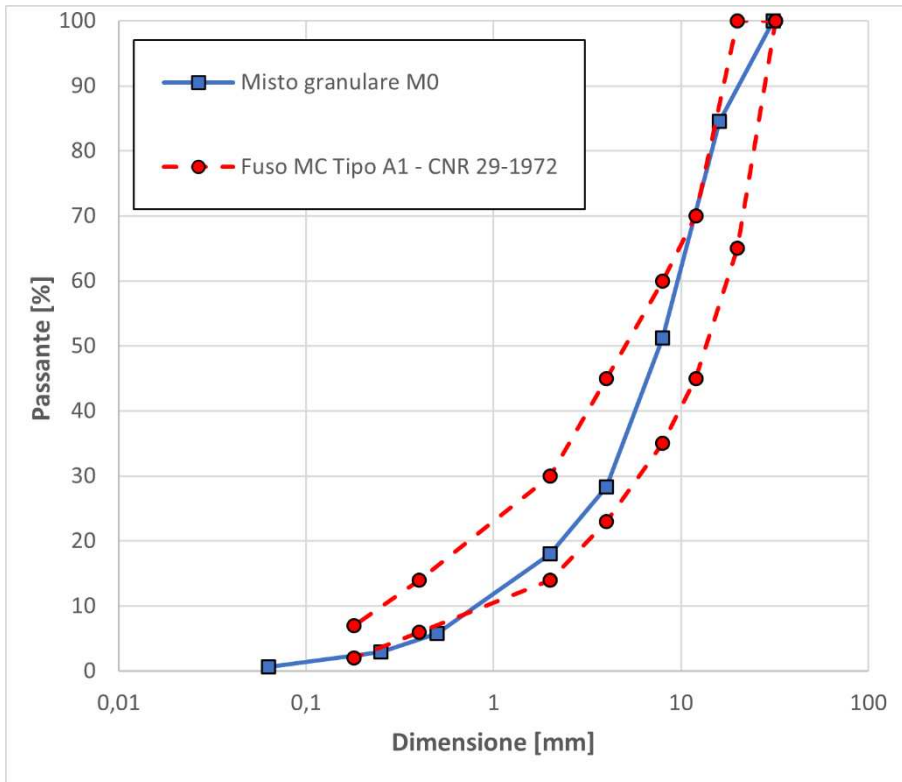


Figura 15- Analisi granulometrica M0 con fuso granulometrico A1 da norma CNR n.29.

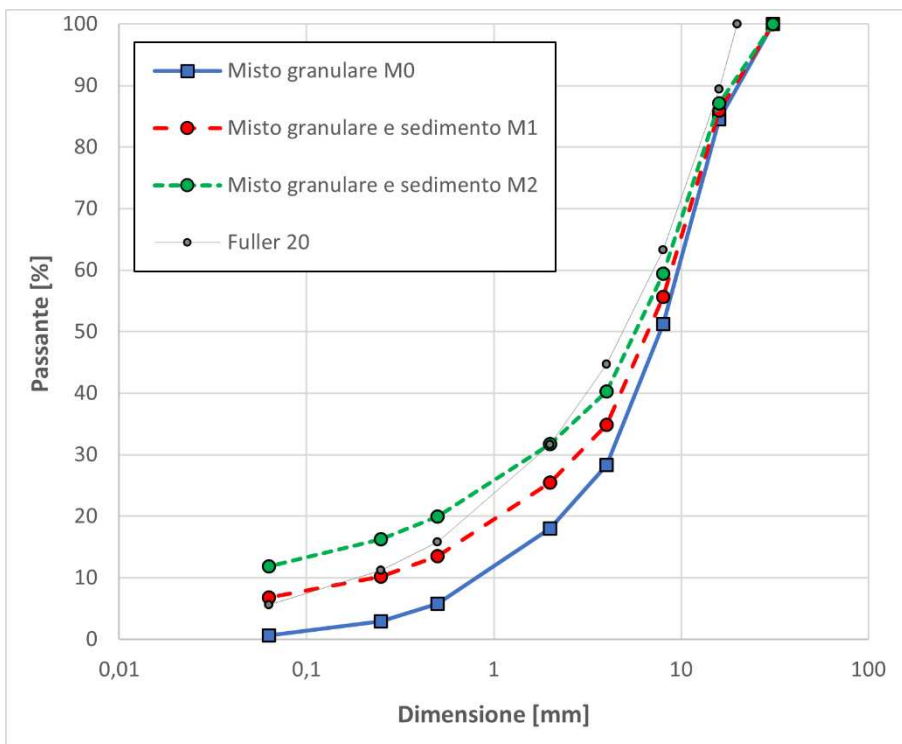
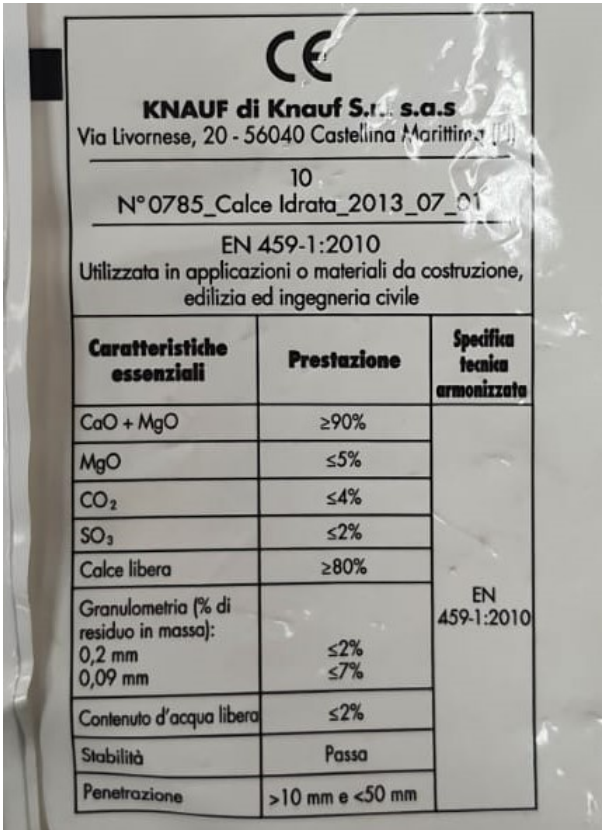


Figura 16- Curve granulometriche M0, M1 e M2 con l'aggiunta di una curva di Fuller.

2.1.3 Calce

La calce utilizzata è calce idrata essendo migliore per la sicurezza rispetto alla calce viva. In Figura 17 viene riportata l'etichetta della confezione di calce con le caratteristiche di tipo chimico e fisico.



CE

KNAUF di Knauf S.r.l. s.a.s
Via Livornese, 20 - 56040 Castellina Marittima (LI)

10
N° 0785_Calce Idrata_2013_07_01

EN 459-1:2010
Utilizzata in applicazioni o materiali da costruzione,
edilizia ed ingegneria civile

| Caratteristiche essenziali | Prestazione | Specifici tecnici armonizzati |
|--|-----------------|-------------------------------|
| CaO + MgO | ≥90% | EN 459-1:2010 |
| MgO | ≤5% | |
| CO ₂ | ≤4% | |
| SO ₃ | ≤2% | |
| Calce libera | ≥80% | |
| Granulometria (% di residuo in massa): 0,2 mm | ≤2% | |
| 0,09 mm | ≤7% | |
| Contenuto d'acqua libera | ≤2% | |
| Stabilità | Passa | |
| Penetrazione | >10 mm e <50 mm | |

Figura 17- Prestazioni della calce riportate nel sacco commerciale.

2.1.4 Cemento

Il cemento utilizzato è il cemento Portland alla pozzolana tipo II/B-P. La classe di resistenza del cemento è 32.5R, in particolare sono garantite le seguenti prestazioni meccaniche:

- resistenza iniziale a 2 giorni ≥ 10 MPa;
- resistenza normalizzata a 28 giorni ≥ 32,5 MPa.

Si riporta in Figura 18 la marcatura CE con le caratteristiche del cemento presenti nel sacco commerciale.

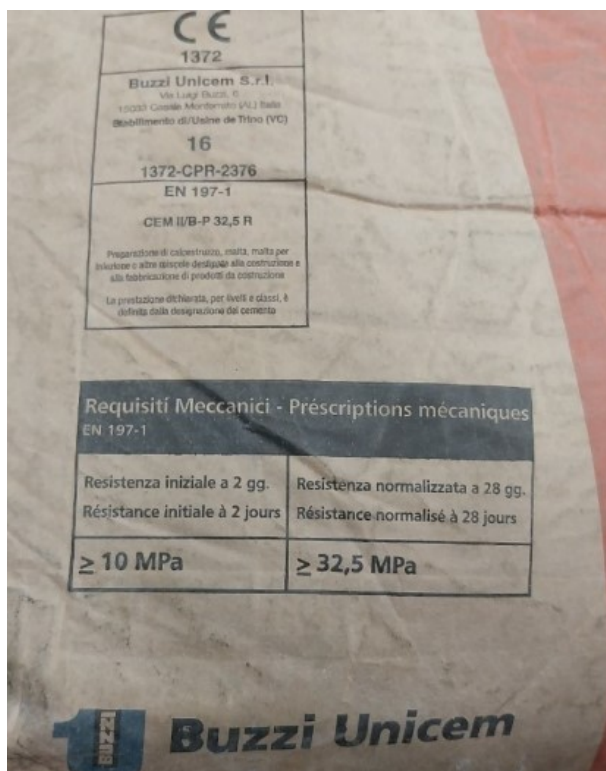


Figura 18- Caratteristiche del cemento riportate nel sacco commerciale.

2.2 Metodi

2.2.1 Analisi granulometrica

Studiare la granulometria di un materiale significa definire le dimensioni delle particelle che lo compongono e classificarle. Questa prova si divide in analisi della frazione grossolana ($> 63 \mu\text{m}$), con separazione meccanica tramite setacciatura oppure analisi strumentale, e analisi della frazione fine ($< 63 \mu\text{m}$) tramite metodi come sedimentazione o diffrazione laser. Per questa tesi si è fatta un'analisi granulometrica del misto granulare, basandosi sul procedimento descritto nelle norme tecniche UNI EN 932-2 e UNI EN 933-1.

Per la prova si utilizzano: una bilancia, una sessola, una spatola, delle teglie, un forno, dei setacci, il vibrovaglio.

Inizialmente si asciuga il misto granulare umido proveniente dai sacchi arrivati in laboratorio, ponendolo su teglie con una sessola e lasciandolo in forno a una temperatura di 110°C per un giorno.

Il giorno seguente, verificato l'essiccamento del materiale con pesate sulla bilancia, il misto granulare si stende sul piano di lavoro e si attua la cosiddetta "quartatura", un

metodo per ridurre il materiale ad una quantità giusta per l'analisi, senza comprometterne l'omogeneità e la rappresentatività. La quartatura si effettua mescolando il materiale e disponendolo in una forma tronco-conica. Sulla parte superiore si delineano due segmenti perpendicolari tra loro, che dividono il campione in quattro porzioni uguali. Con una spatola si dividono i quarti in modo netto; in seguito, due quarti opposti tra loro vengono scartati. Con i due quarti rimasti si ripete l'operazione finché la porzione rimanente risulti di peso idoneo per eseguire la prova granulometrica.

In Tabella 6 si specifica la massa della porzione di prova che, come sancisce la norma UNI EN 933-1, dipende dalla dimensione massima dell'aggregato. In questo specifico caso, come si può notare in Figura 19, si è diviso il materiale in cinque campioni rappresentativi, di cui uno è stato utilizzato per l'analisi granulometrica, dividendolo in due parti per facilitare la setacciatura.

| Dimensione massima dell'aggregato D (mm) | Massa della porzione di prova (minimo) (kg) |
|--|---|
| 90 | 80 |
| 63 | 40 |
| 32 | 10 |
| 16 | 2,6 |
| 8 | 0,6 |
| ≥ 4 | 0,2 |

Tabella 6- Massa della porzione di prova a seconda della dimensione massima dell'aggregato.



Figura 19- Divisione del materiale in cinque campioni rappresentativi.

Per la setacciatura occorre predisporre una pila di setacci posti dall'alto verso il basso con dimensioni decrescenti. I setacci utilizzati sono dotati di aperture quadrate, come

è d'uso attuale nell'ingegneria stradale; tali aperture seguono delle dimensioni standard. Questi servono per descrivere la distribuzione granulometrica di un materiale delle dimensioni comprese tra 125 mm e 0,063 mm. I setacci usati principalmente in Italia sono: setacci della serie americana ASTM e della serie ISO 565-ISO 3310. In particolare, la denominazione dei setacci della serie ASTM ha questo significato: per i setacci con la dimensione delle aperture maggiore di 5 mm la denominazione è data dalla dimensione della luce netta della maglia espressa in pollici; per i setacci con la dimensione delle aperture inferiore a 5 mm la denominazione è data dal numero presente di maglie in un pollice quadro.

La pila di setacci utilizzata in laboratorio (Figura 20) è costituita dall'alto verso il basso da:

- setaccio da 31 mm;
- setaccio da 16 mm;
- setaccio da 8 mm;
- setaccio da 4 mm;
- setaccio da 2 mm;
- setaccio da 0,5 mm;
- setaccio da 0,063 mm;
- recipiente di fondo.

Viene versato il materiale di prova nella pila di setacci, poi si mette un coperchio in cima in modo da non disperdere il materiale nelle fasi successive. L'operazione seguente è la vagliatura: si agita la pila o manualmente o meccanicamente con un vibrovaglio. In laboratorio è stato usato il vibrovaglio (Figura 21) che è costituito da: un motore per l'agitazione meccanica della pila, una guida verticale, una ganascia che scorre lungo la guida e che va agganciata al coperchio di una pila di setacci in modo da tenerli fermi durante l'agitazione meccanica, una base con cavità su cui appoggiare la pila di setacci e bulloni della ganascia che vengono regolati per bloccarne lo scorrimento lungo la guida.

La pila di setacci viene fatta incastrare tra la base del vibrovaglio e la ganascia, dopodiché si accende il motore mettendo così in moto il vibrovaglio. Dopo 5 minuti, il motore può essere spento. Poi si allentano i bulloni e si solleva la ganascia per togliere la pila dal macchinario. L'ultimo passaggio è la pesatura dei setacci. In laboratorio è stata messa sulla bilancia una teglia, in cui poi è stato versato il materiale di ogni

setaccio ed è stato registrato su una tabella il peso del materiale trattenuto parziale in grammi di ogni setaccio (R_i).

Si ricavano le seguenti grandezze:

- **trattenuto parziale (%)**: rapporto percentuale tra il peso del trattenuto nell' i -esimo setaccio R_i e la massa essiccata della porzione di prova M_1 : $(R_i/M_1) \times 100$;
- **trattenuto cumulativo (%)**: somma del trattenuto parziale del setaccio i -esimo più il trattenuto parziale dei setacci precedenti;
- **passante (%)**: si calcola con la differenza: $100 - \text{trattenuto cumulativo dell}'i\text{-esimo setaccio}$.

In seguito, si costruisce la curva granulometrica che riporta in ascissa le dimensioni delle particelle in scala logaritmica e in ordinata il passante percentuale. Infine, come già anticipato nel paragrafo 2.1.2, si possono mettere a confronto più curve corrispondenti a diverse miscele e si può inserire nel grafico anche la curva di Fuller per caratterizzare la massima compattezza di un aggregato.



Figura 20- Esempio pila di setacci di laboratorio. Figura 21- Vibrovaglio con pila di setacci applicata.

2.2.2 Stabilizzazione a calce

La stabilizzazione a calce, in particolare tra il sedimento ECOSEDRA e la calce è stata eseguita in questo progetto con due finalità: nello studio dei limiti di Atterberg sul sedimento miscelato con differenti percentuali di calce e acqua e nella creazione delle diverse miscele in laboratorio che comprendono l'utilizzo di sedimento stabilizzato, acqua, misto granulare e cemento.

Per la miscelazione sedimento-calce è stata seguita la procedura indicata nella norma ASTM D3551-17 ed è stato utilizzato un miscelatore meccanico (Figura 22), una spatola, una ciotola e una bilancia.

In particolare, nella creazione delle miscele il sedimento, una volta che è stato essiccato in forno a 110°C per un giorno e sbriciolato nel macchinario Los Angeles, si umidifica con acqua (si è scelto di aggiungere il 20% di acqua in peso rispetto al peso netto del sedimento utilizzato) e si mescola con una spatola in una teglia. Successivamente si pesa la quantità necessaria di calce posta in una coppetta sulla bilancia. In Figura 23 sono riportati il sedimento umidificato nella teglia e la calce per la stabilizzazione. In seguito, come si può osservare in Figura 24, si versa nella ciotola del miscelatore una quantità pari alla metà del sedimento umidificato e della calce, si avvia il miscelatore per qualche minuto, il quale consente anche la regolazione della frequenza di giri, fino a che l'impasto risulta visivamente omogeneo. Dopo ogni miscelazione meccanica si raschia con una spatola il materiale incrostato sul fondo della ciotola per recuperarne il più possibile.

Si ripete la procedura per l'altra metà dei materiali e infine si copre con una pellicola di plastica il sedimento stabilizzato a calce sulla teglia lasciandolo reagire per un giorno, raggiungendo così la maturazione necessaria per poter essere impiegato nella creazione di miscele con cemento e misto granulare.



Figura 22- Miscelatore meccanico utilizzato.



Figura 23- Teglia con sedimento umidificato e coppetta con calce.



Figura 24- Aggiunta di calce al sedimento umidificato.

2.2.3 Limiti di Atterberg

Lo stato fisico di una terra fine può variare da liquido, a plastico, a semi-solido, a solido in funzione del contenuto d'acqua in essa presente. In tal senso, la progressiva diminuzione dell'acqua produce un incremento di consistenza e, fino a uno specifico contenuto di umidità, una corrispondente diminuzione di volume. Per individuare i differenti stati del terreno si definiscono i limiti di consistenza, o limiti di Atterberg, che segnano, convenzionalmente, il passaggio da uno stato all'altro. Un terreno fine, in particolare argilloso, a elevato contenuto di acqua è caratterizzato da una consistenza paragonabile a quella di un fluido viscoso e pertanto si trova allo stato liquido.

Riducendo progressivamente il suo contenuto d'acqua, esso assume lo stato plastico nel quale può essere modellato senza che presenti fessure, mantenendo la forma che gli è stata assegnata. Il tenore d'acqua che segna il passaggio tra lo stato liquido e quello plastico è detto limite di liquidità o limite liquido (w_L) (Santagata 2016).

Continuando a ridurre il contenuto d'acqua, il carattere plastico scompare e l'argilla perde le sue facoltà di coesione plastica, diventando fragile. Il tenore in acqua corrispondente a tale passaggio di stato è detto limite di plasticità o limite plastico (w_P). Riducendo ulteriormente il contenuto d'acqua al di sotto del limite di plasticità, il

volume del terreno continua a diminuire, fino a che un'ulteriore diminuzione di tenore d'acqua non comporta altra diminuzione di volume. Il tenore d'acqua al di sotto del quale si ha riduzione d'umidità senza variazione di volume è detto limite di ritiro (w_R). Il passaggio da uno stato all'altro non avviene bruscamente, in corrispondenza di uno specifico tenore d'acqua, ma in maniera progressiva in un intervallo di contenuti d'acqua piuttosto ampio (Santagata 2016).

I limiti di Atterberg vengono eseguiti sulle terre fini, in particolare la frazione di terra di dimensioni inferiori a 0,42 mm (passante al setaccio 40 della serie ASTM), e sono tra i principali criteri per identificare le terre. Il contenuto d'acqua è definito come:

$w = M_w/M_s \times 100$ dove M_w è la massa dell'acqua e M_s è la massa del terreno secco.

Per gli scopi della presente tesi sono d'interesse solo il limite liquido e il limite plastico. Viene determinato anche è l'indice di plasticità (IP) che permette di definire l'ampiezza dell'intervallo dei contenuti d'acqua che caratterizza lo stato plastico del terreno. IP è dato dalla differenza tra il limite liquido e il limite plastico:

$$IP = w_L - w_P$$

Il materiale da sottoporre alla prova, ovvero il sedimento ECOSEDRA, viene posto in delle ciotole (circa 100 g in ognuna), in questo caso quattro, alle quali viene aggiunto un quantitativo di acqua in modo da raggiungere una consistenza liquida viscosa. Vengono aggiunte poi differenti percentuali di calce in tre di queste ciotole, mescolando con una spatola, per poter studiare come varia il materiale di partenza con la stabilizzazione e per individuare infine il contenuto di calce più adatto per la creazione di miscele. Nel caso in cui, dopo aver aggiunto la calce, ci sia troppo materiale secco si aggiunge un altro quantitativo di acqua per tornare alla consistenza adeguata. Dopo aver coperto con pellicola e fatto reagire la calce per un giorno, il materiale è pronto per la prova. In Figura 25 sono riportate tre ciotole con all'interno il sedimento di prova in differenti stadi di preparazione: a sinistra è presente il sedimento di partenza, al centro il sedimento umidificato con acqua a cui è stata aggiunta una percentuale di calce, a destra il materiale stabilizzato a cui è stata aggiunta un ulteriore quantitativo di acqua.



Figura 25- Stadi della preparazione del sedimento ai limiti di consistenza.

2.2.3.1 Limite liquido

Il limite liquido viene tradizionalmente determinato mediante il cucchiaio di Casagrande nel rispetto della procedura standardizzata ASTM D4318-00.

Viene utilizzato nella prova anche una spatola di dimensioni standard, ovvero uno strumento in plastica o in metallo non corrosivo, con una punta di larghezza 2 mm e altezza 8 mm. In particolare, il cucchiaio è una coppa di ottone sospesa e fissata tramite un perno facilmente rimovibile all'apparecchiatura che funge da cerniera. Sotto il cucchiaio è disposta una base di gomma dura e l'azionamento del cucchiaio può essere a manovella o a motore. L'altezza di caduta del cucchiaio può essere modificata agendo su una rotella dell'apparecchio e si può eseguire la calibrazione mettendo un blocchetto in metallo di altezza 10 mm oppure il retro della spatola standardizzata sotto il cucchiaio in corrispondenza del punto di contatto con la base. La calibratura va eseguita prima di iniziare ogni prova. Per realizzare la prova si preparano almeno 6 coppette che verranno inizialmente pesate con la bilancia (tara). Il materiale oggetto della prova viene messo su una lastra di vetro, viene mescolato con una spatola in modo da fargli perdere umidità (Figura 26) e poi una parte di esso viene spianata sul cucchiaio, evitando che si formino bolle nell'impasto. Dopodiché, come si può osservare in Figura 27, si pratica nella zona centrale con la spatola standard un solco e girando la manovella o azionando il motore, il cucchiaio viene lasciato cadere ripetutamente a frequenze di circa 2 colpi al secondo. Il numero di colpi viene registrato da un contatore incorporato all'apparecchio di prova. Si registra il numero di colpi necessario a chiudere il solco, cioè affinché le due pareti si tocchino (Figura 28). Viene poi prelevato il materiale in corrispondenza della chiusura del solco e messo in una coppetta, come riportato in Figura 29. Il provino viene pesato e successivamente messo in forno a 105°C per 24 ore. Si ripete la procedura altre volte diminuendo ad ogni prova il contenuto d'acqua e in totale vengono effettuate almeno 4 prove. Trascorse le 24 ore i provini vengono ripesati in modo da poter determinare il contenuto d'acqua in percentuale w%):

$$w(\%) = \frac{\text{Peso netto umido} - \text{Peso netto secco}}{\text{Peso netto secco}} \times 100$$

Si ottengono quindi almeno 4 coppie di valori numero di colpi-contenuto d'acqua. I valori di contenuto d'acqua in funzione del numero di colpi vengono riportati in un diagramma semi-logaritmico, detto curva di liquidità (Figura 30). Per convenzione il limite liquido è il contenuto d'acqua necessario a chiudere il solco per una lunghezza di 13 mm con 25 colpi. Questo valore si ottiene nel diagramma per interpolazione.



Figura 26- Mescolamento di sedimento con spatola su lastra di vetro.



Figura 27- Utilizzo della spatola standardizzata per creare il solco nel cucchiaino di Casagrande

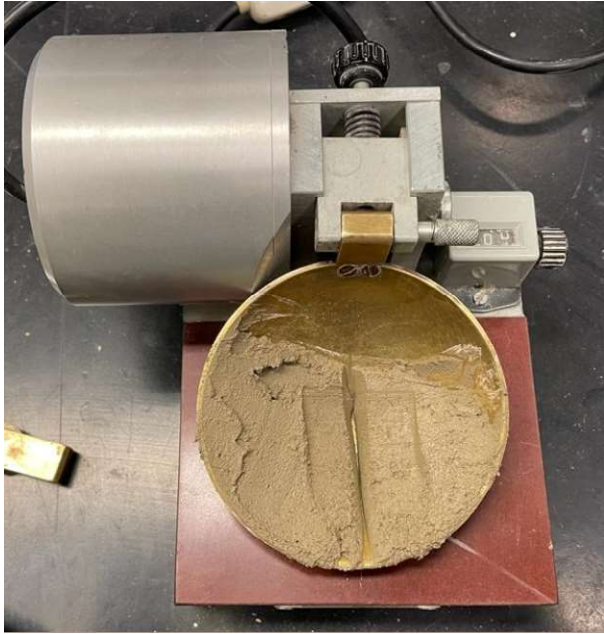


Figura 28- Materiale nel cucchiaio di Casagrande con chiusura del solco.



Figura 29- (a) Prelevamento del materiale dal centro del cucchiaio di Casagrande; (b) Materiale inserito in una coppetta.

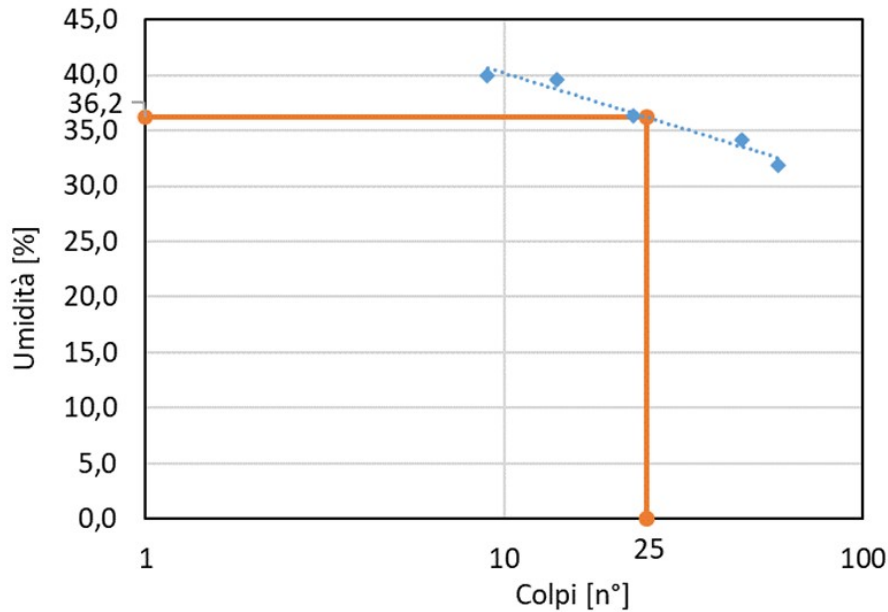


Figura 30- Esempio curva di liquidità secondo Casagrande.

2.2.3.2 Limite plastico

Il limite plastico è stato ottenuto seguendo la norma CEN ISO/TS 17892-12. Si ottiene prelevando circa 20 g dall'impasto di terreno usato per determinare il limite liquido. Da questo provino si realizzano due campioni da 10 g e per ognuno si eseguono le operazioni descritte in seguito. Si modella il terreno tra le dita per distribuire uniformemente l'umidità. Successivamente viene modellato in un bastoncino di circa 6 mm. Poi, come riportato in Figura 31, il bastoncino viene fatto rotolare continuamente su una lastra di materiale poroso per permettere al materiale di perdere progressivamente acqua; in laboratorio è stata usata una tavoletta di sughero. Si può usare un bastoncino campione come riferimento per le dimensioni geometriche del bastoncino di terreno, che deve avere un diametro di circa 3 mm. Il bastoncino da 3 mm di diametro viene fatto rotolare finché non inizia a fessurarsi sia longitudinalmente sia trasversalmente. Poi viene pesato e successivamente messo in forno a 105°C per 24 ore. La stessa procedura si ripete per l'altro campione. Trascorse le 24 ore i campioni vengono ripesati in modo da poter determinare il contenuto d'acqua in percentuale w (%). Il limite plastico è la media dei valori di contenuto d'acqua dei due campioni.

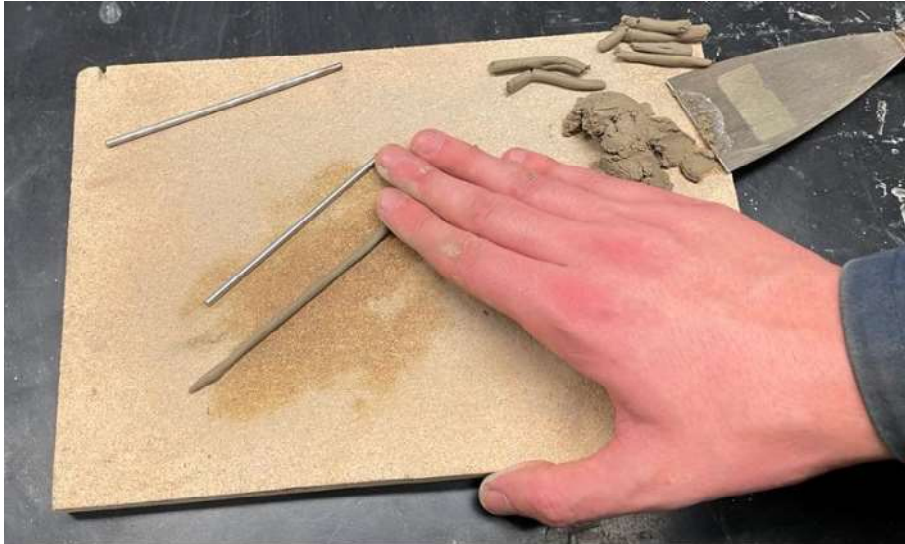


Figura 31- Creazione bastoncino di materiale su tavoletta di sughero per la determinazione del limite plastico.

2.2.4 Miscelazione e stabilizzazione a cemento

Per questa tesi è stata utilizzata la miscelazione e stabilizzazione a cemento per la creazione dei misti cementati con cui si creano provini sottoposti poi a prove meccaniche. Per la miscelazione è stato usato un miscelatore di grandi dimensioni (Figura 32). Esso comprende un piano per incastrare la base del secchio in cui viene messo l'impasto e un motore con pale rotanti.

Per la creazione delle diverse miscele sono stati aggiunti nel secchio del miscelatore in ordine: misto granulare umidificato con il 2% di acqua (acqua di assorbimento), sedimento stabilizzato a calce e umidificato con il 20% di acqua, la restante acqua necessaria e il cemento, la cui percentuale varia a seconda della miscela. Per quanto riguarda gli ultimi due ingredienti citati, essi sono stati aggiunti poco per volta tramite i fori a forma di cerchio del miscelatore. Dopo la miscelazione, il materiale è pronto per essere compattato per creare i provini tramite compattazione Proctor.



Figura 32- Planetaria utilizzata nella creazione delle varie miscele.

2.2.5 Compattazione Proctor

Il costipamento di una terra consiste nella determinazione della massima massa volumica del secco, ottenuta mediante costipamento meccanico effettuato con modalità normalizzate. La costipazione Proctor è il tipo di stabilizzazione meccanica utilizzata per i terreni e consiste nell'addensamento di questi ultimi mediante applicazione di forze esterne. Con l'addensamento si migliorano le prestazioni meccaniche (resistenza a taglio e portanza) dei terreni. Per ottenere il maggiore addensamento dal costipamento occorre un determinato contenuto d'acqua, detto ottimale. Sono state svolte le prove di compattazione Proctor seguendo le norme UNI EN 13286-2 e C.N.R. N° 69.

Per la prova vengono utilizzate delle fustelle, fornite di base e di collare di prolunga. Sono disponibili tre tipi di fustelle con dimensioni diverse: A, B e C. La scelta dipende dalla distribuzione granulometrica del campione: terre prevalentemente a grana fine in fustelle di tipo A, terre prevalentemente granulari in fustelle di tipo C, terre con distribuzione granulometrica intermedia in fustelle di tipo B.

Nella prova per la compattazione del materiale si utilizza un pestello con un determinato peso, una certa altezza di caduta e un determinato numero di strati di materiale da aggiungere. Il pestello può essere manuale o meccanico. In laboratorio è stato eseguito il costipamento meccanico con il macchinario di Figura 33. Ci sono due tipologie di prova, cioè Proctor normale o standard e Proctor modificata. In generale le prove normali vengono utilizzate per lo studio dei rilevati, mentre la prova Proctor modificata per lo studio dei terreni di sottofondo.

Secondo la norma C.N.R. N° 69 il campione di terra da provare viene preventivamente essiccato all'aria, oppure in forno a una temperatura non maggiore di 50° C, per poi essere disgregato e vagliato al crivello 25 UNI 2334. La prova viene eseguita se il trattenuto al suddetto crivello non supera il 35% della massa totale. La norma consiglia di preparare un campione di terra preferibilmente da cinque provini. Il peso di tali provini dipende dalla loro distribuzione granulometrica: secondo la norma UNI EN 13286-2, il provino che passa totalmente al setaccio da 16 mm può essere di 2,5 kg o di 6 kg; il provino che non passa totalmente al setaccio da 16 mm è di 6 kg. Prima di venire introdotti nella fustella, i provini precedentemente umidificati devono essere lasciati riposare in recipienti a tenuta d'aria per almeno dodici ore per consentire una distribuzione uniforme dell'acqua nel loro interno.

Una volta che è pronto il materiale da costipare, si tara la fustella, la si aggancia alla base e al collare e la si posiziona nel macchinario, fissandola con delle viti. La macchina di prova ha un contatore di colpi del pestello, che può essere regolato a seconda della prova da effettuare. In Figura 34 si riporta il contatore con i vari comandi. Se si vuole impostare un certo numero di colpi, prima si azzerà il contatore con il tasto rettangolare rosso a sinistra dei numeri, poi spingendo verso il basso il tasto rettangolare nero con disegnata una freccia si sblocca l'opzione di cambio del numero di colpi, impostabili con i tasti neri posti in orizzontale. Fissato il numero di colpi, si carica con una sessola un primo strato di materiale nella fustella e si fa partire la macchina di prova con il tasto nero con scritto a fianco "marcia". Una volta che il contatore di colpi è arrivato al numero massimo impostato il macchinario si ferma e si riposiziona il pestello alla giusta altezza grazie ad una leva collegata ad una cinghia.

In seguito, si aggiunge il secondo strato di materiale e si fa ripartire la prova fino all'ultimo strato (varia a seconda se Proctor standard o modificata) in cui il materiale deve sfiorare il bordo della fustella andando a confinare con il collare.

In generale i colpi del pestello devono essere ripartiti su tutta la superficie dello strato in modo da ottenere una compattazione più uniforme possibile. Utilizzando il compattatore meccanico i colpi del pestello sono ripartiti in modo automatico, in quanto il basamento sopra il quale viene messa la fustella ruota automaticamente a intervalli regolari durante la prova, mentre il pestello cade a frequenza costante

rimanendo sul piano. Terminato il costipamento viene rimosso il collare di prolunga e con un coltello si livella la superficie fino a raggiungere l'orlo della fustella (si termina il livellamento quando il coltello arriva a toccare la superficie di metallo della fustella) (Figura 35). Nel caso in cui il materiale è granulare, durante l'operazione di raschiatura rimangono buchi sulla superficie che occorre coprire con materiale di granulometria fine. Poi con un pennello si puliscono dalla terra le superfici della fustella e della base e viene in seguito pesata la fustella con il materiale all'interno, così che per differenza si conosce la massa del provino compattato.



Figura 33- Compattatore meccanico Proctor.



Figura 34- Pulsanti compattatore Proctor.



Figura 35- Livellamento della superficie della fustella.

Per questa tesi per la compattazione dei provini è stata utilizzata la prova Proctor modificata con fustella di tipo B che ha le seguenti caratteristiche (norma C.N.R. N° 69):

- diametro della fustella: 150 mm;
- altezza della fustella: 120 mm;
- volume della fustella: 2125 cm³;
- massa del pestello: 4,50 kg;
- altezza di caduta del pestello: 457 mm;
- numero degli strati: 5;
- numero dei colpi per strato: 56.

In Figura 36 si può osservare il costipatore Proctor in funzione senza coperchio frontale, così da mostrare la caduta del pestello sul materiale contenuto in una fustella tipo B.

Questa tipologia di compattazione è stata utilizzata per l'individuazione del contenuto ottimo di acqua da aggiungere nella creazione delle diverse miscele. In particolare, il contenuto d'acqua di un provino di materiale dopo la compattazione si ricava con la seguente procedura: si estrae il provino dalla fustella con un estrusore (Figura 37), poi si posiziona il provino su una teglia e si ricava il nucleo centrale, che è la parte più rappresentativa per quanto riguarda il contenuto d'acqua; questo nucleo viene pesato

sulla bilancia e poi messo in forno a seccare a 110°C su una teglia tarata e il giorno seguente si pesa il materiale secco e si

ricava per differenza il contenuto d'acqua perso con l'essiccamento. In questo modo si determina il contenuto d'acqua della terra, che dovrebbe essere circa uguale al contenuto d'acqua del provino iniziale.

Si determina la massa volumica del secco mediante la seguente equazione:

$$\gamma_d (\text{kN/m}^3) = \frac{m}{V (1+0,01 w)} \times 10$$

dove m è la massa del provino umido in kg, V è il volume della fustella in dm^3 e w è l'umidità percentuale effettiva (ricavata dalla porzione di terra prelevata dalla fustella).



Figura 36- Macchinario Proctor con fustella tipo B.



Figura 37- Estrusore usato per estrarre il provino.

In aggiunta, quando una terra viene costipata in laboratorio (con modalità di prova ben definite), facendo variare il contenuto d'acqua (w), quindi preparando lo stesso materiale con diversi contenuti di acqua e mantenendo costanti gli altri parametri (energia, modalità di costipamento, natura del terreno, spessori degli strati, rigidità del supporto), si osserva che la massa volumica del secco (γ_d) varia in funzione di w

descrivendo una curva dalla tipica forma “a campana”, detta curva di costipamento o curva Proctor (Figura 38). Si costruisce quindi un diagramma in cui sull’ascissa è riportato il contenuto d’acqua e sull’ordinata la massa volumica del secco. Sul diagramma si riportano le coppie di valori contenuto d’acqua-peso volumico del secco ricavate dalla prova di costipamento e si determina la curva di tendenza. Tale curva presenta un ramo ascendente (ramo secco) e un ramo discendente (ramo umido). In tali condizioni, si individua un contenuto d’acqua ottimale (w_{opt}) in corrispondenza del quale il costipamento risulta più efficace e permette di raggiungere il valore massimo della massa volumica del secco ($\gamma_{d,max}$).

Inoltre, in Figura 34 è presente anche la curva di saturazione, curva teorica in cui i vuoti d’aria del campione di terra sono completamente riempiti di acqua, dunque assenza di vuoti d’aria.

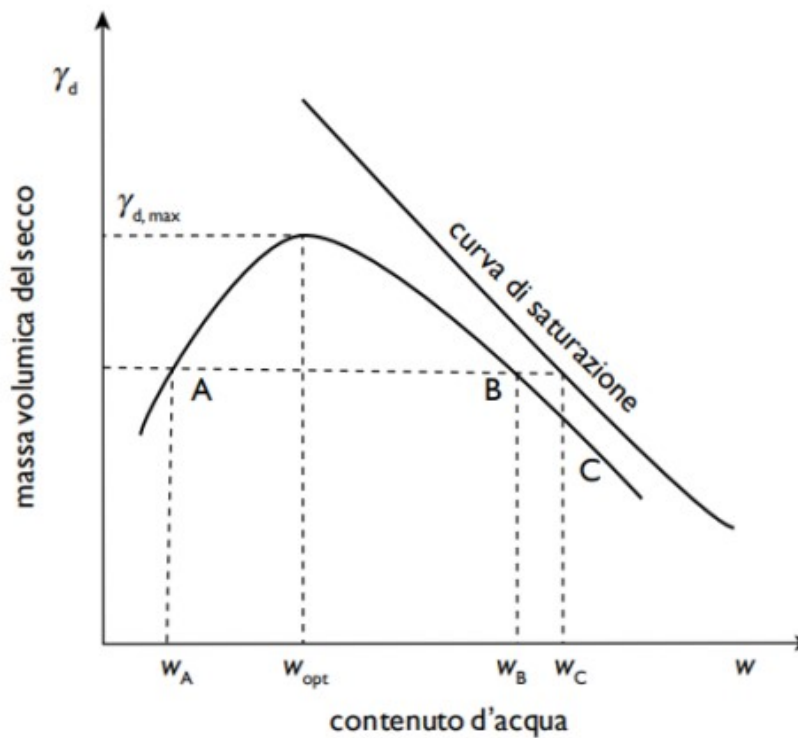


Figura 38- Esempio curva di costipamento con annessa curva di saturazione.

Per i provini di “misto cementato” utilizzati nelle prove di resistenza meccanica si adottano fustelle cilindriche di acciaio CBR provviste di base e collare di estensione come per le fustelle usate in precedenza, ma quello che cambia è l’altezza e la tipologia delle fustelle, che sono apribili tramite viti con bulloni (Figura 39).

In questo caso le caratteristiche degli strumenti per la compattazione, secondo la norma C.N.R. N° 29, sono le seguenti:

- diametro della fustella: $152,4 \pm 0,66$ mm;
- altezza della fustella: $177,8 \pm 0,46$ mm;
- massa del pestello: 4,535 kg;
- diametro del pestello: 51 mm;
- altezza di caduta del pestello: $457,2 \pm 1,3$ mm;
- numero degli strati: 5;
- numero dei colpi per strato: 85



Figura 39- Fustella CBR apribile utilizzata in laboratorio.

2.2.6 Prova CBR

Questa prova si basa sulla norma europea UNI EN 13286-47-2006 che specifica i metodi per la determinazione in laboratorio dell'indice di portanza CBR. La prova è appropriata per la parte della miscela fino a una granulometria massima di 22,4 mm. Quando l'immersione in acqua è specificata come una parte della maturazione del provino, la presente norma europea include anche la determinazione del rigonfiamento verticale del provino prima della determinazione dell'indice di portanza CBR.

L'indice di portanza CBR è un indice utilizzato per caratterizzare la capacità di portanza di una miscela, cioè la massima capacità di carico, determinato immediatamente dopo la compattazione o dopo un periodo di maturazione, ovvero un periodo di tempo e condizione di conservazione tra la fabbricazione e la sottoposizione a prova del provino.

Il principio cardine della prova è la relazione tra forza e penetrazione determinata quando un pistone cilindrico di un'area della sezione trasversale normalizzata è fatto penetrare in un provino di miscela, contenuto all'interno di uno stampo, a una data velocità. L'indice di portanza CBR immediata è calcolato esprimendo la forza sul pistone per una data penetrazione come percentuale di una forza di riferimento.

L'apparecchiatura per la fabbricazione del provino e misurazione del rigonfiamento è la seguente:

fustella CBR non apribile con appropriato collare di estensione (Figura 40), disco distanziatore con annesso un utensile a "T" utilizzato per calare il disco all'interno dello stampo (Figura 41), macchinario di compattazione Proctor, bilancia, carte da filtro grezze, raschietto, piastra di base perforata uniformemente per un minimo dell'1% della sua superficie, piastra superiore perforata in lega di alluminio con stelo regolabile per fornire l'alloggiamento per lo stelo di un comparatore a quadrante (Figura 42), treppiede con dispositivo per misurare l'espansione verticale del provino per l'indice di portanza CBR (Figura 43), con un'accuratezza di 0,05 mm, anello di sovraccarico (Figura 44) e vasca abbastanza grande da consentire l'immersione dello stampo Proctor, preferibilmente sostenuto su una piattaforma a maglie aperte.

Inoltre, l'apparecchiatura per la determinazione dell'indice di portanza CBR è la seguente:

pistone cilindrico di penetrazione con un diametro di $(50 \pm 0,5)$ mm, la cui estremità inferiore deve essere di acciaio temprato e macchina di carico con una capacità di almeno 50 kN, in grado di applicare la forza di prova al pistone a una velocità di penetrazione di $(1,27 \pm 0,20)$ mm/min. La macchina, riportata in Figura 45, deve essere dotata di un dispositivo di indicazione del carico che possa essere letto con precisione di 5 N o inferiore.



Figura 40- Fustella CBR con base e collare di estensione



Figura 41- Disco distanziatore con utensile annesso.

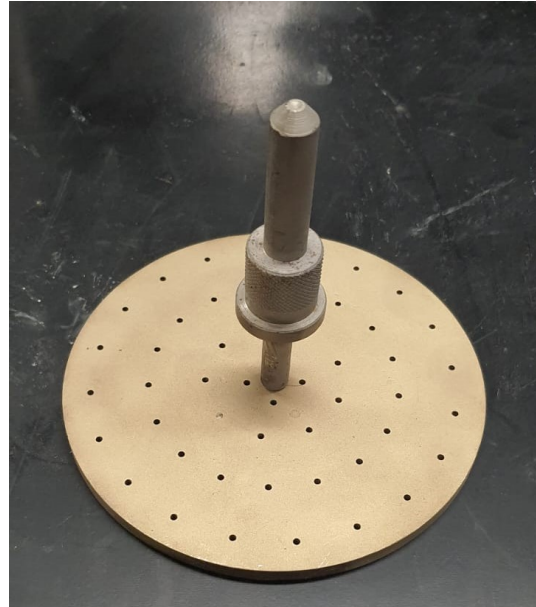


Figura 42- Piastra superiore perforata.



Figura 43- Treppiede con comparatore.



Figura 44- Anello di sovraccarico.



Figura 45- Macchinario per prova CBR.

Per quanto riguarda la fabbricazione del provino si fissa lo stampo tarato in precedenza, cui è attaccato un collare di prolunga, alla piastra di base. Si inserisce poi il disco distanziatore sulla piastra di base e si colloca un mezzo antiaderente, come una carta da filtro grezza, sopra il disco distanziatore. Il gruppo per l'indice di portanza CBR deve essere posto su un substrato solido, per esempio calcestruzzo o basamento, prima della fabbricazione del provino. Si compatta la miscela nello stampo utilizzando la prova di compattazione Proctor modificata, quindi compattando cinque strati di materiale, 56 colpi ognuno. In seguito alla compattazione, si rimuove il collare di prolunga, si livella attentamente la miscela sulla parte superiore dello stampo con il raschietto e si tappano con materiale di granulometria inferiore tutti i buchi che si sono formati sulla superficie con la rifinitura. A questo punto si rimuove la piastra di base e il disco distanziatore, viene pesato e registrato il peso lordo della

fustella. In caso di miscele che mancano di coesione, è più opportuno pesare lo stampo e la miscela con la piastra di base e il disco distanziatore montati per evitare perdite di miscela.

La fase successiva comprende l'immersione completa del provino in acqua come indicato nella norma UNI EN 13286-47-2006. Si posiziona un disco di carta da filtro grezza sulla piastra di base perforata, si inverte lo stampo contenente il provino compactato fissandolo alla piastra di base in modo che il provino sia a contatto con la carta da filtro. Si posiziona poi una carta da filtro sulla parte superiore del provino, seguita da una piastra superiore forata e dall'anello di intercapedine di sovraccarico di massa pari a 2 kg, simulando così l'effetto di una costruzione sovrapposta di 700 mm (Figura 46). Successivamente si immerge il tutto in una vasca piena d'acqua, a una temperatura di $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$, fino a un livello che consenta il libero accesso all'acqua alla parte superiore e inferiore del provino. Si monta e fissa il treppiede con annesso comparatore per misurare l'espansione verticale del provino sullo stampo e si lascia il provino immerso per almeno 96 h (Figura 47). Se richiesto, si misura l'espansione verticale a intervalli di tempo ben precisi e alla fine del periodo di immersione si rileva la misura finale di rigonfiamento. Al completamento della maturazione si rimuove prima il treppiede col comparatore e poi tutto il gruppo per l'indice di portanza CBR e si lascia scolare il provino per 15 minuti. Infine, si rimuove il disco di sovraccarico e la piastra superiore e di base perforate e si pesa la massa dello stampo e del provino.



Figura 46- Provino pronto per immersione.



Figura 47- Provino con comparatore immerso in vasca.

A questo punto si descrive il procedimento per la determinazione dell'indice di portanza CBR, attenendosi sempre alla norma UNI EN 13286-47-2006.

Innanzitutto, si collega la piastra di base allo stampo in modo tale che sia a contatto con la parte superiore originale del provino e che la faccia inferiore sia esposta e possa essere sottoposta a prova e si posiziona lo stampo sulla piastra inferiore della macchina di prova. Per la determinazione dell'indice di portanza CBR con sovraccarico, si sistema il numero richiesto di pesi di sovraccarico sul provino. Se il provino è stato immerso precedentemente, il sovraccarico deve essere uguale a quello utilizzato durante il periodo di immersione. Per impedire il sollevamento della miscela nel foro dei pesi, si colloca un solo disco di sovraccarico sulla miscela prima di alloggiare il pistone di penetrazione; quindi, si posiziona il resto dei pesi di sovraccarico. Viene fissato il comparatore a quadrante di penetrazione o dispositivo simile in posizione e si registra la lettura iniziale zero. In Figura 48 si riporta il grafico che descrive la taratura degli anelli dinamometrici della macchina di prova. A questo punto si applica il carico sul pistone in modo che la velocità di penetrazione sia di circa 1,27 mm/min. Si registrano i valori di carico a incrementi di penetrazione di 0,5 mm fino a una penetrazione totale non maggiore di 10 mm. In Figura 49 si può osservare l'impronta del pistone sul provino dopo la prova. Dopo che la prova è stata completata, si rimuove il provino dallo stampo. Fatto ciò, si determina il contenuto medio di acqua del provino. Ogni campione di contenuto d'acqua deve pesare non meno di 100 g per miscele a granulometria fine e 500 g per miscele a granulometria grossa, e deve essere determinato in conformità alla EN 1097-5. Se il campione è stato in immersione, il contenuto di acqua dopo generalmente supera il contenuto d'acqua iniziale.

L'indice di portanza CBR si ricava tramite una curva forza-penetrazione tracciando quindi ogni valore della forza sull'asse delle ordinate rispetto alla penetrazione corrispondente sull'asse delle ascisse, come osservabile in Figura 50. Dalla curva della prova si leggono le forze in kN in corrispondenza alle penetrazioni di 2,5 mm e 5 mm. Quest'ultime vengono espresse come una percentuale delle forze di riferimento in corrispondenza di queste penetrazioni, vale a dire 13,2 kN e 20 kN rispettivamente. Si prende la percentuale più alta come il valore dell'indice di portanza CBR.

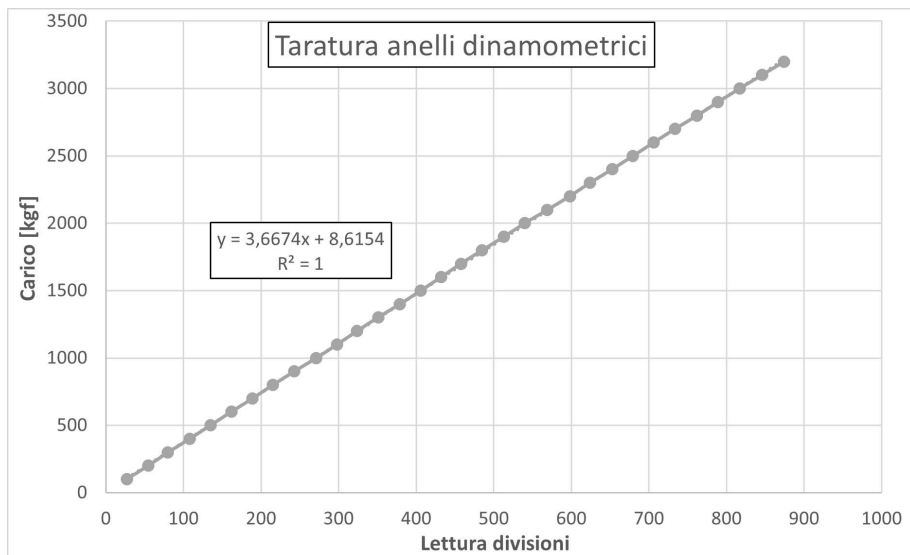


Figura 48- Grafico taratura anelli dinamometrici.



Figura 49- Provino con impronta del pistone di prova.

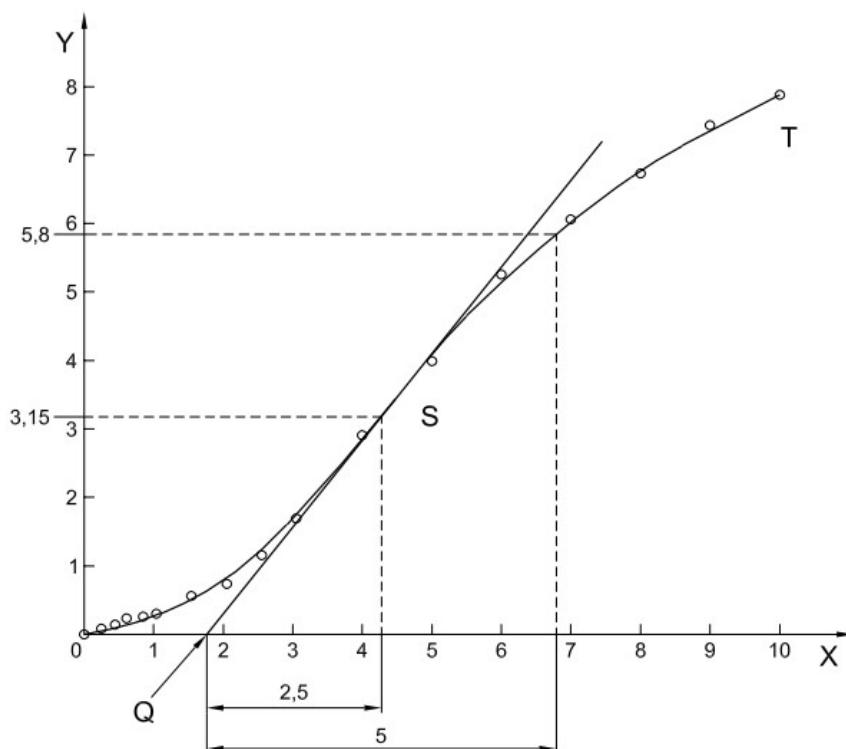


Figura 50- Esempio curva forza-penetrazione per determinare indice CBR.

2.2.7 Prova di compressione semplice (UCS)

La prova di compressione viene utilizzata per le miscele legate con leganti idraulici, in particolare con calce e cemento e consiste nel sottoporre un provino a una forza di compressione fino a raggiungere la rottura. La resistenza a compressione è la sollecitazione in corrispondenza del punto di rottura di un provino quando sottoposto a prova in compressione semplice con espansione laterale libera. Il carico massimo sostenuto dal provino è registrato e la resistenza a compressione è calcolata. Per eseguire la prova di compressione si è utilizzato per il programma sperimentale il procedimento indicato dalla norma C.N.R. N.29. Altre norme di riferimento sono: UNI EN 13286-41, ASTM D1632-17 e ASTM D1633- 17.

Sono stati sottoposti a questa prova due provini per ogni tipologia di miscela, preparati tramite miscelazione in planetaria e compattazione Proctor in fustelle CBR apribili. Terminata la compattazione è stata applicata sulla faccia superiore una boiaccia di cemento, necessaria a rendere tale superficie piana al momento dell'inserimento sotto la pressa per la prova di compressione (Figura 51). In Figura 52 e 53 si osservano quattro provini compattati prima e dopo l'applicazione della boiaccia. Le superfici superiore e inferiore del provino devono avere una tolleranza di parallelismo non

maggiore di 2 mm in 100 mm. I provini vengono conservati nelle fustelle per 24 ore, poi vengono estratti e conservati per 6 giorni a temperatura di 20°C. In Figura 54 sono riportati quattro provini che hanno terminato la maturazione e sono pronti per essere sottoposti alla prova di compressione.



Figura 51- Boiaccia di cemento da applicare sulla superficie dei provini.



Figura 52- Provini compattati.



Figura 53- Provini dopo l'applicazione della boiaccia.



Figura 54- Quattro provini pronti ad essere sottoposti alla prova di compressione.

Poi si inizia la prova di compressione con una pressa idraulica automatica del tipo Controls-Automax System V1.02 (Figura 55). Il macchinario di prova è costituito da due piastre di acciaio: piastra inferiore e piastra superiore. L'alloggiamento della piastra superiore per i provini è sferico, e deve avere un diametro superiore a quello del provino e non superiore a 150 mm. Tra le due piastre ci deve essere una distanza pari all'altezza del provino e per ottenere tale distanza si utilizzano degli spessori da alloggiare sotto la base di appoggio del provino per elevarlo in altezza, riportati in Figura 56.

Tutte le superfici portanti della macchina di prova devono essere pulite e l'eventuale graniglia sciolta o materiale estraneo devono essere rimossi dalle superfici del provino che saranno in contatto con le piastre o le piastre ausiliarie, se utilizzate. Non deve essere utilizzato alcun materiale di riempimento tra il provino e le piastre o le piastre ausiliarie. Il carico deve essere applicato in modo continuo e uniforme senza sbalzi in modo che la rottura si verifichi da 30 s a 60 s dall'inizio del caricamento. In Figura 57 si riporta un provino posizionato nella macchina di prova.

La pressa è dotata di un microprocessore che consente di gestire il menù del display e impartire i comandi. In particolare, nel display è possibile impostare il tipo di prova, di provino e le sue caratteristiche come l'area, il peso e lo sforzo unitario di compressione (gradiente). Tra le impostazioni è possibile scegliere anche l'unità di misura e il numero del test. Quando è stato dato il comando di inizio della prova, la pressa lavora con il gradiente impostato e sul display sono riportati i valori di carico massimo e di resistenza in tempo reale ed è possibile anche ottenere il grafico dell'andamento del carico nel tempo. Inizialmente il carico continua a crescere, poi, raggiunto il massimo, diminuisce. Quando il carico diminuisce si interrompe la prova e ciò significa che il provino è stato portato a rottura. In Figura 58 si osserva un provino portato a rottura. Quando si utilizzano macchine di prova a comando manuale e ci si avvicina alla rottura del provino, qualsiasi tendenza alla diminuzione della velocità di caricamento

selezionata deve essere corretta mediante regolazione appropriata dei comandi. Quando si utilizzano macchine di prova a controllo automatico, la velocità di caricamento deve essere periodicamente controllata per accertare che sia costante.

Sul display, dopo aver interrotto la prova, sarà possibile visualizzare il carico massimo e la resistenza, che viene calcolata automaticamente avendo impostato le dimensioni del provino o direttamente l'area. In particolare, per la prova di compressione si imposta uno sforzo unitario di compressione (gradiente) di 10 kg/cm^2 , e si registra il carico massimo e la resistenza del provino in kg/cm^2 . In Figura 59 si riportano degli esempi dei risultati visibili nel display dopo aver effettuato le prove a compressione.

La resistenza a compressione deve essere determinata con l'equazione:

$$R_c = F/A_c = 4F/(\pi D^2)$$

dove R_c è la resistenza a compressione del provino, F è la forza massima sostenuta dal provino espressa in newton, A_c è l'area della sezione trasversale del provino. Si assume come resistenza a compressione dell'impasto la media delle R_c dei provini.

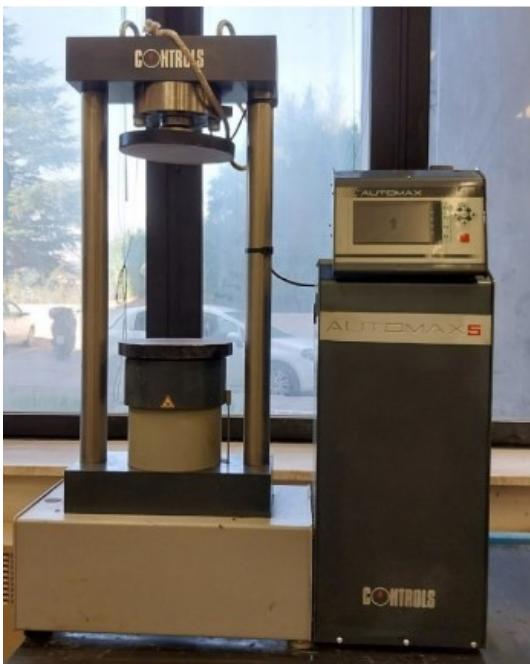


Figura 55- Pressa idraulica utilizzata.



Figura 56- Spessori aggiuntivi.

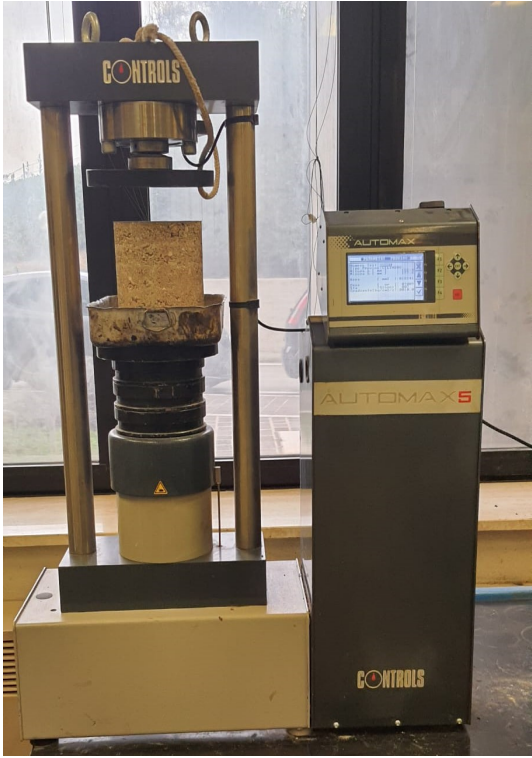
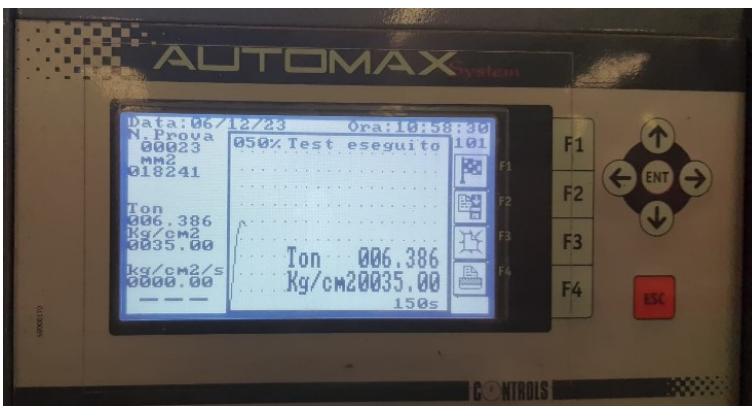
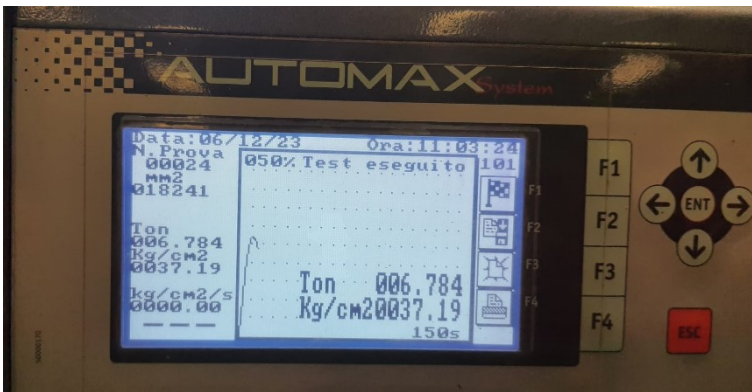


Figura 57- Provino posizionato nel macchinario.



Figura 58- Provino portato a rottura.



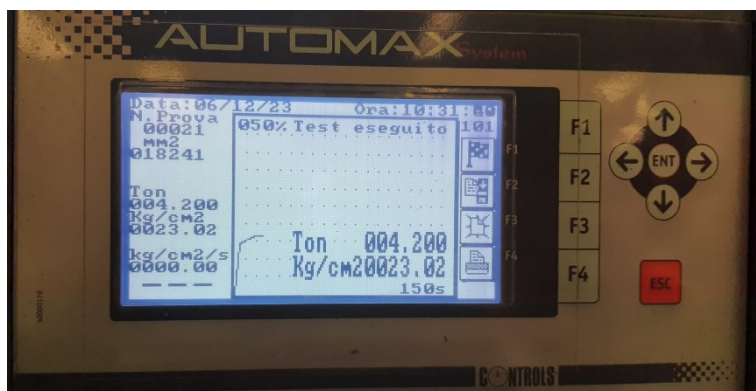


Figura 59- Esempi risultati da prove di compressione.

2.2.8 Prova di trazione indiretta (ITS)

La prova di trazione indiretta viene utilizzata per le miscele legate con leganti idraulici, in particolare con calce e cemento, e consiste nel sottoporre un provino cilindrico a una forza di compressione applicata lungo due generatrici opposte fino a rottura. La resistenza a trazione indiretta è calcolata a partire dal carico di rottura. Per eseguire la prova di trazione indiretta si utilizza per il programma sperimentale il procedimento indicato dalla norma UNI EN 13286-42. Altre norme di riferimento sono: C.N.R. N.97 e ASTM C496-04.

La preparazione dei provini e la loro maturazione è identica a quella per la prova di compressione del paragrafo precedente, con la differenza che in questo caso non serve livellare la superficie dei provini con una boiaccia di cemento. In Figura 60 sono riportati quattro provini pronti per essere sottoposti alla prova.

Per la prova di trazione indiretta si utilizza la pressa utilizzata anche nella prova di compressione, con la differenza che il provino viene stretto tra due piastre standardizzate, usate per distribuire il carico applicato lungo la lunghezza del provino cilindrico. Le piastre devono essere preferibilmente più larghe della lunghezza del provino a cui il carico è applicato (UNI EN 13286-42). Occorre garantire che i provini siano perfettamente centrati tra le due presse. Al centro, dove verranno applicati i carichi, si utilizzano superiormente e inferiormente dei listelli di carico in compensato o in cartone duro collegati a delle piastre (Figura 61). In laboratori i listelli di carico erano in compensato. Tali listelli devono avere le seguenti caratteristiche:

- larghezza: $a = 15 \pm 2$ mm;
- spessore: $b = 4 \pm 1$ mm;
- lunghezza: $c >$ lunghezza della linea di contatto del provino.

Le due opposte generatrici su cui deve essere applicato il carico devono avere una tolleranza di parallelismo non maggiore di 1 mm in 100 mm. I provini che non soddisfano il presente requisito devono essere scartati. Le piastre e la superficie dei provini devono essere pulite. Il provino e le strisce di materiale di riempimento devono essere posizionati al centro delle piastre con un'accuratezza minore di 1 mm. In Figura 62 si riporta un provino posizionato nel macchinario di prova.

Durante la prova si applica uno sforzo unitario di compressione (gradiente) di $0,5 \pm 0,2 \text{ kg/cm}^2$. Quando il carico diminuisce improvvisamente si interrompe la prova, ciò significa che il provino è stato portato a rottura e si registra il carico massimo e la resistenza del provino. La resistenza a trazione indiretta R_{it} si calcola:

$R_{it} = 2P/(\pi ld)$ dove P è la forza massima sostenuta espressa in newton, l è la lunghezza del provino espressa in mm e d è il diametro del provino in mm. In Figura 63 si osserva un provino portato a rottura per trazione indiretta, mentre in Figura 64 si riportano degli esempi di risultati visibili nel display del macchinario.



Figura 60- Provini pronti per essere sottoposti alla prova di trazione indiretta.

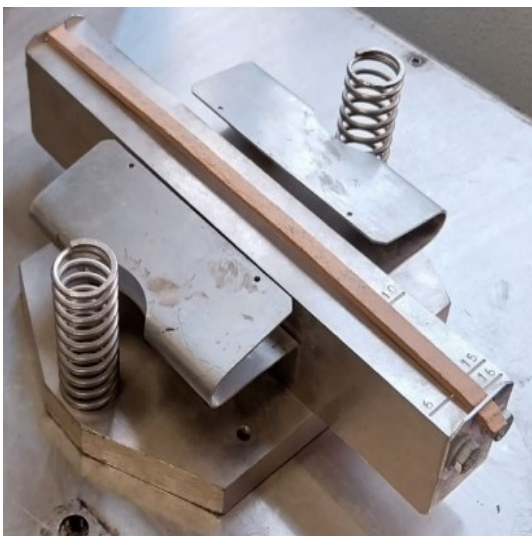


Figura 61- Piastra superiore con listello di carico in compensato.



Figura 62- Provino posizionato nel macchinario.

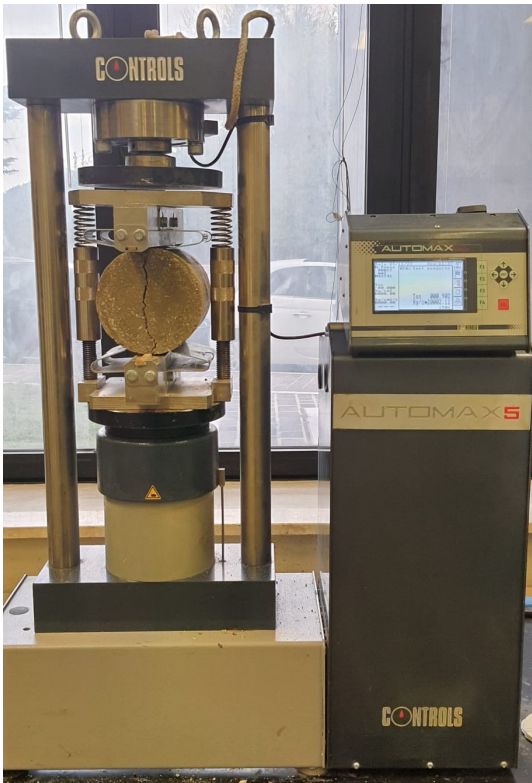


Figura 63- Provino portato a rottura.

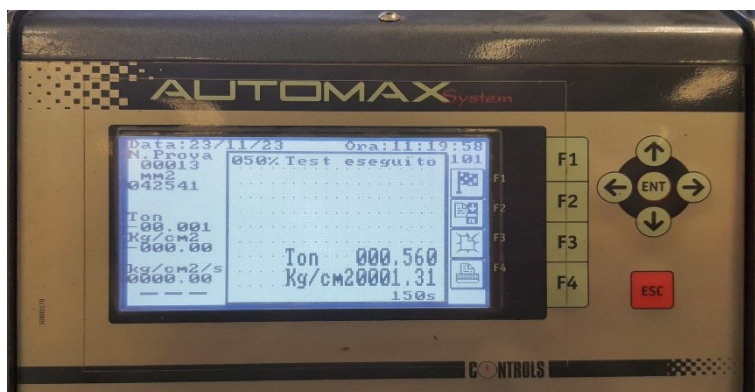
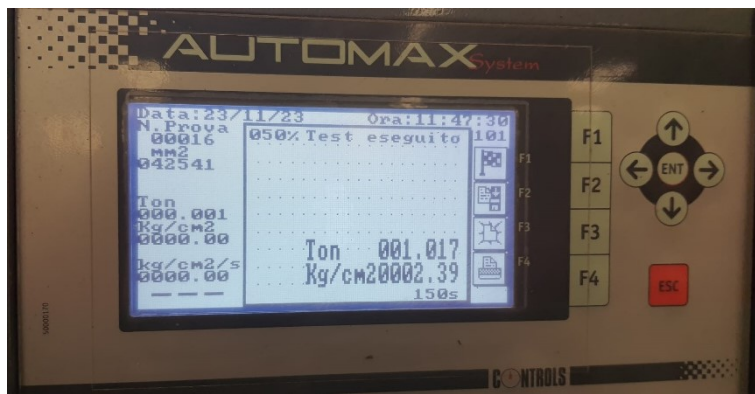


Figura 64- Esempi risultati da prove a trazione indiretta.

2.3 Programma sperimentale

Si illustra il programma sperimentale in cui vengono elencate le prove sperimentali effettuate utilizzando i materiali e i metodi descritti nei paragrafi precedenti.

2.3.1 Studio del sedimento ECOSEDRA

Sul sedimento ECOSEDRA sono stati determinati:

- Limiti di consistenza (LL, LP, IP), eseguiti sul sedimento ECOSEDRA e sul sedimento stabilizzato a diverse percentuali di calce:

| Materiale | N° prove |
|-----------------|----------|
| Sedimento | 1 |
| Sed. + 3% calce | 1 |
| Sed. + 4% calce | 1 |
| Sed. + 5% calce | 1 |

I risultati dei limiti di consistenza sul sedimento non stabilizzato a calce si trovano nel capitolo 2 paragrafo 2.1.1.

- Carta di plasticità.
- Scelta contenuto di calce “di progetto”, cioè la percentuale di calce da aggiungere al sedimento nella creazione delle varie miscele.

2.3.2 Studio del misto granulare FIORI COSTRUZIONI

Sul misto granulare FIORI COSTRUZIONI sono state eseguite le seguenti prove:

- Analisi granulometrica.
- Limite plastico (LP).

Questi risultati si trovano nel capitolo 2 paragrafo 2.1.2.

2.3.3 Identificazione e studio delle miscele

- Miscele non legate (le percentuali si riferiscono alla massa secca del sedimento ECOSEDRA trattato a calce e al misto granulare)

| ID Miscela | A. Sedimento ECOSEDRA trattato a calce | B. Misto granulare FIORI COSTRUZIONI |
|------------|--|--------------------------------------|
| M0 | 0 % | 100 % |
| M1 | 10 % | 90 % |
| M2 | 20 % | 80% |

- Miscele legate a cemento

| ID Miscela | C0 (0% cemento) | C2 (2% cemento) | C4 (4% cemento) |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| M0 | M0C0 | M0C1 | M0C2 |
| M1 | M1C0 | M1C1 | M1C2 |
| M2 | M2C0 | M2C1 | M2C2 |

- Prova di costipamento (Proctor Modificata): utilizzata per disegnare le curve di costipamento per miscele M0 e M2 e per la creazione di tutte le miscele legate a cemento.
- Contenuto ottimo di acqua per miscele M0, M1 e M2.

2.3.4 Prove meccaniche

Si elencano le prove meccaniche eseguite e il numero di provini prodotti per ogni miscela:

- Prova CBR: eseguita per determinare l'indice di portanza CBR per miscele non legate a cemento.

| Miscela | N° provini |
|---------|------------|
| M0C0 | 1 |
| M1C0 | 1 |
| M2C0 | 1 |

- Resistenza a compressione (prova UCS):

| Miscela | N° provini |
|---------|------------|
| M0C2 | 2 |
| M0C4 | 4 |
| M1C2 | 2 |
| M1C4 | 2 |
| M2C2 | 2 |
| M2C4 | 2 |

- Resistenza a trazione indiretta (prova ITS):

| Miscela | N° provini |
|---------|------------|
| M0C2 | 2 |
| M0C4 | 2 |
| M1C2 | 2 |
| M1C4 | 2 |
| M2C2 | 2 |
| M2C4 | 2 |

Riferimenti bibliografici

F.A. Santagata et al. (2016). Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.1: Progettazione.

UNI EN 932-2: Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati – Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio.

UNI EN 933-1: Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura.

ASTM D3551-17: Standard Practice for Laboratory Preparation of Soil-Lime Mixtures Using Mechanical Mixer.

ASTM D4318-00: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

CEN ISO/TS 17892-12: 2004: Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 12: Determination of Atterberg limits.

C.N.R. – A. XII - N. 69 – Norme sui materiali stradali – Prova di costipamento di una terra.

UNI EN 13286-2: Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 2: Metodi di prova per la determinazione della massa volumica e del contenuto di acqua di riferimento di laboratorio - Costipamento Proctor.

C.N.R. – A. VI - N. 29 – 7 novembre 1972 – Norme sui misti cementati.

UNI EN 13286-42: Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 42: Metodo di prova per la determinazione della resistenza a trazione indiretta di miscele legate con leganti idraulici.

UNI EN 13286-41: Miscele non legate e legate con leganti idraulici – Parte 41: Metodo di prova per la determinazione della resistenza a compressione di miscele legate con leganti idraulici.

ASTM D1632-17: Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory.

ASTM D1633-17: Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders.

C.N.R. – A. XVIII - N. 97 – 31 marzo 1984 – Prove distruttive sul calcestruzzo – Prova di resistenza a trazione indiretta (Prova brasiliana).

ASTM C496/C496M-04: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

UNI EN 13286-47-2006: Prova CBR.

Capitolo 3. Risultati

In questo capitolo verranno illustrati ed analizzati i risultati della sperimentazione svolta. Si presenteranno dapprima i risultati riguardanti i limiti di Atterberg, per scegliere un contenuto ottimale di calce da utilizzare per la creazione delle varie miscele, per poi passare alle curve di costipamento Proctor. Poi, saranno analizzati i valori ottenuti in termini di caratteristiche meccaniche, cioè indice CBR e i risultati di prove a compressione e trazione indiretta, mettendoli anche a confronto tra di loro.

3.1 Contenuto ottimale di calce

Nelle Figure 65, 66 e 67 e nella Tabella 7 si riportano i risultati dei limiti di Atterberg riguardanti il sedimento miscelato con diversi contenuti di calce (3, 4 e 5%). In Figura 68, questi risultati ottenuti sono stati inseriti nella carta di plasticità.

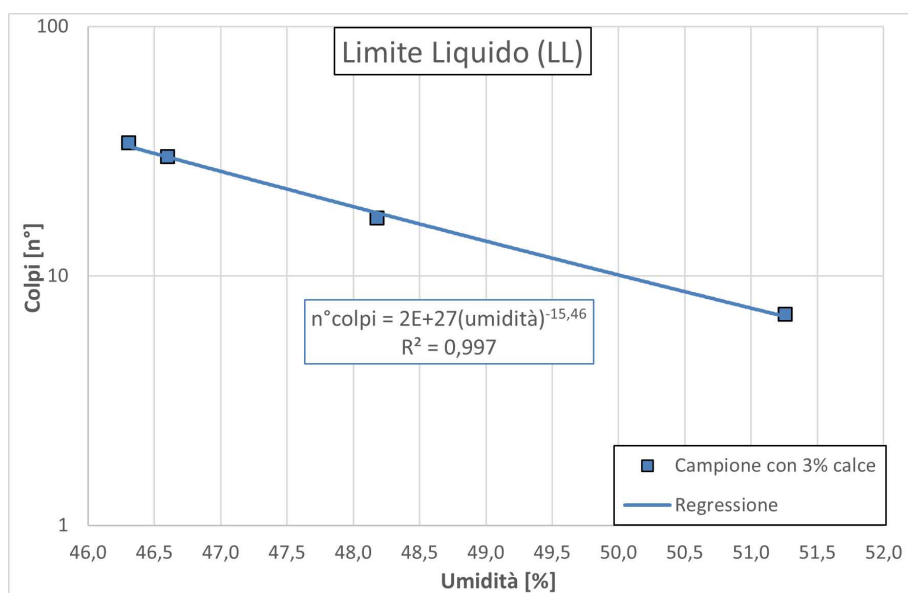


Figura 65- Limite liquido sedimento con 3% calce.

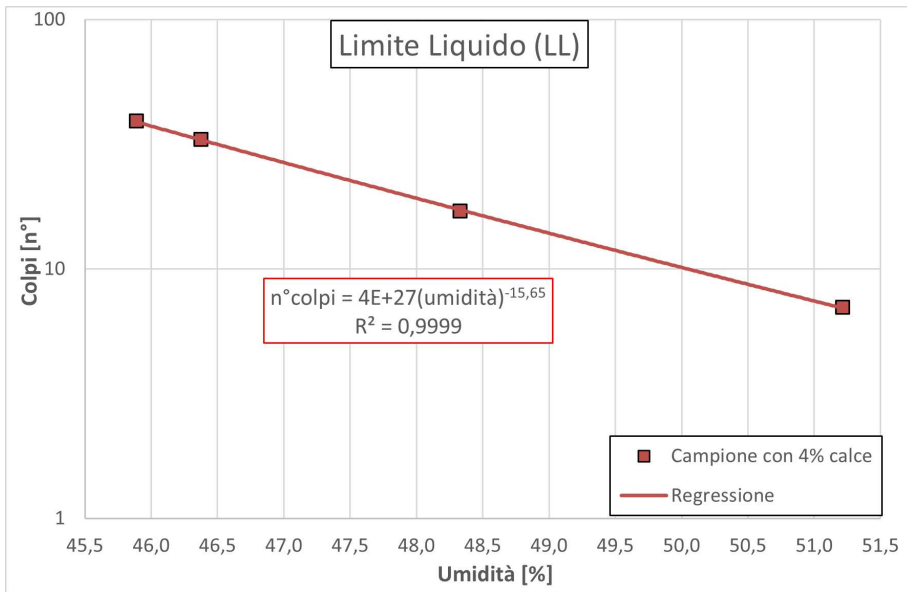


Figura 66- Limite liquido sedimento con 4% calce.

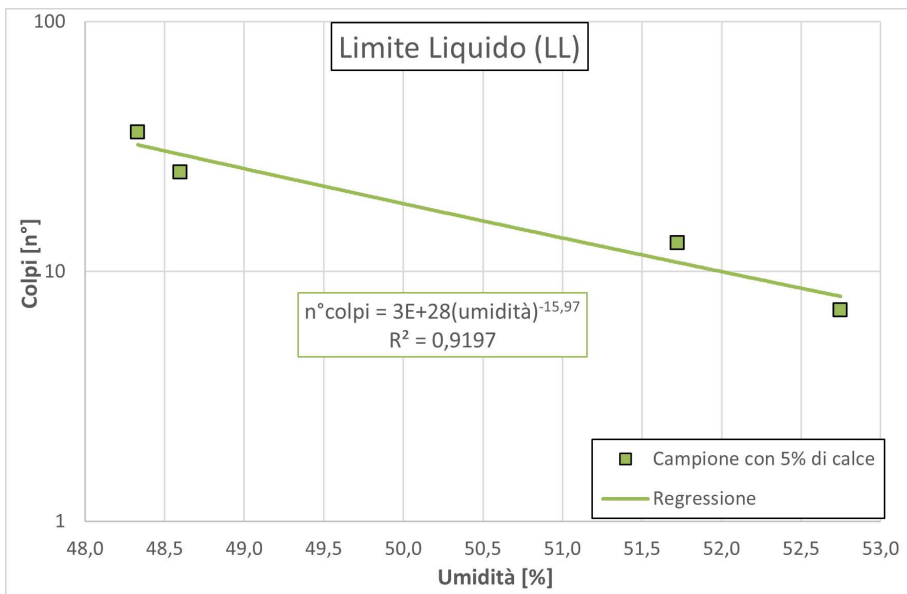


Figura 67- Limite liquido sedimento con 5% calce

| Materiale | Limite liquido [%] | Limite plastico [%] | Indice di plasticità [%] |
|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|
| Sedimento | 52,83 | 34,5 | 18,3 |
| Sed. con 3% calce | 47,15 | 18,5 | 28,65 |
| Sed. con 4% calce | 47,25 | 30,5 | 16,75 |
| Sed. con 5% calce | 49,86 | 31,9 | 17,96 |

Tabella 7- Risultati limite liquido, plastico e indice di plasticità.

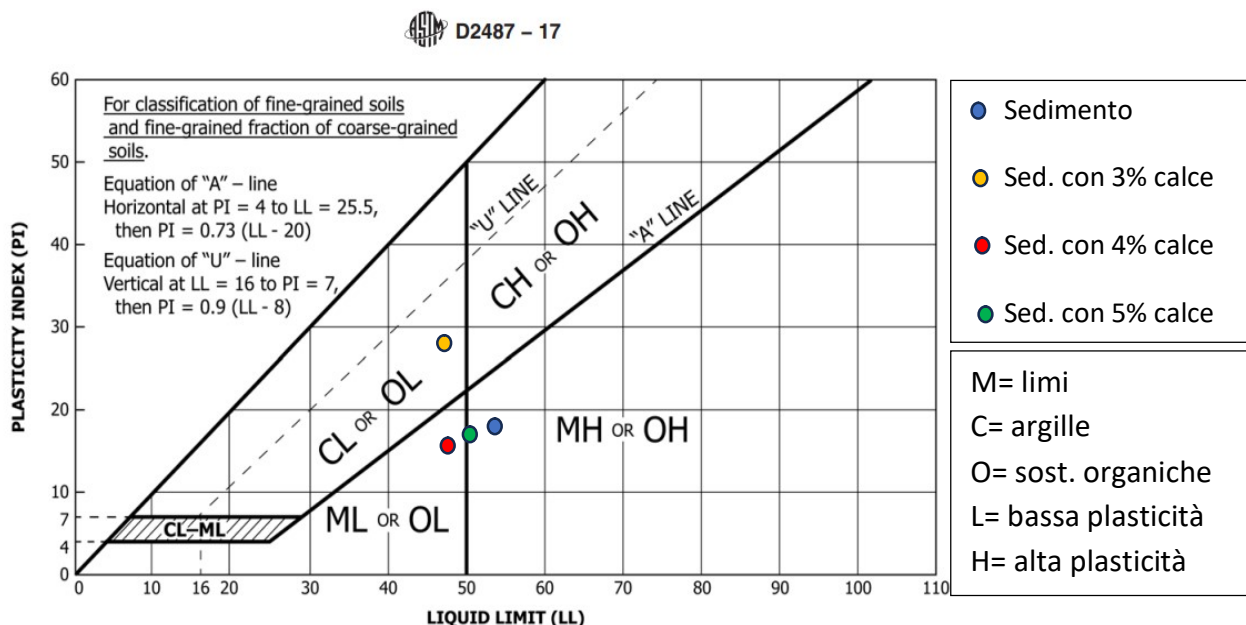


Figura 68- Carta di plasticità su sedimento con diversi contenuti di calce.

Questi dati mostrano che, con l'aggiunta di calce, il valore dei limiti diminuisce e il materiale studiato, da un limo elastico sabbioso (secondo la classificazione USCS ed essendo la frazione di sabbia > 30% dall'analisi granulometrica per setacciatura e sedimentazione fornitaci dal "Laboratorio prove geotecniche Technogeo") risulta essere un limo con bassa/media plasticità e in un caso (3% calce) un'argilla sabbiosa con bassa/media plasticità.

In conclusione, si è optato per un contenuto ottimo di calce corrispondente a un 4% da aggiungere, quando opportuno, nella creazione delle varie miscele.

3.2 Curve di costipamento

Il grafico in Figura 69 illustra le curve di costipamento Proctor modificata relative alle miscele M0C0 e M2C0, con lo scopo di determinarne la densità secca massima e il contenuto ottimo di acqua.

Dopodiché, dai due valori di contenuto ottimo di acqua che si ricavano dal grafico in Figura 5, ovvero 4,33% per M0C0 e 7,17% per M2C0, è stato calcolato tramite una media aritmetica quello per la miscela M1C0, cioè $W_{opt} = 5,75\%$.

-Nota: nell'attività di laboratorio sono stati utilizzati valori differenti per le miscele M1C0 e M2C0, come riportato in Tabella 8.

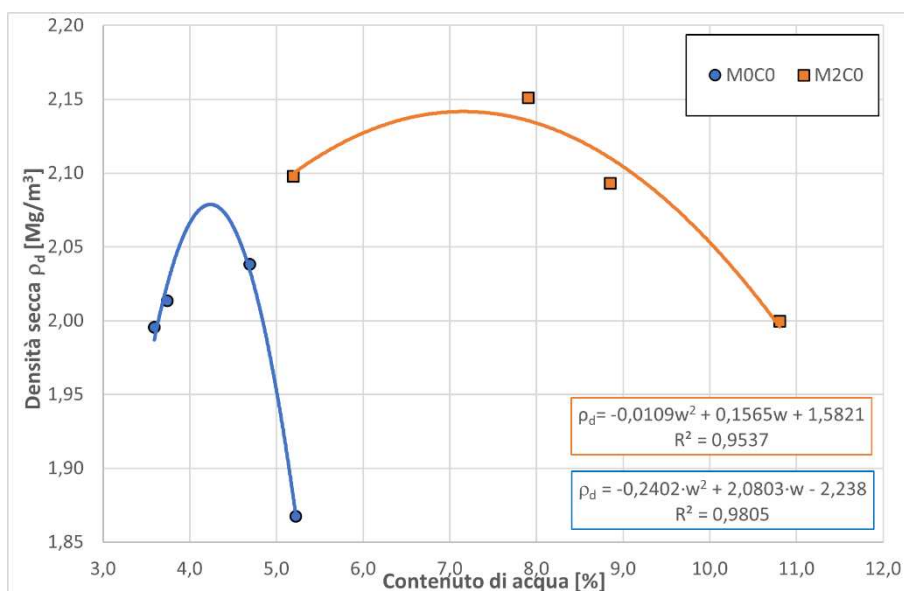


Figura 69- Contenuto d'acqua da prova Proctor modificata su miscele M0C0 e M2C2 in funzione della densità secca.

| Miscela | w_{opt} [%] |
|---------|---------------|
| M0C0 | 4,33 |
| M1C0 | 6,68 |
| M2C0 | 9,03 |

Tabella 8- Contenuto ottimo di acqua utilizzato nelle miscele.

3.3 Prove meccaniche

3.3.1 Prova CBR

Si riportano nelle Figure 70, 71 e 72 e nelle Tabelle 9, 10 e 11 i risultati riguardanti le prove CBR eseguite sulle miscele M0C0, M1C0 e M2C0. Oltre alla determinazione dell'indice di portanza CBR è stato misurato tramite comparatore il rigonfiamento verticale dei provini al termine della maturazione in acqua, come specificato nel Capitolo 2 paragrafo 2.2.6. In particolare, il rigonfiamento è pari a zero per le miscele M0C0 e M1C0, mentre risulta pari al 2% per la miscela M2C0. Si ricorda che, come riporta la norma UNI EN 13286-47-2006, se la parte iniziale della curva forza/penetrazione è concava verso l'alto, cosa che può essere dovuta a irregolarità della superficie, deve essere apportata una correzione tracciando una tangente alla curva in corrispondenza del punto di massima pendenza. Si prende poi l'intersezione di questa tangente con l'asse di penetrazione come la nuova origine.

Successivamente, si registrano i valori di forza corrispondenti a penetrazioni pari a 2,5 e 5 mm partendo dalla nuova origine, andando quindi a normalizzarli con valori della normativa. Infine, l'indice CBR è il valore più grande tra i due.

In conclusione, riporto in Tabella 12 gli indici CBR delle varie miscele studiate.

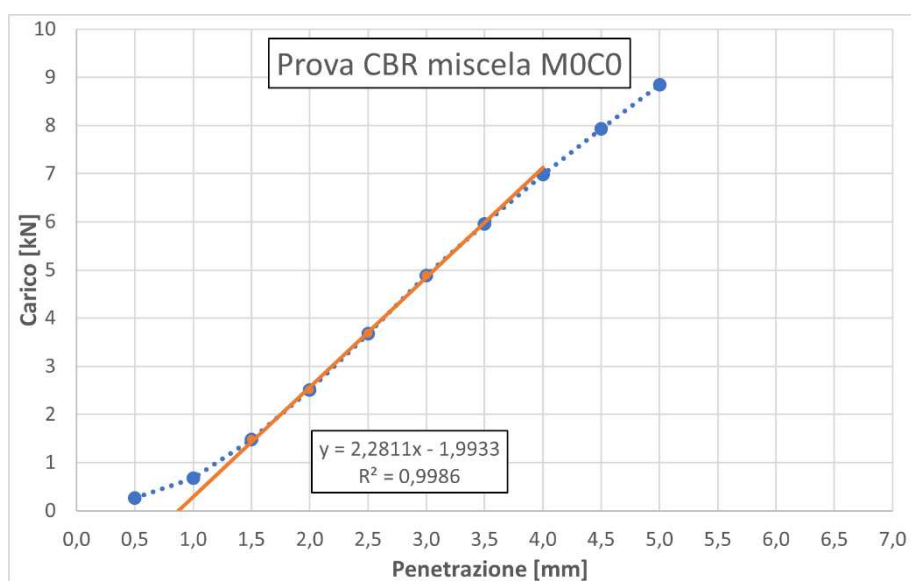


Figura 70- Grafico prova CBR miscela M0C0.

| Deformazione [mm] | Carico [kN] | Indice CBR [%] |
|-------------------|-------------|----------------|
| 3,37 | 5,69 | 43,07 |
| 5,87 | 10,45 | 52,27 |

Tabella 9- Valori indice CBR miscela M0C0.

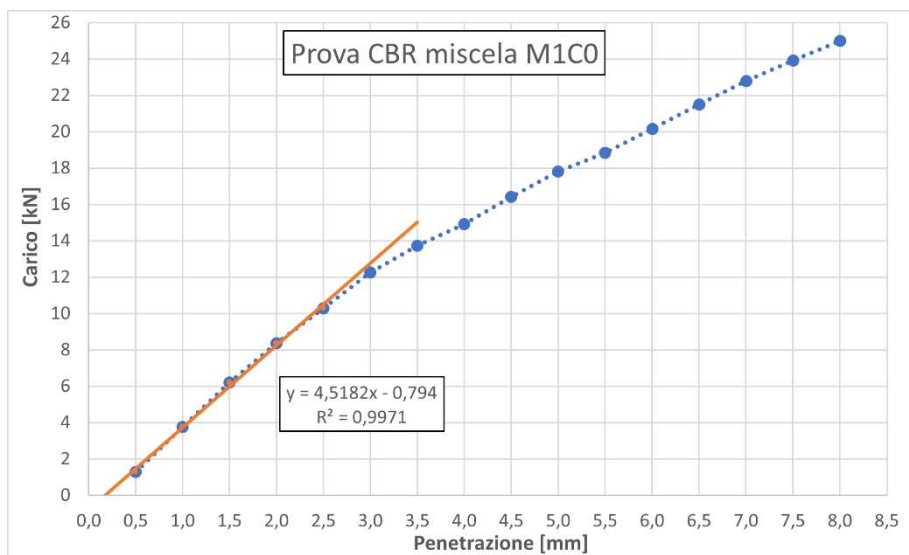


Figura 71- Grafico prova CBR miscela M1C0.

| deformazione [mm] | carico [kN] | Indice CBR [%] |
|-------------------|-------------|----------------|
| 2,68 | 10,98 | 83,16 |
| 5,18 | 18,16 | 90,80 |

Tabella 10- Valori indice CBR miscela M1C0.

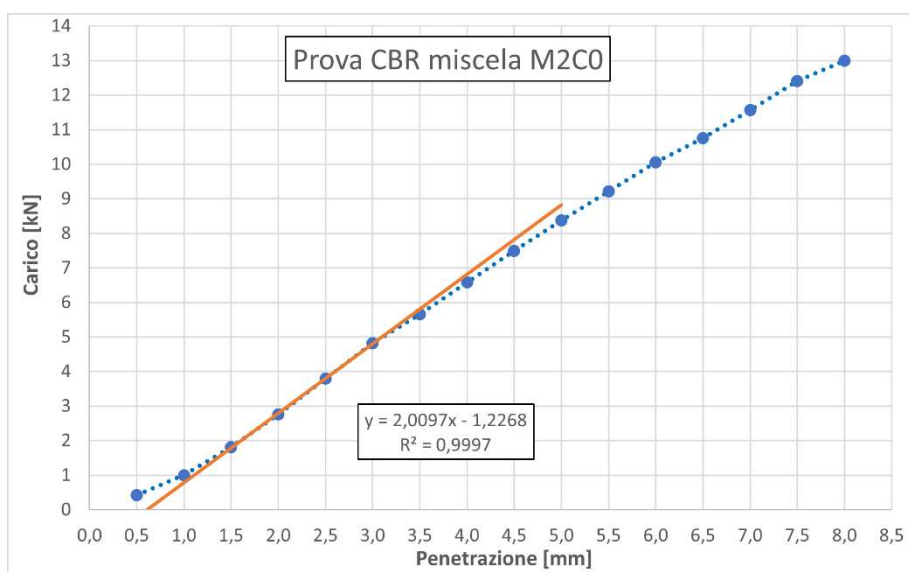


Figura 72- Grafico prova CBR miscela M2C0.

| deformazione [mm] | carico [kN] | Indice CBR [%] |
|-------------------|-------------|----------------|
| 3,11 | 5,00 | 37,90 |
| 5,61 | 9,40 | 47,02 |

Tabella 11- Valori indice CBR miscela M2C0.

| Miscela | Indice CBR [%] |
|---------|----------------|
| M0C0 | 52,3 |
| M1C0 | 90,8 |
| M2C0 | 47,0 |

Tabella 12- Indici CBR miscele.

3.3.2 Prova UCS e prova ITS

Si riportano in Figura 73 e Figura 74 i display della macchina di prova che raffigurano i risultati di una prova di resistenza a compressione e a trazione indiretta. Sul display, il valore in tonnellate indica il carico massimo sopportato dal provino prima della rottura e il valore in kg/cm² indica la resistenza, calcolabile con la formula riportata al Capitolo 2 Paragrafo 2.2.7.

Dopodiché, in Tabella 13, si registrano i risultati dei singoli provini portati a rottura e anche i valori medi calcolati di entrambe le prove per ogni miscela.

Dai risultati si evince che, per quanto riguarda la resistenza a compressione, i valori medi delle miscele senza sedimento sono al di sopra del limite minimo di norma (2,5 MPa dal Capitolato Speciale d'Appalto per misti cementati destinati a strati di base o fondazione). Con l'aggiunta del 10% di sedimento la resistenza peggiora leggermente per la miscela M1C2, mentre si ha un discreto miglioramento per la miscela con il 4% di cemento. I valori diminuiscono invece con le miscele aventi il 20% di sedimento. In quanto alla resistenza a trazione indiretta, i risultati ottenuti sono inferiori al limite minimo di norma (0,25MPa) tranne che per la miscela con 10% di sedimento e 4% di cemento (M1C4).

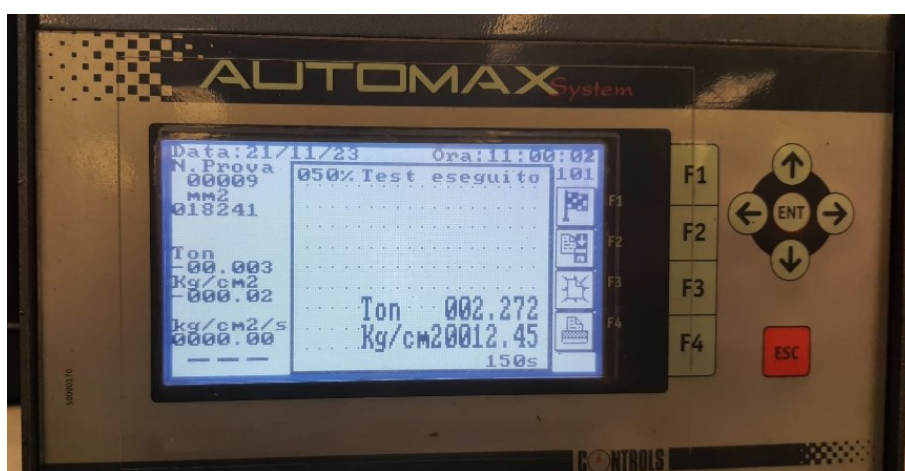


Figura 73- Display risultati di una prova UCS.

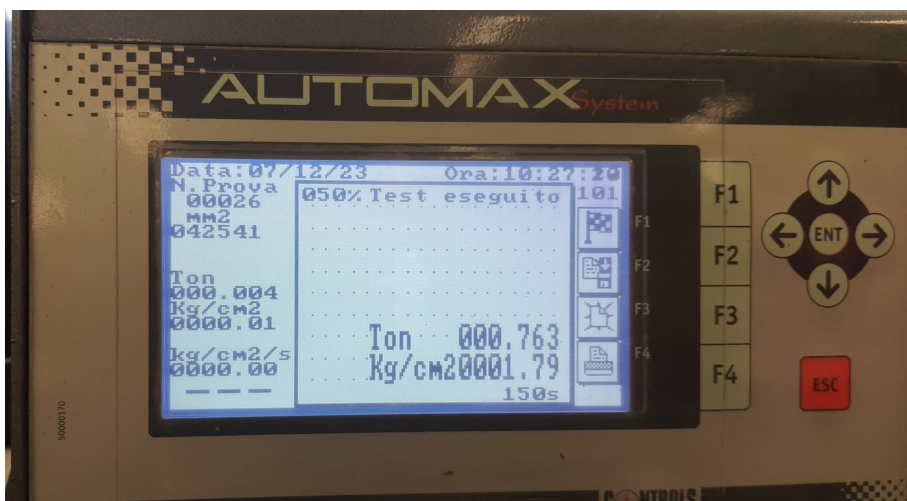


Figura 74- Display risultati di una prova ITS.

| Miscela | Provino [n] | UCS [N/mm ²] | ITS [N/mm ²] |
|---------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| M0C2 | 1 | 2,355 | 0,139 |
| | 2 | 3,286 | 0,130 |
| | Media | 2,820 | 0,134 |
| M0C4 | 1 | 2,153 | 0,070 |
| | 2 | 2,587 | 0,173 |
| | 3 | 2,963 | - |
| | 4 | 2,605 | - |
| | Media | 2,577 | 0,121 |
| M1C2 | 1 | 2,258 | 0,200 |
| | 2 | 2,243 | 0,176 |
| | Media | 2,250 | 0,188 |
| M1C4 | 1 | 3,443 | 0,314 |
| | 2 | 3,647 | 0,270 |
| | Media | 3,540 | 0,292 |
| M2C2 | 1 | 1,221 | 0,129 |
| | 2 | 1,364 | 0,142 |
| | Media | 1,293 | 0,136 |
| M2C4 | 1 | 2,722 | 0,208 |
| | 2 | 2,154 | 0,234 |
| | Media | 2,462 | 0,221 |

Tabella 13- Risultati prove UCS e ITS e valori medi per ogni miscela.

La Figura 75 descrive il rapporto fra le medie dei risultati delle prove a compressione e a trazione indiretta. Generalmente, il rapporto tra i risultati della prova ITS e quelli della prova UCS è intorno a 1/10 e quindi, come si può notare dal grafico in Figura 75, le pendenze del rapporto tra i valori delle due prove per le diverse miscele sono inferiori a quella attesa. Tuttavia, per le miscele M1 e M2 l'andamento è simile a quello teorico, a differenza della miscela M0, la quale ha registrato una resistenza a trazione decisamente inferiore.

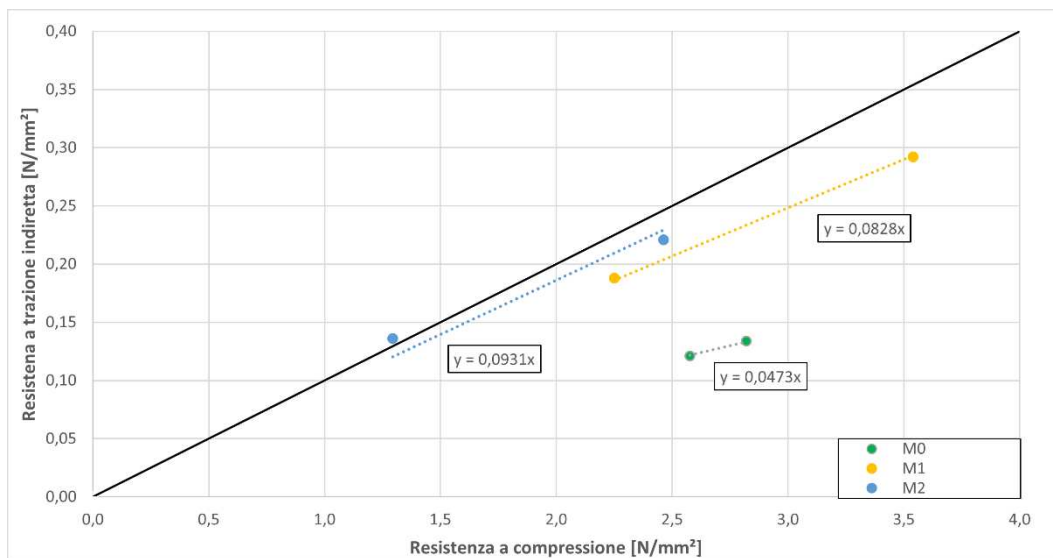


Figura 75- Rapporto tra le medie dei risultati delle prove UCS e ITS.

In conclusione, si nota come dai risultati ottenuti il misto granulare utilizzato tende a migliorare a livello di prestazioni con l'aggiunta del sedimento, in quanto quest'ultimo agisce riempiendo la porosità e aumentando la densità del provino, anche se si sta aggiungendo un materiale più scadente.

Conclusioni

Nella presente tesi è stata condotta una sperimentazione di laboratorio su un sedimento proveniente dal dragaggio del porto di Ancona e trattato nell'impianto pilota messo a punto nell'ambito del progetto ECOSEDRA. L'obiettivo è stato quello di valutare un possibile utilizzo del sedimento per le pavimentazioni stradali, al fine di trasformare un potenziale rifiuto in una risorsa sicura ai fini del risparmio energetico, della riduzione delle emissioni di gas inquinanti e, in generale, dell'impatto ambientale. Lo studio si è incentrato sulla creazione di miscele contenenti il sedimento e stabilizzate a calce e cemento. Tramite compattazione Proctor sono stati fabbricati provini sottoposti poi a prove meccaniche per misurarne le caratteristiche di resistenza. Le conclusioni possono essere riassunte nei seguenti punti:

- Il sedimento trattato nell'impianto pilota ECOSEDRA è stato stabilizzato utilizzando tre contenuti di calce (3%, 4% e 5%) ottenendo una diminuzione dell'indice di plasticità.
- I risultati di indice di portanza CBR delle miscele senza cemento contenenti il sedimento sono buoni e ciò è un primo aspetto positivo per stabilire un possibile utilizzo di questo materiale di rifiuto in una certa percentuale.
- Le prove di compressione e trazione indiretta effettuate hanno dato, eccetto in alcuni casi come per la miscela M1C4, risultati inferiori ai limiti di capitolato per misto cementato per strati di base o sottobase. Tuttavia, i risultati confermano l'utilizzabilità del materiale per gli strati inferiori della pavimentazione (fondazione) o del sottofondo.

I risultati di questa sperimentazione hanno evidenziato che è possibile trovare un impiego del sedimento ECOSEDRA derivante dal dragaggio portuale nella costruzione di pavimentazioni stradali, ma occorre fissare delle percentuali di utilizzo nelle miscele ben precise. Infatti, le miscele contenenti il 20% di sedimento non hanno portato a buoni risultati nelle prove di resistenza meccanica, a differenza delle miscele contenenti il 10% di sedimento, in particolare M1C4 avente il 4% di cemento.