

Alma Mater Studiorum

Università di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali

Corso di Laurea in Scienze Geologiche



**CARATTERIZZAZIONE
FISICO MECCANICA
DI AGGREGATI NATURALI
E PRODOTTI ECO-SOSTENIBILI
PER USO STRADALE**

Tesi di Laurea di: **Michele Gadioli**
Relatore: **Prof.ssa Monica Ghirotti**

Sessione II

Anno Accademico 2012-2013

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali

Corso di Laurea in Scienze Geologiche

**CARATTERIZZAZIONE FISICO MECCANICA DI
AGGREGATI NATURALI E PRODOTTI ECO
SOSTENIBILI PER USO STRADALE**

Relatore:

Prof.^{ssa} Monica Ghirotti

Monica Ghirotti
Prof.ssa M. GHIROTTI

Tesi di Laurea di:

Michele Gadioli

Michele Gadioli

Sessione II

Anno Accademico 2012-2013

Ringraziamenti

In queste righe voglio ringraziare il **Laboratorio Geotecnico C.G.G. Testing srl** di località Ponte Ronca di Zola Predosa (BO) per avermi permesso di utilizzare i macchinari di prova e avermi supportato per tutta la durata della mia sperimentazione.

In modo particolare ringrazio il **Dottor Geologo Biagio Tranquillo** che mi ha seguito e con cui ho pianificato il lavoro di tesi e, non ultimi, il **Dottor Geologo Giuseppe Astorino**, il **Dottor Geologo Daniel Del Negro** e il **Tecnico di Laboratorio Cosima Bosa** che mi hanno informato e consigliato durante le procedure di test.

Indice

- Capitolo 1: Scopo del lavoro e introduzione.....Pag. 1
- Capitolo 2: Tipi di infrastrutture stradali e tipi di calce.....Pag. 4
- Capitolo 3: Sali inorganici naturali e definizione di terreno.....Pag. 7
- Capitolo 4: Elenco prove di laboratorio svolte.....Pag. 10
- Capitolo 5: Esecuzione delle prove e risultati.....Pag.14
- Capitolo 6: Conclusioni.....Pag.27
- Bibliografia.....Pag.29

Capitolo 1

Scopo del lavoro

Nel mondo di oggi si sente parlare molto di inquinamento, materiali ecologici, salvaguardia dell'ambiente e impatto ambientale. Uno sviluppo sostenibile del territorio richiede anche un maggiore sviluppo di tecnologie eco compatibili e, di conseguenza, una continua ricerca per rendere tali i materiali utilizzati quotidianamente. Nel campo delle infrastrutture stradali secondarie, il metodo di costruzione più economico e con minor impatto ambientale risulta essere una strada in terra battuta. Essa di norma è costituita da materiale unicamente terroso e ghiaioso compattato per rendere più agevole il passaggio, anche di mezzi su ruote.

Bisogna però mettere in luce i problemi che crea una pavimentazione di questo genere:

- la formazione di polvere o fango in seguito ad eventi meteorici, rendendo scomodo il passaggio di persone e mezzi su ruote;
- la formazione di ormaie in corrispondenza delle zone con transito concentrato;
- l'erosione della pavimentazione dovuta al ruscellamento delle acque meteoriche.

Questi inconvenienti dipendono tutti da un unico problema, imputabile ad uno scarso legame tra le particelle del terreno. Per questo motivo, realizzare questo tipo di strade con prestazioni migliori richiede l'utilizzo di leganti idraulici che, mescolati con una miscela di acqua e sali inorganici naturali, rendano la terra compatta, priva di polvere, drenante e meccanicamente resistente senza dimenticare la componente ecologica.

Al fine quindi di definire la quantità ottimale di legante da aggiungere al materiale naturale, tale da ottenere un composto che porti ad un'omogeneizzazione della miscela terra-legante e al possibile miglioramento delle prestazioni meccaniche del conglomerato naturale sono state eseguite una serie di misure sperimentali di laboratorio.

In particolare, l'obiettivo di questo lavoro di tesi è la caratterizzazione fisico-meccanica del prodotto finito e verificare che la miscela naturale agisca sul terreno in modo da migliorarne le prestazioni. Inoltre, dato che un'elevata percentuale di materiale fine causa una perdita di resistenza meccanica, si intende determinare anche la percentuale ottimale di fine con la quale riescono ad agire i sali ed il legante.

Introduzione

La strada è un'infrastruttura di trasporto destinata alla circolazione di veicoli terrestri (in special modo su ruota) ed, in misura marginale, pedoni e animali. Il primo e il più elementare tipo di strada fu il sentiero sterrato che consentiva il passaggio di persone e animali. Con il progredire della civiltà e con il crescere degli scambi commerciali aumentò l'importanza attribuita all'economia di tempo e di lavoro, di conseguenza venne realizzato il trasporto a dorso degli animali con l'introduzione della soma e furono adottati mezzi per il trasporto a traino che richiedevano sentieri più larghi. Più tardi l'introduzione del carro sollecitò la costruzione di vie di comunicazioni stabili e con il fondo solido perciò, furono realizzate le prime strade carreggiabili a fondo naturale e nei centri urbani si cercò di rendere compatta la superficie stradale per consentire la circolazione anche durante la cattiva stagione. La realizzazione della prima rete stradale sembra sia dovuta al re persiano *Dario*, nel 500 a.C., con lo scopo di stabilire collegamenti più rapidi tra le capitali, Susa e Persepoli, e le zone più lontane del suo vasto impero. La civiltà che però eccelse nella costruzione delle strade fu quella Romana. Il termine strada stesso deriva dal latino *strata* ovvero strati, in quanto la posa di vari strati di materiale adeguato conferiva alle strade romane le loro caratteristiche tecnologiche. Le conquiste dell'impero Romano e di conseguenza le loro colonizzazioni crearono una rete di collegamenti dei presidi e delle città di nuova fondazione, uno strumento fondamentale per l'affermazione del loro dominio e per la penetrazione capillare del loro sistema economico, sociale, giuridico e culturale. La strada, infatti, riflette sempre l'organizzazione economica e culturale della società in cui nasceva. I Romani capirono che, per poter controllare ed estendere il loro impero, avevano bisogno di potersi spostare rapidamente all'interno di esso e per poter conquistare nuove terre il primo passo era la costruzione di una via, chiamata in latino *Limes Romano*, che portasse l'esercito nel territorio voluto in breve tempo. Da questo proposito cominciarono gli studi sulle strade e sui materiali da utilizzare per poter costruire il più rapidamente possibile una strada e che fosse, al contempo, durevole nel tempo. Dapprima cominciarono a costruire utilizzando il terreno mescolato con aggregati di medie dimensioni (ghiaia e pietrisco) e malta costituita da inerti fini (sabbia), acqua e calce aerea. Il risultato era abbastanza soddisfacente ma aveva tempi di indurimento troppo lunghi per i loro scopi e durata breve. La scoperta della *pozzolana* diede una svolta al metodo di costruzione stradale romano. Il termine pozzolana deriva dal fatto che questo materiale venne scoperto vicino la città di Pozzuoli in Campania, all'interno della vasta area vulcanica dei Campi Flegrei e oggi sappiamo classificarla in una piroclastite sciolta, a granulometria variabile dal limo alla sabbia, con inclusioni ghiaiose costituite in prevalenza da pomici e scorie vulcaniche.

Con questo nome oggi sono identificate tutte le piroclastiti sciolte, anche di origine diversa, in grado di avere un comportamento pozzolanico, ovvero di reagire con acqua e calce per formare un legante idraulico, in grado perciò di indurire anche sott'acqua e di durata straordinariamente lunga. Quindi i Romani avevano tra le mani la prima bozza di legante idraulico della storia che permise loro di creare il primo calcestruzzo, una miscela costituita da acqua, legante idraulico, sabbia e ghiaia. Il metodo Romano per costruire una strada può essere riassunto così in pochi punti:

- L'architetto decideva dove costruire la strada e gli agrimensori creavano il tracciato con pali e uno strumento per tracciare gli angoli chiamato *groma*;
- I *libratores* aiutati da aratri e dai legionari muniti di spade scavavano il terreno fino ad uno strato solido;
- Lo scavo veniva riempito con vari materiali iniziando con quelli a granulometria fine (sabbia) e finendo con gli aggregati di dimensione maggiore (pietrame), questo garantiva il drenaggio dell'acqua piovana;
- Uno strato di mattoni, prima posizionati in verticale e poi in orizzontale, garantiva ottimo sostegno;
- Le lavorazioni finali venivano fatte con uno strato di calcestruzzo su cui poggiavano lastre di pietra, chiamato allora *summa crusta* e oggi *lastricato*.

Finalmente la "ricetta" di una strada durevole e di veloce costruzione venne trovata e, grazie anche a questa tecnologia, l'impero Romano si diffuse velocemente in Europa, Africa e Asia.

Capitolo 2

Tipi di infrastrutture stradali odierne

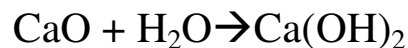
Ancora oggi il metodo di costruzione delle nostre strade ricalca il metodo *a strati*, anche se, ovviamente, nel tempo è stata migliorata la tecnologia di scavo, di riempimento e di copertura dello strato di usura. Attualmente, i metodi per la costruzione delle infrastrutture stradali si differenziano in base ai materiali ed alle tecnologie utilizzate, ma, soprattutto, al tipo di sovrastruttura o pavimentazione che può essere: flessibile, semi-rigida, rigida, ad elementi ed, infine, in terra battuta. Le *pavimentazioni flessibili, semi-rigide e rigide* sono le più resistenti e durature anche al traffico di mezzi pesanti; esse utilizzano come strato di usura materiali bituminosi realizzati dalla evaporazione o raffinazione del greggio e di conseguenza presentano un impatto ambientale elevato indiretto, dovuto anche ai metodi di estrazione del materiale.

Le *pavimentazioni ad elementi* sono utilizzate per lo più nei centri urbani e non tollerano traffico molto pesante e velocità elevate. Sono costituite da elementi lapidei squadrate di varie composizioni e dimensioni.

Le *pavimentazioni in terra battuta* sono le più semplici ed economiche superfici da realizzare. Questo tipo di strade non possiede una vera e propria pavimentazione, tanto che basta un continuo transito sulla zona per compattare il terreno in sito e creare una strada. Esse vengono utilizzate soprattutto in ambito rurale, in aree giochi, in percorsi natura e nelle vicinanze di aree protette che vietano l'impiego di materiali ad elevato impatto ambientale.

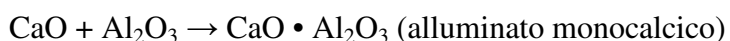
Tipi di calce e loro utilizzo

La calce viene utilizzata per moltissimi scopi: nell'industria chimica, in agricoltura, in edilizia e molti altri campi come l'ingegneria stradale, sulla quale ci soffermiamo. La calce può essere di tre tipi: viva, idrata o idraulica. I primi due tipi fanno parte dei leganti aerei che reagiscono con l'aria mentre la calce idraulica, come si nota dal prefisso idro, è un legante idraulico che reagisce quindi con l'acqua. La calce viva si ottiene cuocendo ad alta temperatura in appositi forni il calcare naturale, roccia diffusissima in natura costituita quasi esclusivamente da carbonato di calcio (CaCO_3), selezionato in funzione di un alto grado di purezza e frantumato con diametro dei frammenti nell'ordine di centimetri o anche un paio di decimetri. Nel forno avviene la reazione di calcinazione che libera anidride carbonica (CO_2) e produce l'ossido di calcio. Dopo la cottura, i frammenti di pietra riducono il loro peso di circa il 40% a causa degli atomi di carbonio e ossigeno perduti, ed assumono una consistenza porosa. La calce viva, se mescolata con acqua, reagisce vivacemente in una reazione fortemente esotermica trasformandosi in calce idrata polverulenta, detta anche calce spenta. Di seguito la reazione di spegnimento, che avviene con quantità d'acqua stechiometricamente controllata:



Questi tipi di calce, come già detto, derivano dalla cottura di calcare naturale o sabbie calcaree pure e induriscono a contatto con aria. Nel lavoro di tesi è stata utilizzata calce idraulica.

La calce idraulica si ottiene dalla cottura di calcari marnosi e quindi con componente argillosa e il processo di indurimento viene attivato dall'acqua. Infatti, un sinonimo di calce idraulica è cemento povero, che riconduce alla famiglia dei cementi e quindi dei leganti idraulici. Con calce idrauliche si intendono prodotti derivati dalla calcinazione di calcari marnosi o marne calcaree (miscele naturali che presentano un certo tenore, dal 6 al 22%, di argille o altri alluminosilicati idrati) sottoposti a cottura in appositi forni con temperature maggiori rispetto a quelli per cottura di calce aeree. Qui si ha la decomposizione termica del calcare (CaCO_3) in calce viva (CaO) e anidride carbonica e dei silicati idrati di alluminio costituenti l'argilla. In seguito, con temperature maggiori, i prodotti della decomposizione dell'argilla si legano con l'ossido di calcio (CaO) per formare:



Questi composti reagendo chimicamente con l'acqua formano idrati stabili ed insolubili che permettono al materiale di indurire e rimanere stabile anche sott'acqua (azione idraulica).

La calce risultante sarà così composta da:

- Parte attiva:

60-70% di Ca(OH)_2 ;

10-20% di frazione idraulica ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$);

5-10% di CaO ;

- Parte incotta 10-30% (materiale che non ha reagito e fungerà da inerte)

Applicazione della calce nell'ingegneria geotecnica

Miscelando intimamente la calce idraulica e le terre con indice di plasticità maggiore di 10 si verificano diversi fenomeni chimico-fisici descritti in seguito:

Riduzione del contenuto d'acqua naturale: in condizioni normali, con una buona miscelazione della terra con la calce, ogni punto percentuale di calce aggiunto può far diminuire di circa un'unità percentuale il contenuto in acqua della terra trattata.

Scambio ionico e flocculazione: le particelle argillose recano in superficie ioni positivi (H^+ , Na^{2+} , K^+) che attraggono le molecole d'acqua. Questi vengono sostituiti dagli ioni calcio (Ca^{2+}) e magnesio (Mg^{2+}) provenienti dalla dissociazione della calce. In questo modo diminuisce la quantità di acqua che circonda le singole particelle argillose che si portano così reciprocamente a contatto. La diretta conseguenza di questo processo è la flocculazione e l'agglomerazione delle particelle disperse nell'acqua.

Reazione pozzolanica: agli elevati valori di pH dovuti alla presenza di calce, una parte dei minerali argillosi solubilizza e si combina con il calcio per dare origine a silico alluminati idrati di calcio stabili dotati di un forte potere legante. Questo complesso di trasformazioni chimiche è comunemente conosciuto come reazione pozzolanica.

Se di basso indice di plasticità, occorre che le terre contengano almeno il 15 % di materiale passante al setaccio ASTM n. 200 (luce netta di 0,075 mm) perché le reazioni sopradescritte possano verificarsi.

Capitolo 3

La miscela di sali inorganici

Questo prodotto in polvere viene aggiunto a miscele confezionate con terreno naturale o di risulta e leganti idraulici per la costruzione di stradelli drenanti ed ecologici quali ad esempio strade rurali, percorsi in parchi, piste ciclabili, impianti sportivi o aree giochi. La formulazione di tale prodotto è a base di prodotti inorganici naturali utilizzati anche in detergenti di uso quotidiano con caratteristiche di biodegradabilità. Lo scopo di questo prodotto in polvere, come additivo nella preparazione di leganti abbinati all'uso di terreno come inerte, è infatti quello di creare condizioni di detergenza naturale. Il composto in polvere viene messo in soluzione in ragione di 1 kg su circa 80-100 litri d'acqua e in seguito viene miscelato con 1 m³ di materiale terroso legato con circa 150 kg di legante idraulico.

Composizione:

Silicato di sodio + sodio carbonato + cloruro di potassio + sodio tripolifosfato = 100%



Tutti questi composti sono sali inorganici di norma presenti in natura e, di conseguenza, con essa compatibili. Il potere detergente di queste sostanze, noto fin dall'antichità, è dovuto anche al loro potere alcalino e allo sviluppo di una potente forza ionica indispensabile per disaggregare le micelle terrose e quindi renderle disponibili per il legante cementizio.

Definizione di terreno

Terra è una parola con molte sfaccettature e che, nel linguaggio quotidiano, viene utilizzata con significato ed accezione diversa a seconda degli ambiti in cui essa si utilizza (geofisica, meteorologia, agraria, geologia, geotecnica, ecc.). Nel campo dell'ingegneria geotecnica un terreno viene definito come un mezzo particellare e multifase di minerali e vuoti interstiziali riempiti da fluidi che possono essere separate le une dalle altre tramite semplice azione meccanica, quale ad esempio l'agitazione in acqua. La composizione di un terreno, nonché di un suolo, è il risultato della sua storia, che comprende fenomeni di trasformazione della roccia madre per alterazione chimica e/o disgregazione meccanica, trasporto tramite agenti atmosferici o subacquei (acqua, ghiaccio, vento, forza di gravità, ecc), e sedimentazione che può avvenire in ambiente marino, continentale o misto (zone costiere, delta, ecc). In base al diametro dei grani costituenti le terre si può fare una prima classificazione dividendo i terreni a grana grossa dai terreni a grana fine. Il limite tra queste due categorie è dato dal valore 0,075 mm (fig. 3.1):

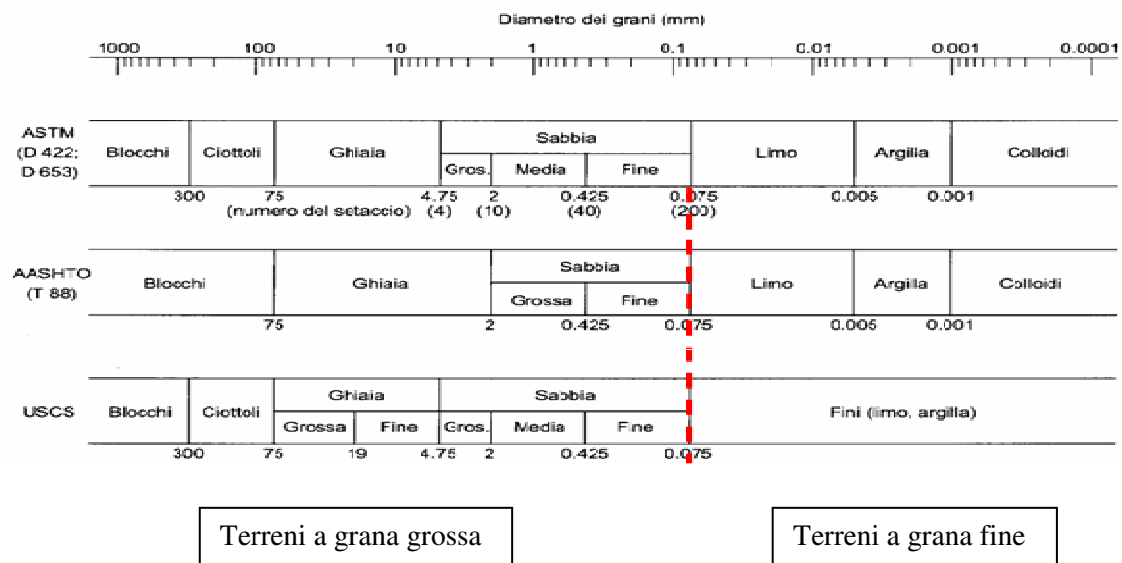


Figura 3.1: Diametro dei grani di un terreno in mm nelle diverse classificazioni.

Le prove di laboratorio sono state eseguite su due tipi di terreni, uno a grana grossa e uno a grana fine, cui segue una descrizione oggettiva.

Terreni a grana grossa: Misto granulare

Si definisce misto granulare una miscela di materiali lapidei con la parte grossolana costituita da frantumazione di rocce, tale da rendere i granuli a spigoli vivi, e la parte fine dimensionalmente appartenente alle sabbie e sabbie fini con limo e argilla in percentuale minima. Viene utilizzato nella sovrastruttura stradale come strato di base, mentre nella tecnologia adottata per il lavoro di tesi come strato finale o di usura.

Terreni a grana fine: Argilla

Si definisce argilla un sedimento non litificato estremamente fine, i cui granuli hanno dimensioni inferiori a $2\ \mu\text{m}$, costituito prevalentemente da minerali argillosi con cristallidi dimensioni colloidali, che chimicamente sono allumino-silicati idrati con altri ioni metallici. I minerali argillosi appartengono alla classe dei fillosilicati, ovvero silicati caratterizzati da una struttura a strati a simmetria tetraedrica in cui ogni tetraedro si lega agli altri tramite l'ossigeno.

I fillosilicati vengono classificati in tre gruppi principali in base alla struttura cristallografica:

- a due strati T-O (tetraedrico – diottaedrico), ad esempio caoliniti;
- a tre strati T-O-T (tetraedrico – diottaedrico – tetraedrico), ad esempio montmorilloniti;
- a quattro strati T-O-T-O (tetraedrico-diottaedrico-tetraedrico-triottaedrico), ad esempio cloriti;

Una particella di argilla possiede una carica esterna negativa e per questo tende ad attrarre gli ioni positivi dell'acqua. Ovviamente più superficie specifica possiede e più interagisce con le cariche positive. La Montmorillonite ha superficie specifica maggiore seguita da Clorite, Illite e Caolinite. Per questo le argille sono terreni con caratteristiche fisico-chimiche che comportano un notevole assorbimento di acqua e di conseguenza una notevole plasticità. Sono terreni coesivi le cui caratteristiche meccaniche dipendono dalla coesione tra i granuli e dall'idratazione. Sono materiali di difficile impiego nelle costruzioni stradali che necessitano trattamenti con leganti idraulici per migliorarne le prestazioni.

Capitolo 4

Elenco prove di laboratorio

Per identificare la natura e lo stato dei terreni e per valutarne l'attitudine al loro impiego sono state eseguite le seguenti prove:

- Analisi granulometrica secondo norma ASTM D422-63 (R 2007);
- Limiti di consistenza Atterberg per la classificazione (ASTM D4318-10);
- Contenuto d'acqua naturale (UNI CEN ISO/TS17892-1);
- Prova di costipamento AASHTO modificato (C.N.R. B.U. A. XII N.69) al variare del contenuto d'acqua, con individuazione della densità massima del secco e dell'umidità ottimale;
- Indice di portanza CBR, secondo modalità di prova (CNR UNI 10009) che tengano conto della destinazione del materiale, dei rischi di imbibizione da venute d'acqua (gravitazionale e/o di capillarità) e del prevedibile stato di addensamento.

Determinazione della curva granulometrica

Lo scopo dell'analisi granulometrica è quello di raggruppare, in diverse classi di grandezza, le particelle costituenti i terreni determinando le percentuali in peso secco del campione iniziale. Le analisi granulometriche si distinguono in:

- *Granulometria per setacci*: ci permette di classificare la parte di terreno con particelle costituenti di diametro $> 0,075$ mm riversandolo in una serie di setacci con maglie con luce decrescente. Tramite l'analisi per setacci si classifica un terreno a seconda delle percentuali delle classi granulometriche in peso che lo compongono.
- *Granulometria per sedimentazione*: ci permette di classificare la parte di terreno con particelle costituenti di diametro $< 0,075$ mm. La prova si basa sulla legge di Stokes, secondo la quale si può determinare il diametro di una sfera avente il peso specifico noto, della quale sia nota la velocità di caduta, all'interno di un liquido di peso specifico e

- viscosità conosciuti. La prova consiste nel misurare la velocità di caduta delle particelle di terreno mediante un densimetro, che viene introdotto nel cilindro contenente il materiale in esame secondo tempi prestabiliti e distribuiti in serie geometrica.

Limiti di consistenza di Atterberg

I limiti di consistenza di Atterberg indicano il valore limite del contenuto di acqua per il quale si registra una transizione dello stato fisico del terreno. In particolare si possono distinguere quattro possibili stati fisici in funzione della consistenza, in ordine crescente del contenuto di acqua essi sono:

- solido
- semisolido
- plastico
- liquido

Il valore limite che corrisponde ad una transizione da solido a semisolido è detto limite di ritiro, gli altri due valori in ordine sono il limite plastico e il limite liquido.

I risultati vengono poi inseriti in un diagramma (Carta di Casagrande, fig. 4.1) con conseguente classificazione del tipo di argilla e caratteristiche fisiche.

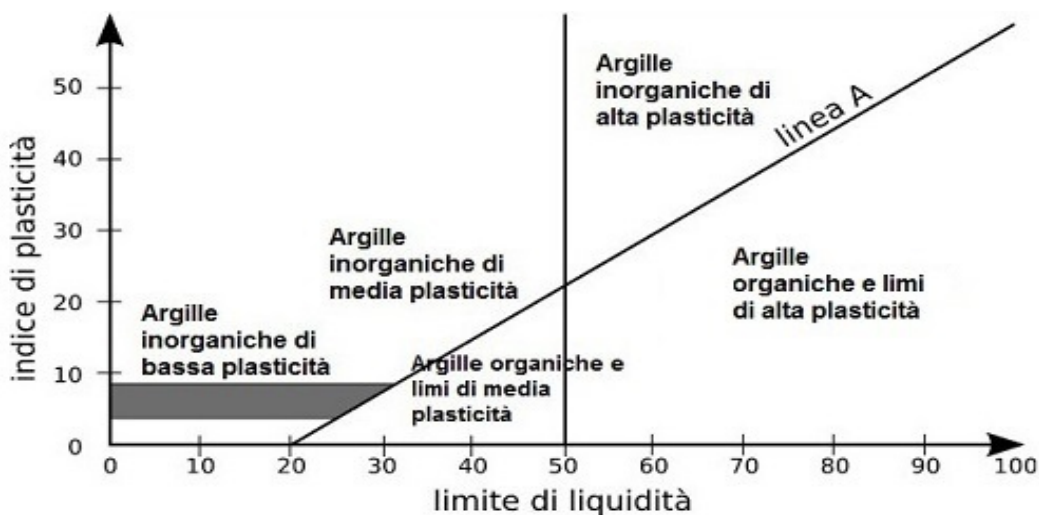


Figura 4.1: Carta di plasticità di Casagrande.

Contenuto d'acqua naturale

Il contenuto naturale d'acqua di un campione di terreno rappresenta la determinazione più semplice e più comunemente effettuata in laboratorio. Tale indagine porta ad un primo riconoscimento del materiale in oggetto e la sua determinazione permette di discriminare il terreno in base alla litologia. La prova viene effettuata mediante comparazione tra i pesi di un campione allo stato naturale e dopo essiccazione a 110°C in stufa.

Prova di costipamento Proctor (AASHTO modificato)

In alcune applicazioni ingegneristiche, può manifestarsi talvolta la necessità di migliorare le caratteristiche del terreno, sia nelle sue condizioni naturali in sito, sia quando esso è impiegato come materiale da costruzione (per esempio per dighe, rilevati, terrapieni, ecc...). Le prove Proctor sono prove di tipo meccanico nelle quali il terreno è compattato con un pestello a caduta libera. L'attrezzatura per l'esecuzione della prova è costituita da un cilindro metallico di dimensioni standard dotato di un collare rimovibile e da un pestello di diametro pari alla metà di quello del cilindro e di peso prefissato. In relazione alle caratteristiche dell'apparecchiatura e alle modalità di esecuzione, le prove Proctor si distinguono in "standard" e "modificata". L'energia di costipamento della prova modificata, che viene eseguita soprattutto per terreni di sottofondo e materiali per pavimentazioni stradali, è superiore a quella della standard. La prova Proctor viene eseguita disponendo a strati una certa quantità di terreno (preventivamente essiccata e ribagnata ad umidità nota) nel cilindro e compattandola con il pestello per un numero prefissato di colpi (25 per la standard e 56 per la modificata). L'operazione viene ripetuta per un certo numero di strati (3 per la standard e 5 per la modificata) fino a riempire il cilindro poco al di sopra dell'attaccatura con il collare. Successivamente viene rimosso il collare, livellato il terreno in sommità, pesato il tutto e determinato il contenuto d'acqua reale, prelevando una porzione di terreno dal cilindro e seccandola in forno. Mediante il peso P ed il volume V (noti), si ricava il peso di volume γ_e e, avendo determinato il contenuto d'acqua, si può ricavare il peso di volume del secco γ_d ovvero la densità secca, determinando il rapporto umidità/densità ottimale del campione.

Indice di portanza CBR (California Bearing Ratio)

L'indice di portanza CBR è il rapporto, espresso in percentuale, fra il carico necessario a far penetrare un pistone di dimensioni normate all'interno di un provino confinato in una fustella metallica ed un carico di riferimento. L'indagine CBR è utile per valutare la capacità portante del terreno e fornisce l'indice di portanza CBR, che viene utilizzato per il dimensionamento degli strati di fondazione e di base delle pavimentazioni stradali. La metodologia per la determinazione dell'indice CBR si dimostra molto più flessibile e di facile attuazione rispetto alle altre prove di penetrazione e può essere realizzata su tutti i tipi di terreno, su campioni indisturbati, su campioni naturali e compattati. L'attrezzatura principale per eseguire la prova consiste in una serie di fustelle standardizzate, un martinetto, una cella di carico per la misura della forza applicata, un pistone di avanzamento avente diametro 49,5 mm, un comparatore centesimale da 50 mm ed una serie di sovraccarichi circolari standardizzati. La prova consiste nel misurare i valori di penetrazione e schiacciamento all'anello dinamometrico. I valori della penetrazione e delle rispettive pressioni vengono registrati ad intervalli regolari e riportati in grafico.

Capitolo 5

Esecuzione delle prove

Le prove di laboratorio sono state eseguite per caratterizzare due tipi di terreni, un misto granulare prelevato nell'azienda **Pattarini srl** a Marengo di Marmirolo in provincia di Mantova, terreno utilizzato per creare i sottofondi di strade asfaltate, e un terreno naturale argilloso prelevato presso il cantiere della variante di valico - lotto 0 - Barberino del Mugello. Successivamente sono state eseguite le stesse prove su miscele dei due terreni a percentuali variabili al naturale, con la sola aggiunta di calce idraulica e con l'aggiunta di calce idraulica e sali inorganici per verificare il miglioramento delle prestazioni meccaniche e il contenuto massimo di argilla oltre il quale la "ricetta" di una strada in terra battuta con tecnologia eco compatibile risulta inefficiente. Le miscele di misto granulare/argilla sono state fatte in rapporto 90/10, 70/30 e 50/50.

Preparazione dei campioni

Analisi granulometrica per setacci: Il materiale viene pesato e messo a bagno per 24 ore. Passato questo periodo viene lavato con acqua, separando la parte fine passante al setaccio ASTM 200 (0,075 mm). Il passante verrà utilizzato per la prova di sedimentazione mentre il trattenuto viene seccato in forno per 24 ore. Successivamente viene riversato in una serie di setacci con larghezza delle maglie via via decrescente da 75 mm a 0,075 mm e fatto vibrare meccanicamente pesando il trattenuto ad ogni maglia (fig. 5.1).



Figura 5.1: Setacci nell'agitatore meccanico.

Analisi granulometrica per sedimentazione: La modalità di preparazione dei campioni consiste nel seccare il materiale lavato in precedenza e passante all'ultimo setaccio (0,075 mm), prelevare 50 g e porlo in un beker con 125 g di soluzione anti flocculante lasciandolo riposare per 24 ore. Trascorso questo periodo si frulla la soluzione per disaggregare al meglio le particelle e si riversa il tutto in un cilindro graduato riempito con acqua distillata per un volume totale di 1 litro, si inserisce il densimetro e si leggono i valori a intervalli di tempo standard. Durante tutta la durata della prova il cilindro è posto in una vasca con acqua a temperatura controllata (fig. 5.2).



Figura 5.2: Vasca a temperatura controllata, cilindri graduati e frullatore necessari per la prova di sedimentazione.

Limiti di consistenza di Atterberg: La preparazione dei campioni prevede che si prelevi una quantità sufficiente di materiale, precedentemente seccato, passante al setaccio ASTM 40 (0,425 mm). In seguito viene bagnato con acqua distillata e mescolato con una spatola per rendere omogeneo il campione. Una parte della miscela viene poi disposta sul cucchiaio di Casagrande (fig. 5.3) dove viene praticato un solco. Il cucchiaio viene montato sull'apparecchio di prova costituito da una base e da una manovella; ruotando quest'ultima il cucchiaio viene sollevato e lasciato poi cadere da un'altezza costante; si contano i colpi necessari a far richiudere il solco per 13 mm di lunghezza. La prova non varia con campioni addizionati con calce idraulica, i provini però, vengono mescolati con il legante, inumiditi e lasciati maturare per 7 giorni prima di essere utilizzati per il test.



Figura 5.3: Cucchiaio di Casagrande.

Costipamento AASHTO modificato: La procedura utilizzata per il confezionamento dei provini vuole riprodurre al meglio l'ordine e i tempi delle lavorazioni in sito, in modo da ottenere risultati maggiormente attendibili ed aderenti alla realtà. Il materiale è stato essiccato in forno; sono stati prelevati 5 campioni da 5000 g e bagnati con acqua in quantità nota e crescente in modo da dare diversi gradi di umidità ai diversi campioni. In seguito le fustelle contenenti il materiale sono state inserite nel macchinario di prova e compattate secondo norma (fig. 5.4). Una parte del materiale compattato viene pesato e messo in forno per conoscere l'umidità reale al momento della compattazione. Il campione nella fustella viene livellato e pesato in modo da ricavare il peso di volume sia umido sia secco. Derivando il grafico si ricava l'umidità ottima del terreno nella quale si ottiene un' addensamento migliore. I campioni miscelati con calce, o con calce e i sali inorganici, sono rimasti a maturare per 24 ore prima di eseguire la prova, in modo da permettere sia alla calce che al prodotto di attivare le loro proprietà.



Figura 5.4: Compattatrice e fustelle per la prova Proctor.

Indice di portanza CBR: In questa tesi l'indice di portanza è stato misurato solamente sui campioni compattati all'umidità ottima mediante prova Proctor. I provini per la determinazione dell'indice CBR possono essere testati nella pressa (fig. 5.5) subito dopo compattazione (indice di portanza istantanea IPI) o in seguito a compattazione ed imbibizione per 96 ore, in modo da simulare una completa saturazione del terreno (indice di portanza post-saturazione). Durante le 96 ore sul provino in post-saturazione viene posto un comparatore che registra il rigonfiamento in mm causato dall'imbibizione in acqua. Prima di eseguire la prova su campioni miscelati con calce, o miscelati con calce e i sali inorganici, il provino è rimasto a stagionare per 7 giorni, mantenendo l'umidità costante, per poi essere messo a saturazione per le 96 ore.



Figura 5.5: Pressa per la determinazione dell'indice di portanza CBR.

Risultati

ANALISI GRANULOMETRICA [ASTM D422-63 (R 2007)]

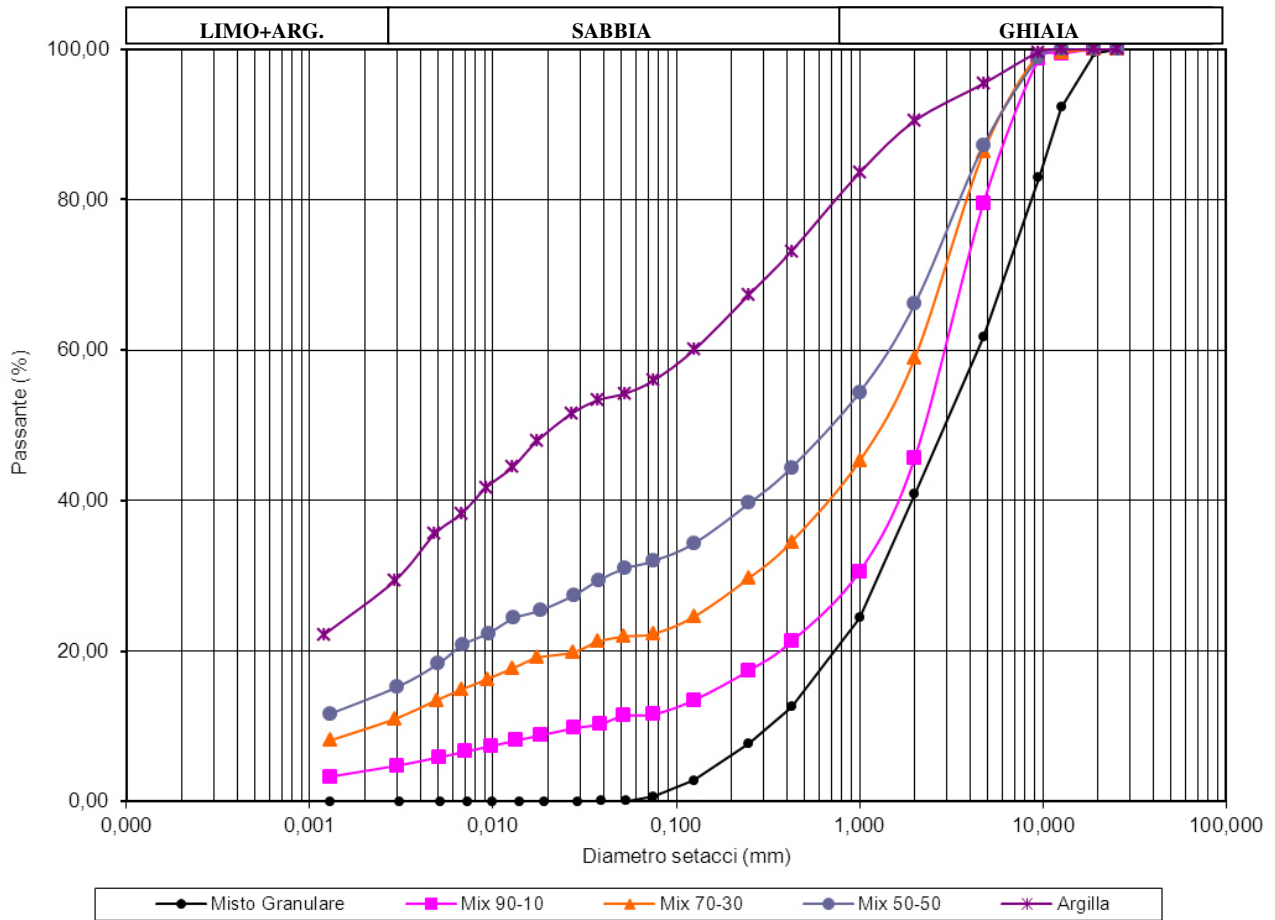


Figura 5.6a: Grafico della variazione della curva granulometrica in funzione dell'aumento di percentuali di argilla.

Nel grafico (fig. 5.6a) si nota che aggiungendo argilla in percentuali crescenti (10 %, 30%, 50%) la curva granulometrica si modifica da un modello uniforme costituito da ghiaia e sabbia del misto granulare ad uno ben gradato dell'argilla con le tre miscele nel mezzo. I dati sono riportati in figura 5.6b.

MISTO GRANULARE		MIX 90-10		MIX 70-30		MIX 50-50		ARGILLA	
Φ Setacci	% Pass.	Φ Setacci	% Pass.	Φ Setacci	% Pass.	Φ Setacci	% Pass.	Φ Setacci	% Pass.
(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
25,400	100,00	25,400	100,00	25,400	100,00	25,400	100,00	25,400	100,00
19,050	99,53	19,050	100,00	19,050	100,00	19,050	100,00	19,050	100,00
12,700	92,32	12,700	99,42	12,700	99,64	12,700	100,00	12,700	100,00
9,500	82,95	9,500	98,72	9,500	99,43	9,500	98,90	9,500	99,64
4,750	61,74	4,750	79,58	4,750	86,36	4,750	87,21	4,750	95,45
2,000	40,95	2,000	45,67	2,000	58,92	2,000	66,13	2,000	90,48
1,000	24,38	1,000	30,57	1,000	45,27	1,000	54,39	1,000	83,59
0,425	12,53	0,425	21,26	0,425	34,52	0,425	44,39	0,425	73,17
0,25	7,68	0,25	17,43	0,25	29,72	0,25	39,66	0,25	67,41
0,125	2,78	0,125	13,48	0,125	24,56	0,125	34,31	0,125	60,04
0,075	0,68	0,075	11,57	0,075	22,29	0,075	31,97	0,075	55,97
0,0536	0,63	0,0518	11,39	0,0518	21,94	0,0523	30,97	0,0523	54,23
0,0392	0,58	0,0386	10,29	0,0373	21,24	0,0379	29,45	0,0373	53,34
0,0290	0,52	0,0279	9,74	0,0273	19,82	0,0277	27,42	0,0268	51,56
0,0192	0,44	0,0183	8,82	0,0175	19,11	0,0181	25,39	0,0175	48,00
0,0139	0,40	0,0133	8,09	0,0128	17,70	0,0130	24,37	0,0128	44,45
0,0100	0,37	0,0097	7,35	0,0093	16,28	0,0094	22,34	0,0092	41,78
0,0073	0,32	0,0070	6,62	0,0067	14,87	0,0068	20,82	0,0067	38,22
0,0052	0,28	0,0051	5,88	0,0049	13,45	0,0050	18,28	0,0048	35,56
0,0031	0,22	0,0030	4,78	0,0029	10,97	0,0030	15,23	0,0029	29,33
0,0013	0,17	0,0013	3,31	0,0013	8,14	0,0013	11,68	0,0012	22,22

Figura 5.6b: Dati rilevati nell'analisi granulometrica per disegnare il grafico.

LIMITI DI CONSISTENZA DI ATTERBERG [(ASTM D4318-10)]

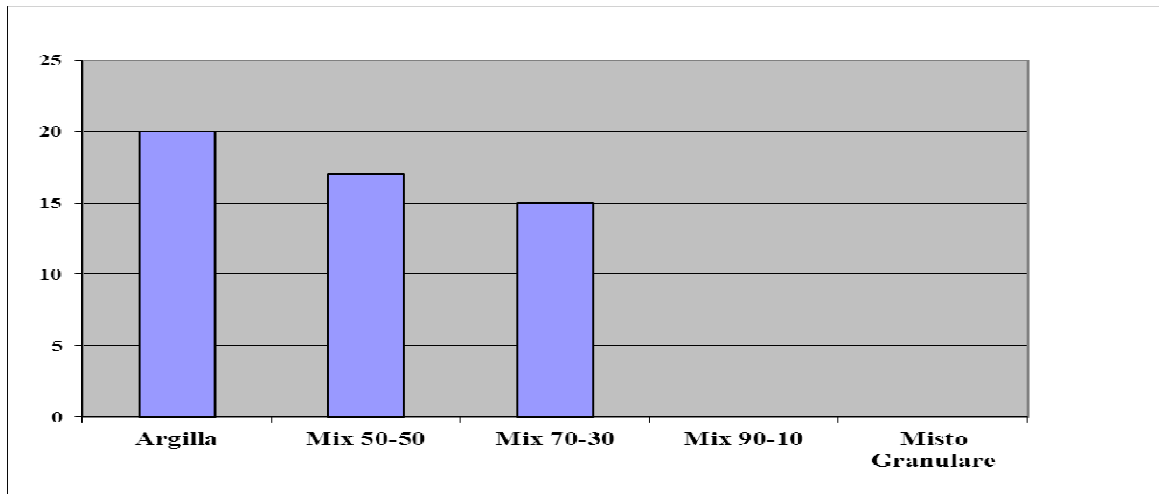


Figura 5.7a: Grafico con la variazione dell'indice plastico dei campioni al naturale.

Il grafico indica i diversi valori di indice plastico dei materiali al naturale. Si nota che per i campioni di misto granulare e miscela 90/10 non è stato possibile ricavare i valori di limite liquido, limite plastico e indice plastico in quanto il materiale è risultato non plastico. I dati sono in figura 5.7b.

Classificazione AASHTO CNR UNI 10006 dei campioni analizzati:

- Misto granulare: A-1-a Ghiaia con sabbia
- Mix 90/10: A-1-a Ghiaia con sabbia
- Mix 70/30: A-2-6 Ghiaia e sabbia limosa o argillosa
- Mix 50/50: A-2-7 Ghiaia e sabbia limosa o argillosa
- Argilla: A-6 Argille

MATERIALE	IP
Argilla	20
Mix 50-50	17
Mix 70-30	15
Mix 90-10	n.p.
Misto Granulare	n.p.

Figura 5.7b: Dati per la costruzione del grafico degli indici di plasticità al naturale.

I limiti di consistenza sono stati calcolati anche sulle miscele Mix 70-30 e Mix 50-50 in seguito a miscelazione con calce al 1%, 2% e 3% per verificare la diminuzione della plasticità(fig. 5.8a e 5.8b):

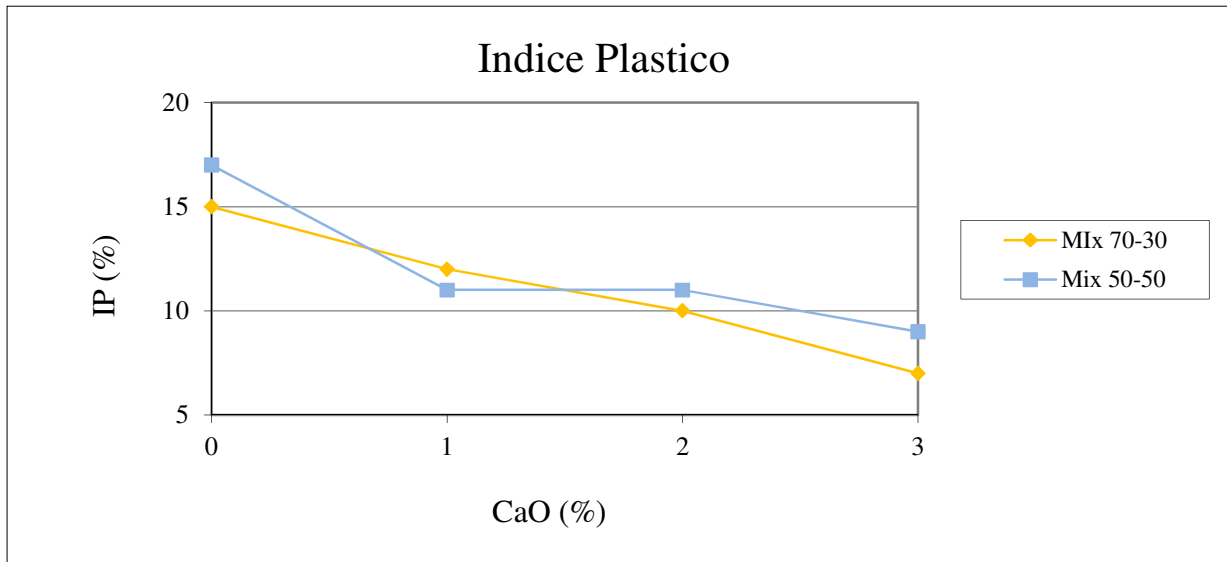


Figura 5.8a: Variazione dell'indice plastico delle miscele Mix 70-30 e Mix 50-50 con l'aggiunta di calce idraulica in percentuali diverse. Si noti che più calce viene aggiunta più si abbassa la plasticità del materiale.

Mix 50-50

IP(%)	CaO (%)
17	0
11	1
11	2
9	3

Mix 70-30

IP(%)	CaO (%)
15	0
12	1
10	2
7	3

Figura 5.8b: Variazione dell'indice plastico del materiale con l'aggiunta di calce.

Nel campione Mix 50-50 si nota che l'aggiunta di calce all' 1% e al 2% non cambia l'indice plastico. Questo comportamento è tipico di materiali argillosi in quanto la variazione di un solo punto percentuale in calce può non essere significativo per la loro plasticità. Passando al 3% di calce invece la curva cambia, abbassando l'indice plastico.

PROVA PROCTOR DI COSTIPAMENTO MODIFICATO [(C.N.R. B.U. A. XII N.69)]

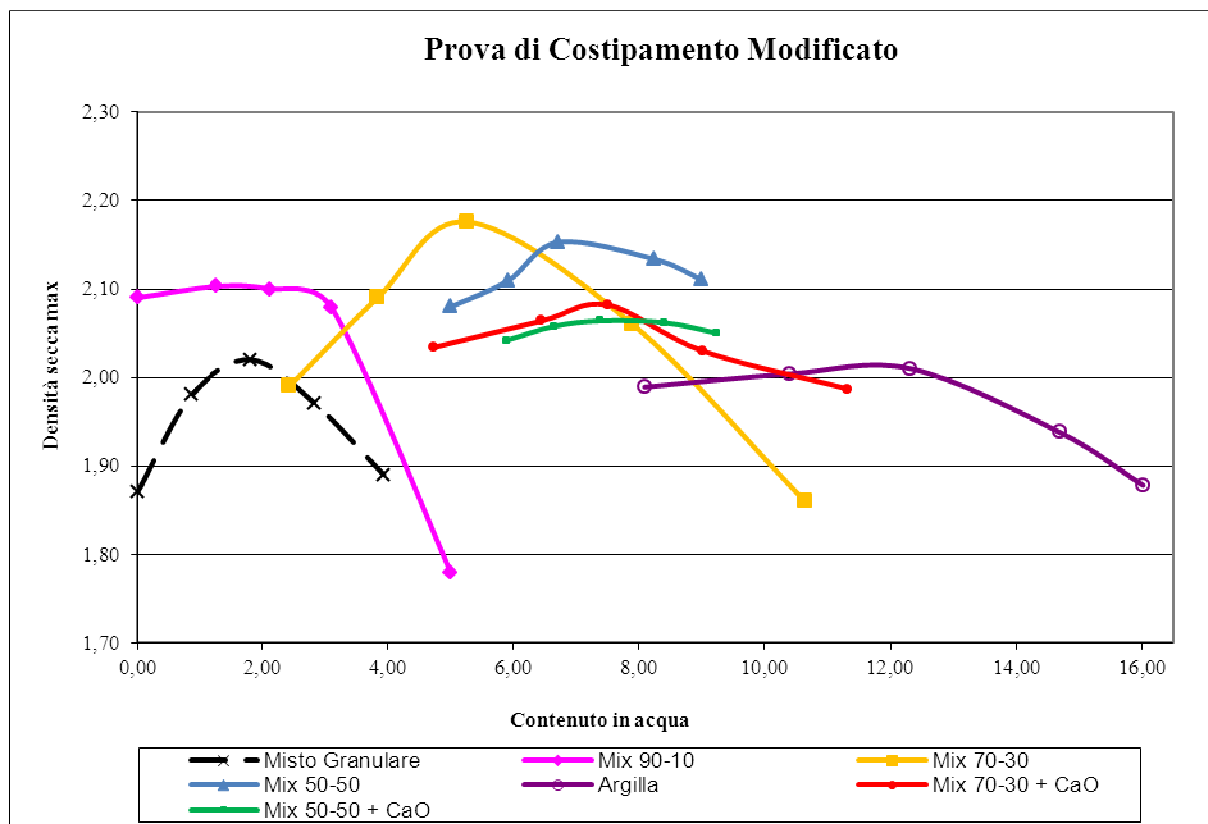


Figura 5.9a: Grafico delle curve proctor per i 5 campioni testati.

Il grafico (fig. 5.9a) mostra le curve di costipamento dei 5 campioni. Il massimo della curva rappresenta l'umidità ottima del campione e conseguente migliore addensamento. Il campione con prestazioni migliori è la miscela 70/30 con densità secca di 2.18 kg/m^3 e umidità ottima di 5.51%. Questo permette di dire che il migliore addensamento del materiale miscelato si ha quando il misto granulare contiene il 30% di materiale fine appartenente ai limi e alle argille, in quanto la parte fine permette di riempire i vuoti. Si nota inoltre dal grafico che i campioni miscelati con calce idraulica spostano il top della curva verso un maggior contenuto d'acqua e verso una più bassa densità secca. Questo dipende dal fatto che la calce tende ad assorbire acqua e il suo peso di volume è basso. Dati in figura 5.9b.

Misto Granulare		Mix 90-10		Mix 70-30		Mix 50-50		Argilla		Mix 70-30 + CaO		Mix 50-50 + CaO	
W(%)	gd	W(%)	gd	W(%)	gd	W(%)	gd	W(%)	gd	W(%)	gd	W(%)	gd
0,00	1,87	0,00	2,09	2,44	1,99	5,01	2,08	8,09	1,99	4,74	2,03	5,90	2,04
0,87	1,98	1,28	2,10	3,84	2,09	5,91	2,11	10,39	2,00	6,45	2,06	6,66	2,06
1,83	2,02	2,13	2,10	5,27	2,18	6,72	2,15	12,32	2,01	7,50	2,08	7,39	2,06
2,85	1,97	3,11	2,08	7,90	2,06	8,23	2,13	14,69	1,94	9,01	2,03	8,41	2,06
3,94	1,89	5,01	1,78	10,64	1,86	8,99	2,11	16,02	1,88	11,31	1,99	9,24	2,05

Figura 5.9b: Dati sperimentali per la determinazione delle curve di costipamento.

INDICE DI PORTANZA CBR [CNR UNI 10009]

L'indice di portanza CBR è stato ricavato per i campioni Mix 70-30 e Mix 50-50 in quanto lo studio proposto vuole verificare che il prodotto di sali inorganici naturali agisca su terreni con buona percentuale di parte fine. Le miscele sono state testate in condizioni di post-saturazione e nelle seguenti modalità:

- al naturale;
- con l'aggiunta di calce al 3%;
- con l'aggiunta di calce in percentuali crescenti (1%, 2%, 3%) e i sali inorganici naturali.

Questo procedimento è finalizzato a verificare lo scopo del lavoro di tesi, ovvero determinare se il prodotto migliora le caratteristiche meccaniche della miscela e se agisce anche con quantità considerevoli di materiale fine.

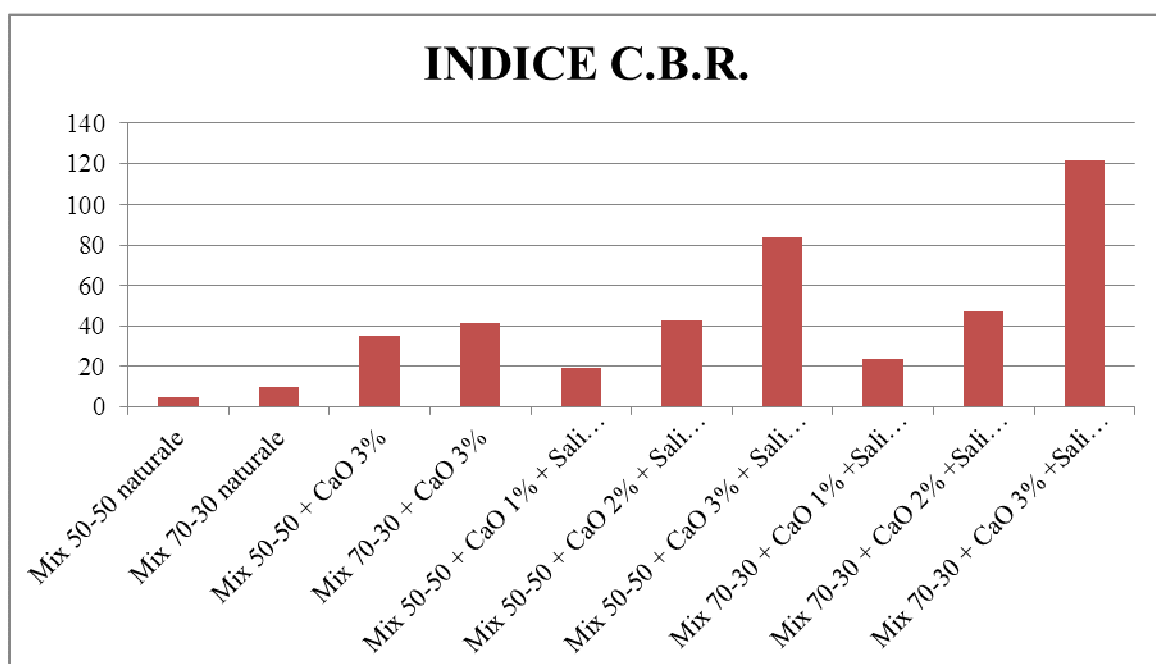


Figura 5.10: Variazioni dell'indice CBR delle miscele al naturale, con l'aggiunta di calce al 3% e con l'aggiunta di percentuali variabili di calce e sali inorganici.

Dal grafico in fig. 5.10 si nota che, nell'indice di portanza CBR delle miscele, avviene un primo incremento dovuto all'aggiunta di calce idraulica in ragione del 3%. Aggiungendo i sali inorganici naturali, a parità di contenuto d'acqua e percentuale di calce, l'indice CBR subisce un ulteriore considerevole incremento (fig. 5.11). Sempre osservando il grafico in figura 5.10, confrontando il valore CBR delle miscele con sola calce idraulica pari al 3% e delle miscele con calce idraulica al 2% e i sali inorganici, si può dire che l'azione del prodotto naturale permette di risparmiare un punto percentuale di calce idraulica, mantenendo le prestazioni meccaniche invariate. Inoltre questi sali riescono ad agire anche con quantità di materiale argilloso pari al 50% dell'intera miscela, nonostante le prestazioni meccaniche migliori si riscontrino con il 30% di fini.

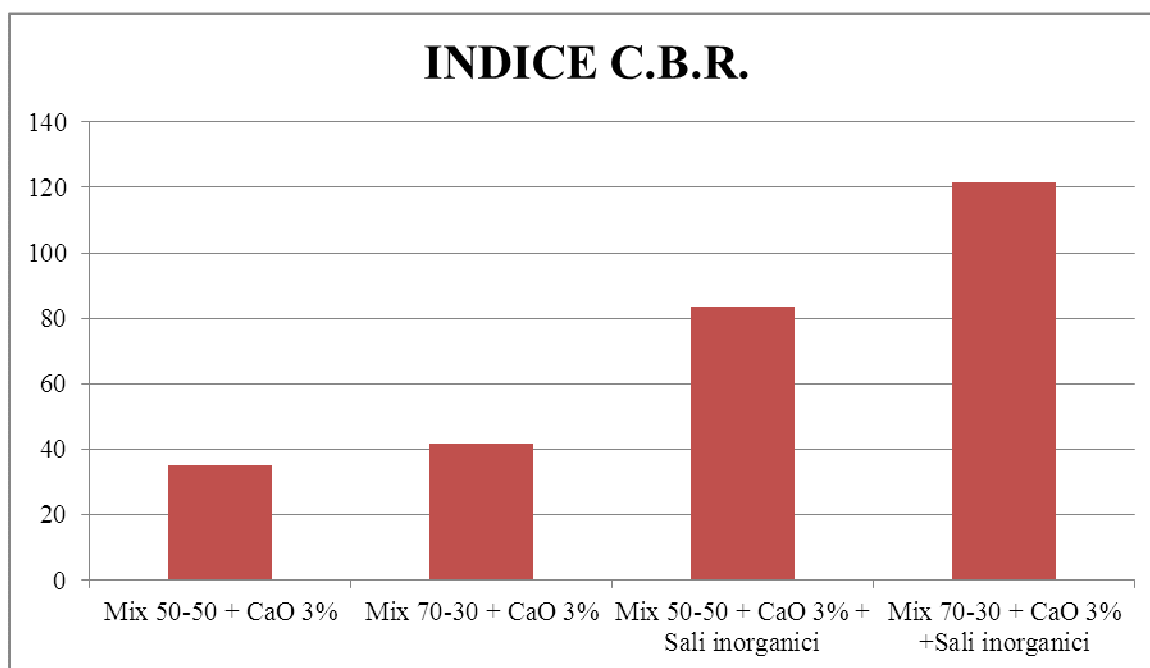


Figura 5.11: Variazione dell'indice CBR a parità di contenuto d'acqua e percentuale di calce idraulica.

La figura 5.11 permette di dire che l'aggiunta del prodotto eco compatibile incrementa l'indice CBR e, di conseguenza, migliora le prestazioni meccaniche della miscela di quasi il triplo. L'aggiunta del prodotto permette di realizzare strati di usura in terra battuta ecologici e con capacità portante significativamente buona.

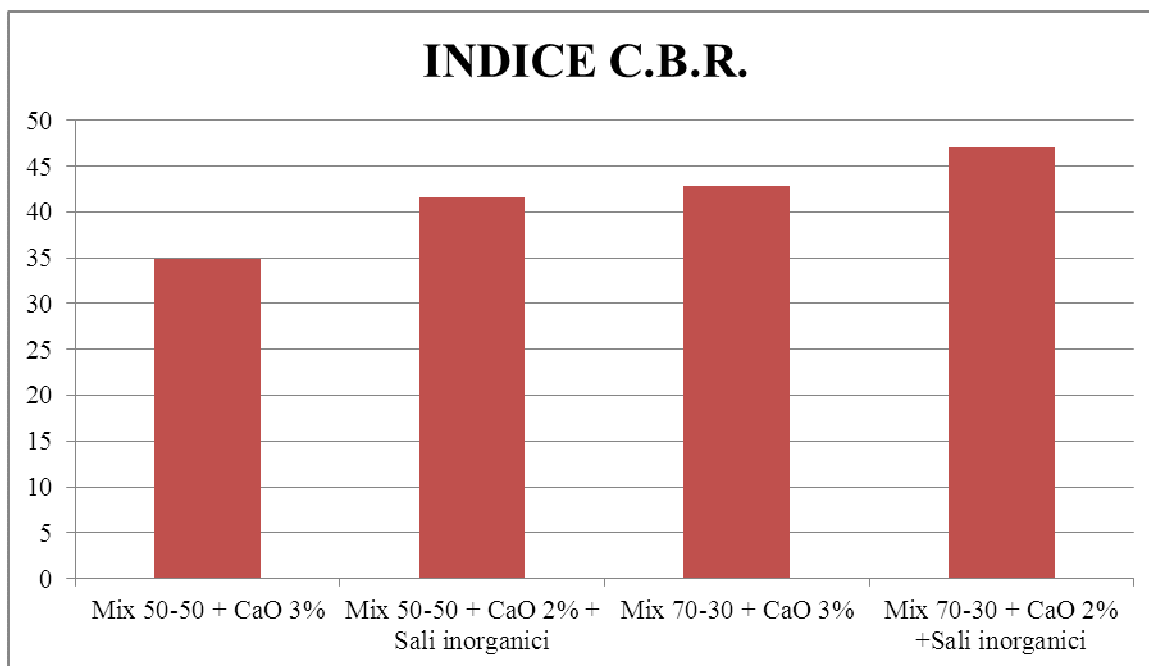


Figura 5.12: Incrementi dell'indice CBR tra i campioni con CaO al 3% e al 2% con sali inorganici.

La figura 5.12 mostra come le miscele con l'aggiunta di calce idraulica al 2% e sali inorganici migliorino la capacità portante rispetto alle miscele di sola calce idraulica al 3%, facendo risparmiare un punto percentuale di calce aggiungendo la minima quantità di prodotto eco compatibile (soluzione 1 lt di prodotto su circa 80-100 lt di acqua per m³ di conglomerato terroso).

Capitolo 6

Conclusioni

Lo studio effettuato si pone l'obiettivo di "progettare" la miscela ottimale per il confezionamento di un conglomerato terroso, costituito da un materiale arido definito "stabilizzato di cava", amalgamato con un legante idraulico (nello studio specifico calce idraulica) ed un prodotto eco compatibile in grado di migliorarne profondamente le caratteristiche meccaniche e prestazionali in genere, per la realizzazione di strade e pavimentazioni in terra "stabilizzata", evitando gli inconvenienti delle stesse realizzate in terra semplicemente battuta, nell'ottica del risparmio economico e ad impatto ambientale/paesaggistico zero.

A tale scopo, sono stati caratterizzati, mediante prove geotecniche di laboratorio, un terreno in misto granulare, che viene normalmente utilizzato per costruire rilevati stradali successivamente ricoperti con uno strato di usura di tipo bituminoso, e un terreno argilloso prelevato per creare le miscele a diverse percentuali di argilla.

Una volta esaminati i campioni nelle diverse combinazioni, è stato determinato il campione con le prestazioni meccaniche più soddisfacenti, tramite prova Proctor e indice di portanza CBR.

Svolgendo le stesse prove anche nei confronti della miscela risultata più plastica, si è voluto testare il *range* di azione del prodotto eco-compatibile, riscontrando ottime *performance* anche su questo tipo di materiale.

Le analisi di laboratorio hanno dimostrato che i conglomerati terrosi confezionati con questa tecnologia, totalmente ecologica, forniscono alte prestazioni meccaniche e di conseguenza potranno essere adatti a strade e pavimentazioni che, dal punto di vista geotecnico, saranno in grado di superare le prestazioni degli stessi conglomerati legati con sola calce idraulica.

Una strada realizzata con questa tecnologia, manterrà il colore del terreno naturale prima del processo di lavorazione e, alla luce dei risultati ottenuti in laboratorio, potrà assicurare ottimi risultati nel tempo dell'opera finita, eliminando o riducendo in modo drastico gli inconvenienti tipici di queste opere, quali polvere, buche e ormaie con conseguente ristagno d'acqua.

La quantità di legante da utilizzare dovrà essere riferita alle specifiche di capitolato, tenendo presente che anche la miscela con calce al 2 % e i sali inorganici (soluzione 1 lt di prodotto su circa 80-100 lt di acqua per m³ di conglomerato terroso) è risultata con caratteristiche più soddisfacenti della stessa legata con calce idraulica al 3%, facendone risparmiare un punto percentuale per m³.

L'utilizzo di materiali eco-compatibili negli ambienti più variegati è al giorno d'oggi oggetto di studi e ricerche approfondite, tutte rivolte al rapido raggiungimento di una civiltà libera da agenti inquinanti o il più possibile tollerabili e non nocivi nei confronti delle specie conviventi sul nostro pianeta, umani compresi.

Purtroppo, anche al giorno d'oggi, per motivi di abitudine consolidata, praticità o ignoranza, si ricorre alla costruzione di strade e pavimentazioni stradali in genere, utilizzando materiale bituminoso anche in zone dove la salvaguardia dell'ambiente dovrebbe essere prioritaria, dimenticando l'orribile impatto visivo e anti ecologico che una strada di questo tipo provoca.

Piste ciclabili, percorsi pedonali, parchi giochi, percorsi natura, impianti sportivi, stradelli boschivi, ecc., sono luoghi in cui le strade non devono sostenere il traffico pesante.

Il ricorso a metodi costruttivi più ecologici e gradevoli esteticamente, per spostarsi nei luoghi sopraccitati, potrebbe essere un piccolo passo, ma importante, per dare una mano all'ambiente e a noi stessi per un futuro migliore.



Figura 6.1: Strada in terra battuta, stabilizzata con la tecnologia eco-compatibile di sali inorganici (Moniga del Garda – Brescia).

Bibliografia

- [1] Sterpi E., Le Pavimentazioni, Costruzione di Infrastrutture per i trasporti 1;
- [2] Bollettino 326 pubblicato da “National lime association”, Stabilizzazione a calce;
- [3] Appunti del corso di Scienze Geologiche dell’Università di Bologna, Meccanica delle terre e delle rocce, Anno Accademico 2009/2010;
- [4] Materiale divulgativo dell’azienda Azichem srl di Goito in provincia di Mantova;

Normativa di riferimento

- [5] Norma di riferimento ASTM D422-63 (R 2007) – Analisi granulometrica – Edizione 2007;
- [6] Norma di riferimento ASTM D4318-10 – Determinazione dei limiti di consistenza di una terra o di Atterberg – Edizione 2010;
- [7] Norma di riferimento UNI CEN ISO/TS 17892-1 – Umidità di una terra – Edizione 2005;
- [8] Norma di riferimento C.N.R. B.U. A. XII N.69 – Prova di costipamento di una terra – Edizione 30/11/1978
- [9] Norma di riferimento CNR UNI 10009 – Indice di portanza CBR di una terra – Edizione 1964;

Siti internet utilizzati

www.stabilsana.it

www.dimms.eu

www.geoconsultlab.it

www.unicalce.it

www.stradeanas.it

www.associazioneaurelia.it