



Costipamento in laboratorio di miscele non legate per usi stradali e ferroviari e confronto tra procedure di costipamento

Laboratory compaction of unbound mixtures for road and rail uses and comparison of compaction procedures

Donato CIAMPA(*)

Maurizio DIOMEDI(*)

Saverio OLITA(*)

Umberto PETRUCCELLI(*)

Pietro VUONO(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.12.2023.ART.1>)

Sommario - La vita utile di una sovrastruttura stradale e ferroviaria è fortemente condizionata dalla capacità portante del sottofondo. L'azione di addensamento del terreno è un'operazione di rilevanza assoluta, perché oltre al comfort di marcia, garantisce la stabilità e l'assenza di cedimenti, ovvero la funzionalità della sovrastruttura nella fase di esercizio.

Spesso i terreni che si riscontrano durante la realizzazione di un'infrastruttura viaria non sono idonei a garantire, nel tempo, le caratteristiche di portanza necessarie ad assicurare una soddisfacente durabilità e regolarità dell'opera stessa. Negli ultimi anni si è sempre più diffuso l'impiego di inerti derivanti dal riciclaggio dei rifiuti da Costruzione e Demolizione (C&D) sia per motivi economici, che di sostenibilità ambientale. Il presente studio si propone dunque di analizzare le procedure di costipamento di miscele di materiali naturali e/o riciclati da utilizzare per la costruzione di rilevati o fondazioni stradali e ferroviarie con idonee caratteristiche prestazionali. L'indagine sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio di Costruzioni Stradali dell'Università degli Studi della Basilicata. Sono state studiate numerose miscele, la cui composizione per cinque di esse è stata ottimizzata oltreché con la prova Proctor, con quella dinamico/impulsiva del Vibrating Hammer, che consente di imprimere al terreno sollecitazioni diverse rispetto a quelle tradizionali. I materiali indagati sono la pozzolana da sola e miscelata con il C&D, il terreno limo argilloso ed il misto granulare di cava (calcare). Atteso che l'efficacia del costipamento con il *Vibrating Hammer* dipende sia del tipo di materiale costipato che dal tempo di compattazione, gli autori han-

Summary - The service life of a road and rail superstructure is strongly affected by the bearing capacity of the subgrade. The action of thickening the soil is an operation of absolute importance, because in addition to ride comfort, it ensures stability and the absence of failure, i.e., the functionality of the superstructure during operation. Often, the soils encountered during the construction of a road infrastructure are not suitable to guarantee, over time, the bearing characteristics necessary to ensure satisfactory durability and regularity of the work itself. In recent years, the use of aggregates from recycling of construction and demolition waste (C&D) has become increasingly popular for both economic reasons and environmental sustainability. Therefore, this study aims to analyze the compaction procedures of mixtures of natural and/or recycled materials to be used for the construction of road and rail embankments or foundations with suitable performance characteristics. The experimental investigation was conducted at the Laboratory of Road Construction of the University of Basilicata. Numerous mixtures were studied, the composition of which for five of them was optimized in addition to the Proctor test, with the dynamic/impulsive Vibrating Hammer test, which allows different stresses to be imparted to the soil than traditional ones. The materials investigated are pozzolan alone and mixed with C&D, clay loam soil and granular quarry mix (limestone). Expecting that the effectiveness of compaction with the Vibrating Hammer depends on both the type of material compacted and the compaction time, the authors investigated the possibility of optimizing pozzolan and C&D mixtures. Specifically, they identified the compaction technique that allows the material to provide the best bearing

(*)Università della Basilicata- Scuola di Ingegneria - Potenza - Italia.

(*)Università della Basilicata - Scuola di Ingegneria - Potenza - Italia.

no indagato la possibilità di ottimizzare le miscele pozzolana e C&D. In particolare, hanno individuato la tecnica di costipamento che consente al materiale di fornire le migliori prestazioni di portanza e, con riferimento alla tecnica di compattazione impulsiva, hanno definito il tempo ottimale di costipamento.

Parole Chiave: Costipamento, Prova Proctor, *Vibrating Hammer*, C&D, Tempo di costipamento ottimale.

1. Introduzione

La compattazione del terreno di sottofondo e dello strato di fondazione è una fase importante della costruzione di un'infrastruttura viaria ed ha come obiettivo quello di aumentare il grado di incastro tra le particelle di terreno (o di aggregato), di minimizzare i vuoti e, dunque, di incrementare la densità. Tale operazione dipende, innanzitutto, dalla natura del terreno e dal contenuto d'acqua presente al suo interno, ma anche dall'energia e dalla modalità di costipamento [1].

Una compattazione non adeguata genera problemi strutturali del corpo stradale, dovuti a un suo improprio assestamento. Nello specifico, una scarsa compattazione dei terreni granulari favorisce la formazione di cedimenti eccessivi, specialmente quando si utilizza il metodo della compattazione per impatto invece della compattazione vibratoria [2][3].

In laboratorio la Prova Proctor è quella normalmente utilizzata per il costipamento del terreno. Occorre però evidenziare che essa imprime delle sollecitazioni, che possono presentare delle differenze non trascurabili rispetto a quelle sopportate dal terreno sia nella fase di costruzione ad opera dei rulli, sia durante la vita utile ad opera del traffico. Per questo motivo nel tempo, sono state sviluppate procedure di laboratorio alternative per costipare i terreni, come quella del *Vibrating Hammer*, che prevede l'impiego simultaneo di compattazione da impatto e da vibrazione (EN 13286-4, "Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrating hammer"). L'interesse per le nuove tecniche di costipamento si è parallelamente affiancato all'interesse verso le problematiche ambientali e, dunque, verso l'impiego di materiali alternativi.

Per tali motivi, questo studio descrive i risultati della costipazione tradizionale (Proctor) e di quella alternativa (*Vibrating Hammer*) sulle seguenti tipologie di terreni (anche miscelati tra loro): terreni naturali pozzolanici, terreni limo-argillosi, rifiuti da costruzione e demolizione (C&D), misto granulare di cava. Nello specifico gli autori propongono di valutare la risposta di diverse miscele ottimizzate, all'azione di costipamento con l'apparecchio Proctor e con il *Vibrating Hammer*.

Il C&D proveniente dalla costruzione, demolizione o ristrutturazione di opere civili ed edili, fino a qualche anno fa veniva considerato un costo per la società, in quanto destinato ad essere smaltito in discarica. Oggi invece in

performance and, with reference to the impulsive compaction technique, defined the optimal compaction time.

Key Words: Compaction, Proctor test, *Vibrating Hammer*, C&D, Optimal compaction time.

1. Introduction

Compaction of the subgrade soil and foundation layer is an important step in the construction of a road infrastructure and aims to increase the degree of interlocking between soil (or aggregate) particles, minimize voids and, therefore, increase density. This depends, first and foremost, on the nature of the soil and the water content within it, but also on the energy and mode of compaction [1]. Inadequate compaction generates structural problems of the road body due to improper settlement. Specifically, poor compaction of granular soils promotes excessive subsidence, especially when the impact compaction method is used instead of vibratory compaction [2][3].

In the laboratory, the Proctor test is the one normally used for soil compaction. However, it must be emphasised that it imparts stresses, which may differ significantly from those borne by the soil both during the construction phase by road rollers and during the service life by traffic. For this reason, over time, alternative laboratory procedures have been developed to compact soils, such as the *Vibrating Hammer* procedure, which involves the simultaneous use of impact and vibration compaction (EN 13286-4, "Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrating hammer"). Interest in new compaction techniques went hand in hand with interest in environmental issues and, therefore, in the use of alternative materials. For these reasons, this study describes the results of traditional (Proctor) and alternative (*Vibrating Hammer*) compaction on the following soil types (also mixed with each other): natural pozzolanic soils, silt-clay soils, construction and demolition waste (C&D), granular quarry mix.

Specifically, the authors propose to evaluate the response of different optimised mixtures to the compaction action with the Proctor device and the *Vibrating Hammer*.

C&D material from the construction, demolition or renovation of civil and building works was until a few years ago considered a cost for society as it was destined to be disposed of in landfills. Today, around 78% of C&D waste in Italy is recycled and therefore, if properly mixed with other components, can be reused with considerable economic and environmental benefits.

Italia circa il 78% dei rifiuti C&D viene riciclato e pertanto, se opportunamente miscelato con altri componenti, può essere riutilizzato con notevoli benefici economici ed ambientali.

Gli aggregati riciclati possono sostituire quelli naturali da cava nelle costruzioni stradali e ferroviarie [4][5]. Difatti questi materiali, adeguatamente miscelati e compattati, esibiscono buone prestazioni, un modulo resiliente maggiore [6][7], minore deformazione permanente e sono meno suscettibili alle variazioni di umidità, rispetto ad un rilevato con presenza di materiale limoso/argilloso. In alcuni casi possono evidenziare anche proprietà di autocementazione [8][9].

2. Metodologia e Materiali

Il presente lavoro è stato sviluppato presso il Laboratorio di “Costruzioni Stradali” dell’Università degli Studi della Basilicata, secondo il piano sperimentale sintetizzato nello schema di Fig. 1.

In particolare, dopo aver definito e caratterizzato i materiali da impiegare, si sono ottimizzate numerose miscele, anche se per brevità solo alcune di esse vengono riportate nella presente memoria. I provini di ciascuna miscela sono stati costipati in parte con l’apparato Proctor ed in parte con il *Vibrating Hammer*.

2.1. Il materiale oggetto di analisi

In questa indagine sono stati impiegati terreni naturali pozzolanici e limo-argillosi, misti granulari naturali di cava e materiali riciclati. Tali materiali sono stati prelevati nella Regione Basilicata (sud Italia) nei comuni di Barile, Potenza e Pignola in provincia di Potenza (PZ). Nello specifico:

- terreno pozzolanico di Barile (PZ);
- terreno limo-argilloso della località Macchia Romana di Potenza;
- terreno misto granulare cava di Pignola (PZ);
- materiale riciclato C&D, fornito da una azienda Lucana.

La caratterizzazione del C&D è stata eseguita secondo la EN 13285 “Unbound mixtures-Specifications” che prevede l’analisi granulometrica e la classificazione dei vari componenti tramite cernita visiva. L’analisi granulometrica è stata effettuata secondo la EN 933-1 “Tests for geometrical properties of aggregates-Part 1: Determination of particle size distribution-Sieving method” e i limiti di Atterberg sono stati determinati con riferimento alla EN ISO 17892-

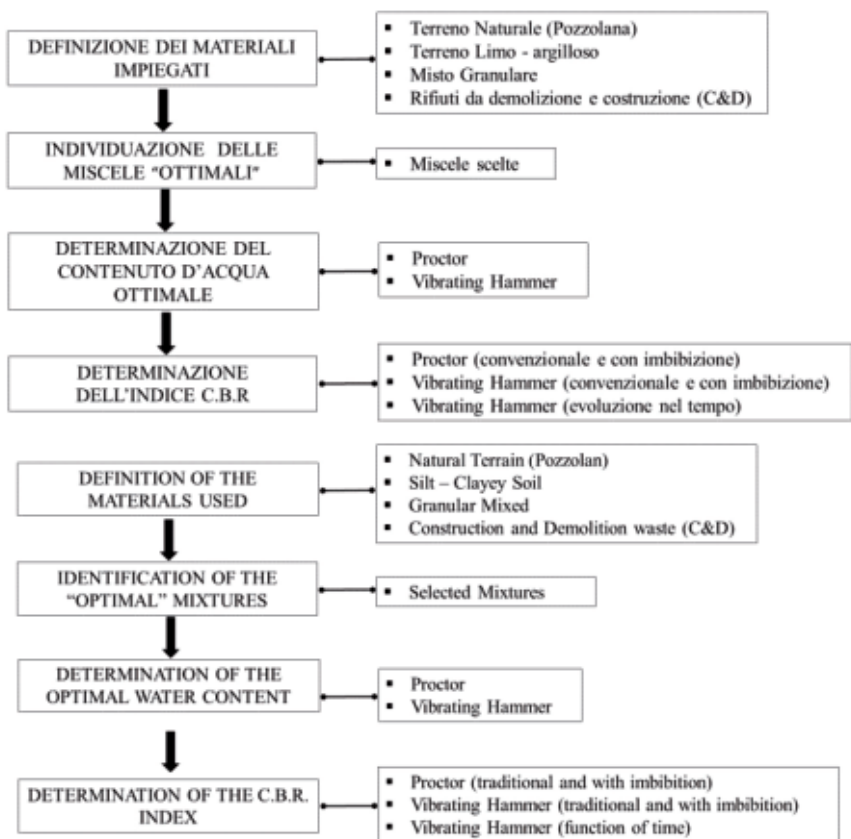


Figura 1 - Piano sperimentale.
Figure 1 - Experimental plan.

Recycled aggregates can replace natural quarried aggregates in road and railway construction [4][5]. In fact, these materials, properly mixed and compacted, exhibit good performance, a higher resilient modulus [6][7], less permanent deformation and are less susceptible to moisture variations, compared to an embankment with the presence of silty/clayey material. In some cases, they may also exhibit self-cementing properties [8][9].

2. Methodology and Materials

This work was developed at the Laboratory of Road Construction of the University of Basilicata, according to the experimental plan summarised in Fig. 1.

Specifically, after defining and characterizing the materials to be used, a number of mixtures were optimized, although for brevity only some of them are reported in this paper. The specimens of each mixture were compacted partly with the Proctor device and partly with the Vibrating Hammer.

2.1 The material under analysis

Natural pozzolanitic and silt-clay soils, natural granular mixed quarries and recycled materials were used in this re-

12 “Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil-Part 12: Determination of liquid and plastic limits”.

2.2. Analisi granulometrica e classificazione delle terre

Il primo passo per la caratterizzazione di questi materiali è la classificazione granulometrica, secondo le norme EN 12620 “Aggregates for concrete” e EN 933-1 (serie 71-40-25-10-15-2-0.42-0.063-fondello).

Il materiale riciclato in esame, della categoria dei rifiuti speciali da C&D “non pericolosi”, ha una composizione marcatamente eterogenea, costituita da calcestruzzo demolito, conglomerato bituminoso, materiali ceramici (laterizi, tegole), intonaco, terre e rocce da scavo. In Tabella 1 sono riportati i trattenuti dei vari materiali ai crivelli da 5 mm e 10 mm.

La eterogeneità della miscela di aggregati riciclati e le loro combinazioni conferiscono al materiale specifiche caratteristiche e proprietà fisico-meccaniche. Attraverso l’analisi diretta e le percentuali della Tab. 1, il C&D in questione si colloca nel prospetto A2 della norma EN 13285.

Tabella 1 – Table 1

Composizione della miscela di C&D dopo campionatura ai crivelli da 10 mm e 5 mm
C&D mixture composition after sampling at the 10 mm and 5 mm sieves

Componente Component	Trattenuto al Crivello 10 mm [%] Retained at 10 mm sieve[%]	Trattenuto alCrivello 5 mm [%] Retained at 10 mm sieve[%]
Aggregato Aggregate	42	48
Conglomerato Bituminoso Asphalt concrete	16	10
Intonaco Plaster	28	19
Laterizi Bricks	14	23

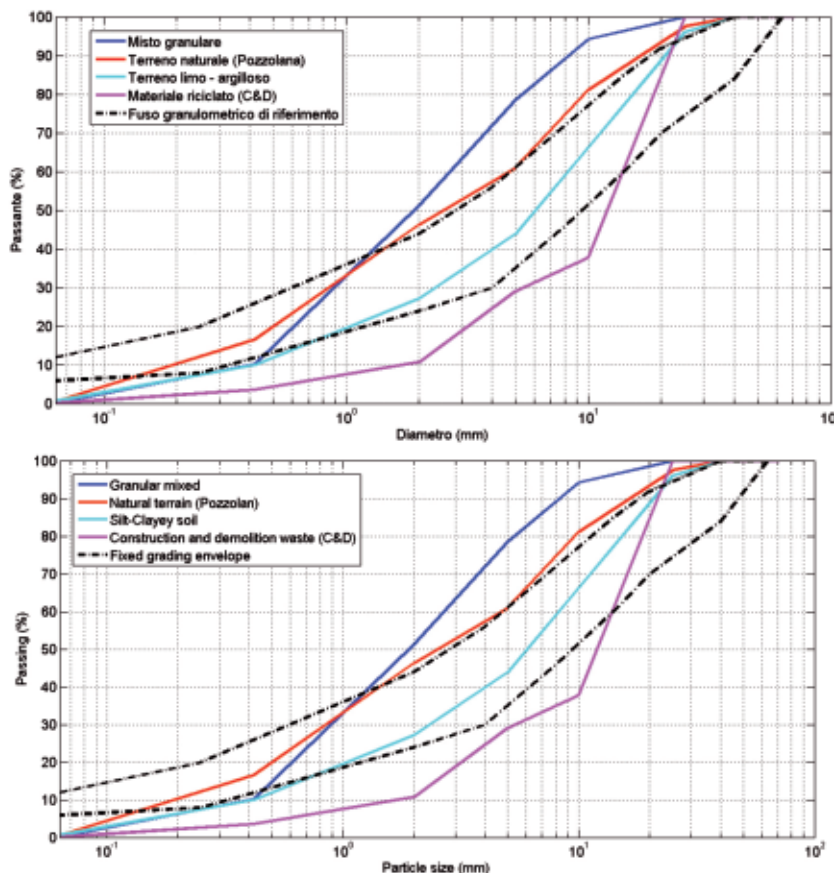


Figura 2 - Curva granulometrica per ciascun materiale impiegato.
Figure 2 - Particle size distribution for each material used.

search. These materials were taken in the Basilicata Region (southern Italy) in the territory of Barile, Potenza and Pignola. Specifically:

- pozzolanic soil from Barile (PZ);
- silt-clayey soil from the Macchia Romana locality of Potenza;
- mixed granular quarry soil from Pignola (PZ);
- recycled C&D material, supplied by a Lucanian company.

C&D characterization was performed according to EN 13285 “Unbound mixtures-Specifications,” which involves particle size analysis and classification of the various components by visual sorting.

Particle size analysis was carried out according to EN 933-1 “Tests for geometrical properties of aggregates-Part 1: Determination of particle size distribution-Sieving method,” and Atterberg limits were determined with reference to EN ISO 17892-12 “Geotechnical investigation and testing-Laboratory testing of soil-Part 12: Determination of liquid and plastic limits”.

2.2 Particle size analysis and classification of soils

The first step in the characterization of these materials is particle size classifica-

Nella Fig. 2 sono riportate le curve granulometriche dei materiali in esame, rapportate al fuso granulometrico tipico di uno strato di fondazione di infrastrutture stradali.

Si può osservare che la curva relativa al terreno naturale, nella parte superiore si trova leggermente al di fuori del fuso con sovrabbondanza di materiale grossolano e, analogamente, nella parte inferiore, mostra un deficit di materiale fino. La curva del misto granulare risulta essere completamente fuori dal fuso di riferimento, quella del terreno limo-argilloso è quasi totalmente contenuta all'interno del fuso e quella del materiale riciclato risulta per gran parte al di fuori del suddetto fuso.

Il passo successivo dello studio è stato quello della determinazione dei limiti di Atterberg. I risultati ottenuti sono sintetizzati in Tab. 2.

Solo per il terreno limo-argilloso è stato possibile determinare il limite liquido ed il limite plastico con valori rispettivamente pari a 45.45% e a 30.43% e di conseguenza ricavare l'indice di plasticità pari a 15.02%. Infatti gli altri materiali presi in esame sono tutti non plastici.

Al fine di valutarne all'impiego per la realizzazione di sottofondi e/o di fondazioni stradali, i materiali sono stati classificati in base alla norma UNI EN 11531-1.

Sulla base dei dati desunti in precedenza e dal riscontro con le norme di riferimento si può affermare che:

tion, according to EN 12620 "Aggregates for concrete" and EN 933-1 (71-40-25-10-15-2-0.42-0.063-pan).

The recycled material under consideration, from the category of "non-hazardous" special C&D waste, has a markedly heterogeneous composition, consisting of demolished concrete, asphalt, ceramic materials (bricks, tiles), plaster, and excavated soil and rock. Tab. 1 shows the retainages of the various materials at the 5 mm and 10 mm sieves.

The heterogeneity of the recycled aggregate mixture and their combinations give the material specific physical-mechanical characteristics and properties. Through direct analysis and the percentages in Tab. 1, the C&D in question is placed in schedule A2 of EN 13285.

Fig. 2 shows the particle size distributions of the materials under investigation, compared to the typical grading envelope of a road infrastructure foundation layer. It can be seen that the curve for the natural terrain is slightly outside the grading envelope at the top with an overabundance of coarse material, and similarly, at the bottom, it shows a deficit of fine material.

The curve of the granular mixture turns out to be completely outside the reference grading envelope, that of the silt-clayey soil is almost entirely contained within the grading envelope, and that of the recycled material is largely outside the grading envelope.

The next step in the study was to determine the Atterberg limits. The results obtained are summarised in Tab. 2.

Only for the silt-clayey soil it was possible to determine the liquid limit and the plastic limit with values of 45.45% and 30.43% respectively, and consequently to derive the plasticity index of 15.02%. In fact, the other materials examined are all non-plastic.

In order to assess their use in the construction of road substructures and/or foundations, the materials were classified according to EN 11531-1. Based on the above data and the comparison with the reference standards, it can be stated that:

- the natural pozzolanic soil belongs to group A1-b (gravelly-sandy soil), consisting mainly of coarse sand with a sieve pass of 0.063 of less than 25 % and a group index of 0;
- the silt-clayey soil belongs to group A7-5 (silt-clayey soil), with a predominance of fine sieve-passing 0.063 material greater than 35 % and group index ≤ 20 ;
- the granular mixture belongs to group A1-a (gravelly-sandy soil).

Tabella 2 – Table 2

Valori dei limiti di Atterberg per ciascun materiale impiegato
Atterberg limits for each material used

Tipologia Materiale Material Type	Limiti di Atterberg Atterberg Limits			Classificazione delle Terre Lands Classification
	Limite Liquido (LL) [%] Liquid Limit (LL) [%]	Limite Plastico (LP) [%] Plastic Limit (LP) [%]	Indice di Plasticità (IP) [%] Plasticity Index (IP) [%]	
Terreno Pozzolanic Pozzolanic Terrain	-	Non Plastico Non-Plastic	0.00	A 1-b(Terra Ghiaio-Sabbiosa) (Gravel-Sandstone)
C&D	-	Non Plastico Non-Plastic	0.00	
Terreno Limo Argilloso Silt Clayey soil	45.45	30.43	15.02	A 7-5 (Terra Limo-Argillosa) (Silt Clay soil)
Terreno Misto Granulare Mixed Granular Soil	-	Non Plastico Non-Plastic	0.00	A 1-a (Terra Ghiaio-Sabbiosa) (Gravel-Sandstone)

- il terreno naturale pozzolanico, appartiene al gruppo A1-b (terra ghiaio-sabbiosa), costituito in prevalenza da sabbia grossa con un passante al setaccio 0.063 inferiore al 25 % ed indice di gruppo pari a 0;
- il terreno limo-argilloso appartiene al gruppo A7-5 (terreno limo-argilloso), con prevalenza di materiale fine passante al setaccio 0,063 superiore al 35% ed indice di gruppo ≤ 20 ;
- il misto granulare appartiene al gruppo A1-a (terra ghiaio-sabbiosa).

2.3. Miscele e indagine sperimentale

Con i materiali caratterizzati in precedenza sono state preparate diverse miscele, rientranti nel fuso di Fig. 1 ed ottimizzate in termini di contenuto d’acqua per una compattazione ottimale. Tra esse gli autori hanno deciso di descrivere in questo studio le seguenti cinque miscele (Cfr. Fig. 3):

- Miscela 1 = 100% Pozzolana;
- Miscela 2 = 70% Pozzolana + 30% C&D;
- Miscela 3 = 50% Pozzolana + 50% C&D;
- Miscela 4 = 100% Terreno Limo-Argilloso;
- Miscela 5 = 100% Misto Granulare.

Per ogni miscela la determinazione del contenuto ottimo di umidità (Optimum Moisture Content, OMC), è stata effettuata sia con la prova Proctor, sia con il Vibrating Hammer (Cfr. Fig. 4). A tale scopo, per ogni miscela e per ognuna delle due procedure, sono stati confezionati cinque provini con contenuti di acqua crescenti a partire dal 6%, impiegando fustelle in acciaio del diametro di 150 mm ed altezza 120 mm. I provini sono stati preparati secondo le modalità previste dalla norma di riferimento di ciascuna procedura (Cfr. Fig. 4 e Fig. 5).

Nella sperimentazione si sono confrontate le due metodologie di costipamento, al fine di valutare la loro incidenza sulle proprietà meccaniche delle varie miscele.

In particolare, per il Vibrating Hammer i provini sono stati preparati inserendo nella fustella il terreno passante al crivello 20, in tre strati all’incirca di uguale spessore e poi costipandolo per 60 secondi con una vibrazione ed una forza agente verso il basso compresa tra 300 e 400 N.

2.3 Mixtures and experimental investigation

With the materials characterised above, various mixtures were prepared, falling within the grading envelope of Figure 1 and optimised in terms of water content for optimal compaction. Among them, the authors decided to describe the following five mixtures in this study (see Figure 3):

- Mixture 1 = 100% Pozzolan;
- Mixture 2 = 70% Pozzolan + 30% C&D;
- Mixture 3 = 50% Pozzolan + 50% C&D;
- Mixture 4 = 100% Silt Clayey soil;
- Mixture 5 = 100% Granular Mixed.

For each mixture, the determination of the Optimum Moisture Content (OMC) was carried out with both the Proctor test and the Vibrating Hammer (see Fig. 4). For this purpose, five specimens with increasing water contents starting at 6 per cent were made for each mixture and for each of the two procedures, using steel dies with a diameter of 150 mm and a height of 120 mm. The specimens were prepared in accordance with the reference standard for each procedure (see Fig. 4 and Fig. 5).

In the experiment, the two compaction methods were compared in order to assess their impact on the mechanical properties of the various mixtures.

Specifically, for the Vibrating Hammer, the specimens were prepared by inserting the soil passing through the 20 sieve in three layers of approximately equal thickness and then tamping it for 60 seconds with a vibration and downward force of between 300 and 400 N.

The specimens of each mixture, compacted with both devices, were also tested in a saturated condition. For this purpose, they were immersed in water for 4 days, with swelling data recorded every 24 hours (see Figure 6).

For each mixture, the CBR index was determined on specimens with the optimum water content (w_{opt}) constipated with both the Proctor test and the Vibrating Hammer. The CBR index provides information on the material in terms of its resistance to loads transmitted from vehicles to the superstructure, according to EN 13286-47 ‘Unbound and hydraulically bound mixtures-Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling’, by applying a load with a constant velocity gradient.



Figura 3 - Miscele impiegate (casi di studio).
Figure 3 - Mixtures used (case studies).

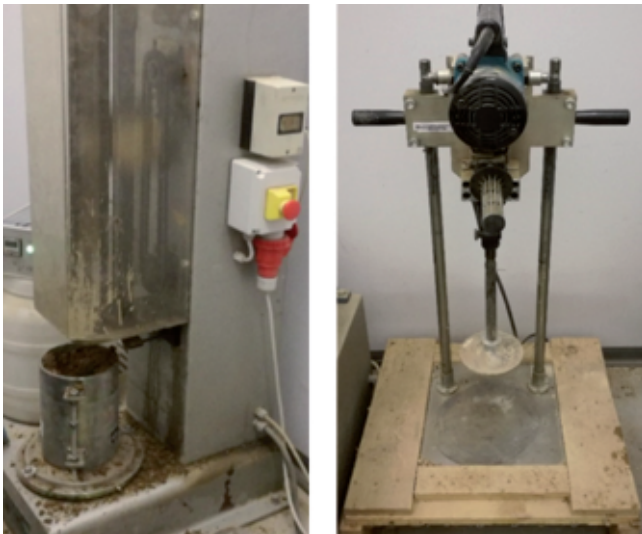


Figura 4 - Apparecchiature Proctor e Vibrating Hammer.
Figure 4 - Proctor and Vibrating Hammer equipment.

I provini di ciascuna miscela, compattati con entrambe le apparecchiature, sono stati testati anche in condizione satura. All'uopo essi sono stati immersi in acqua per 4 giorni, rilevando ogni 24 ore i dati dell'eventuale rigonfiamento (Cfr. Fig. 6). Per ogni miscela è stato determinato l'indice CBR su provini con il contenuto di acqua ottimale (w_{opt}) costipati sia con la prova Proctor che con il *Vibrating Hammer*. L'indice CBR fornisce informazioni sul materiale in termini di resistenza ai carichi trasmessi dai veicoli alla sovrastruttura, secondo la norma EN 13286-47 "Unbound and hydraulically bound mixtures-Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling", applicando un carico con gradiente di velocità costante.

Successivamente, si è studiata l'evoluzione dell'azione di costipamento nel tempo. A tale scopo si sono confezionati ulteriori provini per ogni miscela oggetto di studio, da analizzare in corrispondenza di diversi tempi di costipamento (5, 15, 30, 45, 50, 55 secondi).

Quest'ultima indagine, non ha riguardato i provini sottoposti a imbibizione, ma solo quelli costipati in modo convenzionale.

3. Risultanze sperimentali ed analisi dei dati

Per ogni miscela e per ciascuna procedura di costipamento, in Fig. 7 sono mostrati i valori del peso secco dell'unità di volume (γ_s) in funzione del contenuto d'acqua ottimale w_{opt} .

I valori w_{opt} variano da 10.77% della Miscela 1 (100% Pozzolana) a 18.88% della Miscela 4 (100% terreno limo-argilloso) nel caso del metodo Proctor e da 9.76% della Miscela 2 (70% Pozzolana e 30% C&D) a 18.45% della Miscela 4 (100% terreno limo-argilloso) nel caso del *Vibrating Hammer*.



Figura 5 - Preparazione dei provini con costipatore Proctor e con *Vibrating Hammer*.

Figure 5 - Specimens preparation with Proctor device and *Vibrating Hammer*.

Subsequently, the evolution of the compaction action over time was studied. For this purpose, additional specimens were made for each mixture under study, to be analysed at different compaction times (5, 15, 30, 45, 50, 55 seconds). This last investigation did not concern the specimens subjected to imbibition, but only those conventionally compacted.

3. Experimental results and data analysis

For each mixture and each compaction procedure, Fig. 7 shows the values of the unit volume dry weight (γ_s) as a function of the optimum water content w_{opt} . The w_{opt} values ranged from 10.77% of Mixture 1 (100% Pozzolan) to 18.88% of Mixture 4 (100% silt-clayey soil) in the case of the Proctor method and from 9.76% of Mixture 2 (70% Pozzolan and 30% C&D) to 18.45% of Mixture 4 (100% silt-clayey soil) in the case of the *Vibrating Hammer*.

The highest w_{opt} values were recorded for Mixture 4, precisely because the silt-clayey soil is fine-grained, character-



Figura 6 - Provino sottoposto ad imbibizione.

Figure 6 - Specimen subjected to imbibition.

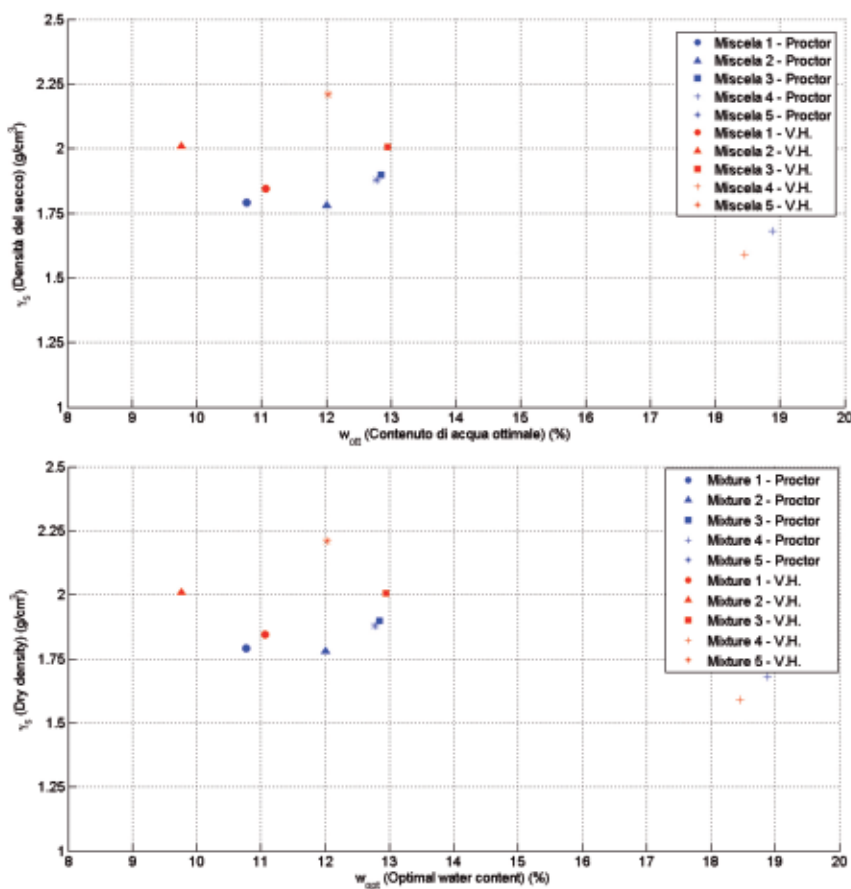


Figura 7 - Diagramma densità del secco ($\gamma_{s,max}$) in funzione del contenuto d'acqua ottimale (w_{opt}).

Figure 7 - Dry density diagram ($\gamma_{s,max}$) as a function of optimal water content (w_{opt}).

Per la Miscela 4 si sono registrati i valori più elevati di w_{opt} , proprio perché il terreno limo-argilloso è a grana fine, caratterizzato da valori di coesione molto elevati e da conducibilità idraulica contenuta.

I valori del peso secco dell'unità di volume γ_s variano da 1.68 kg/dm³ della Miscela 4 (100% terreno limo-argilloso) a 1.90 kg/dm³ della Miscela 3 (50% Pozzolana e 50% C&D) nel caso del metodo Proctor e da 1.59 kg/dm³ della Miscela 4 (100% terreno limo-argilloso) a 2.21 kg/dm³ della Miscela 5 (100% Misto Granulare) nel caso del *Vibrating Hammer*.

Pertanto, con il *Vibrating Hammer* si sono registrati i valori massimo e minimo assoluti di γ_s rispettivamente pari a 2.21 kg/dm³ per la Miscela 5 e 1.59 kg/dm³ per la Miscela 4. Ciò è ragionevole in quanto il materiale granulare della Miscela 5, durante il processo di costipamento con il *Vibrating Hammer* subisce una continua riorganizzazione interna dei suoi elementi addensandosi, mentre il materiale fine limo-argilloso della Miscela 4 è molto meno sensibile alla sua contemporanea azione vibrante e di compressione.

ised by very high cohesion values and low hydraulic conductivity.

Unit volume dry weight values γ_s range from 1.68 kg/dm³ of Mixture 4 (100 % silt-clayey soil) to 1.90 kg/dm³ of Mixture 3 (50 % Pozzolan and 50 % C&D) in the case of the Proctor method and from 1.59 kg/dm³ of Mixture 4 (100 % silt-clayey soil) to 2.21 kg/dm³ of Mixture 5 (100 % Granular Mixed) in the case of the Vibrating Hammer method.

Therefore, the Vibrating Hammer recorded the absolute maximum and minimum values of γ_s of 2.21 kg/dm³ for Mixture 5 and 1.59 kg/dm³ for Mixture 4, respectively. This is reasonable because the granular material of Mix 5, during the compaction process with the Vibrating Hammer undergoes a continuous internal reorganisation of its elements as it thickens, whereas the fine silt-clay material of Mix 4 is much less sensitive to its simultaneous vibrating and compression action.

The optimal w_{opt} moisture did not increase substantially from Proctor to Vibrating Hammer compaction. As the C&D content in the mix increased, there was a reduction in this difference and an increase in the optimum water content. Furthermore, the Proctor curves, not shown for brevity, tend to be flatter than those obtained with the Vibrating Hammer, especially for Mixtures 3 and 4.

At this point, experimentation continued with the CBR test, testing specimens of each mixture with optimum water content with both devices. A comparison of the obtained results is shown in Fig. 8.

The CBR values of the Proctor test specimens ranged from 15.10% of Mixture 4 (100% silt-clayey soil) to 75.43% of Mixture 2 (70% Pozzolan and 30% C&D). Those of the Vibrating Hammer specimens, on the other hand, ranged from 4.13% of Mixture 4 (100% silt-clayey soil) to 166.35% of Mixture 5 (100% granular mix).

In absolute terms, the lowest (4.13%) and highest (166.35%) values are for Mixtures 4 and 5, respectively, compacted with the Vibrating Hammer. The Vibrating Hammer specimens of all mixtures, with the exception of Mixture 4, showed higher CBR values than the same Proctor specimens.

The CBR index values determined on Proctor and Vibrating Hammer specimens showed percentage differences in favour of the latter. These differences are small and amount to 4.32% and 2.29% for Mixtures 1 and 2 respectively and rather high and amount to 35.03% and 178.22% for Mixtures 3 and 5 respectively. Only for Mix-

L'umidità ottimale w_{opt} non è aumentata in maniera sostanziale, passando dal costipamento Proctor a quello con il *Vibrating Hammer*. Al crescere del contenuto di C&D nella miscela, si è registrata una riduzione di tale differenza ed un aumento del contenuto d'acqua ottimale.

Inoltre le curve Proctor, non riportate per brevità, tendono ad assumere un andamento più piatto rispetto a quelle ottenute con il *Vibrating Hammer*, soprattutto per le Miscele 3 e 4.

A questo punto la sperimentazione è proseguita con l'esecuzione della prova CBR, testando i provini di ogni miscela con contenuto ottimo di acqua con entrambe le apparecchiature. Il confronto tra i risultati ottenuti è riportato in Fig. 8.

I valori dell'indice CBR dei provini Proctor variano dal 15.10% della Miscela 4 (100% terreno limo-argilloso) al 75.43% della Miscela 2 (70% Pozzolana e 30% C&D). Quelli dei provini costipati con il *Vibrating Hammer* variano, invece, da 4.13% della Miscela 4 (100% terreno limo-argilloso) al 166.35% della Miscela 5 (100% misto granulare).

In assoluto i valori più basso (4.13%) e più alto (166.35%) sono relativi, rispettivamente alle Miscele 4 e 5, compattate con il *Vibrating Hammer*.

I provini *Vibrating Hammer* di tutte le miscele, ad eccezione della Miscela 4, hanno mostrato valori dell'indice CBR superiori agli stessi provini Proctor.

I valori dell'indice CBR, determinati su provini Proctor e *Vibrating Hammer*, hanno mostrato delle differenze percentuali a favore di quest'ultimo. Tali differenze sono modeste e pari a 4.32% e 2.29% rispettivamente per le Miscele 1 e 2 e piuttosto alte e pari a 35.03% e 178.22% rispettivamente per le Miscele 3 e 5. Solo per la Miscela 4 la differenza del 72.65% è a favore dei provini Proctor (Cfr. Fig. 8). Nel caso dei provini saturi, si è riscontrata una ragionevole riduzione dell'indice CBR per entrambe le modalità di compattazione rispetto al caso senza imbibizione. Tuttavia, i migliori valori delle quattro miscele testate sono sempre da attribuire al costipamento con il *Vibrating Hammer* (Cfr. Fig. 9). Inoltre, considerato il bassissimo valore dell'indice CBR della Miscela 4 (100% terreno limo-argilloso) senza imbibizione, si è evitato di testarla dopo saturazione in acqua.

I valori dell'indice CBR dopo imbibizione dei provini Proctor variano dal 33.44% della Miscela 1 al 53.70% della

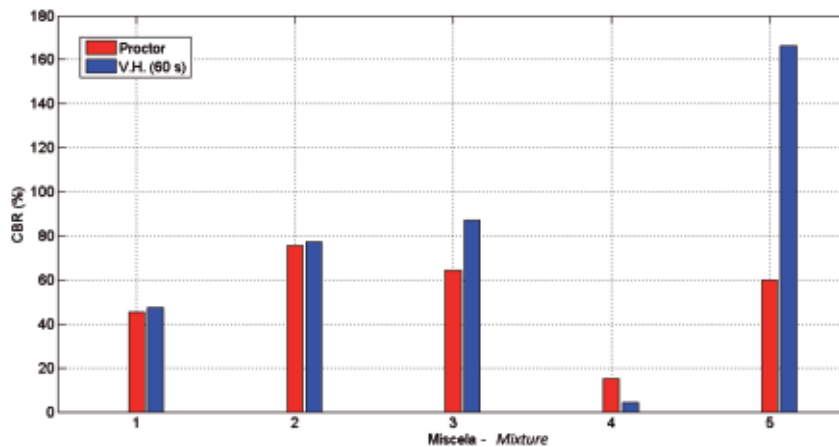


Figura 8 - Indice CBR convenzionale determinato a seguito di costipamento Proctor e con *Vibrating Hammer*.

Figure 8 - Conventional CBR index determined after Proctor compaction and with *Vibrating Hammer*.

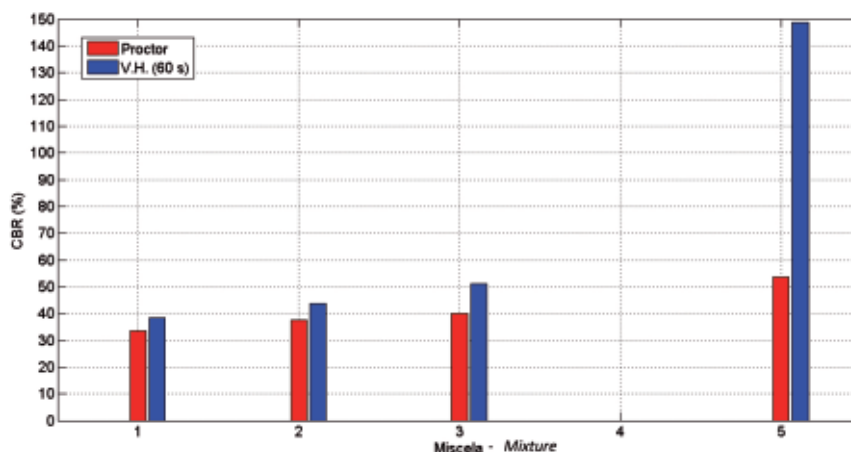


Figura 9 - Indice CBR dopo imbibizione determinato con due metodologie per ciascuna miscela.

Figure 9 - CBR index after imbibition determined by two methodologies for each mixture.

ture 4 the difference of 72.65% is in favour of the Proctor specimens (see Fig. 8). In the case of the saturated specimens, a reasonable reduction of the CBR index was found for both compaction modes compared to the case without imbibition. However, the best values of the four tested mixtures were always attributable to compaction with the *Vibrating Hammer* (see Fig. 9). In addition, given the very low CBR value of Mixture 4 (100 per cent silt-clayey soil) without imbibition, testing after saturation in water was avoided.

The CBR values after imbibition of the Proctor specimens ranged from 33.44% of Mixture 1 to 53.70% of Mixture 5 and of those prepared with the *Vibrating Hammer* from 38.33% of Mixture 1 to 148.81% of Mixture 5. The comparison of the CBR index value, obtained after imbi-

Miscela 5 e di quelli preparati con il *Vibrating Hammer* dal 38.33% della Miscela 1 al 148.81% della Miscela 5.

Dal confronto del valore dell'indice CBR, ottenuto dopo imbibizione, è emerso che i valori più elevati di portanza sono forniti dalle Miscele 3 e 5, ossia quelle con la più alta percentuale di materiale granulare naturale o riciclato.

Dalle analisi numeriche si evince, inoltre, che la differenza tra le due metodologie di costipamento in termini di indice CBR è più evidente nella prova con imbibizione rispetto a quella convenzionale per le Miscele 1 e 2, un po' meno per la Miscela 3 e quasi trascurabile per la Miscela 5.

3.1. Variazione dell'Indice CBR in funzione del tempo di costipamento

In questo studio gli autori hanno anche indagato gli effetti tempo di azione del *Vibrating Hammer* sull'efficacia del costipamento. Nella Fig. 10 si riportano i risultati ottenuti in termini di indice CBR a diversi istanti di tempo.

Si evince che, per miscele con elevate percentuali di materiale granulare, come la Miscela 5, per raggiungere un adeguato addensamento delle particelle è sufficiente un tempo inferiore rispetto ai 60 secondi previsti dalla normativa. Infatti, l'indice CBR, già nei primi secondi della prova, raggiunge un valore del tutto confrontabile con quello dei provini Proctor. In particolare, dopo soli 5 secondi di compattazione, l'indice CBR della Miscela 5 è pari a 55.09%, che è lievemente inferiore a quello ottenuto per la stessa miscela mediante costipamento Proctor. Dopo 15 secondi assume il valore di 113.65%, che è già più elevato di ogni altro valore di CBR determinato su provini Proctor.

Si osserva inoltre che per le miscele in cui è presente la pozzolana, come le Miscele 2 e 3, per tempi di compattazione inferiori a 60 secondi i valori dell'indice CBR sono minori rispetto a quanto determinato su provini Proctor.

Pertanto, per queste miscele con rilevante percentuale di fino, il tempo di costipamento con il *Vibrating Hammer* non può essere ridotto al di sotto del valore di 60 secondi imposto dalla normativa e, dunque, dovranno essere ben compattate per esibire le resistenze meccaniche necessarie al loro impiego nel settore stradale e ferroviario.

L'indagine condotta per successivi istanti di tempo pone le basi per un'interpretazione realistica del fenomeno osservato. Essa consente di individuare un tempo (o un intervallo di tempo) di

bitazione, showed that the highest lift values are provided by mixes 3 and 5, i.e. those with the highest percentage of natural or recycled granular material.

Numerical analyses also show that the difference between the two compaction methods in terms of CBR index is more pronounced in the imbibition test than in the conventional one for Mixtures 1 and 2, somewhat less for Mixture 3 and almost irrelevant for Mixture 5.

3.1 CBR Index and compaction time

In this study, the authors also investigated the time effects of *Vibrating Hammer* on the effectiveness of compaction. Fig. 10 shows the obtained results in terms of the CBR index at different time instants.

It can be seen that for mixtures with a high percentage of granular material, such as Mixture 5, a shorter time than the 60 seconds required by the standard is sufficient to achieve an adequate thickening of the particles. In fact, the CBR index, already in the first seconds of the test, reaches a value fully comparable with that of the Proctor spe-

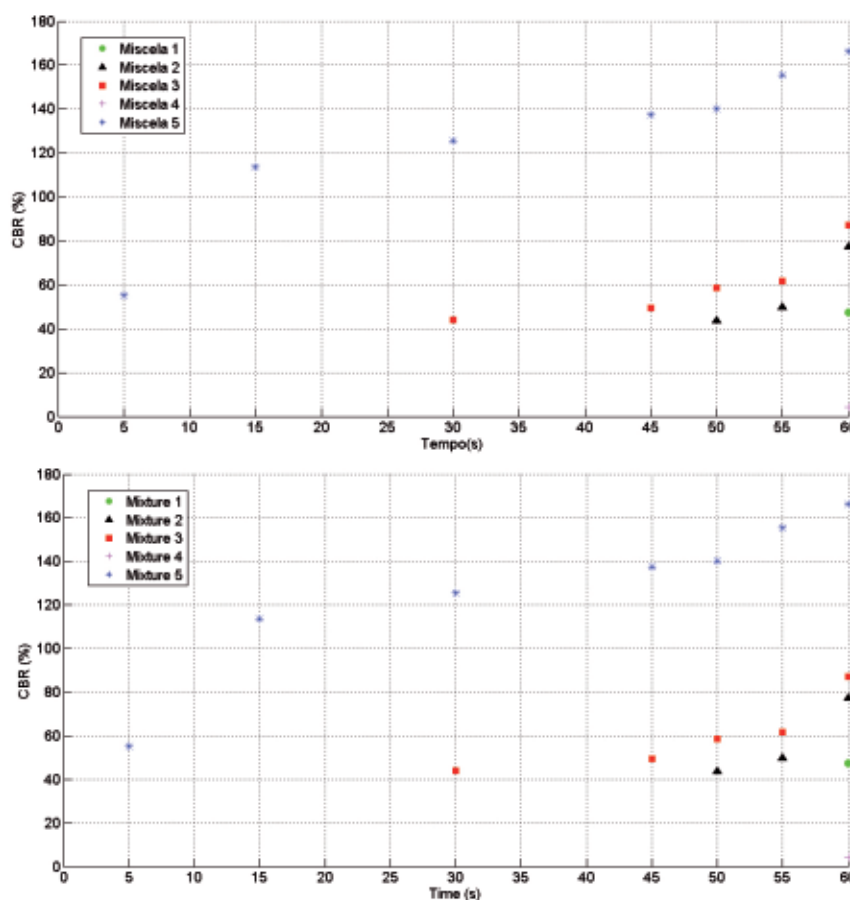


Figura 10: Variazione dell'indice CBR in funzione del tempo di costipamento per ciascuna miscela.

Figure 10 - Variation of CBR index as a function of compaction time for each mixture.

costipamento ottimale per miscele di terreni granulari, che può oscillare ragionevolmente tra 10 e 30 secondi. Mentre, continua ad essere ottimale, il tempo di 60 secondi per tutte le miscele con elevate percentuali di materiali a grana fine.

4. Conclusioni

In questo lavoro, condotto presso il Laboratorio di Costruzioni Stradali dell'Università della Basilicata, si sono studiate numerose miscele composte da terreno naturale di diversa tipologia e/o da materiali riciclati, ai fini di un loro impiego negli strati di fondazione e nei rilevati stradali e ferroviari.

Tra le numerose miscele preparate, ne sono state analizzate cinque. Nella prima fase dello studio si è posta particolare attenzione alla caratterizzazione delle suddette miscele, mediante provini ottimizzati e confezionati mediante costipamento Proctor e Vibrating Hammer. Nella seconda fase sono state effettuate prove di portanza CBR su provini sia asciutti che saturi dopo imbibizione in acqua.

L'obiettivo dello studio è stato principalmente quello valutare l'efficacia del costipamento delle miscele con il Vibrating Hammer in alternativa, o meno, con la tradizionale procedura Proctor. Tale valutazione è stata effettuata riservando particolare attenzione anche agli aspetti di sostenibilità ambientale ed economica. Infatti, tra le cinque miscele analizzate ne sono state previste due costituite da pozzolana e C&D, ovvero da materiali disponibili in grandi quantità in Basilicata, ma difficilmente impiegabili in toto da soli. Lo studio ha invece potuto dimostrare che questi materiali, opportunamente miscelati tra loro ed ottimizzati, possono essere impiegati in grandi quantità nelle costruzioni stradali e ferroviarie. Ciò consente di evitare il loro smaltimento in discarica ed il conseguente necessario approvvigionamento di materiale vergine in cave di prestito.

Nell'ottica del confronto tra le due modalità di compattazione è emerso che i risultati più soddisfacenti in termini di portanza CBR sono stati forniti dalle miscele a prevalenza di materiale granulare, costipate con il *Vibrating Hammer*.

Infatti il massimo valore CBR dei provini Proctor è stato pari a 75.43% (Miscela 2). Mentre i valori CBR più alti dei campioni *Vibrating Hammer* pari a 77.16%, 87.00% e 166.35% sono stati forniti dalle Miscele 2, 3 e 5, cioè quelle in cui è presente del materiale granulare. Inoltre il valore CBR aumenta al crescere della percentuale di materiale granulare nella miscela.

I provini *Vibrating Hammer* di tutte le miscele, ad eccezione della Miscela 4, hanno mostrato valori CBR superiori a quelli dei provini Proctor.

I provini con terreni a grana fine hanno fornito i risultati CBR più alti con compattazione Proctor. Pertanto la metodologia a compattazione vibratoria risulta particolar-

ciens. In particular, after only 5 seconds of compaction, the CBR index of Mix 5 is 55.09%, which is slightly lower than that obtained for the same mix by Proctor compaction. After 15 seconds it assumes a value of 113.65%, which is already higher than any other CBR value determined on Proctor specimens. It is also noted that for mixtures in which pozzolan is present, such as Mixtures 2 and 3, for compaction times of less than 60 seconds, the CBR values are lower than those determined on Proctor specimens.

Therefore, for these mixtures with a significant percentage of fines, the compaction time by the Vibrating Hammer cannot be reduced below the 60-second value imposed by the standard. So they will have to be well compacted to exhibit the mechanical strength required for their use in road and rail applications.

The research conducted over successive instants of time lays the foundation for a realistic interpretation of the observed phenomenon. It allows the identification of an optimal compaction time (or time interval) for granular soil mixtures, which can reasonably range between 10 and 30 seconds. While the 60-second time for all mixtures with high percentages of fine-grained materials continues to be optimal.

4. Conclusions

In this work, conducted at the Laboratory of Road Construction at the University of Basilicata, several mixtures composed of natural soil of different types and/or recycled materials were studied for use in foundation layers and road and rail embankments. Of the numerous mixtures prepared, five were analysed. In the first phase of the study, special consideration was paid to the characterisation of these mixtures by means of optimised specimens packed using Proctor compaction and Vibrating Hammer.

In the second phase, CBR bearing tests were carried out on both dry and saturated specimens after imbibition in water. This assessment was also carried out paying particular consideration to environmental and economic sustainability aspects. In fact, among the five mixtures analysed, two were made up of pozzolan and C&D, i.e. materials that are widely available in Basilicata, but are difficult to use on their own. Instead, the study was able to demonstrate that these materials, properly mixed together and optimised, can be used in large quantities in road and railway construction. This avoids their disposal in landfills and the subsequent necessary supply of new material in borrow quarries.

When comparing the two compaction methods, it emerged the most satisfactory results in terms of CBR bearing capacity were provided by the mixes with a predominance of granular material, compacted with the Vibrating Hammer. In fact, the highest CBR value of the Proctor samples was 75.43% (Mixture 2). While the highest CBR values of the Vibrating Hammer samples of 77.16%, 87.00% and

mente efficace per terreni incoerenti e spiccatamente eterogenei.

Infine, con riferimento al *Vibrating Hammer*, è stata anche analizzata l'incidenza del tempo di costipamento a partire da 5 secondi fino ai 60 secondi previsti dalla normativa.

In tal senso si è osservato che la miscela, costituita interamente da misto granulare, si addensa meglio e più rapidamente con il *Vibrating Hammer*. Infatti, già dopo pochi secondi di costipamento essa mostra un buon valore dell'indice CBR, che cresce con il prolungarsi del tempo fino a 60 secondi. Per quanto riguarda, invece, le miscele costituite da pozzolana e C&D (Miscele 2 e 3) gli effetti maggiori del *Vibrating Hammer* nei confronti della Proctor si registrano solo al raggiungimento dei 60 secondi di compattazione.

I risultati di questo lavoro confermano che i C&D opportunamente miscelati con terreni naturali, come quelli pozzolanici, sono una valida alternativa all'impiego dei materiali tradizionali nelle costruzioni stradali e ferroviarie, specialmente nelle opere in cui sono richiesti elevati volumi di materiale.

Naturalmente, dovrà essere posta particolare cura nelle operazioni di costipamento in situ, studiando bene gli spessori degli strati e le modalità di svolgimento della rullatura in cantiere, oltreché il tipo di rullo da impiegare. Inoltre, aumentando la percentuale di C&D nella miscela, le caratteristiche di compattazione, e quindi di resistenza, differiscono a causa del metodo di compattazione e pertanto, quando si utilizzano materiali alternativi, anche il metodo di compattazione deve essere scelto con oculatezza.

La sperimentazione ha mostrato chiaramente un maggior effetto del *Vibrating Hammer* sui materiali granulari, che presentano un buon assortimento granulometrico, mentre nei materiali con una consistente aliquota di componente fine, i risultati migliori si raggiungono mediante il costipamento con la prova Proctor. In ultimo, al fine di ottimizzare i lavori in termini economici ed ambientali, i risultati dello studio suggeriscono, per i materiali granulari, un tempo di costipamento ridotto del 50%, ovvero pari a 30 secondi.

166.35% were provided by Mixtures 2, 3 and 5, i.e. those in which granular material is present. Furthermore, the CBR value increases as the percentage of granular material in the mixture increases.

The *Vibrating Hammer* specimens of all mixtures, with the exception of Mixture 4, showed higher CBR values than the Proctor specimens.

Specimens with fine-grained soils provided the highest CBR results with Proctor compaction. Therefore, the vibratory compaction methodology is particularly effective for inconsistent and distinctly heterogeneous soils.

Finally, with reference to the *Vibrating Hammer*, the impact of the compaction time was also analysed, starting from 5 seconds up to the 60 seconds required by the rules.

In this respect, it was observed that the mixture, consisting entirely of granular mixture, thickens better and faster with the *Vibrating Hammer*. In fact, already after a few seconds of compaction, it shows a good CBR value, which increases as time goes on up to 60 seconds.

For mixtures consisting of pozzolan and C&D (Mixtures 2 and 3), on the other hand, the greatest effects of the *Vibrating Hammer* against Proctor only occur when the 60 seconds compaction time is reached.

The results of this work confirm that C&D mixed appropriately with natural soils, such as pozzolanic soils, is a valid alternative to the use of traditional materials in road and rail construction, especially in works where high volumes of material are required.

Of course, special care must be taken in the in-situ tamping operations, studying well the thicknesses of the layers and how to carry out the rolling on site, as well as the type of road roller to be used. Furthermore, as the percentage of C&D in the mix increases, the compaction characteristics, and thus the strength, differ due to the compaction method and therefore, when using alternative materials, the compaction method must also be chosen wisely.

The experiment clearly showed a greater effect of the *Vibrating Hammer* on granular materials with a good particle size gradation, while in materials with a large proportion of fine component, the best results are achieved by compaction with the Proctor test. Finally, in order to optimise the work in economic and environmental terms, the results of the study suggest, for granular materials, a compaction time reduced by 50 per cent, or 30 seconds.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] TESORIERE G. (1998), "Strade ferrovie aeroporti. Il progetto e le opere d'arte" Vol. 1, UTET, Torino, ISBN-10: 8802043620.
- [2] ARCEMENT B.A., WRIGHT S.G. (2001), "Evaluation of laboratory compaction procedures for specification of densities

- for compacting fine sands*", Research Project 0-1874, Texas Department of Transportation, Bureau of Engineering Research, Austin, Texas. Available online: https://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/1874_1.pdf.
- [3] PROCHASKA A.B., DRNEVICH V.P., ASCE (2005), "*One-point Hammer Compaction Test for Granular Soils*", Geotechnical Special Publication, [https://doi.org/10.1061/40776\(155\)6](https://doi.org/10.1061/40776(155)6).
- [4] HILL A.R., DAWSON A.R., MUNDY M. (2001), "*Utilisation of Aggregate Materials in Road Construction and Bulk Fill*", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 32, Issues 3-4, Pages 305-320, ISSN 0921-3449, [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00067-2).
- [5] POON C.S., CHAN D. (2006), "*Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushed Clay Brick as Unbound Road Sub-Base*", Construction and Building Materials, Vol. 20, Issue 8, Pages 578-585, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045>.
- [6] XUAN D., HOUBEN L.J.M., MOLENAAR A.A.A. *et al.* (2010), "*Cement Treated Recycled Demolition Waste as a Road Base Material*", J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit. 25, 696-699, <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0073-4>.
- [7] Alireza M., Arul A., Jay S. , M. DISFANI, Bo M., Darmawan S. (2014), "*Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications*", Journal of Materials in Civil Engineering, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001148](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001148).
- [8] SANGIORGI C., LANTIERI C., DONDI G. (2015), "*Construction and Demolition Waste Recycling: An Application for Road Construction*", International Journal of Pavement Engineering. 16. 1-8, <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943134>.
- [9] ZHANG J., GU F. AND ZHANG Y. (2019), "*Use of Building-Related Construction and Demolition Wastes in Highway Embankment: Laboratory and Field Evaluations.*", Journal of Cleaner Production, Vol. 230, Pages 1051-1060, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.182>.
-