

From building to roads. Testing road embankment with construction and demolition materials

Mauro Coni, Silvia Portas, Francesca Maltinti,
Francesco Pinna*

Highlights

Annually, transport infrastructures construction activity consume a large amount of aggregates deriving from quarries, causing considerable land, environmental and energy losses. The employment of construction and demolition waste (C&DW) a for road constructions it is a valid alternative to build embankment, subgrade and granular layers. Understand how this type of materials behaves on the physical and mechanical point of view is important to encourage and develop their use. In addition, a pilot project can encourage the construction reliability and the dissemination of the results.

Abstract

The paper reports the results obtained during an experimental research conducted in real working conditions of road embankment made with C&DW. For this purpose an experimental road, 30 m long, 4 m wide and 4 m high was built, installing 12 instruments: 3 pressure cells to measure stresses and 9 Linear Variable Differential Transformers (LVDTs) to measure deformations. The data were collected under different load and traffic speed magnitude. At this point of the research data are being analysed and compared, and the results reported on this paper.

Keywords

Transport infrastructures, Construction, Demolition materials, Recycling

1. INTRODUCTION

The increasing cost of transport infrastructure, in terms of construction complexity, economic costs and environmental impact is mainly affected by aggregates supply, transport, and management.

This involves the land exploitation for the opening of new quarries to extract and the transportation of the materials from the quarries to the construction and consequent increases in energy costs and environmental.

The employment of recycling materials deriving from the construction and demolition of buildings represents a valid alternative to increase overall economic and environmental efficiency.

The C&DW use permit to limit the exploitation of natural materials and,

Mauro Coni

DICAAR - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Ambiente
e Architettura, Università di
Cagliari, via Università 40,
Cagliari, 0913, Italia

Silvia Portas

Sogaer, Società di Gestione
dell'Aeroporto di Cagliari-
Elmas, via dei Trasvolatori S.n.c.,
Italia

Francesca Maltinti

DICAAR - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Ambiente
e Architettura, Università di
Cagliari, via Università 40,
Cagliari, 0913, Italia

Francesco Pinna

DICAAR - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Ambiente
e Architettura, Università di
Cagliari, via Università 40,
Cagliari, 0913, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-6755216;
fax: +39-6755215;
e-mail: mconi@unica.it

consequently, to reduce landfills dimension. Many road infrastructures have been built with recycled materials but this good practice is little used due to the lack of reliability of professional operators and the absence of consolidated technical knowledge.

1. INTRODUZIONE

Il crescente costo delle infrastrutture di trasporto sia in termini costruttivi sia ambientali è prevalentemente legato all'approvvigionamento di inerti e di materiali di qualità. Ciò comporta il consumo di territorio



Figure 1. Section IV of the Statal Road 597 Sassari-Olbia opening in 2017. The entire highway will be 78 km long with 320.000 m² of footprint.



Figure 2. The road embankment built in 2007 with the coal waste inside the Carbosulcis mining site.

Economic and fiscal tools have been used in some European countries (axes on landfill, defiscalization on recycling aggregates), to encourage the use of alternative materials. Despite these, the use of recycled materials in road construction is still restricted. This is due at:

1. the conception of these materials as a type of “rubbish” and hence very poor;
2. transport costs and economic reasons;
3. debatable mechanical reliability and environmental performance of the materials.

Many questions, with no satisfactory answers, are connected to the assessment

per l'apertura di nuove cave di prestito, il trasporto dei materiali dalle cave da e verso i cantieri di costruzione e conseguenti incrementi dei costi energetici ambientali. L'introduzione di materiali di riciclaggio derivanti dalla demolizione e costruzione degli edifici rappresenta una valida alternativa per aumentare l'efficienza economica e ambientale complessiva. Ciò limita lo sfruttamento delle risorse naturali rinnovabili e, conseguentemente, a ridurre l'estensione delle discariche. Molte infrastrutture stradali sono state costruite con materiali riciclati e tuttavia questi stentano a diffondersi come buona pratica a causa della diffidenza del mondo professionale e la mancanza di adeguate e consolidate conoscenze tecniche. Diversi Paesi europei hanno usato

of their actual engineering performances and their effects on the environment. Several scientific results were obtained in the last years in the understanding of alternative materials behavior but must still be used to develop construction methodologies and standard specifications.

2. STATE OF THE ART

The ISPRA Report 2018 [1] on “Land Consumption, Territorial Dynamics and Ecosystem Services,” in Italy highlights that the “artificialization” of the territory in the different forms of settlement amounts to 94.8 km² / year on 301.338 km² and 4.53 km² / year in Sardinia on 24090 km². The fundamental causes are the construction of transport networks, buildings, industrial and productive settlements and expansion of cities, quarries and landfills, densification and conversion within urban areas. About 43% of the volumes of materials and aggregates derive from the construction for transport infrastructures (roads, railways, airports, ports, etc.). The needs of the Sardinia region is estimated at over 16 million m³.

strumenti economici e fiscali per incrementare l'impiego di materiali alternative, quali tasse sul prelievo di materiali vergini o la defiscalizzazione sull'impiego di materiali derivanti da riutilizzo [17]. Tuttavia, almeno in Italia, l'utilizzo estensivo di questi materiali rimane limitato. Questo difficoltà è principalmente dovuta a:

1. la percezione di questi materiali come un tipo di “spazzatura” e dunque molto povera e scadente;
2. ragioni economiche, quali i costi di trasporti o trasformazione;
3. l'affidabilità delle prestazioni meccaniche e ambientali dei materiali riciclati.

Alcune questioni aperte sono connesse alla conoscenza e confidenza da parte dei professionisti di tali materiali e alla diffidenza circa gli effetti sull'ambiente. Numerosi studi scientifici sono stati sviluppati e sono tuttora in corso per approfondire lo studio di tali materiali sia in laboratorio sia attraverso progetti pilota.

2. STATO DELL'ARTE

Il Rapporto ISPRA 2018 [1] sul “Consumo di suolo, Dinamiche territoriali e servizi ecosistemici”, in Italia mette in evidenza che lo stato di “artificializzazione” del territorio nelle diverse forme insediative è pari a 94.8 km² /anno su 301.338 km² e di

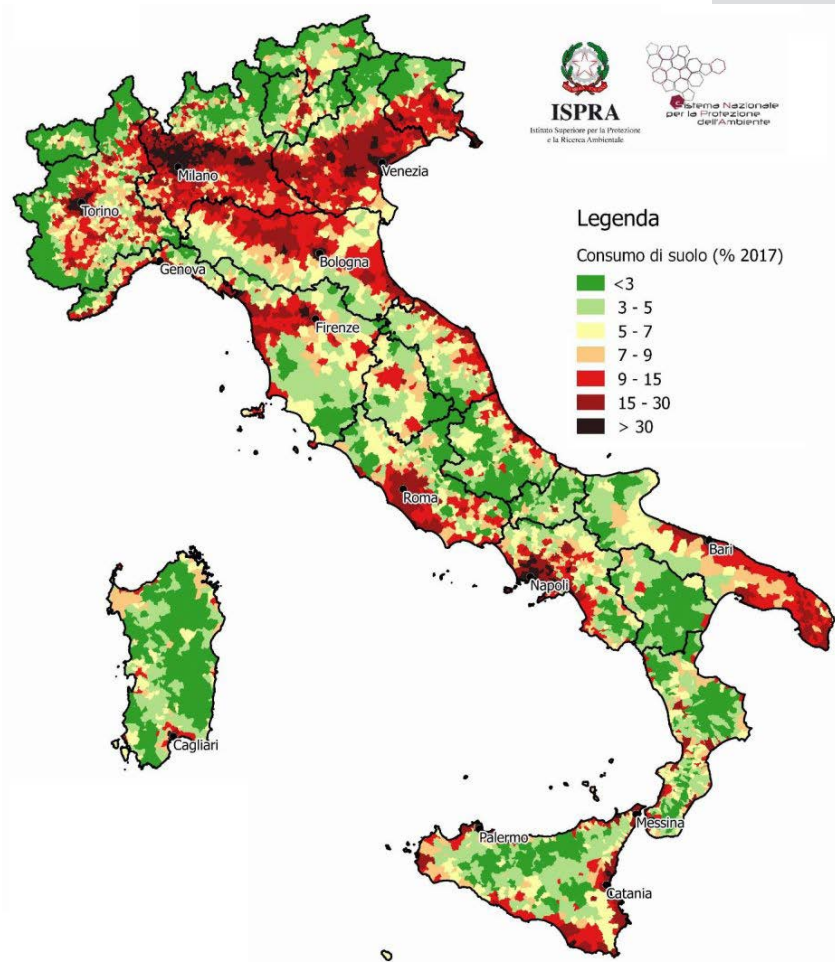


Figure 3. Land use at the municipal level (% excluding water bodies - 2017). Source: ISPRA elaborations on SNPA cartography.

In addition to C&DWs, many other types of alternative materials have been tested in road construction: glass, fly ash, plastics, oven slag, tires, etc. In Carolina (USA), a study concerned the mixing of waste sand and plastic clay creating a durable composite material [2] (FWHA, 2011). In France, the sediments dredged from the port of Dunkirk were mixed with cement creating a composite material with performances far superior to traditional materials [3] (Siham et al., 2007). In some cases, electronic equipment waste was also used for aggregates of the foundations and bituminous conglomerates [4] (Ndoke, 2011). In this context, this paper investigates the use of C&DWs, present in many sites and deriving from civil and industrial constructions.



Figure 4. C&DW re-use process of buildings in a road.

In this research, C&DW materials were used in large quantities in the F.Ili Loi plant and deriving from the demolition of buildings in the metropolitan area of Cagliari. Several laboratory tests were carried out on this material, and an experimental road embankment was built on the intersection of the new SS 554 and the SS 125. The tests conducted during construction investigated the quality of compaction and the bearing capacity of the various levels of the survey [5] [6]. A homogeneous section of the body of the embankment was subsequently selected for the installation of the instrumentation. This instrumental survey mode has been widely used in the United States. Relevant studies on instrumented roads were conducted in Pennsylvania (USA), the Bedford project, MnRoad in Minnesota, Virginia Smart Road, NCAT, and in Italy the SmartRunway at Cagliari airport [7] [8].

Particular interest has the European cooperative research programs ALTMAT, POLMIT, and SAMARIS:

- ALT-MAT “Alternative materials in road construction.” The objective of ALT-MAT is to improve methods to assess the suitability of not standard unbound materials for transport infrastructures application (sub-base, subgrade, and embankment). ALMAT, completed in 1999, founded by “Fourth RTD Framework Program” of the European Commission, involving 7 European countries coordinated by the TRL (UK), with a wide

4.53 km² /anno in Sardegna su 24090 km². Le principali cause sono la realizzazione di reti di trasporto, edifici e fabbricati, insediamenti industriali, produttivi ed espansione delle città, cave e discariche, densificazione e conversione all'interno delle aree urbane. Circa il 43% dei volumi dei materiali e inerti deriva dalle esigenze costruttive delle infrastrutture di trasporto (strade, ferrovie, aeroporti, porti, etc.). Il fabbisogno della regione Sardegna è stimato in oltre 16 milioni di m³.

Oltre ai C&DW molti altri tipi di materiali alternativi sono stati testati nelle costruzioni stradali: vetro, ceneri volanti, plastiche, loppe d'alto forno, pneumatici, etc. In Carolina (USA), ad esempio, uno studio ha riguardato la miscelazione di sabbia di scarto ed argilla plastica creando

un materiale composito duraturo [2] (FWHA, 2011). In Francia i sedimenti dragati dal porto di Dunkirk sono stati miscelati con cemento realizzando un materiale complesso con prestazioni di gran lunga superiori ai materiali tradizionali [3] (Siham et al., 2007). In alcuni casi sono state utilizzate anche scarti di apparecchiature elettroniche per aggregati dei sottofondi e per i conglomerati bituminosi [4] (Ndoke, 2011). In questo contesto, la presente memoria indaga sull'impiego dei C&DW, presenti in molti siti e derivanti da costruzioni civili e industriali.

Per la realizzazione della ricerca sono stati utilizzati i materiali C&DW stoccati in grande quantità nell'impianto F.Ili Loi e provenienti dalle demolizioni di edifici dell'area metropolitana di Cagliari. Su questi materiali sono stati condotti diversi test di laboratorio e successivamente realizzato un rilevato stradale sperimentale in prossimità dell'intersezione tra la nuova SS 554 e la SS 125. I test condotti durante la costruzione hanno indagato sulla qualità della compattazione e sulla portanza dei vari livelli di rilevato [5] [6]. Una tratta omogenea del corpo del rilevato è stata successivamente selezionata per l'installazione della strumentazione. Questa modalità di rilievo strumentale è stata ampiamente utilizzata negli Stati Uniti. Studi rilevanti su strade strumentate sono stati condotti in Pennsylvania (USA), il progetto Bedford, MnRoad in Minnesota, la Virginia Smart Road, NCAT, e in Italia la SmartRunway presso l'aeroporto di Cagliari [7] [8].

Di particolare interesse sono i

variety of climatic conditions, unconventional and natural materials and methods of road construction.

- SAMARIS “Sustainable and advanced materials for road infrastructure.” SAMARIS is a research project from the Growth program of the 5th Framework Programme, financed by the EU Commission and other public partners. The principal aim of the project is to encourage better use of recycled components in pavement materials. The second main objective is to prepare for the harmonization of European procedures and specification within the next generation of EN standards. This indicates moving from a recipe approach, which puts much importance on the intrinsic characteristics of the constituents, to a performance-based approach in-situ.
- POLMIT “Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanism, Pathways, and Mitigation Measures”: The project objectives are to provide and understand the absolute and relative importance of potential sources of pollution in and around roads, including the spreading of pollutants in soil and groundwater. The project is carried out under EU - DG XII “Transport Program” with the “Danish Road Institute” and other 6 European organizations.

However, despite extensive studies [11] [12] [11] and research, there are no studies in the literature concerning real-scale road sections made with C&DW materials while numerous experimental experiences involve laboratory tests, which have a lower significance than traditional materials due to the different origin of the materials (concrete parts, plaster, bricks, ceramics, etc.) and dimensional heterogeneity. It is important to note that in many cases the C&DW materials tested in the laboratory do not give satisfactory results, but once implemented they provide progressively increasing values up to the high performance. This is to be found in the presence of hydraulic binders and the crushed materials due to rolling with the release of fines that have binding power. In this situation, the presence of humidity activates hydration processes with the result of a monolithic behavior of the whole detected [14] [15] [16].

3. METHODOLOGY

The main objective of the research is to understand the behavior of the C&DW material in road construction, measuring the response of road layers under the loading of a heavy vehicle in different environmental conditions.

The paper describes the methods, tests, and analyses conducted and the needs for further research. In the preliminary phase, granulometric, abrasion (LA), water sensitivity (Atterberg limits) and CBR lift tests were conducted in the

programmi di ricerca cooperativa [9] [10] dell'Unione Europea ALTMAT, POLMIT e SAMARIS:

- ALT-MAT “Alternative materials in road construction”. L'obiettivo principale di ALT-MAT è quello di sviluppare metodi per valutare l'idoneità dei materiali non legati per l'impiego all'interno delle infrastrutture stradali (sottofondi, fondazioni, riempimenti, etc.). Il progetto, completato nel 1999, si è svolto durante il IV Programma Quadro RST della Commissione Europea, che coinvolge sette paesi europei, coordinati dal TRL (Transportatio Research Laboratory UK) analizzando un'ampia gamma di condizioni climatiche, , materiali e metodi costruttivi.
- SAMARIS “Sustainable and advanced materials for road infrastructure”. SAMARIS è un progetto del Growth Program del 5th Framework Programme finanziato dalla Commissione europea e da altri soggetti pubblici. L'obiettivo principale del progetto è quello di favorire un maggiore utilizzo di componenti riciclati nei materiali delle pavimentazioni. Il secondo obiettivo è quello di preparare ed armonizzazione l'approccio europeo alle specifiche dei materiale e dei processi in previsione delle nuove norme CEN. Questo implica lo spostamento da un approccio prescrittivo, che pone molta enfasi sulle caratteristiche intrinseche dei componenti, per un approccio prestazionale basato sui risultati dei materiali disposti in-situ.
- POLMIT “Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanism, Pathways and Mitigation Measures”: Il progetto mira a fornire una analisi assoluta e relativa delle potenziali fonti di inquinamento, derivanti dalle strade, comprese le indagini della diffusione degli inquinanti nel suolo e nelle acque sotterranee. Il progetto è stato realizzato dalDanish Road Institute e da altri sei organizzazioni di ricerca europee e finanziato dal EU - DG XII “Transport Programme”.

Tuttavia, nonostante estesi studi [11] [12] [11] e molteplici organismi di ricerca coinvolti, in letteratura non sono presenti studi che riguardano sezioni stradali in scala reale realizzate con materiali C&DW mentre numerose esperienze sperimentali coinvolgono test in laboratorio, che hanno una significatività inferiore rispetto ai materiali tradizionali a causa della differente origine e natura dei materiali (parti di calcestruzzo, intonaci, gesso, laterizi, ceramiche, etc.) e dell'eterogeneità dimensionale. È rilevante osservare che in molti casi i materiali C&DW testati in laboratorio non danno risultati soddisfacenti mentre una volta messi in opera forniscono valori progressivamente crescenti sino a raggiungere alte prestazioni. Ciò è da ricercare nella presenza di leganti idraulici e nella frantumazione dovuta alla rullatura con rilascio di fini che presentano potere legante. In questa situazione, la presenza di umidità attiva processi di idratazione con il risultato di un comportamento

laboratory. During the construction of the embankment, the compaction was evaluated with the in situ density test, with the sand cone method and the load-bearing capacity by plate tests, both dynamic and static. The C&DW survey, built in January 2010, is part of the road works of the new SS 554, it is about 30 m long, 4 m wide and 3 m high. The instrumented area covers about 5 m² positioned on the right side of the embankment (Figure 5) and can measure the effect transmitted by the tires on both axles of the heavy vehicle in all directions.



Figure 5. The site and the instrumented embankment.

The experimental road section was instrumented with 12 instruments: 9 LVDTs and three pressure cells. The sensors were installed in 3 different levels to monitor the entire structure. In each layer 2 standards, LVDTs were installed in longitudinal and transverse positions to measure deformations, 1 LVTD to detect vertical deformations and 1 pressure cell to measure vertical pressure. The instruments signal were measured after construction by a data acquisition system connected to a notebook. To simulate the effect of traffic a 4-axle heavy vehicle (42 t) was used at different speeds: 1.5 km / h, 2.5 km / h and 4 km / h, with different offsets over the entire surface. First, the weight of the axes was determined by electronic axle weighing for each axis of the vehicle in order to know the tension level imposed on the surface of the embankment.

The embankment response was measured in different periods of the year: January 2010, immediately after construction, autumn 2010 and summer

monolitico dell'intero rilevato [14] [15] [16].

3. METODOLOGIA

L'obiettivo principale della ricerca è comprendere il comportamento del materiale C&DW nelle costruzioni stradali, misurando la risposta di un rilevato stradale sotto carico ripetuto di un mezzo pesante in diverse condizioni ambientali. La memoria descrive i metodi, i test e le analisi condotte e quelle necessarie in futuro. Nella fase preliminare sono stati condotti in laboratorio test granulometrici, di abrasione

(LA), di sensibilità all'acqua (Limiti di Atterberg) e di portanza CBR. Durante la fase di costruzione del rilevato la compattazione è stata valutata con la prova di densità in situ, con il metodo del cono di sabbia e la capacità portante mediante prove su piastra, sia di tipo dinamico sia di tipo statico.

Il rilevato C&DW, costruito nel gennaio 2010, fa parte dei lavori stradali della nuova SS 554, è lungo circa 30 m, largo 4 m e alto 3 m. L'area strumentata copre circa 5 m² posizionati sul lato destro del rilevato (Figura 5) ed è in grado di catturare completamente l'effetto trasmesso dai pneumatici su entrambi gli assi del mezzo pesante in entrambe le direzioni.

Il rilevato sperimentale è stato strumentato con un totale di 12 strumenti: 9 LVDT e 3 celle di pressione. I sensori sono stati installati in 3 diversi livelli per monitorare l'intera struttura. In ogni strato sono stati installati 2 LVDT standard in posizione longitudinale e trasversale per la deformazione, 1 LVTD per lo studio della deformazione verticale e 1 cella di pressione per la pressione verticale. Le risposte degli

2011. This allowed us to highlight the performance of the material and their evolution under real traffic and environmental conditions.

The laboratory tests, conducted on the samples taken from the C&DW recycling plant, concerned: the flattening index of the aggregate, the shape of the coarse aggregate, the percentage of crushed, the Atterberg limits and the density. These methods have been the same used to evaluate the performance of natural aggregates.

Previous studies on C&DW aggregates shows that they do not always meet all the specifications required for tests on traditional materials and that in many cases there is no correlation between these tests and the results in situ [5] (Portas, 2004). Vice versa, in situ tests, on full-scale models, highlight satisfactory and increasing performance over time. For this reason, it is essential to compare the data obtained in the laboratory test and those obtained under real conditions of use.

The sensors were positioned at three different depths 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m. The material was laid in 25 cm layers, and each layer 4 instruments were installed: 3 LVDT and 1 pressure cell, for a total of 12 instruments (Figure 6). The horizontal distance between the instruments of 0.6 m reduces the possibility of mutual influence of the sensors.

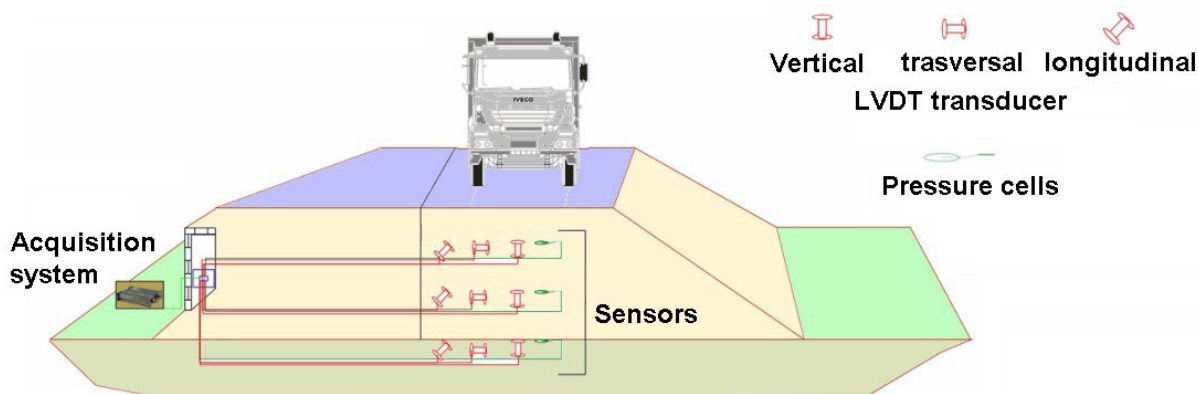


Figure 6. Experimental surveyed cross section and position of the sensors.

The 3 pressure cells were set according to the maximum expected pressure: 0.068 MPa at 1.5 m, 0.136 at 1.0 m and 0.344 MPa at 0.5 m. The installation techniques used have followed the protocols already verified in the Virginia Smart Road and Italian Smart Runway projects.

A thin layer of sand was added around the sensors to ensure complete contact between the pressure cell and C&DW materials, placing a geotextile and sand sheet at the top as protection from the rollers during compaction (Figure 7).

strumenti sono state misurate dopo il completamento del rilevato da un sistema di acquisizione dati collegato ad un notebook. Per simulare l'effetto del traffico è stato utilizzato un mezzo pesante a 4 assi (42 t) a velocità diverse: 1.5 km/h, 2.5 km/h e 4 km/h, con offset diversi su tutta la superficie. Preliminarmente, il peso degli assi è stato determinato mediante pesa-assi elettronico per ciascun asse del mezzo al fine di conoscere il livello tensionale imposto sulla superficie del rilevato.

La risposta del rilevato è stata misurata in diversi periodi dell'anno: gennaio 2010, subito dopo la costruzione, autunno 2010 ed estate 2011. Ciò ha permesso di mettere in evidenza le prestazioni del materiale in fase di esecuzione nonché la loro evoluzione in condizioni di traffico ed ambientali reali.

I test di laboratorio, condotti sui campioni prelevati dall'impianto di riciclaggio di C&DW, hanno riguardato: l'indice di appiattimento dell'aggregato, la forma dell'aggregato grosso, la percentuale di frantumato, la qualità dei fini e la densità dell'inerte. I metodi sono stati gli stessi utilizzati tradizionalmente per valutare le prestazioni degli aggregati naturali. Precedenti studi su aggregati C&DW hanno dimostrato che essi non sempre soddisfano tutte le specifiche previste per i test sui materiali tradizionali e che in molti casi non sussiste correlazione tra tali test e i risultati in situ [5] (Portas, 2004). Viceversa, prove in situ, su modelli in scala reale, mettono in evidenza prestazioni decisamente

soddisfacenti e crescenti nel tempo. Per tale motivo è importante confrontare i dati ottenuti nei test di laboratorio e quelli ottenuti in condizioni reali d'impiego.

I sensori sono stati posizionati a tre diverse profondità 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m. Il materiale è stato steso in strati di 25 cm e in ogni strato sono stati installati 4 strumenti: 3 LVDT e 1 cella di pressione, per un totale di 12 strumenti (Figura 6). La distanza orizzontale tra gli strumenti di 0.6 m riduce la possibilità di reciproca influenza dei sensori.

Le tre celle di pressione sono

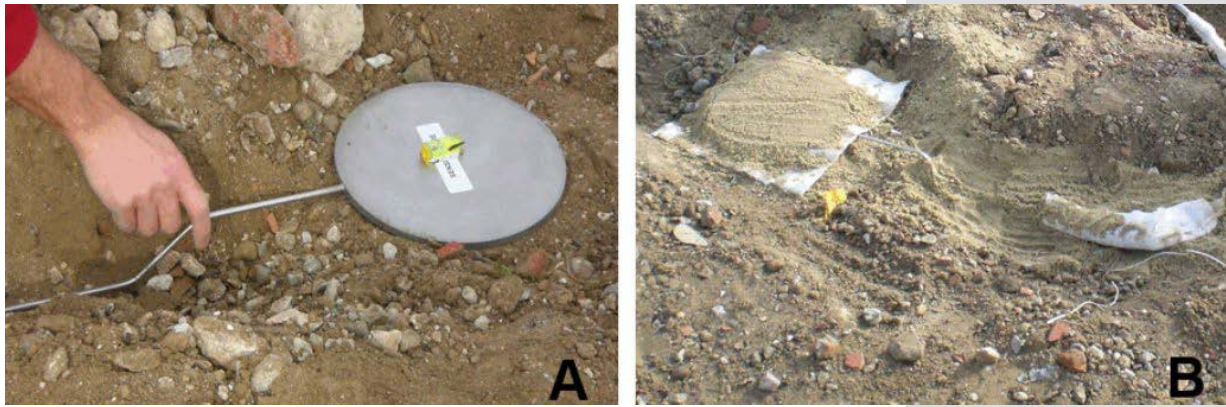


Figure 7. Installation of pressure cells (A) and displacement transducers (B).

The LVDTs installed are of 2 types, 25.4 mm and 50.8 mm, modified to improve the duration and coupling between sensor displacements and granular mass. They consist of 2 65 mm diameter aluminum plates connected with a sleeve (Figure 8). During installation, the two disks were kept with a predefined opening, controlling their vertical alignment. Modifications have been introduced to protect the LVDTs from water infiltration, with adhesive thermo-shrinking sheaths, and with a 25 mm diameter molded neoprene sleeve.

state setate in base alla pressione massima prevista: 0,068 MPa a 1.5 m, 0.136 a 1.0 m e 0.344 MPa a 0.5 m. Le tecniche di installazione utilizzate hanno seguito i protocolli già verificati nell'ambito dei progetti Virginia Smart Road e Italian Smart Runway. Un sottile strato di sabbia è stato aggiunto intorno ai sensori per assicurare un perfetto contatto tra cella di pressione e i materiali C&DW, disponendo in sommità un telo di geotessuto e sabbia come protezione dai rulli durante la compattazione (Figura 7). Gli LVDT installati sono di 2 tipologie, da 25.4 mm e 50.8 mm,

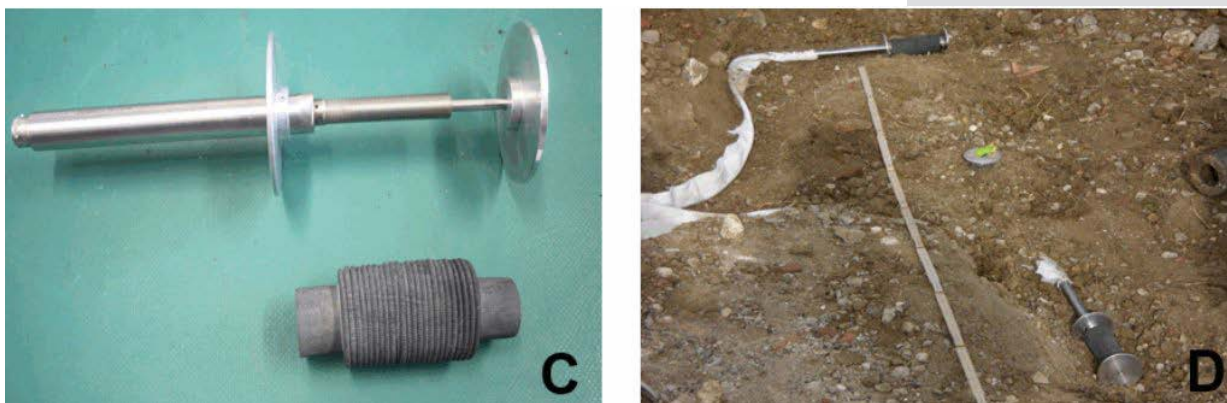


Figure 8. LVDT with plates and protective sleeve (C) and their positioning (D).

The IOtech data acquisition system used allows the contextual reading of the signal from the 12 instruments installed. The 2001 DaqBook portable system is a portable data acquisition device capable of simultaneously receiving analog, frequency and digital inputs in a frequency range up to 200 kHz and manageable from a laptop or PC via Ethernet. The unit is able to amplify and condition the signal by using two DBK65 units that have been connected to the 12 instruments. Each unit can accommodate 8 sensors where the voltage can be set; the pressure cell channels have been set to 10 V and LVDT to 24 V. The test program saw the application of a moving load, applied with a heavy

modificati per migliorare la durata e l'accoppiamento tra spostamenti del sensore e ammasso granulare. Essi consistono di 2 piastre di alluminio da 65 mm di diametro connesse con un manicotto (Figura 8). Durante l'installazione, i due dischi sono stati mantenuti con un'apertura predefinita, controllandone l'allineamento verticale. Modifiche sono state introdotte per proteggere gli LVDT dall'infiltrazione di acqua, con guaine termo-restringenti adesivi e con un manicotto di neoprene modellato di diametro 25 mm. Il sistema di acquisizione dati IOtech utilizzato permette la lettura contestuale del segnale proveniente dai 12 strumenti installati. Il

construction vehicle, both empty and fully loaded, with 4 axles and an empty weight of 11500 kg (Figure 9) in transit at different speeds.

sistema portatile DaqBook 2001 è un dispositivo portatile di acquisizione dati in grado di ricevere simultaneamente ingressi analogici,



Figure 9. Heavy vehicle on the C&D survey.

Each axle of the truck (Figure 10) and the tire pressure were measured before allowing the truck to maneuver on the embankment.

di frequenza e digitali in un range di frequenza sino a 200 kHz e gestibile da laptop o PC tramite Ethernet.

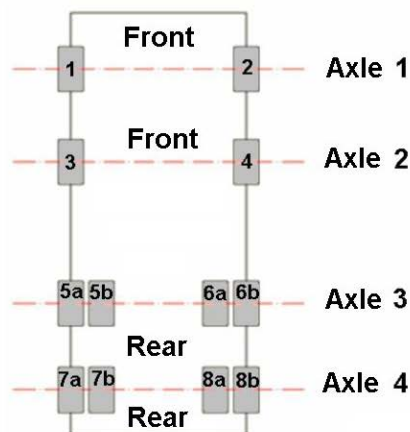


Figure 10. Measurement of axle weight of heavy vehicles and configuration of loads.

After the embankment construction, standard tests were carried out to determine the dry density and the bearing capacity by load plate tests. The sand cone method was used to measure dry density, according to the CNR UNI protocol valid for natural aggregates.

L'unità è in grado di amplificare e condizionare il segnale con l'impiego di due unità DBK65 che sono state collegate ai 12 strumenti. Ogni unità può ospitare 8 sensori dove è possibile impostare la tensione; i canali delle celle di pressione sono stati impostati a 10 V e LVDT a 24 V. Il programma dei test ha visto l'applicazione di un carico in

4. RESULTS

The C&DW material used highlighted a granulometric distribution resulting as coarse gravel sand A1a (HRB-AASHTO), with plasticity index $I_p = 0$. The bearing capacity (CBR) measured on the 25 mm ASTM sieve were carried out with different moisture contents. The results are shown in Table 1.

The mean value of the Los Angeles coefficient is 36.9%, highlighting a high aptitude for the fragmentation of the C&DW aggregates. Table 2 summarizes the values obtained.

The results of the standard tests show an average dry density of 89% of the maximum AASHTO mod. The values are low if referred to a non-bound and compacted layer in a standard way. The degree of compaction has been deliberately limited to make the progressive setting phenomenon evident. This occurs because C & DW materials have a high percentage of hydraulic binders (cement, lime, gypsum, etc.)

movimento, applicato con un mezzo pesante da cantiere, sia vuoto sia a pieno carico, con 4 assi e peso vuoto di 11500 kg (Figura 9) in transito a velocità differenti.

Ogni assale del camion (Figura 10) e anche la pressione dei pneumatici sono stati misurati prima di consentire al camion di manovrare sull'argine. Successivamente alla realizzazione del rilevato, sono stati eseguiti test standard per determinare la densità del secco e la capacità portante mediante prove su piastra. Il metodo del cono di sabbia è stato utilizzato per misurare la densità a secco, secondo il protocollo del CNR UNI valido per gli aggregati naturali.

4. RISULTATI

Il materiale C&DW utilizzato ha evidenziato una distribuzione granulometrica classificabile come sabbia grossolana ghiaiosa A1a (HRB-AASHTO), con indice di plasticità $I_p=0$. Le misure di portanza (CBR) sul passante al 25 mm ASTM sono state condotte con differenti contenuti di umidità. I risultati sono mostrati in Tabella 1.

I valori del coefficiente Los Angeles si attestano sul valore medio di 36.9%

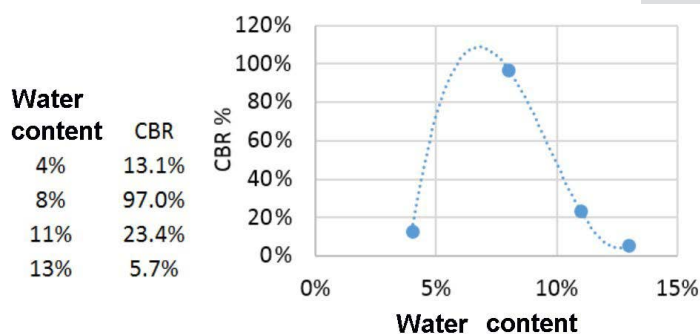


Table 1. CBR as a function of water content.

C&DW test	Classification	Value
HRB HRB	[A1-a]	coarse sand
Atterberg limit	$I_p = 0$	not plastic
Los Angeles	[%]	36.9

Table 2. Summary of laboratory tests.

		Section 3	Section 11
Natural density	[kN/m ³]	17.9	17.9
Dry density	[kN/m ³]	16.7	17
Water content	[%]	6.8	5.6
Max density AASHTO mod	[kN/m ³]	18.9	18.9
% compaction	[%]	88.4	89.9

Table 3. Summary of in situ tests.

Static plate tests were integrated with LWDT (Leight Weight Drop Test) dynamic tests for a quick estimation of the dynamic Evd module. Measurements were performed every 1.50 m, along the left and right median edge, along the entire length of the embankment with a total of 66 measurements. The adequate measures were performed in autumn 2010 and during the summer of 2011, highlighting the good behavior of the material after a post-consolidation period (Figure 6).

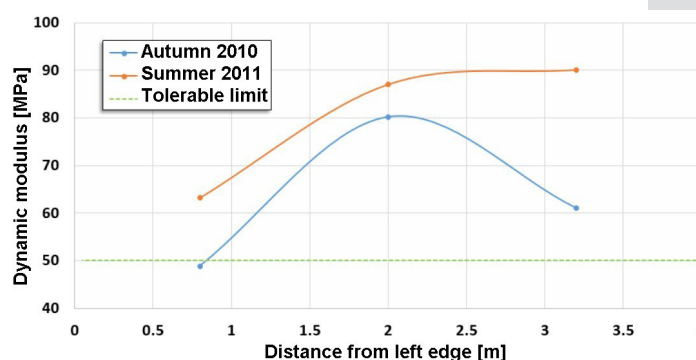


Figure 11. Average values of the Evd dynamic module between autumn 2010 and summer 2011.

The highest value is recorded along the central axis and is due to the compaction action of the means which is higher in the middle of the embankment. In fact, in this area, the machines work better than the edges have a higher bearing capacity. Another reason is due to the reduced width of the road, which meant that the area near the central axis was subjected to several passages of the compacting means double than the edge.

Figure 12 shows the response of the pressure cells due to the passage of the axis. The highest value was measured with the passage of the most massive quarter. The maximum pressure measured in tests during truck maneuvers was around 94 kPa (Figure 13). The vertical pressure decreases rapidly, almost linearly, within the first meter. A similar trend was achieved for the three different speeds.

The displacements (Figure 14) in the first layer (0.5 m) have been found between 5 and 7 mm, while at 1.5 m of depth between 0.5 and 1.8 mm.

In the other directions, longitudinal and transversal, the displacements have a lower absolute value, and they also become near to zero rapidly already in the first meter of depth.

Regarding the effect of transit speed the acquired data do not show a defined trend. This is due to the geometric configuration of the experimental road which did not allow an exact repetition of the tests on the same track covered by the tires.

evidenziando una grande attitudine alla frammentazione degli aggregati C&DW. Nella Tabella 2 sono riepilogati i valori ottenuti.

I risultati dei test standard evidenziano una densità del secco media del 89% di quella massima AASHTO mod.. I valori risultano bassi se riferiti ad uno strato non legato e compattato in modo standard. Infatti il grado di compattazione è stato volutamente limitato per rendere evidente il fenomeno di cementificazione. Ciò si verifica perché i materiali C

& DW hanno un'alta percentuale di leganti idraulici (cemento, calce, gesso, ecc.)

I test su piastra statica sono stati integrati con test dinamici Leight Weight Drop Test (LWDT,HMP LFG-K 2516) per una stima speditiva del modulo dinamico Evd. Le misure sono state eseguite ogni 1.50 m, lungo il bordo mediano, sinistro e destro, per l'intera lunghezza del terrapieno con un totale di 66 misurazioni. Le misure, pienamente soddisfacenti, sono state eseguite nell'autunno 2010 e nel corso dell'estate 2011, evidenziando il buon comportamento del materiale dopo un periodo di post-consolidazione (Figura 6).

Il valore maggiore si registra lungo l'asse centrale ed è riconducibile all'azione di compattazione dei mezzi d'opera che risulta essere maggiore al centro del rilevato. Infatti, in quest'area i macchinari lavorano meglio rispetto ai bordi perché più stabili. Un altro motivo è da ricondursi alla larghezza ridotta della strada che ha comportato che l'area in prossimità dell'asse centrale venisse sottoposta ad un numero di passaggi dei mezzi compattanti doppio rispetto al bordo.

Nella figura 12 è mostrata la risposta delle celle di pressione dovute al passaggio dell'asse. Il valore più alto è stato misurato con il passare del quarto più pesante. La pressione massima misurata nei test durante le manovre del camion è stata di circa 94 kPa (Figura 13). La pressione verticale diminuisce rapidamente, quasi linearmente, entro il primo metro. Una tendenza simile è stata ottenuta per le tre diverse velocità.

Gli spostamenti (Figura 14) nel primo strato (0.5 m) sono risultati compresi tra 5 e 7 mm, mentre a 1.5 m di profondità tra 0.5 e 1.8 mm.

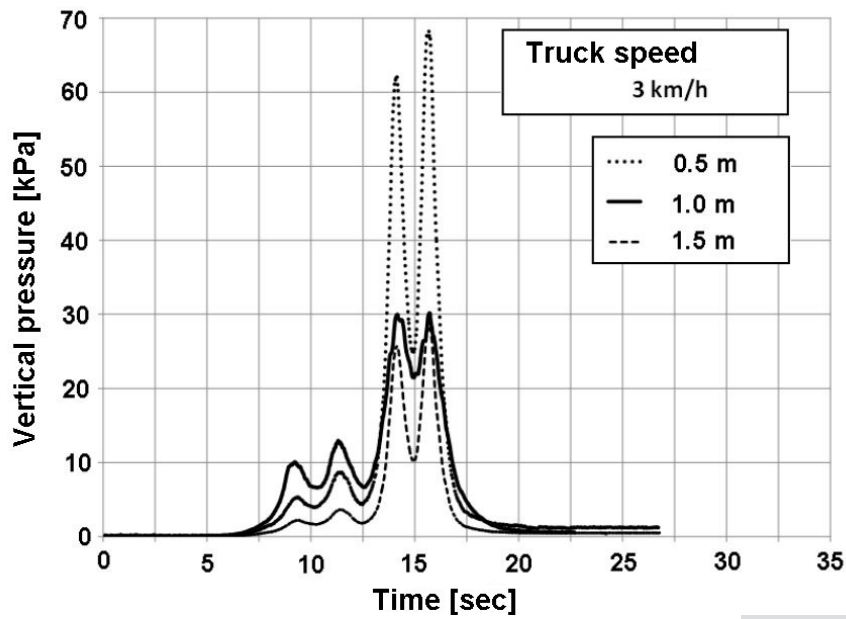


Figure 12. The response of the pressure cells during the transit of the 4 axes.

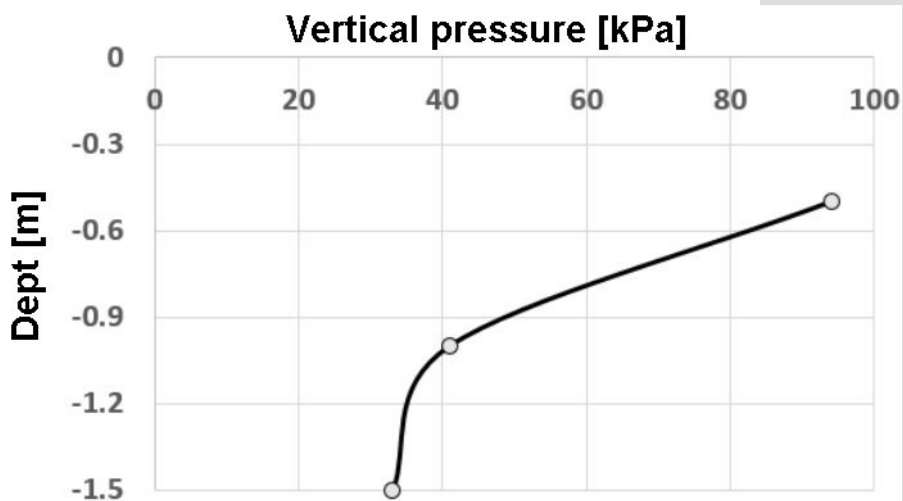


Figure 13. Response of pressure cells to different depths.

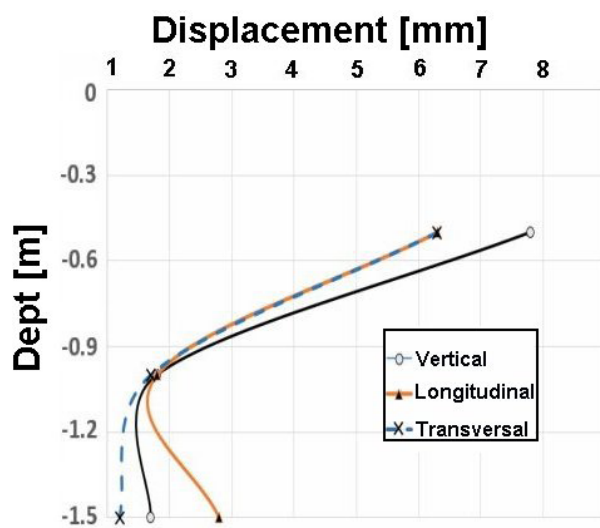


Figure 14. The response of displacement LVDTs to different depths and direction.

5. CONCLUSIONS

The research aimed to verify the behavior in real working conditions of C&DW materials using displacement and pressure sensors in an experimental survey. The value of the dynamic module was on average equal to 61.3 MPa higher than the generally accepted minimum values of 50 MPa. The repetition of the tests after one year shows how the value grows further, reaching 80.2 MPa with an increase of 26.7%. The field of stress and displacements is rapidly extinguished already in the first meter of the C&DW embankment, highlighting the excellent behavior of the materials.

The possibility of reusing demolition debris deriving from civil and industrial buildings is, therefore, a correct technique to guarantee the mechanical performance of road bodies and at the same time reduce the impact of waste in the environment.

6. REFERENCES

- [1] ISPRA Report 2018, "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici," web source <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/suolo-e-territorio/il-consumo-di-suolo/i-dati-di-consumo-di-suolo>, 2018.
- [2] FHWA, (2011) "The Sand-Clay Roads of South Carolina," web source <http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/sandclay.cfm>
- [3] Siham, K., Fabrice, B., Edine, AN., Patrick, D. (2007). "Marine Dredged Sediments as New Materials Resource for Road Construction." Waste Management. v 28, n 5, p 919-928.
- [4] Ndoke, Peter (2011) "Performance of Palm Kernel Shells as a Partial Replacement for Coarse Aggregate in Asphalt Concrete," web page <http://lejpt.academicdirect.rog/A09/145-152.htm>.
- [5] Portas, S. (2004) "Case Study: Mechanical reliability of sub-grade layer built with demolition waste materials." Preceding of International Congress SIIV– New Technologies And Modelling Tools For Roads.
- [6] James Rombi, Silvia Portas, Mauro Coni (2010) Experimental Investigation on the use of Recycled Aggregates, Proceedings of the 10th International Conference On Sustainable construction materials and pavement engineering
- [7] Imad L. Al-Qadi, Silvia Portas, Mauro Coni, Samer Lahouar Runway Instrumentation and Response Measurements
- [8] Tabatabaee, N., I. L. Al-Qadi, and P. E. Sebaaly. Field Evaluation of Pavement Instrumentation Methods. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, ASTM, Vol. 20, No. 2, March 1992, pp. 144-151.
- [9] ALTMAT-ALternative MATerials in Road Construction D7: web source <http://www.trl.co.uk/altmat/D7FinalReport.ZIP>
- [10] SAMARIS project web source <http://samaris.zag.si/documents.htm>
- [11] Jakobsen, J.B. (1992) "Quantitativi, composizione e riciclaggio dei rifiuti di costruzione e demolizione in Europa," in SR Rifiuti Solidi.
- [12] J M Reid, The use of alternative materials in road construction" UNBARS Conference, Nottingham, UK, June 2000
- [13] Matt Cegelis and John Renyck Incorporating Waste and Recycled Materials into Road Construction (2011)
- [14] Gambin, N., Leo, C. and Rahman, A. (2004) "Recycling of construction and demolition materials as part of the waste minimization strategy in the Sydney Basin and possible lessons for the Himalayas."
- [15] York, D, Hill, A R, Taylor, J V, Dawson, A R & Hall, S, "Environmental Assessment of Road Construction Materials," Britpave Seminar 'A greener way ahead,' October 1999.
- [16] Hill, A R & Dawson, A R, "Observations of leaching of low concentration contaminants from alternative aggregates in road constructions," Proc. Waste Materials in Construction-

Nelle altre direzioni, longitudinali e trasversali, gli spostamenti hanno valore assoluto inferiore e anch'essi si estinguono rapidamente già nel primo metro di profondità. Per quanto concerne l'effetto della velocità di transito i dati acquisiti non mostrano un trend definito. Ciò è da imputarsi alla configurazione geometrica della strada sperimentale che non ha permesso un'agevole ripetizione dei test sulla stessa traccia percorsa dai pneumatici.

5. CONCLUSIONI

Lo scopo della ricerca è stato quello di verificare il comportamento nelle reali condizioni di lavoro dei materiali C&DW utilizzando sensori di spostamento e di pressione all'interno di un rilevato sperimentale. Il valore del modulo dinamico è risultato mediamente pari 61.3 MPa superiore ai valori minimi generalmente accettati di 50 MPa. La ripetizione dei test a distanza di un anno mostra come il valore cresca ulteriormente raggiungendo 80.2 MPa con un incremento del 26.7%. Il campo delle tensioni e degli spostamenti si estingue rapidamente già nel primo metro del rilevato C&DW evidenziando un ottimo comportamento dei materiali. La possibilità di riutilizzo delle macerie da demolizione derivanti dagli edifici civili ed industriale è dunque una tecnica più che valida per garantire le prestazioni meccaniche dei corpi stradali e al contempo ridurre l'impatto degli scarti nel territorio.

The Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, 'WASCON 2000', 31 May-2 June, Harrogate, UK, Ed. Woolley, G R, Goumans, J J J & Wainwright, P J, Elsevier Science Ltd., 2000

- [17] M.Coni, F. Annunziata, "The employment of not traditional materials in road infrastructures. The research state", International Conference VARIREI, L'Aquila, 29 May 2005. Web source <http://people.unica.it/mauroconi/files/2011/10/coni82full.pdf>.