



## **CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DI AGGREGATI RICICLATI DA DEMOLIZIONI PER SOTTOFONDI STRADALI**

**Massimo Losa**

Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Pisa  
Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa  
Tel: +39 050.550421 - Fax: +39.050.553573  
E-mail: losa@ing.unipi.it

**Alessandro Marradi**

Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Pisa  
Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa  
Tel: +39 050.550421 - Fax: +39.050.553573  
E-mail: a.marradi@ing.unipi.it

# **CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DI AGGREGATI RICICLATI DA DEMOLIZIONI PER SOTTOFONDI STRADALI**

**MASSIMO LOSA** - Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa

**ALESSANDRO MARRADI** - Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa

## **SOMMARIO**

Nel presente lavoro si illustrano i risultati di indagini sperimentali condotte con l'obiettivo di valutare l'idoneità di alcuni tipi di aggregato riciclato ad essere impiegati nelle costruzioni stradali, non solo per la realizzazione di sottofondi ma anche di strati di fondazione. I materiali esaminati sono stati preventivamente caratterizzati con le procedure convenzionali di analisi normalizzate per i materiali stradali tradizionali. Successivamente i risultati delle indagini di laboratorio sono stati integrati con quanto ricavato da prove con piastra, eseguite su strati di materiali riciclati ricostruiti in laboratorio in scala reale, nonché da prove con FWD, effettuate su due sovrastrutture i cui sottofondi e fondazioni sono stati realizzati utilizzando lo stesso tipo di aggregati.

## **ABSTRACT**

This paper describes the results of experimental tests performed in order to investigate the suitability of some recycled aggregate materials to be used in road constructions, not only in compacted subgrade but also in subbase layers. First these materials have been investigated by using normalised tests developed for conventional road materials. Then the results of the laboratory tests have been integrated with that ones obtained by plate load tests, performed on layers of recycled aggregates built in real scale within the laboratory, as well as by FWD tests, performed on existing pavement structures where the recycled aggregates have been used to built both the subgrade and the subbase layers.

## **1. INTRODUZIONE**

Per "materiali riciclati da costruzione e demolizione ("C&D") si intendono, correntemente, quelli come il calcestruzzo, la muratura e tutti gli altri materiali provenienti principalmente dalla demolizione di edifici e/o di sovrastrutture stradali con esclusione di quelli metallici, lignei e in plastica.

Al riciclaggio di questo tipo di rifiuto viene in genere riconosciuto un duplice vantaggio: la possibilità di conservare le risorse non rinnovabili diminuendo la richiesta di materiali di origine naturale e la riduzione di danni ambientali connessa alla minimizzazione delle quantità da conferire alle discariche.

Uno dei campi più interessanti per il loro reimpiego è quello delle costruzioni stradali, attraverso la loro conversione in aggregati utilizzabili per la formazione di rilevati, di sottofondi o di alcuni strati delle sovrastrutture.

Al fine di approfondire ed ampliare le conoscenze delle reali caratteristiche tecnologiche e prestazionali di questi materiali, sono state eseguite presso il Laboratorio Sperimentale Stradale del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa indagini sul materiale da riciclaggio prodotto con continuità da un impianto locale che

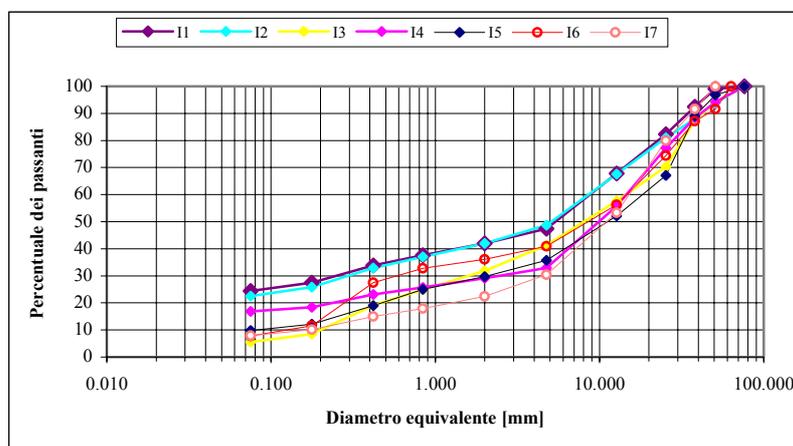
utilizza in prevalenza rifiuti provenienti da demolizione di vecchi edifici in muratura. Ai fini dello studio sono stati presi in esame due tipi di questi materiali che possono considerarsi caratteristici di tale produzione.

La sperimentazione e l'analisi dei dati sono state indirizzate sia alla qualificazione e caratterizzazione del materiale, sia alla valutazione delle caratteristiche prestazionali di strati con essi realizzati.

## 2. CARATTERIZZAZIONE DELL'AGGREGATO RICICLATO CON LE PROCEDURE CONVENZIONALI

E' ben noto che i materiali provenienti da riciclaggio di demolizioni sono difficilmente caratterizzabili con le procedure convenzionali di analisi normalizzate per i materiali stradali tradizionali essendo questo tipo di approccio non esaustivo ai fini della previsione del comportamento del materiale una volta messo in opera essenzialmente per i motivi riportati qui di seguito.

- I requisiti granulometrici richiesti dalle vigenti Norme si riferiscono ad aggregati di origine naturale e si basano su esperienze e specifiche sperimentazioni; per questo motivo il confronto delle caratteristiche granulometriche di un aggregato riciclato con quelle previste per i materiali convenzionali può non rappresentare di per sé un affidabile metodo di previsione delle relative prestazioni in opera [1]; peraltro, per questi materiali, in alcuni casi si riscontra una variazione della composizione granulometrica dopo la messa in opera.
- A causa dell'organizzazione dei processi produttivi e della variabilità delle proprietà dei materiali conferiti all'impianto di riciclaggio, si verificano anche sostanziali differenze tra le granulometrie di materiali prelevati dallo stesso impianto ma appartenenti a stoccaggi realizzati in tempi diversi (Figura 1)[2, 3].



**Figura 1. Confronto tra le curve granulometriche di campioni di aggregato riciclato prelevati da differenti stoccaggi dello stesso impianto.**

- L'analisi dei risultati di prove per la determinazione del coefficiente di abrasione "Los Angeles" [4, 5, 6, 7], effettuate su aggregati provenienti dal riciclaggio di macerie di demolizioni edilizie, evidenzia l'impossibilità di stabilire con sufficiente attendibilità un campo di valori caratteristico da attribuire a questa tipologia di materiali. Analisi precedentemente condotte [8] hanno evidenziato che tali aggregati

presentano coefficienti L.A. che ricadono in un campo assai ampio (compreso tra il 30% ed il 50%) e che si riscontra una notevole variabilità dei risultati anche per materiali prodotti dallo stesso stabilimento; a titolo di esempio, sono riportati nella Tabella 1 i risultati delle determinazioni eseguite sul materiale di questa indagine per ciascuna delle classi granulometriche in esso presenti.

**Tabella 1. Valori dei coefficienti di abrasione "Los Angeles" per i materiali I e II**

Materiali	Classi granulometriche						
	1	2	3	A	B	C	D
<b>TIPO I</b>	-	-	-	-	30.0	-	-
<b>TIPO II</b>	43.0	43.5	44.0	42.0	41.0	40.0	41.0

- Le analisi di composizione, condotte seguendo il "metodo di prova per la determinazione delle categorie dei materiali componenti attraverso esame visivo" [9] (secondo le categorie previste dalla Commissione edilizia dell'UNI, Gruppo di Lavoro 7 – SC1 [10, 11]), non sono in grado di mettere in evidenza differenze compositive cui possa essere attribuita la causa di una diversità così marcata di questi materiali nei confronti dell'abrasione "Los Angeles". Tali variazioni invece potrebbero essere correlate alla presenza di diverse percentuali di pietrisco naturale, laterizi, calcestruzzo, malte, che sono caratterizzate da valori diversi di resistenza all'abrasione e che sono tutte inglobate nella prima categoria delle "tipologie di materiali". D'altra parte, anche quando si provveda, mediante analisi visiva, ad effettuare una classificazione più accurata dei componenti in modo da separare i materiali litici, il calcestruzzo frantumato, i laterizi, le malte, gli intonaci e i prodotti ceramici, potranno comunque verificarsi notevoli differenze del coefficiente di abrasione, anche su campioni simili, a seguito della diversa qualità dei materiali conferiti all'impianto.
- I risultati di prove C.B.R. condotte su riciclati da demolizioni edili, hanno evidenziato valori dell'indice C.B.R. in ogni caso superiori al valore del 30% che la Norma CNR [12] indica come limite di accettabilità per gli aggregati di origine naturale da impiegare in strati di fondazione. La particolarità di alcuni risultati riguarda un fenomeno non riscontrabile negli aggregati di origine naturale, cioè che l'indice C.B.R. "dopo saturazione" risulta quasi sempre superiore a quello ricavato sul campione in condizioni ottime di umidità e massa volumica.

### **3. CARATTERIZZAZIONE DELL'AGGREGATO RICICLATO CON PROVE DI TIPO PRESTAZIONALE SUL MATERIALE IN OPERA**

La possibilità di utilizzazione di questi materiali per la realizzazione di strati di rilevato e di sottofondi è stata recentemente presa in considerazione nello studio a carattere prenormativo per la redazione delle norme tecniche di tipo prestazionale per capitolati speciali d'appalto [13].

Di contro, il loro impiego per la costruzione di strati di fondazione suscita ancora alcuni dubbi legati all'intrinseca variabilità della provenienza dei componenti che possono generare disuniformità di comportamento e non garantire la conservazione nel tempo di determinate caratteristiche prestazionali che, da un punto di vista strettamente normativo, possono essere messe in evidenza dalla variabilità dei valori del coefficiente "Los Angeles". Con riferimento ai requisiti di accettazione previsti dalla norma per aggregati naturali da impiegare in strati non legati di fondazione e di base [12], questi

materiali sono classificabili come "miscele di tipo 2", essendo caratterizzati da valori del coefficiente LA non inferiore a 40, e quindi il materiale è utilizzabile esclusivamente per strade con livelli di traffico classificati "leggero" o "medio".

*D'altra parte per questi materiali può essere considerata la possibilità offerta dalla citata Norma [12] di estendere l'impiego di materiali classificati come "Tipo 2" a strati di fondazione per qualsiasi categoria di traffico nel caso che "uno studio apposito o il comportamento in strutture esistenti ne provino l'idoneità".*

Con riferimento a questo criterio, per valutare il comportamento degli aggregati riciclati presi in esame, sono state eseguite prove di tipo prestazionale in scala reale sia su strati preconfezionati in laboratorio sia su sovrastrutture in esercizio i cui sottofondi e fondazioni sono stati realizzati con i materiali stessi.

### 3.1 Prove di carico con piastra su modello in scala reale

Poiché il citato studio prenormativo [13] indica la prova di carico con piastra come valida metodica per apprezzare le effettive prestazioni di materiali anche non tradizionali, è stata predisposta un'attrezzatura per determinare su saggi in scala reale e in laboratorio, quindi in condizioni ambientali controllate (figura 2), i moduli di strati realizzati con lo stesso materiale, precedentemente caratterizzato con le convenzionali prove su campioni.



**Figura 2. Strati realizzati in laboratorio in scala reale**

Sono stati realizzati due strati: uno costituito da materiale terroso, appartenente al gruppo A-4 della classificazione CNR-UNI 10006, avente spessore pari a cm 30 e steso in due strati successivi direttamente su un piano rigido; ed uno costituito dal citato materiale riciclato "tipo I", messo in opera in due strati successivi, ognuno di spessore pari a cm 10. Su ciascuno dei due strati, dopo la stesa e la compattazione, sono state eseguite determinazioni della massa volumica e dell'umidità; i relativi valori medi sono riportati in tabella 2.

**Tabella 2. Valori medi di alcune proprietà fisiche dei materiali in opera**

Strato	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)
Materiale terroso	1.71	15.5
Materiale da riciclaggio	1.93	6.9

Successivamente sono state effettuate prove di carico a cicli ripetuti con piastre di diametro pari a 16 e a 30 cm, registrando le deflessioni anche a distanza di 20, 30 e 40 cm dal centro della piastra; con tali valori è stato determinato il modulo di deformazione  $M_d$  e il modulo elastico secante secondo la teoria del Boussinesq. Le determinazioni sono state ripetute dopo 1 e 7 giorni dalla realizzazione degli strati di prova al fine di apprezzare come il tempo di maturazione del materiale può influenzare i valori dei suddetti parametri.

Per il calcolo del modulo elastico, utilizzando il metodo di Odemark degli spessori equivalenti [14], il sistema multistrato è stato trasformato in un semispazio indefinito elastico omogeneo ed isotropo; così operando ciascuno strato è stato sostituito, passo dopo passo, con un altro avente lo stesso modulo dello strato sottostante ed altezza tale da lasciarne inalterata la rigidezza; il coefficiente di Poisson è stato assunto uguale per tutti gli strati e pari a  $\nu = 0.45$ .

### ***Il materiale terroso***

Per questo materiale si è ipotizzato che il modulo elastico dipenda dalla tensione principale massima  $\sigma_1$  prodotta dal carico applicato secondo la relazione:

$$E = C \left( \frac{\sigma_1}{p} \right)^n \quad (1)$$

dove  $p$  è la tensione di riferimento, comunemente assunta pari alla pressione atmosferica (0.1 Mpa) mentre  $C$  ed  $n$  sono costanti da determinare in funzione di diversi valori della tensione principale massima.

Il valore del modulo "equivalente"  $E_o$ , sulla superficie dello strato a grana fine, è stato calcolato in base ai valori degli abbassamenti  $d_o$  della piastra rigida avente diametro pari a 16 cm, utilizzando la nota formula di Boussinesq per il semispazio elastico, omogeneo ed isotropo; per effetto della non linearità espressa dalla relazione (1), si dimostra che il valore del modulo "equivalente"  $E_o$  dipende dalla tensione trasmessa dalla piastra secondo la relazione seguente:

$$E_o = (1 - 2n)C \left( \frac{\sigma_o}{p} \right)^n \quad (2)$$

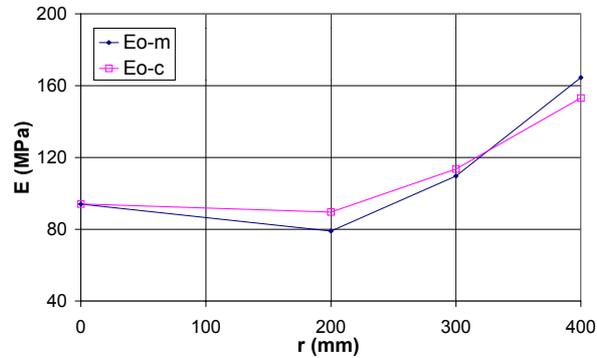
dalla quale è possibile determinare i parametri  $n$  e  $C$ ; per il caso in esame essi sono risultati rispettivamente pari a  $C=28$  ed  $n=-0.5$ .

### ***Il materiale da riciclaggio***

I valori del modulo  $E$  del materiale da riciclaggio sono stati calcolati per ciascuno dei due strati (di spessore pari a 10 cm) componenti quello complessivo di 20 cm, in corrispondenza di due diversi incrementi della pressione trasmessa dalla piastra rispetto a quella del precarico (0.05 MPa).

I valori calcolati sono riportati in tabella 3, dove si è indicato con "I" lo strato inferiore di materiale da riciclaggio e con "II" quello superiore; in essa sono riportati anche i valori del modulo  $E_o(\cdot)$  calcolati per il semispazio indefinito (omogeneo ed isotropo) avente rigidezza equivalente al sistema reale stratificato. Nella figura 3 è riportato il confronto tra i valori del modulo equivalente misurato  $E_o-m$  e quello calcolato  $E_o-c$  a diverse distanze dalla piastra per valutare l'affidabilità della soluzione trovata. In tutti i casi esaminati lo scarto quadratico medio tra i valori  $E_o-m$  ed  $E_o-c$  è

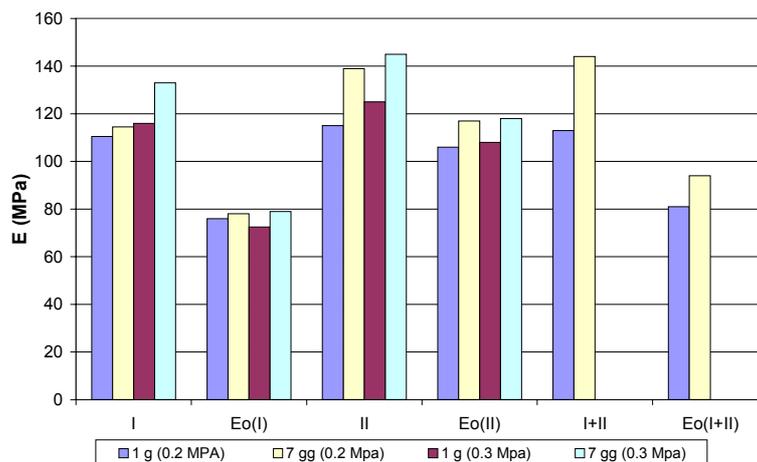
risultato inferiore al 5%. Tali valori sono riportati in forma grafica nella figura 4; il confronto tra i risultati delle prove ha messo in evidenza il miglioramento, dopo 7 giorni, delle caratteristiche prestazionali del materiale preso in esame, miglioramento imputabile a proprietà auto-cementanti. L'entità di tale incremento è mediamente pari a circa il 16%.



**Figura 3. Confronto fra i valori dei moduli equivalenti calcolati e misurati**

**Tabella 3. Moduli degli strati da prove con piastra su modello in scala reale**

	1 giorno		7 giorni	
	(0.2 MPA)	(0.3 Mpa)	(0.2 Mpa)	(0.3 Mpa)
I	110,5	116	114,5	133
Eo(I)	76	72,5	78	79
II	115	125	139	145
Eo(II)	106	108	117	118
I+II	113		144	
Eo(I+II)	81		94	



**Figura 4. Moduli degli strati da prove con piastra su modello in scala reale**

I valori dei moduli di deformazione ed elastici così determinati sono stati poi confrontati con quelli ottenuti con le determinazioni sperimentali condotte sulle sovrastrutture di due diverse tratte stradali per le quali è stato utilizzato lo stesso tipo di materiale oggetto d'indagine per la formazione dei relativi sottofondi e delle fondazioni stradali.

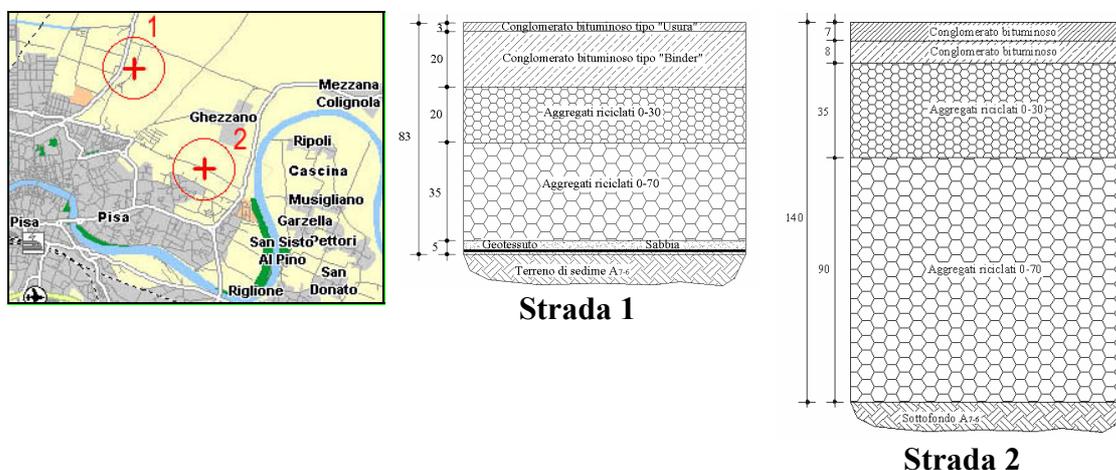
### 3.2 Prove con FWD su sovrastrutture in esercizio

Queste prove sono state eseguite sulle sovrastrutture di due strade extraurbane secondarie realizzate nel 1997 nella periferia della città di Pisa (Figura 5) aperte al traffico nella seconda metà del 1998. Una rappresentazione schematica delle pavimentazioni realizzate è riportata nella stessa figura 5.

Durante la costruzione sono stati eseguiti i consueti controlli sperimentali; in particolare le prove di carico con piastra, effettuate sul piano di posa del conglomerato bituminoso, hanno evidenziato buone caratteristiche di portanza in termini di modulo di deformazione  $M_d$ , i cui valori sono risultati compresi tra 110 e 120 MPa (nell'intervallo di pressione compreso tra 0,15 e 0,25 N/mm<sup>2</sup>).

Sull'infrastruttura identificata come "Strada 1" sono stati eseguiti anche rilievi di traffico con sensori ad induzione magnetica posizionati sulla pavimentazione.

Il TGM è risultato di circa 5000 veicoli/giorno, con una percentuale di veicoli commerciali pari al 6%. Il traffico che interessa l'infrastruttura si può quindi classificare "leggero" [15]. Sulla base dei dati rilevati è stato stimato il traffico commerciale totale che ha interessato l'infrastruttura dal momento della sua entrata in esercizio, che è risultato pari a circa  $2 \cdot 10^5$  veicoli commerciali.



**Figura 5. Ubicazione delle infrastrutture e rappresentazione schematica delle sovrastrutture**

Per le sovrastrutture in esame si è proceduto all'esecuzione di prove con FWD seguendo le modalità sperimentali comunemente utilizzate per pavimentazioni con strati di fondazione e sottofondi tradizionali. Per ciascun sito, le prove sono state eseguite su un tratto di lunghezza pari a circa 200 m; per la "Strada 1" queste hanno interessato

entrambe le corsie di marcia con un interasse di circa 20 m, mentre per la "Strada 2" sono state eseguite solo su una corsia e ad interasse di circa 10 m.

Le acquisizioni dei valori di picco delle deflessioni sono state effettuate per diversi valori della pressione imposta alla piastra (400, 600, 800, 1000 KPa), eseguendo tre cadute della massa battente per ciascun livello di pressione e registrando, alla terza caduta, le deflessioni in corrispondenza delle seguenti distanze dei geofoni dal centro della piastra di carico: 0, 0.2, 0.3, 0.45, 0.9, 1.2, 1.5 m. Ciascuna serie di misure è composta quindi di dodici cadute delle masse e, in ogni punto di prova, la serie è stata ripetuta tre volte.



**Figura 6. Prove con attrezzatura FWD**

La caratterizzazione meccanica degli strati della pavimentazione mediante l'attrezzatura FWD richiede la valutazione dello stato deformativo della struttura mediante l'impiego di metodi di calcolo razionali.

A tal fine è stata eseguita un'analisi statica equivalente con il programma BAP [16], che ha il pregio di poter modellare anche materiali il cui comportamento meccanico è di tipo elastico non lineare.

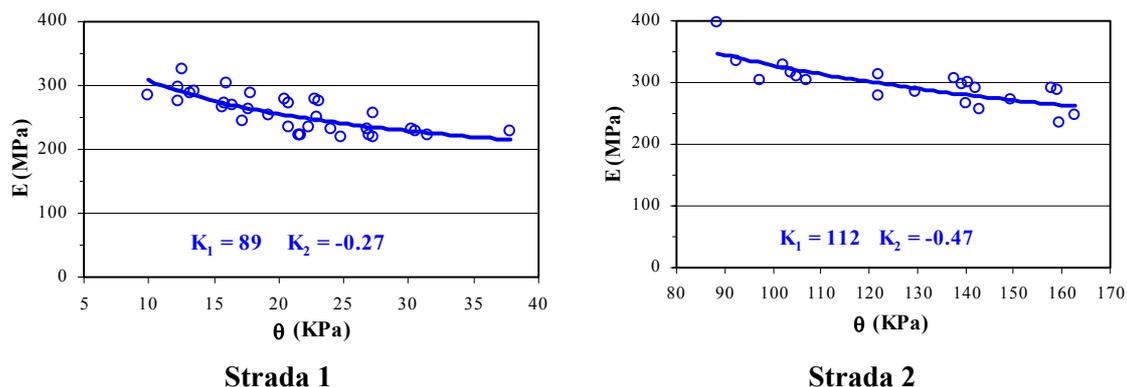
Per i materiali granulari con comportamento non lineare, il modulo di elasticità viene messo in relazione allo stato tensionale in esso presente mediante la seguente espressione:

$$E = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (3)$$

dove  $\theta$  è il primo invariante di tensione, uguale alla somma delle tensioni principali nel punto considerato,  $k_1$  e  $k_2$  sono costanti di regressione che dipendono dalle proprietà fisiche del materiale; in generale, per i materiali non legati con comportamento di tipo non lineare si riscontra un aumento del modulo all'aumentare dell'invariante lineare delle tensioni.

L'elaborazione dei dati rilevati ha consentito di evidenziare alcune particolarità del comportamento meccanico dei materiali riciclati.

I risultati della elaborazione della prima serie di prove, per tutti i punti di misura e per ognuna delle due strade, sono riportati nei diagrammi di figura 7; essi mettono in evidenza una diminuzione del valore del modulo con l'aumentare del livello tensionale nello strato indagato e quindi un comportamento sensibilmente differente rispetto a quello tipico degli aggregati tradizionalmente impiegati in strati non legati; tale fenomeno sembra essere più accentuato quando il materiale è sottoposto a stati tensionali più elevati.



**Figura 7. Caratterizzazione dell'aggregato riciclato da prove con FWD secondo le usuali procedure**

I risultati dell'elaborazione dei dati rilevati nelle serie di prove successive, eseguite sempre nello stesso punto, sono riportati nelle figure 8, 9 e 10 (serie R1, R2, R3). Essi, oltre a confermare la diminuzione del valore del modulo elastico dello strato all'aumentare del livello di tensione, mostrano un'interessante evoluzione del comportamento del materiale con la ripetizione delle sollecitazioni trasmesse dalla piastra di prova, caratterizzata da una graduale riduzione del valore del modulo che poi tende a stabilizzarsi su un valore asintotico. La diminuzione dei valori dei moduli qui riscontrata può dare un'idea del comportamento a fatica del materiale e suggerisce l'opportunità di prestare particolare cautela nel determinarne i valori da utilizzare nel dimensionamento della pavimentazione.

Il fenomeno riscontrato, imputabile alla disgregazione dei grumi di malta cementizia ancora presenti ovvero alla crisi dei deboli legami di autocementazione presenti nel materiale in opera, non si manifesta invece negli aggregati di origine naturale, come si può evincere dai risultati di serie di prove con FWD ripetute su una sovrastruttura in condizioni analoghe a quella in esame, ma realizzata utilizzando inerti naturali; per confronto, i valori dei moduli calcolati in quest'ultimo caso sono riportati negli stessi grafici delle figure 8, 9 e 10 (punti N).

Le ipotesi qui avanzate per l'interpretazione del fenomeno della riduzione del modulo degli strati di aggregato riciclato sembrano la più plausibile per motivare le anomalie riscontrate in recenti sperimentazioni condotte in Svezia [17], secondo le quali i valori dei moduli resilienti ricavati in laboratorio sono risultati sensibilmente inferiori a quanto registrato in sito a mezzo di apparecchiatura FWD sullo stesso tipo di materiale.

È emersa quindi l'opportunità di fare riferimento, nella caratterizzazione di questi materiali, ai valori del modulo di elasticità normale calcolato riferendosi ai valori delle deflessioni registrate in corrispondenza del valore massimo della tensione trasmessa dalla piastra di carico.

È opportuno notare che, in ogni caso, i valori dei moduli degli strati realizzati con questo tipo di aggregati riciclati evidenziano caratteristiche meccaniche del materiale confrontabili con quelle di aggregati tradizionali, se non addirittura superiori.

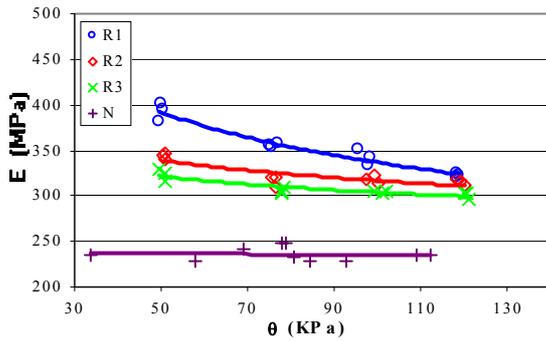


Figura 8. Valori del modulo al variare dell'invariante di tensione – Postazione 1

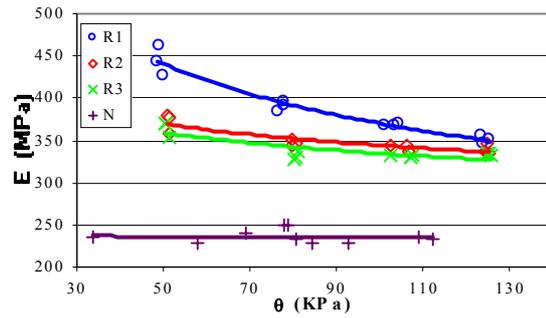


Figura 9. Valori del modulo al variare dell'invariante di tensione – Postazione 2

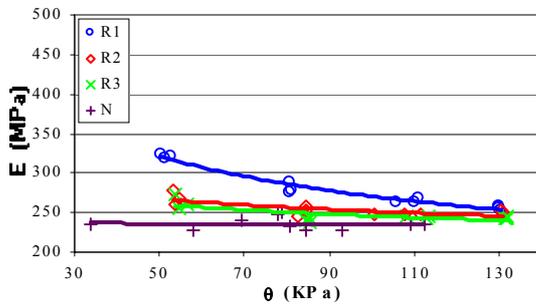


Figura 10. Valori del modulo al variare dell'invariante di tensione – Postazione 3

Nella figura 11 si riportano gli andamenti delle deflessioni registrate ai diversi geofoni in tutte le postazioni di prova, normalizzate riferendole al valore di carico trasmesso dalla piastra pari a 40 kN; è possibile notare una sostanziale uniformità dei valori delle deflessioni di picco per tutta l'estensione delle tratte analizzate.

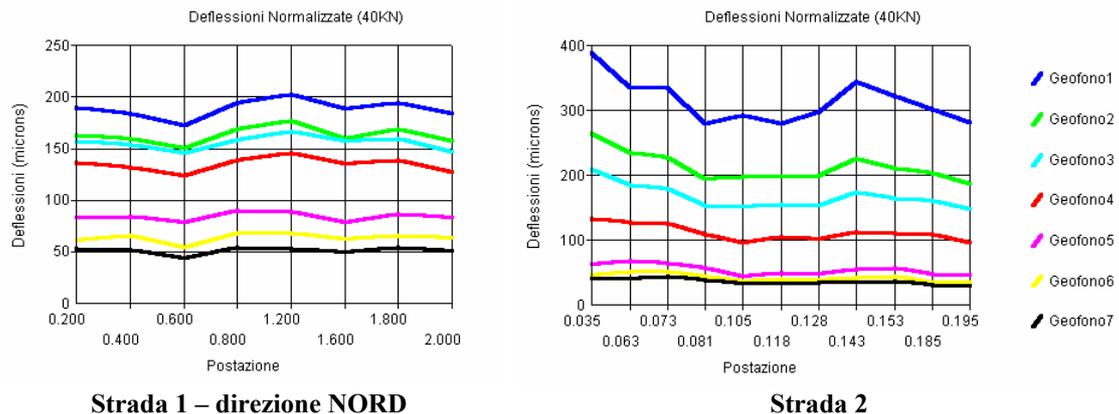
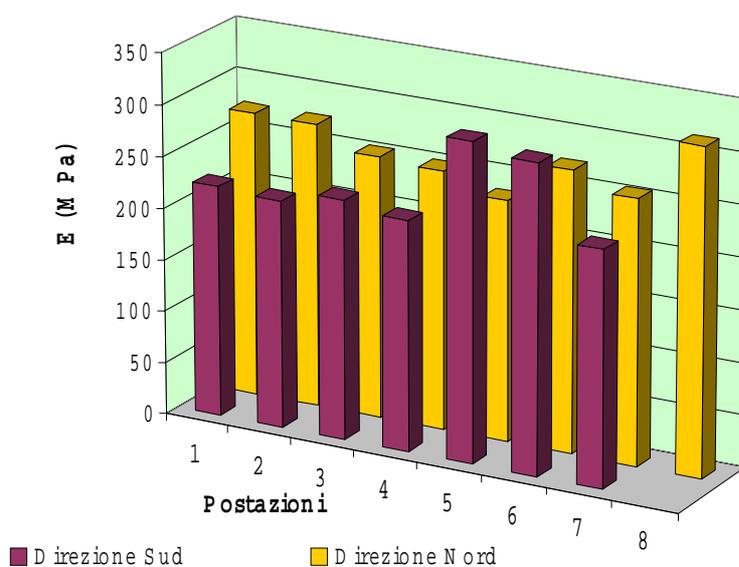


Figura 11. Andamenti delle deflessioni normalizzate per tutte le postazioni di prova

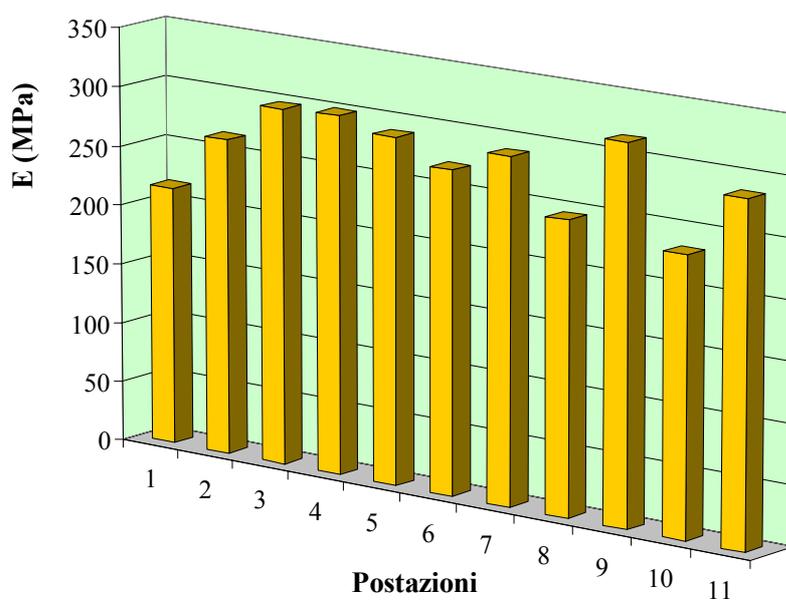
I valori medi dei moduli degli strati realizzati con materiali riciclati da demolizioni edilizie, presenti nelle pavimentazioni esaminate, sono riportati nelle figure 12 e 13 e sintetizzati in tabella 4.

**Tabella 4. Valori medi dei moduli degli strati non legati della pavimentazione (MPa)**

Postazione	Aggregati riciclati	Sottofondo
Strada 1 – Direzione NORD	<b>266</b>	94 (Terreno di sedime)
Strada 1 – Direzione SUD	<b>247</b>	96 (Terreno di sedime)
Strada 2	<b>274</b>	<b>207</b> (Rilevato con riciclati)



**Figura 12. Strada 1 – Valori dei moduli degli strati**



**Figura 13. Strada 2 – Valori dei moduli degli strati**

I risultati dell'indagine confermano quanto riportato da diversi Autori che riconoscono a questo tipo di materiali migliori prestazioni in sito di quanto sia possibile prevedere sulla base dei risultati delle tradizionali analisi di laboratorio effettuate su campioni. Una delle possibili spiegazioni di queste evidenze sperimentali potrebbe risiedere nel fatto che nella frazione fine di questi materiali sono presenti particelle dotate di una residua capacità legante in grado di produrre, nel tempo, un incremento di resistenza [6, 18, 19].

Non sorprenda che i dati rilevati in questa nostra ricerca si discostano sensibilmente da quanto riportato nella recente letteratura [17, 20] sul fenomeno dell'incremento dei moduli di strati non legati, realizzati con aggregati da riciclaggio di demolizioni, a seguito di fenomeni di autocementazione e dopo un determinato periodo di tempo (superiore a 2 anni) dalla loro messa in opera (Tabella 5). Tali differenze sono probabilmente attribuibili alla diversa composizione dell'aggregato riciclato che, in quei casi, era costituito prevalentemente da calcestruzzo frantumato mentre i campioni qui esaminati provengono da demolizioni edilizie e sono composti da diverse percentuali di pietrisco naturale, laterizi, calcestruzzo e malte.

In ogni caso, il consumo di materiali con prestazioni così elevate per la realizzazione di strati di fondazione può essere opportunamente contenuto miscelandoli nelle giuste dosi con materiali meno pregiati quali sono quelli oggetto di questa sperimentazione.

**Tabella 5. Analisi di infrastrutture esistenti realizzate con aggregati riciclati da demolizioni [20]**

Paese	Materiale	Anni dalla costruzione	Modulo (MPa)
Regno Unito	<b>Macerie</b>	<b>5</b>	<b>999</b>
	Calcare	5	284
Danimarca	<b>Calcestruzzo frantumato</b>	<b>5</b>	<b>540</b>
	Ghiaia	5	215
Svezia	<b>Calcestruzzo frantumato</b>	<b>2</b>	<b>850</b>
	Granito frantumato	2	300
Svezia	<b>Calcestruzzo frantumato</b>	<b>2</b>	<b>870</b>
	Granito frantumato	2	280

#### 4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Sulla base dei risultati delle analisi effettuate sul tipo di materiali preso in esame appare possibile trarre le seguenti indicazioni:

- i valori delle caratteristiche fisico-meccaniche usualmente determinati (granulometria, forma, resistenza all'abrasione L.A., indice di portanza C.B.R.) mostrano una notevole variabilità, anche se si riferiscono a materiali prodotti dallo stesso impianto di riciclaggio; in particolare la variabilità del coefficiente di abrasione L.A. è attribuibile alla diversa natura dei materiali componenti le miscele e non alla forma dei granuli;
- le prove di carico con piastra effettuate in laboratorio e quelle in sito a mezzo di apparecchiatura FWD su infrastrutture in esercizio, hanno mostrato che questi materiali, se correttamente messi in opera, offrono prestazioni più che soddisfacenti;
- i risultati delle prove con FWD hanno inoltre evidenziato una tendenza alla riduzione dei valori del modulo al ripetersi dei cicli di sollecitazione, fenomeno che può essere attribuito alla rottura dei legami intergranulari instauratisi per l'autocementazione tipica di questi materiali la cui frazione fine è in alcuni casi dotata di residue capacità leganti; i valori dei moduli sono comunque confrontabili, se non addirittura superiori,

- con quelli caratteristici degli aggregati tradizionali posti in opera nelle stesse condizioni ed aventi caratteristiche granulometriche analoghe;
- i risultati dimostrano che i materiali esaminati possono essere ritenuti sicuramente idonei ad impieghi in strati di rilevato, in sottofondi ed in strati di fondazione di infrastrutture soggette a traffico "leggero" e "medio"; gli ottimi valori della portanza rilevati in sito e indicati dagli indici C.B.R. determinati in laboratorio potrebbero fornire valide indicazioni in merito ad un loro possibile impiego anche in strati di fondazione soggetti a traffici più pesanti; tuttavia l'attuale indisponibilità di un numero sufficientemente elevato di risultati sperimentali relativi alla qui riscontrata evoluzione delle loro caratteristiche di deformabilità in rapporto alle ripetizioni di carico, suggerisce l'opportunità di estendere ulteriormente le indagini sperimentali del tipo adottato nella ricerca oggetto della presente memoria.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Engineering Committee Soils and Materials Design and Specification Group, *Use of recycling for road pavement construction and maintenance*, County Surveyors Society, Dorset County Council, County Hall, Dorchester, 1994.
- [2] BAKOS S.L., RAVINDRARAJAH R. SRI, *Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities*, UTS, Sydney, Centre for Built Infrastructure Research, Sydney, 1999.
- [3] NOBILI P., *Materiali di scarto edilizio: possibili impieghi per conglomerati cementiti*, Atti da Riciclaggio di materiali da demolizione edilizia per la costruzione di rilevati ferroviari, Istituto Sperimentale Ferrovie dello Stato, 1993.
- [4] VILLA A., *Un caso pratico di utilizzazione di materiali da demolizione edilizia per la costruzione di rilevati: tratto sperimentale nella variante SP2 Panaria Bassa*, Atti da Riciclaggio di materiali da demolizione edilizia per la costruzione di rilevati ferroviari, Istituto Sperimentale Ferrovie dello Stato, 1993.
- [5] CANDELORI M., *Classificazione e caratterizzazione dei materiali di scarto edilizio*, Atti da Riciclaggio di materiali da demolizione edilizia per la costruzione di rilevati ferroviari, Istituto Sperimentale Ferrovie dello Stato, 1993.
- [6] MARRADI A., *Indagini sperimentali sui materiali inerti di riciclaggio*, Riciclare per l'ambiente, 1999.
- [7] BERG F., PIHL A. K., MILVANG-JENSEN O., HJELMAR O., *Inspection and testing of existing road constructions using secondary materials in Denmark*, Project ALT-MAT, Report No. WP3.DRI002, 1999.
- [8] MARRADI A., *I risultati di una indagine sperimentale sui materiali inerti di riciclaggio*, Atti del Convegno Il riutilizzo dei materiali di risulta dell'edilizia, Pisa, 1998.
- [9] D'ANDREA A., MARRADI A., *Metodo di prova per la determinazione delle categorie di materiali componenti*, Gli Inerti – Riciclare per l'ambiente, 2001.
- [10] D'ANDREA A., *Verso la definizione della normativa U.N.I. per l'impiego stradale dei riciclati da C&D*, Recycling N.4, 2001.
- [11] Progetto di Norma UNI, *Aggregati provenienti da attività di demolizione e costruzione e delle loro miscele con rifiuti minerali recuperabili – Requisiti di accettazione*, Commissione Edilizia UNI, GdL 7 – SC1, Rev. Marzo 2001.

- [12] C.N.R. B. U. N. 176/1995, *Requisiti di accettazione e di posa in opera di misti granulari non legati naturali o corretti o di frantumazione per strati di fondazione e di base.*
- [13] Ministero dei Lavori Pubblici, *Studio a carattere pre-normativo delle Norme Tecniche di tipo Prestazionale per Capitolati Speciali d'Appalto*, Novembre 2001.
- [14] ULLIDTZ P., *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*, Polyteknisk Forlag, Denmark 1998.
- [15] C.N.R. B. U. N. 139/1992, *Norme sugli aggregati – Criteri e requisiti di accettazione degli aggregati impiegati nelle sovrastrutture stradali.*
- [16] ALMEIDA, J.R. DE. Users Guide of program BAP. Res. Rep. Universidade Nova de Lisboa, 1998.
- [17] ARM M., *Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests*, Waste Management 21, 2001.
- [19] D'ANDREA A., *Classificazione e caratterizzazione dei materiali di scarto edilizio*, Atti da Riciclaggio di materiali da demolizione edilizia per la costruzione di rilevati ferroviari, Istituto Sperimentale Ferrovie dello Stato, 1993.
- [19] O'MAHONY M. M., MILLIGAN G. W. E., *Use of Recycled Materials in Subbase Layers*, Transportation Research Record n. 1310.
- [20] REID J.M., *The use of alternative materials in road construction*, Transport Research Laboratory, Ground Engineering, UK, 2000.

#### **RINGRAZIAMENTI**

Gli Autori desiderano ringraziare il Dott. Ing. Massimiliano Toni dell'Ufficio Tecnico del Comune di San Giuliano per il contributo offerto nell'organizzazione della campagna di prove in sito. Ringraziamenti anche al Geom. Stefano Giusti ed al P.I. Francesco Puccinelli del Laboratorio Sperimentale Stradale annesso al Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa per la collaborazione nell'esecuzione delle determinazioni sperimentali.