

Materiali riciclati per pavimentazioni viarie

GIULIO DONDI*, CESARE SANGIORGI*, CLAUDIO LANTIERI*, MATTEO PETTINARI*, LUCA RESCA* MICHELE ALBERGHINI**

Si stima che in Italia siano prodotte annualmente circa 20 milioni di tonnellate di rifiuti da costruzione e demolizione (C&D). L'alternativa allo smaltimento è rappresentata dal trattamento in impianti di recupero e riqualifica nei quali il materiale di scarto viene opportunamente selezionato, vagliato e miscelato fino ad ottenere aggregati marcati CE, aventi pari dignità rispetto agli aggregati vergini e, talvolta, prestazioni superiori. A fianco dei materiali da C&D, altri materiali di scarto non pericolosi trovano impiego come riciclati nel confezionamento di miscele di aggregati e di prodotti per le costruzioni civili in genere. Tra quelli, scorie siderurgiche e scarti provenienti da processi di termovalorizzazione dei rifiuti sono tra i più diffusi. Da queste premesse il DICAM Strade dell'Università di Bologna e il Consorzio Cave Bologna, azienda bolognese di riferimento nella produzione di aggregati da costruzione, hanno sviluppato una sperimentazione ad hoc allo scopo di valutare il contributo alla portanza dei materiali di riciclo impiegabili per sottofondi e fondazioni di pavimentazioni viarie

Materiali impiegati

Ai fini della ricerca sono stati qualificati 3 materiali provenienti da attività di costruzione e demolizione e 2 da impianti di trattamento di rifiuti, successivamente utilizzati per il confezionamento delle miscele sperimentali poste in opera in un campo sperimentale realizzato appositamente. In particolare, si sono analizzati materiali ottenuti dalla demolizione selettiva di manufatti in calcestruzzo opportunamente deferrizzati, dalla demolizione non selettiva di edifici ed altre opere, da scarti di lavorazione delle industrie siderurgiche e provenienti da processi di termovalorizzazione di rifiuti solidi urbani (figura 1). Tutti materiali di base, compresi quelli provenienti da impianti di smaltimento, sono stati preventivamente caratterizzati nei confronti delle componenti merceologiche prevalenti e riconoscibili. Durante le fasi di demolizione, infatti, è possibile operare una separazione preventiva dei materiali a diversi livelli; nell'eventualità

Figura 1 - Materiali della sperimentazione: A. Frantumato di cls, B. Misto Riciclato da C&D, C. Scarto proveniente da processi termici di fusione dei metalli, D. ed E. Scarti provenienti da processi di termovalorizzazione di rifiuti solidi urbani



*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI (DICAM) – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

** RESPONSABILE SISTEMA INTEGRATO E QUALITÀ PRODOTTO - CONSORZIO CAVE BOLOGNA

Costituenti	Descrizione
Rc	Calcestruzzo, prodotti in calcestruzzo, malta, muratura di calcestruzzo
Ru	Aggregati non legati, pietre naturali, aggregati idraulici legati
Rb	Muratura in argilla (mattoni e piastrelle), silicati di calcio, particelle non galleggianti
Ra	Conglomerato bituminoso
Rg	Vetro
X	Altro: materiali coesivi argilla e terreno, materiali ferrosi e non, non galleggianti, legno, plastica e gomma, intonaco di gesso.

Tabella 1 - Costituenti non galleggianti di un aggregato grossolano

che la demolizione avvenga senza separazione, la prova merceologica (UNI EN 933-11) consente di stabilire la tipologia e la relativa percentuale di tutti i componenti delle miscele al fine di valutarne la possibilità di impiego ed il rispetto di requisiti di norma. I materiali catalogati dalla norma Europea sono suddivisi secondo la tabella 1.

Il metodo d'esame è specifico per aggregati riciclati grossi, cioè con granulometria compresa tra i 4 ed i 63 mm. La porzione di ogni materiale caratterizzante il provino è determinata ed espressa come percentuale in massa, fatta eccezione per la porzione di particelle galleggianti. Per quest'ultime, intese come le particelle di materiale con peso specifico inferiore a quello dell'acqua, la frazione merceologica relativa è espressa come percentuale in volume. In tabella 2 sono riportati i risultati dell'analisi (FL indica i materiali galleggianti).

Dall'analisi dei 5 materiali impiegati è emerso che:

- il materiale A fa parte dei calcestruzzi riciclati, ovvero aggregati costruiti prevalentemente da frammenti di conglomerati cementizi, anche armati, provenienti da demolizione di opere in cemento armato,

Campione	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg	X	FL
A	90%	5%	5%	0%	0%	0%	0%
B	50%	30%	20%	0%	0%	0,01%	0,01%
C	0%	0%	0%	0%	0%	N.D.	0%
D	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
E	0,0%	75,4%	1,5%	0,0%	22,7%	0,4%	3,0%

Tabella 2 - Analisi merceologica, differenziazione per tipo di materiale (% in peso)

con un 90% in massa di componente principale dato da calcestruzzo e materiale litico frantumato. Il 10% è formato da scarti edilizi frantumati di murature e rivestimenti;

- il materiale B è materiale proveniente da macerie, ovvero presenta aggregati costituiti prevalentemente da calcestruzzo e materiale litico frantumato in percentuale maggiore o uguale al 50% in massa e scarti edilizi frantumati di murature in percentuale inferiore al 50%;

- il materiale C è una scoria da acciaieria derivante da processi termici di fusione dei metalli; la composizione di tale materiale è quindi data da schede fornite dai produttori e non necessita di prova merceologica (non sono riconoscibili i materiali costituenti ad occhio nudo);

- i materiali D ed E sono costituiti dallo stesso materiale derivante da impianti di termovalorizzazione dei rifiuti, in classe granulometrica differente, pertanto la

prova merceologica è stata eseguita sulla pezzatura più grossa.

Sono state poi effettuate ulteriori prove di pre-qualifica per valutare le caratteristiche fisico-meccaniche degli stessi materiali di riciclo (tabella 3). Si osservi come i materiali A e B presentino le caratteristiche geometriche e di resistenza alla frammentazione tipiche dei C&D, e che la scoria ha una notevole resistenza alla

frammentazione ed un elevato valore di E.S.

In seguito all'analisi di pre-qualifica, i 5 materiali (A, B, C, D, E) sono stati selezionati e opportunamente combinati per costituire 4 miscele ottimizzate - in termini meccanici, produttivi ed economici - da porsi in opera nella pavimentazione sperimentale in vera grandezza. In particolare, sono state definite due miscele non legate M1 (50% A 50% B) e M2 (70% B, 30 % E) e due miscele legate, denominate M3 e M4, ottenute, rispettivamente, dalle stesse miscele non legate con l'aggiunta di leganti idraulici in ragione di 1,25 % di cemento Portland 42.5 e 1,25 % di ceneri volanti di riciclo. In figura 2 sono riportate le curve granulometriche delle miscele con i rispettivi fusi di riferimento desunti dal Capitolato ANAS vigente per le pavimentazioni stradali.

Sito Sperimentale

La scelta di realizzare un campo sperimentale in vera grandezza è finalizzata alla valutazione in situ delle caratteristiche prestazionali di portanza dei materiali oggetto di studio, in singolo e doppio strato, ed analizzarne l'evoluzione della compattazione durante le fasi costruttive. Il campo prove simula un tratto stradale

Tabella 3 - Limiti di Atterberg (UNI CEN ISO/TS 17892-12), Indice di Forma (UNI EN 933-4), Indice di Appiattimento (UNI EN 933-3), Los Angeles geliva e non (UNI EN 13242), Equivalente in sabbia (UNI EN 933-8)

Campione	LL [%]	F.I. [%]	S.I. [%]	L.A. [%]	L.A. [%] G	E.S. [%]
A	34,07	13,41	8,24	31,20	32,90	37,39
B	34,45	12,41	9,14	35,44	35,82	27,36
C	31,07	3,37	0,00	19,31	18,85	76,89
D	55,27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	46,88
E	43,84	17,62	8,50	45,29	46,00	57,69

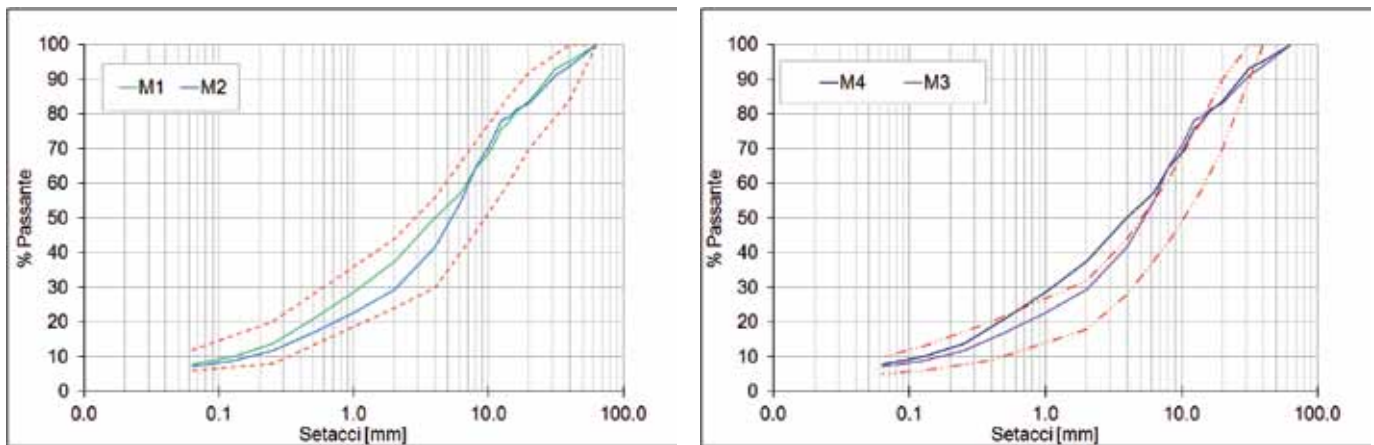


Figura 2 - Curve granulometriche delle miscele sperimentali e fusi di riferimento

di 10 x 30 m costituito da strati di sottofondo e fondazione. Al di sopra di uno strato di bonifica, necessario per ottenere un piano di posa omogeneo, sono stati stesi un primo strato di materiali non legati (M1 e M2) ed un secondo di materiali legati (M3 e M4). Posando con una opportuna configurazione geometrica i 2 strati si sono ottenute 4 diverse

combinazioni stratigrafiche sulla base delle quali operare un confronto prestazionale diretto in termini di portanza (figura 3).

Il sottofondo di posa è uno strato di bonifica (70-80 cm) costituito da materiale naturale vergine di classe A1 (UNI 10006) con buone caratteristiche meccaniche e di portanza. La bonifica è stata realizzata al fine di impedire che lo strato di materiale esistente in posto, per quanto omogeneo e naturalmente addensato, potesse influenzare la caratterizzazione prestazionale dei materiali oggetto di studio.

La compattazione è stata eseguita per tutti gli strati, sottofondo compreso, con un rullo vibrante dotato di tecnologia per il Controllo Continuo della Compattazione (CCC), operando lungo quattro corsie parallele e adiacenti di 2,1 m di larghezza e 30 m di lunghezza. È stato anche realizzato un cordolo di calcestruzzo in prossimità della mezzeria del campo ed a livello del sottofondo, al fine di valutare

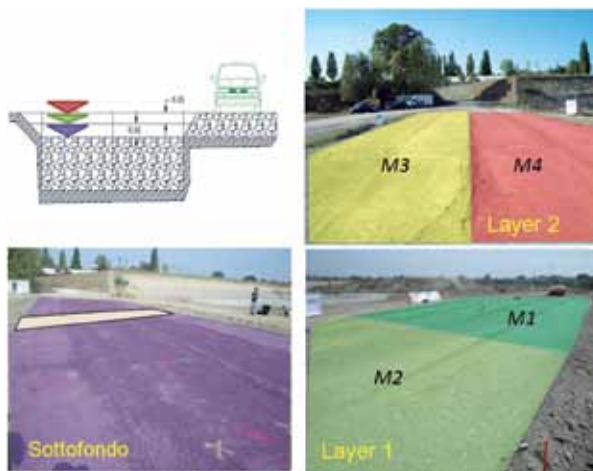
la profondità di misurazione del sistema di compattazione e comprendere quanto la presenza di sezioni rigide sottostanti possa influenzare i moduli di rigidità misurati sugli strati sovrastanti.

I materiali non legati M1 e M2 sono stati stesi sullo strato di sottofondo con uno spessore compattato di circa 30 cm (la-

yer 1). La posa in opera di M1 ed M2 è avvenuta dividendo trasversalmente il campo in due superfici di 10 x 15 m.

I materiali legati M3 e M4 sono stati stesi sopra i non legati per uno spessore compattato di circa 25 cm (layer 2). La due aree simmetriche sono di dimensioni pari a 5 x 30 m, ottenute dividendo le due stese longitudinalmente lungo la mezzeria del campo (figura 4).

Figura 3 - Sezione e struttura del campo prove



Le apparecchiature utilizzate

Il Controllo in Continuo della Compattazione (CCC) rappresenta un'importante innovazione nella costruzione delle infrastrutture viarie e di recente introduzione in Ita-

Figura 4 - Fasi realizzative: bonifica, testing, posa del primo strato, compattazione, secondo strato





Figura 5 - Schema di compattazione, prove di densità e di portanza con LWD

lia; esso si basa sull'analisi dell'interazione tra il rullo dinamico vibrante e il terreno compattato (Adam, 2007) e prevede l'impostazione della configurazione di compattazione in termini di velocità di avanzamento, frequenza ed ampiezza di vibrazione del rullo. Ad ogni impulso il sistema accelerometrico misura la risposta del piano compattato restituendo un modulo dinamico di rigidità, sulla base del quale esprimere un giudizio sulla compattazione ottenuta a quel passaggio. Un dispositivo di posizionamento satellitare ed un display di bordo consentono il controllo e la localizzazione dei valori di rigidità misurati dal sistema rendendolo, di fatto, un'apparecchiatura deflettometrica ad alto rendimento.

Nel sito sperimentale realizzato, ogni strato compreso il sottofondo, è stato compattato con un rullo Bomag BW213 del peso di 15 tonnellate, dotato di sistema BCM5. La compattazione è stata eseguita adottando un numero di rullate prefissate per ciascuno strato ed impostando manualmente l'ampiezza di vibrazione al fine di ottenere, per quella configurazione di compattazione (energia, spessore, umidità), il massimo addensamento possibile per i materiali posati, evitando fenomeni di decompattazione superficiale (figura 5).

A fianco delle misure di tipo CCC condotte durante l'addensamento meccanico dei materiali, si sono eseguite in sito una serie di prove deflettometriche tramite apparecchiature di tipo Light Weight Deflectometer (LWD) oltre a prove di densità ed umidità (figura 5). I test sono stati

effettuati sul sottofondo bonificato, sul primo strato e sul secondo strato seguendo uno schema a maglia regolare per un totale di 24 punti di prova per ciascuna corsia, 96 per ciascun piano.

In commercio esistono diverse apparecchiature di tipo LWD. In particolare la LWD Good Practice Guide identifica due categorie principali, entrambe utilizzate per le misure nel campo prove:

-Categoria 1 (C1): permettono la variazione dell'altezza di caduta della massa battente, la misura delle deflessioni con un geofono posto direttamente a contatto con la superficie attraverso un foro al centro della piastra e cella di carico per la registrazione delle time histories degli impulsi sotto la piastra (ASTM 2583-07);

-Categoria 2 (C2): hanno altezza di caduta fissa, la misurazione della deflessione del suolo attraverso un accelerometro collocato tra i buffer e la piastra di carico per misurare la deflessione della piastra e assenza di cella di carico (TP BF-StB Part 8.3).

Il dispositivo C1 impiegato include una cella di carico e consente di impostare un carico specifico fissando l'altezza di caduta a seconda del tipo di strato indagato. Il dispositivo C2 qui adottato impone una forza nominale di picco (calibrata dal costruttore) pari a 7,07 kN per una massa di 10 kg, e a 10,60 kN per una di 15 kg; tali forze sono considerate agenti sulla sommità della piastra, ed assunte costanti per il calcolo delle pressioni verticali sotto la piastra. L'impulso è applicato con curve di carico di forma prevalentemente semi-sinusoidale che si differenziano per la du-

rata dell'impulso: la curva del dispositivo C2 ha un periodo di circa 16-18 ms, mentre per C1 è di ca. 28-30 ms (Sangiorgi, 2009).

I risultati delle prove in sito

A seguito di una preliminare analisi dei principali risultati, è possibile fare le seguenti considerazioni circa le caratteristiche di rigidità assunte dai materiali durante la compattazione ed al termine di questa, anche in relazione all'accoppiamento stratigrafico dei materiali legati e non legati.

Rappresentando graficamente il modulo vibratorio (E_{vib}) ottenuto per tutte le passate di una singola corsia centrale, con la progressiva della distanza percorsa dal rullo, si osserva un incremento del modulo all'aumentare delle passate, con un comportamento più marcato in presenza di materiali legati (figura 6). Per i materiali non legati, sottofondo compreso, gli strati raggiungono la compattazione massima già dai primi transiti e l'incremento del numero di passaggi del rullo potrebbe risultare inutile, se non controproducente. Sul secondo strato i materiali M3 ed M4 crescono via via in modulo esibendo una variazione inferiore al 5% solamente intorno alla settima passata vibrata. I materiali di riciclo posati necessitano quindi di una diversa energia di compattazione a seconda del tipo di miscela utilizzata, degli spessori dello strato e del piano di posa su cui vengono stese.

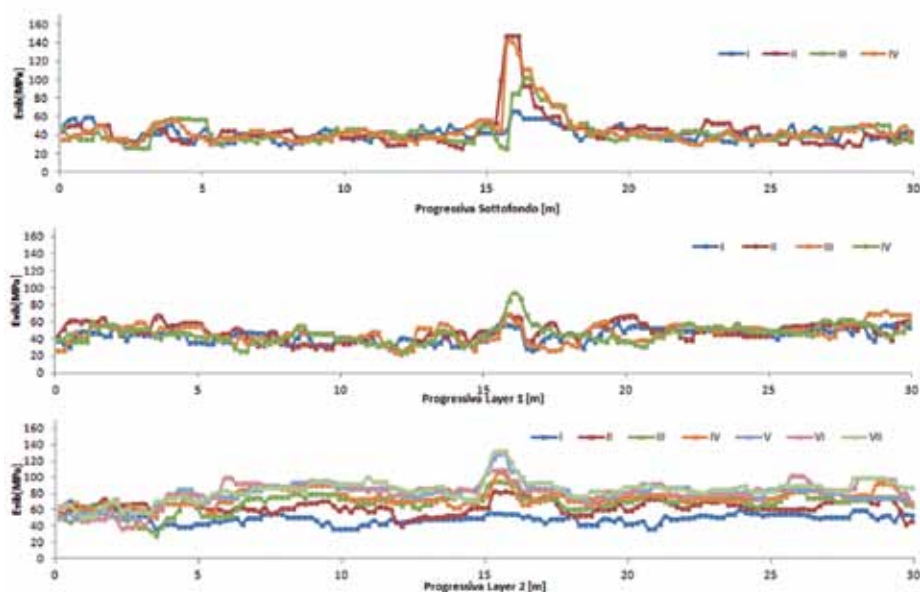


Figura 6 - Valori del modulo Evib per ogni layer e per ogni passata in CCC con rilevazione ogni 10 cm

In termini prestazionali, i risultati medi dei moduli vibrator (Evib) per i materiali non legati studiati si attestano, al termine della compattazione, intorno ai 50 MPa, restituendo, di fatto, valori uniformi a quelli del consistente strato di bonifica in ghiaia realizzato. Per i materiali legati, invece, il valore di rigidezza immediato sale mediamente a 70 MPa, con valori più elevati laddove le miscele M1 ed M3 compongono la stratigrafia e minori in corrispondenza della stratigrafia M2-M4.

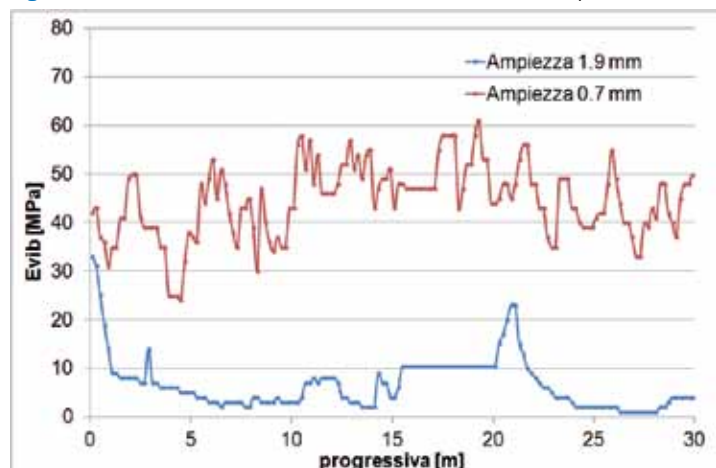
Dai grafici di figura 6 è possibile inoltre osservare come la maggiore rigidezza del cordolo in cls realizzato in prossimità della mezzeria del campo, sia registrata dal rullo in ognuna delle passate di misurazione

del sottofondo, del primo e del secondo strato. Ciò significa che la configurazione di ampiezza del rullo, impostata manualmente a 0,7 mm, risente della rigidezza degli strati sottostanti almeno fino a 50-70 cm dal piano di rullatura. Ciò accade, analogamente al caso dei materiali vergini, anche per i materiali di riciclo, indipendentemente dal fatto che essi siano legati o meno.

La configurazione di prova del rullo è quindi molto importante, anche nel caso di impiego di materiali totalmente riciclati, al fine di valutare la profondità di misurazione del sistema CCC, variabile solitamente da 50 cm ad oltre 1,5 metri a seconda dell'ampiezza di vibrazione

impostata. A riprova di ciò, in figura 6 sono riportati i passaggi effettuati sullo strato di bonifica con un'ampiezza di 0,7 mm (linea rossa - spessore indagato 50-70 cm), e di 1,9 mm (linea blu - spessore indagato superiore ad 1,5 m). Nel grafico il valore del modulo è più elevato (intorno ai 40 MPa) se si considera una profondità di misura comprendente solo il terreno bonificato e si riduce a circa 20 MPa se si considera una profondità di indagine che comprende il terreno presente in sito al di sotto della bonifica. Il modulo di rigidezza risente in tal caso dello strato di materiale di rigidezza inferiore (figura 7). L'evoluzione della compattazione per le passate sui materiali legati del secondo strato sono illustrate a titolo esemplificativo in figura 8 attraverso i cosiddetti Compaction Path (CP), (Sangiorgi, 2012). I CP si ottengono dai valori medi di modulo di una passata vibrata e di quella successiva, sempre vibrata. Se i valori tra due passate consecutive si equivalgono, il valore medio dei moduli di rigidezza si avvicina alla linea a 45°. La compattazione ottimale, qui intesa come la massima rigidezza raggiungibile dal materiale in quelle condizioni di compattazione, si ha quindi quando due passate successive non registrano più una variazione di modulo, attestando il CP sulla linea di equivalenza. In generale, i materiali legati evolvono con continuità e, come detto, raggiungono i valori massimi oltre la settima passata vibrata. Per i non legati la compattazione evolve secondo un

Figura 7 - Misurazioni dei valori di Evib al variare dell'ampiezza del rullo



CP limitato a due soli punti immediatamente prossimi alla linea di equivalenza.

Attraverso una mappatura di superficie poi, è possibile rappresentare la rigidità del piano indagato e valutare l'omogeneità dei valori osservando le differenze tra le singole corsie di compattezza, passata dopo passata. In figura 9 si nota come, all'aumentare del numero di passate, le corsie centrali raggiungono valori di modulo più elevati rispetto a quelle laterali.

Questo atteso comportamento è giustificabile col confinamento laterale offerto dalle corsie più esterne del campo; ai fini della corretta posa in opera dei materiali occorrerà pertanto tenere in conto tale aspetto costruttivo per garantire l'omogeneità del piano finito in termini di portanza. Infine, sempre ai fini del controllo prestazionale della portanza dei materiali sperimentali posati si riporta di seguito, per brevità, la sola analisi effettuata sugli strati attraverso l'utilizzo del sistema deflettometrico di tipo LWD di classe C1. Le mappature rappresentate in figura 10 sono state calcolate tramite interpolazione dei dati sperimentali ottenuti dalle griglie di rilievo precedentemente de-

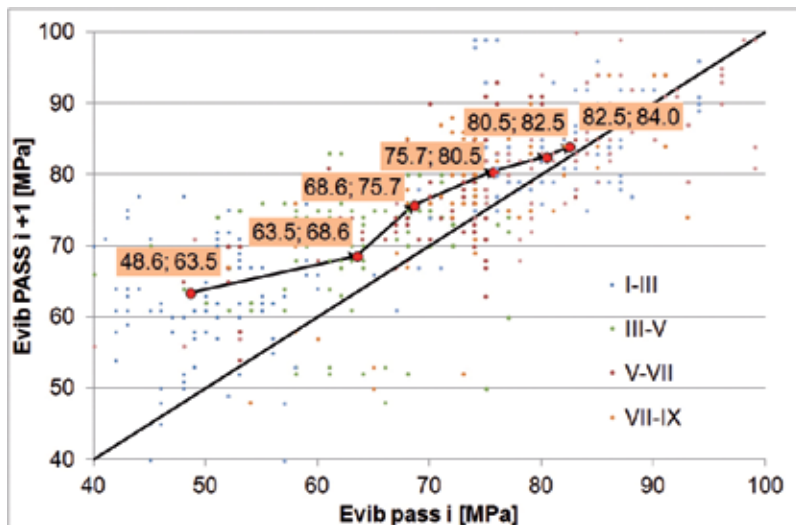


Figura 8 - Compaction Path per valutare l'evoluzione della compattazione durante le fasi costruttive

scritte (96 punti di misura, massa 15 kg a circa 120 kPa).

Confrontando i moduli ottenuti dalla prova con LWD-C1 sui tre strati sovrapposti si evince, analogamente a quanto ottenuto dai dati CCC, che i valori in modulo delle miscele M1 ed M2 sono assimilabili, quando non di poco inferiori (M2), ai valori ottenuti per lo strato di bonifica di sottofondo in ghiaia naturale. Le miscele M3 e M4 presentano invece moduli più elevati, fino a raggiungere, nelle zone centrali delle sezioni compattate, valori ampiamente idonei per una fondazione stradale legata.

Coerentemente alle rappresentazioni CCC, la mappatura utilizzata mostra anche se in maniera meno evidente, come

le rigidità siano più accentuate nelle porzioni centrali del campo sperimentale.

Inoltre, prendendo a riferimento il Capitolato ANAS, esso richiede che, utilizzando un LWD di categoria C1 con massa da 10 kg e pressione di picco pari a 70 kPa, per uno strato di fondazione o sottofondazione in misto granulare stabilizzato, "[...] la portanza dello strato" abbia "un valore minimo di 80 MPa [...]". Per uno

strato di fondazione legato a cemento, invece, la portanza dovrà avere "[...] valori minimo di 60 MPa, dopo 4 ore, e 200 MPa dopo 1 gg [...]". Gli ulteriori test nelle modalità prescritte hanno riscontrato che le miscele hanno raggiunto i requisiti prestazionali richiesti, con l'eccezione delle zone laterali del layer 1 per il materiale M2.

Conclusioni

Alla luce delle elaborazioni preliminari dei dati acquisiti presso il campo sperimentale realizzato si può affermare che i materiali di base impiegati, derivanti da un processo mirato di riciclaggio, se corret-

Figura 9 - Mappature dei moduli del secondo strato per ogni passata in CCC. In grigio la zona non considerata nell'analisi data la presenza del cordolo in cls

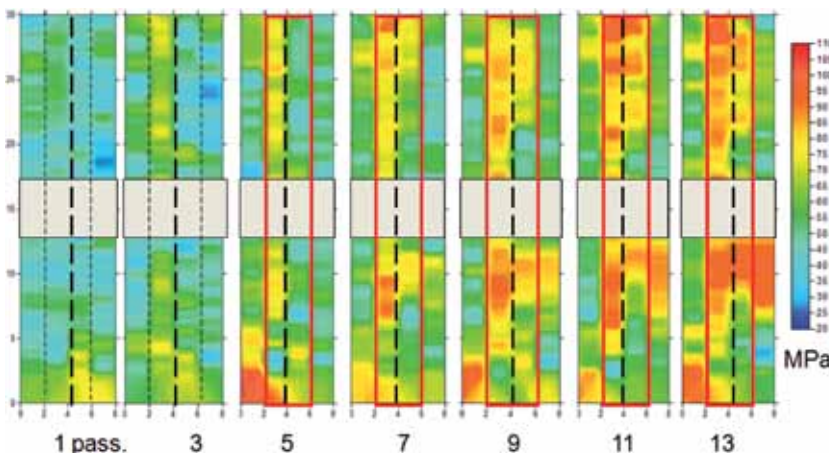
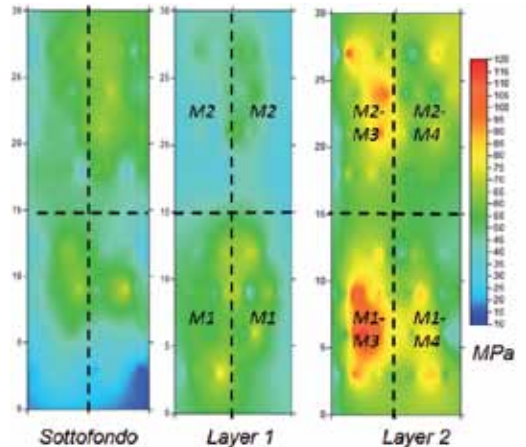


Figura 10 - Risultati delle prove LWD di classe C1 sui diversi piani del campo prove



tamente selezionati e miscelati, sono in grado di fornire, nel complesso, risultati prestazionali di portanza paragonabili a quelli ottenibili da aggregati vergini nella formazione di sottofondi e fondazioni di pavimentazioni viarie.

Le miscele non legate proposte mostrano una certa predisposizione alla compattazione, raggiungendo valori massimi di rigidità CCC dopo poche passate di rullo; i valori di modulo LWD indicano che tali materiali soddisfano i requisiti del Capitolato prestazionale ANAS sulle pavimentazioni.

Le miscele legate, dove parte del legante è anch'esso di riciclo, restituiscono valori di portanza significativi; le rigidità CCC evolvono con continuità e si attestano su valori di Evib mediamente superiori ai 70 MPa. I dati LWD mostrano che già dopo 2 ore dalla compattazione tali strati raggiungono moduli che soddisfano ampiamente il Capitolato ANAS. In termini stratigrafici, apprezzabili in questo caso tramite i dati CCC, si osserva

come l'accoppiamento delle miscele contenenti prevalentemente cls (M1 ed M3) fornisca valori di portanza più elevati delle restanti sezioni stratigrafiche; la stratigrafia M2-M4 risulta la meno rigida.

Con riferimento alla compattazione ed al controllo delle lavorazioni, si può affermare che l'utilizzo del sistema CCC può contribuire in maniera significativa ai processi di verifica sia in termini di tempo, sia in termini di rappresentatività del dato, permettendo durante la fase di costruzione il monitoraggio dell'addensamento, della rigidità e della omogeneità della compattazione. ■

Bibliografia

- Adam, D. 2007, Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC) Technical Contractual Provisions & Recommendations. Design and Construction of Pavement and Rail Tracks: Geotechnical Aspects and Processed Materials, A.G. Correia, Y. Momoya, and F. Tatsuoka, eds., Taylor & Francis Group, London UK, pp 111-138.

- Sangiorgi C., Marradi A., Kloubert H.J. & Wallrath W. A CCC experimental site for studying the compaction evolution of C&D materials, 3rd International Seminar on Earthworks in Europe, Berlin, Germany 19th - 20th March 2012.

- Sangiorgi C., Marradi A., Pinori U., Lantieri C., Dynamic field assessment of bearing capacity for pavement subgrades and foundations, 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Turin, Italy, Jul. 2009.

- PFG Pavement Foundation Group, LWD Good Practice Guide, 2009.

- ASTM 2583-07, Test Method for Measuring Deflection with a Light Weight deflectometer, 2007.

- TP BF-StB Part 8.3, Dynamic Pressure Plate Test with the help of the Light Drop Weight Device, 2004.

URETEC

POLIURETANI

Azienda soggetta all'attività di direzione e coordinamento della Sicma S.p.A.

IL POLIURETANO AL SERVIZIO DELLA VAGLIATURA... DAL 1994

*Pannelli autoportanti - Telai tensionati - Pannelli modulari per ogni tipo di fissaggio
Tappeti - Soluzioni personalizzate - Accessori*