

SOLUZIONI TECNICHE INNOVATIVE PER LA MITIGAZIONE DEL RUMORE E DELLE VIBRAZIONI DA TRAFFICO STRADALE

Giulio Dondi*, Andrea Simone*

*DISTART - Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

SOMMARIO

I rapporti tra ambiente, uomo e strada sono numerosi, complessi e di notevole attualità sia in termini di eco-compatibilità del moto e sostenibilità ambientale sia in termini di risparmio energetico e delle materie prime utilizzate nelle fasi di costruzione e manutenzione.

Negli ultimi anni si sta cercando di dare una risposta alle problematiche connesse al rumore ed alle vibrazioni trasmesse all'ambiente circostante dal traffico stradale mediante l'utilizzo di nuovi materiali, criteri progettuali e tecnologie costruttive.

In quest'ambito si inserisce il lavoro di ricerca alla base della seguente memoria che intende illustrare alcune soluzioni tecniche innovative in grado di garantire la mitigazione dei fenomeni indesiderati e nocivi prodotti dalla strada.

INTRODUZIONE

I rapporti tra ambiente, uomo e strada sono numerosi, complessi e di notevole attualità sia in termini di eco-compatibilità del moto e sostenibilità ambientale sia in termini di risparmio energetico e delle materie prime utilizzate nelle fasi di costruzione e manutenzione. In particolare nuove potenzialità e conseguentemente nuovi campi di ricerca si aprono per un corretto utilizzo delle tecnologie e dei materiali in termini di riduzione del consumo di energia [1].

In fase progettuale appare sempre più necessario, accanto alle richieste di minimizzazione degli impatti sull'ambiente del traffico veicolare, considerare anche il livello superiore connesso alle esigenze di salvaguardia ambientale e di "progettazione integrata" dell'infrastruttura.

La costruzione, manutenzione e riqualificazione delle infrastrutture viarie in generale e dei tappeti in conglomerato bituminoso in particolare comporta oltre ad un elevato esborso economico anche una notevole richiesta di materie prime pregiate costituite da inerti di cava.

Nel corso degli ultimi cinquant'anni le infrastrutture, in modo particolare le vie di comunicazione, hanno conosciuto uno sviluppo senza precedenti. Molte di esse sono in uso da oltre vent'anni e, avendo raggiunto il limite della loro vita utile, necessitano di crescenti interventi di manutenzione volti a mantenere livelli accettabili di servizio. Inoltre, negli anni, la quantità media di automezzi è aumentata in modo costante, il derivante incremento del traffico e delle sollecitazioni dovute ai veicoli, il maggiore carico per asse e "l'età avanzata" sono tutti fattori che concorrono al deterioramento delle pavimentazioni stradali; per affrontare i problemi ad esso connessi sta diventando sempre più diffusa la tecnica del riciclaggio delle pavimentazioni flessibili.

Le motivazioni che sostengono la necessità di riciclare sono

molteplici e tutte parimenti importanti dal punto di vista della tutela ambientale, come ben sintetizzano le linee generali dello studio OCSE [2] pubblicato nel 1997:

- riduzione dell'impiego delle materie prime;
- riduzione delle aree da destinare a discarica;
- contenimento dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera dovuto al trasporto dei rifiuti;
- conservazione dell'energia;
- convenienza economica;
- vantaggi tecnici.

Il riciclaggio dei conglomerati bituminosi diventa quindi di fondamentale importanza per delle corrette politiche di tutela delle risorse naturali e per un progettazione "sostenibile" in chiave ambientale.

Gli inerti non sono impiegati solo nelle strade ma anche in tutte le costruzioni civili; il consumo di inerti nelle nazioni industrializzate è secondo solamente al consumo di acqua. Il consumo annuale di aggregati in Europa per ciascun abitante è approssimativamente fra le 6 e le 8 tonnellate (e in Islanda, ad esempio, supera le 25 tonnellate). Per valutare l'entità del problema e la continua richiesta di risorse pregiate basti pensare che approssimativamente sono necessari 10.000 m³ di aggregati per un chilometro di strada a due corsie [3].

Un'ulteriore problematica di grande attualità sempre legata al riciclo è rappresentata dalle possibilità di riutilizzo dei pneumatici usurati sia come fonte di energia sia come materia prima all'interno di altre lavorazioni. Si stima che ogni anno in Europa si accumulino circa 250 milioni di pneumatici. In Italia la produzione annua di pneumatici da riciclare è di 434.500 tonnellate su un totale di 2.660.000 tonnellate prodotte in Europa (fonte: ETRA, European Tyre Recycling Association, 2003). Di questi enormi quantitativi attualmente ancora il 35% in Europa ed il 66% in Italia viene portato in discarica.

Tabella 1. Consumi energetici per la produzione di un pavimentazione flessibile tipo [1]

Fase	Descrizione processo o materiale	Consumo di energia (J/t di materiale)	Energia totale consumata (MJ)	Contributo del processo sulla singola fase (%)	Contributo della fase sul totale dell'energia consumata (%)
Consumo di energia nella fase di estrazione e di trasformazione iniziale					
	Bitume	0	0	0	6.69
	Aggregati lapidei	5.30×10^7	2.53×10^5	100	
	Sub-totale		2.53×10^5	100	
Produzione					
	Produzione del bitume	6.00×10^9	1.51×10^6	43	91.54
	Stoccaggio del bitume	5.43×10^8	1.36×10^5	4	
	Miscelazione del conglomerato ed essiccazione degli inerti	3.62×10^8	1.82×10^6	53	
	Sub-totale		3.46×10^6	100	
Messa in opera					
	Conglomerato bituminoso	1.34×10^7	6.70×10^4	100	1.77
	Sub-totale		6.70×10^4	100	
	Totale		3.78×10^6		100

Il granulato ed il polverino di gomma provenienti dal recupero di pneumatici usati possono essere invece utilmente impiegati come materia prima all'interno della produzione dei conglomerati bituminosi.

Un altro aspetto da non sottovalutare è il dispendio di energia connesso alla produzione ed alla stesa delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso.

In Tabella 1 sono riportati i risultati contenuti nello studio di due ricercatori statunitensi [1] relativamente alla stima dei costi energetici per la realizzazione di una pavimentazione flessibile tipo larga 7.20 m e con uno spessore di strati legati a bitume pari a 300 mm.

Possibili benefici potrebbero essere tratti dall'utilizzo di materiale riciclato a parziale o totale sostituzione dell'aggregato lapideo e sostanziali vantaggi potrebbero essere tratti dall'utilizzo di tecnologie "a freddo" o tramite lo studio di nuove miscele di conglomerato bituminoso "tiepide" a ridotta emissione di fumi di bitume e richiesta energetica.

Un vantaggio sicuro e facilmente quantificabile potrebbe infine derivare da una riduzione degli spessori di pavimentazione stradale messi in opera.

Anche pochi centimetri di differenza nel dimensionamento della sovrastruttura possono portare a riduzioni anche del 20 – 30% del consumo energetico.

Non si possono infine dimenticare le possibilità offerte dall'utilizzo delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso come collettori di calore [4].

Esse possono fornire un significativo risparmio energetico ed un contributo alla diminuzione delle emissioni di CO₂ conseguenti al riscaldamento o alla climatizzazione degli edifici (vedi figura 1).

Negli ultimi anni si sta cercando di dare una risposta alle problematiche connesse al rumore ed alle vibrazioni trasmesse all'ambiente circostante dal traffico stradale mediante l'utilizzo di nuovi materiali, criteri progettuali e tecnologie costruttive.

Sono stati altresì sviluppati numerosi tipi di miscele di conglomerati bituminoso per superfici a bassa emissione sonora e nuove miscele sono ancora in corso di studio; altre ricerche sono state condotte e sono ancora in corso, per individuare tipologie di pavimentazioni stradali, nuovi

materiali e requisiti di regolarità della superficie viabile, capaci di ridurre drasticamente la generazione e la propagazione delle vibrazioni da traffico veicolare.

In quest'ambito si inserisce il lavoro di studio alla base della seguente memoria che intende illustrare alcune soluzioni tecniche innovative in grado di garantire la mitigazione dei fenomeni indesiderati e nocivi prodotti dalla strada.

In questa breve trattazione si descriveranno due studi: il primo relativo alla progettazione ed alla messa in opera di una innovativa formulazione per microtappeti anti-skid drenanti e fonoassorbenti, il secondo relativo alla valutazione delle caratteristiche di smorzamento delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso ed alle possibili tecniche di mitigazione.

Per meglio chiarire i due ambiti di studio è opportuno definire i principali parametri prestazionali [5] richiesti ai conglomerati bituminosi ed ai tappeti superficiali in particolare.

È possibile individuare e classificare le caratteristiche funzionali che sono direttamente collegate alle prestazioni offerte dalla pavimentazione in esercizio, esse possono riassumersi in:

- portanza, definita in termini di resistenza strutturale e di adeguata risposta deformativa ai carichi di traffico. Essa è strettamente connessa alla vita utile della pavimentazione. Con riferimento ai conglomerati bituminosi, la caratteristica prestazionale deve essere in grado di valutare e stimare il comportamento meccanico-reologico della miscela in opera ed il mantenimento nel tempo delle proprietà di resistenza;
- aderenza, parametro fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza della circolazione e collegato direttamente alle caratteristiche compositive del conglomerato ed alla tessitura superficiale;
- regolarità, con riferimento agli obiettivi di sicurezza e comfort di marcia, collegata alle caratteristiche di portanza della pavimentazione e resistenza strutturale del conglomerato precedentemente descritte;
- drenabilità, anch'essa connessa alle esigenze di sicurezza e dipendente dalla composizione delle miscele di conglomerato bituminoso utilizzate;
- visibilità, funzione del colore e delle caratteristiche di

assorbimento della luce del materiale costituente il tappeto superficiale e anch'essa strettamente collegata agli obiettivi di sicurezza.

A queste caratteristiche è possibile aggiungerne altre tre specificatamente connesse alla eco-compatibilità del moto ed alla tutela dell'ambiente circostante l'infrastruttura:

- rumore, in termini di definizione e certificazione delle qualità acustiche dei conglomerati bituminosi e di studio delle caratteristiche compositive più idonee per la minimizzazione dello stesso in fase di generazione e di massimizzazione dell'assorbimento in fase di propagazione;

- vibrazione, in termini di minimizzazione del contributo della superficie e dei materiali componenti la pavimentazione al fenomeno di generazione di vibrazioni ed esaltazione degli effetti di smorzamento nei processi di propagazione attraverso la piattaforma stradale;

- resistenza al rotolamento, in termini di minimizzazione dei consumi di carburante e di pneumatici per giungere ad una riduzione dei costi per l'utenza e degli impatti sull'ambiente.

Tutti e tre i parametri sono direttamente collegati all'ambiente ed alla sua tutela. Con un adeguato ed attento studio della miscela che porti ad una valutazione della tessitura superficiale e delle caratteristiche di fonoassorbimento del materiale è già oggi possibile dare delle risposte tecniche adeguate alle rinnovate esigenze di tutela ambientale.

Per tutti gli ambiti di studio sopra descritti le esperienze tecniche e le novità scientifiche sono molteplici, le correlazioni fra materiali stradali in generale e conglomerati bituminosi in particolare ed ambiente sono infatti numerosissime [6]. Per questo motivo nella presente trattazione ci limiteremo a descrivere le principali e più recenti esperienze svolte sull'argomento dal nostro gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Bologna.

I MICROTAPPETI DRENANTI ANTI-SKID

Negli ultimi anni si sta sempre più diffondendo nel campo del ripristino funzionale delle pavimentazioni stradali l'utilizzo di microtappeti in conglomerato bituminoso stesi a caldo. Tali miscele sono costituite da un aggregato a curva granulometrica discontinua o semi-discontinua e quindi risultano parzialmente drenanti e fonoassorbenti oltre ad essere caratterizzate da una elevata rugosità.

Il motivo principale di questa diffusione consiste nella possibilità offerta da questo tipo di tappeto di ripristinare l'aderenza senza la necessità di sopraelevare il livello stradale e di essere in grado di esplicare anche una certa funzione "drenante" e "fonoassorbente" migliorando ulteriormente la sicurezza della circolazione, il comfort di moto e la eco-compatibilità del trasporto.

Presso il Dipartimento DISTART dell'Università di Bologna si è studiata e sviluppata sia in fase preliminare di studio della miscela [7] che in fase di messa in opera [8] una particolare curva granulometrica "discontinua" (vedi figura 2) da utilizzare per la realizzazione di un conglomerato bituminoso per microtappeto drenante anti-skid.

Considerando i positivi risultati ottenuti è stata presa in esame anche la possibilità di inserire dell'argilla espansa nel conglomerato al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni del tappeto soprattutto dal punto di vista dell'aderenza [9].

Una miscela di questo tipo, caratterizzata da una matrice legante rinforzata con fibre di vetro, da una non elevata percentuale dei vuoti (12 - 15%) e da una curva

granulometrica semi-discontinua è stata studiata presso il Laboratorio di Strade del DISTART della Facoltà di Ingegneria di Bologna e quindi messa in opera nell'ambito di un normale programma di manutenzione delle autostrade A21 per un'estensione di circa 13 km.

La sperimentazione della nuova miscela per microtappeti drenanti confrontata con un conglomerato bituminoso drenante tradizionale ha fornito risultati molto promettenti.

Appare quindi possibile realizzare, con spessori sempre più ridotti (25 mm), tappeti con permeabilità elevate e simili a quelle dei classici tappeti drenanti mantenendo i vantaggi di un tappeto sottile:

- costi ridotti e quindi possibilità di fresare e ripavimentare con maggiore frequenza;

- significativo risparmio energetico per tutte le fasi di produzione e messa in opera del materiale;

- ridotta manutenzione;

- riduzione dell'effetto spray e del fenomeno dell'aquaplaning senza vincoli di spessori minimi del materiale posto in opera;

- possibilità di applicazione su pacchetti esistenti di caratteristiche medio-basse.

La sperimentazione effettuata sia in laboratorio che in sito sostituendo parte dello scheletro litico con argilla espansa ha confermato che il suo utilizzo presenta numerosi vantaggi anche per i microtappeti antiskid.

Questi tappeti migliorano ulteriormente le loro prestazioni con l'impiego dell'argilla espansa ed in particolare ne trae beneficio l'aderenza.

Si sono venute in qualche modo ad "integrare" le caratteristiche di macrorugosità dovute all'assortimento granulometrico con quelle di microrugosità proprie del granulo di argilla espansa, formando così un conglomerato che garantisce un'elevata sicurezza nel tempo.

Questi materiali, rispetto ai microtappeti già descritti consentono alcuni ulteriori miglioramenti tra i quali:

- la mancata additivazione con fibre in quanto l'argilla espansa svolge in parte la funzione di assorbimento del legante in eccesso;

- l'alleggerimento della miscela, significativo per l'applicazione su opere d'arte;

- un ulteriore incremento del coefficiente di aderenza e del fonoassorbimento;

- un certo risparmio economico derivante dal minor quantitativo di inerti pregiati (basaltici) impiegati.

LE PAVIMENTAZIONI ANTI-VIBRANTI

Il secondo studio riguarda l'analisi della propagazione delle vibrazioni da traffico e delle possibili tecniche di mitigazione [10] [11]. Le vibrazioni generate dal traffico stradale costituiscono un problema diffuso in molte città, soprattutto nei centri storici, per gli effetti a lungo termine che si possono avere sugli edifici e sulle persone.

Alla base della generazione delle vibrazioni vi sono molti fattori, tra cui le caratteristiche e le condizioni della strada, il peso, la velocità e le sospensioni di cui è dotato il veicolo, le proprietà e la stratificazione del terreno, le caratteristiche degli edifici circostanti.

Mediante l'utilizzo di un codice di calcolo alle differenze finite (FLAC 2D) (vedi figura 3) si è sviluppata un'analisi numerica indirizzata alla valutazione del modo di propagazione delle vibrazioni generate dal traffico stradale e dell'efficacia di alcuni possibili sistemi di attenuazione del

disturbo derivante da queste.

I metodi di mitigazione presi in esame sono rappresentati da modifiche strutturali della pavimentazione o da inserimento di elementi di schermatura adiacenti ad essa:

- irrigidimento della pavimentazione tramite sostituzione dello strato in conglomerato bituminoso con uno strato in conglomerato cementizio;

- irrigidimento della pavimentazione tramite sostituzione dello strato in stabilizzato granulometrico con un strato di materiale legato a cemento;

- miglioramento delle caratteristiche del terreno di sottofondo;

- inserimento di una trincea in conglomerato cementizio a fianco della pavimentazione.

Si è verificata la prevalente importanza delle onde superficiali di Rayleigh come causa del disturbo vibratorio generato dai carichi tipici del traffico stradale, come già evidenziato dalla teoria della dinamica dei suoli.

In seguito ad un'analisi parametrica volta alla valutazione dell'influenza del tipo di materiali impiegati e delle caratteristiche geometriche degli interventi si è verificato che l'uso di tali sistemi di attenuazione consente di ottenere riduzioni di velocità tra il 50% e l'80%.

In particolare, i risultati ottenuti con il modello con semispazio libero permettono di sostenere che le sovrastrutture rigide e le barriere d'onda costituite da materiali con elevato modulo elastico consentono di ridurre le accelerazioni in maniera simile se ci si riferisce a punti posti ad una certa distanza (8-10 metri) dalla sorgente di disturbo.

Dallo studio di un modello con struttura in elevazione adiacente si è invece osservato che nonostante l'effetto positivo per entrambi gli interventi, l'irrigidimento della sovrastruttura riduce l'intensità del fenomeno vibratorio, mentre si conserva l'andamento del carico; le barriere invece agiscono soprattutto sull'andamento dell'oscillazione che va a smorzamento in modo più lineare.

Complessivamente i risultati ribadiscono l'efficacia di queste tipologie di intervento al fine di schermare dalle vibrazioni zone particolarmente sensibili.

La sollecitazione vibratoria si genera a causa delle forze di reazione che nascono quando le ruote del veicolo passano al di sopra di una irregolarità.

Oltre che l'analisi delle irregolarità, assume particolare importanza quindi anche la caratterizzazione della pavimentazione in particolar modo in corrispondenza degli strati superficiali.

Se appare ormai accertata l'importanza della regolarità superficiale sul meccanismo di generazione delle vibrazioni altrettanto non si può dire sulla rigidità degli strati superficiali o sulla elasticità relativa tra strato superficiale di usura e strati sottostanti di collegamento e base.

A questo aspetto sono collegate le caratteristiche del veicolo, essendo il fenomeno vibratorio intimamente legato alle sue dimensioni, al suo peso, alla sua velocità ed al sistema di sospensioni di cui è dotato.

Dunque un veicolo che transita lungo una strada causa la trasmissione di due forme di sollecitazione dinamica: una è dovuta alle irregolarità della pavimentazione, l'altra all'eccitazione interna al veicolo dovuta principalmente al funzionamento del motore, al complesso ruota-pneumatico, ecc..

Abbiamo quindi verificato la possibilità di utilizzare dei classici conglomerati bituminosi di collegamento aventi miscele di aggregati modificate mediante l'aggiunta e/o la sostituzione di piccole percentuali in peso di granulato di

gomma proveniente dal riciclo di pneumatici di veicoli pesanti.

I rilievi sperimentali hanno confermato le prime ipotesi progettuali: la presenza di uno strato di collegamento con parte dello scheletro litico sostituito da granulato di gomma permette (a parità di forza dinamica applicata) di ridurre l'entità assoluta di accelerazioni superficiali e quindi di spostamenti indotti.

L'utilizzo della formulazione di conglomerato bituminoso di collegamento con gomma sotto al tappeto superficiale di usura non è finalizzato allo smorzamento delle vibrazioni trasmesse attraverso la pavimentazione ma alla limitazione alla "sorgente" della nascita delle stesse.

La sperimentazione su strada della nuova miscela per tappeti anti-vibranti (vedi figura 4), confrontata con un conglomerato bituminoso di collegamento tradizionale, ha fornito risultati molto promettenti.

Appare quindi possibile realizzare, con spessori tipici di una pavimentazione flessibile, tappeti con granulato di gomma simili a quelle dei classici tappeti di collegamento aggiungendo una serie di vantaggi alla pavimentazione tradizionale:

- riduzione della rigidità dello strato ma non della pavimentazione nel suo complesso con conseguente vantaggio in termini di vita utile;

- aumento delle capacità di assorbimento elastico delle vibrazioni provocate dalle irregolarità superficiali in prossimità della sorgente con conseguente aumento dell'efficacia dell'intervento;

- un vantaggio ambientale prodotto dalla possibilità di reimpiegare il materiale proveniente dalla frantumazione di pneumatici di veicoli pesanti.

Lo strato di collegamento con granulato di gomma potrebbe risultare un utile "strumento" per progettare pavimentazioni flessibili "intrinsecamente" anti-vibranti.

Si potrà quindi giungere alla riduzione delle vibrazioni prodotte dal traffico stradale mediante la progettazione di una pavimentazione specifica per le aree urbane poste nei pressi di centri storici oppure destinate a traffico intenso (es tangenziali).

Una volta consolidata l'esperienza in campo stradale si potrà estendere quanto acquisito in termini di conoscenza sugli effetti smorzanti del conglomerato additivato con granulato di gomma anche al caso del trasporto urbano su rotaia ed in particolar modo alle metropolitane di tipo leggero, dove è parimenti sentito il problema delle vibrazioni.

CONCLUSIONI

Al termine della relazione è importante evidenziare gli argomenti di maggiore attualità e le linee di ricerca più rilevanti per i prossimi anni nel campo della risparmio energetico in rapporto alla realizzazione dei conglomerati bituminosi ed delle pavimentazioni stradali in generale.

Tra gli argomenti più interessanti possiamo ricordare:

- l'utilizzo di bitumi schiumati per il riciclaggio in sito di strati di fondazione o per la realizzazione di strati di base;

- la reale applicabilità delle tecniche di riciclaggio a freddo con emulsione bituminosa e cemento con impiego di RAP fino al 100% per la realizzazione di strati di base e di fondazione;

- le possibilità di impiego delle tecniche di riciclaggio anche per i conglomerati bituminosi drenanti e fonoassorbenti;

- lo studio, la progettazione e la realizzazione di nuovi conglomerati bituminosi anti-vibranti per strati di base con

parte dello scheletro litico costituito da granulato di gomma;

- le possibilità di sviluppo dei nuovi tappeti drenanti e fonoassorbenti a doppio strato anche in ambito urbano;

- le potenzialità offerte anche dal punto di vista della tutela dell'ambiente e del risparmio energetico dalle nuove pavimentazioni "perpetue" (perpetual pavements) o a manutenzione zero.

Sono numerose e tutte ugualmente interessanti le sfide che si prospettano sia nel campo della ricerca sia in quello più strettamente applicativo per il futuro; dovremo essere pronti ad affrontarle anche per rispondere alle sempre più attuali e stringenti esigenze di risparmio energetico e tutela dell'ambiente.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. P. Zapata, J.A. Gambatese, Energy consumption of Asphalt and reinforced Concrete Pavement Materials and Construction, Journal of Infrastructure Systems, Vol.11, No 1, March 2005, pp.9-20.
2. OECD - Road Transport Research. Road Transport and Intermodal Linkages Research Programme: Recycling Strategies for Road Works. OECD Organisation for Economic Co-operation and Development. ISBN 9264154612. Jun 1997.
3. COST 337 - Unbound Granular Materials for Road Pavements - Final Report of the Action, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2000.
4. M. Loomans, H. Oversloot, A.H. de Bondt, R. Jansen, and H. van Rij. Design Tool for the Thermal Energy Potential of Asphalt Pavements. Proceedings of the 8th International IBPSA Conference on Building Simulation,

Aug. 11-14, 2003, Eindhoven, Netherlands.

5. G. Boscaino, Evoluzione delle prestazioni delle pavimentazioni stradali, Rassegna del Bitume, n°38/01, pp. 31-41.
6. C. Giavarini, I molteplici aspetti del rapporto fra ambiente e infrastrutture, Atti del Convegno Infravia 2000, Verona 10-13 maggio 2003, pp.419-423.
7. A. Bucchi, G. Dondi, A. Bonini, A. Simone, Microtappeti drenanti con fibre: ottimizzazione con pressa giratoria, Atti del XXIII Convegno Nazionale Stradale, Verona, 18-21 Maggio 1998.
8. A. Bucchi, G. Dondi, A. Bonini, A. Simone, Microtappeti drenanti: controlli in fase di messa in opera con pressa giratoria, Atti del Convegno SIIV "Adeguamento funzionale e manutenzione delle infrastrutture viarie", Milano, 19-20 Ottobre 1998.
9. A. Bucchi, G. Dondi, A. Simone, Laboratory and field experimental investigations about the properties of a bituminous thin layer with porous aggregate, Proceedings of the Ninth International Conference on Asphalt Pavements, August 17-22, 2002, Copenhagen, Denmark, su CD-ROM.
10. A. Bucchi, G. Dondi, A. Bonini, Generazione e propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico in aree urbane, Atti del Convegno SIIV "Adeguamento funzionale e manutenzione delle infrastrutture viarie", Milano, 19-20 Ottobre 1998.
11. G. Dondi, A. Bonini, Propagazione delle vibrazioni da traffico: tecniche di mitigazione, Atti del Convegno Nazionale Traffico e Ambiente, Centro Servizi Culturali S. Chiara, Trento, 21-25 febbraio 2000, pp. 469-489, Arti Grafiche Padovane (Padova), a cura di Alessandro Peretti e Paolo Simonetti.

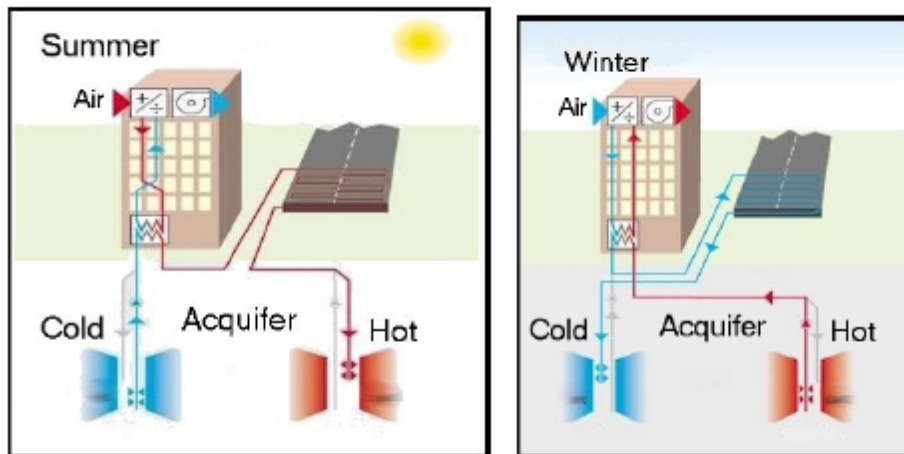


Figura 1. Schema di utilizzo della pavimentazione stradale come collettore di calore [4].

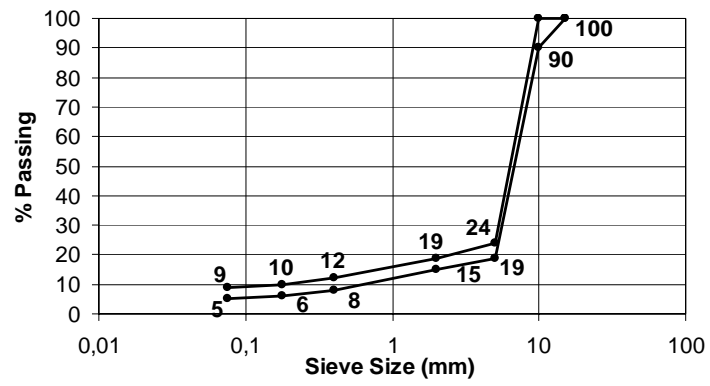


Figura 2. Fuso granulometrico per i microtappeti drenanti anti-skid

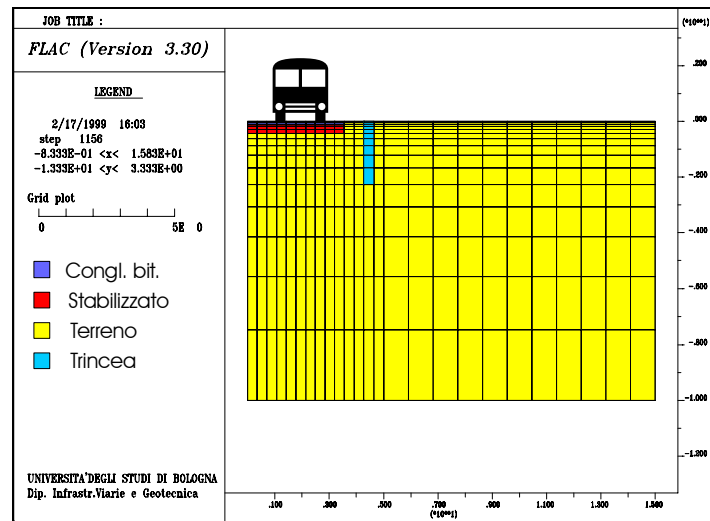


Figura 3. Modello alle differenze finite per la valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione delle vibrazioni



Figura 4. Esecuzione della pavimentazione sperimentale anti-vibrante e realizzazione delle prove dinamiche in situ