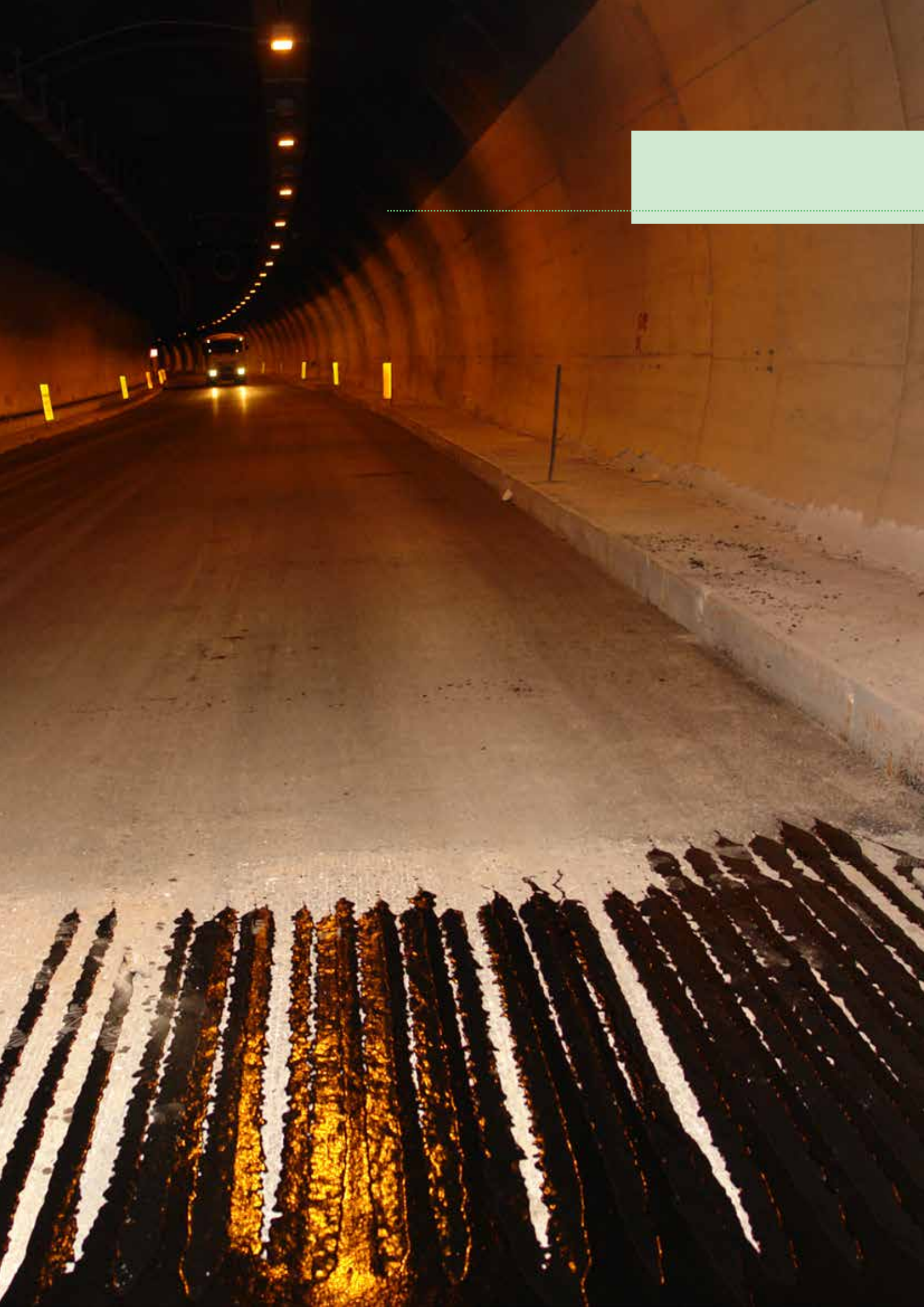
L'impiego di prodotti da Pneumatici Fuori Uso nelle pavimentazioni stradali

06

ecopneus

il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE,
DEL TERRITORIO E
DELLE INFRASTRUTTURE



Sommario

1. Prefazione **5**
2. Le pavimentazioni stradali **15**
Costituzione e messa in opera dei conglomerati bituminosi 16
Prestazioni in esercizio delle pavimentazioni flessibili 18
Progetto, monitoraggio e manutenzione delle pavimentazioni flessibili 22
Monitoraggio e analisi delle emissioni durante la produzione
e messa in opera delle pavimentazioni flessibili 26
3. L'impiego del polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali **28**
Tecnologia "wet" 31
Conglomerati bituminosi contenenti "asphalt rubber" 35
Conglomerati bituminosi contenenti "terminal blends" 41
Tecnologia "dry" 42
4. Esperienze in Italia riguardanti
l'impiego del polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali **47**
Interventi di manutenzione e costruzione 48
Ricerche universitarie 51
Ricerche del Politecnico di Torino 54
Indagini di laboratorio
Polverini da PFU 55
Leganti bituminosi contenenti polverino da PFU 62
Il tronco pilota realizzato sulla Borgaro Venaria
Mix design 68
Campo prove 72
Posa in opera sul tronco pilota 75
Controlli in corso d'opera 77
Valutazione delle emissioni gassose e del potenziale di eluizione 82
5. Conclusioni e sviluppi futuri **89**
6. Bibliografia **93**

213

Prefazione

La rete delle infrastrutture stradali costituisce un patrimonio di inestimabile valore per la società moderna nella quale, malgrado il forte sviluppo di strumenti per l'esplorazione di itinerari "virtuali", sono tuttora in crescita le esigenze di mobilità fisica di persone e beni. Alla costruzione di nuove strade ed alla manutenzione di quelle esistenti vengono di conseguenza destinate ingenti risorse economiche, in parte impiegate per lo studio e la messa a punto di nuove soluzioni tecniche finalizzate ad un miglioramento delle prestazioni per ciò che concerne l'affidabilità, la sicurezza ed il comfort delle infrastrutture stesse. In tale contesto assumono un ruolo di particolare rilievo le pavimentazioni stradali (altrimenti dette sovrastrutture), le cui caratteristiche strutturali e funzionali debbono essere tali da garantire le su citate prestazioni, facendo fronte, al tempo stesso, al considerevole e continuo aumento dei volumi e dei carichi di traffico. Ciò risulta possibile in quanto nel tempo si è andata progressivamente sviluppando una vera e propria "scienza e tecnologia delle pavimentazioni stradali", fondata non solo sull'osservazione empirica del loro comportamento in opera, ma anche sui risultati di studi teorici e sperimentali mirati che hanno portato ad una comprensione approfondita dei complessi fenomeni di interazione tra pavimentazione, veicoli ed ambiente. Oltre al perfezionamento di soluzioni tecniche di uso ormai consolidato, si sono così sviluppate metodologie di costruzione e manutenzione del tutto innovative in grado, a seconda dei casi, di massimizzare specifici aspetti delle prestazioni in esercizio o di offrire alternative commercialmente vantaggiose per Imprese ed Enti di gestione.

Per ciò che concerne i materiali impiegati nelle pavimentazioni, di pari passo con l'impiego di nuovi prodotti concepiti ad hoc, nel tempo si è andato diffondendo con sempre maggiore frequenza l'utilizzo di componenti di riciclaggio o di recupero. Tale tendenza risulta in linea con quanto avvenuto in altri settori produttivi e risponde in linea generale all'esigenza, sottolineata anche a livello giuridico e regolamentare, di ridurre il consumo di materie prime limitando al contempo l'accumulo di rifiuti derivanti da strutture ed opere dismesse.

Alla luce di quanto sopra esposto, il riutilizzo di pneumatici fuori uso (PFU) nelle pavimentazioni stradali rappresenta uno dei casi di recupero di maggiore interesse per gli operatori del settore stradale e per i gestori di rifiuti. Facendo ricorso a particolari tecnologie produttive messe a punto nel corso di circa 30 anni di esperienze, è infatti possibile includere i PFU, preventivamente ridotti in forma granulare mediante opportuni processi di trattamento, all'interno dei conglomerati bituminosi (impropriamente denominati "asfalti") utilizzati per la realizzazione della parte superficiale delle sovrastrutture. In tal modo viene raggiunto il duplice obiettivo di individuare una destinazione d'uso per tali materiali e di migliorare, per quanto documentato in letteratura, le prestazioni strutturali e funzionali delle sovrastrutture stesse.

Le tecnologie produttive attualmente disponibili richiedono che il cosiddetto "polverino" derivante dai PFU, avente ben definite caratteristiche dimensionali e compositive, venga incorporato, a seconda dei casi, all'interno del bitume impiegato per la realizzazione dei conglomerati bituminosi (processo "wet") oppure direttamente all'interno delle miscele come componente aggiuntivo (processo "dry"). Ciò richiede, in entrambi i casi, la disponibilità di attrezzature ad uso specifico e l'adozione di particolari accorgimenti tecnici che debbono essere messi in atto in tutte le fasi che compongono il processo costruttivo (dalla formulazione delle miscele alla loro messa in opera).
Le su citate tecnologie hanno avuto una notevole diffusione negli Stati Uniti, ove sono state sperimentate già a partire dagli anni '90 grazie soprattutto all'introduzione di una norma federale che prescriveva l'impiego di definiti quantitativi di PFU all'interno delle pavimentazioni stradali. Benché tale prescrizione sia stata in seguito abolita, gli incoraggianti risultati ottenuti in numerose applicazioni su scala reale hanno suggerito di continuare ad investire risorse in questa direzione, con la progressiva creazione di un know-how che ha costituito, e ancora rappresenta, un punto di riferimento per la comunità scientifica internazionale. A tal proposito, sono particolarmente significative le esperienze compiute in Arizona, California, Texas e Florida, ove le miscele bituminose contenenti PFU, principalmente riconducibili alla tecnologia "wet", sono ben presto entrate a far parte del novero delle soluzioni tecniche standard.
In Europa, per lungo tempo non si sono purtroppo verificate le condizioni opportune affinché venissero dedicate al recupero dei PFU nelle pavimentazioni le necessarie risorse industriali e di ricerca. L'immissione sul mercato dei bitumi modificati con polimeri di sintesi ha di fatto, seppure impropriamente, inizialmente relegato la tecnologia "wet" ad un ruolo di secondo piano, con applicazioni su scala reale di modesta entità realizzate in Belgio, Olanda, Francia, Austria e Germania. Il processo "dry", messo a punto e brevettato per la prima volta in Svezia, ha invece dapprima conosciuto una certa diffusione prevalentemente nei paesi del Nord Europa, ma a seguito di valutazioni controverse inerenti alle effettive prestazioni in opera è stato successivamente utilizzato in maniera alquanto limitata.
Lo scenario europeo è tuttavia cambiato piuttosto radicalmente a partire dalla fine degli anni '90 quando, facendo tesoro delle pregresse esperienze statunitensi, la tecnologia "wet" è stata impiegata con continuità nell'ambito della manutenzione delle sovrastrutture stradali in Portogallo ed in Spagna. Ciò è stato possibile non solo per effetto delle iniziative di imprenditori privati, ma anche a seguito di un adeguato supporto governativo derivante dalla crescente diffusione di una cultura europea finalizzata alla riduzione dei rifiuti.
In Italia, ove storicamente le imprese ed aziende del settore stradale hanno dimostrato di saper promuovere l'introduzione sul mercato di tecnologie innovative, il riutilizzo del polverino da PFU è stato accolto con un certo scetticismo. Negli anni '80 e '90 l'interesse si è infatti focalizzato su altre soluzioni tecniche ed i primi tentativi di produrre conglomerati bituminosi con tecnologia "dry" non hanno dato gli esiti sperati. Lo sviluppo delle tecnologie legate all'impiego del polverino è stato inoltre compromesso dalla mancanza di una effettiva filiera di recupero e trattamento dei PFU, principalmente destinati alla produzione di energia o conferiti in discarica.
Anche in Italia la situazione è tuttavia mutata in maniera sostanziale negli ultimi 10 anni grazie ad una serie di fattori concomitanti che hanno contribuito ad accrescere l'interesse per le tecnologie di riutilizzo dei PFU nelle pavimentazioni stradali. In primo luogo, alla luce dei vincoli legislativi relativi alla gestione dei PFU, si è andata gradualmente sviluppando una vera e propria rete di aziende dedite alla valorizzazione dei PFU per il loro successivo impiego in vari settori produttivi. In secondo luogo, la tecnologia "wet" è finalmente diventata disponibile sul mercato nazionale grazie ad una iniziativa imprenditoriale che ha altresì stimolato lo sviluppo di attività di studio e ricerca da parte di varie istituzioni universitarie.
Fin qui le applicazioni su scala reale di conglomerati bituminosi contenenti legante prodotto con tecnologia "wet" sono consistite in interventi per lo più isolati, prevalentemente eseguiti su strade comunali e provinciali e non inquadrati in una più ampia strategia di miglioramento sistematico delle prestazioni delle pavimentazioni a livello di rete. Fa eccezione l'iniziativa intrapresa della Provincia di Torino che a partire dal 2008, grazie all'interessamento congiunto degli Assessorati all'Ambiente ed alla Viabilità, ha dato vita ad una serie di attività finalizzate ad utilizzare su vasta scala i conglomerati bituminosi contenenti PFU nell'ambito della costruzione e manutenzione

delle pavimentazioni della propria rete provinciale. A tal riguardo è stata formalizzata collaborazione tecnico-scientifica con il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino al quale è stato dato l'incarico di effettuare tutte le indagini, di laboratorio e di campo, necessarie per potere implementare localmente le tecnologie disponibili in un'ottica di sostenibilità ambientale. Si sono inoltre previste attività di formazione del personale tecnico, di messa a punto di norme prestazionali da adottare per la manutenzione delle pavimentazioni e di individuazione delle modalità con le quali soddisfare i dettami della politica dei cosiddetti acquisti pubblici verdi (Green Public Procurement - GPP).

Le attività sperimentali svolte nell'ambito della suddetta collaborazione, che hanno preso in esame tanto le prestazioni attese delle pavimentazioni quanto il potenziale impatto delle lavorazioni sull'ambiente e sulla salute dei lavoratori, sono state affiancate alla costruzione di un tronco pilota sulla circonvallazione Borgaro-Venaria, la più grande opera pubblica mai realizzata dalla Provincia di Torino. Il tratto sperimentale si sviluppa lungo circa 1,2 km ed include, su una superficie di circa 16.000 m^2, uno strato di usura costituito da un particolare conglomerato bituminoso contenente polverino da PFU, denominato "gap-graded". I lavori sono stati effettuati alla fine del 2010 con successiva apertura al traffico nel febbraio del 2011.

Oltre che con il supporto tecnico-economico della Provincia di Torino, il Politecnico di Torino ha sviluppato le attività di propria competenza anche in relazione ad una partnership istituita con la Ecopneus, società consortile senza fini di lucro costituita dalle principali aziende produttrici di pneumatici (Bridgestone, Continental, Goodyear-Dunlop, Marangoni, Michelin e Pirelli) ed operante in Italia al fine di ottimizzare la gestione degli pneumatici fuori uso.

A seguito di una attenta valutazione dei possibili scenari di recupero dei PFU, Ecopneus ha ritenuto che le applicazioni in ambito stradale siano di primario interesse sia perché offrono da un punto di vista quantitativo una valida destinazione d'uso a tali materiali, sia perché consentono una loro effettiva valorizzazione all'interno del medesimo sistema di trasporto per il quale vengono originariamente prodotti. Di conseguenza, Ecopneus ha fornito il proprio sostegno tecnico al Politecnico di Torino durante l'esecuzione degli studi effettuati per conto della Provincia di Torino ed ha successivamente messo in campo le risorse necessarie per lo svilup-

po di ulteriori attività di ricerca. In particolare, sotto l'egida di Ecopneus è stato avviato un programma di monitoraggio del tronco pilota sopra indicato e sono state intraprese ulteriori iniziative di studio legate all'approfondimento delle conoscenze nel settore dei conglomerati bituminosi per pavimentazioni contenenti polverino da PFU.

Tenendo conto delle conoscenze accumulate nelle attività già concluse ed ancora in corso di svolgimento, è stato predisposto il presente documento, destinato ai tecnici ed operatori del settore stradale che siano interessati al possibile impiego di conglomerati bituminosi contenenti polverino da PFU per la costruzione e la manutenzione delle pavimentazioni stradali.

Nei vari capitoli in cui è articolato il documento si trattano gli aspetti di base e si focalizzano alcuni punti chiave inerenti alla valutazione preliminare delle tecnologie di impiego di prodotti da PFU.

Il Capitolo 2 è dedicato al tema generale delle pavimentazioni stradali, con una sintetica illustrazione delle diverse problematiche che debbono essere affrontate per garantire elevate prestazioni in opera e per poterle verificare con idonee tecniche di caratterizzazione.

Il Capitolo 3 è invece incentrato sulle tecnologie di impiego del polverino da PFU nei conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali. Vengono descritti i due processi produttivi attualmente disponibili ("wet" e "dry") e richiamate le principali prescrizioni che occorre rispettare nelle fasi di formulazione e di messa in opera delle miscele. Vengono infine forniti alcuni elementi relativi alle prestazioni attese in esercizio, desunte dai dati riportati in letteratura.

Il Capitolo 4 riporta una sintesi delle esperienze compiute in Italia per quel che riguarda l'impiego di polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali. Esse si riferiscono sia ai lavori di costruzione e manutenzione, sia agli studi effettuati dai principali centri di ricerca universitari. In particolare, vengono illustrati in maniera più dettagliata i risultati ottenuti dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino nell'ambito del su citato progetto sviluppato per conto della Provincia di Torino.

Il Capitolo 5 contiene infine una serie di considerazioni conclusive e di raccomandazioni che potranno essere utili agli operatori per sfruttare appieno le potenzialità delle tecnologie "wet" e "dry". Vengono altresì menzionate le attività di studio, attualmente promosse da Ecopneus, che potranno ulteriormente ampliare il quadro delle conoscenze e condurre in Italia ad una implementazione ancora più estesa di tali tecnologie.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare tutti coloro i quali hanno contribuito, in varie forme, alla predisposizione del presente documento. Per il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino: il prof. Orazio Baglieri, l'ing. Davide Dalmazzo, la dott.ssa Silvia Fiore, l'ing. Michele La Notte, l'ing. Pierpaolo Riviera, l'ing. Barbara Ruffino e l'ing. Lucia Tsantilis. Per ECOPNEUS , che ha sostenuto l'iniziativa da un punto di vista tecnico ed economico: l'ing. Giovanni Corbetta e il dott. Daniele Fornai. Per la Provincia di Torino, che ha concesso l'autorizzazione per la pubblicazione dei risultati sperimentali relativi agli studi effettuati a supporto del tronco pilota realizzato sulla circonvallazione Borgaro-Venaria: gli Assessori Alberto Avetta, Angela Massaglia e Roberto Ronco, l'arch. Paolo Foietta, l'arch. Agata Fortunato, l'ing. Dario Masera, l'ing. Sabrina Bergese e l'ing. Battista Bellusci. Per l'Impresa CO.GE.FA. S.p.A., che ha realizzato le stese sperimentali: il dott. Massimo Fantini, il geom. Fabrizio Odetto, il geom. Franco Vergano e il geom. Gianfranco Papa. Per le società Asphalt Rubber Italia s.r.l. e Bitem s.r.l., che hanno fornito il legante "asphalt rubber": l'ing. Ines Antunes, il dott. Leopoldo Rosi e il geom. Andrea Bonafè.

Ezio Santagata

Ezio Santagata è professore ordinario di “Strade, Ferrovie ed Aeroporti” presso il Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino. Si è laureato in Ingegneria Civile nell’Università di Ancona e si è successivamente specializzato presso la Penn State University (USA) nel settore della reologia dei leganti bituminosi.
La sua principale attività scientifica consiste nello studio delle caratteristiche prestazionali dei materiali, tradizionali ed innovativi, impiegati nelle pavimentazioni stradali ed aeroportuali. Dal 2007 è il Responsabile scientifico del Laboratorio Alta Qualità del Politecnico di Torino denominato “Laboratorio Sperimentale di Materiali Innovativi e di Recupero per le Infrastrutture dell’Ingegneria Civile”. È membro del Comitato Editoriale delle riviste internazionali *Road Materials and Pavement Design*, *International Journal of Pavement Engineering*, *International Journal of Roads and Airports* e *International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology*. È autore di numerose pubblicazioni scientifiche su riviste ed atti congressuali nazionali ed internazionali.

Maria Chiara Zanetti

Maria Chiara Zanetti è professore ordinario di "Ingegneria Sanitaria Ambientale" presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino. Si è laureata in Ingegneria Mineraria nel Politecnico di Torino ove ha successivamente conseguito il Dottorato di Ricerca in "Impianti Chimici".
La sua principale attività scientifica consiste nell'analisi e nello sviluppo di tecnologie ambientali per il trattamento delle acque, il riciclo dei rifiuti e la bonifica di siti contaminati. Dal 2006 è il responsabile scientifico del "Laboratorio di Chimica Ambientale" del Politecnico di Torino. È peer reviewer delle riviste internazionali *Resources Conservation and Recycling, Environmental Pollution, Journal of Hazardous Materials* e *Waste Management*. È autrice di numerose pubblicazioni scientifiche su riviste ed atti congressuali nazionali ed internazionali.

ecopneus

il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi

Ecopneus

Ecopneus Scpa è la società senza scopo di lucro nata nel 2009 per gestire il **rintracciamento**, la **raccolta**, il **trattamento** e la **destinazione finale dei Pneumatici Fuori Uso (PFU)** in Italia, creata da Bridgestone, Continental, Goodyear, Dunlop, Marangoni, Michelin e Pirelli.
In base all'art. 228 del Decreto Legislativo 152/2006, infatti, i principali produttori e importatori di pneumatici operanti in Italia devono assicurare la corretta gestione dei PFU con responsabilità proporzionale alle quote di mercato rappresentate. Tale mission si traduce nell'obiettivo pratico di **gestire larga parte delle oltre 350.000 tonnellate** di PFU generate ogni anno in Italia: i soci che hanno costituito Ecopneus rappresentano oltre l'80% del mercato nazionale.

Il sistema Ecopneus garantirà:

- **identificazione di tutti i punti della generazione del rifiuto-pneumatico,** con la mappatura completa di tutti i gommisti, delle stazioni di servizio, officine ed, in generale, i punti dove avviene il ricambio dei pneumatici;
- **ottimizzazione della logistica,** attraverso un'organizzazione del trasporto dei PFU integrato ed efficiente;
- **promozione di nuovi impieghi dei PFU,** stimolando i ricercatori ed i decisori di ogni livello per ampliare le possibilità di riutilizzo dei PFU;
- **monitoraggio e rendicontazione,** che eviteranno la dispersione dei PFU verso flussi illegali, rendendo trasparente ogni passaggio e favorendo una rendicontazione puntuale.

POLITECNICO
DI TORINO

Politecnico di Torino
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Il Politecnico di Torino è un Ateneo di riferimento nel panorama italiano e internazionale per gli studi di ingegneria e architettura. Il Regio Politecnico di Torino nasce come istituzione nel 1906, ma le sue origini risalgono alla Scuola di Applicazione per gli Ingegneri, sorta con la Legge Casati nel 1859. Attualmente il Politecnico di Torino si configura come una Research University, nella quale la ricerca si integra alla formazione fornendo una risposta culturale alle istanze sempre più complesse avanzate dalla società, sia sotto il profilo sociale che economico. Dal primo gennaio 2012 il Politecnico di Torino si compone di 11 strutture dipartimentali dedicate alla ricerca e alla didattica.

Il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) costituisce la struttura di riferimento dell'Ateneo nelle aree culturali inerenti alla salvaguardia, alla protezione e alla gestione dell'ambiente e del territorio, all'utilizzo sostenibile delle risorse e allo sviluppo ottimizzato ed eco-compatibile delle infrastrutture e dei sistemi di trasporto. Il DIATI promuove, coordina e gestisce la ricerca di base e quella applicata, il trasferimento tecnologico ed i servizi al territorio. Nei vari ambiti di pertinenza, le ricerche del DIATI si sviluppano attraverso l'utilizzo di strumenti di indagine analitici, numerici e sperimentali. In particolare, le attività sperimentali si svolgono sia nei laboratori, sia mediante rilevamenti diretti sul territorio.
Nelle aree culturali di competenza il DIATI organizza e gestisce la formazione su tre livelli (laurea triennale, laurea magistrale, dottorato di ricerca), anche con corsi di studio consortili di tipo inter-dipartimentale ed inter-ateneo.

Le pavimentazioni stradali

Le pavimentazioni stradali sono costitute da una serie di strati sovrapposti aventi diversa costituzione e differenti funzioni. In linea del tutto generale si possono distinguere:

- le pavimentazioni flessibili e semi-rigide, nelle quali gli strati più superficiali sono costituiti da miscele di conglomerato bituminoso, mentre quelli inferiori, posti al di sopra del terreno di sottofondo, appartengono generalmente alla classe dei materiali non legati (misti granulari) o stabilizzati (a bitume o a cemento);
- le pavimentazioni rigide, costituite da lastre in conglomerato cementizio (armato o non armato) poggianti su uno o più strati di fondazione (in misto cementato e/o in misto granulare non legato) che si trovano al di sopra del terreno di sottofondo.

Per questioni di carattere tecnico ed economico, nonché per effetto di una consuetudine che si è andata consolidando nel corso del tempo, lungo l'intero sviluppo della rete di infrastrutture italiane vengono realizzate, nella quasi totalità dei casi, pavimentazioni di tipo flessibile. Le specifiche soluzioni tecniche adottate per la loro costruzione e manutenzione vengono di volta in volta individuate tenendo conto delle prestazioni attese in esercizio, influenzate in maniera significativa sia dall'entità dei carichi di traffico sia dalle condizioni climatiche locali. A tal riguardo, esistono varie Norme Tecniche che disciplinano l'impiego dei materiali componenti e delle miscele costituenti i vari strati e che fissano i criteri di accettazione dei lavori eseguiti in opera. Sono altresì disponibili procedure progettuali che consentono di dimensionare le pavimentazioni per garantire una vita utile compatibile con la categoria di appartenenza dell'infrastruttura.

L'introduzione di nuovi materiali e di tecnologie innovative deve essere necessariamente fondata sulla conoscenza delle tecniche di caratterizzazione, delle procedure operative e delle metodologie di rilievo impiegate per la realizzazione e lo studio delle pavimentazioni di tipo tradizionale. Esse vengono qui di seguito riportate in maniera sintetica per potere successivamente valutare le problematiche tecniche connesse con l'utilizzo di conglomerati contenenti polverino da PFU.

2.1 Costituzione e messa in opera dei conglomerati bituminosi

I conglomerati bituminosi sono miscele costituite da aggregati lapidei di varia pezzatura, legante bituminoso (bitume o bitume modificato con polimeri di sintesi), filler minerale ed in alcuni casi, qualora ciò sia consentito dalle Norme Tecniche, anche da fresato bituminoso asportato da pavimentazioni precedentemente soggette ad interventi di manutenzione.
La miscelazione dei componenti, nei dosaggi previsti a seguito di un progetto preliminare di miscela (mix design), avviene all'interno di impianti di produzione ad una temperatura elevata, variabile a seconda delle caratteristiche di consistenza del legante ma comunque superiore ai 150°C. Le miscele prodotte in impianto vengono riversate all'interno di automezzi pesanti dotati di un apposito cassone e quindi trasportate presso il cantiere di destinazione. Vengono quindi poste in opera negli spessori previsti in progetto a mezzo di macchine livellatrici (le cosiddette vibrofinitrici) e quindi sottoposte ad un opportuno addensamento mediante l'impiego di rulli pesanti, dotati a seconda dei casi di ruote metalliche o gommate.
Per potere garantire una adeguata efficienza dell'addensamento, che come si dirà in seguito è essenziale ai fini delle prestazioni in esercizio degli strati, è fondamentale non solo una corretta scelta ed utilizzo dei rulli di compattazione, ma è altresì necessario che le operazioni di compattazione avvengano quando il conglomerato bituminoso è ancora ad una temperatura sufficientemente elevata, tale da potere essere addensabile sotto l'azione dei mezzi d'opera. A tal proposito, al fine di evitare un eccessivo raffreddamento delle miscele, è opportuno tenere conto delle distanze di trasporto (tra l'impianto ed il cantiere) e delle condizioni climatiche, ed è altresì opportuno che i mezzi di trasporto siano dotati di teloni di copertura.
Poiché i vari strati in conglomerato bituminoso non devono presentare scorrimenti relativi sotto carico, tra di essi vengono di norma realizzate le cosiddette mani d'attacco che derivano dalla uniforme applicazione, con un opportuno dosaggio, di emulsioni bituminose (utilizzate a freddo) o di bitume (spruzzato a caldo). Tale pratica viene ovviamente seguita, oltre che nel caso di costruzione di una nuova pavimentazione, anche nel caso di rifacimento del solo strato di usura superficiale.
Gli strati in conglomerato bituminoso possono essere distinti, in funzione della loro posizione all'interno della pavimentazione, in strati di base (posti in profondità, al di sopra degli strati di fondazione), strati di collegamento (in posizione intermedia) e strati di usura (posti in superficie). Essi si differenziano tra loro per la composizione e le caratteristiche

volumetriche finali; in particolare, al crescere della profondità (passando cioè dallo strato di usura a quello di collegamento e poi a quello di base), si ha generalmente un aumento della pezzatura massima degli aggregati lapidei, una riduzione della percentuale di bitume ed un aumento del volume dei vuoti. Negli schemi di pavimentazione flessibile di tipo tradizionale, al crescere della profondità all'interno della sovrastruttura si ha inoltre un aumento degli spessori degli strati.

2.2 Prestazioni in esercizio delle pavimentazioni flessibili

Nella fase di esercizio le pavimentazioni stradali sono interessate sia dalla ripetuta applicazione in superficie di sollecitazioni derivanti dal transito dei veicoli, sia dalle azioni termiche che vengono indotte nei vari strati per effetto delle variazioni delle condizioni climatiche esterne che si verificano a varie scale temporali (giornaliera, mensile e stagionale). Per quel che riguarda le sollecitazioni applicate dai mezzi in superficie, si può osservare come esse abbiano componenti sia verticali (perpendicolari alla superficie della pavimentazione) sia tangenziali (paralleli alla superficie). Le componenti di sollecitazione verticale derivano essenzialmente dalla massa dei veicoli in transito, dalla distribuzione dei carichi sugli assi e dagli eventuali effetti dinamici associati all'irregolarità del profilo superficiale della pavimentazione, variabile nel tempo per effetto dei transiti ripetuti. Le componenti di sollecitazione tangenziale sono invece conseguenti alla mobilitazione dell'aderenza all'interfaccia pneumatico-pavimentazione, alle eventuali variazioni della velocità e direzione di avanzamento dei veicoli ed all'insorgere di addizionali forze trasversali agenti su di essi (conseguenti a fattori quali l'irregolarità della pavimentazione ed il vento). Per effetto dell'applicazione delle su citate sollecitazioni e variazioni termiche, si verificano, all'interno dei vari strati della pavimentazione, tensioni e deformazioni la cui distribuzione dipende dalle caratteristiche meccaniche dei materiali, dagli spessori degli strati e dal grado di adesione tra essi. Tali tensioni e deformazioni possono condurre, nel corso del tempo, a fenomeni di dissesto (detti anche di ammaloramento) che dapprima appaiono in maniera lieve e localizzata, ma che possono successivamente presentarsi in forma via via più marcata e diffusa.

A tal proposito, vale la pena sottolineare che la

scienza e tecnologia delle pavimentazioni, un tempo basata principalmente sull'empirismo, è progredita ed evoluta orientandosi sempre più verso un approccio di tipo razionale e rigoroso, a tal punto che ad oggi si dispone di strumenti che consentono non solo di identificare e classificare i dissesti in maniera molto chiara, ma anche di associare a ciascuno di essi i fenomeni fisico-meccanici che si verificano su scala locale e i corrispondenti modelli previsionali basati sulla valutazione dello stato di tensione e deformazione in alcuni punti caratteristici della pavimentazione. Tale bagaglio di conoscenze è di assoluto rilievo in quanto consente, a seconda della natura e dell'estensione dei dissesti, di approntare gli interventi di manutenzione e riqualificazione necessari per preservare l'integrità strutturale della pavimentazione e per garantire il suo utilizzo in piena sicurezza.

Occorre precisare che nella fase di esercizio, contestualmente all'applicazione delle su citate sollecitazioni, i materiali costituenti i vari strati possono essere interessati da fenomeni di alterazione dovuti all'azione dell'acqua, di origine meteorica o di falda, che può determinare in taluni casi una rilevante variazione delle loro proprietà meccaniche, contribuendo così ad accelerare gli ammaloramenti o ad indurne alcuni specifici. Anche in questo caso, le esperienze accumulate nel corso degli anni dalla comunità scientifica internazionale ha consentito di identificare i meccanismi di danneggiamento dei materiali e di definire opportuni modelli per una valutazione quantitativa dei corrispondenti effetti sulle prestazioni delle pavimentazioni, anche in relazione ad eventuali interventi di manutenzione.
Alla luce di quanto illustrato, è evidente che al fine di realizzare pavimentazioni aventi prestazioni soddisfacenti, tali cioè da non presentare dissesti indesiderati e/o prematuri, è non solo opportuno ma soprattutto tecnicamente possibile agire su tutti quei fattori che siano controllabili da un punto di vista progettuale e costruttivo.

Con specifico riferimento ai conglomerati bituminosi costituenti la parte superficiale delle pavimentazioni flessibili, i più comuni ammaloramenti cui si fa riferimento tanto nella pratica progettuale quanto nella diagnostica di sovrastrutture stradali già in uso sono:

- la fessurazione per fatica, derivante dal danneggiamento sotto carico ripetuto della matrice bituminosa legante;
- l'ormaiamento, derivante dall'accumulo di deformazioni non reversibili nei conglomerati bituminosi (e in alcuni casi anche negli strati non legati);
- la fessurazione termica, derivante dalla rottura della matrice bituminosa legante nel caso in cui le coazioni di origine termica non siano compatibili con le caratteristiche locali di resistenza e di duttilità del materiale.

Esistono inoltre altre tipologie di ammaloramento che pur derivando dalle sollecitazioni descritte in precedenza, influenzano essenzialmente le prestazioni funzionali delle pavimentazioni. Esse sono:

- la creazione di irregolarità, derivanti dall'accumulo non uniforme di deformazioni permanenti lungo lo sviluppo dell'infrastruttura, che hanno un effetto significativo sulle condizioni di comfort e sicurezza di utilizzo della pavimentazione;
- la riduzione dell'aderenza superficiale, derivante dall'usura e levigazione degli aggregati lapidei esposti in superficie e/o dal rifluimento del legante bituminoso in superficie, che ha un effetto significativo sulla sicurezza.

Infine, esistono ammaloramenti che non rientrano in nessuna delle tipologie su indicate. Tra essi, i più comuni e documentati in letteratura risultano essere:

- la formazione di buche con distacco di porzioni dello strato di usura e/o dei sottostanti strati;
- lo sgranamento, consistente nella perdita di aggregati superficiali;
- la formazione di distorsioni, cedimenti, rigonfiamenti e fessure localizzate;
- la formazione di fessure "a blocchi" (a maglia larga), derivanti dai concomitanti effetti prodotti dall'invecchiamento del bitume e dagli agenti climatici;
- la formazione di fessure "di richiamo" derivante dalla propagazione di fessure già presenti negli strati sottostanti;
- la formazione di fessure in corrispondenza dei giunti di costruzione.

In considerazione di quanto illustrato in precedenza, al fine di minimizzare il rischio del verificarsi di dissesti associati alla ripetuta applicazione di sollecitazioni derivanti dal transito dei veicoli e dai cicli termici, nonché alla contestuale possibilità di presenza di acqua di varia origine, è fondamentale adottare tutte le misure necessarie per garantire ai conglomerati bituminosi, coerentemente con quanto previsto in progetto:

- adeguate caratteristiche meccaniche;
- adeguati spessori degli strati;
- un adeguato grado di adesione tra gli strati;
- una adeguata durabilità all'acqua.

Per quel che riguarda le caratteristiche meccaniche dei conglomerati bituminosi costituenti i vari strati, espresse in termini di rigidezza e/o di resistenza, esse dipendono da una serie di fattori che debbono essere presi in considerazione tanto nella fase progettuale (con la definizione di idonee Norme Tecniche per l'accettazione dei materiali e delle lavorazioni) quanto in quella di realizzazione (con l'adozione di opportune procedure di produzione, messa in opera e controllo). Nello specifico, per poter garantire il raggiungimento di determinate caratteristiche meccaniche assumono un ruolo chiave:

- la distribuzione granulometrica degli aggregati lapidei, nonché le caratteristiche meccaniche e di forma delle varie frazioni componenti;
- la percentuale di bitume;
- le proprietà reologiche del bitume;
- il grado di addensamento raggiunto in opera dalla miscela (quantificabile facendo riferimento ad esempio alla percentuale dei vuoti residui).

Nel solo caso degli strati di usura, al fine di garantire un accettabile livello di aderenza devono inoltre essere controllate le caratteristiche di tessitura e di resistenza alla levigazione degli aggregati impiegati per la costituzione della miscela bituminosa.

Per ottenere un soddisfacente grado di adesione tra gli strati occorre porre particolare cura nella realizzazione delle mani d'attacco. A tal proposito si sottolinea che nelle Norme Tecniche correttamente articolate vengono imposti limiti di accettazione a quei fattori che possono essere controllati dal progettista. In particolare, nel caso di mani d'attacco realizzate con l'applicazione di emulsioni bituminose, nelle Norme Tecniche vengono previsti limiti di accettazione per ciò che riguarda:

- il tipo di emulsione;
- il dosaggio di emulsione per unità di superficie;
- il tempo di maturazione prima della stesa dello strato superiore.

Hanno ovviamente un'influenza significativa sull'adesione tra gli strati anche le condizioni della pavimentazione sulla quale si realizza il trattamento, soprattutto con riferimento alle caratteristiche di tessitura e di pulizia, nonché le caratteristiche del materiale costituente lo strato superiore.
Le emulsioni vengono caratterizzate facendo riferimento alla loro composizione (rapporto bitume/acqua), alla carica conferita alle particelle di bitume in sospensione (cationiche o anioniche), nonché alla loro velocità di rottura. Quest'ultima caratteristica è controllata, oltre che dalla composizione, da quantità e tipo di agente emulsionante presente nell'emulsione.
Per il controllo della durabilità all'acqua dei conglomerati bituminosi occorre infine porre particolare attenzione alla tipologia degli aggregati impiegati. Ciò in relazione al fatto che a seconda della loro mineralogia le interazioni che si creano con i film di ricoprimento di bitume possono essere più o meno resistenti all'azione dell'acqua, limitando quei fenomeni di spogliamento che riducono significativamente le caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose.
Per la limitazione degli effetti deleteri dovuti alla presenza dell'acqua è inoltre opportuno che le caratteristiche volumetriche della miscela vengano controllate con attenzione. Riducendo opportunamente la percentuale dei vuoti si realizzano infatti miscele pressoché impermeabili all'acqua, con il conseguente vantaggio di non dover temere, se non in superficie, i su citati fenomeni di spogliamento.

2.3 Progetto, monitoraggio e manutenzione delle pavimentazioni flessibili

Alla luce di quanto su esposto, risulta evidente che per garantire alle pavimentazioni stradali adeguate prestazioni in esercizio, anche con riferimento alla sicurezza degli utenti che le utilizzano, occorre che esse siano adeguatamente progettate, tenendo conto di tutti quei fattori che influenzano l'insorgere di eventuali ammaloramenti. È inoltre indispensabile che nel corso del tempo si provveda ad un attento monitoraggio delle prestazioni e che in funzione dei relativi esiti si programmino e si approntino i

necessari interventi di manutenzione, anch'essi fondati su una adeguata progettazione.
Per quel che riguarda il progetto, riferito tanto alle nuove opere quanto agli interventi di manutenzione e riqualificazione, esso deve necessariamente includere una precisa definizione delle caratteristiche degli strati messi in opera, con riferimento ai loro spessori, alle caratteristiche compositive dei materiali costituenti ed alle eventuali lavorazioni complementari che ne influenzano le prestazioni in esercizio. È inoltre indispensabile che nell'ambito del progetto vengano fissate le modalità di controllo delle lavorazioni per fare in modo che l'opera realizzata corrisponda effettivamente a quella ipotizzata in sede progettuale.

Sebbene la letteratura tecnico-scientifica sia ricca di studi relativi alle problematiche progettuali sopra esposte, allo stato attuale non esiste un unico approccio internazionalmente condiviso per la loro risoluzione. Benché diversi Paesi europei abbiano nel tempo sviluppato proprie metodologie di progetto, in Italia ciò non è avvenuto e i progettisti sono soliti fare riferimento ai documenti messi a punto all'estero. Indipendentemente dalla soluzione tipologica scelta e dalla procedura di progetto impiegata, le pavimen-

tazioni stradali sono destinate ad essere soggette ad un progressivo degrado durante l'esercizio. Di conseguenza, è indispensabile provvedere ad un loro attento monitoraggio allo scopo:

- di individuare eventuali situazioni che possano pregiudicare la sicurezza di utilizzo dell'infrastruttura;
- di progettare gli interventi di manutenzione sulla base dell'individuazione dei fenomeni in atto e delle cause che li hanno indotti.

Il monitoraggio delle condizioni della pavimentazione è inoltre il presupposto indispensabile per potere gestire la sua manutenzione in maniera programmata. Ciò richiede l'utilizzo di modelli che consentano di effettuare una previsione delle future condizioni della pavimentazione e di allocare, di conseguenza, le risorse economiche nel modo più efficiente possibile.
Secondo quanto documentato dalla letteratura tecnico-scientifica del settore, il monitoraggio delle pavimentazioni stradali comprende le seguenti attività di osservazione e rilievo:

- valutazione delle condizioni di dissesto superficiale;
- valutazione del comportamento sotto carico della pavimentazione (comportamento strutturale);
- valutazione delle caratteristiche di regolarità e di aderenza superficiale della pavimentazione (comportamento funzionale).

Per ciascuna delle attività sopra elencate sono disponibili procedure e strumenti il cui impiego è stato validato internazionalmente e nella maggior parte dei casi codificato all'interno di documenti di riferimento.
Le condizioni di dissesto superficiale (o di ammaloramento) delle pavimentazioni stradali vengono di norma descritte facendo riferimento a cataloghi che individuano un certo numero di dissesti caratteristici associando a ciascuno di essi, mediante specifiche modalità di misura, vari gradi di severità. Da tali dati si possono quindi derivare parametri che descrivono in maniera oggettiva e sintetica lo stato di dissesto.
Per quel che riguarda la valutazione del comportamento strutturale della pavimentazione, la consuetudine oramai diffusa è di fare ricorso a prove non distruttive di carico su piastra mediante l'applicazione di sollecitazioni impulsive che simulano il passaggio dei veicoli. L'attrezzatura che viene utilizzata a tale scopo è il cosiddetto Falling Weight Deflectometer (FWD), che consente di rilevare gli spostamenti verticali della superficie della pavimentazione sotto carico in modo da ricostruire il cosiddetto "bacino di deflessione".

Tali dati possono essere quindi soggetti a varie procedure di elaborazione tra le quali assume particolare importanza il calcolo delle caratteristiche meccaniche dei vari strati componenti la pavimentazione. Si noti che per potere procedere con questo tipo di elaborazione è necessario conoscere con precisione la stratigrafia della pavimentazione. Essa può essere desunta, a seconda dei casi e del grado di precisione richiesto, dai dati progettuali, da campioni prelevati mediante carotaggio dalla pavimentazione o da rilievi non distruttivi effettuati con attrezzatura Georadar (GPR, Ground Penetrating Radar). Quest'ultima è basata sull'impiego di onde radar incidenti che vengono parzialmente riflesse dalle interfacce presenti all'interno delle pavimentazioni e che consentono di determinare, nota la velocità di propagazione caratteristica di ogni singolo materiale costituente, la stratigrafia effettiva. Sebbene la tecnica di rilievo con attrezzatura Georadar sia in costante evoluzione, allo stato attuale è indispensabile integrare le misure con il prelievo di carote dalla pavimentazione per potere procedere alla calibrazione dei segnali e dedurre, di conseguenza, una stratigrafia effettivamente aderente a quella reale.

Come detto, il rilievo delle caratteristiche funzionali delle pavimentazioni viene effettuato facendo riferimento alla regolarità superficiale ed all'aderenza disponibile all'interfaccia pneumatico-pavimentazione.

Le misure di regolarità possono essere eseguite, a seconda dei casi, mediante attrezzature che rilevano il profilo della pavimentazione lungo determinati allineamenti, o mediante l'impiego di veicoli strumentati che registrano la risposta dinamica di alcune loro parti durante il transito sull'infrastruttura.

Le misure di aderenza possono essere eseguite con attrezzature che si differenziano tra loro a seconda delle condizioni di interazione che vengono imposte al contatto pneumatico-pavimentazione. In ogni caso è opportuno che l'aderenza venga valutata nelle condizioni più sfavorevoli possibili, ossia in presenza di un velo idrico sulla superficie della pavimentazione.

2.4 Monitoraggio e analisi delle emissioni durante la produzione e messa in opera delle pavimentazioni flessibili

Quando si riscalda un conglomerato bituminoso si verifica la produzione di fumi, costituiti in parte da vapori e in parte da particolato aeriforme. Tali fumi, a parità di altre condizioni, sono tanto più abbondanti quanto più è alta la temperatura e, tipicamente, l'esposizione ad essi può provocare agli operatori una irritazione degli occhi e delle prime vie respiratorie. Nei cantieri stradali è quindi opportuno garantire le migliori condizioni di lavoro limitando il più possibile l'esposizione ai fumi di bitume.
Attualmente la ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) prevede per i fumi di bitume un valore del limite di esposizione di 0,5 mg/m^3 (8 h/giorno, 5 giorni/sett) , misurato come frazione solubile in Benzene di quella parte dei fumi che si presenta sotto forma di aerosol "inalabile". Inoltre il NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), considerando il fenomeno di produzione dei fumi da conglomerato bituminoso, consiglia di non superare durante la messa in opera della pavimentazione la temperatura di 160 °C. Oltre alla temperatura vi sono tuttavia altri fattori che possono influenzare la severità di esposizione del lavoratore ai fumi quali il tipo di applicazione, il tipo di bitume, le condizione meteorologiche, il tipo di lavoro (mansione) e la sua durata.
Il monitoraggio delle emissioni bituminose può essere effettuato allo scopo di ottenere una stima realistica dell'esposizione del lavoratore oppure, in alternativa, per ricavare una stima cautelativa (in eccesso) dell'esposizione stessa.
Nel primo caso la durata del campionamento coincide con un comune giorno lavorativo (8 h) per una

settimana lavorativa (40 h); nel secondo caso, invece, si individuano nel turno di lavoro gli intervalli di tempo in cui l'operatore è maggiormente esposto ai fumi e su quella base si realizzano i campionamenti. Il campionamento vero e proprio viene effettuato mediante un campionatore personale ubicato il più vicino possibile alla zona di respirazione del lavoratore da monitorare e l'aria viene quindi pompata attraverso il filtro con portata costante per un periodo determinato. Tra le sostanze particolarmente critiche per la salute dei lavoratori, oltre al particolato totale, vi sono i composti organici volatili (COV) e gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

L’impiego del polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali

Il polverino da PFU può essere incluso all'interno dei conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali ricorrendo a due diverse tecnologie di produzione:

- la tecnologia "wet", mediante la quale il polverino viene disperso all'interno del bitume, modificandone le caratteristiche viscoelastiche;
- la tecnologia "dry", nella quale il polverino sostituisce una parte degli aggregati lapidei, modificando le caratteristiche del risultante scheletro litico e dando luogo ad una limitata interazione con il legante bituminoso.

In entrambi i casi le proprietà del prodotto composito (legante o conglomerato) sono fortemente dipendenti, oltre che dal dosaggio di polverino impiegato, anche dalle sue caratteristiche fisico-chimiche, estremamente variabili in funzione del particolare processo di trattamento cui sono sottoposti i PFU. Quest'ultimo si compone di varie fasi di lavorazione nel corso delle quali la gomma viene separata dagli altri materiali presenti (fibre tessili ed elementi metallici) e meccanicamente ridotta in forma granulare fino alla pezzatura desiderata. Qualora le operazioni di lacerazione, taglio ed abrasione avvengano a temperatura di poco superiore a quella ambiente, il processo viene denominato "ambient size reduction". Nei casi in cui, invece, per la riduzione di pezzatura i PFU vengono portati, con idonei impianti, ad una temperatura inferiore a quella di transizione vetrosa, il processo viene indicato come "criogenico". Si deve comunque rilevare che sono continuamente allo studio nuove tecnologie di trattamento in grado di ottimizzare l'efficienza degli impianti. Si cita tra questi il caso della riduzione mediante processo "high pressure waterjet", basato sull'impiego di getti d'acqua ad elevatissima pressione (circa 3.000 bar) in grado di polverizzare i PFU nella misura richiesta. Una volta conferiti all'impianto di trattamento, gli pneumatici (se da autocarro) vengono dapprima sottoposti alla cosiddetta stallonatura, con rimozione degli anelli metallici che supportano il tallone. I PFU

vengono quindi avviati alla triturazione, frequentemente eseguita in due fasi, che li riduce in brandelli irregolari aventi dimensione massima dell'ordine dei 15-30 cm. Seguono quindi le fasi di granulazione, che produce frammenti uniformi di forma cubica e di dimensioni variabili a seconda del tipo di attrezzatura impiegata, e di separazione magnetica dei residui ferrosi. I prodotti così ottenuti vengono poi sottoposti a macinazione e successivo frazionamento granulometrico mediante setacciatura, con la produzione di polverini compresi entro le dimensioni minime e massime desiderate.

Si segnala infine che le caratteristiche del polverino da PFU risultano dipendenti, oltre che dal tipo di processo di trattamento, anche dalla natura della gomma soggetta a lavorazione. Quest'ultima può infatti variare a seconda delle specifiche mescole impiegate dai produttori e della iniziale destinazione d'uso degli pneumatici. A tal proposito si rileva infatti che negli pneumatici per automezzi pesanti viene generalmente impiegata una percentuale di gomma naturale superiore a quella relativa agli pneumatici per veicoli leggeri.

3.1 Tecnologia “wet”

Nel caso della tecnologia “wet”, la dispersione delle particelle di polverino all’interno del bitume avviene, ad una temperatura di 175-225°C, mediante accurata miscelazione meccanica. A seconda del tipo e dosaggio di polverino impiegato, nonché delle modalità di stoccaggio del prodotto risultante, i leganti bituminosi prodotti con tale tecnologia possono essere distinti in due categorie, cui corrispondono tipici ambiti di impiego differenti:

- leganti ad alta viscosità (“asphalt rubber”);
- leganti a più bassa viscosità (“terminal blend”).

I leganti del tipo “asphalt rubber” immediatamente dopo la miscelazione vengono mantenuti in agitazione ad elevata temperatura (150-215°C) per un periodo di tempo, dell’ordine dei 45-60 minuti, necessario affinché possano verificarsi i fenomeni di interazione tra i due materiali componenti. In particolare, in questa fase della produzione le particelle di polverino tendono ad assorbire una parte delle frazioni aromatiche del bitume, dando luogo ad un sensibile rigonfiamento ed alla contestuale formazione di un gel che conferisce al legante le sue peculiari caratteristiche chimico-fisiche. Ne risulta un materiale composito nel quale le singole particelle di polverino mantengono la loro integrità e sono distinguibili, anche visivamente, dalla matrice nella quale sono incluse.

Tali leganti vengono denominati “ad alta viscosità” in quanto ad una data temperatura di riferimento (pari a 175°C secondo quanto indicato nelle norme ASTM) posseggono una viscosità non inferiore a 1500 cP. Essi generalmente contengono una percentuale di polverino, espressa in peso rispetto al peso del legante complessivo, pari ad almeno il 15% (con valori tipici compresi tra il 18 ed il 22%). Lo

stoccaggio di tali prodotti deve avvenire in serbatoi dotati di idonei sistemi di agitazione allo scopo di garantire una omogenea e stabile dispersione delle particelle di polverino.
Le caratteristiche del legante risultante dal processo di modifica risultano dipendenti, oltre che dalla costituzione chimica dei due materiali componenti, dal dosaggio di polverino nonché dalla dimensione e morfologia delle sue particelle. L'entità dei su citati processi di interazione con il bitume tende a crescere con il crescere del dosaggio e della superficie specifica del polverino. In tal senso, risultano più reattivi i polverini di pezzatura più fine costituiti da particelle rugose e di forma irregolare.

Tali fattori debbono essere tenuti in considerazione per la selezione del polverino da impiegarsi nel processo di modifica "wet". Tuttavia, mentre le norme tecniche adottate da alcuni Departments of Transportation (DoT) statunitensi fissano dei criteri di accettazione basati sulla loro composizione e granulometria, la Norma ASTM D6114 si limita a imporre un valore soglia alla massima dimensione delle particelle (< 2,36 mm), segnalando tuttavia che la granulometria del polverino deve essere concordata tra il produttore del legante e l'acquirente. Tale Norma fissa inoltre dei limiti relativi alla densità (pari a 1,15 ± 0,05), al contenuto d'acqua (≤ 0,75%) ed al contenuto di fibre tessili (≤ 0,5%) e di metalli ferrosi residui (≤ 0,01%).

Tabella I. Caratteristiche fisiche del legante "asphalt rubber" (Norma ASTM D6114).

Denominazione legante	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Viscosità apparente a 175°C (cP)	1500÷5000	1500÷5000	1500÷5000
Penetrazione a 25°C (dmm)	25÷75	25÷75	50÷100
Penetrazione a 4°C (dmm)	≥ 10	≥ 15	≥ 25
Punto di rammollimento (°C)	≥ 57,2	≥ 54,4	≥ 51,7
Recupero elastico (%)	≥ 25	≥ 20	≥ 10
Punto di infiammabilità (°C)	≥ 232,2	≥ 232,2	≥ 232,2
Penetrazione residua a 4°C dopo invecchiamento con RTFOT (%)	≥ 75	≥ 75	≥ 75

Anche per quel che riguarda le caratteristiche fisiche e reologiche del legante “asphalt rubber”, esistono in letteratura specifiche tecniche caratterizzate da un differente grado di complessità a seconda delle esperienze dalle quali sono scaturite. A titolo di esempio viene comunque riportato, in Tabella I, il quadro di classificazione proposto nella su citata Norma ASTM D6114, di facile applicabilità in quanto basata sull’impiego delle più semplici e tradizionali prove di caratterizzazione empirica.
I leganti denominati “terminal blends” non raggiungono il su citato valore di soglia di viscosità. Ciò in ragione del fatto che vengono impiegati polverini più fini (solitamente passanti allo staccio da 0,3 mm) e con un dosaggio inferiore (in genere non superiore al 10%). Per effetto della elevata superficie specifica del polverino, la sua interazione con il bitume avviene piuttosto rapidamente durante la miscelazione, con la conseguente creazione di una matrice macroscopicamente omogenea nella quale non sono più distinguibili le particelle originarie. Non essendovi problemi di stabilità, il prodotto finito può essere fatto ricircolare all’interno dei normali serbatoi di stoccaggio presenti negli impianti di produzione dei conglomerati bituminosi, senza la necessità di predisporre particolari dispositivi di agitazione.
Poiché la produzione di tali leganti avviene di norma presso le raffinerie, essi vengono solitamente denominati “terminal blends”. Tuttavia, con gli opportuni accorgimenti tecnici essi possono essere anche preparati direttamente presso gli impianti di produzione dei conglomerati bituminosi (si parla in questo caso di “field blends”).
Le caratteristiche dei bitumi modificati prodotti con entrambe le varianti di tecnologia “wet” possono mutare in maniera significativa a seconda del tipo e dosaggio di polverino, nonché delle temperature e modalità con le quali si effettua la miscelazione. In alcuni casi, durante la produzione possono essere inoltre aggiunti altri componenti, quali oli aromatici e gomma naturale, per conferire al prodotto finito particolari caratteristiche fisico-chimiche.
I leganti di tipo “asphalt rubber” o di tipo “terminal blend” possono essere utilizzati per la produzione

di conglomerati bituminosi seguendo in impianto le stesse procedure previste per le miscele di tipo tradizionale. Gli unici accorgimenti necessari sono relativi alla temperatura di pompaggio dei prodotti, che deve essere necessariamente più elevata in ragione della loro viscosità.
Per quel che riguarda la formulazione delle miscele, le esperienze accumulate negli Stati Uniti a partire dagli anni '70 hanno dimostrato che è opportuno fare riferimento a diverse tipologie di conglomerato bituminoso in rapporto al tipo di legante impiegato. I leganti "asphalt rubber" debbono essere destinati alla formazione di conglomerati bituminosi in cui la curva granulometrica degli aggregati sia caratterizzata da una certa discontinuità, necessaria per poter creare una porosità interna che sia sufficiente per accogliere le particelle di polverino. È questo il caso delle miscele di tipo "gap-graded" e "open-graded", il cui uso negli strati di usura è stato ampiamente sperimentato tanto nell'ambito della costruzione di nuove infrastrutture quanto nella manutenzione e riqualificazione di quelle in esercizio. In alcuni casi è stata inoltre impiegata la combinazione delle due miscele, con la posa in opera del conglomerato "open-graded" al di sopra di uno strato di collegamento di tipo "gap-graded".
I prodotti che ricadono invece nella categoria dei "terminal blends" possono essere utilizzati nella preparazione di miscele chiuse a granulometria continua, del tutto simili a quelle di tipo ordinario. Le più frequenti applicazioni riguardano comunque gli strati di usura ai quali sono richieste caratteristiche di durabilità particolarmente elevate.

3.1.1 Conglomerati bituminosi contenenti “asphalt rubber”

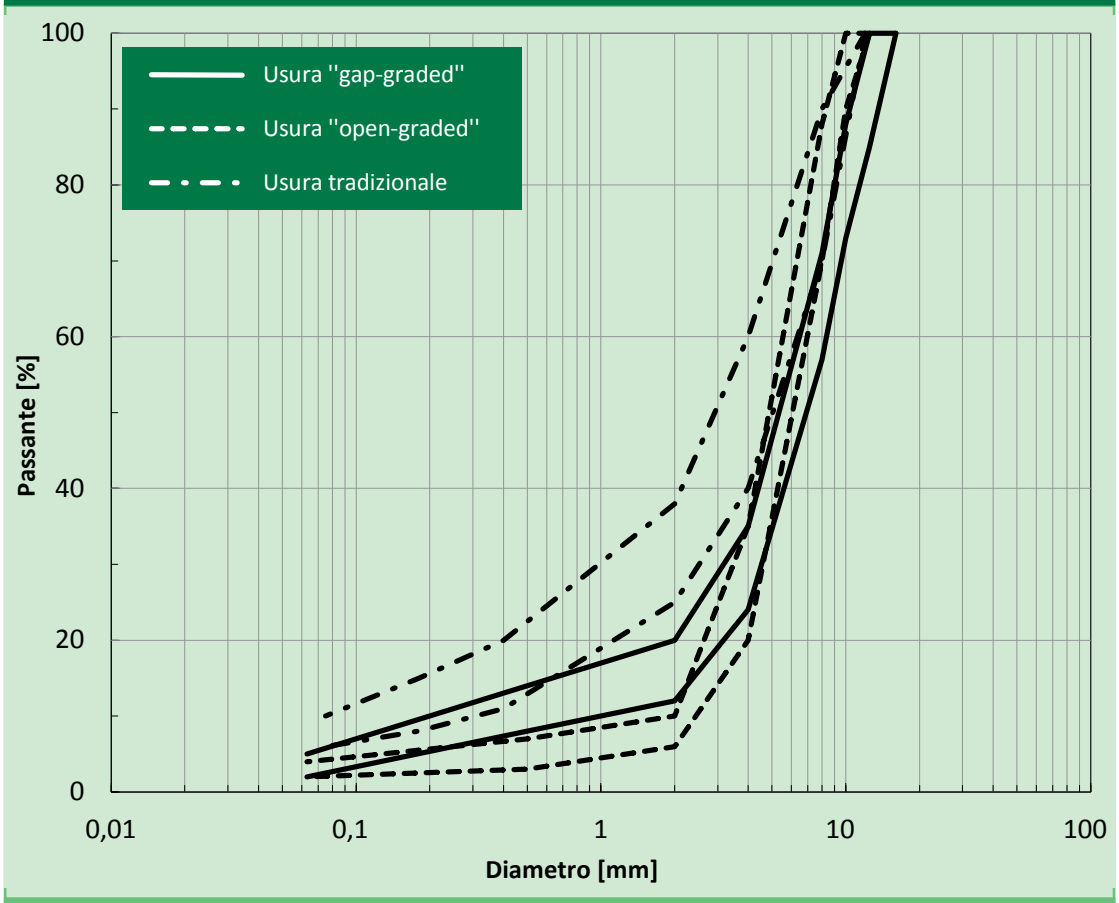
I conglomerati bituminosi “gap-graded” e “open-graded” rientrano rispettivamente nella categoria delle miscele di tipo “semi-chiuso” (con vuoti residui in opera dell’ordine del 5-8%) e “semi-aperto” (con vuoti dell’ordine del 12-18%). Grazie alla discontinuità della distribuzione granulometrica degli aggregati, entrambi sono caratterizzati da una rilevante macro-tessitura superficiale che conduce ad elevati valori dell’aderenza disponibile all’interfaccia pneumatico-pavimentazione anche in presenza di precipitazioni meteoriche. Mentre i conglomerati “gap-graded” sono di fatto impermeabili all’acqua, quelli “open-graded” presentano una porosità interna di morfologia ed entità tale da consentire alle acque meteoriche di filtrare attraverso di essi, producendo un ulteriore innalzamento dell’aderenza in ragione della creazione di un contatto asciutto in tutte le condizioni ambientali. A tale effetto, come nel caso delle tradizionali miscele “drenanti” (aperte), si accompagnano inoltre alcuni vantaggi connessi con l’eliminazione degli effetti “splash” e “spray”, fonti di potenziale pericolo per la sicurezza degli utenti della strada.

La su citata discontinuità della curva granulometrica, oltre ai positivi riflessi sulle caratteristiche superficiali, ha anche degli effetti sulla struttura interna di entrambe le tipologie di miscela. Gli aggregati di più grandi dimensioni creano infatti, nel caso in cui posseggano adeguate caratteristiche di forma, uno scheletro litico che irrigidisce la miscela e che si oppone efficacemente all'accumulo di deformazioni permanenti sotto carico. La matrice litica portante viene quindi riempita in parte con le frazioni più fini ed in parte con il legante bituminoso, per il quale vengono adottati dosaggi significativamente più elevati rispetto a quelli normalmente adottati per miscele di tipo ordinario. Ciò determina un incremento della duttilità di tali conglomerati bituminosi che presentano, rispetto a quelli tradizionali, una più elevata resistenza a fatica e alla propagazione delle fessure. Si noti inoltre che grazie alla elevata viscosità del legante non si determinano, pur con l'impiego di elevati dosaggi, problemi di "drain-off" durante la produzione ed il trasporto né si verificano fenomeni di rifluimento superficiale durante la messa in opera ed in fase di esercizio.

La presenza di elevati quantitativi di legante in queste miscele ha ulteriori effetti benefici per ciò che riguarda la resistenza ai fenomeni di invecchiamento termo-ossidativo, la durabilità all'acqua e la generazione di rumore di rotolamento da parte degli pneumatici. In relazione ai primi due aspetti, si rileva infatti che gli agenti aggressivi esterni (aria ed acqua) riescono a penetrare solo in una modesta porzione superficiale dell'ingente volume di legante che conserva pertanto nel tempo gran parte delle proprie caratteristiche originarie svolgendo anche la funzione di barriera per l'accesso alle superfici degli aggregati lapidei. La riduzione del rumore di rotolamento è invece ascrivibile al particolare comportamento della matrice bituminosa legante che in ragione delle proprie caratteristiche reologiche e dell'elevato volume occupato determina una attenuazione delle vibrazioni che possono nascere all'interfaccia pneumatico-pavimentazione. Si noti a

tal proposito che nel caso di conglomerati bituminosi "open-graded" si possono sommare a questi effetti quelli dovuti alla porosità superficiale che fornisce un ulteriore contributo all'attenuazione del rumore attraverso i ben noti fenomeni di assorbimento acustico.
Le specifiche tecniche adottate per sviluppare il processo di mix design di tali miscele e per poter governare le loro procedure di controllo ed accettazione in corso d'opera fanno riferimento a fusi granulometrici degli aggregati e intervalli ammissibili della percentuale di legante caratteristici. Poiché tali specifiche sono state progressivamente affinate dai vari Enti sulla base delle loro esperienze, esse non sono univoche, anche in considerazione della diversa disponibilità locale di aggregati lapidei. A titolo di esempio, in Figura 1 vengono riportati alcuni tipici fusi di accettazione relativi alle miscele "gap-graded" e "open-graded", messi a confronto con quello normalmente impiegato in Italia per i conglomerati bituminosi chiusi per strati di usura. Per quel che riguarda la percentuale di legante, sono generalmente ammessi valori del 7-9% per miscele "gap-graded" e del 8,5-10% per miscele "open-graded" (a fronte di contenuti di legante nelle miscele tradizionali dell'ordine del 5-6%).

Figura 1. Tipici fusi granulometrici per conglomerati bituminosi per strati di usura ("gap-graded", "open-graded" e tradizionale).



Secondo quanto riportato in letteratura, l'individuazione della formula di impasto ottimale può essere effettuata facendo riferimento alle caratteristiche volumetriche di campioni preparati in laboratorio mediante opportune apparecchiature (Marshall, Hveem, pressa giratoria). In particolare, vengono generalmente prese in considerazione la percentuale dei vuoti residui, per la quale viene fissato un valore obiettivo, e la percentuale dei vuoti nella miscela degli aggregati (VMA), per la quale viene spesso indicato un minimo valore ammissibile. In taluni casi viene inoltre verificata la compatibilità con vincoli di accettazione relativi alle caratteristiche meccaniche delle miscele, solitamente misurate con tecniche piuttosto semplici (stabilità Marshall, stabilità Hveem, trazione indiretta).

La posa in opera delle miscele contenenti "asphalt rubber" avviene con le medesime attrezzature impiegate per i consueti lavori stradali. A compattazione ultimata l'accettazione della miscela così come posta in opera può essere effettuata prelevando carote dalla pavimentazione e facendo riferimento alle medesime grandezze volumetriche utilizzate per sviluppare lo studio di mix design. Vengono inoltre generalmente eseguiti anche controlli per ciò che attiene alle caratteristiche superficiali, valutate in termini di tessitura ed aderenza. Laddove previsto, vengono infine eseguite indagini relative al comportamento acustico della superficie della pavimentazione.

La grande varietà di prescrizioni rinvenibili nelle diverse Norme Tecniche indica in maniera inequivocabile che le conoscenze relative a questi specifici conglomerati bituminosi non hanno ancora raggiunto un livello tale da consentire la definizione di un unico quadro di riferimento. Ciò determina la necessità per i progettisti di definire, per ogni nuovo contesto in cui tali miscele vengono sperimentate, Norme Tecniche ad hoc, ineluttabilmente destinate ad essere soggette a miglioramenti ed integrazioni in funzione di quanto successivamente rilevato in esercizio. La convergenza verso specifiche più ampiamente condivise è tuttavia auspicabile e verosimilmente si potrà attuare nel prossimo futuro introducendo elementi di valutazione di carattere prestazionale fondati sull'impiego delle più moderne prove di laboratorio.
Le effettive prestazioni in opera delle miscele contenenti "asphalt rubber" sono state l'oggetto di una attenta valutazione da parte degli Enti che le hanno adottate nell'ambito di interventi di costruzione e manutenzione. In particolare, molte informazioni sono state raccolte da numerosi Departments of Transportation (DoT) statunitensi e dagli Enti di gestione delle infrastrutture dei paesi europei che da più tempo hanno creduto in questa tecnologia.
In linea del tutto generale si può notare come nel corso del tempo via sia stato un complessivo incremento delle prestazioni rilevate, verosimilmente in ragione del progressivo affinamento delle specifiche tecniche e dell'adozione di più corrette pratiche operative. Facendo riferimento quindi ai rilievi più

recenti si può concludere che le prestazioni di tali conglomerati bituminosi sono del tutto coerenti con quanto illustrato in precedenza circa la loro composizione e le specifiche funzioni assegnate alle fasi costituenti. In particolare, le specifiche caratteristiche che hanno trovato riscontro in esercizio, e che risultano di interesse tanto per i gestori delle infrastrutture quanto per gli utenti della strada, risultano le seguenti:

- elevata resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti, con conseguente riduzione del tasso di ormaiamento;
- elevata resistenza a fatica e alla propagazione delle fessure;
- elevata resistenza all'invecchiamento termo-ossidativo;
- elevata durabilità all'acqua;
- elevata aderenza disponibile all'interfaccia pneumatico-pavimentazione, anche in presenza di condizioni meteorologiche sfavorevoli;
- sensibile riduzione del rumore di rotolamento.

Per effetto delle vantaggiose proprietà sopra elencate, le miscele contenenti "asphalt rubber" sono state adottate, in taluni contesti, come le soluzioni di maggiore efficacia per gli interventi di manutenzione e di riqualificazione delle pavimentazioni già in esercizio. A tal proposito, occorre sottolineare che i maggiori costi di produzione delle miscele risultano ampiamente compensate dalla riduzione dei successivi oneri di manutenzione, con una conseguente diminuzione del costo totale se valutato lungo l'intero ciclo di vita della pavimentazione. Tali vantaggi risultano particolarmente marcati in tutti quei casi in cui vi è una adeguata diffusione della tecnologia di produzione, con la conseguente creazione di un vero e proprio mercato del legante "asphalt rubber" nel quale possano essere contenuti i costi di trasporto e si definiscano prezzi unitari in un'ottica di competizione commerciale.

Ulteriori considerazioni legate al costo degli interventi con "asphalt rubber" discendono da valutazioni che possono essere fatte con riferimento agli spessori dei conglomerati da porre in opera. Per effetto delle loro elevate prestazioni meccaniche e della loro elevata durabilità si è infatti stimato che possano garantire prestazioni analoghe a quelle di miscele di tipo tradizionale pur impiegando spessori più contenuti. Questo specifico aspetto in alcuni casi è stato addirittura codificato con leggi di equivalenza, che tuttavia debbono essere opportunamente calibrate per ciascun contesto applicativo per tenere conto degli effetti di tutti i fattori che hanno un'influenza sui fenomeni di danneggiamento.

3.1.2 Conglomerati bituminosi contenenti “terminal blends”

Le miscele bituminose contenenti “terminal blends” sono caratterizzati da una distribuzione granulometrica continua degli aggregati e rientrano pertanto nella categoria dei conglomerati bituminosi di tipo “chiuso” (con vuoti residui in opera dell’ordine del 4%). Essi presentano un comportamento meccanico che si discosta da quello delle miscele di tipo tradizionale in una misura che dipende dal grado di modifica apportato al legante durante il processo di produzione. In particolare, per effetto della variazione delle caratteristiche reologiche del legante stesso si rileva un aumento delle componenti di risposta elastica sotto carico, con conseguente miglioramento della resistenza all’accumulo di deformazioni permanenti ed a fatica.

Per ciò che attiene alla formulazione, produzione, messa in opera e controllo si può fare ricorso alle procedure già validate per le miscele chiuse di tipo tradizionale, tenendo unicamente conto delle più elevate temperature richieste nelle fasi di miscelazione e compattazione. In termini del tutto generali si può pertanto concludere che qualora siano correttamente proporzionati e addensati, tali conglomerati bituminosi presentano caratteristiche tali da potere essere impiegati nella costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali in affiancamento o in sostituzione di quelli di tipo ordinario.

Le prestazioni rilevate sul campo sono risultate in linea con le considerazioni su esposte, con una riduzione, rispetto al caso delle miscele di tipo tradizionale, dei fenomeni di fessurazione superficiale e di ormaiamento. Si è inoltre appurato che il costo aggiuntivo derivante dal processo di modifica del legante risulta ampiamente compensato dai minori oneri di manutenzione che intervengono nel corso della vita utile delle pavimentazioni.

3.2 Tecnologia “dry”

Nel caso della tecnologia “dry”, il polverino da PFU viene aggiunto presso l’impianto di produzione del conglomerato bituminoso come componente addizionale della miscela. Non essendo prevista alcuna miscelazione preventiva con il bitume, vengono impiegati opportuni dosatori che introducono il polverino direttamente nella camera di miscelazione, avendo cura di indurre una dispersione sufficientemente omogenea all’interno della massa degli aggregati. Ciò costituisce un aspetto particolarmente critico in quanto il polverino presenta una densità significativamente inferiore a quella degli aggregati (1,15 g/cm^3 anziché circa 2,65 g/cm^3), con la conseguente possibilità di dare luogo a fenomeni di segregazione. Il bitume, che viene quindi aggiunto nel dosaggio desiderato, ricopre e lega entrambi i tipi di particelle (lapidee e di gomma), dando altresì luogo ad una debole interazione superficiale con i granuli di polverino.

Il polverino viene solitamente impiegato con dosaggi compresi tra l'1 ed il 3% rispetto al peso complessivo degli aggregati, avendo cura di verificare che la sua distribuzione granulometrica, espressa in termini volumetrici per tenere conto della differente densità delle due tipologie di particelle, sia compatibile con quella della frazione lapidea. Sulla base di quanto riportato in letteratura, possono essere impiegati polverini di differente pezzatura, compresi tra quelli a grana grossa (passanti allo staccio da 6 mm e trattenuti allo staccio da 2,36 mm) e quelli denominati "ultrafini" (passanti allo staccio da 0,3 mm).

A seconda della loro dimensione, le particelle di polverino forniscono quindi un contributo al riempimento dei vuoti oppure conferiscono allo scheletro litico particolari caratteristiche elastiche.
Gli studi documentati in letteratura indicano che con la tecnologia "dry" possono essere prodotte miscele chiuse, semichiuse ("gap-graded") e semi-aperte ("open-graded"). Per la loro formulazione si può fare ricorso ai medesimi fusi granulometrici impiegati per le miscele contenenti legante prodotto con metodo "wet", mentre la percentuale di legante da impiegare deve essere definita tenendo conto del fatto che il polverino tende ad assorbire, anche durante le fasi di trasporto e messa in opera della miscela, una quota parte della frazione aromatica del bitume impiegato.

Nel caso delle miscele chiuse, a granulometria continua, si sono spesso riscontrati fenomeni di sgranamento superficiale proprio a causa dei su citati fenomeni di assorbimento. Per tali miscele le prestazioni migliori, comunque prossime a quelle dei conglomerati bituminosi di tipo ordinario, sono state ottenute impiegando polverini di tipo “ultrafine”.
Nella definizione delle formule di impasto delle miscele “gap-graded” e “open-graded”, ed in particolare per la scelta del dosaggio e tipo di polverino da impiegare, si deve tenere conto del fatto che in esse è presente un considerevole volume di vuoti nella miscela degli aggregati, potenzialmente a disposizione per potere accogliere le particelle di gomma. Tuttavia, l’esperienza accumulata sul campo consiglia di impiegare per entrambe le tipologie di miscele granuli aventi dimensioni non superiori a 2 mm. Nel caso specifico dei conglomerati “open-graded”, l’eventuale presenza di polverino a grana grossa (con dimensioni superiori a 4,75 mm) ha infatti causato rilevanti dissesti nella forma di sgranamenti e fessurazioni.
Malgrado la tecnologia “dry” sia stata sperimentata già a partire dagli anni ’70, i risultati contrastanti ottenuti nelle applicazioni di campo hanno di fatto limitato il suo sviluppo e la sua diffusione. In particolare, non sono state affrontate con adeguato grado di approfondimento tutte quelle problematiche di base legate alla compatibilità tra polverino ed aggregati lapidei che avrebbero consentito un un significativo progresso di questa tecnologia. Parimenti, non sono state codificate né validate le procedure di mix design, caratterizzazione e controllo che risultano indispensabili per potere impiegare tali miscele su vasta scala. Allo stato attuale la produzione di miscele “dry” aventi soddisfacenti prestazioni in opera dipende quindi dalle specifiche competenze acquisite dalle imprese che ne hanno sperimentato l’uso in lavori di modesta entità.

MARINI

Esperienze in Italia riguardanti l'impiego del polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali

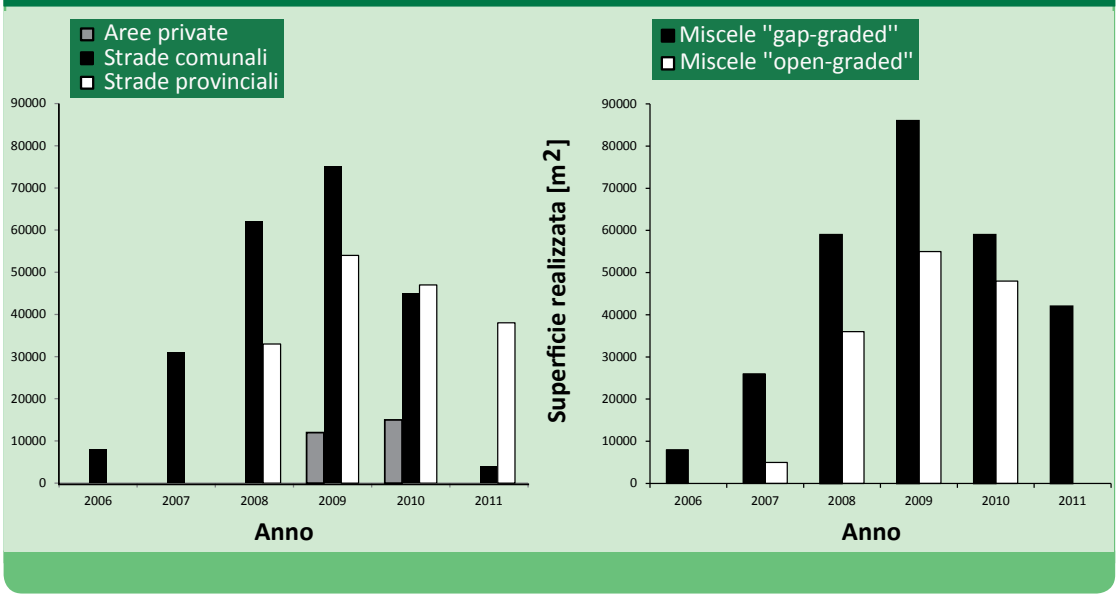
Le attività che in Italia hanno riguardato l'impiego del polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali possono essere ricondotte da una parte agli interventi di manutenzione e costruzione effettuati nell'ambito dei programmi di investimento di alcune pubbliche amministrazioni, e dall'altra agli studi sviluppati in laboratorio e sul campo da istituti di ricerca universitari con la collaborazione di aziende del settore.
Gli interventi di manutenzione e costruzione sono stati effettuati nella quasi totalità dei casi ricorrendo alla tecnologia "wet", divenuta disponibile sul territorio nazionale a partire dal 2006 grazie ad una iniziativa imprenditoriale che ha portato alla realizzazione, in Toscana, di un impianto per la produzione di "asphalt rubber". Tali interventi, che hanno prevalentemente riguardato le pavimentazioni di strade comunali e provinciali, sono consistiti nella messa in opera di miscele per strati di usura (del tipo "gap-graded" e "open-graded") e di collegamento ("gap-graded"), nonché nella realizzazione di interstrati di assorbimento delle sollecitazioni (SAMI, stress-absorbing membrane interlayer). Tuttavia, le Amministrazioni hanno fatto ricorso a queste particolari soluzioni in casi isolati, senza adottarli in maniera diffusa e continuativa per il miglioramento delle prestazioni delle pavimentazioni a livello di rete.

Le applicazioni su scala reale della tecnologia "dry" sono state sporadiche, per lo più di modesta entità e aventi il carattere di sperimentazioni di primo tentativo. I risultati ottenuti, non sempre soddisfacenti per ciò che riguarda la durabilità dei conglomerati bituminosi, hanno inoltre scoraggiato tanto le imprese quanto le amministrazioni ad insistere in questa direzione. Per quel che riguarda le attività di ricerca universitaria, esse si sono focalizzate su vari aspetti inerenti entrambe le tecnologie di impiego del polverino da PFU ("wet" e "dry"). Le ricerche hanno riguardato la caratterizzazione dei materiali, il mix design delle miscele e la valutazione delle prestazioni in opera. Sebbene i risultati ottenuti siano in linea con quelli internazionalmente condivisi dalla comunità scientifica, non sono mancati contributi originali e approfondimenti di particolare rilievo.

4.1 Interventi di manutenzione e costruzione

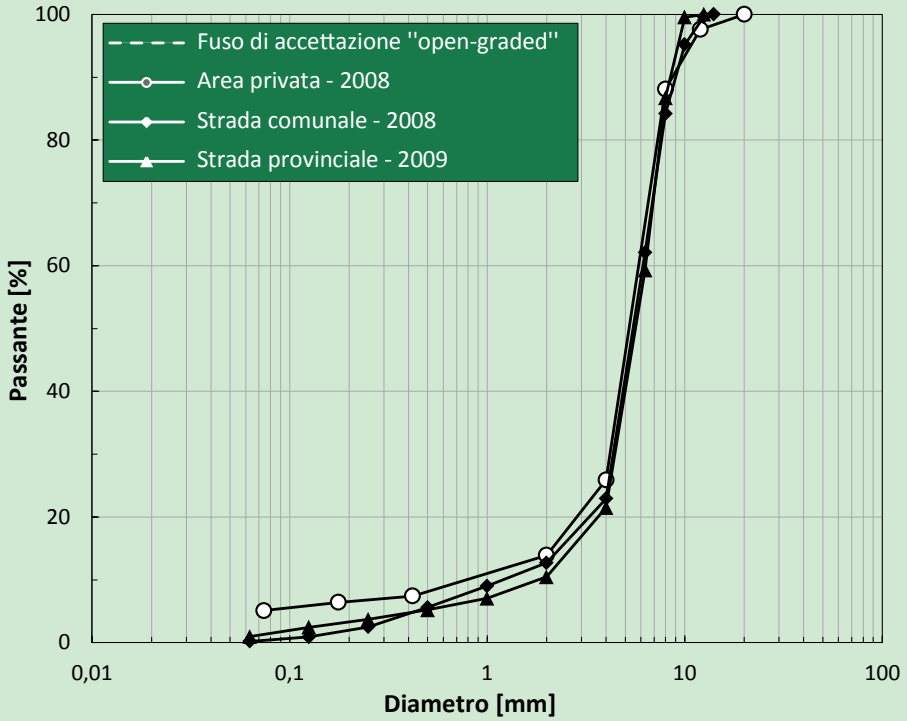
Gli interventi di manutenzione e costruzione realizzati in Italia a partire dal 2006 con tecnologia “wet” sono sinteticamente descritti nei grafici di Figura 2. I lavori sono stati generalmente eseguiti facendo riferimento alle Norme Tecniche messe a punto dall’azienda produttrice del legante, con sperimentazioni preventive e di controllo che sono state nella maggior parte dei casi alquanto limitate.

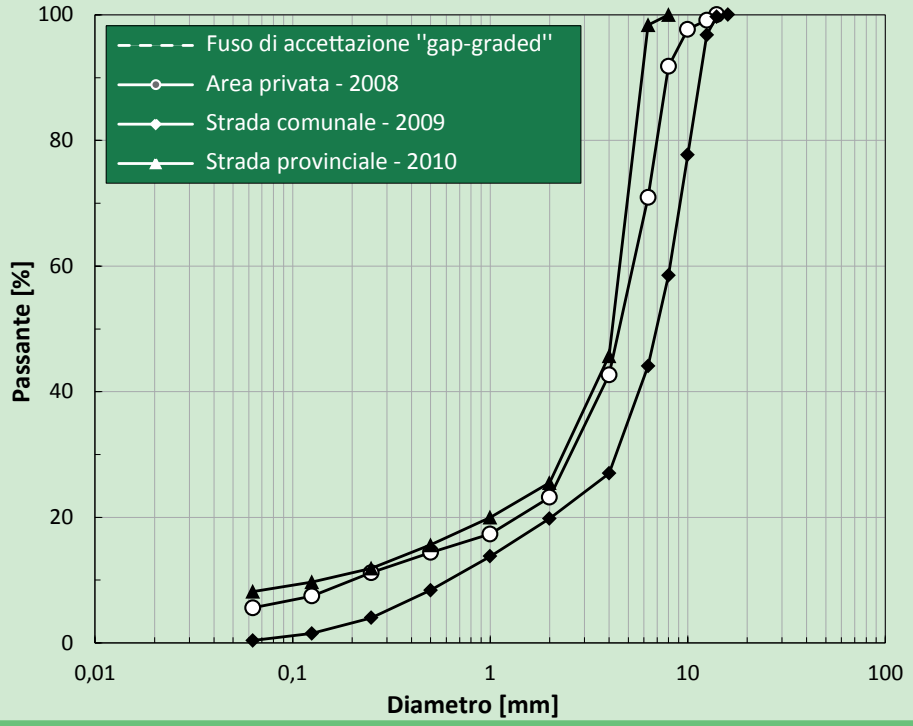
Figura 2. Interventi di costruzione e manutenzione realizzati in Italia con tecnologia “wet”.



Nella Figura 3 sono riportate, a titolo di esempio, le curve granulometriche degli aggregati definite nella fase di mix design di alcune tra le miscele poste in opera. Per entrambe le tipologie (“gap-graded” e “open-graded”) risulta evidente il tipico andamento discontinuo, necessario per poter impiegare un elevato quantitativo di legante. Nel caso delle miscele “gap-graded” si nota inoltre che a seconda degli aggregati impiegati, certamente diversi in ragione della differente ubicazione delle infrastrutture, si sono riscontrate percentuali di filler estremamente variabili, comprese tra lo 0 e l’8%. Tale osservazione consente di mettere in luce un aspetto che risulta ancora controverso: le varie Norme Tecniche disponibili in letteratura prescrivono infatti, a fronte di un dosaggio di legante del 7-9%, intervalli di accettazione della percentuale di filler molto diversi tra loro (0-2,5% per il DoT dell’Arizona, 2-7% per il DoT della California). A seconda della prescrizione adottata si possono così realizzare ed accettare mastici bituminosi con

Figura 3. Distribuzioni granulometriche di progetto per alcuni interventi di manutenzione e/o costruzione.





un rapporto filler-bitume estremamente variabile e che pertanto presentano sotto carico un comportamento reologico molto differente. È questo il caso delle miscele cui fanno riferimento i dati di Figura 3, per le quali, a fronte di un dosaggio di legante compreso nell'intervallo 8-8,7%, si sono rilevati valori del rapporto filler-legante variabili tra 0,01 e 1.

Tabella II. Vincoli di accettazione delle miscele suggeriti dal fornitore italiano di "asphalt rubber".

	Gap-graded	Open-graded
Percentuale dei vuoti Marshall (%)	5-8	12-18
Stabilità Marshall (kN)	> 9	> 6
Rigidezza Marshall (kN/mm)	1,5-3,0	1,5-3,0
Stabilità residua dopo 15 giorni di immersione in acqua (%)	≥ 75	≥ 75

Oltre ad includere verifiche di composizione delle miscele, i controlli in corso d'opera documentati hanno previsto la preparazione di campioni Marshall (75 colpi per faccia) per la successiva valutazione di alcune grandezze volumetriche e meccaniche. I corrispondenti vincoli di accettazione che il fornitore di "asphalt rubber" suggerisce per le due tipologie di miscela, da adottarsi anche in fase di mix design, sono riportati nella Tabella II.

Alla luce della crescente sensibilità che le Amministrazioni locali mostrano nei confronti del problema dell'inquinamento acustico da traffico veicolare, in occasione di alcuni dei su citati lavori di manutenzione il fornitore di "asphalt rubber" ha commissionato a laboratori privati l'esecuzione di rilievi acustici. Ciò allo scopo di quantificare i vantaggi che gli strati di usura del tipo "gap-graded" e "open-graded" presentano rispetto a quelli realizzati con i tradizionali conglomerati bituminosi chiusi.
I rilievi sono stati eseguiti di volta in volta con metodologie differenti, secondo procedure che si discostano da quelle previste dalle relative Norme ISO. Ciononostante, in ambito urbano è stata stimata una riduzione del livello equivalente di pressione sonora dell'ordine dei 3 dBA per strati "open-graded" e di 2 dBA per strati "gap-graded". Si è inoltre verificato che detta riduzione si mantiene nel corso del tempo, con prestazioni acustiche ancora molto valide dopo 3 anni di esercizio. Occorre tuttavia sottolineare che in considerazione delle approssimazioni introdotte nelle tecniche di misura, tali conclusioni non possono essere generalizzate e dovranno essere necessariamente validate nel futuro mediante rilievi effettuati in condizioni standard e attraverso una adeguata modellazione dei dati sperimentali.

4.2 Ricerche universitarie

Con riferimento alla tecnologia “wet”, le ricerche effettuate sotto l’egida di istituzioni universitarie si sono concentrate su diversi aspetti riguardanti la caratterizzazione del legante composito contenente polverino da PFU e delle risultanti miscele bituminose speciali. Inoltre, tramite la predisposizione di tronchi pilota sono stati effettuati studi finalizzati al monitoraggio delle lavorazioni ed alla conseguente valutazione delle prestazioni in opera.
Significativi contributi allo studio delle caratteristiche fisiche e reologiche di leganti prodotti con tecnologia “wet” sono stati forniti dai ricercatori dell’Università di Parma. Nell’ambito di una tesi di Dottorato di Ricerca (I. Antunes, 2006) sono stati presi in esame leganti “asphalt rubber” e “terminal blend” messi a confronto con bitumi modificati con polimeri di sintesi. Sono stati inoltre approfonditi temi specifici di grande rilevanza scientifica quali ad esempio l’influenza sulla viscosità del tempo di miscelazione. In studi di laboratorio successivi, facenti parte di un progetto di Dottorato di Ricerca di carattere più generale (F. Merusi, 2009), sono state quindi applicate a leganti “asphalt rubber” tecniche sperimentali avanzate per la valutazione della resistenza all’accumulo di deformazioni irreversibili, della resistenza a fatica e della resistenza all’azione aggressiva del kerosene. Altre indagini riguardanti i leganti “asphalt rubber” sono state effettuate presso l’Università di Ancona, sede del Centro Interuniversitario di Ricerca Stradale ed Aeroportuale (CIRS), nell’ambito di una convenzione di ricerca stipulata con il produttore italiano. In particolare, attraverso la costruzione di curve maestre delle principali grandezze viscoelastiche sono stati analizzati gli effetti di invecchiamento a breve termine, simulati mediante Rolling Thin Film Oven (RTFO).

Infine, sempre sul tema della caratterizzazione dei leganti “asphalt rubber” un importante apporto è stato fornito dall’Università di Palermo mediante indagini sviluppate sempre nell’ambito di una tesi di Dottorato (D. Lo Presti, 2011) che ha comportato una collaborazione scientifica di primissimo livello con la University of Nottingham. Lo studio, basato su misure reologiche eseguite in regime oscillatorio, ha preso in esame in maniera dettagliata gli effetti dovuti alla temperatura ed al tempo di maturazione dei leganti, pervenendo a conclusioni aventi importanti implicazioni pratiche. A titolo di confronto sono stati inoltre analizzati prodotti “terminal blends” e leganti contenenti, oltre a polverino da PFU, vari agenti modificanti.
Indagini relative alle caratteristiche volumetriche e meccaniche di conglomerati bituminosi ottenuti utilizzando leganti prodotti con tecnologia “wet” sono state effettuate presso i laboratori di numerosi atenei. In particolare, nell’Università di Ancona sono state eseguite indagini riguardanti le caratteristiche tenso-deformative di miscele “gap-graded” e “open-graded” ricorrendo a numerose tecniche sperimentali. Di particolare interesse è risultato lo studio della durabilità all’acqua delle miscele “open-graded”, nonché la costruzione di curve maestre del modulo complesso delle due tipologie di miscela.

Numerose ricerche si sono concentrate sullo studio delle prestazioni acustiche in opera di miscele bituminose per strati di usura contenenti "asphalt rubber". Il gruppo di ricerca dell'Università di Ancona ha affrontato l'argomento mediante la predisposizione di tronchi pilota in ambito urbano che sono stati soggetti ad opportuni monitoraggi. Sono state inoltre effettuate prove complementari di laboratorio per la determinazione della costante di assorbimento acustico mediante tubo ad onde stazionarie.
Gli studi dell'Università di Pisa sono stati effettuati nell'ambito del "Progetto Leopoldo" che ha preso in considerazione pavimentazioni tradizionali e speciali distribuite in tutto il territorio della Regione Toscana. Anche in questo caso le pavimentazioni con strati di usura contenenti legante "asphalt rubber" sono state sottoposte a indagini riguardanti le prestazioni acustiche evidenziando le particolari proprietà di miscele formulate in modo da realizzare una "tessitura superficiale ottimizzata".
Con riferimento alla tecnologia "dry", gli studi effettuati in Italia sono stati principalmente rivolti alla valutazione in laboratorio delle caratteristiche volumetriche e meccaniche delle miscele, seguite da limitate applicazioni sul campo. Il tema della resistenza a fatica è stato affrontato dall'Università di Palermo, ove sono state effettuate, mediante l'esecuzione di prove di flessione su quattro punti, indagini di confronto con miscele standard. Le sperimentazioni eseguite presso l'Università di Roma "La Sapienza" e presso l'Università di Bologna sono state invece incentrate sull'esecuzione di prove di tipo tradizionale e sulla valutazione della potenziale capacità di tali miscele di contribuire in maniera significativa all'attenuazione della propagazione delle vibrazioni da traffico. Ulteriori ricerche sono state portate avanti presso l'Università di Padova, ove miscele del tipo "dry" sono state caratterizzate per quel che riguarda la rigidezza, la resistenza a fatica e la resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti.
Infine, presso l'Università della Basilicata sono state eseguite indagini per l'ottimizzazione delle miscele e per la corrispondente valutazione degli inviluppi di rottura determinati mediante particolari prove triassiali.

4.3 Ricerche del Politecnico di Torino

A partire dal 2008 presso il Politecnico di Torino sono state avviate numerose attività di ricerca finalizzate all'approfondimento di alcune tematiche legate all'impiego della tecnologia "wet". Gli studi, di carattere sperimentale, sono stati sviluppati a supporto di una iniziativa della Provincia di Torino che ha ritenuto opportuno valutare la possibilità di utilizzare in maniera continuativa conglomerati bituminosi contenenti polverino da PFU nell'ambito degli interventi di costruzione e manutenzione delle pavimentazioni della propria rete infrastrutturale.
Le indagini sono state compiute sia in laboratorio sia sul campo con la finalità di implementare localmente la tecnologia "wet" in un'ottica di sostenibilità ambientale, prendendo in considerazione le caratteristiche dei materiali impiegati, le prestazioni attese delle relative pavimentazioni e il potenziale impatto delle lavorazioni sull'ambiente e sulla salute dei lavoratori. Ampio spazio è stato inoltre dedicato ad alcuni aspetti di particolare rilievo scientifico al fine di cogliere appieno le potenzialità della tecnologia e di evidenziarne i punti critici.

Una prima validazione sul campo è stata effettuata mediante la realizzazione, sulla circonvallazione Borgaro-Venaria, di un tronco pilota avente uno sviluppo di circa 1,2 km. La superficie interessata è stata di circa 16.000 m^2 con la posa in opera di uno strato di usura del tipo "gap-graded" avente uno spessore di 3 cm.
Nel seguito vengono sintetizzati i principali risultati ottenuti nel corso delle varie attività sperimentali. Essi riguardano l'analisi di polverini da PFU di varia provenienza, la caratterizzazione reologica di leganti bituminosi e gli studi effettuati a supporto della realizzazione del tronco pilota.

4.3.1 Indagini di laboratorio

Polverini da PFU

In base a quanto rilevato nel corso delle esperienze compiute nei Paesi ove la tecnologia "wet" si è diffusa in maniera estesa, le caratteristiche fisico-chimiche del polverino da PFU hanno un'influenza significativa sulle caratteristiche reologiche del legante composito in cui esso viene incluso. Di conseguenza, una parte delle attività sperimentali sviluppate nell'ambito del progetto di ricerca sono state dedicate alla caratterizzazione di polverini da PFU di varia provenienza, potenzialmente utilizzabili per la modifica di leganti bituminosi.
Prendendo in esame nove campionature di polverino

Figura 4. Distribuzioni granulometriche dei polverini da PFU impiegati nello studio di laboratorio.

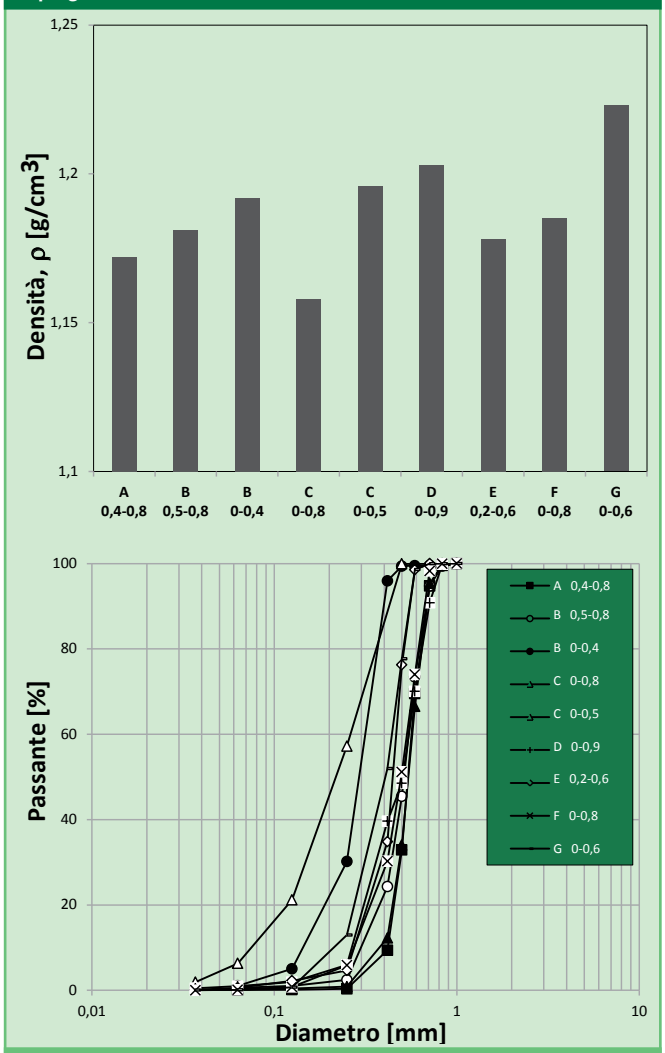


Figura 5. - *Immagini di alcuni polverini da PFU acquisite con stereomicroscopio.*

Polverino A (ingrandimento 2,5X)

Polverino A (ingrandimento 4X)

Polverino B (ingrandimento 2,5X)

Polverino B (ingrandimento 4X)

Polverino C (ingrandimento 2,5X)

Polverino C (ingrandimento 4X)

provenienti da sette differenti stabilimenti produttivi (sei italiani ed uno straniero, quest'ultimo preso in considerazione a scopo comparativo) si è rilevato che, pur partendo da PFU aventi caratteristiche complessivamente analoghe, a seconda del processo di trattamento impiegato si possono ottenere polverini aventi proprietà fisiche e chimiche estremamente variabili, anche quando essi risultano commercialmente classificati in maniera del tutto equivalente.
Alla grande variabilità della distribuzione granulometrica (Figura 4), rilevata mediante setacciatura a secco, sono risultate associate variazioni altrettanto significative della densità (Figura 4), determinata con il metodo del picnometro ed alcool etilico, della morfologia e del grado di pulizia, valutate mediante osservazioni con stereomicroscopio (Figura 5), e della superficie specifica, quantificata sia con le classiche formule empiriche valide per mezzi granulari fini sia mediante l'uso combinato dell'analisi delle immagini e di appositi modelli analitici (Tabella III).

Tabella III. Superficie specifica (m^2/g) dei polverini da PFU impiegati nello studio di laboratorio.

	A 0,4-0,8	B 0,5-0,8	B 0-0,4	C 0-0,8	C 0-0,5	D 0-0,9	E 0,2-0,6	F 0-0,8	G 0-0,6
Da analisi granulometrica	0,0198	0,0228	0,0402	0,0208	0,0606	0,025	0,0268	0,024	0,0282
Da immagini e modelli	0,0126	0,0149	0,0305	0,0137	0,0501	0,0168	0,0160	0,0147	0,0164

Le immagini riportate nella Figura 5 consentono di evidenziare come, a seconda del processo produttivo, vi possa essere una prevalenza di elementi rugosi ed irregolari (casi A e B) oppure di particelle con superficie liscia e regolare (caso C). Si possono altresì individuare, a seconda dei casi, quantitativi più o meno elevati di filamenti tessili o metallici (come nei casi A e B). A tal proposito, si è rilevato che i prodotti con pezzatura più ridotta (diametro massimo dell'ordine dei 0,4-0,5 mm) risultano maggiormente inquinati da tali elementi estranei.
Come si evince dai dati di Tabella III, i valori di superficie specifica associati ai vari prodotti risultano direttamente dipendenti dalla loro pezzatura ed in particolare più elevati nel caso dei polverini più fini. Si osserva inoltre che la superficie specifica varia in maniera significativa a seconda del metodo di valutazione impiegato.
I dati sperimentali relativi alla composizione chimica, riportati nelle Tabelle IV-VII ed espressi in termini di contenuto di carbonio, idrogeno, azoto e zolfo (valutato mediante analizzatore CHNS), contenuto di metalli (determinato mediante spettrometria di emissione al plasma ad accoppiamento induttivo) e di contenuto di sostanze organiche (Composti Organici

Volatili, COV, e Idrocarburi Policiclici Aromatici, IPA, derivati da prove eseguite con gascromatografo - spettrometro di massa), presentano una variabilità del tutto analoga a quella delle caratteristiche fisiche. Per quel che riguarda l'analisi elementale CHNS, i risultati sperimentali ottenuti non mettono in evidenza variazioni significative in funzione della tipologia di polverino (Tabella IV).

Tabella IV. Contenuto di carbonio, idrogeno, azoto e zolfo dei polverini da PFU impiegati nello studio di laboratorio.

		A 0,4-0,8	B 0,5-0,8	B 0-0,4	C 0-0,8	C 0-0,5	D 0-0,9	E 0,2-0,6	F 0-0,8	G 0-0,6
C	%	77,00	78,83	79,22	78,26	76,21	81,89	81,54	78,37	77,05
H	%	7,24	7,16	7,34	7,38	7,00	7,23	7,25	7,03	7,09
N	%	0,52	0,48	0,47	0,49	0,53	0,48	0,39	0,46	0,43
S	%	2,14	1,98	2,02	2,42	2,22	2,33	1,69	2,03	1,96

I metalli presenti con più elevate percentuali risultano in tutti i casi calcio, ferro e zinco (Tabella V); tuttavia, nel caso dei metalli pesanti si può notare come le più elevate concentrazioni siano rilevate per i prodotti più fini, verosimilmente a causa della presenza in questi ultimi di residui di filamenti metallici, cariche minerali e particelle derivanti dall'abrasione delle attrezzature impiegate per la comminuzione dei PFU. Per quel che riguarda i COV, in tutti i casi si rileva una elevata presenza di Benzene (concentrazioni dell'ordine degli 8-33 mg/kg), con valori dei COV totali compresi in un intervallo piuttosto ampio (tra 20,84 e 45,56 mg/kg) (Tabella VI). Si osserva inoltre come i COV si riducano sensibilmente, per uno stesso impianto di lavorazione, al diminuire della dimensione delle particelle costituenti il polverino.

Tabella V. Contenuto di metalli dei polverini da PFU impiegati nello studio di laboratorio.

		A 0,4-0,8	B 0,5-0,8	B 0-0,4	C 0-0,8	C 0-0,5	D 0-0,9	E 0,2-0,6	F 0-0,8	G 0-0,6
Na	mg/kg	216	240	231	214	218	230	198	229	252
K	mg/kg	506	504	586	530	582	559	407	300	357
Ca	%	0,349	0,364	0,546	0,180	0,357	0,345	0,496	0,130	1,12
Mg	mg/kg	444	350	542	397	999	445	1240	246	344
Fe	%	0,153	0,088	0,245	0,169	0,915	0,215	0,223	0,042	0,147
Mn	mg/kg	14,7	10,7	23,9	16,1	59,6	19,6	25,3	5,07	15,8
Ba	mg/kg	13,2	8,87	20,3	10,9	28,3	211	18,7	6,29	121
Al	mg/kg	630	572	779	493	707	800	675	372	653
Cd	mg/kg	4,59	6,30	4,48	5,79	5,64	3,40	2,89	2,17	2,43
Cr	mg/kg	4,73	7,02	6,27	6,69	11,7	5,07	12,3	2,29	3,51
Ni	mg/kg	11,5	10,2	9,13	9,87	13,2	9,22	11,0	3,84	4,54
Pb	mg/kg	66,3	77,7	44,9	73,3	73,5	194	26,6	28,4	28,0
Cu	mg/kg	295	222	472	317	1218	353	80,0	64,3	85,9
Zn	%	2,03	1,94	1,83	2,10	2,26	1,87	1,33	1,16	1,18
Co	mg/kg	330	248	259	347	418	255	179	162	151
Ti	mg/kg	55,5	49,7	67,4	33,6	45,1	56,0	39,6	37,0	65,2
Sb	mg/kg	487	367	379	554	608	388	183	164	151

Come atteso, i contenuti di IPA risultano rilevanti per tutti i prodotti sottoposti a caratterizzazione, con valori totali variabili tra 20,76 e 31,18 mg/kg (Tabella VII). In tutti i casi sono stati inoltre misurati contenuti di Pirene che risultano preponderanti rispetto agli altri composti.

Tabella VI. Contenuto di composti organici volatili (COV) dei polverini da PFU impiegati nello studio di laboratorio (mg/kg).

	A 0,4-0,8	B 0,5-0,8	B 0-0,4	C 0-0,8	C 0-0,5	D 0-0,9	E 0,2-0,6	F 0-0,8	G 0-0,6
Benzene	17,24	33,68	15,63	29,41	15,18	10,10	18,43	16,32	8,94
Toluene	4,04	1,60	1,20	2,68	1,58	0,01	1,68	1,56	1,52
Etilbenzene	1,35	1,78	1,10	1,15	2,06	1,35	2,45	3,70	0,59
Stirene	0,34	0,14	0,11	0,24	0,52	0,05	0,40	0,18	0,11
1,2,4-Trimetilbenzene	4,77	2,84	2,44	1,60	1,65	1,80	4,08	2,78	2,84
1,3,5-Trimetilbenzene	1,35	0,95	1,32	0,61	1,10	1,85	1,58	1,68	1,66
p-Xilene	1,88	1,55	1,04	1,52	1,46	1,24	0,92	1,52	1,16
1,3,5-Triclorobenzene	5,84	3,02	3,64	3,20	1,19	4,43	1,56	4,53	3,44
1,2,4-Triclorobenzene	0,34	<0,001	<0,001	0,33	<0,001	0,31	0,62	0,34	0,58
Totale COV	37,15	45,56	26,48	40,74	24,74	21,14	31,72	32,61	20,84

Tabella VII. Contenuto di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) dei polverini da PFU impiegati nello studio di laboratorio (mg/kg).

	A 0,4-0,8	B 0,5-0,8	B 0-0,4	C 0-0,8	C 0-0,5	D 0-0,9	E 0,2-0,6	F 0-0,8	G 0-0,6
Naftalene	0,30	0,27	0,21	0,42	0,34	0,34	0,53	0,32	0,37
Acenaftilene	0,32	0,35	0,20	0,61	0,51	0,45	0,74	0,46	0,47
1-Bromonaftalene	0,03	0,05	0,05	0,07	0,06	0,06	0,02	0,06	0,05
Acenaftene	0,06	0,06	0,04	0,08	0,06	0,07	0,08	0,06	0,06
Fluorene	0,02	0,16	0,12	0,22	0,21	0,20	0,28	0,19	0,21
Fenantrene	2,80	1,45	1,56	1,90	1,84	1,68	3,36	1,54	2,27
Antracene	1,80	0,47	0,32	0,79	0,38	0,60	0,91	0,61	0,87
Fluorantene	4,08	2,72	3,02	3,14	2,36	3,30	3,13	2,96	3,38
Pirene	13,12	10,02	10,52	11,30	17,20	12,46	16,04	11,29	10,92
Benzo[a] antracene	2,34	1,62	1,52	0,87	0,80	2,34	1,13	1,77	3,02
Crisene	0,51	0,22	0,30	0,12	0,12	0,34	0,16	0,23	0,88
Benzo[a]pirene	0,85	0,85	0,45	0,47	1,22	1,22	0,61	1,02	1,85
Benzo[b] fluorantene	0,94	0,67	0,48	0,31	1,21	0,96	1,43	0,76	1,56
Dibenzo[a,h] antracene	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Indeno[1,2,3-cd] pirene	0,33	0,19	0,15	0,10	0,20	1,12	0,14	0,10	0,19
Benzo[g,h,i] perilene	3,68	3,11	1,82	1,35	0,84	3,62	2,04	3,54	4,56
Totale IPA	31,18	22,21	20,76	21,75	27,35	27,76	30,60	24,91	30,66

Per quanto detto, è verosimile che i vari polverini analizzati presentino livelli di idoneità differenti per poter essere utilizzati all'interno di miscele bituminose. È infatti noto che le caratteristiche fisiche cui si è fatto riferimento influenzano, oltre che il volume occupato dal polverino all'interno delle miscele, anche l'efficacia della sua interazione con la fase bituminosa legante. Quest'ultima è inoltre controllata anche dalle caratteristiche chimiche che hanno altresì un effetto diretto sui processi di invecchiamento termo-ossidativo, sulla resistenza all'azione dell'acqua e sui fenomeni connessi con l'eventuale rilascio di sostanze tossiche e/o inquinanti nell'ambiente.
Con un'analisi di dettaglio riferita ai singoli prodotti vi è la possibilità di mettere in relazione tra loro i dati sperimentali e di stabilire correlazioni con le caratteristiche dei materiali in ingresso e con la tipologia di trattamento. Tuttavia, la complessità del processo di produzione e l'elevato numero di variabili coinvolte impedisce di stabilire criteri generali per individuare una strategia di produzione ottimale. Ciò anche in considerazione del fatto che le effettive prestazioni dei materiali bituminosi contenenti polverino da PFU sono influenzate dalle caratteristiche chimico-fisiche del bitume, dalla metodologia di impiego ("wet" o "dry") e dalle effettive condizioni imposte durante le varie lavorazioni (in produzione ed in stesa).

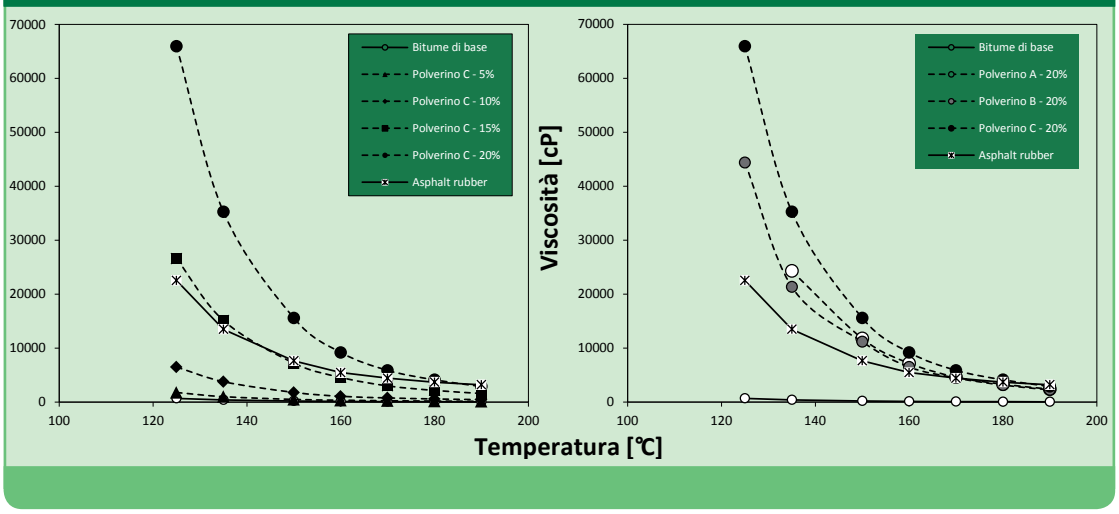
Leganti bituminosi contenenti polverino da PFU

Per potere ottenere prestazioni soddisfacenti in esercizio, i leganti bituminosi contenenti polverino da PFU debbono presentare una significativa rigidezza alle alte e medie temperature ed una notevole resistenza al danneggiamento sotto i ripetuti carichi indotti dai veicoli. Nel caso dei prodotti "asphalt rubber" è inoltre richiesta una elevata viscosità all'atto della produzione per poter realizzare miscele omogenee con un elevato dosaggio di legante.
Le su citate caratteristiche del legante dipendono dalla struttura che si realizza al suo interno a seguito dell'introduzione del polverino. In particolare, risulta determinante la scelta del dosaggio e della tipologia del polverino stesso che dà luogo a complessi fenomeni di interazione con la matrice bituminosa.
In ragione di quanto sopra illustrato, nel progetto di ricerca sviluppato per conto della Provincia di Torino è stata inclusa una indagine che ha preso in esame le caratteristiche reologiche di leganti compositi preparati in laboratorio con un unico bitume di base e tre tipi di polverino (indicati in precedenza come A 0,4-0,8, B 0,5-0,8 e C 0-0,8) aventi dosaggi compresi tra il 5 ed il 20%. In tutti i casi la miscelazione è avvenuta alla temperatura di 180°C impiegando un dispositivo di agitazione "ad ancora" mantenuto in movimento ad una velocità di 750 rpm per 90 minuti.
Sono state indagate tanto le caratteristiche di flusso quanto quelle viscoelastiche e di resistenza al danneggiamento, avendo cura di utilizzare protocolli di prova congruenti con le esperienze internazionali documentate ed elaborando i dati sperimentali con adeguati modelli analitici. A titolo comparativo le stesse prove sono state inoltre eseguite su un legante "asphalt rubber" prodotto industrialmente, contenente circa il 18% di polverino da PFU.
Le prove di viscosità sono state eseguite mediante un viscosimetro rotazionale Brookfield in un intervallo di temperatura compreso tra 125 e 190°C, con un'unica girante (SC4-27) e gradiente di scorrimento variabile. I valori di viscosità così determinati sono stati quindi riportati ad un unico valore del gradiente di scorrimento (pari a 6,8 s^{-1}) utilizzando i risultati di alcune misure supplementari ed opportuni modelli analitici (legge di potenza). Si è infine analizzata la dipendenza della viscosità dalla temperatura ricorrendo al modello di Arrhenius.

I risultati sperimentali (Figura 6) hanno permesso di evidenziare che al crescere del dosaggio di ciascun tipo di polverino si ha un considerevole aumento della viscosità a tutte le temperature prese in esame e che, come atteso, tale incremento di viscosità tende a crescere al diminuire della temperatura. Si è inoltre rilevato che la viscosità subisce variazioni che sono, a parità di dosaggio, dipendenti dalla tipologia di polverino. In particolare, nel caso degli specifici materiali presi in considerazione, le viscosità maggiori sono state riscontrate per il polverino C, avente rispetto agli altri una diversa origine in quanto derivante esclusivamente da PFU di mezzi pesanti. Questi ultimi sono di norma caratterizzati da una maggiore percentuale di gomma naturale che può aver favorito, a parità di condizioni di miscelazione, l'interazione con il bitume.

I valori di viscosità rilevati indicano che per poter utilizzare leganti come quelli analizzati occorre adottare temperature di miscelazione e compattazione che risultano nettamente superiori a quelle dei materiali bituminosi di tipo ordinario. Si osserva inoltre che nel caso dei leganti con dosaggi di polverino pari al 15 e 20% alla temperatura di 175°C si supera la soglia dei 1500 cP normalmente utilizzata per distinguere i prodotti del tipo "asphalt rubber" da quelli denominati "terminal blends".

Figura 6. Viscosità dei leganti presi in considerazione nello studio di laboratorio.



Per quel che riguarda lo studio delle caratteristiche viscoelastiche, sono state effettuate prove in regime oscillatorio mediante un reometro rotazionale adottando la configurazione di misura di piatti paralleli (diametro 25 o 8 mm, spessore dei campioni pari a 1 o 2 mm). A seguito dell'esecuzione di scansioni di frequenza per temperature comprese tra 0 e 100°C sono stati valutati il modulo complesso G* e l'angolo di fase δ, per i quali si è quindi provveduto alla costruzione di curve maestre mediante l'ausilio di opportuni modelli analitici.

Dall'analisi delle curve maestre riportate in Figura 7 risulta evidente che per effetto dell'inclusione di crescenti quantitativi di polverino da PFU nel bitume di base si produce, nel campo delle basse frequenze di sollecitazione (o delle elevate temperature) un sensibile incremento tanto della rigidezza (valori di G* via via crescenti) quanto del comportamento elastico (valori di δ via via decrescenti). La risposta elastica della frazione polimerica viene filtrata dal comportamento della matrice bituminosa alle frequenze intermedie, ove si riscontra un vero e proprio plateaux, mentre diviene prevalente alle basse frequenze ove dà luogo ad una significativa riduzione dell'angolo di fase. Gli effetti sopra descritti si traducono in una riduzione del possibile accumulo di deformazioni permanenti sotto carichi ripetuti, o comunque in un comportamento che da tale punto di vista ammette, per i dosaggi più elevati di polverino, la formulazione di miscele ad elevato contenuto di legante (ad esempio, di tipo "gap-graded" e "open-graded").
Poiché le indagini sono state eseguite fino ad una

temperatura minima di 0°C, le informazioni relative al comportamento reologico dei leganti alle basse temperature (o alte frequenze) non sono state acquisite in maniera diretta ma sono state invece desunte dall'applicazione del modello di Christensen ed Anderson. Si può comunque osservare come in tali condizioni il polverino produca una lieve riduzione del modulo complesso ed un piccolo incremento dell'angolo di fase. Tali variazioni del comportamento reologico, ancorché modeste, sono vantaggiose da un punto di vista prestazionale, con una potenziale riduzione della tendenza a dare luogo a fenomeni di fessurazione termica. Si presume inoltre che tali vantaggi possano rivelarsi ancora più marcati prendendo in esame il comportamento dei leganti nello stato di invecchiamento a lungo termine in quanto il polverino, come è noto, tende a inibire tale fenomeno.

I dati riportati in Figura 8 sono relativi ai leganti preparati con i vari tipi di polverino dosati al 20%. Le differenze di risposta viscoelastica non risultano particolarmente evidenti, anche in considerazione del fatto che la distribuzione granulometrica dei tre polverini presi in esame è piuttosto simile.

Lo studio di laboratorio dei leganti contenenti polverino da PFU è stato completato con prove in regime oscillatorio eseguite ad una frequenza di 10 Hz ed in condizioni di equi-rigidezza iniziale (15 MPa). Utilizzando la medesima forzante di sollecitazione (con valore di picco pari a 300 kPa), le prove sono state prolungate fino al raggiungimento delle condizioni limite di misura, evidenziando così la resistenza al

Figura 7. Influenza del dosaggio di polverino da PFU sulle caratteristiche viscoelastiche dei leganti presi in considerazione nello studio di laboratorio.

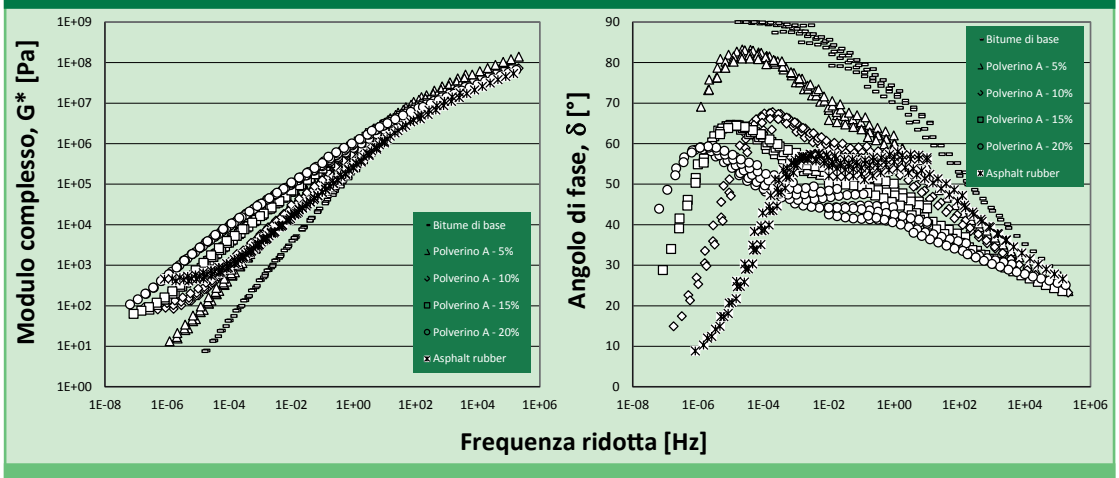
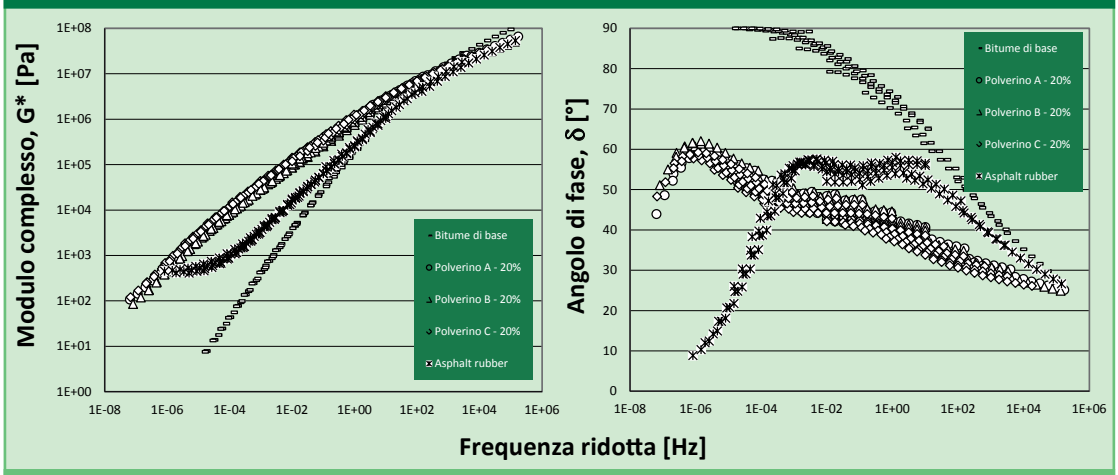
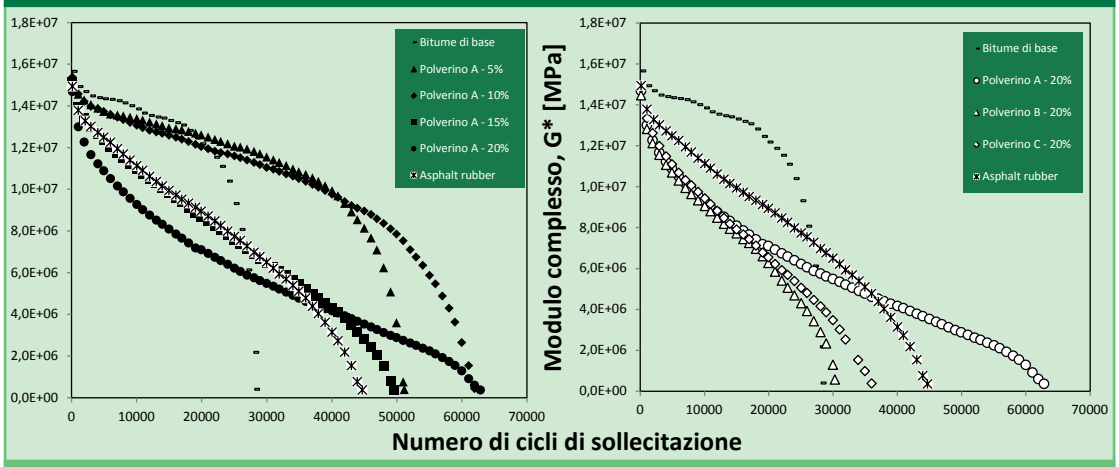


Figura 8. Influenza della tipologia di polverino da PFU sulle caratteristiche viscoelastiche dei leganti presi in considerazione nello studio di laboratorio.



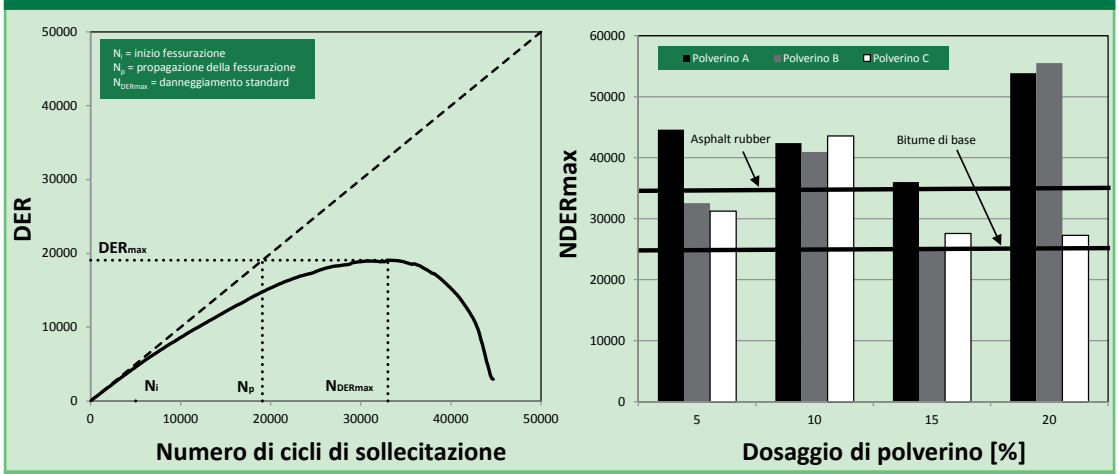
danneggiamento dei materiali presi in esame.
I dati sperimentali riportati in Figura 9 mostrano come il modulo complesso dei leganti si riduca al crescere del numero di cicli di carico applicati a causa dei su citati fenomeni di danneggiamento. Tale rappresentazione, riferita unicamente alla rigidezza, può essere utilizzata per un primo confronto tra i materiali analizzati. Si può quindi notare che la resistenza al danneggiamento è fortemente dipendente dal dosaggio di polverino da PFU e che si manifesta un netto cambiamento di comportamento allorché il dosaggio di quest'ultimo passa dal 10 al 15%. In particolare, i leganti con più elevato dosaggio presentano un andamento del modulo complesso che risulta del tutto analogo a quello del materiale "asphalt rubber" prodotto in impianto, con un gradiente iniziale di riduzione che risulta ben superiore a quello dei leganti con più basso dosaggio. Tale comportamento, comune anche ai bitumi modificati con polimeri di sintesi che in opera hanno dimostrato di poter resistere efficacemente al danneggiamento sotto carico ripetuto, suggerisce che nel caso di leganti compositi una valutazione delle potenziali prestazioni non si può limitare alla sola analisi del decadimento delle caratteristiche di rigidezza. Dai dati di Figura 9 risulta comunque evidente che la tipologia di polverino impiegato può, a parità di dosaggio, avere un effetto non trascurabile sulla resistenza al danneggiamento.
Adottando un approccio di analisi di tipo alternativo, i dati sperimentali desunti dalle prove di danneggiamento possono essere elaborati in modo tale da valutare, al crescere del numero di cicli di carico, il rapporto di energia dissipata (DER, Dissipated Energy Ratio). L'andamento di tale parametro offre una rappresentazione differente dei fenomeni che si verificano all'interno dei leganti, con la possibilità di individuare, così come indicato in Figura 10, diversi valori caratteristici del numero di cicli di sollecitazione.

Figura 9. Variazione del modulo complesso nelle prove di danneggiamento eseguite sui leganti presi in considerazione nello studio di laboratorio.



In particolare, il numero di cicli in corrispondenza del quale il su citato fattore energetico risulta massimo (NDERmax) può essere considerato come rappresentativo dell'effettiva durata del materiale sotto l'effetto dei carichi ripetuti.
Nel caso specifico dei leganti presi in esame, i risultati sperimentali, espressi in termini di NDERmax, hanno evidenziato come l'impiego di polverini differenti conduca alla realizzazione di leganti compositi aventi caratteristiche di resistenza al danneggiamento estremamente variabili, sensibili in maniera differente alle variazioni di dosaggio. Si può comunque osservare che in base a tale analisi i leganti aventi un dosaggio di polverino pari al 20% nella maggior parte dei casi presentano una durata a fatica superiore a quelli dei leganti con dosaggi inferiori.

Figura 10. Analisi energetica dei risultati delle prove di danneggiamento eseguite sui leganti presi in considerazione nello studio di laboratorio.

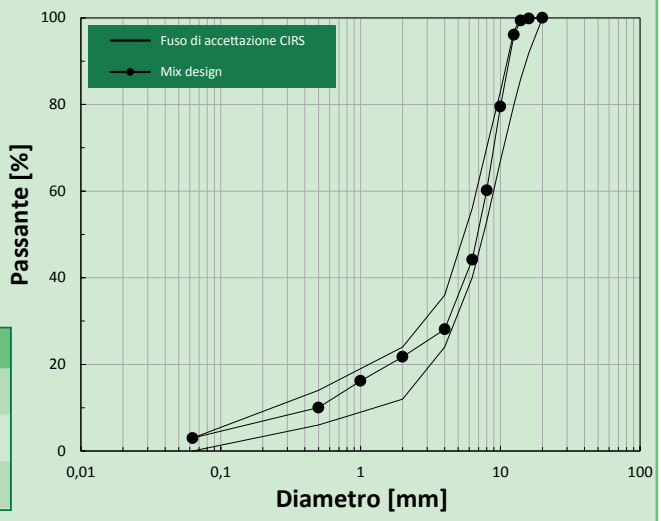


4.3.2 Il tronco pilota realizzato sulla Borgaro-Venaria

Mix design

Per il proporzionamento della miscela bituminosa di tipo "gap-graded" da mettere in opera sul tronco pilota programmato sulla circonvallazione Borgaro-Venaria si è fatto riferimento alle Norme Tecniche precedentemente messe a punto dal Centro Interuniversitario di Ricerca Stradale ed Aeroportuale (CIRS). Queste ultime contengono limiti di accettazione riferiti alle caratteristiche fisiche degli aggregati e del legante, alla distribuzione granulometrica degli aggregati, al contenuto di legante, al livello di addensamento richiesto (in laboratorio ed in opera) ed alle caratteristiche meccaniche. Tuttavia, dato il carattere innovativo delle miscele in questione, si è ritenuto opportuno integrare le indagini previste dalle suddette Norme Tecniche con l'esecuzione di prove in grado di fornire in maniera diretta informazioni relative alle prestazioni attese in opera. In particolare, per il caso in esame sono state eseguite prove sperimentali aggiuntive finalizzate alla valutazione della resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti e della resistenza alla propagazione delle fessure.
Nelle Figure 11 e 12 sono sinteticamente riportati i risultati ottenuti nella fase iniziale di mix design, sviluppata in accordo con quanto prescritto dalle su citate Norme Tecniche.
Il legante "asphalt rubber", campionato presso l'unico impianto di produzione italiano, è stato caratterizzato mediante prove di viscosità e prove in regime oscillatorio, ottenendo i risultati riportati nelle Figure 6-10. Gli aggregati lapidei, prelevati presso una cava sita nella Provincia di Torino, sono stati invece combinati in modo tale da rientrare all'interno del fuso di accettazione (Figura 11) e successivamente sottoposti alle prove per la determinazione delle caratteristiche di forma (con valore dell'indice di forma pari a 9,7%) e della resistenza alla frammentazione (con indice Los Angeles inferiore a 20).

Figura 11. Combinazione ottimale degli aggregati della miscela "gap-graded" di mix design.

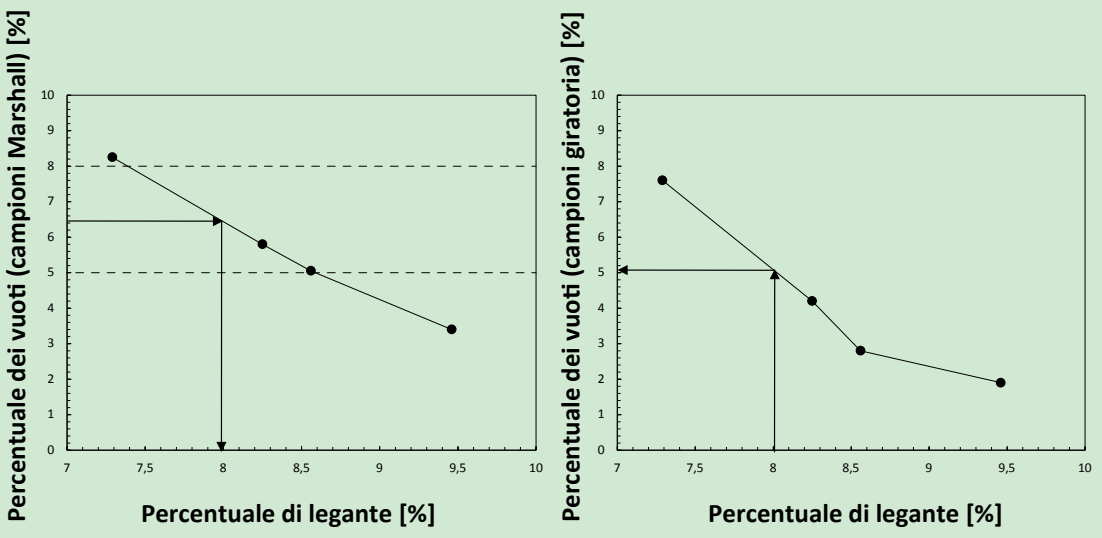


	Percentuale nella miscela
Sabbia 0/5	26%
Graniglia 5/10	25%
Pietrisco 10/15	49%

Per l'individuazione della percentuale ottimale di legante si è fatto riferimento alle caratteristiche volumetriche e meccaniche di campioni preparati con costipatore Marshall (50 colpi per faccia) e con pressa a taglio giratorio (50 giri). Come atteso, i valori della percentuale dei vuoti residui, riportati in Figura 12, sono risultati decrescenti al crescere del dosaggio di legante, evidenziando tuttavia una rilevante differenza tra il livello di addensamento raggiunto con le due metodologie di preparazione dei campioni. Nel caso dei risultati delle prove meccaniche non si sono invece potuti individuare gli andamenti caratteristici che di norma si rilevano per conglomerati bituminosi di tipo ordinario, con valori della stabilità Marshall e della resistenza a trazione indiretta compresi, al variare del dosaggio di legante, entro intervalli piuttosto contenuti (rispettivamente pari a 6,8-7,7 kN ed a 0,87-1,03 MPa). Per effetto di tutto ciò, la scelta della percentuale di legante di progetto, pari all'8%, è stata basata unicamente sui dati relativi alle caratteristiche volumetriche, facendo in particolare riferimento al punto mediano dell'intervallo di accettazione della percentuale dei vuoti dei campioni Marshall (pari al 6,5%).

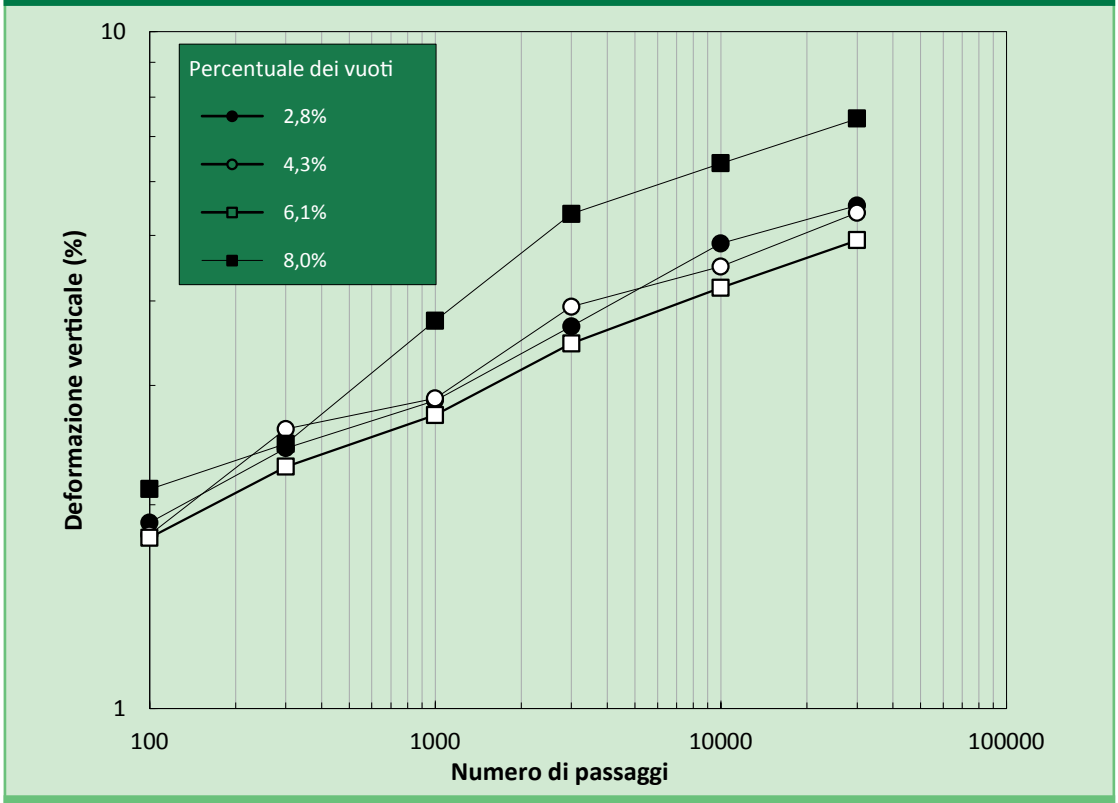
Per una prima valutazione della durabilità delle miscele bituminose, le prove di stabilità e di resistenza a trazione indiretta sono state eseguite anche dopo condizionamento dei campioni in acqua per 15 giorni. Come atteso, in ragione dell'elevato contenuto di legante di questo tipo di miscela non si sono rilevate significative riduzioni dei parametri meccanici, con valori del rapporto percentuale post- e pre- condizionamento mai inferiori al 93%.

Figura 12. Risultati delle prove di caratterizzazione volumetrica per il mix design della miscela "gap-graded".



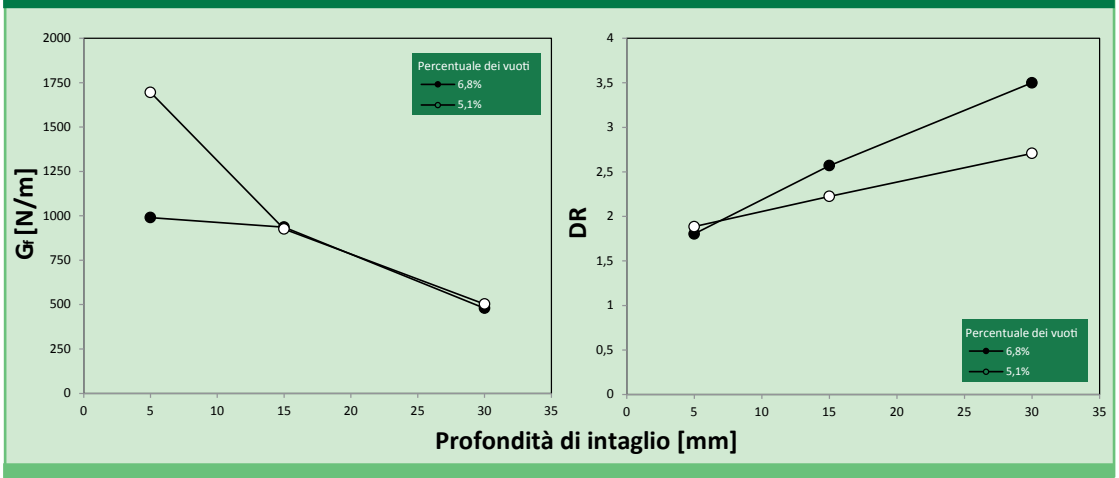
Le prove di carattere prestazionale relative alla resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti ed alla resistenza alla propagazione delle fessure sono state eseguite unicamente sulla miscela bituminosa di progetto, prendendo tuttavia in considerazione vari livelli di addensamento. Sia le Norme Tecniche predisposte dal CIRS sia quelle generalmente consigliate dal produttore di "asphalt rubber" indicano infatti che in opera possono essere accettate miscele con una massima percentuale di vuoti residui pari a quella di laboratorio di riferimento aumentata di due punti percentuali.
Per quel che riguarda la valutazione della resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti, si sono eseguite prove di ormaiamento in scala ridotta. Le lastre di conglomerato bituminoso, preparate spessore pari a 5 cm e con percentuali dei vuoti comprese tra il 3 e l'8%, sono state quindi sottoposte ai ripetuti carichi di una ruota gommata sotto l'effetto di un carico verticale pari a 5 kN. In modo da simulare condizioni di esercizio estremamente gravose, le prove sono state eseguite alla temperatura di 60°C fino ad un massimo di 30.000 passaggi. Corrispondentemente, sono state registrate le deformazioni permanenti verticali subite da ciascuna lastra, espresse in termini relativi rispetto allo spessore iniziale.
I risultati sperimentali ottenuti, riportati in Figura 13, consentono di evidenziare come la risposta del materiale sotto i carichi ripetuti sia estremamente sensibile al livello di addensamento iniziale, che pertanto deve essere attentamente controllato in corso d'opera. In particolare, si può notare come la miscela presenti il migliore comportamento in corrispondenza della percentuale dei vuoti più prossima a quella individuata a seguito della fase preliminare di mix design (pari al 6,5%).

Figura 13. Risultati delle prove di ormaiamento eseguite sulla miscela di progetto.



Le valutazioni relative alla resistenza alla propagazione delle fessure della miscela di progetto sono state effettuate mediante l'esecuzione di prove di flessione su campioni semicircolari. Questi ultimi sono stati preparati con pressa giratoria a due diversi livelli di addensamento (con percentuali dei vuoti dell'ordine del 3,5 e del 6%) con intagli centrali aventi lunghezze variabili (pari a 5, 15 e 30 mm). Le prove sono state eseguite a 20°C con una velocità di spostamento imposta pari a 1 mm/min.
I risultati riportati in Figura 14 sono espressi in termini di energia di frattura G_f, corrispondente all'energia dissipata per la produzione del collasso dei campioni (normalizzata rispetto all'area resistente), e di rapporto di duttilità DR, corrispondente al rapporto tra l'energia di collasso e quella necessaria per determinare l'inizio della fessurazione a partire dall'apice dell'intaglio. Si può osservare come il comportamento della miscela sia sensibile al livello di addensamento. In particolare, qualora si raggiunga una percentuale di vuoti pari al 6,8%, prossima a quella di progetto, si ha, rispetto al caso della miscela maggiormente addensata (vuoti pari al 5,1%) una riduzione dell'energia totale G_f solamente per profondità di intaglio modeste, mentre la duttilità tende in generale ad aumentare in maniera significativa.

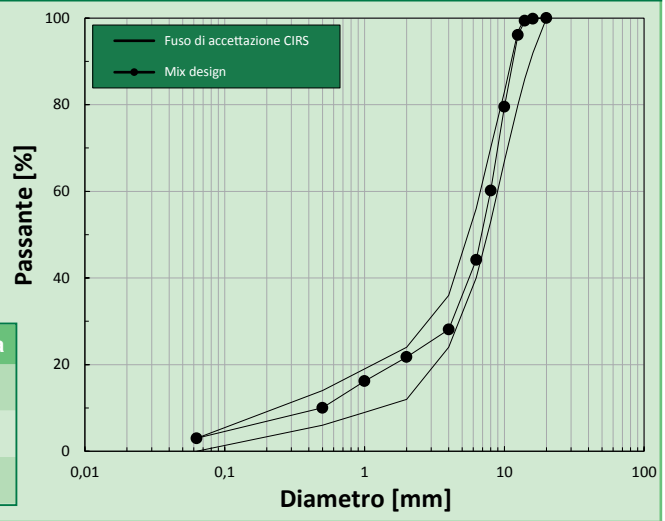
Figura 14. Risultati delle prove di flessione su campioni semicircolari eseguite sulla miscela di progetto.



Campo prove

La posa in opera dello strato di usura “gap-graded” è stato preceduto dalla realizzazione di un campo prove presso l’impianto di produzione di conglomerato bituminoso dell’impresa incaricata di eseguire l’intervento. Preventivamente si sono inoltre prese in esame le caratteristiche degli aggregati lapidei effettivamente disponibili, differenti rispetto a quelli inizialmente considerati nella fase di mix design. Si sono quindi eseguite prove preliminari per la determinazione della formula di impasto ottimale (Figura 15) e per la conseguente valutazione delle caratteristiche di forma e di resistenza alla frammentazione (indice di forma pari al 17%, indice Los Angeles inferiore a 20).

Figura 15. Combinazione ottimale degli aggregati della miscela studiata per il campo prove e per il tronco pilota.



	Percentuale nella miscela
Sabbia 0/5	29,8%
Graniglia 5/10	16,3%
Pietrisco 10/15	53,9%

Utilizzando il medesimo legante “asphalt rubber” impiegato nel mix design e lo stesso dosaggio di progetto (pari all’8%) si sono quindi preparati campioni Marshall con la conseguente valutazione delle caratteristiche volumetriche e meccaniche della miscela. A causa del diverso scheletro litico realizzato, i risultati ottenuti si sono rivelati lievemente differenti da quelli di riferimento, con una percentuale dei vuoti più contenuta e valori più elevati della stabilità (Tabella VIII).

Tabella VIII. Caratteristiche volumetriche e meccaniche della miscela studiata per il campo prove e per il tronco pilota.

	Valore medio
% vuoti Marshall (50 colpi) (%)	5,2
Stabilità Marshall (kN)	7,5
Stabilità Marshall residua dopo immersione in acqua (%)	87,5

La miscela “gap-graded” è stata prodotta nell’impianto dell’impresa (del tipo discontinuo) con una fornitura di “asphalt rubber” appositamente approvvigionata per tale scopo. Essa è stata trasportata in una cisterna riscaldata che è stata quindi opportunamente collegata all’impianto di produzione (Figura 16).

La posa in opera è avvenuta lungo un tratto di lunghezza pari a circa 80 m su due strisce di stesa aventi larghezza pari a 4 m. Per la compattazione dello strato di 3 cm, avvenuta ad una temperatura mai inferiore ai 150°C, è stato impiegato un rullo metallico di massa totale pari a 14 t (Figura 17).

Figura 16. - *Produzione della miscela “gap-graded” durante la realizzazione del campo prove.*

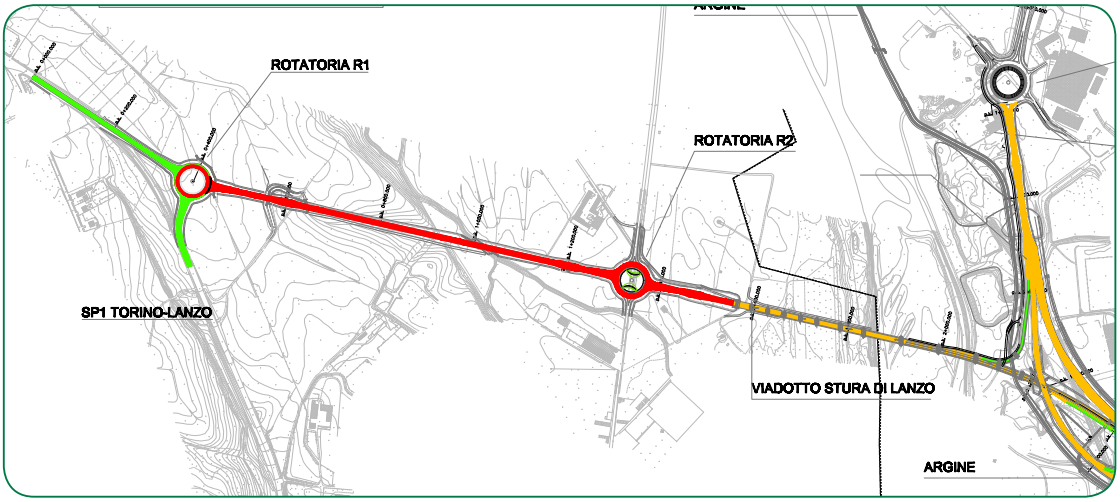
Figura 17. - *Messa in opera della miscela "gap-graded" sul campo prove.*

Dopo il completamento delle operazioni di compattazione sono stati effettuati prelievi di carote per valutare lo stato di addensamento raggiunto. Le relative prove di laboratorio hanno fornito un valore medio della percentuale dei vuoti pari al 7%, superiore a quello di riferimento di laboratorio ma comunque accettabile secondo quanto generalmente prescritto nelle Norme Tecniche.

Posa in opera sul tronco pilota

La posa in opera dello strato di usura "gap-graded" sulla circonvallazione Borgaro-Venaria è avvenuta nel tratto compreso tra l'intersezione con la SP 1 Torino-Lanzo ed il viadotto Stura di Lanzo, avente una larghezza di carreggiata pari a 10 m e comprendente due rotatorie (Figura 18).

Figura 18. -
Planimetria con l'ubicazione del tronco pilota.



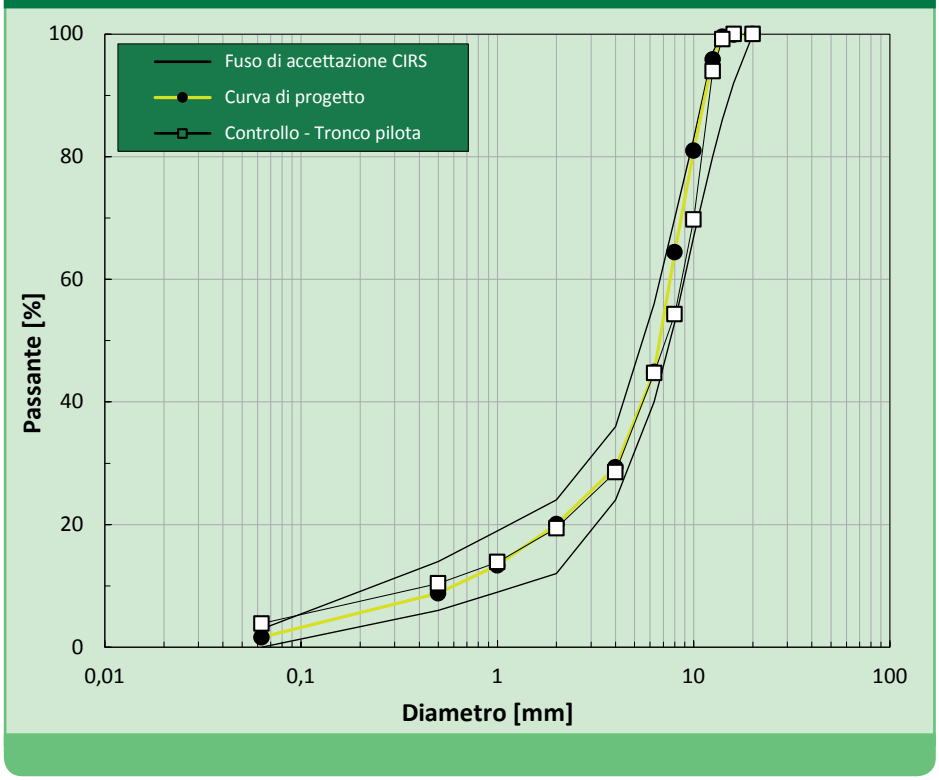
La superficie di stesa dello strato di usura "gap-graded" è stata preparata mediante la realizzazione di una mano d'attacco con emulsione bituminosa modificata, avente un dosaggio di bitume residuo pari a 0,4 kg/m^2. Si è quindi proceduto con la messa in opera adottando il medesimo sistema operativo utilizzato per il campo prove (Figura 19). Pur essendo la distanza di trasporto ragguardevole (dell'ordine dei 35 km), la stesa e la successiva compattazione sono avvenute ad una temperatura dell'ordine dei 170°C. La formula di impasto adottata durante la realizzazione dell'intervento è stata la medesima impiegata per il campo prove. Per la produzione della miscela è stata tuttavia utilizzata una nuova fornitura di "asphalt rubber".

Figura 19. - *Messa in opera della miscela "gap-graded" sul tronco pilota.*

Controlli in corso d'opera

Le medesime caratteristiche volumetriche e meccaniche prese in considerazione nell'ambito del mix design sono state utilizzate durante i controlli in corso d'opera, che hanno altresì previsto verifiche relative alla composizione della miscela, alle caratteristiche reologiche e di flusso del legante ed ai livelli di addensamento effettivamente raggiunti. Sulla pavimentazione finita sono state infine eseguite prove puntuali per la determinazione della macrotessitura e dell'aderenza.
Nelle Figure 20-23 ed in Tabella IX vengono riportati i risultati ottenuti nelle prove di laboratorio. Si noti come, pur avendo utilizzato aggregati lapidei diversi da quelli presi in considerazione nella fase di mix design, si siano ottenuti dati sperimentali coerenti con quelli di progetto. Occorre inoltre precisare che in questa fase le prove reologiche sono state eseguite sul legante "asphalt rubber" prelevato dalla cisterna dell'impianto, verosimilmente differente rispetto a quello impiegato nelle precedenti fasi di studio.
La percentuale media di legante rilevata a seguito delle prove di ignizione eseguite sul conglomerato "gap-graded" campionato in situ è risultata pari all'8,2% e dunque lievemente superiore a quella prestabilita. La distribuzione granulometrica degli aggregati (Figura 20) presenta scostamenti modesti rispetto a quella di progetto, sebbene si sia riscontrato un lieve eccesso di filler (pari al 3,9%, anziché all'1,6%). Malgrado non si possa escludere che tale percentuale sia sovrastimata a causa della presenza di polverino incombusto nel forno di ignizione, il quantitativo rilevato appare in ogni caso compatibile con la prassi seguita in altre applicazioni sul campo. Ad esso corrisponde infatti un rapporto filler-legante pari a 0,5, intermedio rispetto a quelli cui tipicamente si fa riferimento nella letteratura tecnica.

Figura 20. Distribuzione granulometrica degli aggregati della miscela "gap-graded" messa in opera.



La viscosità del legante “asphalt rubber”, campionato in impianto nei tre giorni di produzione della miscela, è risultata piuttosto variabile (Figura 21), con valori a 175°C e 6,8 s^{-1} che sono risultati comunque accettabili (compresi tra 1500 e 5000 cP). Si è inoltre rilevato che le caratteristiche di flusso di tale legante sono in linea con quelle del prodotto utilizzato per il campo prove ma significativamente differenti rispetto a quelle del materiale impiegato nella fase di mix design. Ciò può essere dovuto a differenze di composizione e di trattamento che tuttavia non è stato possibile indagare.
Una analoga variabilità è stata riscontrata nel caso delle caratteristiche viscoelastiche desunte da prove eseguite in regime oscillatorio (Figura 22) con valori del modulo complesso G* e dell’angolo di fase δ del tutto coerenti con quelli di viscosità.

Figura 21. Viscosità del legante “asphalt rubber” campionato durante i controlli in corso d’opera.

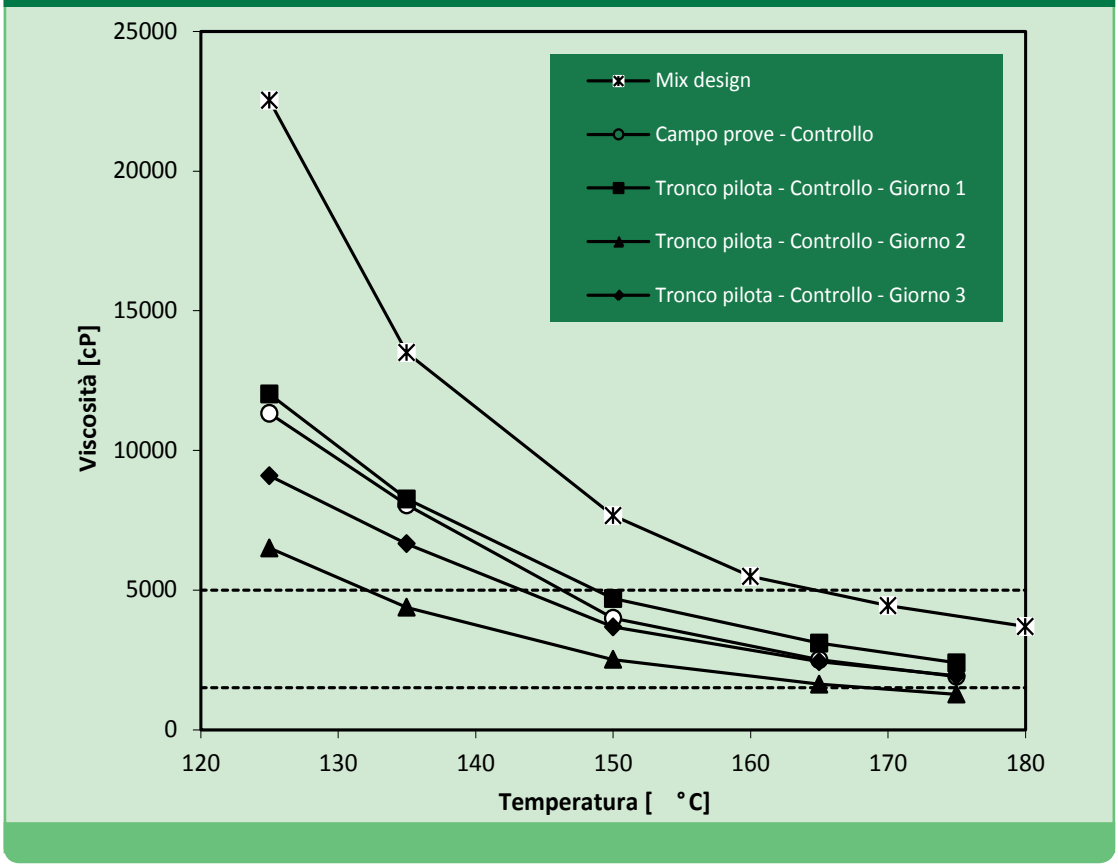
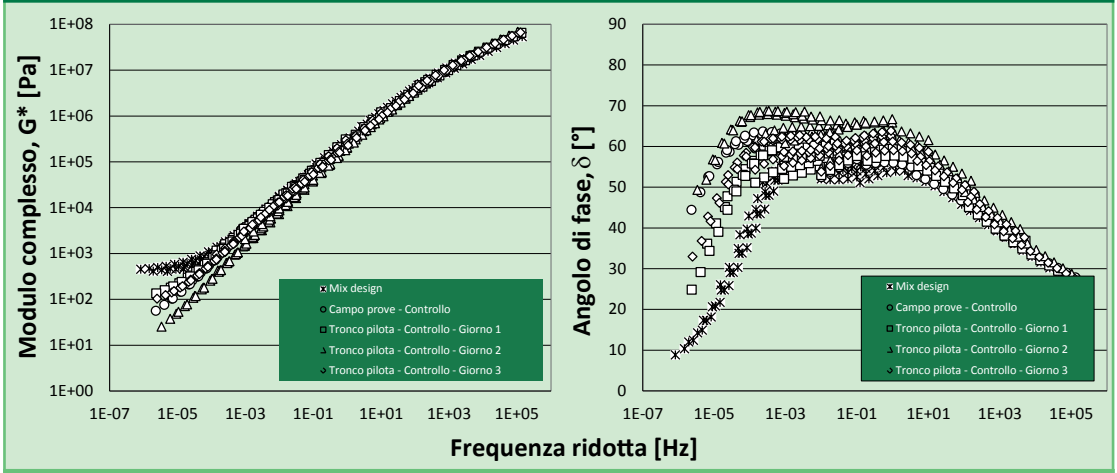


Figura 22. Caratteristiche viscoelastiche del legante "asphalt rubber" campionato durante i controlli in corso d'opera.



Le caratteristiche volumetriche e meccaniche della miscela "gap-graded" messa in opera sono state valutate ricorrendo anche in questo caso alle medesime prove impiegate nella fase di mix design, eseguite su campioni preparati con compattatore Marshall e pressa a taglio giratorio (Tabella IX). A causa dell'impiego di diversi materiali di base (aggregati e legante) e in ragione del fatto che la miscelazione è stata effettuata in impianto (anziché in laboratorio) si sono ottenuti risultati differenti. In particolare, a fronte di livelli di addensamento che a seconda della modalità di compattazione sono risultati superiori (Marshall) o inferiori (giratoria) a quelli di riferimento, si sono riscontrati più elevati valori della stabilità Marshall e della resistenza a trazione indiretta. Infine, come atteso, le prove finalizzate alla valutazione della durabilità all'acqua hanno dato esito positivo.

Nella Tabella IX è riportato anche il valore medio della percentuale dei vuoti (pari al 9,1%) rilevato sulle carote prelevate dallo strato di usura una volta ultimata la compattazione. Esso risulta piuttosto elevato e comunque superiore al massimo valore ammissibile secondo quanto prescritto nelle Norme Tecniche del CIRS. Occorre inoltre segnalare che la percentuale dei vuoti è risultata estremamente variabile lungo lo sviluppo del tronco pilota, con valori compresi tra il 5,3 ed il 12,2%, a testimonianza delle difficoltà che possono essere incontrate durante la realizzazione degli interventi nel caso in cui non vengano attentamente controllati i tempi e le modalità di compattazione.

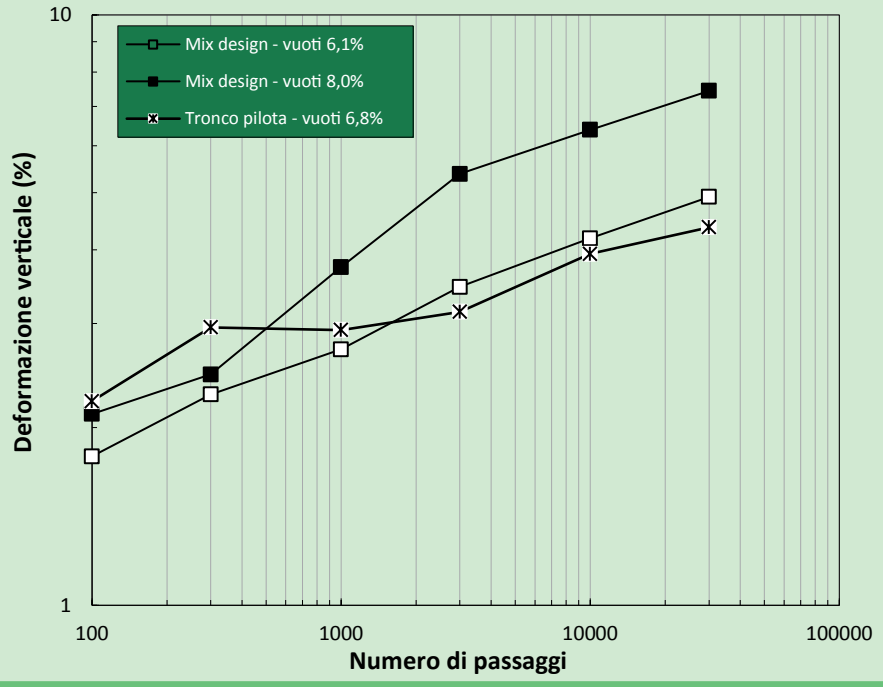
Tabella IX. Risultati delle prove di controllo in corso d'opera.

	Valore medio
% vuoti Marshall (50 colpi)	4,8
Stabilità Marshall (kN)	8,5
Stabilità Marshall residua dopo immersione in acqua (%)	96,1
% vuoti Giratoria (50 giri)	6,1
Resistenza a trazione indiretta (MPa)	1,19
Resistenza a trazione indiretta residua dopo immersione in acqua (%)	103,7
% vuoti in opera	9,1

La caratterizzazione prestazionale della miscela bituminosa campionata durante la realizzazione del tronco pilota è stata effettuata mediante prove di ormaiamento e di resistenza alla propagazione delle fessure eseguite su campioni preparati a differenti livelli di addensamento. Nel caso delle prove finalizzate alla valutazione delle deformazioni permanenti sotto carico ripetuto si è conservativamente scelto quale valore obiettivo della percentuale dei vuoti quello massimo ammissibile secondo le Norme Tecniche CIRS (pari al 6,8%, che corrisponde alla percentuale dei vuoti dei campioni Marshall aumentata di due punti percentuali). Per quel che riguarda le prove di flessione su campioni semi-circolari, allo scopo di evidenziare il massimo potenziale di resistenza della miscela, i campioni sono stati invece preparati ad un livello di addensamento prossimo a quello dei campioni Marshall di riferimento, con un valore della percentuale dei vuoti pari al 5%. I risultati delle due tipologie di prova sono mostrati nelle Figure 23-24 ove sono messi a confronto con quelli della miscela di mix design.

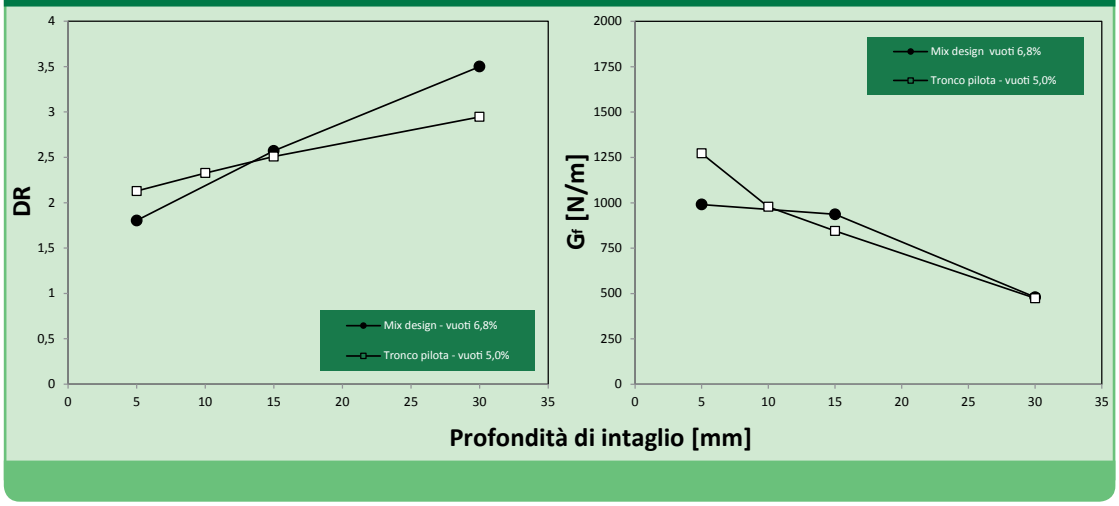
Le curve di ormaiamento rappresentate in Figura 23 indicano che la miscela bituminosa messa in opera presenta, nelle condizioni limite sopra descritte, una resistenza all'accumulo delle deformazioni permanenti significativamente più elevata di quella di progetto (con vuoti dell'8,0%, vicini al valore limite pari all'8,5%). Il comportamento è invece del tutto comparabile a quella di progetto considerata ad un livello di addensamento prossimo a quello dei campioni Marshall (con vuoti pari al 6,1%). Tali osservazioni trovano spiegazione nella diversa struttura lapidea formatasi a seguito dell'impiego di aggregati differenti per distribuzione granulometrica e forma. I valori medi dell'energia di frattura G_f e del rappor-

Figura 23. Risultati delle prove di ormaiamento eseguite sulla miscela messa in opera.



to di duttilità DR, riportati in Figura 24 in funzione della profondità dell'intaglio praticato sui campioni semi-cilindrici sottoposti a flessione, mostrano come la miscela impiegata nel tronco pilota abbia caratteristiche di resistenza alla propagazione delle fessure analoghe a quella della miscela di progetto considerata in uno stato di addensamento relativo del tutto simile, con vuoti residui (pari al 6,8%) prossimi a quelli dei campioni Marshall di riferimento. Si può quindi ipotizzare che il comune andamento dei grafici di Figura 24 sia da mettere in relazione alle caratteristiche di resistenza della fase legante cui è ascrivibile la funzione di inibitore della fessurazione.

Figura 24. Risultati delle prove di flessione su campioni semicircolari eseguite sulla miscela messa in opera.



Sulla superficie dello strato di usura posto in opera, indipendentemente dalla tipologia di conglomerato bituminoso utilizzato, debbono essere eseguite prove sperimentali per la valutazione delle caratteristiche di tessitura e di aderenza. Lungo lo sviluppo del tronco pilota sono state pertanto eseguite prove per la determinazione del British Pendulum Number (BPN) e dell'altezza in sabbia (HS), che hanno rispettivamente condotto a valori medi pari a 63 e 0,75 mm. Tali risultati sono in linea con quelli di conglomerati bituminosi di tipo "semi-chiuso" e sono compatibili con le tipiche prescrizioni adottate per questa tipologia di materiale nella maggior parte delle Norme Tecniche.

Valutazione delle emissioni gassose e del potenziale di eluizione

La valutazione delle emissioni gassose associate alla produzione e messa in opera dei conglomerati bituminosi contenenti polverino da PFU è di primaria importanza soprattutto per fugare le perplessità che vengono sollevate da alcuni utilizzatori. La presenza di gomma vulcanizzata nelle miscele determina infatti una significativa variazione dell'odore dei fumi per i quali occorre pertanto procedere ad analisi quantitative relative alla loro eventuale tossicità. Resta inteso che tale valutazione deve avvenire anche in termini differenziali prendendo come base di riferimento i fumi prodotti dai conglomerati bituminosi di tipo tradizionale.

Durante la realizzazione del tronco pilota questo specifico problema è stato affrontato eseguendo prelievi delle emissioni gassose sia in corrispondenza del posto di guida della vibrofinitrice (posizione F), sia in prossimità del banco di stesa (posizione B) (Figura 25). A tale scopo si è utilizzata una pompa (portata di 0,5 l/min, durata di aspirazione pari a 5 minuti), facendo adsorbire le emissioni su cartucce in carbone attivo granulare, successivamente portate in laboratorio per le relative analisi quantitative relative alla determinazione del contenuto di Composti Organici Volatili (COV) e degli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA). Si noti come le misure siano state effettuate nelle condizioni di massima esposizione ai fumi degli operatori, ossia durante lo scarico del conglomerato bituminoso nella vibrofinitirice e immediatamente dopo la sua posa (prima della compattazione).

Figura 25. - *Posizioni di campionamento delle emissioni gassose durante la messa in opera della miscela "gap-graded".*

Poiché le emissioni dipendono in misura rilevante dalle condizioni ambientali ed operative di produzione e stesa (quali temperatura esterna, vento, temperatura del materiale e tipologia dei macchinari), ulteriori prelievi delle emissioni sono stati effettuati in laboratorio in condizioni standard controllate. In particolare, la miscela prelevata in opera è stata soggetta ad una procedura di riscaldamento e movimentazione impiegando un miscelatore ad asse verticale (circa 30 kg di miscela, movimentazione a 150°C in ambiente chiuso), al termine della quale si è proceduto con il prelievo dei fumi con la stessa metodologia seguita in situ (configurazione L). Con tale procedura, pur non riproducendo alcuna situazione che effettivamente si verifica in situ, si può rilevare, in condizioni ripetibili, il potenziale emissivo di una data miscela bituminosa.
I risultati sperimentali ottenuti mediante analisi di laboratorio, eseguite con gascromatografo equipaggiato con spettrometro di massa, sono riportati nelle Tabelle X-XI. Per quel che riguarda i COV, si è rilevata una elevata concentrazione di Benzene, Toluene, p-Xilene e Trimetilbenzene. Nel caso degli IPA, i composti maggiormente presenti risultano essere l'1-Bromonaftalene, il Naftalene, il Benzo[a] antracene, il Benzo[a]pirene ed il Benzo[g,h,i]perilene. Attualmente in Italia non sono previsti dei valori limite per l'esposizione dei lavoratori ai fumi di bitume. Tuttavia, i valori misurati di COV e IPA per la miscela "gap-graded" del tronco pilota risultano inferiori alle soglie individuate dalla normativa tedesca che prescrive una massima concentrazione di idrocarburi totali nelle emissioni pari a 10 mg/m^3.

Tabella X. Contenuto di composti organici volatili (COV) delle emissioni prodotte dalla miscela "gap-graded" messa in opera sul tronco pilota (µg/m^3).

	F	B	L
Benzene	2,6	< 0,1	14,5
Toluene	5,4	13,4	11,1
Etilbenzene	< 0,1	< 0,1	2,3
bromoBenzene	< 0,1	< 0,1	1,3
Stirene	< 0,1	< 0,1	< 0,1
1,2,4-Trimetilbenzene	7,6	6,1	35,3
1,3,5-Trimetilbenzene	5,9	17,1	54,9
p-Xilene	11,8	157,3	2,6
1,3,5-Triclorobenzene	< 0,1	< 0,1	< 0,1
1,2,4-Triclorobenzene	< 0,1	< 0,1	< 0,1
p-isopropilToluene	1,4	57,3	15,8
butilBenzene	< 0,1	3,1	5,9
Totale COV	34,31	264,87	143,68

Tabella XI. Contenuto di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) delle emissioni prodotte dalla miscela "gap-graded" messa in opera sul tronco pilota (µg/m^3).

	F	B	L
Naftalene	7,9	5,2	2,5
Acenaftilene	1,8	1,2	0,7
1-Bromonaftalene	10,3	9,2	8,4
Acenaftene	2,3	1,4	1,1
Fluorene	1,3	1,0	1,1
Fenantrene	2,0	1,1	0,6
Antracene	1,8	0,6	0,1
Fluorantene	3,1	0,9	0,3
Pirene	3,0	0,9	0,3
Benzo[a]antracene	6,1	2,2	< 0,1
Crisene	3,6	0,8	< 0,1
Benzo[a]pirene	5,3	3,5	5,7
Benzo[b]fluorantene	3,6	0,8	1,5
Dibenzo[a,h] antracene	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Indeno[1,2,3-cd] pirene	8,9	2.15	1.62
Benzo[g,h,i]perilene	3,6	5.78	4.33
Totale IPA	64,4	44.51	33.56

Poiché la valutazione delle emissioni deve essere necessariamente svolta anche in termini comparativi, i risultati ottenuti per la miscela "gap-graded" del tronco pilota sono stati messi a confronto con quelli relativi ad altri cantieri di stesa le cui caratteristiche sono sinteticamente riportate in Tabella XII. I corrispondenti risultati sperimentali, espressi in termini di COV ed IPA totali, sono indicati in Tabella XIII. Con riferimento ai risultati riportati in Tabella XIII occorre in primo luogo sottolineare che le emissioni gassose dipendono, oltre che dalle su citate condizioni operative, dal quantitativo di legante presente e dalla sua specifica tipologia. In particolare, una elevata variabilità scaturisce proprio da quest'ultimo aspetto in quanto la composizione chimica dei bitumi risulta estremamente variabile a seconda del greggio di origine e dei processi di raffinazione e trattamento utilizzati per la sua produzione.

Tabella XII. Cantieri di stesa sottoposti a monitoraggio delle emissioni gassose (a titolo comparativo).

Conglomerato bituminoso	Tipologia di legante	Dosaggio di legante	Cantiere	Spessore	T stesa
Gap-graded	"asphalt rubber"	8,5%	Tronco pilota	3 cm	170°C
Gap-graded	"asphalt rubber"	8%	A	5 cm	170°C
Binder tradizionale (con fresato)	non modificato	4,8%	B	7 cm	165°C
Binder tradizionale	modificato	5,5%	C	9 cm	165°C
Gap-graded	"asphalt rubber"	6,8%	D	4 cm	190°C

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella XIII si può in primo luogo evincere che in tutti i casi le emissioni totali di idrocarburi rispettano il limite di accettazione imposto dalla su citata normativa tedesca (10 mg/m^3). Si nota inoltre che a parità di tipologia di bitume le concentrazioni di IPA nelle emissioni sono principalmente una funzione della quantità di bitume presente nel conglomerato bituminoso, mentre i COV totali risentono maggiormente delle condizioni operative ed ambientali.

Mettendo a confronto le posizioni di campionamento si rileva infine come nelle emissioni i valori relativi ai COV siano più elevati in corrispondenza del banco (posizione B), mentre quelli degli IPA siano maggiori al posto di guida della vibrofinitrice (posizione F). L'unica eccezione è costituita dal caso del cantiere D (in galleria), ove la presenza dell'impianto di aspirazione ha verosimilmente modificato le condizioni di emissione.

Tabella XIII. COV ed IPA totali rilevati nei cantieri di stesa sottoposti a monitoraggio delle emissioni gassose(a titolo comparativo) (μg/m³).

Cantiere	COV			IPA		
	F	B	L	F	B	L
Tronco pilota	34,31	264,87	143,68	64,42	29,98	22,29
A	125,59	207,75	-	161,19	79,85	-
B	171,34	163,08	-	45,39	41,27	-
C	139,34	93,41	-	35,08	40,37	-
D (galleria)	13,09	11,34	-	132,54	46,91	-
D (cielo aperto)	1,62	9,44	-	34,77	31,52	-

Per quel che riguarda il potenziale di eluizione della miscela "gap-graded" messa in opera sul tronco pilota, sono stati eseguiti test di cessione secondo la procedura indicata nel Dlgs 152/2006. Tuttavia, poiché in letteratura non sono indicati valori di soglia per valutare in termini assoluti il possibile rilascio di un conglomerato bituminoso, le valutazioni sono state effettuate in termini comparativi per mettere in evidenza gli eventuali effetti determinati dalla presenza del polverino da PFU nel legante. A tale scopo sono state prese in esame due miscele bituminose preparate in laboratorio con composizione controllata.

La prima riproduce la miscela messa in opera utilizzando i medesimi aggregati lapidei ed un bitume "asphalt rubber" appositamente preparato con il bitume di base ed il polverino da PFU effettivamente impiegati durante la produzione industriale del legante destinato al tronco pilota. La seconda, avente la medesima formula di impasto della precedente (con dosaggio di legante pari all'8,5% così come rilevato durante i controlli in corso d'opera), è stata invece realizzata senza polverino da PFU.

Tabella XIV. COV ed IPA totali rilevati negli eluati dei conglomerati bituminosi "gap-graded" con e senza polverino da PFU.

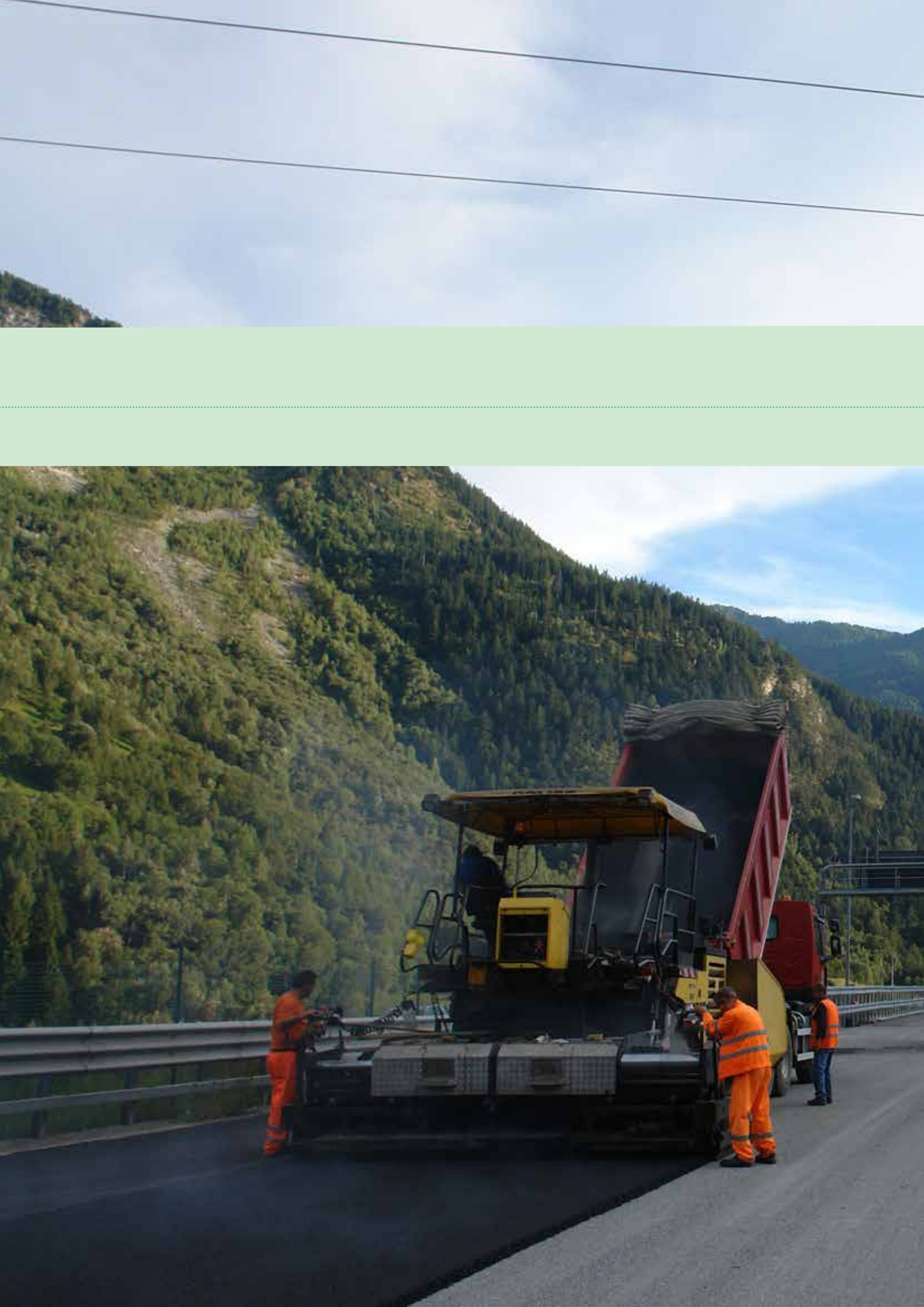
	Con polverino da PFU	Senza polverino da PFU
COV (μg/kg)	57,59	74,18
IPA (μg/kg)	21,54	35,75

Sull'eluato derivante dai test di cessione sono state eseguite in laboratorio le prove necessarie per la determinazione del contenuto di sostanze organiche, nonché dei parametri inorganici di principale interesse. I relativi risultati sono riportati nelle Tabelle XIV-XV. In generale si osserva che i valori delle concentrazioni di COV ed IPA determinati per l'eluato del conglomerato che non contiene polverino da PFU sono superiori a quelli relativi alla miscela contenente polverino.

Quest'ultimo sembra quindi avere degli effetti positivi sul fenomeno di eluizione, trattenendo parte delle sostanze potenzialmente nocive all'interno del conglomerato bituminoso. Considerazioni differenti debbono essere fatte nel caso dei parametri inorganici: in generale si nota infatti che la miscela contenente polverino da PFU dà luogo ad una maggiore eluizione di metalli.

Tabella XV. Parametri inorganici misurati negli eluati dei conglomerati bituminosi "gap-graded" con e senza polverino da PFU.

		Con polverino da PFU	Senza polverino da PFU
nitrati	mg/l	< 0,1	< 0,1
fluoruri	mg/l	< 0,1	< 0,1
solfati	mg/l	0,804	0,363
cloruri	mg/l	1,42	0,750
Ba	µg/l	21,5	15,2
Cu	µg/l	50,3	4,57
Zn	µg/l	17,5	11,1
Co	µg/l	< 0,6	< 0,6
Ni	µg/l	3,56	< 1,5
As	µg/l	< 5,3	< 5,3
Cd	µg/l	< 0,25	< 0,25
Cr	µg/l	1,79	1,66
Pb	µg/l	< 4,2	< 4,2
Al	µg/l	2,53	3,56
Fe	µg/l	2,47	3,31
Mn	µg/l	11,8	6,04
COD	mg/l	10,6	10,6
pH		7,89	7,96
CE	µS/cm	14	15



Conclusioni e sviluppi futuri

Sulla base di quanto esposto nel presente documento, si può concludere che le tecnologie di impiego di polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali ("wet" e "dry") costituiscono valide soluzioni per potere realizzare sovrastrutture con elevate prestazioni in esercizio. Tuttavia, la limitata diffusione che esse hanno avuto in Italia richiede che nel prossimo futuro vengano investite sufficienti risorse per renderle fruibili su tutto il territorio nazionale. Per potere beneficiare appieno delle grandi potenzialità di tali tecnologie, è indispensabile inoltre che vengano portate avanti attività di ricerca che forniscano una solida base scientifica per la corretta progettazione dei materiali e degli interventi di manutenzione e costruzione, nonché per una rigorosa valutazione delle prestazioni. Presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino sono state già intraprese numerose iniziative in tal senso.

Per quel che concerne il tronco pilota realizzato sulla circonvallazione Borgaro-Venaria, su cui ci si è ampiamente soffermati nel documento, sono state avviate le attività di monitoraggio pluriennale che riguarderanno le caratteristiche strutturali e funzionali, con una particolare attenzione alle prestazioni acustiche.

Nell'ambito del bando di finanziamento europeo LIFE+ è stato predisposto un progetto triennale, coordinato dalla Provincia di Torino, denominato "Development and Implementation of Innovative Sustainable Technologies for the Use of Scrap Tyre Rubber in Road Pavements (TYREC4LIFE)".
Il progetto, che oltre al Politecnico di Torino vede il coinvolgimento di imprese di costruzione e di Enti pubblici, ha individuato i seguenti quattro obiettivi:

- validazione delle attuali tecniche di impiego "wet" del polverino da PFU, con la contestuale individuazione di tipologie di miscele bituminose che possano considerarsi alternative rispetto a quelle codificate;
- valutazione del possibile utilizzo di aggregati di seconda scelta nelle miscele bituminose "wet";
- sviluppo di soluzioni tecnologiche che per la tecnologia "wet" conducano ad una riduzione del consumo energetico e delle emissioni ambientali;
- implementazione preliminare della tecnologia "dry".

Il progetto prevede altresì la realizzazione di ulteriori tronchi sperimentali di prova nella rete della Provincia di Torino e del Comune di Settimo Torinese (TO), sui quali è programmata una prima attività di monitoraggio che verrà successivamente portata avanti nel tempo per una valutazione sul campo delle effettive prestazioni sotto traffico.

Coerentemente con questa strategia di sviluppo, altre attività di studio sono state avviate con il supporto tecnico-economico di Ecopneus, con il quale è stato tra l'altro congiuntamente attivato presso il Politecnico di Torino il primo "Centro di Eccellenza per lo Studio dei Prodotti derivanti da PFU".
Presso il Cento di Eccellenza è stato istituito un servizio di certificazione dei prodotti derivanti da PFU destinati all'impiego nei conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali. La certificazione viene eseguita sui polverini che vengono in primo luogo sottoposti alle prove necessarie per la valutazione delle caratteristiche fisiche (granulometria e densità) e per la determinazione dei contenuti di metalli, di composti organici volatili (COV) e di idrocarburi policiclici aromatici (IPA). I polverini vengono quindi utilizzati per la preparazione, in laboratorio, di leganti bituminosi compositi che sono analizzati con riferimento alle caratteristiche reologiche. Queste ultime vengono messe a confronto con quelle del legante di base in modo da poter quantificare gli effetti determinati dall'addizione di polverino.

È stato infine avviato, con il finanziamento di Ecopneus, un programma di ricerca quadriennale denominato "Scienza e tecnologia dei leganti e conglomerati bituminosi contenenti polverino da PFU (POLIPNEUS)" avente il principale obiettivo di contribuire ad ampliare le conoscenze relative all'impiego del polverino da PFU nelle pavimentazioni stradali. In particolare, le indagini previste riguarderanno:

- il consolidamento delle conoscenze riguardanti le miscele bituminose prodotte con tecnologia "wet";
- lo studio di dettaglio della tecnologia "dry", con la contestuale messa a punto di Norme Tecniche che possano governarne l'applicazione su vasta scala;
- lo studio delle potenzialità della tecnologia "terminal blend".

In parallelo alle su citate attività di studio, allo scopo di promuovere il trasferimento delle più aggiornate conoscenze verranno organizzati seminari e corsi di formazione per tecnici di Imprese, Società di progettazione ed Amministrazioni. Verrà inoltre svolta una azione di coordinamento e di supervisione scientifica dei vari programmi di ricerca promossi da Ecopneus in modo tale da poterli coerentemente collocare in un quadro di riferimento unitario.

Bibliografia

Riferimenti di carattere generale

Abdelrahman, M.A., Carpenter, S.H., “The mechanism of the interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier (CRM)”, *Transportation Research Record*, n.1661, 1999.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), “TLVs and BEIs”, *ACGIH Publication 0112*, Cincinnati, OH, U.S.A., 2012.

American Society for Testing and Materials, ASTM, *Standard specification for asphalt rubber binder - ASTM D6114/D6114M-09*, West Conshohocken, PA, U.S.A., 2009.

Bahia, H.U., Davis, R., “Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders”, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, vol.63, 1994.

Bressi, G., Rollando, F., “Utilizzo del polverino da pneumatici fuori uso nelle pavimentazioni stradali e in altri settori”, *Rapporto 96/01*, Istituto per l’Ambiente, Roma, 1996.

California Pavement Preservation Center, “Evaluation of terminal blend rubberized asphalt in paving applications”, *Report CP2C-2010-102TM*, Chico, CA, U.S.A., 2010.

CONCAWE, “Bitumens and bitumen derivatives”, *Product dossier 92/104*, Brussels, Belgium, 1992.

Decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152, “Norme in materia ambientale”, Roma, 2006.

Epps, J.A., “Uses of recycled rubber tyres in highways”, *NCHRP Report - Synthesis of Highway Practice 198*, TRB National Research Council, Washington, D.C., U.S.A., 1994.

Federal Highway Administration of United States (FHWA), “Crumb rubber modifier. Design procedures and construction practices”, *Publication FHWA-SA-93-011*, Washington, D.C., U.S.A., 1993.

Heitzman, M.A., “State of the practice - Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier”, *Report FHWA-SA-92-022*, Washington, D.C., U.S.A., 1992.

Heitzman, M.A., “Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier”, *Transportation Research Record*, n.1339, 1992.

Hicks, R.G., Lundy, J.R., Leahy, R.B., Hanson, D., Epps, J., “Crumb rubber modifiers (CRM) in asphalt pavements: summary of practices in Arizona, California and Florida”, *Report FHWA-SA-95-056*, Washington, D.C., U.S.A., 1985.

Hicks, R.G., Epps, J.A., *Quality control for asphalt rubber binders and mixes*, Rubber Pavements Association, Tempe, AZ, U.S.A., 2000.

Hicks, R.G., *Asphalt rubber design and construction guidelines. Volume 1 -Design guidelines*, Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRACTC) – California Integrated Waste Management Board (CIWMB), Sacramento, CA, U.S.A., 2002.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), “Health effects of occupational exposure to asphalt”, *DHH (NIOSH) Publication 2001-110*, Cincinnati, OH, U.S.A., 2001.

State of California Department of Transportation (Caltrans), “Asphalt rubber usage guide”, Sacramento, CA, U.S.A., 2003.

State of California Department of Transportation (Caltrans), “Synthesis of Caltrans rubberized asphalt concrete projects”, Sacramento, CA, U.S.A., 2005.

State of California Department of Transportation (Caltrans), “Use of scrap tire rubber. State

of the technology and best practices", Sacramento, CA, U.S.A., 2005.
State of California Department of Transportation (Caltrans), "Maintenance Technical Advisory Guide. Volume I – Flexible pavement preservation", Sacramento, CA, U.S.A., 2007.
Stonex, A., Carusone, J.M., "Development of mix-design procedures for gap-graded asphalt-rubber asphalt concrete", *Final Report 524*, Arizona Department of Transportation, Phoenix, AZ, U.S.A., 2007.
Stroup-Gardiner, M., Kurts, N., Epps, J.A., *Comparison of mix-design methods for asphalt-rubber concrete mixtures*, Asphalt Rubber Producers Group, Washington, D.C., U.S.A., 1992.
Widyatmoko, I., Elliot, R., "A review of the use of crumb rubber modified asphalt worldwide", *WRAP Project TYR032*, UK, 2008.

Esperienze e ricerche in Italia

Agostinacchio, M., Ciampa, D., Diomedi, M., Olita. S., "Asphalt concrete mixtures with tyre rubber granulate", 5th International Conference "*Bituminous Mixtures and Pavements*", Thessaloniki, Greece, 2011.
Antunes, I., *Asphalt rubber - Studio della reologia del bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Parma, 2006.
Antunes, I., Giuliani, F., Sousa, J.B., Way, G., "Asphalt rubber: bitume modificato con polverino di gomma di pneumatici riciclata", *5th VARIREI International Congress*, L'Aquila, Italia, 2005.
Asphalt Rubber Italia, *Norme tecniche. Conglomerati bituminosi tipo asphalt rubber (metodo wet) – "gap-graded" e "open-graded"*, 2012.
Canestrari, F., Pasquini, E., Santagata, F.A., Antunes, I., "Asphalt Rubber: policy disclosure in Italy", *Asphalt Rubber 2009 Conference*, Nanjing, China, 2009.
Celauro, B., Celauro, C., Di Francisca, A., "Studio sperimentale sull'impiego di CRM (Crumb Rubber Modifier) nei conglomerati bituminosi secondo processo dry", *XIII Convegno Nazionale SIIV*, Padova, Italia, 2003.
Celauro, B., Celauro, C., Di Francisca, A., Giuffrè, O., "Effect of the construction process on the performances of asphalt paving mixes with crumb rubber from scrap tires", *3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Vienna, 2004.
D'Andrea, A., Mariotti, T., "Asphalt mixes containing crumb rubber - 1ª parte", *Rassegna del Bitume*, n.39/01, 2001.
D'Andrea, A., Mariotti, T., "Asphalt mixes containing crumb rubber - 2ª parte", *Rassegna del Bitume*, n.40/02, 2002.
D'Andrea, A., Loisi, T., Urbani, L., "Fenomeni vibratori da traffico stradale in presenza di strati con granulato di gomma", *XVI Convegno Nazionale SIIV*, Campus di Arcavacata di Rende (CS), Italia, 2006.
De Ferrariis, L., Madella, A., Simone, A., "Conglomerato bituminoso con granulato di gomma per pavimentazioni stradali anti-vibranti", *Le Strade*, n. 1406, 2005.
Giuliani, F., Merusi, F., "Il ruolo dei bitumi modificati con polverino di pneumatico riciclato nel ripristino funzionale delle pavimentazioni soggette a fenomeni di ormaiamento", *XVI Convegno Nazionale SIIV*, Campus di Arcavacata di Rende (CS), Italia, 2006.
Giuliani, F., Merusi, F., "Advanced rheological characterization of non-reversible deformation and fatigue behavior in crumb rubber modified asphalt binders", Road Materials and Pavement Design, vol.11, 2010.
Lo Presti, D., *Rheology and curing of tyre rubber modified bitumens*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Palermo, 2011.
Losa, M., Leandri, P., Bacci, R., "Mix design and performance evaluation of CRM-modified asphalt concrete mixtures", *5th International Conference "Bituminous Mixtures and Pavements"*,

Thessaloniki, Greece, 2011.
Losa, M., Leandri, P., Cerchiai, M., “Improvement of pavement sustainability by the use of crumb rubber modified asphalt concrete for wearing courses”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol.5(6), 2012.
Losa, M., Leandri, P., Rocchio, P., “Crumb rubber modified asphalt concrete for low noise surfaces”, *Asphalt Rubber 2012 Conference*, Munich, Germany, 2012.
Madella, A., De Ferrariis, L., Simone, A., “Traffic-induced ground vibrations reduction through an innovative binder course with recycled crumb rubber”, Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, CA, U.S.A., 2006.
Merusi, F., *Metodi reologici avanzati per l’analisi del comportamento dei bitumi stradali negli stati critici di esercizio*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Parma, 2009.
Partl, M.N., Pasquini, E., Canestrari, F., Virgili, A., “Analysis of water and thermal sensitivity of open graded AR mixtures”, *Construction and Building Materials*, vol.24(3), 2010.
Pasetto, M., Baldo., N., “Use of crumb rubber in hot-mixed asphalt made by the dry process: mechanical characterization and performance evaluation”, *6th VARIREI International Congress*, L’Aquila, Italia, 2007.
Pasetto, M., Baldo, N., “Mechanical properties of porous asphalt modified with road tyre rubber using the dry process”, *5th International Conference “Bituminous Mixtures and Pavements”*, Thessaloniki, Greece, 2011.
Pasquini, E., Canestrari, F., Ferrotti, G., Santagata, F.A., Serpilli, F., “Acoustic characterization of asphalt rubber mixtures in Italy”, *Internoise2010, 39th International Congress on Noise Control Engineering*, Lisbon, Portugal, 2010.
Pasquini, E., Canestrari, F., Cardone, F., Santagata, F.A., “Performance evaluation of gap graded asphalt rubber mixtures”, *Construction and Building Materials*, vol.25(4), 2011.
Pasquini, E., Canestrari, F., Santagata, F.A., “Durability assessment of asphalt rubber mixtures”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 5(4), 2012.
Santagata, E., Zanetti, M.C., “Valutazione dei possibili utilizzi nelle pavimentazioni stradali del polverino proveniente da pneumatici fuori uso”, *Rapporto Finale*, Provincia di Torino, 2011.
Santagata, E., Dalmazzo, D., Lanotte, M., Zanetti, M.C., Ruffino, B., “Relationship between crumb rubber morphology and asphalt rubber viscosity”, *Asphalt Rubber 2012 Conference*, Munich, Germany, 2012.
Santagata, E., Riviera, P.P., Dalmazzo, D., Lanotte, M., Zanetti, M.C., Fiore, S., Ruffino, B., “Design and construction of a full-scale test section with asphalt rubber gap-graded wearing course mixture”, *5th International SIIV Congress*, Roma, Italia, 2012.
Santagata, F.A., Canestrari, F., Pasquini, E., “Mechanical characterization of asphalt rubber wet process”, *4th International SIIV Congress*, Palermo, Italia, 2007.
Santagata, F.A., Antunes, I., Canestrari, F., Pasquini, E., “Asphalt Rubber: primeiros resultados em Itália”, *Estrada 2008, V Congresso Rodoviário Português*, Estoril, Portugal, 2008.
Santagata, F.A., Canestrari, F., Pasquini, E., “Controllo della produzione, verifica della produzione e predisposizione di norme tecniche di capitolato per miscele di conglomerato bituminoso tipo asphalt rubber”, *Rapporto Finale*, Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale ed Aeroportuale (CIRS), 2009.
Santagata, F.A., Cardone, F., Canestrari, F., Bahia, H.U., “Modified PATTI test for the characterization of adhesion and cohesion properties of asphalt binders”, MAIREPAV6, *6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Torino, Italia, 2009.
Zanetti, M.C., Fiore, S., Ruffino, B., Santagata, E., “End of life tyres: crumb rubber physical and chemical characterization for reuse in paving applications”, *Sardinia 2011, 13th International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula (CA), Italia, 2011.

06

ecopneus

il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi

Ecopneus Scpa
Via Messina, 38 Torre B
20154 Milano
Tel.: +39 02.92.970.1
Fax.: +39 02.92.970.299
E-mail: info@ecopneus.it
Web: www.ecopneus.it