

*Università Degli Studi di Padova*

*- Facoltà di Ingegneria -*

*DIPARTIMENTO DI COSTRUZIONI E TRASPORTI (DCT)*



*- Tesi di Laurea di I Livello del Corso di Studio in Ingegneria Civile -*

*“Materiali e tecniche innovative per la costruzione ed il ripristino  
delle infrastrutture viarie”*

*Allievo Ingegnere Civile Matteo Convertino*

*Matricola 478006 – IC –*

*Relatore Prof. Ing. Marco Pasetto*

*Anno Accademico 2003 / 2004*



## INDICE

<b>(0) PREMESSA.</b> .....	<b>pag. 4</b>
<b>(1) LEGANTI BITUMINOSI INNOVATIVI.</b> .....	<b>8</b>
<b>(1.a) Bitumi flussati, o liquidi, o cut-backs.</b> .....	<b>8</b>
<b>(1.b) Bitumi soffiati, o ossidati.</b> .....	<b>10</b>
<b>(1.c) Bitumi modificati (PMB):</b> .....	<b>12</b>
– Prestazioni del PE vergine e del PE di recupero (casi studio DK, Malaysia, USA); .....	<b>13</b>
– Prestazioni dello SBR in campo aeroportuale (casi studio Aviano, Verona, Lamezia Terme). .....	<b>19</b>
<b>(1.d) Emulsioni bituminose, o oil water (OW):</b> .....	<b>26</b>
– Il lattice di polimero; .....	<b>28</b>
– La tecnica a freddo nella costruzione e nel ripristino. ....	<b>29</b>
<b>(1.e) Bitumi schiumati, o foamed bitumens:</b> .....	<b>32</b>
– Bitume “Superfoam®” per il riciclaggio a freddo (caso studio E 78, Siena-Betolle). ....	<b>35</b>
<b>(1.f) Catrami modificati.</b> .....	<b>42</b>
<b>(1.g) Leganti polimerici:</b> .....	<b>44</b>
– Legante bituminoso colorato con ossido di ferro. ....	<b>45</b>
<b>(2) AGGREGATI INNOVATIVI.</b> .....	<b>48</b>
<b>(2.a) Argilla espansa in granuli:</b> .....	<b>48</b>
– Microtappeti antiskid con argilla espansa, esperienza della A 21 TO-BS; .....	<b>51</b>
– Costruzione di rilevati stradali alleggeriti, totalmente o parzialmente compensati; .....	<b>52</b>
– Cenni alle pavimentazioni rigide con argilla espansa. ....	<b>53</b>
<b>(2.b) Fresato stradale di riciclo (RAP):</b> .....	<b>53</b>
– Il riciclaggio a freddo. ....	<b>54</b>
<b>(2.c) Aggregati di riciclo:</b> .....	<b>60</b>
– Produzione di aggregati leggeri da materiali di scarto dei processi produttivi (progetto LIFE LAW); .....	<b>60</b>
– Utilizzo di materiali riciclati da costruzioni e demolizioni (C&D) anche in ambito stradale (progetto NETWORK RECY); .....	<b>61</b>
– Processo di consolidamento dei materiali coesivi attraverso diagenesi e laterizzazione, per la realizzazione di sottofondi stradali (progetto EUREKA HARD ROAD). ....	<b>64</b>
<b>(3) ADDITIVI INNOVATIVI.</b> .....	<b>68</b>
<b>(3.a) Attivanti chimico funzionali (ACF), o rigeneranti:</b> .....	<b>68</b>
– Rigenerazione a caldo di conglomerati bituminosi in impianti semoventi. ....	<b>69</b>
<b>(3.b) Attivanti di adesione.</b> .....	<b>70</b>
<b>(3.c) Fibre vetrose, di cellulosa, metalliche, polimeriche:</b> .....	<b>71</b>

– Microtappeto a freddo “Fibroseal®” con fibre vetrose; .....	72
– Fibre vetrose di riciclo (progetto WBRM): .....	73
· TNT; .....	75
· Polimeri GFRP; .....	76
· Conglomerati bituminosi fibrorinforzati (FRBC); .....	76
· Calcestruzzo GFRC. ....	77
– Fibre di cellulosa. ....	78
<b>(3.d) Additivi “fluidificanti”:</b> .....	79
– Gli additivi organici: le cere paraffiniche (sintesi FT); .....	79
– Gli additivi inorganici: zeoliti naturali ed artificiali; .....	81
– Il metodo WAM per la riduzione della temperatura di miscelazione e stesa. ....	82
<b>(3.e) Polvere e granulato di pneumatici usati:</b> .....	84
– Processo Dry, rassegna dei risultati delle sperimentazioni; .....	87
– Processo Wet, rassegna dei risultati delle sperimentazioni; .....	87
– Pavimentazioni antivibranti, cenni ai metodi di smorzamento delle vibrazioni. ....	89
<b>(4) PRODOTTI COMPLEMENTARI INNOVATIVI.</b> .....	92
<b>(4.a) Reti elettrosaldate per le pavimentazioni flessibili:</b> .....	92
– Il progetto REFLEX: .....	92
· Analisi benefici-costi; .....	93
· Studio particolare del problema ormaiamento; .....	94
· Caso studio strada provinciale in località Salmastro (UD); .....	97
· Caso studio autostrada A 23, tratto Palmanova-Udine. ....	98
<b>(4.b) Geoweb.</b> .....	101
<b>(4.c) Geogriglie, tessuti non tessuti, geomembrane:</b> .....	102, 104, 106, 107
– Cenni alle geogriglie metalliche a semplice o doppia torsione; .....	104
– TNT termosaldati a filamento continuo precompressi; .....	107
– Membrane impermeabilizzanti (armate) / mani d’attacco SAM e SAMI. ....	108, 109
<b>(4.d) Materiali e tecniche di sigillatura delle fessure:</b> .....	109
– Analisi della fessurazione; .....	110, 111
– Sigillatura e riempimento a caldo: .....	111
· Il mastice d’asfalto. ....	111
– Sigillatura a freddo: .....	112
· Nastrini preformati adesivi in PMB. ....	112, 113
<b>(4.e) Materiali innovativi per la segnaletica orizzontale.</b> .....	114
<b>(5) CONSIDERAZIONI FINALI ED INNOVAZIONI DI RICERCA.</b> .....	116
<b>(6) BIBLIOGRAFIA.</b> .....	118

## (0) PREMESSA

Nel 1900 esistevano in Italia 326 automobili che circolavano su una rete stradale del tutto impreparata all'avvento di questo nuovo mezzo. Le auto erano già diventate 118.000 nel 1925 e mezzo milione nel 1950 (oltre un milione se si considera tutto il parco veicoli, includendo motoveicoli, macchine agricole, macchine operative, autobus e varie). Alla fine del 1960 i mezzi in circolazione raggiunsero la cifra di cinque milioni e settecentomila, determinando sulle strade condizioni di disagio, pericolosità e saturazione, insostenibili in alcune direttrici di maggior traffico. Lo sforzo fatto dal paese Italia in quegli anni riuscì a far fronte a questa situazione, grazie allo sviluppo della rete autostradale e dei relativi collegamenti secondari.

Oggi la situazione appare molto più tragica di quanto non fosse alla fine degli anni '50. I veicoli circolanti hanno raggiunto l'impressionante cifra di 40.7 milioni, con un tasso di motorizzazione medio pari a 600 autovetture su 1000 abitanti e una densità di traffico di 85 unità per chilometro (la più alta in Europa).

Siamo attualmente nella cosiddetta fase di saturazione del mercato, o III fase riscontrabile nella *curva logistica* che descrive l'andamento del tasso di motorizzazione nel tempo; da sottolineare, "saturazione" significa che le vendite continuano ad esserci ma costituiscono solamente un ricambio fisiologico del parco macchine circolante. Il problema della congestione delle strade ci accomuna con molti altri Stati europei; questo però non è motivo di rallegramento. Congestione significa maggiore probabilità di incidenti, con tutte le conseguenze (anche economiche, oltre che luttuose) che ne derivano. Trovare una soluzione semplice e indolore non è facile. L'Unione Europea non sembra intenzionata a incoraggiare la costruzione di nuove strade per risolvere il problema della mobilità, anche se sappiamo bene che non sempre il potenziamento della rete infrastrutturale viaria implica una maggiore efficienza e l'equilibrio *user optimal* è diverso dall'assetto *system optimal*.

La ferrovia, soprattutto nel nostro paese con i suoi 16.000 km circa di sviluppo totale, non è però in grado nel breve periodo di assorbire una parte cospicua del traffico delle merci, che sovraccarica oggi le nostre strutture stradali. Per il momento, in attesa di qualche miracoloso e improbabile evento, si devono fare tutti gli sforzi possibili per migliorare e potenziare l'esistente rete stradale, soprattutto nelle zone più "calde" seguendo il criterio della *promiscuità regolata* per le strade esistenti, e quello della *specializzazione* per le nuove strade secondo le norme del D.M. 05/11/2001.

### **Al problema non facile della gestione del traffico consegue il problema di come costruire le infrastrutture viarie e ripristinarle, quindi bisogna domandarsi quali materiali utilizzare e quali tecniche adottare.**

Le attuali esigenze di salvaguardia dell'ambiente hanno sempre più indirizzato gli sforzi dei progettisti alla realizzazione di opere che possano coesistere in armonia con l'ambiente circostante.

Lo sforzo dei progettisti e dei costruttori di infrastrutture stradali è fortemente orientato verso l'individuazione di adeguati criteri progettuali, di tecnologie costruttive e dei relativi controlli di accettazione e di produzione che possano garantire la mitigazione di fenomeni indesiderati e/o nocivi per l'ambiente, ma al tempo stesso che garantiscano migliori *performance*.

Il raggiungimento di questi obiettivi dipende, in particolare, da un appropriato impiego dei materiali sia tradizionali sia innovativi, da un corretto dimensionamento delle strutture delle pavimentazioni e da una manutenzione adeguatamente programmata che ne garantisca la conservazione.

I rapporti tra ambiente – strada e materiali stradali sono numerosi, complessi e di stringente attualità. Occorre inoltre considerare che i materiali stradali negli ultimi anni hanno subito una notevole evoluzione per fare fronte alle sempre maggiori richieste di prestazioni; a ciò si sono aggiunte le istanze derivanti dalle nuove e più moderne procedure di "progettazione integrata" delle infrastrutture viarie.

In quest'ottica il documento di fattibilità ambientale (SIA) e la valutazione di impatto ambientale (VIA) diventano degli strumenti progettuali dotati non solo di una propria coerenza interna, ma costruiti insieme al progetto che diventa il primo e principale strumento per la minimizzazione degli impatti.

La tutela dell'ambiente non è più vista come un qualche documento da allegare al progetto, ma ne diventa parte integrante, ne costituisce il principio ispiratore.

Con queste premesse si possono quindi subito identificare due diversi campi di studio e ricerca fra di loro collegati, dalle interrelazioni che intercorrono fra conglomerati bituminosi e tutela dell'ambiente: il primo fa

riferimento alla “micro-scala” tipica dell’ambiente attraversato dall’infrastruttura viaria e più in generale alla ecocompatibilità del moto ed alle caratteristiche funzionali delle pavimentazioni, il secondo invece, si riferisce in scala più ampia (“macro-scala”) direttamente all’impatto sull’ambiente e sulle risorse disponibili della costruzione, gestione e manutenzione della pavimentazione stradale, da prevedere, valutare e minimizzare in fase progettuale.

Al livello di “micro-scala” non si hanno impatti in assenza di traffico, la ecocompatibilità del moto è infatti direttamente collegata alla presenza sulla strada dei veicoli. A livello di “macro-scala” invece gli impatti dei conglomerati bituminosi sull’ambiente prescindono dalla presenza di traffico.

Per meglio chiarire il primo dei due ambiti di studio è opportuno definire i principali parametri prestazionali richiesti ai conglomerati bituminosi ed ai tappeti superficiali in particolare (Fig. 1).

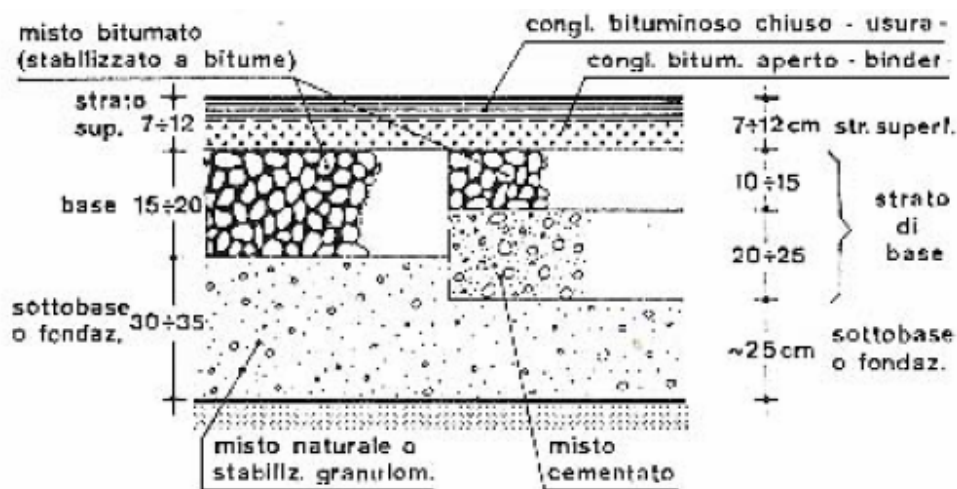


Fig. 1. Strati della pavimentazione stradale flessibile.

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

- **Portanza**, definita in termini di resistenza strutturale e di adeguata risposta deformativa ai carichi di traffico. Essa è strettamente connessa alla *vita utile* della pavimentazione. Con riferimento ai conglomerati bituminosi, la caratteristica prestazionale deve essere in grado di valutare e stimare il comportamento meccanico-reologico della miscela in opera ed il mantenimento nel tempo delle proprietà di resistenza;
- **Aderenza**, parametro fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza della circolazione e collegato direttamente alle caratteristiche compositive del conglomerato ed alla tessitura superficiale;
- **Regolarità**, rappresenta la capacità della sovrastruttura di fornire un piano carrabile uniforme dal punto di vista geometrico, con riferimento agli obiettivi di sicurezza e comfort di marcia, collegata alle caratteristiche di portanza della pavimentazione e resistenza strutturale del conglomerato;
- **Drenabilità**, anch’essa connessa alle esigenze di sicurezza e dipendente dalla composizione delle miscele di conglomerato bituminoso utilizzate;
- **Visibilità**, funzione del colore e delle caratteristiche di assorbimento della luce del materiale costituente il tappeto superficiale e anch’essa strettamente collegata agli obiettivi di sicurezza.

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

- **Rumore**, in termini di definizione e certificazione delle qualità acustiche dei conglomerati bituminosi e di studio delle caratteristiche compositive più idonee per la minimizzazione dello stesso in fase di generazione e di massimizzazione dell'assorbimento in fase di propagazione;
- **Vibrazione**, in termini di minimizzazione del contributo della superficie, e dei materiali componenti la pavimentazione, al fenomeno di generazione di vibrazioni ed esaltazione degli effetti di smorzamento nei processi di propagazione attraverso la piattaforma stradale;
- **Resistenza al rotolamento**, in termini di minimizzazione dei consumi di carburante e di pneumatici per giungere ad una riduzione dei costi per l'utenza e degli impatti sull'ambiente.

Tutti e tre i parametri sono direttamente collegati all'ambiente ed alla sua tutela a livello di micro-scala, così come definito in precedenza.

Con un adeguato ed attento studio della miscela che porti ad una valutazione della tessitura superficiale e delle caratteristiche di fonoassorbimento del materiale è già oggi possibile dare delle risposte tecniche adeguate alle rinnovate esigenze di tutela ambientale.

Accanto alle richieste di riduzione del rumore e delle vibrazioni e di minimizzazione degli impatti sull'ambiente del traffico veicolare (micro-scala) occorre anche considerare il livello superiore (macro-scala) connesso alle esigenze di salvaguardia ambientale e di "progettazione integrata" dell'infrastruttura come già accennato in precedenza.

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

Nel corso degli ultimi cinquant'anni le infrastrutture, in modo particolare le vie di comunicazione, hanno conosciuto uno sviluppo senza precedenti. Molte di esse sono in uso da oltre vent'anni e, avendo raggiunto il limite della loro vita utile, necessitano di crescenti interventi di manutenzione volti a mantenere livelli accettabili di servizio.

Inoltre, negli anni, la quantità media di automezzi è aumentata in modo costante: il derivante incremento del traffico e delle sollecitazioni dovute ai veicoli, il maggiore carico per asse e "l'età avanzata" sono tutti fattori che concorrono al deterioramento delle pavimentazioni stradali; per affrontare i problemi ad esso connessi sta diventando sempre più diffusa la tecnica del riciclaggio delle pavimentazioni flessibili.

Le motivazioni che sostengono la necessità di riciclare sono molteplici e tutte parimenti importanti dal punto di vista della tutela ambientale, come ben sintetizzano le linee generali dello studio OCSE pubblicato nel 1997:

- Riduzione dell'impiego delle materie prime;
- Riduzione delle aree da destinare a discarica;
- Contenimento dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera dovuto al trasporto dei rifiuti;
- Conservazione dell'energia;
- Convenienza economica;
- Vantaggi tecnici.

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

Per entrambi gli ambiti di studio descritti le esperienze tecniche e le novità scientifiche sono molteplici, le correlazioni fra materiali stradali in generale e conglomerati bituminosi in particolare ed ambiente sono infatti numerosissime. Per questo motivo nella presente trattazione ci limiteremo a descrivere le principali e più recenti esperienze svolte sull'argomento.





## **(1) LEGANTI BITUMINOSI INNOVATIVI**

Con il termine generale di “leganti bituminosi innovativi” si comprendono tutti quei leganti organici bituminosi presenti attualmente nel mercato che per caratteristiche fisico-chimiche si discostano dai leganti bituminosi classici, solidi o semisolidi a temperatura ambiente. Ad esempio vedremo i leganti bituminosi modificati con polimeri naturali o sintetici (PMB), e i bitumi flussati liquidi a temperatura ambiente.

L’innovazione modificante dei leganti bituminosi può comportare variazioni chimiche temporanee o permanenti nel tempo, variazioni nel comportamento fisico-meccanico-reologico momentanee o durature, o entrambe.

E’ importante sottolineare che la modifica per tutti i leganti bituminosi innovativi avviene per assimilazione delle proprietà dell’agente modificante da parte del bitume, e non indirettamente nella eventuale fase successiva di miscelazione a caldo o a freddo con gli aggregati per la formazione del conglomerato bituminoso; si dovrebbe più propriamente parlare quindi di *conglomerato di bitume modificato*, anziché conglomerati bituminosi modificati.

Fanno eccezione i cosiddetti *conglomerati migliorati* offerti da alcune imprese nei quali il polimero viene aggiunto a valle durante l’impasto, mescolando assieme aggregati, bitume e polimeri; le prestazioni di questi conglomerati sono inferiori a quelle dei PMB e leggermente superiori a quelli dei conglomerati bituminosi normali. Si citano anche i *conglomerati bituminosi fibrinforzati* (FRBC) con fibre metalliche (in genere d’acciaio, della lunghezza di 2 cm e diametro di qualche decimo di millimetro), fibre polimeriche (PVAC, PAN, PP), fibre vetrose.

I leganti bituminosi innovativi sono stati introdotti per migliorare le caratteristiche del legante in considerazione soprattutto della sua elevata suscettibilità termica, e per consentire applicazioni non possibili con materiali tradizionali.

### **(1.a) BITUMI FLUSSATI, O LIQUIDI, O CUT BACKS**

#### Caratteristiche

Sono bitumi di petrolio (ottenuti industrialmente per distillazione da greggi petroliferi) resi sufficientemente fluidi per essere messi in opera senza riscaldamento o con moderato riscaldamento, grazie all’aggiunta effettuata in raffineria di solventi volatili di distillazione a lenta evaporazione (benzine, oli di distillazione del catrame, aromatici in genere). L’averne un bitume liquido a temperatura ambiente ne consente l’impiego senza la necessità di riscaldarlo, evitando quindi caldaie, combustibili e tutte le complicazioni impiantistiche necessarie a tenerlo almeno a 100 °÷120 °C il che causerebbe l’emissione di fumi. Il bitume liquido può essere spruzzato o steso a rullo-pennello con estrema facilità: con l’evaporazione rapida dei solventi, il prodotto si rapprende e solidifica svolgendo la funzione di collante e impermeabilizzante (il supporto deve essere ben asciutto altrimenti la capacità di adesione risulta ridotta).

Questi prodotti offrono tutti i vantaggi propri sia dei procedimenti a caldo sia di quelli a freddo: infatti specie nei trattamenti superficiali, l’applicazione del bitume puro ad una temperatura di 180 °÷200 °C (temperatura di miscelazione) costituisce un’operazione delicata, che può dar luogo a superfici troppo ricche di bitume. Ciò può accadere specialmente sul finire dell’estate, quando è difficile ottenere la completa saturazione del bitume a mezzo di pietrischetto o graniglia di copertura; nell’estate successiva si può quindi verificare un trasudamento di bitume, che deve essere saturato con nuovo spandimento di materiale da copertura.

La temperatura di applicazione di un bitume liquido deve però mantenersi al di sotto di 120°C, per evitare che evaporino i solventi in esso contenuti e venga posto in opera un bitume solido insufficientemente riscaldato.

Devono possedere i requisiti di cui alle “Norme per l’accettazione dei bitumi liquidi per usi stradali” – Fascicolo n. 7 – Ed. 1957 del C.N.R. (tab. 1, incompleta): vengono designati con la sigla BL e con una coppia di numeri relativi al tempo di uscita dal viscosimetro Redwood; più bassi sono questi numeri più fluido è il bitume, minore è la sua viscosità.

Le principali prove di accettazione dei bitumi liquidi sono due: la prova di viscosità e la prova di adesione.

### Prova di viscosità

Si esegue con il “viscosimetro di Redwood”, costituito da un contenitore con foro di efflusso del diametro di 10 mm e dove il campione viene colato sino allo stato fluido. Il tutto è contenuto in un bagno termostatico a +25 °C e con un contasecondi viene rilevato il tempo necessario affinché defluiscano 50 cm<sup>3</sup> di prodotto. E' una prova tipica dei catrami e ne consente la suddivisione in classi.

### Prova di adesione

Molto importante per tutti gli impieghi in cui il bitume deve svolgere la funzione di collante su supporti diversissimi (dalla muratura alla ghiaia), è fondamentale negli impieghi stradali, per cui la prova viene eseguita sia su rocce di origine vulcanica, da preferire per la pavimentazioni, come il granito di San Fedelino (a comportamento idrofobo e costituente anche il materiale di riferimento per la prova di attrito radente con il tribometro mirata a valutare la resistenza all'usura degli aggregati) sia di origine sedimentario-metamorfica come il marmo di Carrara (a comportamento idrofilo). La prova consiste nel produrre la separazione per taglio di due provini, 5x2x2 cm, precedentemente spalmati in superficie con un film di bitume in quantità totale di 80 mg, fatti aderire e raffreddare fino a temperatura ambiente (20 °C ca.). Per controllare l'effetto dell'umidità sui supporti, la prova viene eseguita anche su provini inumiditi.

La tabella sottostante contenuta nella norma C.N.R. per i bitumi liquidi è incompleta in quanto si riportano solamente i dati relativi alle due prove descritte.

Caratteristiche	Classi dei bitumi liquidi (BL)				
	BL 0/1	BL 5/15	BL 25/75	BL 150/300	BL 350/700
<b>Viscosità Redwood (25 °C)</b>					
foro di 10 mm (s)	-	5 - 15	25 - 75	150 - 300	350 - 700
foro di 4mm (s)	max 30	-	-	-	-
<b>Adesione minima</b>					
Granito di San Fedelino					
asciutto (0,1N/mm <sup>2</sup> =1kgf/cm <sup>2</sup> )	2,50	2,75	2,75	2,75	3,00
bagnato	1,10	1,25	1,25	1,25	1,25
Marmo di Carrara					
asciutto	2,30	2,50	2,50	2,50	2,75
bagnato	-	-	-	-	-

Tab. 1: Classificazione C.N.R. dei bitumi liquidi per usi stradali.

Si riporta la scheda tecnica delle caratteristiche di un additivo studiato per abbassare la viscosità dei bitumi. Il suo utilizzo è particolarmente indicato per la produzione di emulsioni bituminose, in quanto l'aggiunta di tale flussante al bitume facilita il processo di emulsionamento.

Il prodotto considerato è una miscela di oxo-alcogli ed idrocarburi.

### **SPECIFICHE**

Aspetto:	liquido
Colore:	chiaro
pH:	N.A.
Densità a 15 °C:	0.86/0.96 kg/dm <sup>3</sup>
Punto ebollizione:	180 °C

Viscosità a 20 °C:	1.5 °E
Punto infiammabilità:	80 °C
Temp. Autoaccensione:	>200 °C
Proprietà esplosive:	Nessuna
Solubilità in acqua:	Insolubile

Il dosaggio dell'additivo varia in funzione del tipo di bitume utilizzato, dal tipo di emulsione che si vuole produrre e dal tipo di processo di emulsionamento utilizzato. Indicativamente il dosaggio può variare dal 1% al 5%. In commercio è venduto in fusti da 170/200 kg.

### Usi

Le applicazioni principali dei bitumi liquidi in ambito stradale sono di impregnazione e di stabilizzazione delle terre in posto, variano in funzione della loro classe e sono rispettivamente:

- Il BL 0/1 viene impiegato per trattamenti di impregnazione su massicciate molto chiuse e ricche di elementi fini o su strutture di terra stabilizzata meccanicamente;
- Il BL 5/15 e il BL 25/75 si impiegano per l'impregnazione di massicciate pure ricche di elementi fini ma non molto chiuse;
- Il BL 350/700 si usa per trattamenti superficiali, di semipenetrazione e per la preparazione di conglomerati bituminosi a freddo;
- Il BL 150/300 si impiega in luogo del BL 350/700, e per gli stessi scopi, nelle stagioni fredde in quanto più fluido.

### **(1.b) BITUMI SOFFIATI, O OSSIDATI**

#### Caratteristiche

Si tratta di bitumi sottoposti in raffineria ad aerazione per insufflazione d'aria per alcune ore mentre si trovano allo stato liquido, a caldo. Una parte dei componenti viene in tal modo ossidata. Ne risulta un bitume più viscoso, più resistente al rammollimento e che col tempo modificherà la sua viscosità in misura inferiore, in quanto meno sensibile all'ossigeno atmosferico e quindi all'invecchiamento. L'insufflaggio di aria arricchisce il bitume di asfalteni i quali costituiscono la frazione più pesante delle parti di cui è composto il legante.

Il bitume infatti invecchia anche abbastanza rapidamente: con ciò si intende quella perdita di plasticità causata dai processi ossidativi dovuti all'ossigeno (l'ozono è ancor più pericoloso); l'ossigeno favorisce la formazione di legami polari negli idrocarburi che compongono il bitume, questi ultimi sono responsabili dell'aumento delle forze di attrazione intermolecolare e di conseguenza della rigidità che colpisce il prodotto rendendolo fragile e facendogli perdere la sua più importante qualità: la plasticità. All'ossidazione si aggiunge l'evaporazione di solventi volatili (aromatici), l'azione dei raggi UV, il soleggiamento, l'acqua (a livello microscopico si è constatato che si formano emulsioni di acqua in bitume provocanti un calo della aderenza bitume – aggregato) e le inclemenze climatiche.

Parleremo più approfonditamente del processo di invecchiamento del bitume nella trattazione del “*fresato stradale*”, come materiale di riciclo innovativo per la costruzione di pavimentazioni stradali.

#### Prove di accettazione

Le prove di accettazione dei bitumi ossidati sono le stesse prove caratteristiche dei bitumi normali, con la differenza che gli intervalli di valori limite accettabili sono diversi.

Un provino di bitume ossidato è all'incirca equivalente ad un provino di bitume normale dopo la prova di volatilità (determinazione della perdita per riscaldamento) poiché questa determina un invecchiamento del bitume; i dati ricavati eseguendo misurazioni sul residuo della prova di volatilità vengono indicati come “valori dopo RTFOT”. Le prove principali eseguite su un campione ossidato sono la prova di penetrazione, la prova Fraass del punto di rottura, e la prova “pala e anello” del punto di rammollimento tese ad individuare le variazioni del comportamento fisico-meccanico-reologico del bitume. Il bitume ossidato presenta una

temperatura P&A maggiore, temperatura Fraass maggiore (minore in modulo), penetrazione minore, duttilità minore, viscosità maggiore; il campo di plasticità rimane pressoché invariato, è come se subisse una traslazione verso l'alto rispetto ad una ipotetica scala con origine nello zero termico.

Si riporta la tabella (Tab. 2) contenuta nelle “Norme per l'accettazione dei bitumi semisolidi per usi stradali” – Bollettino Ufficiale n. 68/1978 del C.N.R., al fine di confrontare i valori ammessi per bitume inalterato e bitume dopo la prova di volatilità, ad inizio ossidazione.

Caratteristiche		Classi dei bitumi semisolidi (B)					
		B 40/50	B 50/60	B 60/80	B 80/100	B 130/150	B 180/200
Campione vergine	Pen.cv 25 °C (dmm)	40 - 50	50 - 60	60 - 80	80 - 100	130 - 150	180 - 200
	P&A (°C)	51 - 60	48 - 56	45 - 54	44 - 49	40 - 45	37 - 42
	PFraass,max (°C)	-6	-7	-8	-10	-12	-14
	Viscosità Re.60 °C (Pa s)	100 - 200 variabile (per bitume distillato)					
Campione dopo RTFOT	Pen.co 25 °C (%Pen.cv)	60	60	60	60	60	60
	ΔP&A (°C)	max 5 °C					
	PFraass,max (°C)	-4	-5	-6	-7	-9	-11
	Δviscosità Re.60 °C (Pa s)	max 1000 (per bitume ossidato)					

Tab. 2: Classificazione C.N.R. dei bitumi semisolidi per usi stradali.

### Usi

I bitumi ossidati vengono utilizzati in rare applicazioni; gran parte della ricerca tecnologica è indirizzata verso l'ampliamento dell'intervallo di plasticità (o campo di plasticità;  $CP = T_{ramm.} - T_{rott.}$ ) per garantire un ottimo comportamento del legante bituminoso anche alle basse ed alte temperature critiche alle quali una pavimentazione si trova ad operare, oltre alle temperature standard di esercizio.

Facendo questo si riduce il pericolo di rottura fragile tipico nei mesi di gelo, la trasudazione del bitume con “annegamento” degli aggregati lapidei nella matrice bituminosa nei torridi mesi estivi, e l'ormaiamento ossia l'accumulo di deformazioni permanenti nelle “wheel paths”, anche se quest'ultimo fenomeno dipende anche dalla resistenza a taglio della miscela.

I bitumi soffiati, particolarmente fragili, vengono pertanto utilizzati maggiormente in paesi tropicali o comunque con climi molto caldi, nei quali la temperatura scende al di sotto dello zero di poco e raramente.

### **(1.c) BITUMI MODIFICATI, O PMB (BITUMEN MODIFIED WITH POLIMER)**

I bitumi modificati sono stati messi a punto compiutamente solamente negli anni '80, e tuttora il loro utilizzo non è così diffuso come sarebbe auspicabile, soprattutto in considerazione del fatto che i bitumi tradizionali cominciano a manifestare evidenti limiti di impiego, allorquando le condizioni di esercizio delle strutture richiedono leganti sempre più qualificati in senso prestazionale.

Gli agenti modificanti sono polimeri ad alto peso molecolare, compatibili, usati singolarmente o in combinazione tra loro, i quali conferiscono coesione e bassa suscettività termica al bitume al quale sono aggiunti. Essi vengono introdotti come polvere in stabilimento a 180 °C e non al momento dell'uso nell'impianto per i conglomerati.

In passato si è preferito modificare i catrami per la maggiore semplicità dell'operazione. L'adesione del bitume modificato, agli aggregati, può essere talora difficoltosa, pertanto si aggiungono all'impasto anche degli additivi, "dopes" adesivi, specifici per favorirla.

I polimeri possono essere naturali o sintetici (o resine di sintesi); tra i primi ricordiamo la gomma naturale (elastomero naturale, o polimero elastico, indicato NR) e la cellulosa, tra i secondi il polietilene PE (termoplastico vinilico, HDPE, LDPE, LLDPE, PE-X o reticolato), Il polipropilene atattico APP, l'etilenmetilacrilato EMA, l'etilene acetato di vinile EVA, e due gomme sintetiche o elastomeri termoplastici sintetici apparsi in forze agli inizi degli anni '80, lo stirene-butadiene-stirene SBS e lo stirene-butadiene-rubber (o a struttura radiale) SBR.

Resine epossidiche (EP, termoindurenti) di tipo particolare, non commerciali, sono compatibili con taluni bitumi, seppure con limiti di miscibilità e fragilità del prodotto; resine flessibilizzate sono più costose. Ricordiamo infine che lo stesso filler naturale (calcareo, dolomitico, asphaltico) o artificiale (cemento, calce idrata) utilizzato come riempitivo nella miscela dei conglomerati bituminosi degli strati neri (per l'usura in quantità del 6%÷12% sulla quantità di bitume usata, per il binder 4%÷8%, per la base 3%÷4.5%), ha anche la funzione di stabilizzante ossia riduce la sensibilità termica del legante idrocarburico.

Il bitume modificato presenta un maggiore intervallo di elastoplasticità, maggiore resistenza alle deformazioni, alla fatica e all'invecchiamento, maggiore adesione con gli inerti; accanto a queste proprietà positive vi è quella negativa dell'innalzamento della temperatura di miscelazione del conglomerato di bitume modificato, la quale raggiunge il valore di 190 °C o più, contro i 170 ÷ 180 °C di un conglomerato bituminoso normale. Questo aspetto è da non sottovalutare in quanto per via della richiesta di maggiore riscaldamento si produce una quantità maggiore di fumi inquinanti per l'ambiente e tossici per gli operatori.

#### Breve cronologia dell'impiego dei vari polimeri e del PE in particolare

La tecnologia dell'impiego di poliolefine, come additivo modificante del bitume, nasce e si sviluppa in Italia, nel settore delle membrane impermeabilizzanti, alla fine degli anni '60. Il polimero impiegato era il APP, ovvero polipropilene atattico (scarto di produzione), eventualmente integrato da polipropilene isotattico.

Agli inizi degli anni '70, come additivo per usi stradali, venne introdotto il PE (polietilene) o meglio il LDPE (polietilene a bassa densità); arrivando poi alla sostituzione del PE vergine con PE di riciclaggio, anche con l'eventuale aggiunta di copolimeri (polimero costituito dalla polimerizzazione di due o più monomeri diversi) di tipo SBS, sia lineari che radiali.

Si vuole in questa trattazione sottolineare il notevole interesse che risiede nel riutilizzo delle "plastiche" di recupero.

La plastica, così largamente utilizzata nei paesi industrializzati, costituisce quasi la metà di tutti i rifiuti solidi urbani ed industriali. L'esigenza di smaltire e possibilmente riutilizzare questi "rifiuti" rappresenta una priorità di carattere sociale che non può venire ignorata.

Una notevole percentuale di tale plastica è costituita a sua volta da PE, e da PP, polimeri che riutilizzati in modo selettivo ed oculato, oltre a costituire una validissima alternativa nella produzione di leganti bituminosi

modificati, stradali ed industriali, rappresentano un prezioso contributo ad una razionale soluzione delle nostre emergenze ambientali.

In alcuni casi, quando il polimero di riciclaggio viene opportunamente selezionato ed impiegato con competenza, i risultati possono anche essere paragonabili a quelli ottenibili con polimeri vergini realizzandosi in più notevoli economie di scala.

Negli USA le norme AASHTO M 320 (ultimo aggiornamento AASHTO MP 1a) e ASTM D 6373 contengono un preciso riferimento al fatto che, per la modifica dei bitumi stradali, possono essere impiegati polimeri sia vergini sia riciclati; tali normative sono state derivate verso la fine del 1991 dall'autorevole studio SHRP *Superpave*, che non faceva distinzioni fra bitumi normali e PMB, nel senso che le caratteristiche richieste per i vari "gradi" o PG (performance grades), si riferivano a leganti stradali comunque ottenuti, direttamente con i processi di raffinazione e/o modificati od additivati.

In ambito europeo fino a qualche mese fa la norma di riferimento per i PMB era la PrEN 14023, ora in fase di reimpostazione grazie al gruppo WG4 di ricerca sui bitumi modificati (nell'ambito del TC 336 ci sono tre gruppi di lavoro principali, il TG 1 per le proprietà del legante ad alta temperatura, il TG 2 per le proprietà a bassa temperatura ed il TG 3 per lo studio dell'invecchiamento). Anche nella nuova struttura della norma sono presenti le misure di invecchiamento EN 13587 e coesione EN 13589, integrate dal calcolo dell'energia di coesione EN 13703, che permettono di caratterizzare i leganti indipendentemente dall'agente modificante.

Per quel che riguarda la scelta delle prestazioni del legante da correlare, per esempio, con la resistenza all'ormaiamento, si deve sottolineare che non trova fondamento una teoria secondo la quale un elevato valore del ritorno elastico possa tradursi in una maggiore resistenza delle miscele stradali all'ormaiamento, come se l'elasticità del legante potesse consentire ad una parte delle deformazioni generate dal traffico di venire "richiamate" dopo il passaggio del carico che le ha prodotte.

E' la resistenza a taglio della miscela determinante nella resistenza all'ormaiamento così come il grado di suscettibilità termica del bitume. All'aumentare del grado di compattazione aumenta  $R_t$  (resistenza a taglio) ed è proprio su questo concetto che si basa la tecnica innovativa di *mix design* di un conglomerato tramite la pressa giratoria. Le forze che provocano il richiamo elastico nel PMB tale e quale, specialmente alle temperature più elevate (quando le deformazioni permanenti diventano più probabili) sono troppo esigue per superare la resistenza "frizionale" che si manifesta in una miscela di aggregati. La resistenza alla deformazione permanente di una miscela bituminosa, in conclusione, è determinata dal tipo e dalla granulometria dell'aggregato oltre che semmai, dalla resistenza viscosa del legante.

Non esistono ancora normative specifiche italiane concernenti i PMB che fissino le prove di accettazione ed i loro requisiti prestazionali minimi.

Vengono ora esaminati due casi studio condotti sperimentalmente in diverse nazioni, volti a verificare le effettive prestazioni dei PMB: la prima indagine che verrà trattata riguarda lo studio sul campo dei bitumi modificati con PE vergine e riciclato, confronto tra i due e tra essi e gli altri polimeri disponibili sul mercato, la seconda indagine concerne l'utilizzo di SBS radiale in campo aeroportuale.

- **INDAGINI PRESTAZIONALI IN CAMPO, DEL PE vergine E di recupero.**

Per rendersi conto del contributo specifico che i vari polimeri sono in grado di esercitare sulle caratteristiche dei PMB, si esamineranno di seguito alcuni esempi derivati da esperienze recenti, con particolare attenzione nell'analisi dei vantaggi apportati dal PE riciclato in considerazione anche del problema del riciclaggio dei materiali.

Il primo esempio si riferisce ai risultati di uno studio condotto da un consorzio di aziende europee, sponsorizzato dalla Commissione Europea nell'ambito del programma BRITE EURAM, con lo scopo primario di valutare la possibilità di impiego dei polimeri riciclati nelle pavimentazioni asfaltiche.

Sono state valutate oltre un centinaio di formulazioni diverse, confrontando i risultati ottenuti con PMB 45 (secondo le specifiche tedesche TL PMB, 2001) e su 20 leganti sono state effettuate le prove sulle miscele con aggregato.

Per l'esame dei risultati ottenuti con PMB con polimeri vergini tipo LLDPE, LDPE e HDPE (polietileni di varia densità) oltre che con due tipi di polietileni di recupero (REC-PE1 e REC-PE2) ed un PMB 45 (con SBS) a norma tedesca, si rimanda alla Tab. 3, in cui sono classificati i vari leganti ottenuti, sia secondo le norme provvisorie EN, sia secondo ASTM/AASHTO.

Legante Bituminoso	Classifica Provvisoria Europea <sup>2</sup>			Classifica SHRP <sup>3</sup>
	Composizione	Pen. 25°C	R & B S.P. (°C)	Classe PMB
Bit. base 70/100	99	46,3	—	PG 64-28
Bit. base + 5.0% V-LDPE <sup>1</sup>	59	54,6	50/70-53	PG 70-22
Bit. base + 5.0% V-HDPE	43	62,1	30/50-58	PG 70-22
Bit. base + 5.0% V-LLDPE	48	62,6	30/50-58	PG 70-22
Bit. base + 5.0% REC-PE 1	50	56,7	50/70-53	PG 76-22
Bit. base + 6.0% REC-PE 1	41	60,5	30/50-58	PG 82-22
Bit. base + 5.0% REC-PE 2	48	58,0	30/50-58	PG 76-22
Bit. base + 6.0% REC-PE 2	43	63,4	30/50-58	PG 76-22
Bit. base + 3.0% REC-PE 1 + 3.0% SBS	50	61,0	30/50-58	PG 76-22
PMB 45 (SBS)		59	30/50-58	PG 76-22

Tab. 3. Classificazione dei leganti secondo le norme EN e ASTM/AASHTO.

Note:

1. La V indica PE Vergine, mentre REC indica PE di recupero;
2. Classifica provvisoria europea, secondo PrEN 14023;
3. Classifica secondo ASTM D 6373 ed AASHTO M-320 (SHRP).

Tutti i PMB di cui alla Tab. 3 rispettano il limite ( $>3.0 \text{ J/cm}^2$ ) previsto per l'energia di deformazione minima (force ductility a 5 °C, PrEN 14023).



Un tratto dimostrativo di pavimentazione è stato costruito nel 2002 in Germania, con alcune delle miscele di cui alla Tab. 4; in tabella sono riportati i valori ottenuti tramite le prove condotte nei differenti tratti.

Materiali			Caratteristiche della miscela asphaltica			
Miscela tipo	Bitume di Base	Polimero nel PMB	MR (MPa) @ 0°C; 25°C	IDTS (MPa) @ 0°C; 25°C	DCR @40°C M (mpA); S(-)	WTR @ 60°C Prof. Ormaie (%)
SMA 0/8S	B 70/100	6,0% R-PE 1 3,0% R-PE1 + 3,0 % SBS	13333; 2505 12146; 1692	3,2; 0,7 3,6;0,7	26; 0,29 23; 0,28	8,7 10,8
		PMB 45 (SBS)	11739; 2079	3,2; 0,7	22; 0,20	7,2
Abi 0/16S	B 50/70	6,0% R-PE 1 3,0% R-PE1	19811; 4761 19987; 4979	3,8; 1,1 3,4; 1,1	56; 0,15 93; 0,15	6,9 3,0
		PMB 45 (SBS)	18388; 2792	3,6; 1,0	60; 0,18	11,0

Tab. 4. Proprietà prestazionali delle miscele confezionate con i vari PMB.

Note:

\* SMA: Splitt Mastix Asphalt, norma tedesca;

\* Abi O/16S: Conglomerato 0/16, alto traffico, norma tedesca;

\* IDTS: Indirect Tension Strength (ASTM D 4123);

\* DCR: Creep dinamico; M: Modulo complesso; S: log-log della pendenza fra 1000 e 7200 cicli di carico;

\* WTR: Wheel Tracking Test (NF P 98-253-1) a 30.000 cicli di carico.

L'esempio successivo riguarda l'esperienza derivata dalla costruzione dell'aeroporto internazionale di Kuala Lumpur in Malaysia, per la realizzazione delle cui piste (runways) e vie di rullaggio (taxiways) è stato impiegato oltre un milione di tonnellate di conglomerato bituminoso, usando tre tipi di PMB, vale a dire EMA, PE e SBS XL (reticolato a maglia larga).

Da rilevare che l'impiego del PE è stato possibile solo grazie all'utilizzo di speciali miscelatori mobili che hanno permesso di mantenere omogeneo il PMB, che diversamente non sarebbe stato sufficientemente stabile allo stoccaggio prolungato. Sono state prodotte ed impiegate 14.000 t di PMB a base di PE.

Dopo oltre sei anni di esercizio, la pista 1 e le taxiways A e B realizzate con il PE si comportano esattamente come le pavimentazioni realizzate con EMA e SBS.

Lo studio delle miscele bituminose venne ottimizzato soprattutto per resistere all'ormaiamento. La resistenza alle basse temperature, ovviamente, non venne mai considerata un problema in quanto il clima è costantemente caldo e umido, così come l'affaticamento della pavimentazione, costruita su una fondazione-base stabilizzata a



cemento di 45 cm di spessore con sovrapposto uno strato di binder ed uno strato di conglomerato aperto (*crack relief layer*).

Esaminando i risultati della Tab. 5 si può notare che, pur essendo il valore della P&A per il PMB contenente il PE il più basso dei tre leganti utilizzati per il progetto sotto esame, i parametri indicativi delle prestazioni delle miscele bituminose sono praticamente identici.

Questa circostanza sembra avvalorare la tesi secondo la quale dalla prova di P&A non si ricava un indicatore “prestazionale” utilizzabile per la valutazione delle miscele; non si può quindi affermare che una bassa temperatura di rammollimento del bitume utilizzato implichi un basso valore di rigidità e stabilità Marshall del conglomerato, quantomeno per i leganti modificati.

Il PE alle alte temperature maggiori di 100 °C riduce la viscosità del bitume maggiormente rispetto agli altri polimeri (vedi i valori di viscosità Redwood a 135 °C), favorendo la miscibilità degli aggregati con il legante quindi diminuendo la temperatura di miscelazione, mentre alle temperature di esercizio garantisce una maggiore consistenza il che significa maggiore rigidità e resistenza all'ormaiamento.

Proprietà dei leganti e delle miscele	Polimeri usati come additivo		
	EMA	PE	SBS
<b>Legante PMB</b>			
Viscosità at 135 °C (Pa.s)	3,21	2,13	3,05
Palla e Anello (°C)	67,0	58,5	77,5
<b>DSR Stiffness at 76°C (kPa)</b>			
● Legante originale	1,79	2,07	2,27
● Residuo dopo RTFOT	2,69	3,39	3,30
<b>Miscela per manto d'usura</b>			
Stabilità Marshall (kN)	17,6	18,4	16,0
Rigidità Marshall (kN/mm)	4,9	5,6	4,8
Modulo Resiliente 25 °C (MPa)	4320	5145	3640
IDT <i>Strength</i> 25 °C (MPa)	1,32	1,39	1,22
<i>Creep</i> statico 40 °C/0,4 MPa/1 h			
● Modulo (MPa)	79	86	74
● Pendenza ( <i>log-log</i> )	0,14	0,12	0,15

Tab. 5. Compendio dei risultati delle prove effettuate sui materiali impiegati nel progetto dell'aeroporto internazionale di Kuala Lumpur.

Un altro valido confronto fra le prestazioni di miscele asfaltiche ottenute con l'impiego di bitumi normali e con due particolari tipi di PMB, si ricava dai risultati che emergono da uno studio approfondito di vari anni condotto per conto dell'Amministrazione delle strade USA presso il Turner Fairbanks Highway Research Center fra il 1993 ed il 1998.

Anche se lo scopo primario di tale programma di ricerca era la verifica, e possibilmente, la convalida della correlazione esistente fra le prescrizioni *Superpave* ed il prevedibile comportamento delle pavimentazioni, i risultati ottenuti con le prove di ormaimento hanno reso possibile un attendibile confronto fra la resistenza alle deformazioni di vari tipi di leganti, modificati e non.

I leganti presi in considerazione sono stati cinque: tre bitumi normali, AC-5, AC-10 ed AC-20 (secondo ASTM 03381-83 in ordine di viscosità crescente) e due PMB; uno modificato con elastomeri ed uno con PE.

Nelle prove di laboratorio vennero impiegati tre diversi "ormaiatori", o *wheel tracking devices*, secondo protocolli di prova standardizzati, a temperature, velocità di carico e numero di cicli diversi. Venne inoltre impiegata anche una particolare apparecchiatura denominata ALF (*Accelerated Loading Facility*), una specie di ponteggio metallico che permette di effettuare prove di ormaimento su tratti di pavimentazione lunghi 10 metri, mediante una ruota gommata (pressione interna di 690 kPa e carico costante di 43 kN) che si muove avanti e indietro alla velocità di 18.5 km/h.

Di questa estesa sperimentazione, ci limiteremo a considerare unicamente i risultati che si riferiscono alle prove di ormaimento, che si trovano riassunti nelle due tabelle 6 e 7. Analizzando tali risultati si rileva che il PMB a base di PE ha mostrato il comportamento migliore, in tutte le condizioni. I PMB ottenuti con il PE di recupero, una volta incorporati nell'impasto di una miscela stradale, si comportano dal punto di vista dell'ormaiamento, praticamente come gli altri PMB ottenuti con polimeri vergini.

Prova \ Legante	AC-5 Pen ≥ 220	AC-10 Pen ≥ 80	AC-20 Pen ≥ 60	PMB con PE	PMB con elastomero
1* Profondità Ormaia [%]	15,5	13,8	6,4	2,6	3,7
2* Profondità Ormaia [mm]	7,4	5,4	3,7	1,4	1,9
3* Profondità Ormaia in mm Passaggi/1mm	> 30 290	> 30 634	8,5 6.224	1,9 24.594	2,8 17.947
4* Graduatoria ALF	5°	3°	4°	1°	2°

Tab. 6. Prove di ormaimento con varie apparecchiature, confronto tra diversi leganti.

Descrizione delle apparecchiature utilizzate:

1\*: NF p 98-253-1 Wheel Tracking Device (Francia); 60 °C, 0.88 rad/s, 30.000 cicli;

2\*: Georgia DOT (USA) Loaded Wheel Tester; 40 °C, 0.13 rad/s, 8000 cicli;

3\*: Hamburg Wheel Tracking Device (Germania); 50 °C, 0.13 rad/s, 20.000 passaggi;

4\*: ALF Accelerated Loading Facility, FHWA (USA); 2.3 rad/s.

Legante	Anno	Temperatura di prova	Cicli di carico ALF per ottenere ormaie di:		
			10 mm	15 mm	20 mm
PE	1997	76 °C	31.625	349.250	1.900.000
	1995	70 °C	5.750	62.840	*340.000
	1994	58 °C	*293.000	*1.750.000	*6.000.000
PMB con elastomero	1997	76 °C	3.040	38.760	236.000
	1995	70 °C	1.520	17.430	98.300
	1994	58 °C	7.910	55.540	*220.000
AC-20	1997	64 °C	670	2.640	236.000
	1995	58 °C	262	2.032	98.300
	1994	52 °C	4.200	35.500	161.400
AC 10	1994	58 °C	340	940	1.900
	1996	52 °C	2.140	8.300	21.720
	1997	46 °C	2.980	20.840	82.920
AC-5	1994	58 °C	115	279	521
	1995	58 °C	143	395	814
	1997	52 °C	190	740	1950
	1998	46 °C	1.820	33.330	192.000

Tab. 7. Compendio dei risultati ottenuti con le prove ALF 1994/1998.

### Conclusioni

Gli esempi qui trattati dimostrano come il PE riciclato utilizzato nelle pavimentazioni stradali con la dovuta competenza, consente di ottenere eccellenti risultati. Naturalmente si deve riconoscere che selezionare un PE di recupero da miscelare col bitume per ottenere un PMB qualitativamente impeccabile, è operazione che richiede un non indifferente impegno di analisi e di prove di laboratorio. Il PE viene largamente usato in fogli trasparenti, come isolante elettrico, per coperture di serre, tubazioni, contenitori alimentari e pellicole colorate per realizzare sacchetti di vario tipo (si ricorda il "pallettaggio", ossia il fissaggio dei materiali sfusi con pellicola trasparente per consentirne il trasporto); è quindi evidente che la possibilità di un suo riciclaggio è fondamentale.

Il PMB modificato con PE potrebbe essere preferito dove venga richiesta alla pavimentazione resistenza strutturale, rigidità e resistenza alle ormaie, quindi in climi relativamente caldi, di contro PMB modificati con SBS sono consigliati per climi freddi in quanto conferiscono maggiore elasticità. Una di queste applicazioni con PE potrebbe essere la messa a punto di miscele "ad alto modulo", standardizzate in Francia come miscele EME, per la costruzione di strati di base *heavy duty* (risanamenti profondi o nuove strade in zone a traffico pesante, lento e canalizzato), come alternativa agli stabilizzati in cemento.

Esaminando i risultati spesso notevolmente interessanti, ottenuti con l'impiego di polimeri riciclati, viene da domandarsi quali possano essere i motivi per i quali una tale tecnologia non abbia ottenuto un più largo e generalizzato impiego. La risposta risiede in parte, nel maggior impegno richiesto nella scelta del polimero ed, in parte, dalla necessità di garantire con mezzi meccanici, che la dispersione del polimero nel PMB venga mantenuta sui previsti livelli di omogeneità.

- **PRESTAZIONI DELLO SBR IN CAMPO AEROPORTUALE.**

I moderni aeromobili consentono un più elevato livello di sofisticazione e di economia del traffico aereo, a patto che gli aerei abbiano siti idonei dove atterrare.

Questa vuole essere una provocazione ma in effetti lo sviluppo del traffico aereo e l'introduzione in servizio di aerei di dimensioni e peso sempre più elevati stanno determinando la necessità di adeguare le sovrastrutture per renderle coerenti con le sollecitazioni indotte dagli aeromobili. Una componente significativa di questo adeguamento risulta essere il legante bituminoso.

Se da un lato il supporto della pavimentazione agli elevati carichi del traffico risiede nel contatto "pietra su pietra" che costituisce lo scheletro litico, la durata del manto è conferita dalla miscela bitume-filler che crea una malta bituminosa in grado di legare efficacemente l'intera struttura litica.

Un tangibile segno della nuova accezione di qualità e concreto esempio di come una ricerca contribuisca a migliorare le prestazioni, è lo sviluppo dei bitumi modificati "Eliflex®", prodotti nelle raffinerie di Livorno. La metodologia di modifica è brevettata e del tutto originale. Nella maggior parte dei casi, le tecnologie di modifica si basano sull'individuazione di un bitume base, che risponda al requisito di compatibilità con i polimeri, e del migliore "agente compatibilizzante" ovvero di un additivo in grado di tenere assieme due mondi chimicamente molto diversi fra loro, quali il bitume e le gomme termoplastiche, ad esempio lo SBS-R.

Il processo Eliflex®, invece, è definito "per componenti" in quanto il bitume da modificare viene costruito utilizzando idonei tagli bituminosi di lavorazione della raffineria, prima che questi vengano riuniti per la formulazione del bitume tradizionale finito, e prevede l'uso del polimero SBS di tipo radiale, che, superate le maggiori difficoltà nel processo di compatibilizzazione, offre le migliori prestazioni.

Grazie all'utilizzo di più componenti bituminosi, viene creato un prodotto intermedio, compatibile con forti concentrazioni di SBS-R, che successivamente viene diluito con un flusso bituminoso fino a percentuali più basse a seconda delle gradazioni che si intendono ottenere, producendo modificati stabili allo stoccaggio, ad elevate prestazioni con caratteristiche di viscosità e ritorno elastico molto alte.

Grazie a tale flessibilità è stato possibile formulare una linea completa di prodotti che attualmente comprendono 5 gradazioni, rispondenti alle nuove richieste prestazionali: modificati di tipo classico (cosiddetti hard o soft, a seconda che la quantità di modificante sia rispettivamente dal 6% all'8%, o minore del 6%), modificati ad alto modulo indicati per i risanamenti strutturali, modificati ad altissima prestazione con polimeri anche adesivanti, modificati ad alto grado di modifica per applicazioni estreme (come ad esempio piste aeroportuali, autodromi, piazzali di interscambio merci, ecc.). E' evidente che minore è la diluizione del prodotto intermedio con ulteriore bitume, migliori sono le caratteristiche meccaniche del finito.

Fra il 2000 ed il 2002 i bitumi della linea Eliflex® sono stati impiegati in importanti realizzazioni, in alcune delle quali è stato anche possibile sperimentare con successo bitumi e conglomerati sviluppati nell'ambito delle ricerche applicative svolte: diversi aeroporti (Aviano, Verona, Lamezia Terme, Gioia del Colle, Bari), un campo prove presso l'autodromo di Monza ed uno sull'autostrada SALT, il rifacimento di alcuni tratti dell'autodromo Valle Lunga (zona paddock e corsia box) e dell'autodromo di Adria, oltre ad importanti applicazioni presso la tangenziale di Mestre ed A4 Torino-Trieste, tangenziale di Napoli, autostrada Venezia-Padova, autostrada SARA, autostrada Salerno-Reggio Calabria.

Ciò premesso passiamo in rassegna alcune delle esperienze applicative realizzate.

**a) RIFACIMENTO PISTA DI VOLO DELLA BASE MILITARE DI AVIANO.**

Il lavoro è consistito nella ristrutturazione completa della pista di volo: scarifica e posa del nuovo manto di usura in conglomerato bitumato, rifacimento delle testate della pista in conglomerato cementizio, sostituzione dei sistemi di arresto e alcuni lavori elettrici. Relativamente alla pavimentazione bitumata, dopo aver scarificato il vecchio manto ammalorato, è stato steso uno strato di usura dello spessore di 5 cm. per tutta la superficie interessata, lunga 3 km con una larghezza di 50 m.

Per tutto il lavoro è stato utilizzato un bitume modificato “Eliflex®” (con SBS radiale) avente le seguenti caratteristiche:

<b>Caratteristiche</b>	<b>Valori</b>
Penetrazione a 25°C, dmm	55
Punto di Rammollimento P&A, °C	104
Punto di Rottura Fraass, °C	-18
Penetrazione dopo RTFOT, % iniz.	69%
Infiammabilità v.a. , °C	300
Viscosità a 160°C, poise	9
Stabilità stoccaggio (3gg a 180°C), P&A T/F °C	103 / 101

La realizzazione è stata eseguita da un'impresa specializzata in lavori stradali che ha curato anche il progetto del conglomerato. In particolare è stata formulata alla Direzione Lavori la proposta di realizzare il mix-design secondo alcune variazioni rispetto alle specifiche USAF di riferimento. La proposta è stata accettata in quanto giudicata coerente e con lo scopo di rappresentare un valido banco di prova.

La proposta contemplava i seguenti scostamenti dalle prescrizioni USAF:

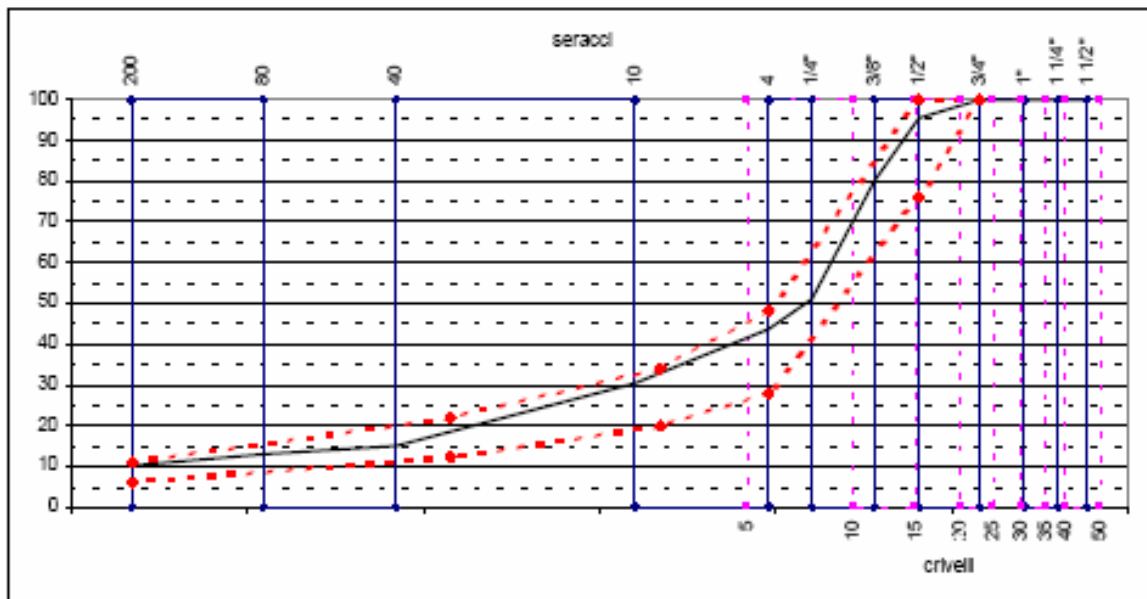
- Granulometria tendenzialmente più fine;
- Energia di compattazione di 75 doppi colpi adottando aggregati di elevata qualità (USAF prevedeva 50 doppi colpi per evitare la frantumazione degli aggregati);
- Contenuto di bitume del 5,4% riferito agli inerti (USAF avrebbe richiesto 6% minimo);
- Vuoti residui;
- Uso di un bitume modificato con SBS radiale senza inserire le fibre minerali previste da USAF.

Nel marzo 1999 era stata realizzata una sezione di prova con lo scopo di valutare su campo quanto prospettato con prove di laboratorio. Il conflitto del Kosovo ha ritardato la realizzazione dell'intero rifacimento al settembre del 1999. La sezione di prova è stata pertanto sollecitata durante il conflitto dal traffico degli aerei da combattimento (F-15E e EA-6B) e dai mezzi pesanti terrestri. Nel luglio '99 è stata condotta una ispezione sulla sezione di prova trovandola in eccellenti condizioni.

I lavori di stesa della pavimentazione bitumata sono avvenuti come detto nel settembre '99 e sono durati 8 giorni per un totale giornaliero di 2 strisciate complete di pista aventi larghezza di 3 metri l'una.

Il conglomerato è stato prodotto presso il cantiere dell'impresa utilizzando la curva granulometrica in figura. Durante la stesa sono state prelevate campionature di conglomerato ed i riscontri eseguiti hanno confermato i dati di progetto. Il conglomerato prelevato all'impianto è stato compattato in laboratorio a 170 °C con un'energia di 75 colpi per faccia ottenendo le seguenti caratteristiche:

<b>Caratteristiche</b>	<b>Valori</b>
Stabilità Marshall, kg	2100
Scorrimento Marshall, mm	3,4
Rigidezza Marshall, kg/mm	615
Resistenza a Trazione indiretta, kg/cmq	12,2
Vuoti liberi, %vol.	2,9



Curva granulometrica utilizzata

Al fine di valutare la suscettibilità di queste caratteristiche rispetto alla temperatura e all'energia di compattazione, sono state eseguite in laboratorio alcune prove combinando tra loro due temperature (160 e 180 °C) e due energie di compattazione (50 e 75 doppi colpi) differenti.

I dati, organizzati nella seguente tabella consentono di riscontrare che l'incidenza dell'energia di compattazione è molto minore (8%) rispetto a quella della temperatura (26%). Queste considerazioni sono state trasferite in campo applicativo prestando la massima attenzione alle temperature di confezionamento e di stesa del conglomerato. Gli impianti hanno prodotto conglomerato sempre al di sopra dei 180 °C consentendo la stesa e la compattazione nell'intorno delle temperatura di progetto.

	160°C	160°C	180°C	180°C
	50+50	75+75	50+50	75+75
Stabilità Marshall, kg	1780	1920	2260	2390
Scorrimento Marshall, mm	3,5	3,8	2,9	3,1
Rigidezza Marshall, kg/mm	508	505	780	770
Vuoti liberi, %vol.	4,0	3,1	2,1	1,5

**b) RIFACIMENTO PISTA DI VOLO AEROPORTO “CATULLO” DI VERONA VILLAFRANCA.**



La realizzazione è stata curata da un'impresa specializzata locale. Complessivamente il lavoro ha riguardato il rifacimento completo della pista di volo per una superficie bitumata di circa 100.000 mq comprendente il rifacimento del binder e dell'usura. Detti conglomerati sono stati confezionati utilizzando due bitumi modificati ciascuno aventi caratteristiche coerenti con il capitolato di riferimento e mirate a consentire di traguardare le caratteristiche richieste ai conglomerati.

Propedeutico al lavoro, a inizio marzo '99 è stata effettuata una produzione ed una stesa di prova presso il cantiere dell'Impresa che ha consentito di verificare su impianto le formulazioni ottimizzate in laboratorio. La realizzazione delle pavimentazioni è iniziata intorno alla metà aprile '99 con la posa del binder cui è seguita la posa dello strato di usura che si è protratta fino alla metà di maggio.

In questa sede desideriamo trattare il solo manto di usura.

Per il manto di usura è stato utilizzato un bitume modificato “Eliflex®” (con SBS radiale) avente le seguenti caratteristiche:

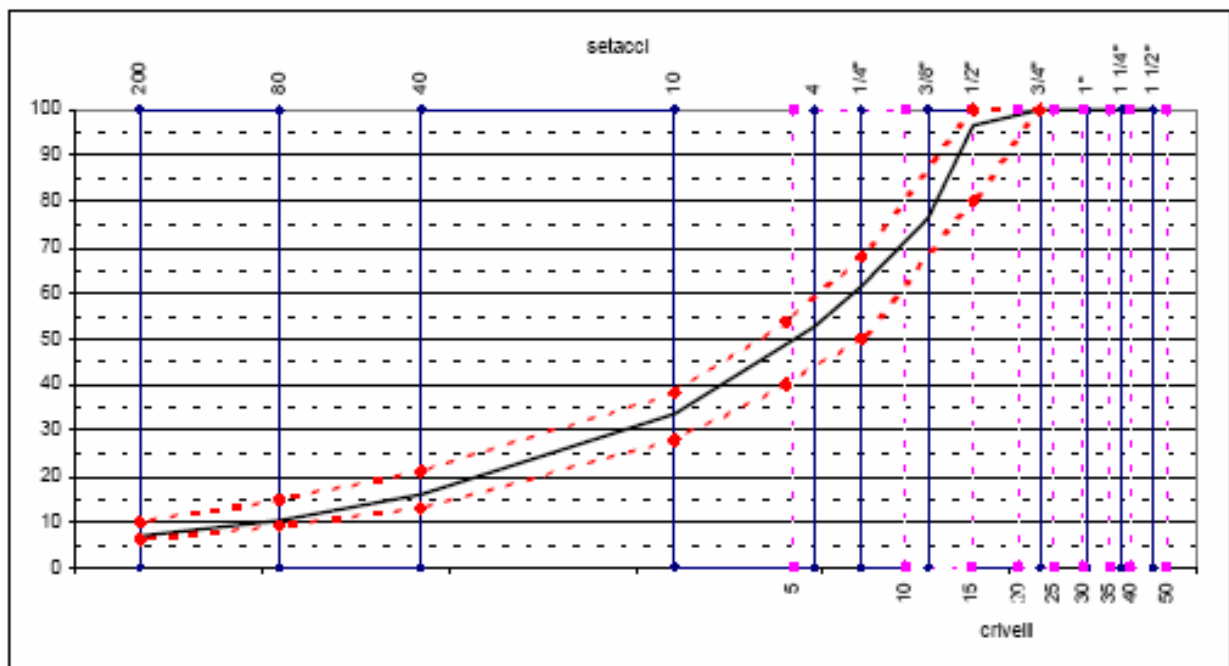
<b>Caratteristiche</b>	<b>Valori</b>
Penetrazione a 25°C, dmm	65
Punto di Rammollimento P&A, °C	96
Punto di Rottura Fraass, °C	-18
Penetrazione dopo RTFOT, % iniz.	72%
Infiammabilità v.a. , °C	300
Viscosità a 160°C, poise	6
Stabilità stoccaggio (3gg a 180°C), P&A T/F °C	95 / 94

Il conglomerato è stato prodotto presso il cantiere dell'impresa utilizzando un contenuto di bitume del 5,5% ed una curva granulometrica riportata in figura.

Durante la stesa sono state prelevate diverse campionature di conglomerato con le quali è stato possibile avere i riscontri della bontà esecutiva del progetto.

Il conglomerato prelevato all'impianto è stato compattato in laboratorio a 170 °C con un'energia di 75 colpi per faccia ottenendo le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche	Valori
Stabilità Marshall, kg	2300
Scorrimento Marshall, mm	3,9
Rigidezza Marshall, kg/mm	590
Vuoti liberi, %vol.	3,7



### Curva granulometrica utilizzata

#### c) RISANAMENTO PISTA DI VOLO DI LAMEZIA TERME CON PAVIMENTAZIONE BITUMINOSA AD ALTO MODULO.

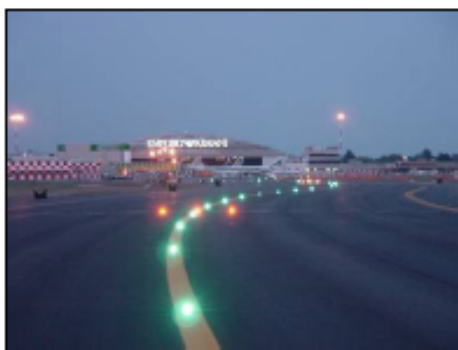
Sulla pista di volo dell'Aeroporto di Lamezia Terme, per la prima volta in Italia in campo aeroportuale, è stata impiegata, nel corso del mese di novembre 2001, la tecnologia del conglomerato ad "alto modulo".

La stesa di tale conglomerato ha interessato le zone più ammalorate della pista di volo, sulle quali erano state riscontrate carenze di portanza e valori insufficienti di PCN (Pavement Classification Number), parametro che definisce la capacità di una pavimentazione aeroportuale a sopportare il traffico aereo previsto.

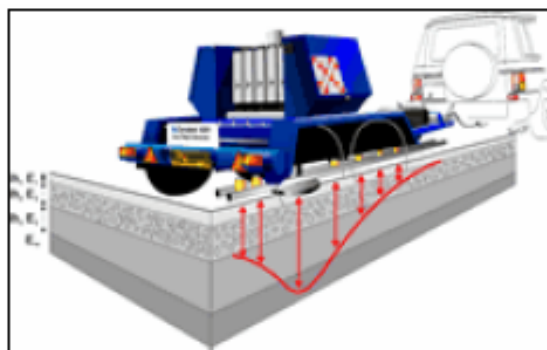
Mediante prove di F.W.D. (Falling Weight Deflectometer) era stato appurato che tali carenze di portanza erano dovute unicamente a valori insufficienti del modulo degli strati bitumati e, in alcuni casi, della fondazione.







Ispezioni visive in aeroporto



Misure di portanza con FWD/HWD

2

L'intervento con alto modulo ha interessato uno spessore di 7 cm della pavimentazione ed è stato associato, in alcuni casi, a iniezioni con speciali resine per la stabilizzazione della fondazione; il risanamento è pertanto un intervento di tipo strutturale sicuramente più impegnativo del rifacimento superficiale degli strati neri.

Tutti gli interventi sono stati eseguiti nel corso delle ore notturne mediante scarifica della pavimentazione vecchia e stesa del nuovo conglomerato, senza interruzione del traffico aereo e quindi con enormi vantaggi per la Società di gestione aeroportuale e per gli utenti.

Per il conglomerato ad "alto modulo" sono state utilizzate le specifiche messe a punto dal SITEB (Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade), con l'impiego di bitume modificato.

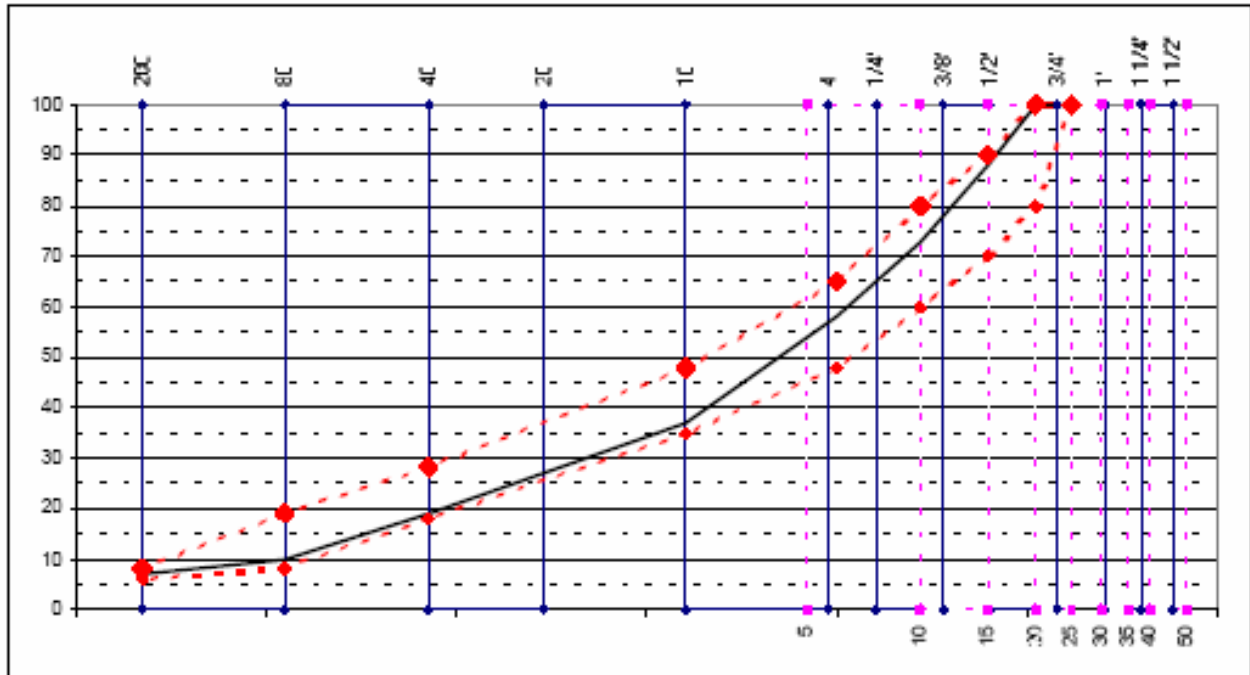
Caratteristiche bitume	Valori
Penetrazione a 25°C, dmm	29
Punto di Rammollimento P&A, °C	76
Infiammabilità v.a. , °C	276
Viscosità a 160°C, poise	7,8

Il conglomerato è stato confezionato utilizzando un contenuto di bitume del 5,7% ed una curva granulometrica riportata in figura.

Durante le operazioni sono state prelevate diverse campionature di conglomerato con le quali è stato possibile verificare la bontà esecutiva del lavoro.

Il conglomerato prelevato all'impianto è stato compattato in laboratorio a 165 °C con un'energia di 75 colpi per faccia ottenendo le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche conglomerato	Valori
Stabilità Marshall, kg	1990
Scorrimento Marshall, mm	3,8
Rigidezza Marshall, kg/mm	520
Vuoti liberi, %vol.	4,0



Curva granulometrica del conglomerato ad alto modulo

I controlli di portanza effettuati dopo la stesa hanno consentito di verificare l'incremento dei valori di PCN al di sopra dei limiti richiesti dalle norme. Tutte le attività di progettazione dell'intervento, Direzione Lavori ed i controlli di qualità, sono state coordinate dalla stessa Società.

L'intervento con conglomerato ad alto modulo ha, in definitiva, consentito di risolvere i problemi di portanza della pista, evitando interventi molto più onerosi, sia dal punto di vista economico, che da quello dell'operatività dell'aeroporto.

### Conclusioni

Al giorno d'oggi si sono messi a punto alcuni bitumi modificati specifici per applicazioni aeroportuali che hanno consentito di realizzare con successo queste ed altre applicazioni. I dati riscontrati, sia subito dopo la stesa, ma soprattutto i riscontri positivi del campo nell'utilizzo giorno dopo giorno delle realizzazioni, ci confortano.

Tali prodotti presentano pertanto caratteristiche idonee alla maggior parte delle applicazioni aeroportuali, nonché per le applicazioni stradali dove lo SBS è uno dei polimeri più utilizzati.

L'impianto di produzione presenta comunque una flessibilità impiantistica che consente di produrre bitumi secondo particolari richieste di capitolato e pertanto si possono prendere in considerazione produzioni mirate, anche se a più alto costo, per ogni tipologia specifica di intervento.

In definitiva i PMB sono il futuro della tecnologia stradale anche se dovrebbero già essere una consolidata realtà. Numerosissimi sono i prodotti ai quali i bitumi modificati hanno apportato enormi vantaggi, come le emulsioni bituminose, i nastri sigillanti bituminosi autoadesivi e le membrane impermeabilizzanti (SAMI), oltre alle nuove applicazioni resisi possibili e migliorate, tipo manti sottili e microtappeti a caldo (Splitt Mastix Asphalt) e a freddo (Slurry Seal), manti drenanti fonoassorbenti a unico e doppio strato, conglomerati ad alto modulo e antiskid, asfalti colati e pavimentazioni perpetue "long lasting".

### (1.d) EMULSIONI BITUMINOSE, O OW (OIL WATER)

#### Caratteristiche

Sono ottenute dal mescolamento intimo e dalla suddivisione finissima di due sostanze non miscibili tra loro, acqua e bitume: in esse si distinguono una *fase disperdente* continua (acqua) e una *fase dispersa* (bitume) costituita da piccolissime particelle aventi dimensioni di pochi micrometri, comprese fra 6 e 20  $\mu$ . La quantità di legante è elevata, dal 50 al 70 per cento in peso totale del prodotto.

Per facilitare la formazione dell'emulsione, termodinamicamente instabile, ed evitare che le particelle della fase dispersa si riuniscano in particelle più grandi alterando così l'omogeneità della massa, si aggiunge un terzo elemento, detto emulsivo o emulsionante o emulgatore o tensioattivo, costituito normalmente da oleato sodico, derivati di resine, colle animali e vegetali.

Infine, come elemento accessorio, viene talvolta aggiunto un ulteriore stabilizzante che assicura appunto la stabilità dell'emulsione nel tempo e al gelo, specie quando si preveda un lungo periodo di conservazione nei recipienti.

L'emulgatore riduce la tensione interfacciale bitume/acqua, formando un film protettivo attorno alle particelle del legante mantenendole disperse in acqua. A causa della differente polarità delle molecole (quelle acquose polari, quelle d'olio apolari ed idrofobe) i due liquidi naturalmente non si mescolano. Le molecole di un tensioattivo hanno una porzione polare idrofila, spesso elettricamente carica, e una porzione non polare; la "code" apolari si immergono nella particella di bitume e le teste polari rimangono immerse in acqua creando uno strato di cariche elettriche dello stesso segno che permette la coabitazione delle fasi, acquosa neutra e oleosa.

Il più grave inconveniente che si può riscontrare nelle emulsioni bituminose è costituito dalla separazione del bitume dall'acqua (*rottura dell'emulsione*) nell'interno dei recipienti prima del suo uso: tale rottura deve invece avvenire solo all'atto dell'impiego, quando cioè l'emulsione viene a contatto del materiale lapideo da cospargere o dell'impasto da miscelare.

✓ *Classificazione in base all'uso (indice di rottura):*

- *A rapida rottura:* trovano impiego nei trattamenti superficiali e a penetrazione con spruzzo, contraddistinte dall'acronimo ER;
- *A media velocità di rottura:* usate negli impasti con aggregati aventi anche sensibili percentuali di materiale fino, indicate EM;
- *A lenta rottura:* richieste per impasti con forti percentuali di aggregato fino, e in particolare nelle terre incoerenti da stabilizzare, con sigla EL.

Nei trattamenti superficiali la rottura dell'emulsione deve incominciare dopo pochi minuti dalla sua applicazione e compiersi entro 1 o 2 ore: ciò è molto importante nelle giornate umide, perché così si riduce il pericolo che improvvisi acquazzoni dilavino la superficie stradale, asportando l'emulsione bituminosa appena applicata.

Per i lavori stradali in climi caldi (e in particolare per i procedimenti a semipenetrazione) sono consigliabili emulsioni al 55% di bitume, aventi una viscosità più elevata. Le emulsioni devono risultare omogenee, esenti da grumi, non suscettibili di rapida sedimentazione, stabili nel tempo e al gelo; esse hanno il vantaggio rispetto ai bitumi normali, di consentire trattamenti stradali anche nelle stagioni non molto calde.

Le emulsioni bituminose servono anche per la preparazione a freddo di pietrischetti e graniglie bitumate (*cold mix*) utilizzati ad esempio per costituire il ballast ferroviario; gli inerti non necessitano di alcun riscaldamento preventivo per eliminare l'umidità in essi contenuta, che nella formazione dei conglomerati bituminosi a caldo attraverso la tensione di vapore tra il grano dell'inerte e la pellicola di bitume che lo avvolge, favorisce il distacco di quest'ultima. Questa tecnica è sicuramente dal punto di vista energetico, molto meno onerosa.

Il quantitativo di tensioattivi che si introducono in una emulsione bituminosa è assai scarso e generalmente varia tra lo 0,2 e l'1,0% in massa sul prodotto finale. La qualità del bitume influenza in modo determinante le caratteristiche di adesione agli inerti e la coesione dell'emulsione, mentre i tensioattivi contenuti, in base alla

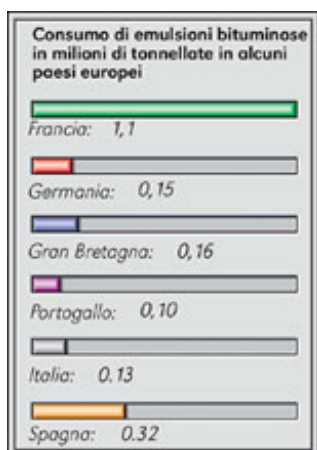
loro carica polare e al quantitativo disperso in acqua, determinano una delle caratteristiche fondamentali dell'emulsione stessa.

✓ *Classificazione in base all'agente emulsificante:*

- Emulsioni bituminose *anioniche* (carica negativa delle teste), comunemente dette "basiche", le quali sarebbero più adatte all'ambiente alcalino del conglomerato bituminoso, devono corrispondere ai requisiti di cui alle "Norme per l'accettazione delle emulsioni bituminose per usi stradali" – Fascicolo n. 3 \_ Ed. 1958 del C.N.R. tuttora valide (Tab. 1);
- Emulsioni bituminose *cationiche*, comunemente dette "acide" (pH < 7), più diffuse, versatili e performanti, applicabili anche su superfici umide e in giornate piovose quando sia indispensabile lavorare per motivi di urgenza. Per queste si fa riferimento alle normative straniere (es. classificazione ASTM, Tab. 2).

<b>Caratteristiche</b>	<b>ER 50</b>	<b>ER 55</b>	<b>ER 60</b>	<b>EM 55</b>	<b>EM 60</b>	<b>EL 55</b>	<b>EL 60</b>
% in peso di bitume puro	>50	>55	>60	>55	>60	>55	>60
% in peso di emulsivo e di destabilizzante	<1	<1	<1	<2	<2	<2,5	<2,5
indice di rottura	>0,9	>0,9	>0,9	0,5 - 0,9	0,5 - 0,9	>0,5	>0,5
adesione (kg/cm <sup>2</sup> ):							
- provini asciutti	3	3	3	3	3	3	3
- provini bagnati	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
penetrazione del bitume estratto (25 °C) (dmm)	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200
duttilità legante (25 °C) (cm)	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70
solubilità in CS <sub>2</sub> (%)	>99	>99	>99	>99	>99	>99	>99
punto di rammollimento (°C)	<42	<42	<42	<42	<42	<42	<42
punto di rottura Fraass (°C)	<-14	<-14	<-14	<-14	<-14	<-14	<-14

Tab. 1: Requisiti di accettazione delle emulsioni bituminose basiche per usi stradali, Fascicolo n. 3 Ed. 1958 C.N.R..



<i>Prove</i>	<i>CRS-1</i>	<i>CRS-2</i>	<i>CMS-2</i>	<i>CMS-2h</i>	<i>CSS-1</i>	<i>CSS-1h</i>
stabilità stoccaggio per 24h (%)	1	1	1	1	1	1
polarità delle particelle	+	+	+	+	+	+
% di rottura in prova di miscelazione con grani di cemento	-	-	-	-	2,0	2,0
distillazione emulsione a 260 °C:						
- flussante distillato (%)	3	3	12	12	-	-
- residuo (bitume) (%)	60	65	65	65	57	57
pen (25 °C, 100 g, 5 s) su residuo di distillazione (dmm)	100 - 250	100 - 250	100 - 250	40 - 90	100 - 250	40 - 90
duttilità (25 °C, 5cm/min) sul residuo di distillazione (cm)	40	40	40	40	40	40
solubilità in tricloroetilene (%)	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5

Tab. 2: Requisiti di accettazione delle emulsioni bituminose acide per usi stradali (Classificazione ASTM).

Altri parametri di caratterizzazione che distinguono una emulsione bituminosa sono:

- ✓ Il contenuto di legante residuo e sue caratteristiche fisico-chimico-meccaniche;
- ✓ L'adesività (prova di adesione);
- ✓ La stabilità allo stoccaggio;
- ✓ La viscosità;
- ✓ L'omogeneità;
- ✓ La sedimentazione.

Le emulsioni bituminose nel corso degli anni hanno subito tante evoluzioni e perfezionamenti, sono così nate le emulsioni di "bitume e polimero" per applicazioni fortemente prestazionali. Dette anche "emulsioni elastomeriche" poiché il polimero utilizzato più frequentemente è lo SBS-R (con eventuali lubrificanti o "dopes" diluenti), ottenute per emulsione diretta, presentano, dopo la rottura, un bitume residuo con caratteristiche elevatissime, in pratica si realizza a freddo una pavimentazione stradale il cui legante è un bitume modificato PMB.

Esistono anche le emulsioni prodotte con bitume e *latice di polimero*; la normativa europea CEN, in fase di approvazione, le classifica entrambe come emulsioni BP (bitume polimero) senza tenere conto della sostanziale differenza della tecnica di produzione. Il latice per la produzione di emulsioni bituminose modificate anioniche o cationiche, è una dispersione acquosa di copolimeri (a base di butadiene e stirene generalmente), stabile e di altissima qualità, la quale conferisce elasticità al bitume. Si riportano le specifiche di un latice in commercio.

Le dosi di impiego variano a seconda del grado di modifica che si vuole ottenere sul bitume residuo, in media dall'1% al 10% sul peso dell'emulsione finale.

#### SPECIFICHE

Aspetto:	liquido
Colore:	bianco
Contenuto di solidi:	50 +/- 1.5%
Densità a 20 °C:	ca. 0.98 kg/dm <sup>3</sup>
Punto ebollizione:	100 °C (acqua)

Viscosità:	110÷650 mPa s
pH:	10÷12 (anionica); 2.5÷3.5 (cationica).
Punto infiammabilità:	non infiammabile

#### La tecnica a freddo

La tecnica che privilegia l'impiego di conglomerati bituminosi a caldo per i rifacimenti dei manti di usura, è quella più usata per i lavori di manutenzione delle strade, così come il riciclaggio a caldo; tuttavia, importanti fattori ambientali, il risparmio energetico, e l'inquinamento atmosferico, vengono più spesso presi in considerazione e là dove è possibile, spingono l'industria delle costruzioni stradali a integrare le tecniche a caldo con quelle a freddo. Per tecnica a freddo si intende quella tecnologia che, nella realizzazione dei nastri d'asfalto, utilizza aggregati lapidei a temperatura ambiente e, come legante, emulsione bituminosa (o bitume schiumato, o bitume liquido) ad una temperatura compresa tra i 20 ed i 70 °C.

Le emulsioni bituminose soppiantate negli anni '70 dall'avvento dei conglomerati a caldo, stanno ritornando prepotentemente alla ribalta.

Nel mondo si stima che l'impiego di emulsioni bituminose sia superiore a 7.000.000 di tonnellate per anno. In Francia si supera annualmente la quota di 1.000.000 di tonnellate, in Spagna quella di 350.000. In Italia invece il consumo di questo prodotto si assesta sulle 110÷130.000 tonnellate annue, in gran parte utilizzate per le mani d'attacco. Molti paesi utilizzano bitume, sotto forma di emulsione stradale, in percentuali variabili dal 20 al 45% del loro consumo. In Italia, questa percentuale è piuttosto bassa (3÷4%), ma i valori sono destinati a crescere nei prossimi anni.

Con le emulsioni bituminose in particolare quelle con bitume modificato, è possibile eseguire pavimentazioni stradali complementari e/o integrative a quelle realizzate con i conglomerati a caldo, con indubbi vantaggi. Laddove è possibile, cioè in presenza di strade dotate di un buon sottofondo e di adeguata portanza, possiamo ripristinare le caratteristiche superficiali iniziali, riproponendo la stessa metodologia utilizzata fino agli anni '60, consistente nella stesa in strati successivi, di emulsione bituminosa e spargimento di graniglie e pietrischetti (mono/doppia granigliatura mono/bi strato). Tecniche odierne più avanzate hanno portato agli "Slurry Seal", trattamenti superficiali di irruvidimento che formano microtappeti a freddo impermeabilizzanti; si differenziano dalla granigliatura classica per la presenza di idonei additivi, fibre o granuli di gomma e dopes, acqua e cemento, e per una diversa tecnica di posa (unica stesa di un impasto a freddo con emulsione cationica modificata al 60 – 65% di bitume residuo, a rottura controllata).

Nelle tecniche di costruzione stradale, l'utilizzo di questi prodotti comporta sempre forti riduzioni dei tempi di messa in opera e del conseguente disagio per i cittadini. Con l'utilizzo delle macchine combinate per la stesa contemporanea di emulsioni e graniglia, in Italia purtroppo poco presenti, anche questi tempi ridotti possono essere ulteriormente dimezzati. Pavimentazioni a freddo con emulsioni vengono realizzate anche in ambito aeroportuale dove le sollecitazioni sono maggiori, ad esempio sono state impiegate per il rinnovo della pista dell'aeroporto "G. Marconi" di Bologna.

Tra l'altro, l'impiego di inerti tipici della zona, purché dotati di adeguati requisiti di accettazione, consente di intervenire sulla pavimentazione offrendo un aspetto finale naturale che non altera i valori paesaggistici esistenti. L'aspetto nero, lucido, del conglomerato classico è drasticamente ridotto poiché il bitume non avvolge mai l'inerte completamente ma lo fissa al suolo prendendolo solo "al piede".

La consapevolezza della necessità di ridurre l'impatto delle strade nelle aree di interesse ambientale, è ormai diffusa. Le tradizionali strade bianche in stabilizzato sono però purtroppo polverose, disagioli, insicure e richiedono continue e costose manutenzioni con elevato consumo di inerti. Questo problema può quindi essere efficacemente risolto da particolari tipi di emulsioni che, sempre a freddo, realizzano manti bituminosi sicuri ed impermeabili, il cui effetto finale, per le particolari caratteristiche del legante modificato, assume il colore della graniglia utilizzata: bianco, verde, rosso, ecc.

Grazie alla tecnologia "a freddo" delle Emulsioni Bituminose, è possibile la realizzazione di conglomerati "ecologici" con una straordinaria facilità di utilizzo. Parliamo di prodotti non tossici e non nocivi che possono essere confezionati e trasportati anche in sacchi fino al luogo di utilizzo, essere tenuti all'aperto per lunghi periodi senza soffrire alcuna variazione e che possono infine essere applicati anche da un solo addetto e senza

attrezzature particolari. Si tratta ovviamente di prodotti che trovano un impiego ottimale nella manutenzione e nel ripristino del manto dopo tagli e interruzioni dello stesso, dovute a scavi per creazione o ripristino di condotte o stesa di cavi elettrici o telefonici.



Dal punto di vista energetico, una tonnellata di conglomerato bituminoso a caldo necessita di 8 – 9 litri di olio combustibile per essiccare gli inerti e mantenere in temperatura il bitume. Al contrario, una tonnellata di prodotto a freddo richiede solo un litro di olio indispensabile per azionare i tori dell'impianto. E' evidente il forte risparmio energetico che si può generare sfruttando questa tecnologia.

Le emulsioni bituminose vengono anche utilizzate per fornire un rimedio a situazioni di degrado del manto stradale come fessurazioni e buche, che possono rapidamente aggravarsi in particolari condizioni meteorologiche (forti nevicate e incessanti piogge) e di traffico, e costituire fonte di pericolo. E' stata messa a punto una specifica e risolutiva tecnologia che fa uso di una macchina operatrice automatica, nota con il nome di "Tappabuche", per la quale è stata studiata un'emulsione bituminosa da bitume modificato. L'apparecchiatura esegue le seguenti operazioni: pulizia della zona mediante getto di aria compressa, preventivo getto di emulsione realizzata con bitumi modificati con funzione aggrappante, getto di graniglia premiscelata con emulsione per il riempimento stratificato delle lesioni o delle buche, copertura dell'intervento con uno strato sottile di graniglia o sabbia fine o entrambe secondo opportunità e/o necessità.



#### Usi

- Mani d'attacco (*bond coat*), interfaccia strato conglomerato bituminoso/conglomerato bituminoso, interfaccia strato misto granulare (legato o non legato)/conglomerato bituminoso, interfaccia sottofondo stabilizzato/misto granulare (legato o non legato);
- Stabilizzazione delle terre incoerenti (quantità di emulsione non oltre il 3% della massa complessiva da stabilizzare);
- Trattamenti di irruvidimento superficiale (microtappeti a freddo per granigliatura tradizionale e Slurry Seal);
- Riciclaggio a freddo di fresati stradali (vedi punto (2.b));
- Strade bianche (pavimentazione di colore pari a quello della graniglia utilizzata);
- Tappabuche.





### (1.e) BITUMI SCHIUMATI, O FOAMED BITUMENS

Più di quarant'anni fa il Dottor Ladis Csanyi, nel Laboratorio di Ricerca dell'Università dello Stato dell'Iowa, iniettò con successo del vapore nel bitume per creare una massa schiumosa. Si scoprì che, durante la sua "vita metastabile", il bitume espanso poteva essere miscelato con una varietà di inerti migliorandone le affinità per usi stradali. Ciò nonostante la tecnica della schiumatura ha avuto solo una limitata applicazione su scala globale, soprattutto a causa dei vincoli imposti dai diritti d'autore sugli iniettori di schiuma.

Il bitume schiumato, chiamato anche espanso, è un prodotto ottenuto tramite un processo in cui vengono spruzzati, all'interno di una camera di espansione (Figura 3), il bitume caldo ( $170\div 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ed una certa quantità d'acqua a temperatura ambiente, generando un prodotto schiumoso ad elevato volume, tale da garantire una migliore miscelazione ed adesione con gli aggregati, grazie soprattutto alla bassa viscosità del legante.

Durante il processo di schiumatura il bitume scambia energia con l'acqua con conseguente trasferimento di calore. Alla temperatura di  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  avviene l'evaporazione dell'acqua ed il vapore generato causa un'immediata ed esplosiva espansione del legante. Il bitume schiumato veniva inizialmente prodotto solo in impianti fissi.

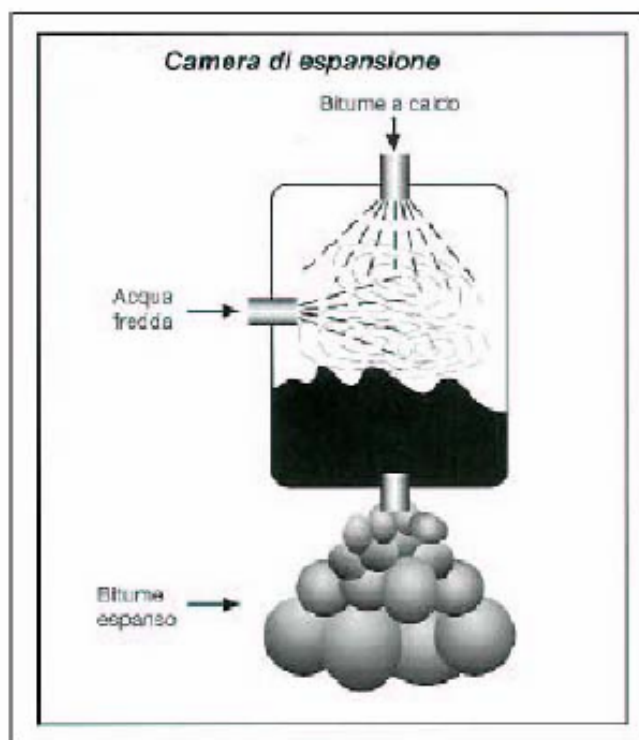


Figura 3: Camera di espansione

Successivamente, grazie all'ideazione di opportuni macchinari mobili, si è potuto utilizzare anche in sito con un notevole abbattimento dei costi di trasporto del fresco.

Nonostante questi aspetti positivi, l'assenza di protocolli di progettazione delle miscele con bitume schiumato, ne rendono ancora difficile l'utilizzo su ampia scala. Pertanto, attualmente, occorre un accurato lavoro di laboratorio per la definizione delle proprietà della miscela da utilizzare, della valutazione della sua durabilità e delle sue prestazioni a lungo termine.

In questo processo occorre tenere conto delle due principali grandezze che caratterizzano il bitume schiumato:

- Il rapporto di espansione (ER), definito come rapporto tra il massimo volume raggiunto allo stato schiumoso e il volume finale del legante, esaurito il processo di schiumatura;
- Il tempo di semitrasformazione ( $\tau_{1/2}$ ) cioè il tempo, espresso in secondi, durante il quale il volume massimo raggiunto dal bitume nel processo di schiumatura ( $V_{\max}$ ) si riduce della metà ( $V_{\max}/2$ ).

I valori di questi parametri influenzano notevolmente le caratteristiche fisico-meccaniche del prodotto finale. In Figura 4 si riportano le curve di variazione di ER e  $\tau_{1/2}$  al variare della percentuale di acqua di schiumatura. Per una completa caratterizzazione del bitume schiumato e per la determinazione delle sue capacità di favorire la lavorabilità durante l'impasto della miscela è necessario far riferimento alla curva che descrive il collasso della schiuma nel tempo, definita *curva di decadimento* (Figura 5).

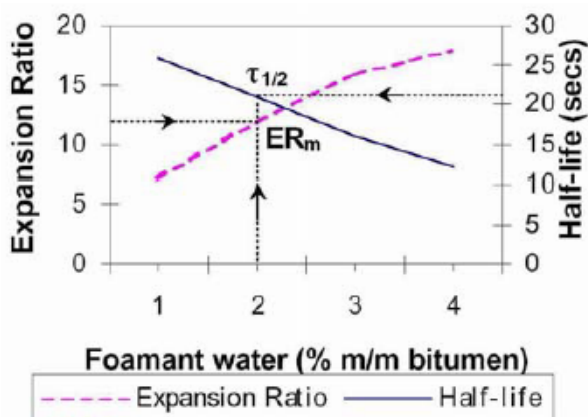


Figura 4: Curve di variazione di ER e  $\tau_{1/2}$  [8]

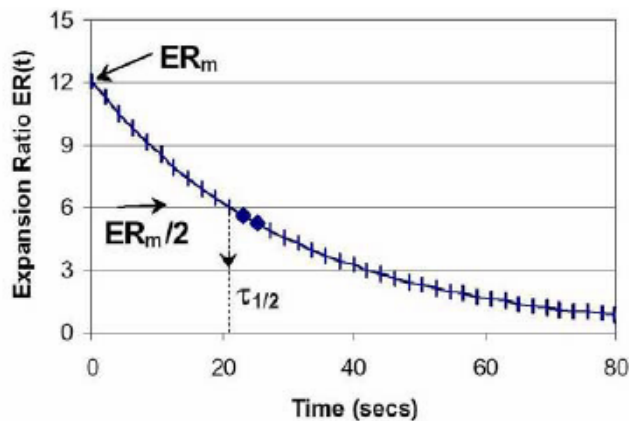


Figura 5: Curva di decadimento [8]

Il processo di schiumatura determina una riduzione della viscosità del bitume e consente una migliore miscelazione tra il legante e gli aggregati. Più precisamente, la schiuma incrementa la superficie specifica del bitume e riduce considerevolmente la sua viscosità, rendendo il legante più adatto all'impasto con aggregati freddi e umidi.

Con il progressivo diminuire della temperatura, il vapore condensa all'interno delle bolle causandone il collasso; di conseguenza la schiuma comincia a decomporsi.

Il fenomeno del decadimento della schiuma durante la fase di vaporizzazione viene illustrato nella Figura 6, dove viene considerato tutto il ciclo di produzione della schiuma.

Poiché il tempo necessario per la spruzzatura ( $t_s$ ) è di almeno 5 secondi, durante i quali nella miscela già inizia la fase di decadimento della schiuma, il massimo rapporto di espansione misurato ( $ER_m$ ) non corrisponde al valore massimo effettivo ( $ER_a$ ), cioè  $ER_m \neq ER_a$  (Figure 6 e 7). Dal massimo rapporto di espansione misurato in laboratorio  $ER_m$  è possibile ricavare a posteriori il valore massimo effettivo  $ER_a$ , non potendo quest'ultimo, essere misurato direttamente per ragioni pratiche. Determinato  $ER_a$  si definisce un parametro caratteristico della schiuma che tiene conto degli effetti combinati dell'espansione (ER) e della stabilità ( $\tau_{1/2}$ ) del bitume e che esprime la capacità della schiuma stessa di mescolarsi e disperdersi negli aggregati. Tale parametro è rappresentato dall'area sottesa alla curva di decadimento e fornisce una misura integrata dell'espansione e della stabilità della schiuma, rappresentando perciò un importante strumento di analisi.

Quest'area, definita come "Indice di schiuma" ( $FI=$ Foam Index), permette di caratterizzare e ottimizzare la schiuma e fornisce indicazioni relative all'energia immagazzinata, nella stessa, in funzione del tempo. L'indice di schiuma si calcola mediante la seguente relazione:  $FI=A1 + A2$  (Figura 7). Lo stesso indice di schiuma costituisce un importante metodo di analisi che consente di determinare l'adeguatezza dei diversi leganti a essere sottoposti a tale trattamento: alti valori di FI determinano una migliore attitudine di un bitume al trattamento di schiumatura rispetto a quanto non si abbia con bitumi a FI più basso. Pertanto non tutti i bitumi sono adatti ad essere sottoposti ad un processo di schiumatura.

Al fine di comprendere i vantaggi e le prestazioni derivanti dall'uso del bitume schiumato si riporta una sperimentazione eseguita in laboratorio e sul campo, riguardante il riciclaggio a freddo di una pavimentazione, attualmente una delle poche applicazioni di tale prodotto innovativo.

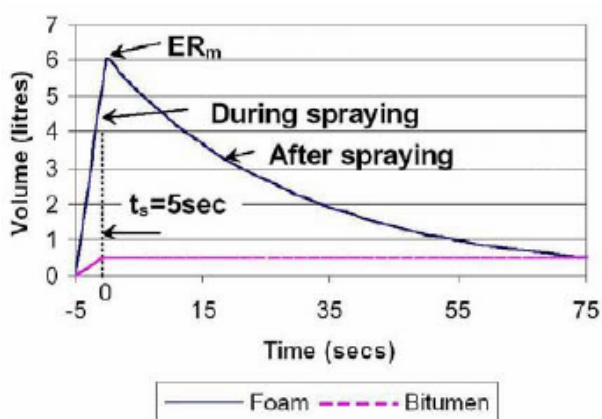


Figura 6: Variazione del volume nel tempo [8]

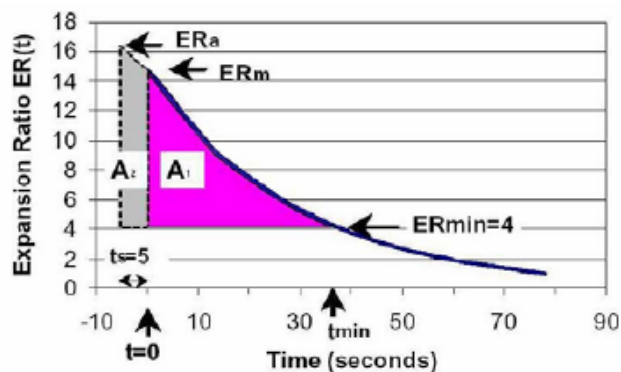


Figura 7: Indice di schiuma [8]

### Descrizione della sperimentazione

Lo scopo dello studio è stato quello di fornire indicazioni e riferimenti in merito alla tecnica del riciclaggio a freddo delle pavimentazioni stradali degradate con bitume schiumato e cemento, attraverso un percorso che va dalla valutazione preventiva (progetto di mix-design) alla verifica delle prestazioni e comportamenti forniti dalle pavimentazioni stradali rigenerate in questo modo.

Attualmente non esiste alcun protocollo ufficiale per la sperimentazione delle miscele con bitume schiumato. Quello adottato per il presente studio si basa su quanto dedotto dalla letteratura disponibile, escludendo le proposte ritenute inappropriate o poco significative.

Grazie alla collaborazione nata tra il Dipartimento di Architettura ed Urbanistica dell'Università di L'Aquila, l'Istituto di Idraulica e Infrastrutture Viarie dell'Università Politecnica delle Marche in Ancona e una ditta di Montepulciano (SI), che da tempo opera nel settore stradale e che è stata tra le prime in Italia ad investire sulla tecnica del riciclaggio a freddo con bitume schiumato e cemento, è stato possibile realizzare un'interessante indagine sperimentale in cantiere ed in laboratorio.

Lo studio è stato condotto su un tronco stradale di una strada extraurbana secondaria (viabilità collaterale della E 78, raccordo Siena-Betolle) ubicata in Provincia di Siena. Il lavoro è consistito nel rifacimento strutturale della pavimentazione stradale esistente, notevolmente degradata, adottando proprio la tecnica del riciclaggio a freddo con bitume schiumato e cemento per la realizzazione dello strato di base.

Al fine di eseguire una completa indagine per la individuazione della miscela ottimale da impiegare e delle migliori modalità di esecuzione dei lavori in cantiere, lo studio è stato condotto in tre successive fasi sperimentali:

- Indagine preliminare condotta in laboratorio;
- Lavori eseguiti in cantiere;
- Indagine sui provini prelevati dal cantiere.

In particolare sono state determinate, per caratterizzare le proprietà delle miscele indagate, le seguenti caratteristiche volumetriche e meccaniche:

- La determinazione dell'assortimento granulometrico;
- Il peso di volume;
- La percentuale dei vuoti;
- La resistenza a trazione indiretta;
- Il coefficiente di trazione indiretta.

Tutte le prove sono state eseguite presso il Laboratorio dell'Istituto di Idraulica e Infrastrutture Viarie dell'Università Politecnica delle Marche in Ancona.

Dell'approfondito studio condotto riporteremo solo le principali conclusioni alle quali si è pervenuti.

*In laboratorio* i provini sono stati confezionati adottando alcune combinazioni di dosaggio del bitume schiumato (2%, 3%, 4%) e del cemento (1%, 2%, 3%) aggiunti al materiale prelevato dal cantiere, al fine di determinare la miscela "ternaria" bitume-acqua-cemento ottimale. Il bitume adottato è un PMB 80/100 il quale è stato

denominato bitume “Base-Modifica 80/100”, mentre il cemento Portland risulta con classe di resistenza 32.5. In tabella 2 si riportano i dati tecnici relativi al bitume Base-Modifica 80/100.

Penetrazione a 25°C, dmm	80-100
Punto di rammollimento, °C	60-70
Indice di penetrazione	da -1 a 3
Punto di rottura FRAAS, °C	< -16
Viscosità dinamica a 80°C, Pa•s	60-400
Viscosità dinamica a 160°C, Pa•s	0,4-2,0
Intervallo di elastoplasticità	75-90

*Tabella 2 : Dati tecnici del bitume Base-Modifica 80/100*

Le modalità di raggiungimento del punto di rottura del materiale sono influenzate dalle diverse percentuali di leganti utilizzate, che ne modificano il comportamento delle miscele analizzate, infatti si è riscontrato che:

- Un crescente quantitativo di cemento presente nell’impasto induce notevoli incrementi di resistenza meccanica, ma anche rotture di tipo fragile (Figura 18);
- Un crescente quantitativo di bitume conferisce al prodotto finale caratteristiche di deformabilità maggiori che permettono di ottenere rotture di tipo duttile, ma con resistenze meccaniche inferiori (Figura 19).



*Figura 18: Rottura di tipo fragile*



*Figura 19: Rottura di tipo duttile*

Dal confronto dei risultati delle prove di trazione indiretta, eseguita sui provini a tre giorni di maturazione e rappresentanti le varie combinazioni bitume-cemento, si evince che il miglior compromesso, valutando sia le resistenze meccaniche  $R_t = 2P/\pi HD$  sia i valori di duttilità  $\alpha$  (angolo dal ramo post-picco del diagramma di carico Forza-Spostamento alla verticale), si ottiene per la miscela (C2-B3) che contiene il 2% di cemento ed il 3% di bitume, sul peso totale del fresato.

Nei grafici sottostanti si indicano i parametri meccanici del conglomerato di cui si è tenuto conto;  $\Delta v_0$  è la deformazione a rottura,  $R_t$  e CTI espressi in  $N/mm^2$ .

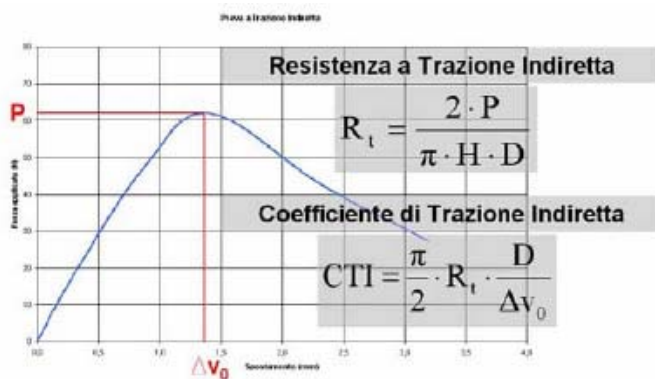


Figura 10: Calcolo di  $R_t$  e  $CTI$



Figura 11: Calcolo dell'Indice di Duttilità  $\alpha$

In cantiere, nel dettaglio per l'intervento eseguito, si è proceduto con un'iniziale stesa di cemento sul tronco stradale da rigenerare, per poi procedere alla fresatura e miscelazione del fresato (e cemento aggiunto) con il bitume schiumato e l'acqua; non sono stati sparsi *aggregati di correzione* della miscela perché preventivamente in laboratorio era stata verificata l'accettabilità della curva granulometrica di un campione di fresato tal quale, proveniente dal cantiere stesso.

Nella figura 27 è riportato un particolare della fase di fresatura e miscelazione dell'impasto all'interno dell'apposita camera, dove si notano una fresa che sgretola il manto stradale nelle pezzature ottimali e gli ugelli di spruzzatura, sia per il bitume schiumato che per l'acqua d'impasto.

In questa camera il materiale fresato è spinto verso l'alto dove si mescola con i vari tipi di leganti opportunamente dosati; quindi ricade sul tamburo di fresatura che per effetto del suo movimento rotatorio ne impasta e miscela i componenti, riposizionandoli sulla pavimentazione appena fresata.

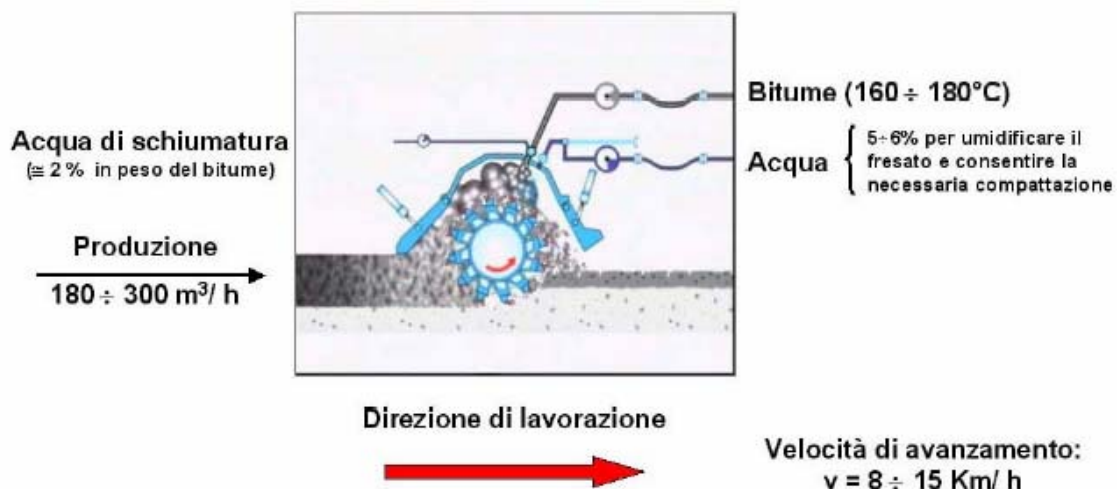


Figura 27: Rotore di fresatura e miscelazione.

Gli obiettivi perseguiti nelle operazioni di cantiere sono stati:

- La valutazione dell'influenza dell'energia di compattazione sulle caratteristiche meccaniche delle miscele;
- Il confronto tra il bitume Base-Modifica 80/100 (utilizzato nella fase preliminare e solitamente impiegato per conglomerati bituminosi tradizionali) ed il bitume Superfoam®, che presenta caratteristiche ideali per questa tecnica di riciclaggio, in quanto risulta essere un legante meno viscoso alle alte temperature ( $T_{P\&A}$  minore).

Al fine di valutare il primo obiettivo sono state considerate tre forme di compattazione delle miscele. In particolare sono stati eseguiti due livelli di compattazione in sito, mediante 4 oppure 8 passaggi del rullo

costipatore, ed uno in laboratorio utilizzando la forma di costipamento prevista per la prova Marshall su materiale sciolto miscelato in cantiere.

Al fine di valutare il secondo obiettivo, le diverse forme di compattazione delle miscele sono state ripetute in forma analoga su due tratti stradali uguali dove si è utilizzato, nel primo, il bitume Base-Modifica e, nel secondo, il bitume Superfoam® di cui si riportano i dati tecnici in tabella 3 e le curve di variazione di ER e di  $\tau_{1/2}$  in Figura 29.

Caratteristica empiriche	Unità di misura	Norma	Valore
Penetrazione a 25°C	dimmi	EN 1426: 99; CNR 24/71	80-100
Punto di Rammollimento	°C	EN 1427: 99; CNR 35/73	40-44
Punto di vetture Froas	min °C	EN 12593: 99; CNR 35/73	5-8
Viscosità Dinamica 160°C, gradiente di velocità 10 s <sup>-1</sup>	MPa·sec	EN 13702-2	≤ 100
Stabilità allo stoccaggio: - Δ penetrazione - Δ rammollimento	0,1 mm °C	EN 13399: 99	≤ 5 ≤ 5
Valori dopo RTROT		EN 12607-1: 99	
Perdita per riscaldamento (volatilità) a 160°C	%	EN 12607-1: 99	≤ 0,5
Penetrazione residua a 25°C	%	EN 1426: 99; CNR 24/71	≥ 50
Incremento del punto di rammollimento	°C	EN 1427: 99; CNR 35/73	≤ 9

Tabella 3: Dati tecnici bitume Superfoam

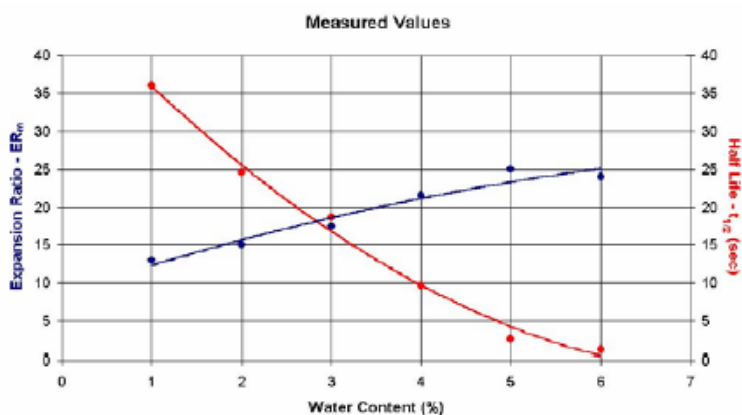


Figura 29: Curve di variazione di ER e  $\tau_{1/2}$  del Superfoam

I campioni, relativi ai due diversi gradi di compattazione realizzati (4 e 8 passate di rullo) e per i due tipi di leganti utilizzati (Base-Modifica e Superfoam®) sono stati prelevati, in cantiere, mediante carotaggio dopo due giorni dalla stesa della miscela. Il taglio delle carote è stato effettuato mediante una sega ad acqua ed i provini hanno subito una stagionatura a temperatura ambiente, prima di essere sottoposti ai test di laboratorio (Figura 30).

Dall'analisi dei risultati emerge, come era da attendersi, che le miscele sottoposte ad 8 passate di rullo sono risultate più compatte rispetto a quelle sottoposte a 4 passate di rullo. Inoltre, le miscele con bitume Superfoam® hanno fornito valori di densità maggiori rispetto a quelle realizzate con il bitume Base-Modifica che pertanto risulta meno adatto per questo tipo di applicazione. I provini costipati in laboratorio hanno fornito valori intermedi di vuoti e resistenze rispetto a quelli ottenuti dai campioni prelevati in sito; ciò ci consente di affermare che tale forma di costipamento riproduce in maniera verosimile quanto viene realizzato nei cantieri.



Figura 30: Carotaggio e taglio delle carote

E' stata eseguita una prova a trazione indiretta sui campioni, ed i risultati sono stati organizzati secondo le tre variabili indagate:

- Tipo di bitume;
- Tipo di compattazione;
- Tempo di stagionatura.

Dall'analisi dei valori risulta che:

- I provini aventi per legante il bitume Superfoam® hanno fatto registrare valori di resistenza superiori rispetto a quelli aventi per legante il bitume Base-Modifica;
- Le modalità di rottura dei campioni, relativi alle due forme di compattazione in sito (4 e 8 passate di rullo), sono risultate, a parità di stagionatura, leggermente differenti tra loro: comunque quelli compattati con un numero di passate maggiore hanno fornito, sempre, resistenze più elevate. Inoltre per i risultati ottenuti dai provini costipati in laboratorio valgono le stesse considerazioni già espresse per l'indagine volumetrica, non però per quanto concerne la maturazione della miscela essendo il costipatore Marshall troppo impulsivo;
- I provini stagionati a 28 giorni (lungo termine) hanno fatto registrare prestazioni meccaniche circa raddoppiate rispetto a quelli stagionati a 3 giorni (breve termine).

Inoltre, emerge che, già nelle prove eseguite a 7 giorni di stagionatura, si ottengono, per tutte le miscele realizzate con bitume Superfoam®, risultati di  $R_t$  e CTI pressoché accettabili secondo le prescrizioni dettate da tutti i capitolati di settore.

A questo punto si è voluto svolgere un'ulteriore indagine, di tipo statistico, con l'obiettivo di correlare la resistenza a trazione indiretta  $R_t$  al numero di giorni di stagionatura delle miscele in relazione alle diverse forme di compattazione eseguite e per i due tipi di bitume impiegati. Sono emersi risultati soddisfacenti utilizzando relazioni di tipo lineare.

Da questa analisi sono scaturiti i seguenti parametri che sintetizzano l'evoluzione delle resistenze meccaniche delle miscele nel tempo:

- $R_{t\text{ iniziale}}$ , il valore dell'ordinata all'origine della retta di regressione, che rappresenta il valore di resistenza a trazione al tempo zero ossia la resistenza a breve termine della miscela;
- $d(R_t) / d(t)$  il valore della pendenza della retta di regressione, che rappresenta la velocità di maturazione della miscela durante la stagionatura.

Il risultato più interessante che scaturisce da questa indagine statistica è il seguente: le miscele realizzate con il bitume Superfoam® e compattate con minore energia (4 passate di rullo) forniscono una velocità di maturazione più elevata rispetto a quelle compattate con maggiore energia (8 passate di rullo). Ciò sta ad indicare che questo tipo di legante riesce a maturare meglio in miscele che presentano una maggiore percentuale dei vuoti residui.

Evidentemente questo aspetto consente una maggiore ossigenazione della miscela e, quindi, una più facile eliminazione dell'acqua residua dalla fase di impasto che determina una migliore maturazione della matrice bituminosa.

Pertanto le miscele realizzate con il bitume Superfoam® raggiungono a lungo termine, indipendentemente dalla forma di compattazione ricevuta, prestazioni meccaniche veramente soddisfacenti e paragonabili ai tradizionali conglomerati bituminosi per strato di base.

Da una sintesi generale dei risultati ottenuti, scaturisce chiaramente che il bitume Superfoam® è più idoneo per essere usato nel processo di schiumatura rispetto al bitume Base-Modifica. Inoltre la scelta di ricorrere ad una maggiore o minore energia di compattazione dipenderà rispettivamente dalla necessità di una immediata riapertura al traffico (breve termine) oppure dalla possibilità di poter far maturare la miscela per almeno 7 giorni (medio termine) o più.

Nella tabella 6 si riportano in forma schematica, le prestazioni delle miscele in funzione delle caratteristiche volumetriche (densità e percentuale dei vuoti residui) e di quelle meccaniche (resistenza meccanica e velocità di maturazione) delle miscele stesse.

		CARATTERISTICHE MECCANICHE		
		Valori di Rt a breve termine	Velocità di maturazione	Valori di Rt a lungo termine
CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE	Miscele più compatte	accettabili	bassa	buoni
	Miscele meno compatte	bassi	alta	buoni

*Tabella 6: Schema delle prestazioni fornite dalle miscele realizzate con Superfoam in funzione delle caratteristiche volumetriche e meccaniche*

### Conclusioni

Nel lavoro svolto si è effettuato uno studio sulla tecnica del riciclaggio a freddo delle pavimentazioni stradali degradate con bitume schiumato e cemento, con lo scopo di approfondire le conoscenze scientifiche in tale settore.

Lo studio effettuato ha riguardato un'interessante indagine sperimentale svolta sia in laboratorio sia in cantiere su di un tratto di strada di tipo extraurbana secondaria.

Le indagini preliminari, eseguite in laboratorio, sono state effettuate per individuare i dosaggi ottimali dei leganti da impiegare nei lavori di rigenerazione della pavimentazione stradale studiata, mentre nelle operazioni di cantiere sono stati perseguiti due diversi obiettivi: quello di valutare gli effetti di differenti gradi di compattazione delle miscele (4 oppure 8 passate di rullo) e quello di confrontare due diversi tipi di bitume (Base-Modifica e Superfoam®).

Questi obiettivi sono stati valutati in laboratorio per mezzo di indagini, sia volumetrica (densità e percentuale dei vuoti) sia di prestazioni meccaniche (prove a trazione indiretta), eseguite su campioni prelevati in cantiere.

Dall'indagine volumetrica si evince che per effetto della compattazione le grandezze studiate evolvono secondo criteri attesi: all'aumentare dell'energia di costipamento aumenta la densità e diminuisce la percentuale dei vuoti della miscela.

Dall'analisi delle prestazioni meccaniche si osserva che si ottengono prestazioni più elevate per le miscele maggiormente compattate e realizzate con il bitume Superfoam® che, evidentemente, risulta più idoneo a questo tipo di applicazione.

Nello studio è stata inoltre eseguita un'indagine sull'evoluzione, nel tempo, delle prestazioni meccaniche delle miscele. Questo aspetto è stato osservato, anche in questo caso, attraverso la valutazione dei risultati forniti da prove a trazione indiretta eseguite su campioni prelevati in cantiere e stagionati a 3, 7, 28 giorni. Dall'analisi dei risultati emerge che i provini stagionati a lungo termine (28 giorni) forniscono prestazioni nettamente superiori a quelli stagionati a breve termine (3 giorni). Tale tendenza di miglioramento delle prestazioni meccaniche nel tempo risulta molto importante se valutata rispetto al comportamento dei conglomerati bituminosi tradizionali confezionati a caldo che, invece, raggiungono immediatamente, al raffreddamento, le massime prestazioni e non sviluppano ulteriori miglioramenti.

Lo sviluppo incrementale della resistenza nel tempo è dovuto alla presenza del cemento, il quale funge anche da riempitivo del conglomerato e fillerizzante (addensante e stabilizzante) del legante bituminoso, riducendo la sua suscettibilità termica, e di conseguenza migliorando le prestazioni meccaniche alle temperature estreme.

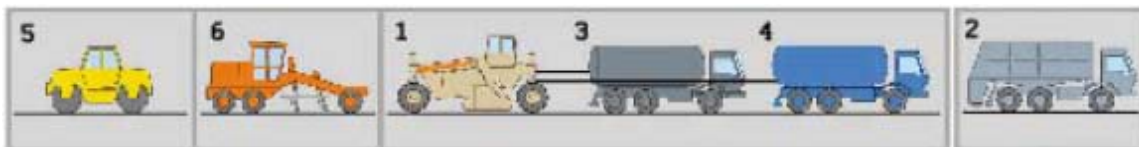


Infine è stata svolta un'ulteriore indagine statistica con l'obiettivo di correlare la resistenza a trazione indiretta  $R_t$  al numero di giorni di stagionatura delle miscele in relazione alle diverse forme di compattazione eseguite e per i due tipi di bitume impiegati. Dalla valutazione della velocità di maturazione delle miscele, definita come la variazione del valore della resistenza a trazione indiretta  $R_t$  nel tempo, si evince che i valori di velocità di maturazione, riscontrati per le miscele in cui si è impiegato il bitume Superfoam®, decrescono all'aumentare dell'energia di costipamento. Infatti, le miscele meno compattate maturano più velocemente rispetto a quelle maggiormente compattate raggiungendo, a lungo termine, prestazioni meccaniche veramente soddisfacenti e simili a quelle delle miscele più compattate.

Da una sintesi dei risultati si può asserire che la tecnica del riciclaggio a freddo con bitume schiumato e cemento è in grado di competere con i tradizionali conglomerati bituminosi confezionati a caldo.

Dal punto di vista operativo la tecnologia non necessita di impiego di frese in quanto la macchina è dotata di un tamburo rotante, agente all'interno di una campana, che svolge sia la funzione di fresatura a freddo sia di miscelazione, la produzione oraria reale è di 270 t/h contro una produzione di 80 t/h (teorica di 120 t/h) della tecnica con emulsioni bituminose e cemento. La stabilizzazione dello strato di fondazione e di base può avvenire anche con solo cemento, o solo bitume, comprese le soluzioni intermedie poiché si ha un ottimo controllo della miscela prodotta. Vi è la possibilità di una immediata stesa degli strati neri superficiali con tempestiva riapertura al traffico della strada, fermo restando i tempi tecnici necessari al raffreddamento del manto a caldo, se non eseguito a sua volta con tecniche a freddo. La profondità di lavorazione potenziale è fino a 50 cm, operativa 20÷25 cm, ottimale per la compattazione. Il personale operativo è ridotto.

Gli aspetti negativi sono due: il primo è dovuto all'impiego necessario di una macchina livellatrice (grader) agente prima del rullo compattatore nel treno di cantiere, al fine di sistemare il piano finito non regolare in direzione trasversale, soprattutto in zone a forte pendenza; il secondo deriva dal fatto che tra una corsia e l'altra trattata, longitudinalmente si possono creare spazi vuoti (max 30 cm) da colmare, i quali non risultano omogenei con il resto dello strato di pavimentazione riciclato.



Va comunque evidenziato che tale tecnica può sicuramente subire dei miglioramenti sia per quel che riguarda i mezzi impiegati (riciclatrici-miscelatrici, rulli compattatori), sia per la tipologia del legante che meglio si presta a tale tipo di lavorazione. Altre indagini, su questa tecnica di riciclaggio a freddo, potranno essere finalizzate ad un ampliamento delle possibilità d'impiego anche negli strati superiori a quello di base delle pavimentazioni stradali flessibili.

Una ulteriore recente applicazione del riciclaggio a freddo con bitume schiumato, la si è avuta su un tratto di oltre 1 km della tangenziale Mistral, a Sud di Modena, ed ha nuovamente confermato le potenzialità di tale tecnologia per la manutenzione strutturale delle strade. La scelta del riciclaggio a freddo con l'utilizzo di bitume schiumato, già sperimentata un anno fa sul tratto della tangenziale posto a Nord Est della città, è frutto della ricerca eseguita a tutto campo per risolvere il problema della generale carenza di portanza delle fondazioni che non sono in grado di assicurare una ragionevole durata agli interventi eseguiti negli ultimi anni di semplice sostituzione dei primi 10-20 cm della pavimentazione in conglomerato.

Ricordiamo inoltre la attuale sistemazione della tangenziale di Crema. La Giunta Provinciale ha infatti deciso di prevedere un intervento globale di ristrutturazione del manto stradale della 415 sui 7.5 km di circonvallazione, nel tentativo di "correggere" i difetti d'usura, ma soprattutto di costruzione della struttura, utilizzando la tecnica del bitume schiumato per il riciclaggio migliorativo dello strato di fondazione e di base.



### (1.f) CATRAMI MODIFICATI

I catrami tradizionali sono prodotti di condensazione dotati di capacità legante, ottenuti dalla distillazione distruttiva di carboni fossili nelle cokerie (impianti per la produzione di carbon coke e gas di città), torba, o sostanze vegetali. Il catrame, come gli altri leganti organici idrocarburici, è un sistema colloidale in cui la fase dispersa è costituita da piccolissime particelle carboniose in una fase disperdente oleosa. Ricordiamo che i *bitumi* sono gli ultimi residui della distillazione del petrolio, la frazione a densità maggiore più correttamente indicati come “bitumi industriali”, mentre si preferisce chiamare *asfalti* i bitumi naturali ricavati dalla macinazione o distillazione di emersioni rocciose “asfaltiche” prossime ai giacimenti petroliferi. Il catrame, fra i tre, è il prodotto più scadente infatti è quasi scomparso dal campo delle costruzioni stradali; tuttavia pur di utilizzarlo, può essere ulteriormente lavorato, mescolato al bitume, additivato o modificato. Le sue caratteristiche reologiche inferiori a quelle dei bitumi hanno indotto ad utilizzare polimeri ad alto peso molecolare per la sua modifica, così come per i PMB, nella maggior parte dei casi il polivinilcloruro PVC, che ne aumentano l’intervallo elastoplastico. Tali prodotti sono allora consigliati per trattamenti superficiali e mani di ancoraggio.

Le resine epossidiche possono essere parimenti impiegate, in quanto anch’esse intervengono positivamente sulla suscettibilità termica del catrame, riducendola. Il catrame modificato peraltro resiste al cherosene, fatto che ne consiglia l’impiego in aree aeroportuali (testate delle piste e piazzali di parcheggio aeromobili) o in aree di servizio per il rifornimento carburanti al posto dei sampietrini in porfido.

Si classificano in base alla consistenza, ossia al tempo in secondi impiegato da una sonda per affondare nella massa di una profondità stabilita, oppure in base alla viscosità come per la Normativa Italiana (viscosimetro di Redwood modificato, prova a 30 °C). Il sistema di classifica dei catrami è tale che ad un catrame con coefficiente C elevato (alta viscosità) corrisponde, per analogia di impiego, un bitume con coefficiente B basso (bassa penetrazione): per esempio per la preparazione di conglomerati si usano catrami C 125/500 oppure bitumi B 40/50.

In linea di massima si impiegano i catrami C 10/40 e C 40/125 per trattamenti superficiali e procedimenti a penetrazione, i catrami C 125/500 per conglomerati. I trattamenti stradali eseguiti con catrame sono meno resistenti alle sollecitazioni e nel tempo come già detto, ma anche meno sdruciolevoli di quelli a base di bitume. Attualmente i catrami tradizionali, per ultimi qui descritti, hanno trovato impiego di un certo rilievo nella preparazione di pitture di fondo antiruggine.

Si riporta la tabella relativa ai principali requisiti di accettazione per i catrami, previsti dalla Normativa Italiana, C.N.R.; si nota che la massa volumica, o peso specifico, è maggiore rispetto quella dei bitumi ( $\gamma_B \cong 1100 \text{ kg/m}^3$  a 25 °C), ma l’adesione è minore.

Caratteristiche	Classi dei catrami (C)		
	C 10/40	C 40/125	C 125/500
<b>Viscosità Redwood (30 °C)</b>	10 - 40	40 - 125	125 - 500
<b>Adesione minima (80 mg)</b>			
Granito di San Fedelino			
asciutto ( $0,1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ kgf/cm}^2$ )	3,00	5,00	6,00
bagnato	1,20	1,70	2,00
Marmo di Carrara			
asciutto	3,00	5,00	6,00
bagnato	-	-	-
<b>Massa volumica (30 °C) (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	1140-1120	1150-1240	1160-1250

Tab. 3: Classificazione C.N.R. dei catrami per usi stradali.



## (1.g) LEGANTI POLIMERICI

I leganti polimerici impiegati nel settore stradale sono preferibilmente polimeri a basso peso molecolare, termoindurenti (resine termoindurenti a polimerizzazione controllata per condensazione, con struttura reticolare parziale che garantisce la rigidità in opera ma anche plasticità nella fase di lavorazione) come le resine epossidiche (EP) e il poliestere termoindurente (PET), e termoplastici (resine termoplastiche a polimerizzazione per addizione, con struttura macromolecolare lineare caratterizzati da una temperatura di transizione rigido-elastica) come il poliestere termoplastico (PET) ed il polietilene a bassa densità (LDPE).

Hanno limitato impiego per i loro costi elevati, difatti per ragioni economiche alle volte vengono miscelati con sabbia (caricamento), senza che per questo però ne siano alterate le proprietà. Sono insensibili all'acqua e garantiscono un ottimo effetto legante; si è validamente sperimentato il loro utilizzo in situazioni di esercizio estreme, in campo aeroportuale e stradale (climi molto caldi, utenze poco rispettose) ad esempio è stato testato il polietilene a bassa densità in paesi nord-africani.

E' possibile realizzare manti d'usura ad alto attrito a base di resina epossidica bicomponente applicata a freddo (temperatura variabile da 20 °C a 70 °C), utilizzando aggregati di tipo e granulometria diversi; di questi sono state severamente testate le proprietà meccaniche, e ne è risultato che, a parità di inerti utilizzati, offrono le stesse prestazioni di modulo dinamico e di resistenza allo scorrimento dei conglomerati tradizionali. Diffuse sono soprattutto le pavimentazioni a base di resina poliuretanica a due componenti con reticolazione rapida, disponibili in un'ampia gamma di colori.



C'è oggi, da parte dei cittadini, una giusta e crescente richiesta di armonia nell'ambiente naturale e di stile in quello urbano. Un'esigenza a cui dà ottime risposte il legante polimerico colorato. Si tratta di prodotti trasparenti che utilizzati puri valorizzano pienamente il colore naturale della graniglia utilizzata, consentendo realizzazioni di alto valore estetico, ben armonizzabili con aree di elevata importanza paesaggistica o storica/culturale. Inoltre si trovano in commercio in alternativa agli aggregati naturali anche inerti colorati antiscivolo (o antisdrucciolevoli) ad alta durata.

Invece, con l'impiego di piccole quantità di pigmenti, si possono ottenere manti a freddo (perlopiù microtapeti, max 1.5 cm) e pavimentazioni insolite, impattanti e dal forte contenuto estetico in una vasta gamma di colori, capaci di caratterizzare efficacemente aree urbane dedicate al commercio, ai divertimenti, al turismo, carrozzabili di parchi pubblici o privati, corsie preferenziali o piste ciclabili, ecc.

La colorazione delle pavimentazioni è al giorno d'oggi sempre più importante non solamente per fini estetici, ma anche per scopi di mantenimento della sicurezza nella sede stradale, costituendo un ottimo strumento per la gestione della promiscuità in particolare nelle strade già esistenti dove si vuole far coesistere le varie componenti del traffico riducendo i pericolosi differenziali di velocità tra di esse.



I conglomerati basati sui leganti polimerici colorati si mettono in opera alle stesse temperature e con le stesse attrezzature utilizzate per i bitumi tradizionali e sono stati tra l'altro scelti per la pavimentazione del piazzale antistante il museo di Villa Borghese a Roma, per quella del porto di Lampedusa, per l'autostrada ed il tunnel del Frejus, e la piazza comunale di Livorno. Con tali leganti innovativi il colore si fa strada nell'ambiente, offrendo ad urbanisti, architetti e responsabili dei beni culturali ed ambientali un'opportunità in più per creare spazi pubblici o privati più gradevoli ed armonici.



I leganti polimerici possono essere anche additivati, oltre ai pigmenti colorati, con fibre rinforzanti di vetro, di kevlar (poliammide termoplastica non vinilica con notevoli doti di resistenza), e di carbonio, per situazioni di impiego molto particolari ove si richiedono grandi prestazioni meccaniche a fronte della loro elevata onerosità; si ottengono in questo modo i leganti polimerici fibrorinforzati FRP (Fiber Reinforced Polymer).

Una applicazione speciale di questi leganti è rappresentata dalla realizzazione di manti superficiali termoplastici antiscivolo "hotgrip" contenenti bauxite calcinata come aggregato, ad alto PSV (Polished Stone Value, o valore di levigazione della pietra), ricavato tramite il British Portable Skid Resistance Tester su tasselli provenienti da prova di levigabilità accelerata.

L'ottenimento di un microtappeto colorato è possibile anche con leganti bituminosi classici o modificati e/o additivati, oltre che con i leganti polimerici sin qui esaminati. Si propone di seguito un prodotto usato sempre più spesso per tale scopo, idoneo a bitumi normali.

L'aggiunta dell'ossido di ferro nella fase di miscelazione del bitume con gli inerti, comporta la pigmentazione rossa dell'intero conglomerato. Il prodotto è particolarmente indicato per la realizzazione di marciapiedi, piste ciclabili (Fig. 1), strade dove si necessita una migliore visibilità sia diurna che notturna della superficie stradale.

### SPECIFICHE

Aspetto:	polvere
Colore:	rosso
Densità a 15°C:	5.0 gr/cmc

Il dosaggio dell'ossido di ferro varia in funzione della colorazione che si vuole ottenere e comunque tra 5,0% e 7,0% calcolato sul peso degli inerti. L'impasto deve avvenire ad una temperatura compresa tra i 120-135 °C, inferiore a quella tipica dei conglomerati tradizionali, di conseguenza troppo inferiore a quella necessaria per i conglomerati di bitume modificato (170÷190 °C); si può ricorrere per ridurre la consistenza del legante a quella temperatura, agli zeoliti o alle cere paraffiniche (vedi in seguito, punto (2.d)). Per migliorare la qualità del conglomerato bituminoso colorato di rosso si consiglia l'uso di additivi tipo fibre, dosati all'1% sul bitume.

Viene fornito in sacchi da 25 kg, risulta stabile alle normali temperature e va mantenuto al coperto.

Recentemente, ad esempio, il Comune di Roma ha approvato il progetto di differenziazione delle corsie preferenziali per gli autobus ed i taxi dalle altre, mediante la stesa di un tappeto bituminoso di colore rosso. Al posto dei cordoli verranno applicate speciali borchie.

La differenziazione delle corsie tramite i colori è stato infatti riscontrato che è una esigenza particolarmente sentita dagli utenti, come risulta anche da una inchiesta condotta pochi anni fa in Francia.

Altre applicazioni dell'ossido di ferro le si sono avute a Londra nei pressi di Buckingham Palace e nella corsia box del circuito di Montecarlo.



Fig. 1. Pista ciclabile realizzata in conglomerato bituminoso additivato con ossido di ferro.





## **(2) AGGREGATI INNOVATIVI**

Anche il legislatore italiano sta incominciando a dare indicazioni per promuovere il senso ecologico e un maggior riciclo dei materiali. In questo senso è di recente pubblicazione il D.M. n. 203/2003, già denominato Decreto Matteoli (dal nome del Ministro dell'Ambiente emanante), in vigore dal 20 agosto dello scorso anno, che, pur essendo lacunoso per alcuni aspetti, fissa l'obbligo di usare almeno il 30% di materiali riciclati, imponendo l'adeguamento dei capitolati delle opere pubbliche predisposti dagli enti pubblici e dalle S.p.A. miste.

L'articolo 2 del decreto definisce come materiale riciclato "un materiale che sia realizzato utilizzando rifiuti derivanti dal post-consumo", ma l'elenco dei materiali riciclati, dei manufatti e beni ottenuti con materiale riciclato, deve ancora essere definito da uno speciale gruppo di lavoro.

Esistono tuttavia anche normative più specifiche di quest'ultima Italiana a livello nazionale di cui sopra si è menzionato, nonostante siano precedenti ad essa, e alle quali possiamo riferirci.

Il nuovo D.G.R. 7 Febbraio 2003, n. 7 della Regione Lombardia definisce le caratteristiche dei materiali inerti per la costruzione di infrastrutture viarie. L'approvazione di questa nuova delibera è stata guidata da una doppia finalità. L'obiettivo primario della Giunta regionale è stato quello di stabilire indirizzi e disposizioni tecniche per l'utilizzo, in opere pubbliche e nelle grandi infrastrutture per la mobilità, di materiali inerti di riciclaggio, opportunamente trattati, in sostituzione di materiale pregiato, attraverso accordi con le Società o i Consorzi di Società che hanno in appalto i lavori; accordi da stipulare con le Società o i Consorzi di Società di cui all'articolo 3 della legge regionale 8 Agosto 1998, n. 14.

La seconda finalità è quella di limitare il ricorso all'apertura delle cosiddette "cave di prestito" e la contestuale riduzione del ricorso alle discariche per lo smaltimento dei rifiuti inerti.

L'Unità Operativa Attività Estrattive e Recupero Ambientale della Direzione Generale Qualità dell'Ambiente, con la collaborazione di un apposito gruppo di lavoro costituito da rappresentanti di Enti, Associazioni, Società ed Uffici Pubblici interessati a vario titolo all'utilizzo di materiale inerte di riciclaggio, ha quindi predisposto un elaborato tecnico che è stato approvato dalla Giunta Regionale mediante la delibera in questione. La stessa, infatti, approva, all'allegato A, l'elaborato tecnico che riporta le caratteristiche dei materiali inerti utilizzabili per la realizzazione delle diverse tipologie di opere pubbliche stradali e definisce, all'allegato B, le tipologie di impianti idonei alla produzione di materiali inerti riciclati autorizzati dalla Regione.

I nuovi regolamenti sugli inerti, in definitiva, limitano decisamente la possibilità di estrarre **aggregati naturali** da cave in alvei fluviali, in particolare nel tratto pedemontano che è stato quello più eroso (si pensi che il fiume Brenta, nel tratto da Bassano del Grappa a Cittadella, è sceso di 4÷5 metri), ed in roccia, cosicché è diventato di fondamentale importanza il recupero di inerti già utilizzati (**aggregati di riutilizzo**) in genere per lo stesso scopo per il quale si vuole adoperarli una seconda volta, così come il fresato stradale, il riciclaggio di materiali altrimenti destinati allo smaltimento (**aggregati riciclati**), ad esempio pneumatici usurati, residui da costruzioni e demolizioni, rifiuti solidi urbani (dai quali si ricavano anche polimeri modificanti di riciclo per i bitumi, vedi il REC-PE) o delle lavorazioni industriali, e l'utilizzo alternativo di **aggregati artificiali**, ossia composti di materiali inerti, perlopiù prodotti "ad hoc" prevalentemente con processi di tipo termico, come l'argilla espansa.

I trattamenti ai quali sono sottoposti i materiali di riutilizzo, riciclo, e quelli per la formazione degli aggregati artificiali, possono essere di tipo meccanico, termico, e chimico.

### **(2.a) ARGILLA ESPANSA**

L'argilla espansa è un inerte artificiale e naturale allo stesso tempo, ottenuto dalla cottura di particolari argille di vari colori, all'interno di forni rotanti, a temperatura attorno ai 1200 °C, così da appartenere alla classe di reazione al fuoco "0" (incombustibile) proprio come il cemento. Il prodotto finito si presenta in forma di granuli a superficie irregolare, di diametri variabili tra 0 e 30 mm, caratterizzati da una scorza esterna resistente con una elevata rugosità superficiale e meno porosa, intimamente legata ad un nucleo interno alveolare con un elevato indice dei vuoti.

Infatti all'interno dei grani stessi è presente una grande quantità di pori, alcuni dei quali non interconnessi. E' possibile allora individuare, all'interno di questo particolare mezzo poroso, due tipi differenti di vuoti che nel seguito saranno chiamati, rispettivamente, intergranulari e intragranulari (o endogranulari).

Mentre i pori intergranulari sono interconnessi e vengono saturati facilmente quando il materiale è posto sotto falda, i pori intragranulari (o endogranulari) si riempiono d'acqua con molta più difficoltà ed alcuni di essi non si satureranno mai. Per una migliore comprensione di quanto appena osservato, in Fig. 2, è schematizzata la distribuzione di solidi e vuoti all'interno del continuo.

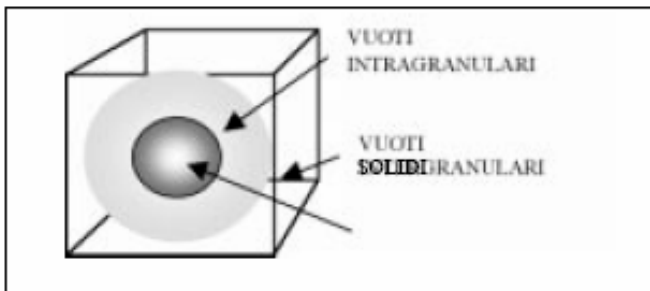


Figura 2: Schema teorico della distribuzione di solidi e vuoti nelle argille espanse

Quando viene compattato, il materiale perde parte del volume occupato dai vuoti interstiziali ma non quello contenuto all'interno dei grani. Quando viene saturato, i vuoti interstiziali si riempiono rapidamente mentre difficilmente si saturano i vuoti intragranulari che spesso sono occlusi e non interconnessi. In Fig. 3 è riportato l'andamento del coefficiente di imbibizione (definito come peso dell'acqua assorbita su peso del materiale secco) nel tempo: solo dopo circa tre mesi sembra raggiunto almeno asintoticamente un valore costante.

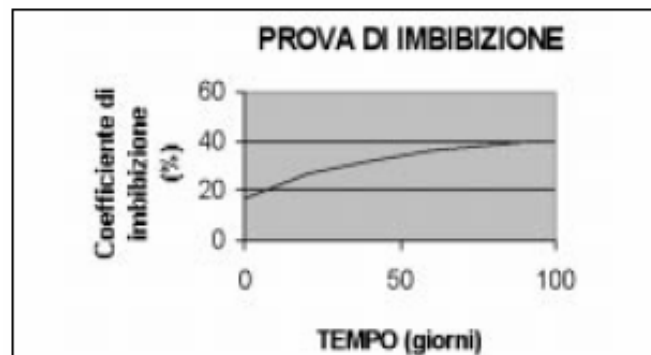


Figura3: Prova di imbibizione

Il granulo di argilla espansa, composto da ossidi metallici inorganici (carbonati, solfati, silicati di calcio, ecc.) e privo di elementi organici, risulta chimicamente inerte, inalterabile nel tempo ed ecobiocompatibile.

Variando alcune impostazioni di produzione, come la temperatura di essiccazione e di espansione, il numero di giri del forno, il tipo e la quantità di materia prima e di additivi impiegati, si ottengono tre tipi di argilla espansa, che, in ordine crescente di pesi e resistenze, si individuano come:

- Argilla espansa *normale*, la cui massa volumica non addensata  $m_v$  (densità), nella granulometria 5÷10 mm, è compresa fra 320 e 370 kg/m<sup>3</sup>, mentre la resistenza allo schiacciamento  $R_C$  (compressione) è superiore a 10 kg/cm<sup>2</sup>;
- Argilla espansa *resistente*, per 3÷11 mm,  $m_v = 420 \div 470$  kg/m<sup>3</sup>,  $R_C > 27$  kg/cm<sup>2</sup>;
- Argilla espansa *strutturale*, per 5÷15 mm,  $m_v = 580 \div 650$  kg/m<sup>3</sup>,  $R_C > 45$  kg/cm<sup>2</sup>.

L'argilla espansa ha un pH pari a circa 9, quindi, essendo basico, possiede una buona affinità con il bitume. Per realizzare miscele bituminose aperte si impiega solitamente l'argilla espansa "strutturale" (viene adottata anche per la costruzione di rilevati alleggeriti compensati sia stradali, sia ferroviari, anche per linee ad alta velocità A.V. – A.C.), mentre per quelle chiuse si utilizza il tipo "resistente".

La modesta resistenza al traffico dell'argilla espansa "normale" determina uno scarso impiego di questa nel settore stradale, preferendo invece le altre tipologie.

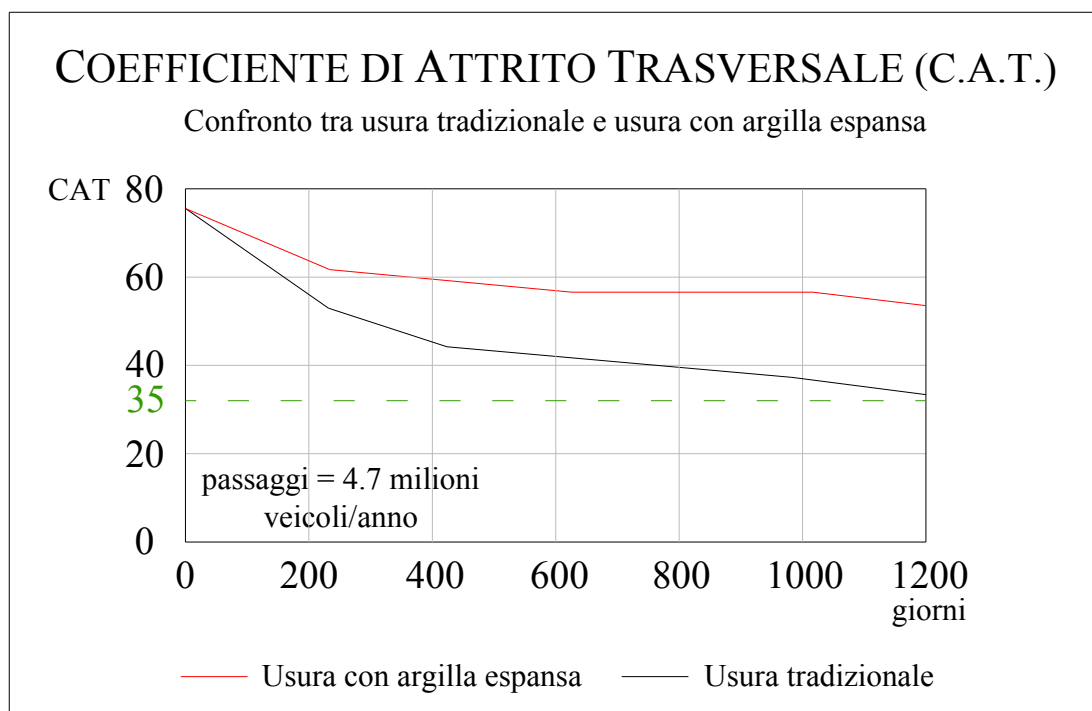
Nella realizzazione dei tappeti stradali, risulta fondamentale il valore del C.L.A. (Coefficiente di Levigabilità Accelerata =  $PSV_{PROVA} / PSV_{RIF.}$ ), che, nel caso dell'argilla espansa, varia fra 0.67 e 0.75 (esprimibile anche in numeri naturali, 67 e 75), a seconda della densità, della granulometria e struttura del prodotto.

<b>C.L.A. Coefficiente di Levigabilità Accelerata</b>	
Basalto	47 - 59
Calcere	32 - 37
Enderby Quarry	49 - 54
A.e. normale	72 - 75
A.e. resistente	73 - 78
A.e. strutturale	73 - 77

In questo modo è possibile ottenere manti stradali ad elevata aderenza, con il solo inserimento del 10% in peso del legante di argilla espansa nel conglomerato bituminoso, tanto che il C.A.T. (Coefficiente di Attrito Trasversale) supera sempre il valore di 55 (o esprimibile in numero razionale, 0.55, come da norma CNR 147/92 e da capitolato di Società Autostrade), valore che garantisce una buona aderenza e sorveglianza diradata.

L'esperienza acquisita con l'argilla espansa nella realizzazione dei tappeti stradali ha confermato che tali valori di C.A.T. si mantengono inalterabili nel tempo (vedi grafico successivo). Una miscela bituminosa ottenuta con l'aggiunta dell'argilla espansa, migliorando l'aderenza pneumatico-strada, porta ad una riduzione dello spazio di frenata dal 10 al 25% in rapporto della velocità dell'automezzo.





Le microcavità del nucleo poroso dell'argilla espansa, contenenti aria ferma, rendono la pallina di argilla espansa capace di attenuare sensibilmente il rumore, riducendo così la riflessione dell'onda acustica; ricordiamo infatti che l'aria, è il migliore isolante acustico e termico che esista, per qualsiasi applicazione.

Tale caratteristica dell'inerte, unita ad una curva granulometrica ben studiata, conferisce al conglomerato buoni valori di assorbimento acustico, che, in base alle ultime esperienze, si aggirano intorno ai 3÷5 decibel.

- **MICROTAPPETI ANTISKID CON ARGILLA ESPANSA (Esperienza della A 21).**

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

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

Una miscela di questo tipo, caratterizzata da una matrice legante anche rinforzata con fibre di vetro, da una non elevata percentuale dei vuoti (12%÷15%) e da una curva granulometrica semi-discontinua (definita *Gap Graded* negli USA) è stata studiata presso il Laboratorio di Strade del DISTART della Facoltà di Ingegneria di Bologna e quindi messa in opera nell'ambito di un normale programma di manutenzione della autostrada A 21 Torino-Brescia, per un'estensione di circa 13 km.

La sperimentazione della nuova miscela per microtappeti drenanti confrontata con un conglomerato bituminoso drenante tradizionale ha fornito risultati molto promettenti. Appare quindi possibile realizzare, con spessori sempre più piccoli (25 mm), tappeti con permeabilità elevate e simili a quelle dei classici tappeti drenanti mantenendo i vantaggi di un tappeto sottile:

- Costi ridotti e quindi possibilità di fresare e ripavimentare con maggiore frequenza;
- Ridotta manutenzione;
- Riduzione dell'effetto spray e del fenomeno dell'aquaplaning senza vincoli di spessori minimi del materiale posto in opera;
- Possibilità di applicazione su pacchetti esistenti di caratteristiche medio-basse.

La sperimentazione effettuata sia in laboratorio che in sito sostituendo parte dello scheletro litico con argilla espansa ha confermato che il suo utilizzo presenta numerosi vantaggi anche per i microtappeti antiskid. Questi tappeti migliorano ulteriormente le loro prestazioni con l'impiego dell'argilla espansa ed in particolare ne trae beneficio l'aderenza.

Si sono venute in qualche modo ad "integrare" le caratteristiche di *macrorugosità* dovute all'assortimento granulometrico con quelle di *microrugosità* proprie del granulo di argilla espansa, formando così un conglomerato che garantisce un'elevata sicurezza nel tempo. Questi materiali, rispetto ai microtappeti già descritti consentono alcuni ulteriori miglioramenti tra i quali:

- La mancata o non necessaria additivazione con fibre in quanto l'argilla espansa svolge in parte la funzione di assorbimento del legante in eccesso, diminuendo la probabilità di trasudazione del bitume nei giorni estivi più caldi;
- L'alleggerimento della miscela, significativo per l'applicazione su opere d'arte;
- Un ulteriore incremento del coefficiente di aderenza e del fonoassorbimento;
- Un certo risparmio economico derivante dal minor quantitativo di inerti pregiati (basaltici e porfirici) impiegati.

#### • *COSTRUZIONE DI RILEVATI STRADALI CON ARGILLA ESPANSA.*

L'argilla espansa nella costruzione dei rilevati alleggeriti, parzialmente o totalmente compensati, è utilizzata anche per sostituire parte del terreno scadente di fondazione in modo da averne uno migliore, di conseguenza il sovraccarico risulta diminuito (*compensazione totale o parziale*), rendendo trascurabili i cedimenti istantanei ed i cedimenti legati alla consolidazione. In ambito geotecnico-stradale è impiegata anche per i muri di sostegno, stabilizzazione di versanti e riempimenti in gallerie.

In caso di rilevato totalmente compensato, se l'operazione di scavo e di riempimento mediante argilla espansa è sufficientemente rapida, lo strato di argilla sottostante non si accorge nemmeno o quasi della variazione delle condizioni al contorno ed il fenomeno della consolidazione risulta interrotto durante il suo stesso sviluppo.

Il problema maggiore consiste nella compattazione della argilla espansa; per ottenere buoni risultati e cioè una densità residua media  $D_{R_{media}} > 80\%$  risulta necessario interporre, all'interno del rilevato, degli strati di misto granulare stabilizzato, e dei fogli di geosintetico che assolvano la funzione di elementi separatori così da evitare la commistione di argilla espansa e del misto granulare stabilizzato stesso.

Lo strato di misto granulare stabilizzato più superficiale, per problemi d'erosione o d'instabilità locale, concentrati negli strati superficiali ed associati al basso valore del peso dei grani di argilla espansa, e ai carichi ciclici/dinamici agenti in superficie (mezzi viaggianti), non deve mai essere di spessore inferiore ai 300 mm.

Nella prima fase è approfondito lo scavo di sbancamento dal piano campagna al piano di fondazione e sul fondo scavo opportunamente livellato è collocato lo strato di geosintetico che funge da elemento separatore. In questo caso il geosintetico serve a distribuire i carichi ma soprattutto ad evitare il fenomeno di pompaggio (*pumping*) di materiale fine che altrimenti tenderebbe a mischiarsi ai materiali granulari che costituiscono il rilevato stesso.

L'argilla espansa sarà posta in più strati, con interposizione di strati di spessore pari a 200 mm di misto granulare, che rendono possibile la sua compattazione; naturalmente lo spessore di argilla espansa varierà in relazione al tipo di sezione.

La sequenza di lavoro prevederà lo scavo di sbancamento, la posa del geotessile non tessuto, la posa del primo strato di argilla espansa, la posa di un ulteriore geotessile non tessuto, la posa dello strato di misto granulare stabilizzato d'interposizione, la compattazione, i controlli (esecuzione in sito di prove su piastra), la posa del secondo strato di a.e., la posa del geotessile non tessuto, la posa del secondo strato di misto granulare stabilizzato, la compattazione, ulteriori controlli, la posa dello strato finale di misto granulare stabilizzato (Fig.5).



Fig.5: Sequenza di lavoro: posa del geotessile non tessuto, del primo strato di argilla e del primo strato di misto.

La conseguenza progettuale più diretta delle modalità esecutive appena descritte consiste nell'aumento del sovraccarico indotto, a parità di geometria, dalla presenza del rilevato rispetto al caso di un utilizzo esclusivo di argilla espansa. In altre parole il peso specifico medio sarà maggiore proprio a causa della presenza degli strati di inerte di cava.

L'utilizzo dell'argilla espansa è anche possibile nei misti bitumati e nei misti cementati dello strato di base, rispettivamente tipici delle pavimentazioni flessibili e delle pavimentazioni semirigide; tuttavia è preferibile sfruttare la loro elevata microtessitura superficiale per impiegarle negli strati di usura, a favore del moto dei veicoli.

- **PAVIMENTAZIONI RIGIDE CON ARGILLA ESPANSA.**

L'argilla espansa costituisce inoltre l'aggregato per la produzione di calcestruzzo leggero, impiegabile per lastre di pavimentazioni rigide poco sollecitate (es. parcheggi): si tratta di un calcestruzzo fluido in modo che risulti autolivellante e non segregabile, con resistenza a compressione caratteristica massima di  $R_{CK} = 250 \text{ kg/cm}^2 = 25 \text{ MPa}$ , minore di quella dei calcestruzzi "ordinari" o strutturali.

### (2.b) FRESATO STRADALE DI RICICLO (RAP)

Il riciclaggio dei prodotti di scarto si presenta, oggigiorno, come uno dei mezzi attraverso i quali attuare uno sviluppo sostenibile del territorio, che tenga conto della qualità ambientale e di uno sfruttamento razionale delle risorse non rinnovabili. È in quest'ottica che il settore delle costruzioni stradali offre numerose soluzioni fra le quali emerge quella del riciclaggio delle pavimentazioni stradali degradate, che si presenta come una delle più importanti tecniche in relazione ai vantaggi ambientali ed energetici che ne conseguono. Infatti, le pavimentazioni stradali flessibili sono soggette, nel corso della loro vita utile, a fenomeni di degrado degli strati superiori in conglomerato bituminoso; per ripristinare l'integrità di tali strutture occorre mettere in atto interventi di manutenzione che comprendano, tra le varie operazioni, la rimozione degli strati ammalorati mediante fresatura, con il conseguente accumulo di materiale di risulta comunemente denominato *fresato* (*Reclaimed Asphalt Pavement*). La scelta della successiva destinazione d'uso del fresato, costituito da materiali pregiati (aggregati lapidei e legante bituminoso invecchiato), è una questione di notevole rilevanza della quale si sono occupati a più riprese i ricercatori ed operatori del settore stradale. Per questo motivo l'opzione di messa a discarica del conglomerato bituminoso fresato, peraltro caratterizzata dai più elevati costi operativi ed ambientali, viene oggi scartata a vantaggio di alternative che prevedono il riciclaggio nelle pavimentazioni stradali stesse, dando soluzione ad un problema di "macro-scala".

In Italia, al contrario di come avviene in molti altri paesi industrializzati, la tecnica del reimpiego del fresato non ha ancora un largo utilizzo. Infatti, da una stima approssimata sulla quantità di materiale da riciclare proveniente dalla demolizione delle pavimentazioni stradali degradate, risulta che il conglomerato bituminoso fresato, prodotto annualmente, è pari a circa 12 milioni di tonnellate, con una capacità di reimpiego stimata intorno al 15% (circa 1.8 milioni di tonnellate). Tale dato risulta molto inferiore rispetto a quello dei maggiori Paesi sviluppati dove si recupera oltre l'80% dello stesso materiale (Tabella 1).

Paese	Produzione annuale di conglomerati (t-10 <sup>6</sup> )	Produzione annuale di fresato (t-10 <sup>6</sup> )	Percentuale di impiego del fresato (%)
FRANCIA	38.0	7.0	25
GERMANIA	63.5	16.0	80
SVIZZERA	4.7	1.8	30
PAESI BASSI	7.5	3.0	100
REGNO UNITO	27.5	8.0	90
USA	515.0	50.0	80
GIAPPONE	70.1	22.0	80
ITALIA	36.3	12.0	15

Tabella 1: Conglomerato bituminoso e fresato: la situazione in alcuni paesi [1]

Oggi sono disponibili varie possibilità di intervento per ripristinare le pavimentazioni stradali ammalorate, con l'impiego di tecniche e di macchine adatte alle diverse esigenze. Spesso non è tanto la tecnologia che manca, quanto un chiaro quadro normativo nazionale che faciliti, anziché ostacolare, le operazioni di riciclaggio. In particolare, il conglomerato bituminoso fresato può essere riciclato sia a caldo che a freddo. Il riciclaggio a caldo, però, è poco utilizzato perché crea diverse difficoltà operative sia di natura tecnica, per il riscaldamento del materiale da riciclare, sia di natura ambientale, per l'emissione di fumi tossici dovuti al surriscaldamento del bitume invecchiato. Di contro, negli ultimi anni, sta assumendo una maggiore importanza il riciclaggio a freddo grazie soprattutto ai progressi compiuti nel settore dei leganti bituminosi. Allo stato attuale quest'ultima tecnica è, per effetto dei notevoli vantaggi ambientali ed energetici, oggetto di un crescente interesse da parte delle amministrazioni ed imprese del settore stradale.

#### Il riciclaggio a freddo

La decisione, sul tipo di intervento di manutenzione a cui ricorrere, deve essere presa considerando che, con il diminuire della transitabilità (intesa come qualità offerta dalla strada in relazione al traffico), occorreranno rimedi di più ampia portata con conseguente aumento dei relativi costi. Nel caso in cui risulta necessario un intervento di rifacimento del manto superficiale oppure di risanamento strutturale (vedi Fig. 1), la riqualificazione della pavimentazione stradale può essere ottenuta mediante un processo di riciclaggio che consente di recuperare il materiale fresato trasformandolo da rifiuto in risorsa.

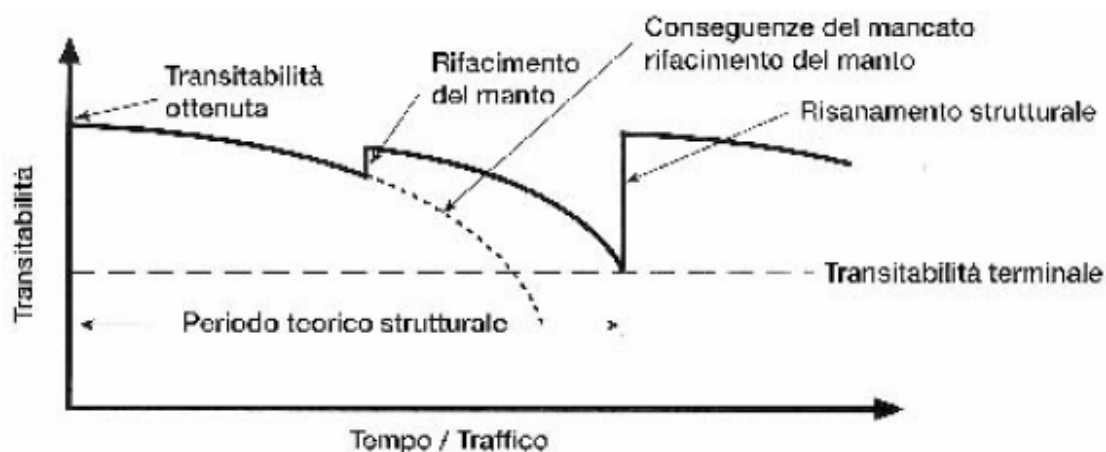


Fig. 1. Gestione della manutenzione stradale.

Il riciclaggio a freddo si realizza con opportune attrezzature che consentono di miscelare con continuità il conglomerato bituminoso fresato con emulsioni di bitumi modificati o bitume schiumato, cemento, acqua ed

eventuali inerti vergini aggiunti. Quindi si procede alla omogeneizzazione, stesa e compattazione della miscela, che consentono di ottenere uno strato rigenerato con prestazioni soddisfacenti.

Tale operazione può essere eseguita, a seconda dei casi, all'interno di impianti di produzione fissi oppure mediante l'impiego di gruppi di attrezzature semoventi che procedono lungo la pavimentazione stradale da rigenerare eseguendo in sequenza le operazioni di fresatura, miscelazione e stesa. In entrambi i casi, ove necessario, la componente lapidea delle miscele riciclate a freddo può essere integrata con l'aggiunta di aggregati di primo impiego detti *aggregati di integrazione*. Dopo la stesa delle miscele si procede con la compattazione che avviene mediante rulli costipatori, generalmente di tipo vibrante, dotati di idonea massa.

Sulla base di studi preliminari, al momento, ci si può attendere di procedere alla rigenerazione della pavimentazione non meno di 3-4 volte; a tale riguardo, ancora una volta, va sottolineata l'importanza dei materiali costituenti la miscela originaria in quanto dalla loro qualità e quantità, forse più che da quelle dei materiali di aggiunta per la rigenerazione, dipende la possibilità di replicare  $n$  volte gli interventi di riciclaggio. Ovviamente su quest'ultimo argomento i maggiori contributi potranno venire dai produttori dei materiali di partenza ed in particolare dall'industria petrolifera che dovrebbe rendere disponibile bitume di qualità superiore costante nel tempo. Per quanto riguarda invece gli inerti, volendo evitare la formazione di frazioni fini durante la fresatura (specie per il riciclaggio di pavimentazioni drenanti fonoassorbenti), le caratteristiche degli inerti basaltici e porfirici garantiscono l'eliminazione di ogni problema in tal senso; sperimentazioni stanno avendo luogo per valutare il comportamento degli aggregati innovativi, ad esempio materiali provenienti dalla demolizione di fabbricati o granuli di scarti industriali, nel riciclaggio dei manti stradali.

La tecnica del riciclaggio a freddo con l'utilizzo di emulsioni bituminose è attualmente la più utilizzata perché esiste un fiorente mercato di questi tipi di leganti che fornisce emulsioni adatte alla diversa natura chimica degli aggregati (emulsioni acide e basiche). Per questa tecnica, gli inconvenienti maggiori si registrano quando le condizioni atmosferiche rendono difficile la rottura delle emulsioni a causa delle basse temperature (minori di 10°C) e della elevata umidità atmosferica.

Il riciclaggio a freddo offre numerosi vantaggi, alcuni dei quali sono immediatamente evidenti mentre altri risultano essere meno tangibili. È importante soprattutto sottolineare i vantaggi ambientali: per mezzo di questo processo, viene utilizzato tutto il materiale della pavimentazione preesistente. Non occorre, quindi, trovare apposite aree di deposito, e il volume del nuovo materiale di riporto dalle cave è ridotto al minimo. In tal modo si limitano le deturpazioni all'ambiente inevitabilmente causate dall'apertura di cave a cielo aperto e di cave di prestito. Anche l'entità delle operazioni di trasporto è inferiore rispetto agli altri processi. Il consumo globale di energia viene pertanto ridotto significativamente così come l'effetto nocivo sulla rete viaria dovuto alla presenza di mezzi di trasporto.

Inoltre c'è un ulteriore risparmio dovuto allo scarso se non addirittura nullo apporto di nuovo materiale pregiato proveniente da cava.



Per analizzare le potenzialità delle nuove tecnologie "a freddo" si è sviluppata una campagna di indagini sperimentali, promossa dal Politecnico di Torino, dedicata per valutare la possibilità di impiego come strato di base di miscele "ternarie" composte al 100% da conglomerato bituminoso fresato proveniente da tappeti superficiali usurati miscelato con percentuali variabili tra lo 0% ed il 2% di cemento Portland e tra il 2,5% ed



4,5% di emulsione bituminosa (la quale è formata generalmente per il 60% da bitume); l'utilizzo congiunto di questi leganti assicura al prodotto finale un certo grado di elasticità ed evita il fenomeno della fessurazione che tende a verificarsi quando si utilizza solo un legante idraulico (pavimentazioni rigide).

Dall'analisi dei risultati sperimentali è stato possibile trarre alcune considerazioni conclusive:

- La miscelazione di cemento, emulsione e materiale riciclato permette di riutilizzare fino al 100% di fresato ottenendo uno strato di fondazione o di base con buone caratteristiche di portanza e di resistenza a fatica. Lo strato risulta flessibile e non si fessura alle basse temperature nonostante l'incremento di rigidità dovuto alla presenza del legante cementizio;
- La compattazione impulsiva tipica della prova Marshall non è adatta per la progettazione ed il controllo in fase esecutiva delle miscele riciclate a freddo. La pressa giratoria per tempi e modalità di applicazione dei carichi più si avvicina alla situazione reale di messa in opera mediante rulli e permette di esprimere giudizi più obiettivi e significativi sulla qualità della miscela. La progettazione volumetrica delle miscele può essere applicata anche ai conglomerati bituminosi riciclati a freddo;
- E' sufficiente un piccolo quantitativo di cemento Portland (1.5%) per ottenere significativi miglioramenti nella prova a compressione e di trazione indiretta ed in particolare nella suscettività all'acqua della miscela riciclata a freddo (maturazione nel tempo del conglomerato);
- Il cemento influenza in modo positivo anche il meccanismo di reazione della miscela aggregato-emulsione e permette di ottenere conglomerati caratterizzati da una migliore lavorabilità durante la messa in opera.

Sono ancora molte le incognite da risolvere e valutare nel processo di riciclaggio a freddo di materiale fresato ma l'uso del cemento ha fornito in ogni caso sempre risposte positive dal punto di vista della resistenza meccanica delle miscele, della resistenza a fatica delle pavimentazione e della maggiore affidabilità e facilità di messa in opera delle miscele.

Varie applicazioni-studio riguardanti l'utilizzo congiunto delle emulsioni bituminose e cemento sono state eseguite in Italia; ricordiamo per importanza le ricerche condotte dal 1998 al 2001, da parte del Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino nell'ambito degli interventi di riciclaggio dell'autostrada A 4 Torino-Milano, in collaborazione con la società ASTM di gestione dell'infrastruttura stessa. Tale sperimentazione ha interessato un tratto della corsia di marcia lenta per uno sviluppo complessivo di circa 2 km compreso tra gli svincoli di Carisio (VC) e Santhià (VC) (progressive chilometriche 51+400 – 49+400 carreggiata Nord). Il cantiere sperimentale venne suddiviso in più lotti entro i quali furono adottate differenti emulsioni, formule di impasto e tecniche di realizzazione.

Il riciclaggio a freddo con bitume schiumato, invece, è la tecnica più innovativa poiché consente una migliore omogeneizzazione dell'impasto con una minore energia di miscelazione dovuta alla ridotta viscosità del legante schiumato. In questo caso, però, occorre utilizzare bitumi adatti a questa applicazione e temperature ambientali non fredde per evitare il collasso immediato della schiuma.

In tabella 2 si riporta, in forma sintetica, il confronto tra le due tecniche di riciclaggio a freddo, di cui quella con bitume schiumato è stata sopra approfonditamente descritta tramite un esempio applicativo concreto.

	VANTAGGI	SVANTAGGI
EMULSIONI BITUMINOSE	- facile reperibilità delle emulsioni	- temperatura di stesa >10°C - necessità di una bassa umidità atmosferica
BITUME SCHIUMATO	- utilizzo con grande varietà di aggregati - posa in opera anche in condizioni climatiche non ottimali	- utilizzo di bitumi idonei - temperatura inerti > 16°C

Tabella 2: Confronto tra le due tecniche di riciclaggio a freddo

Secondo l'attuale legislazione il conglomerato bituminoso asportato dalla pavimentazione stradale è considerato un rifiuto speciale se non è utilizzato in situ (codice CER 17 03 02, asfalto non contenente catrame) ed è quindi sottoposto alla normativa che regola i rifiuti: D.Lgs. n. 22/97 (decreto Ronchi) e D.M. n. 72/98.

Questi due decreti permettono di poter trattare, impiegare e riciclare materiali di recupero catalogati, richiedendo una autorizzazione, mediante una procedura ordinaria o semplificata; l'autorizzazione comporta il diritto di iscrizione al registro degli smaltitori, e deve attestare una serie di requisiti riguardanti i metodi di recupero.

Nel caso del fresato da pavimentazione stradale, esso può essere recuperato sia senza trasformazione, utilizzandolo come sottofondo o rilevato, sia come aggiunta a materiale vergine in impianto di conglomerato bituminoso a caldo; nel primo caso la norma impone l'esecuzione di una laboriosissima prova denominata "test di cessione"; nel secondo caso non è prevista alcuna prova ma istituisce alcuni limiti di emissione in atmosfera dei fumi.

Esistono tuttavia, come abbiamo già visto, anche sistemi di riciclaggio a caldo e a freddo in situ, nei quali comunque il fresato subisce delle trasformazioni per azioni termiche, meccaniche o chimiche.

L'aggiunta a materiale vergine presenta però alcuni problemi, dovuti all'invecchiamento del bitume, che si riflette in una maggiore difficoltà di lavorazione ed in un irrigidimento del conglomerato.

Dal punto di vista fisico e chimico, il bitume contenuto nel fresato ha subito importanti trasformazioni nel tempo: si è notevolmente irrigidito, perdendo le caratteristiche di plasticità e di coesione e quindi la sua capacità legante a causa dell'ossidazione e della perdita delle parti più leggere.

Studi protratti sette anni da una impresa specializzata in materiali stradali con la collaborazione dell'Università di Ancona, hanno monitorato il comportamento fisico-chimico del bitume estratto da campionature effettuate in un tronco stradale.

Da questo studio si può notare che il bitume, rispetto alle sue caratteristiche iniziali, ha subito nel tempo un progressivo aumento del punto di rammollimento (35% circa) ed una diminuzione della penetrazione con variazioni fino al 70% in meno (duttilità minore e temperatura di rottura fragile maggiore).

La cosa interessante da notare è che il bitume inizia il suo invecchiamento già nelle fasi di confezionamento e di stesa, in quanto si distribuisce in uno strato sottile per ricoprire l'inerte e subisce un riscaldamento localizzato che lo porta a perdere le sue parti leggere. Ciò è facilmente rilevabile anche dall'analisi chimica effettuata sui medesimi campioni (Tab. 2), realizzata con il metodo delle separazioni nelle frazioni SARA (Saturi, Aromatici, Resine, Asfalteni), utilizzando l'apparecchio "lastroscan", dove si nota una diminuzione della frazione aromatica superiore al 13% solo nella fase della lavorazione e stesa.

Tempo (mesi)	Asfalteni (% in peso)	Resine (%)	Aromatici (%)	Saturi (%)
0 (Lavorazione)	13,7	19,3	63,0	4,0
Stesa	18,4	27,6	49,7	4,3
18	20,4	27,8	47,0	4,8
56	21,2	27,9	46,4	4,5
84	23,4	28,0	44,2	4,4

*Tab. 2: Risultati dell'analisi SARA.*

La frazione aromatica rappresenta la parte più leggera del bitume ed è quella che influisce soprattutto sul comportamento a caldo, conferendo scorrevolezza sulla superficie dell'inerte; essi vengono aggiunti in quantità superiore a quella naturalmente contenuta, per ottenere i bitumi flussati o cut-backs (vedi punto 1.a).

Parallelamente possono essere riscontrate variazioni sostanziali anche per la viscosità: mentre un bitume appena distillato ha valori compresi fra i 100 e i 200 Pa s a 60 °C, quello ossidato varia da 5000 a 10.000 Pa s, in funzione del suo grado di ossidazione. Si riportano i dati relativi ad un test eseguito su due differenti bitumi, al

fine di confrontarli e analizzare l'andamento nel tempo dell'ossidazione, tramite prova di penetrazione e prova di rammollimento. Per l'utilizzo completo di un fresato si impiegano quindi nel riciclaggio speciali additivi denominati ACF (vedi in seguito punto (3.a)), che riducono la viscosità del legante idrocarburico consentendone la lavorabilità alle normali temperature di stesa di un conglomerato bituminoso.

/	Bitume "A"		Bitume "B"	
	Penetrazione (dmm)	P&A (°C)	Penetrazione (dmm)	P&A (°C)
0	53	51	48	54
Stesa	40	54,5	33	59,5
7	30	57,5	24	61,5
18	23	60	19	65,5
31	23	60	21	66
43	20	62,5	21	66,5
56	16	66,5	17	72
70	20	67	15	74
84	17,2	68,5	13,7	75,5

Tab. 1: Confronto tra bitumi.

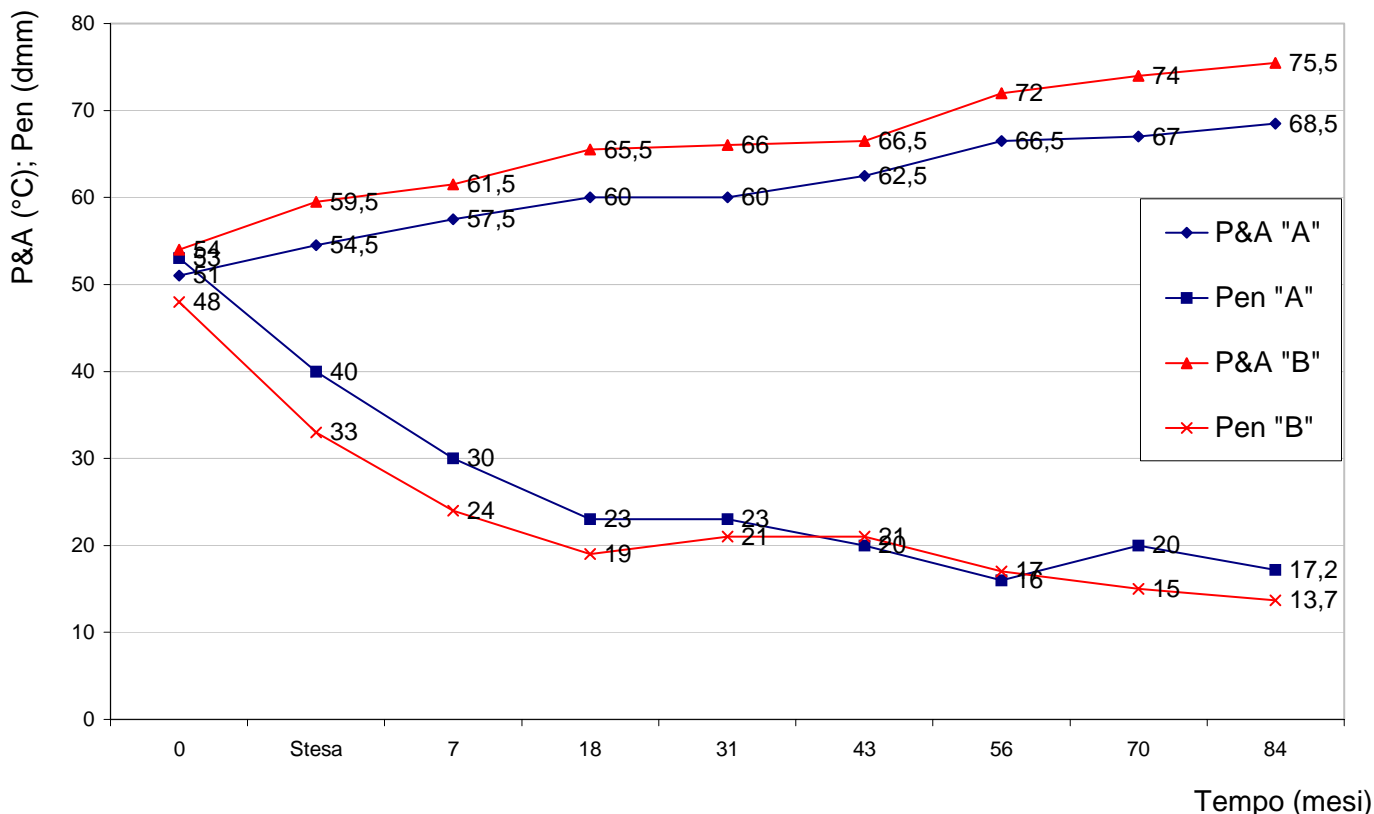


Fig. 1: Caratteristiche del bitume estratto da campionature.



## (2.c) AGGREGATI DI RICICLO

Per quanto riguarda gli aggregati innovativi di riciclo per la realizzazione di conglomerati bituminosi e misti granulari legati o non legati, gli studi e le sperimentazioni applicative in corso non mancano, anche se attualmente non vi sono numerose pubblicazioni scientifiche a riguardo. Molte delle ricerche sono ancora da terminare ed il mercato è poco propenso ad innovarsi.

Nel seguito si è redatto un elenco dei maggiori progetti di ricerca fino ad ora sostenuti in questo campo, alcuni dei quali saranno trattati approfonditamente, nello specifico i primi tre.

- “LIFE LAW”: produzione di aggregati ceramici leggeri a partire da miscele di rifiuti industriali;
  - BRITE THEMATIC “NETWORK “RECY”: utilizzo di materiali riciclati da costruzioni e demolizioni come aggregati nell'industria delle costruzioni.
  - EU220 “EUREKA HARD ROAD”: processo di consolidamento dei materiali stradali e da costruzione attraverso l'ottimizzazione dei processi naturali, diagenesi e laterizzazione;
  - BRITE “RECBUILD”: materiali da costruzione avanzati ottenuti dal riciclaggio di rifiuti tossici e ceneri volanti;
  - BRITE “TESCOP”: soluzioni tecnologiche pulite nel ciclo di vita di prodotti in calcestruzzo;
- *PROGETTO “LIFE LAW”*: produzione di aggregati leggeri da materiali di scarto dei processi produttivi.

L'obiettivo principale del progetto LAW consiste nella realizzazione di un processo per la produzione di aggregati leggeri, sostitutivi di prodotti naturali che provengono da risorse non rinnovabili, rispondente alle esigenze di orientamento del sistema economico verso la sostenibilità, in attuazione degli indirizzi espressi dal 5° Programma Politico e di Azione dell'Unione Europea per lo Sviluppo Sostenibile e conforme ai requisiti di riduzione dell'uso di risorse individuati dalla Campagna Europa Sostenibile degli “Amici della Terra”.

Questo obiettivo generale del progetto LAW è stato verificato, attraverso una valutazione specifica con il criterio dello Spazio Ambientale, che costituisce a tutt'oggi l'unico metodo di valutazione adottato rispetto ad uno scenario di sostenibilità costruito sulla base degli impegni assunti dai governi a livello internazionale e nell'ambito dell'UE.

Come indicato in precedenza, questo tipo di verifica consente di evidenziare che il processo LAW è caratterizzato da prestazioni vantaggiose, sotto il profilo economico e sotto il profilo ambientale, rispetto ai processi finora utilizzati per la produzione di granulati leggeri, quali:

- Utilizzo di materiali di scarto di altri processi produttivi, che finora vanno ad alimentare i flussi di rifiuti;
- Produzione di aggregati leggeri con caratteristiche prestazionali garantite dalla specificità del processo stesso;
- Produzione di aggregati leggeri con consumi ridotti di energia e di altre risorse;
- Minima produzione di rifiuti;
- Minima emissione di reflui nell'ambiente (in aria, in acqua);
- Costi di realizzazione e di gestione compatibili anche con taglie medie, in modo da soddisfare esigenze di mercato geograficamente definite e ridurre i costi di trasporto dei vari materiali in entrata o in uscita dagli impianti.

Va tenuto presente che molte altre iniziative finora realizzate non hanno avuto particolare successo in quanto i relativi prodotti (ad es. argilla espansa normale, ecc.) non hanno mai raggiunto prestazioni tali da consentirne un utilizzo in applicazioni di pregio.

La produzione degli aggregati leggeri a partire da rifiuti speciali si basa sull'impiego di un *additivo espandente* brevettato che esplica la sua azione anche in atmosfera ossidante, a differenza delle reazioni espandenti di riduzione degli ossidi ferrici che caratterizzano la produzione di argilla espansa e che possono avere luogo soltanto in un'atmosfera fortemente riducente.

Questa caratteristica dell'additivo determina la produzione di un granulo molto più omogeneo rispetto a quelli della tradizionale argilla espansa, che sono caratterizzati da un cuore leggero e da una crosta resistente, e molto più resistente di quelli del vetro espanso; anche il nucleo pertanto contribuisce fortemente alla resistenza meccanica. I rifiuti speciali a partire dai quali è possibile produrre questi aggregati leggeri sono:

- Ceneri di combustione del carbone;
- Ceneri di incenerimento di rifiuti solidi urbani (RSU);
- Fanghi e polveri da abbattimento fumi di fonderia;
- Fanghi di abbattimento fumi e sabbie di formatura di acciaieria;
- Fanghi di depurazione delle acque (in particolare di acque reflue di impianti conciarci).

Il materiale prodotto presenta alcune importanti caratteristiche:

- Basso assorbimento di acqua, derivante dalla struttura vetrosa a celle chiuse (ridotta imbibizione);
- Elevato rapporto resistenza meccanica/densità, superiore a quello delle migliori argille espanse in un intervallo di massa volumica reale dei granuli variabile da 500 kg/m<sup>3</sup> (aggregati per isolamento termico) a 1.500 kg/m<sup>3</sup> (aggregati per elementi strutturali);
- Ottima stabilità al gelo ed alle aggressioni chimiche;
- Possibilità di produrre granulometrie ridotte (0,25 ÷ 2 mm) con elevata resistenza meccanica.

- *PROGETTO "NETWORK RECY": utilizzo di materiali riciclati da costruzioni e demolizioni, per l'industria delle costruzioni.*

Il progetto Network Recy (BET 2-0624, 1998-2002) è un progetto di ricerca che mira ad approfondire la conoscenza delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali riciclati, provenienti dalla costruzione e demolizione di edifici in genere; lo scopo è naturalmente anche quello di incentivarne l'utilizzo, comprese le applicazioni in ambito stradale. Varie università ed enti di ricerca sono stati coinvolti, tra i quali:

- Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria de la Construcció (UPC.DEC), Spain;
- Technical Research Centre of Finland, Building Technology (VTT.BT), Finland;
- University of Patras, Department of Civil Engineering (UPAT.DCE), Greece;
- University of Dublin-Trinity College, Civil, Structural and Environmental Engineering (UDTC.CSEE), Ireland;
- Technische Universiteit Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences (TUDT.FCE), Netherlands.

### Obiettivi

La protezione dell'ambiente è una delle problematiche chiave dei giorni nostri; in termini concreti, si stanno diffondendo un utilizzo più razionale delle risorse tipo materie prime ed energia ed uno smaltimento più organizzato dei rifiuti.

A causa delle ingenti quantità di rifiuti delle costruzioni e delle demolizioni implicate (rifiuti C&D, *Construction and Demolition*), l'industria delle costruzioni è fortemente coinvolta nell'esigenza di sviluppare *piani di gestione dei rifiuti*. Nel 1995 l'ammontare totale dei rifiuti C&D, in Europa, poteva essere stimato tra i 221 ed i 334 milioni di tonnellate. In quest'ottica, sono state intraprese iniziative nel settore delle costruzioni per convertire questa ingente massa di rifiuti in risorse sfruttabili.

Da un paio d'anni l'industria delle costruzioni è inoltre sempre più coinvolta nel riciclo di rifiuti provenienti da altri settori, soprattutto sotto forma di aggregati secondari.

Nella maggior parte dei paesi europei, sono state intraprese iniziative per ottimizzare un recupero efficiente dei rifiuti. Il network tematico cerca di contribuire a queste iniziative ed i suoi obiettivi principali si possono riassumere come segue:

- Contribuire all'introduzione a livello europeo di standard e norme pratiche concernenti il riciclo dei rifiuti C&D;
- Coordinare in qualche modo le ricerche realizzate senza i fondi della CEE, concernenti il riutilizzo come aggregati per le costruzioni dei rifiuti C&D e dei rifiuti provenienti da altri settori industriali;
- Organizzare un servizio di registrazione dell'uso di aggregati (es. il CER, Catalogo Europeo Rifiuti), basato su azioni di ricerca coordinate e su relazioni che riportino i risultati dei progetti di ricerca C&D correlati.

- Diffondere informazioni concernenti il suddetto servizio di registrazione sugli aggregati riciclati, utilizzando svariati mezzi, come pubblicazioni sui giornali, relazioni annuali e note strategiche.

### Stato dell'arte

La decrescente disponibilità di materie prime e l'elevato costo di smaltimento dei rifiuti C&D stanno incentivando il riciclo dei medesimi in tutti i paesi della CEE. Per un verso, lo sviluppo delle tecnologie per la demolizione è stato focalizzato verso metodi per separare le frazioni di rifiuti diverse nel corso del processo di demolizione medesimo, il che significa eseguire una *demolizione selettiva*, e verso la realizzazione di metodi ottimali di demolizione, per quanto concerne l'impatto ambientale e la salute e sicurezza dei lavoratori. Dall'altra parte, è stata prestata attenzione allo sviluppo di impianti di riciclaggio per la separazione ed il trattamento dei rifiuti della demolizione, al fine di ottenere prodotti riciclati utilizzabili successivamente.

Si può distinguere fra trattamento di *basso livello* ed *alto livello* per i rifiuti. Il trattamento ad alto livello implica la frantumazione dei materiali segregati, come il calcestruzzo, per ottenere un prodotto da costruzioni selezionato e di alto livello, utilizzabile al posto degli aggregati naturali per la realizzazione ad esempio di conglomerati bituminosi. Il trattamento di basso livello di solito comporta una frantumazione grossolana ed eventualmente uno screening per ottenere un materiale, che è utilizzabile per riempimenti e risistemazioni di discariche.

A parte le applicazioni di basso livello, come la realizzazione di fondi e sottofondi stradali, l'uso di materie prime o aggregati riciclati è tutt'altro che diffuso, anche nei paesi più avanzati. Il basso livello di utilizzo di questi materiali è fra l'altro determinato da problemi di qualità, barriere imposte, prezzi e barriere psicologiche:

- Un grosso disincentivo consiste nell'opinione comune che il materiale secondario recuperato sia di bassa qualità. Si potrebbe realizzare un uso su vasta scala di questi materiali solo se gli utilizzatori possono contare su prodotti e materiali di qualità garantita. L'assenza di standard e specificazioni adatti, come pure delle leggi poco chiare riguardo alla definizione di materie prime secondarie, rendono difficile garantire la qualità;
- Le materie prime secondarie sono spesso soggette ai medesimi, spesso inappropriati, requisiti cui sono sottoposte le materie prime naturali. Queste specifiche tecniche impongono barriere all'utilizzo dei materiali riciclati; la mancanza di prescrizioni tecniche "ad hoc" per gli aggregati secondari ostacola ulteriori investimenti nelle tecnologie per il riciclo dei rifiuti C&D;
- La produzione di materiali secondari di elevata qualità è tecnicamente realizzabile, ma i costi tendono ad essere superiori rispetto a quelli per scavare materie prime naturali, specialmente nelle regioni naturalmente ricche in risorse naturali. Solo nelle applicazioni a basso contenuto tecnologico i prodotti da riciclo possono competere con i tradizionali materiali da costruzione. Il ruolo strategico dei governi è pertanto fondamentale nell'incentivare i proprietari di edifici e gli appaltatori all'impiego dei prodotti secondari, imponendo tasse e imposte, depositi e piani di riciclo ed attraverso l'uso di incentivi fiscali;
- Pur essendo l'impiego di aggregati riciclati possibile in molti casi anche in applicazioni a più elevato contenuto tecnologico, ed in certi casi già permesso dalle norme, l'utilizzatore finale risulta ancora assai scettico. La mancanza di un servizio di registrazione dell'uso di aggregati, assieme alla necessità di modificare alcuni parametri nel processo di produzione in cui vengano impiegati i prodotti riciclati, costituiscono le ragioni principali di questo scetticismo.

In tema di lavori infrastrutturali il mercato ha offerto nel passato a costi contenuti una larga disponibilità di materiali "naturali", ossia prodotto della frantumazione di rocce. La mutata coscienza ecologica, rapidamente evolutasi negli ultimi anni, ha costretto a porsi anche in questo campo di fronte alle problematiche del consumo di risorse non rinnovabili e del danno ambientale e paesaggistico procurato dallo sfruttamento delle cave. Molte Regioni stanno attuando perciò da tempo una politica di restrizioni dell'attività di cava. Notevoli volumi di rifiuti vengono per converso prodotti dalle attività umane (Rifiuti Solidi Urbani, demolizioni edilizie, residui e scarti di produzione di industrie che impiegano materiali litici, rifiuti industriali di vario genere).

Il reperimento di siti per le discariche e la loro gestione costituiscono problemi gravi per la nostra società, tanto da aver generato in molti casi anche il fiorire di attività illecite o addirittura criminali.

L'utilizzo di materiali di scarto o di rifiuto per la costruzione di infrastrutture stradali può contribuire in misura non secondaria alla soluzione contestuale di entrambi i problemi, riducendo la necessità di materiale "vergine" ed i volumi da destinare definitivamente a discarica. Il prodotto alternativo, purché effettivamente sostitutivo del materiale naturale sotto l'aspetto fisico-chimico-meccanico-tossicologico, rappresenta una soluzione costruttiva

economicamente vantaggiosa, poiché di regola è un rifiuto che, come tale andrebbe smaltito o riciclato con inevitabili costi. La Legge "Ronchi", con i suoi decreti attuativi (D.M. 5.2.98) ha tentato di indicare i criteri di massima dei possibili reimpieghi. Alcune Regioni si sono però spinte più avanti nell'esercizio del potere di indirizzo e di stimolo. Ad esempio, la Regione Toscana ha emanato nel 1998 una legge sulla programmazione delle attività estrattive che assimila i residui suscettibili di riutilizzo ai materiali di cava, ai fini del computo per il soddisfacimento delle esigenze. Inoltre, viene prescritta una percentuale minima del 15% di materiale riciclato nei progetti e negli appalti di opere della Regione o di Enti da essa dipendenti. Analogo vincolo è in corso di approvazione da parte del Parlamento sul territorio nazionale. L'applicazione pratica di tale condizione può essere ostacolata dalla carenza di un quadro organico di conoscenze tecniche sui materiali riutilizzabili, sulle procedure di trattamento ed impiego, sulle particolarità della posa in opera, sui parametri di durabilità e resistenza a fatica, da introdurre nella progettazione e nella programmazione della manutenzione.

Queste motivazioni inducono a proporre la ricerca per fornire un contributo alla sperimentazione sui materiali di riciclo quali costituenti di infrastrutture e sovrastrutture viarie. Saranno oggetto dello studio: *sottoprodotti industriali* (scarti dell'industria metallurgica e chimica o scorie delle centrali termoelettriche), *rifiuti ed inerti industriali* (ceramici, resine, materie plastiche), *scarti di cava e miniera*, *rifiuti di demolizioni civili* (sovrastrutture stradali, fabbricati, opere edili in genere), *scarti di costruzione di manufatti in c.a. e c.a.p. e dell'industria dei laterizi e dei rivestimenti edili*, *fanghi di depurazione*, *residui di rottamazione*, *residui dell'incenerimento di rifiuti solidi urbani*. L'utilizzo di questi materiali innovativi per le costruzioni stradali necessiterà di un preliminare studio dei materiali nel loro stato originale, così come vengono prodotti dai processi considerati, e nel loro impiego con leganti e non, valutando anche la possibilità di modificare ed integrare i metodi e le tecnologie di selezione e di trattamento per poter ottimizzare il campo di applicabilità nelle costruzioni stradali.

#### Altre esperienze in corso

- 1) Successivamente alle prove sui materiali dovranno essere creati dei *tratti stradali-test*, ad esempio grazie ad una convenzione a titolo gratuito già stipulata tra la Prima Facoltà di Architettura "Ludovico Quaroni" - Università di Roma "La Sapienza" - ed il Comune di Anzio, nell'ambito della ricerca sui materiali da C&D, verrà costruito un tratto di sovrastruttura stradale realizzata completamente con i materiali riciclati, disponibili nei bacini di influenza degli impianti di trattamento presenti in zona. Per la materiale costruzione della strada, un impianto di riciclaggio di rifiuti industriali e civili vari, sito in Anzio, ha dato la propria disponibilità per quanto attiene la fornitura dei materiali e la loro messa in opera. Sulla strada sperimentale sarà possibile valutare l'effettivo comportamento in opera dei materiali secondari. Tale tratto stradale, realizzato in diverse sezioni, con ciascuna sezione realizzata con materiali e tecniche diverse, consentirà di effettuare prove e rilevazioni, esaminando così il comportamento dell'infrastruttura sotto traffico e l'entità del rilascio di elementi inquinanti da parte dei materiali impiegati. L'esito delle ricerche consentirà di validare il ciclo di attività preordinato per realizzare il reimpiego dei materiali prescelti, grazie alla messa a punto delle tecniche progettuali e delle modalità costruttive che possono renderne soddisfacente, dal punto di vista strutturale, economico ed ambientale, l'utilizzo su vasta scala. Saranno anche individuate le disposizioni normative contenute in leggi, regolamenti, direttive tecniche e capitolati che possono ostacolare, senza un concorrente motivo tecnico, igienico-sanitario od ambientale, l'ampliamento dell'utilizzo delle metodologie di reimpiego. Finalità del lavoro è la definizione delle specificazioni tecniche prestazionali e d'impiego dei materiali in riciclo, anche con la standardizzazione dei processi, e il contributo all'elaborazione delle normative regionali e Nazionali. Il riciclaggio in ipotesi risponde all'obiettivo sociale Nazionale di elevare il livello di protezione ambientale.
- 2) Già da alcuni anni sono state sviluppate ricerche su materiali alternativi (ceneri volanti, loppe d'altoforno, scarti di cava, detriti di risulta delle demolizioni di manufatti edilizi), dal Dipartimento di Idraulica Trasporti Strade (n. 37) dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", che hanno fornito risultati positivi al fine di poter suggerire nuove fonti di approvvigionamento di materiali da costruzione. Una ricerca sperimentale, tuttora in corso, riguarda alcuni *materiali naturali "poveri"*, non idonei alle costruzioni stradali a causa della presenza di componenti limo-argillose, ma che possono essere recuperati all'utilizzazione mediante



opportuni trattamenti con calce, con cemento o con calce-cemento. Tali trattamenti permettono spesso di modificare il loro gruppo di appartenenza nella classifica funzionale delle terre; la ricerca si svolge in collaborazione con il Centro Sperimentale Stradale ANAS di Cesano a Roma e con l'Istituto Sperimentale delle Ferrovie dello Stato.

- 3) Il Laboratorio di Sperimentazione Stradale (LSS) del Politecnico di Milano ha avviato uno studio applicativo riguardante i materiali non tradizionali, nello specifico sabbie di fonderia e materiali provenienti da demolizioni. L'obiettivo della ricerca è di verificare l'idoneità all'uso per la costruzione dei rilevati stradali, ed anche per linee ferroviarie A.V., di materiali innovativi. Lo studio è stato eseguito congiuntamente su campioni in vera grandezza e su miscele di laboratorio, ottenendo risultati di grande interesse soprattutto in vista di un uso sempre più limitato previsto per i materiali naturali tradizionali. Il campo prova prevede in particolare la realizzazione di un «rilevato prova» con diverse miscele; vengono valutate le più efficaci modalità di realizzazione, stesa e costipamento delle stesse, nonché le prestazioni che esse sono in grado di offrire una volta costituito il rilevato. Un insieme di prove di controllo sui materiali di base, sulle miscele e sul corpo del rilevato consentirà di verificare il raggiungimento dei requisiti fissati. Parte del rilevato prova sarà realizzato con miscele tradizionali (cioè costituite solo da sabbia di cava e terra di scavo) al fine di poter effettuare un utile confronto con le prestazioni ottenibili con le miscele non tradizionali. Ricerche su analoghi materiali sono in corso al Laboratorio di Sperimentazione Stradale dell'Università degli Studi di Padova, con particolare riferimento ai conglomerati bituminosi innovativi.
- *PROGETTO "EUREKA HARD ROAD": processo di consolidamento dei materiali stradali e da costruzione attraverso l'ottimizzazione dei processi naturali, diagenesi e laterizzazione.*

L'obiettivo finale della ricerca (EU 220, 1990-1995) era quello di individuare nuovi metodi per la realizzazione di sottofondi stradali a basso costo da impiegare in aree caratterizzate da scarsa disponibilità di materiale ghiaioso e sabbioso.

Per ottenere ciò si è scelto di operare con i materiali coesivi disponibili nell'area di costruzione (argille e limi) stabilizzandoli con un metodo "diagenetico" (complesso delle trasformazioni chimico-fisiche attraverso cui sedimenti sciolti si costituiscono in masse rocciose compatte) basato sull'impiego di basse percentuali di legante idraulico e di una forte compattazione per ottenere una bassa porosità ed una buona stabilità del legame all'azione dell'acqua e di altri agenti disgreganti (gelo-disgelo, carbonatazione, ecc.).

Per queste applicazioni è stato individuato e messo a punto un nuovo tipo di legante, l'*ettringite*, normalmente nota come agente disgregante di alcuni conglomerati cementizi. Le strade scelte da parte francese ed italiana per la sintesi e l'attivazione del legante ettringitico sono state differenti: dopo un inizio comune volto ad analizzare gli aspetti relativi alla sintesi chimica dell'ettringite le ricerche si sono focalizzate sul principale problema di questo tipo di legante, vale a dire la tendenza dei suoi cristalli ad una crescita incontrollata in determinate condizioni.

Da parte italiana si è puntato a controllare il fenomeno mediante l'impiego di precursori parzialmente cristallizzati che hanno mostrato ottime caratteristiche di stabilità dopo l'idratazione e sulla sostituzione (parziale o totale) degli ioni Al con ioni Fe nella molecola ettringitica.

Da parte francese si sono invece sviluppati metodi termici per la produzione di "clinker" ettringitici a cristallizzazione controllata ed anche questi hanno fornito risultati soddisfacenti. Per rendere competitivo il costo di produzione di questi nuovi tipi di legante sia da parte francese sia da parte italiana si è fatto ricorso all'impiego di residui industriali come materie prime. In particolare da parte francese si sono valorizzati dei residui ricchi di gesso e di ossidi di alluminio mentre da parte italiana si sono impiegati i residui da lavorazione del biossido di titanio (ricchi di solfato di ferro), fanghi da lavorazioni di metalli non ferrosi (ricchi di idrossido di alluminio) e marmettola (ricca di calcare).

In entrambi i casi i residui possono rappresentare oltre il 50% dei componenti dei leganti e questo fatto costituisce un indubbio successo dal punto di vista ambientale.

Dal punto di vista tecnologico le strade percorse da parte francese ed italiana sono differenti ma per certi aspetti complementari.

Da parte italiana si è puntato ad ottenere un legante dotato di buone caratteristiche fisiche e meccaniche dotato di una velocità di presa rallentata per adattarsi alle differenti tecnologie in uso nei vari paesi di potenziale impiego (dalle zone aride alla tundra).

Da parte francese non si è potuto limitare la velocità di presa del legante e si è allora messo a punto uno specifico macchinario per una corretta applicazione del prodotto.

Pertanto la maggior parte del know-how tecnologico italiano sviluppato nella ricerca è contenuto nella fase di produzione del legante (essiccazione in strato sottile) mentre quello francese è connesso alla fase di costruzione della strada; questo fatto collima con le specifiche competenze dei due partner principali del progetto.

Dal punto di vista applicativo sia la tecnologia italiana che quella francese hanno dimostrato di possedere delle caratteristiche di validità tali da renderle utilizzabili sia nei paesi in via di sviluppo (PVS) sia nei paesi industrializzati.

Si tratta di sistemi versatili mediante i quali è possibile utilizzare come materia prima quasi tutte le tipologie di suoli presenti in natura (sola esclusione sono i suoli troppo ricchi di sostanze organiche) ed ottenere sottofondi con le caratteristiche geotecniche desiderate semplicemente variando parametri del dosaggio del legante e dell'umidità del suolo base.

Ovviamente un ruolo estremamente importante è giocato dalle attrezzature impiegate per l'applicazione del processo e da questo punto di vista l'impiego di sistemi specifici per l'omogeneizzazione e la costipazione della miscela suolo legante come quello messo a punto dal partner francese è sempre consigliabile per l'ottenimento di risultati costanti.

Ai fini della ricerca Eureka, come criterio di verifica dell'esito, per semplicità era stato individuato un solo parametro indicativo, la coesione, che doveva essere superiore a 1 MPa con dosaggi di legante inferiori od uguali al 20%. Questi valori sono stati abbondantemente superati nel corso delle prove di espansione laterale libera (E.L.L.) svolte in laboratorio già con livelli di additivazione pari al 5%. Pertanto la ricerca ha sicuramente raggiunto gli obiettivi tecnici indicati nell'allegato E.

Non è possibile però trasferire automaticamente questi obiettivi di laboratorio nei tratti sperimentali dimostrativi. Infatti, in queste applicazioni la coesione è strettamente correlata ad altre variabili che caratterizzano il tratto (densità ottimale e reale, umidità, portanza, ecc.) che dipendono da parametri esterni quali le attrezzature impiegate per la costipazione o delle funzioni d'uso cui la struttura realizzata sarà destinata (traffico leggero o pesante, in pianura o in montagna, in zona arida o piovosa, in classe di esposizione climatica mite o severa) o ancora delle modalità costruttive della struttura (in piano o in rilevato, tal quale o con copertura bituminosa).

Inoltre anche all'interno di una stessa struttura possono essere richieste differenti parametri a strati con funzioni diverse (es. strato di finitura, strato di base, corpo del rilevato, strato di fondazione, ecc.).

Per questi motivi si è provveduto a selezionare per i tratti sperimentali dimostrativi della ricerca le miscele di materiali risultate conformi agli obiettivi minimi indicati in un allegato al progetto, ed ad utilizzare per la loro realizzazione le miscele a minor contenuto di legante che, sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio, avrebbero consentito di realizzare delle tipologie di strutture stradali normalmente impiegate nei paesi oggetto di intervento. I risultati delle prove svolte "in situ" dimostrano che in tutte le applicazioni realizzate si sono ottenuti dei risultati soddisfacenti che garantirebbero ampie possibilità di utilizzo della tecnologia nel settore delle costruzioni stradali.

### Stato dell'arte

Come sopra evidenziato, gli obiettivi della ricerca sono essenzialmente di tipo tecnico e possono venire riassunti nella individuazione di un nuovo sistema di consolidamento che permetta l'utilizzo e la valorizzazione di tutti i materiali coerenti ed incoerenti presenti sulla crosta terrestre. Nell'ambito di questo obiettivo di fondo, la ricerca vuole dimostrare specificamente la consolidabilità dei materiali naturali campionati, e l'utilizzabilità dei materiali consolidati come materiali da costruzioni stradali.

Al di là degli obiettivi chimici della ricerca (stabilità chimica), su cui non è facile porre dei limiti, in quanto i parametri di accettabilità possono variare sensibilmente da zona a zona o da tipo di materiale a tipo di materiale (es. temperatura massima e minima di esercizio, pH delle precipitazioni, presenza di sali antigelo, di fertilizzanti, ecc.), risultano fondamentali le caratteristiche meccaniche e reologiche dei materiali consolidati. Per semplicità, tra i parametri di verifica dell'esito della ricerca, verranno poste solo le caratteristiche meccaniche del materiale consolidato, in quanto assai più facilmente esprimibili e molto più influenzati dal processo di consolidazione. In

generale dunque potremo affermare che il trattamento consolidante avrà avuto successo quanto il materiale consolidato, sottoposto ai tre diversi tipi di condizionamento previsti, dopo un periodo standard di maturazione stimato in 15 giorni, raggiungerà comunque valori di coesione  $C > 1$  MPa nelle prove di compressione E.L.L. Un'altra condizione da porre, per mantenere economicamente interessante il processo, è che il dosaggio globale di aggiunte, additivi e catalizzatori non deve superare il 20% in peso sul totale della miscela secca. Se queste condizioni verranno contemporaneamente soddisfatte il processo di consolidazione potrà dirsi riuscito ed il materiale ottenuto valorizzato economicamente.

#### Maggiori innovazioni di questa proposta

In sintesi, dall'esame consuntivo della ricerca emerge chiaramente che con le tecnologie in essa sviluppate è stato possibile raggiungere i limiti a suo tempo posti per valutarne l'effettiva riuscita ma che il pregio più grande del processo messo a punto consiste nella sua versatilità di impiego, sia dal punto di vista delle materie prime (pressoché qualsiasi tipo di suolo incoerente e coerente è utilizzabile), sia delle zone (dal deserto alla tundra), sia dei prodotti finiti (qualsiasi struttura stradale realizzabile con misti granulari "nobili" è realizzabile anche con questa tecnologia).

#### Risultati raggiunti

La ricerca ha dimostrato la possibilità di ottenere dei leganti idraulici per usi geotecnici a partire da rifiuti industriali e sulla base dei risultati ottenuti è possibile confermare il raggiungimento degli obiettivi della ricerca in termini di incremento della coesione di residui incoerenti e coerenti.

Sono state eseguite prove per dimostrare la durabilità dei provini ottenuti e dei risultati raggiunti, sia attraverso dei test ciclici di saturazione/essiccamento, sia attraverso prove di gelo/disgelo. I leganti prodotti sono in grado di confermare i risultati ottenuti.

#### Prospettive di mercato

La tecnologia oggetto della ricerca potrà trovare una vastissima area di applicazione nelle pianure russe, per la realizzazione di strade minori e piste agricole durevoli a bassissimo costo.

Per parte italiana è ragionevole ritenere che la disponibilità di un know-how con un ampio mercato e di un macchinario unico ottimizzato per la produzione delle materie prime necessarie all'applicazione possa garantire ottime prospettive di penetrazione.



### **(3) ADDITIVI INNOVATIVI**

#### **(3.a) ATTIVANTI CHIMICO FUNZIONALI (ACF), O RIGENERANTI**

Per recuperare un fresato (RAP), con la tecnica del riciclaggio a caldo o a freddo, bisogna riconferire al legante le caratteristiche chimiche e fisiche perse (vedi punto (2.b.)). Sono stati messi a punto specifici additivi per bitume denominati ACF (*Attivanti Chimico Funzionali*) che rigenerano il bitume ossidato apportandone le frazioni più volatili perse nel tempo e migliorando quindi la qualità finale del conglomerato. Gli ACF non vengono in genere impiegati nel riciclaggio per formare miscele ternarie, in quanto la rigidità del conglomerato che si ottiene è volutamente maggiore di quella degli strati preesistenti.

L'ACF è un prodotto molto simile all'attivante di adesione (utilizzato quando si adottano nella miscela bituminosa aggregati con silice libera, la quale causa per l'appunto scarsissima adesione del bitume agli inerti stessi), per ciò che riguarda i componenti di base, ma concepito con la funzione specifica di modificare sia dal punto di vista chimico, sia fisico il bitume; l'uso risulta molto semplice: esso si miscela con il nuovo bitume che deve essere aggiunto a quello da rigenerare, direttamente nel serbatoio di stoccaggio, immettendo la quantità precalcolata al momento del carico in cisterna del bitume.

La quantità aggiunta è funzione della massa di fresato utilizzata: lo 0.2%÷0.3% sul peso del bitume nuovo introdotto ogni 5% di fresato immesso nel conglomerato (4%÷6% per 100% di RAP).

Utilizzare il fresato in un conglomerato comporta uno studio che può essere sintetizzato in queste fasi:

- Definizione delle caratteristiche del fresato (contenuto di bitume, curva granulometrica);
- Composizione della curva granulometrica contenente una percentuale variabile di fresato in funzione della tipologia di conglomerato da realizzare;
- Determinazione della percentuale di bitume nuovo da aggiungere, considerando l'aggiunta del bitume rigenerato nel fresato;
- Studio del comportamento meccanico della miscela (pressa giratoria o eventualmente metodo Marshall).

L'introduzione del fresato comporta indirettamente, difficoltà dovute all'incremento di viscosità del conglomerato, in quanto la viscosità del bitume della pavimentazione da rigenerare è molto alta. I risultati di alcuni studi sono sintetizzati nella Tab. 3 dove sono rappresentate le viscosità di diversi conglomerati:

- Il solo fresato ha una viscosità altissima, addirittura non rilevabile a temperature inferiori a 80 °C, ed una sua aggiunta in percentuale del 30% incrementa notevolmente la viscosità del conglomerato finale;
- L'aggiunta dell'ACF sul bitume, porta ad una riduzione della viscosità con conseguente aumento della lavorabilità, dell'adesione agli inerti, e della compattazione del conglomerato, ed una possibilità di diminuire le temperature di impasto e di stesa rispetto un conglomerato senza ACF, con un risparmio sul consumo di carburanti ed una ridotta emissione di gas inquinanti in atmosfera.

Temperatura (°C)	30%RAP + ACF (Pa s)	30%RAP senza ACF (Pa s)	100%RAP (Pa s)
70	812	1320	-
80	166	276	1050
90	46	68	278
100	16	20,6	86,8
110	5,7	7,7	26
120	2,26	3,14	10
130	1,11	1,47	4,6

*Tab. 3: Studi di viscosità.*

I vantaggi dell'uso degli ACF sono pertanto sostanziali, sia in termini di qualità del prodotto finale, sia in termini di vantaggi economici, dovuti al risparmio di bitume e combustibili, nonché alla possibilità di incrementare la frazione di fresato all'interno del conglomerato. C'è da dire che al giorno d'oggi però il fresato è completamente recuperato nelle tecniche a freddo (bitume schiumato ed emulsioni bituminose) senza l'onere necessario di aggiunta degli additivi rigeneranti.

#### Rigenerazione a caldo di conglomerati bituminosi in impianti semoventi

I conglomerati bituminosi rigenerati in impianto semovente, così come risulta dalla Circolare n. 24/85 del 14-05-1985 della Direzione Generale dell'A.N.A.S. ad integrazione del Capitolato Speciale di Appalto ed. 1984, sono costituiti da misti granulari composti da conglomerati preesistenti frantumati, inerti nuovi, aggiunti in proporzioni e tipo variabili a seconda della natura del conglomerato (base, binder, usura) che si deve ottenere, impastati a caldo con bitume, al quale viene aggiunto un idoneo prodotto di natura aromatica, che rigeneri le proprietà del legante contenuto nelle miscele bituminose preesistenti. La messa in opera avviene con sistemi tradizionali, tramite trasferimento diretto del prodotto finito dall'impianto alla vibrofinitrice. Il conglomerato preesistente proviene in genere dalla frantumazione, direttamente dalla sua primitiva posizione, con macchine fresatrici a freddo.

La fresatura non avviene quasi più a caldo, poiché crea grandi inconvenienti: la pavimentazione viene riscaldata per irraggiamento a raggi infrarossi per mezzo di batterie di radiatori alimentate a GPL (gas propano liquido, molto inquinante), o mediante aria forzata portata a temperatura utilizzando gasolio, e si è potuto notare che, a causa della cattiva conduzione del calore da parte del conglomerato, occorrono quattro minuti di riscaldamento per raggiungere la temperatura di 40 °C alla profondità di 4 cm, ma di conseguenza si nota che alla profondità di 2 mm la temperatura ha raggiunto i 440 °C!. In queste condizioni la pavimentazione prende letteralmente fuoco, con emissione di fumi altamente cancerogeni (impossibile l'uso in galleria, ma anche all'aperto), quindi è facile intuire in quali condizioni disastrose viene ridotto il materiale che si vuole riciclare.

Le percentuali minime del materiale inerte da riutilizzare non dovranno essere inferiori all'80%. Il restante materiale dovrà essere costituito da nuovi inerti, aventi i requisiti di accettazione previsti per i conglomerati normali. Il legante sarà costituito da quello presente nel materiale fresato integrato da nuovo bitume, attivato con i rigeneranti-fluidificanti in maniera da ottenere adeguati valori di viscosità e di adesione.

Miscela:

La granulometria della miscela dovrà corrispondere ai normali fusi prescritti dai capitolati per il tipo di conglomerato che si intende realizzare (base, binder, usura). Le percentuali di bitume e di rigenerante sono determinate nella seguente maniera:

% tot. bitume:  $P_t = 0.035 a + 0.045 b + e d + f$

ove:

$P_t$  = % di bitume in peso sul conglomerato (con fresato ed inerti di integrazione);

$a$  = % di aggregato trattenuto al setaccio n. 8 (ASTM 2.38 mm);

$b$  = % di aggregato passante al n. 8 e trattenuto al n. 200 (0.074 mm);

$e$  = % di aggregato passante al n. 200 (filler);

$d$  = 0.15 se il passante al n. 200 è compreso tra 11 e 15 (in percentuale);

= 0.18 se il passante al n. 200 è compreso tra 6 e 10;

= 0.20 se il passante al n. 200 è minore o uguale a 5;

$f$  = compreso fra 0.7 e 1 in funzione dell'assorbimento degli inerti.

La percentuale, rispetto al totale degli inerti, di nuovo legante sarà pari a:

$$P_n = P_t - (P_v \times P_r)$$

in cui:

$P_v$  = % bitume preesistente (nota o determinabile a caldo mediante estrattore Soxhlet, oppure a freddo, CNR B.U. 38/73);

$P_r$  = % di materiale riciclato.

La natura del legante nuovo da aggiungere, sarà determinata in base alla considerazione, che, la viscosità del legante totale a 60 °C non superi il valore di 4000 poise. La percentuale di rigenerante è ricavabile una volta

costruito un diagramma sperimentale, viscosità – % di rigenerante, determinato con almeno tre punti misurati ( $K$ ,  $M$ ,  $F$ ):

$K$  = Viscosità della miscela bitume estratto più bitume aggiunto nelle proporzioni determinate come sopra senza rigenerante;

$M$  = Viscosità della miscela bitume estratto più bitume aggiunto in cui una parte del bitume nuovo è sostituita dall'agente rigenerante in misura del 10% in peso rispetto al bitume aggiunto.

$F$  = Viscosità della miscela simile alle precedenti in cui una parte del bitume nuovo è sostituita dall'agente rigenerante nella misura del 20% in peso rispetto al bitume aggiunto.

Da tale diagramma è possibile dedurre, per interpolazione lineare alla viscosità di 2000 poise la percentuale di rigenerante necessaria, in peso rispetto al bitume nuovo aggiunto.

Circa i requisiti di adesione della nuova miscela di bitume più rigenerato essa non dovrà essere inferiore a quella su bitume nuovo eseguita con il metodo Vialit proposto da "Point et Chaussées". Le prestazioni in termini di stabilità Marshall e percentuale dei vuoti nonché tutti gli altri requisiti di accettazione rimangono inalterate rispetto ai conglomerati tradizionali.

Numerosi sono gli esempi di riciclaggio a caldo in situ nel nostro paese. Ricordiamo per importanza l'intervento lungo il tratto Livorno-Cecina dell'autostrada A 12, nel luglio 2003, della pavimentazione in conglomerato bituminoso drenante con nuovi macchinari innovativi a ridotto inquinamento (utilizzo di gasolio anziché propano, e tamburo essiccatore mobile per la rigenerazione di miscele con bitume modificato), frutto dei lavori sperimentali eseguiti dal 1996 al 2002 lungo l'autostrada A 13 Bologna-Padova.

La nuova tecnologia ha permesso il riciclaggio ottimale dei manti drenanti fonoassorbenti realizzati con bitume modificato, i quali proprio per la presenza dei polimeri nella miscela, richiedono che la temperatura di stesa non sia mai inferiore ai 160 °C.

### (3.b) ATTIVANTI DI ADESIONE

La durata di un conglomerato bituminoso è legata alla buona adesione tra bitume ed inerte ed alla possibilità che questa venga conservata nel tempo. La perdita di adesione comporta un rapido deterioramento degli strati superficiali della pavimentazione stradale (spogliamento degli aggregati), costituiti da conglomerato bituminoso e soggetti all'azione del traffico, l'adesione viene meno soprattutto in presenza d'acqua meteorica o di falda. Questo induce a richiedere che il parametro di adesione ottenuto in condizioni di asciutto non abbia una drastica caduta in presenza d'acqua, ecco perché la prova di adesione viene condotta anche su provini bagnati (vedi prova di adesione).

Con il termine adesione bitume-inerte si intende l'attitudine del legante ad aderire sugli elementi lapidei e di far presa con essi in modo da tenerli fortemente collegati.

Il fenomeno dell'adesione risulta regolato da diversi meccanismi che coinvolgono, tra gli altri i seguenti fattori:

- Le reazioni chimiche di neutralizzazione tra i composti acidi del bitume e quelli basici eventualmente presenti sulla superficie degli inerti;
- La formazione di tensioni interfacciali tra il legante bituminoso e la superficie lapidea (es. pressione di vapore nella miscelazione);
- Gli effetti meccanici legati al grado di ruvidità e porosità posseduta dalla superficie degli inerti.

Ai primi due meccanismi sono legati i fenomeni dello *spogliamento* e del *distacco* (o *pull out*), mentre al terzo quello della *ritenzione spontanea*. Gli attivanti di adesione agiscono con lo scopo di migliorare l'adesività del bitume in due modi simultanei: creando reazioni di tipo chimico maggiore, abbassando la tensione interfacciale tra bitume ed inerte. Tali prodotti sono composti azotati di natura e complessità varia.

L'uso di attivanti risulta sempre di pratica utilità, soprattutto ogni volta che si ha un'adesione di tipo apparente tra il bitume e il materiale lapideo, cosa legata al tipo di inerte utilizzato (es. quarzo, filladi, scisti, rocce con silice libera e non allo stato vetroso in genere) alla sua umidità (aggregati umidi non riscaldati) o a quella dell'ambiente, riuscendo ad alleviare le problematiche di un possibile sgranamento dell'intero manto stradale.

Gli attivanti di adesione permettono inoltre una riduzione dell'ossidazione dei bitumi diminuendo del 30%-40% i fenomeni connessi alla fragilità e rapido invecchiamento delle pavimentazioni, favorendo una maggiore durata dei conglomerati posti in opera. Si riportano le caratteristiche di un attivante di adesione reperibile sul mercato.



L'attivante di adesione, Alkilammidopoliammina in estratti aromatici denaturati, realizzato specificatamente per essere utilizzato nei conglomerati bituminosi a caldo, garantisce un legame perfettamente stabile tra bitume ed aggregato, è stabile alle alte temperature di stoccaggio (170 °C) nel bitume ed ai tempi prolungati di riscaldamento.

#### SPECIFICHE

Aspetto:	liquido viscoso
Colore:	bruno
pH:	N.A.
Densità a 20°C:	ca. 0.97 kg/dm <sup>3</sup>
Punto ebollizione (a p = 1atm):	>200 °C (fluido sovrabollente)
Viscosità a 50°C:	6.5 °E
Punto infiammabilità:	>100 °C
Solubilità in acqua:	Insolubile

Le percentuali di impiego variano da 0.2% a 0.5% sul peso del bitume in funzione delle condizioni di lavoro. E' imballato in fusti da 200 kg netto, per quanto riguarda lo stoccaggio risulta stabile alle normali temperature e deve essere mantenuto nei contenitori chiuso ed al coperto.

#### (3.c) FIBRE VETROSE, DI CELLULOSA, METALLICHE, POLIMERICHE

Il conglomerato bituminoso fibrorinforzato (FRBC) rappresenta sicuramente una delle innovazioni più ragguardevoli che si sono avute nello sviluppo di questo materiale, con l'obiettivo di migliorarne le caratteristiche meccaniche affinché esso possa presentare un comportamento ideale con modulo pressoché costante nell'intervallo di elastoplasticità, così come per i PMB. La direzione di tutte le ricerche in tema di leganti idrocarburici è insomma indirizzata al conseguimento di un prodotto a bassa suscettibilità termica e di alta durata. Le fibre, naturali (farina fossile, cellulosa) e artificiali (vetro, acciaio, gomma, polimeri, amianto, quest'ultimo ora vietato) vengono aggiunte nella fase di formazione del conglomerato, e non a monte nell'impianto di produzione del bitume, il prodotto che ne risulta è chiamato *conglomerato bituminoso additivato*, o *migliorato*. Esistono semplici dosatori di polimeri e fibre in commercio, che consentono per piccoli lavori la miscelazione a basso costo senza la necessità di avere impianti speciali.





L'utilizzo congiunto di PMB e fibre per uno stesso conglomerato dà risultati evidentemente sorprendenti rispetto ad un conglomerato classico; una applicazione di questa "doppio" impiego è lo Splitt Mastix Asphalt, realizzato con PMB 45/55 e l'1% di microfibre. Le fibre sono importantissime anche per la produzione di membrane impermeabilizzanti speciali (SAMI) e calcestruzzi fibrorinforzati, le stesse fibre utilizzate per i conglomerati bituminosi vengono impiegate anche per i conglomerati cementizi. Il modulo elastico delle fibre polimeriche, PVA (polivinilacetato), PAN (poliacrilonitrile, termoplastico vinilico), PP, è di 2000÷3000 MPa, per le fibre di vetro si attesta tra 70÷90 GPa (1 GPa = 1000 MPa), per le fibre di acciaio è uguale o superiore a 210 GPa. Un parametro importante per distinguere le fibre è il *rapporto d'aspetto*, ossia il rapporto tra la loro lunghezza e una dimensione della sezione (ad esempio il diametro); maggiore è il rapporto d'aspetto, più efficaci sono le fibre.

- **MICROTAPPETO A FREDDO "FIBROSEAL®" CON FIBRE VETROSE.**

A quindici anni dalle prime applicazioni in Italia di "Macroseal", microtappeto a freddo di spessore massimo pari a 1 cm, diffusosi ormai a tutti i livelli di utilizzo, autostrade, strade statali, provinciali, comunali, per rispondere alle esigenze indotte da un traffico in continuo e costante aumento, si è messo a punto un nuovo manto stradale: il "Fibroseal®", in altre parole un Macroseal rinforzato con fibre continue di "vetro E" (vetro borosilicoalluminocalcico a basso tenore di alcali). Fibroseal® presenta rispetto al suo predecessore caratteristiche funzionali decisamente migliorate in quanto l'introduzione delle fibre di vetro permette di variarne le componenti in modo sensibile.

Le fibre di vetro adottate hanno un diametro di 15  $\mu$  (microns) e vengono unite in filamenti di circa 65 fibre ciascuno. Con appena 30 grammi di fibra per metro quadro di Fibroseal® otteniamo 1000 metri lineari di filamento che, tagliato in segmenti di circa 6 mm, costituisce una capillare intelaiatura di rinforzo alla "malta" bituminosa.

La quantità di fibre può naturalmente essere variata a seconda delle esigenze e del tipo degli altri componenti.



Le caratteristiche peculiari del Fibroseal® si possono riassumere nei seguenti punti:

- Maggiore viscosità della "malta" bituminosa che non comporta più pericoli di colaggio nel trasporto;
- Maggiore consistenza della malta stessa che può essere costituita da una maggiore quantità di graniglia (sino al 65%) rispetto alle parti fini, dando al prodotto finito una maggiore macrorugosità, di conseguenza diminuzione del pericolo di aquaplaning e un più elevato coefficiente di attrito;
- Maggiore durata nel tempo dovuta all'armatura delle fibre che permettono altresì di aumentare la quantità di bitume senza rischio di rifluimento nelle stagioni calde;
- Maggiore flessibilità della malta a maturazione avvenuta con superiore resistenza alle fessurazioni indotte;
- Minor pericolo di rigetto di graniglia all'apertura al traffico.

Le ragioni di una scelta Fibroseal® è chiaramente un prodotto avanzato rispetto a tutti i tipi esistenti di Slurry-seal:

- E' la risposta adeguata alle esigenze sempre più esasperate della nostra rete stradale;

- E' il rivestimento affidabile che aumenta il comfort e la durata della pavimentazione;
- E' quell'elemento in più di sicurezza che a volte può essere determinante per salvare la nostra vita.

- **FIBRE VETROSE DI RICICLO: IL PROGETTO WBRM.**

Il progetto Life WBRM (Waste Based Reinforcing Materials, LIFE/ENV/98/IT/00132), iniziato nel 1998 e concluso nel 2001, fa parte di una importante serie di progetti finanziati dalla Comunità Europea, al fine di trovare soluzioni economiche ed ecobiocompatibili di riciclo dei materiali.

Questo è un progetto dimostrativo che si propone di testare, su scala pilota, i processi produttivi di nuove tipologie di fibre di vetro utilizzabili per la produzione di prodotti tessili, di tessuti non tessuti e per la produzione di materiali fibrorinforzati a base di bitume, plastiche e cemento. In questo progetto ci si propone di trasformare delle miscele di ceneri di rifiuti urbani (MWI), ceneri di combustione del carbone, e polveri da abbattimento fumi di fonderia (SM) in fibre vetrose lunghe che possiedono buone caratteristiche meccaniche e una alta resistenza chimica.

Inoltre, come sottoprodotto delle fibre vetrose di riciclo, si ottengono *sali purificati* utilizzabili come *anticongelanti* per le pavimentazioni nella stagione fredda.

#### Il problema ambientale

Le ceneri volanti prodotte dai sistemi di combustione, in particolare negli inceneritori di rifiuti solidi urbani, costituiscono un problema di difficile soluzione. Infatti, esse rappresentano mediamente il 3-4% del rifiuto incenerito e sono costituite dalla frazione più fine, leggera e termolabile dei residui derivanti dalla combustione di rifiuti. La quasi totalità di esse (99% circa) viene raccolta nei sistemi di filtrazione dei reflui aeriformi e di abbattimento degli inquinanti. Attualmente, in Europa ne vengono prodotte circa 1.500.000 t/anno che devono essere smaltite in discarica controllata previo trattamento di stabilizzazione/inertizzazione. Infatti, si tratta di rifiuti pericolosi in quanto contenente quantità rilevanti di metalli pesanti (Zn, Pb, Cd, Cr, ecc.) in forma molto solubile e reattiva.

Spesso i metalli pesanti sono presenti in forma di sali anionici (cloruri, solfati) che (specie quelli alcalini) rappresentano una delle principali componenti di questo rifiuto (fino al 25% di Cl in alcuni campioni). Si tratta, quindi di materiali chimicamente molto difficile da stabilizzare in maniera efficace.

Tali caratteristiche rendono questi rifiuti un problema ambientale rilevante e determinano un elevato costo di smaltimento, che nell'ambito europeo, varia da 150 a 500 €/ton.

#### Il processo WBRM

Per risolvere questo problema ambientale è stato sviluppato il processo WBRM (protetto da specifici brevetti) che consente di produrre materiale vetroso, a specifica commerciale, utilizzando ceneri volanti da inceneritore di rifiuti solidi urbani ed altri rifiuti speciali.

Questo processo utilizza i metalli alcalini ed i metalli pesanti, presenti nelle ceneri, per velocizzare il processo di fusione della massa vetrosa e per ridurre il punto di rammollimento dei silicati che ne sono i principali costituenti.

In tal modo, a partire da 1 kg di ceneri volanti tal quali è possibile ottenere da 1 fino a 2,5 kg di vetro, a seconda delle caratteristiche chimiche delle ceneri utilizzate.

Il vetro prodotto con il processo WBRM ha caratteristiche reologiche (elasticità, viscosità e plasticità) che possono essere ottimizzate, con l'aggiunta di piccole quantità di sostanze fondenti tradizionalmente impiegate nell'industria vetraria (ad es. carbonati), sino a rendere il composto facilmente filabile negli impianti utilizzati per la produzione di fibre vetrose convenzionali (ad es. fibre di vetro E, di vetro C o basaltiche) utilizzate in tutto il mondo in vari processi e prodotti industriali.

Le caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre ottenute con il processo WBRM, benché siano fortemente dipendenti dalle condizioni operative utilizzate per produrle, sono risultate sempre sostanzialmente analoghe a quelle delle fibre di vetro tipo E prodotto da materie prime.

Le caratteristiche chimiche della fibre WBRM presentano una maggiore resistenza alle aggressioni alcaline rispetto alle fibre di vetro tipo E, pur non raggiungendo la stabilità delle fibre di vetro all'ossido di zirconio.

Dal punto di vista ambientale le fibre WBRM costituiscono un risultato di grande rilievo in quanto i metalli pesanti in esse contenuti sono risultati fissati in maniera stabile, come dimostrato dagli esiti positivi dei test di rilascio di inquinanti (eseguiti secondo la norma olandese NEN 7341 che si appresta a diventare un vero e proprio standard europeo). Inoltre, il trattamento ad alta temperatura, combinato con idonee soluzioni impiantistiche, assicura al processo WBRM una completa eliminazione degli inquinanti organici dalle emissioni aeriformi, che vengono comunque convogliate ad impianti di abbattimento di elevata efficienza.

Oltre alle fibre, il processo WBRM produce anche una miscela di sali purificati (cloruro di calcio, sodio e potassio) utilizzabile come agente anticongelante per le sedi stradali. Questi sali, che rappresentano il 20-40% della massa di ceneri trattate e che sono praticamente privi di metalli pesanti, rappresentano un'ottima alternativa ai cloruri di calcio e di sodio normalmente utilizzati per lo spandimento sulle strade.

Il processo WBRM consente, quindi, di valorizzare tutti i costituenti delle ceneri e rappresenta un'alternativa economicamente molto conveniente rispetto allo smaltimento in discarica.



#### Vantaggi economici

Oltre l'88% in peso dei materiali utilizzati nel processo WBRM è costituito da rifiuti quali:

- Ceneri volanti da inceneritore di rifiuti solidi urbani;
- Ceneri volanti da combustione del carbone;
- Ceneri di caldaia (scorie) da inceneritore di rifiuti solidi urbani;
- Sabbie esauste di fonderia.

Questo processo garantisce perciò importanti risparmi sui costi di acquisto delle materie prime che caratterizzano invece le fibre di vetro tipo E.

Inoltre, la fase iniziale di fusione del vetro da rifiuti richiede temperature e tempi di affinatura della massa vetrosa molto inferiori a quelli del tradizionale vetro E, consentendo consistenti risparmi energetici ed economici.

Sulla base delle stime disponibili, il costo di un'unità standard capace di trattare 15.000 t/anno di materiale è di circa 3,5 milioni di €.

#### Vantaggi ambientali

La convenienza ambientale del processo WBRM è risultata significativa anche in ragione del fatto che esso utilizza quasi esclusivamente rifiuti, in sostituzione di materie prime, ed ha un impatto decisamente limitato sull'ambiente essendo caratterizzato da:

- Produzione di quantitativi minimi di rifiuti solidi di processo (meno dell'1% del quantitativo di rifiuti trattati);
- Assenza di rifiuti/reflui liquidi;

- Produzione ridottissima di emissioni aeriformi, che possono essere integralmente captate dai sistemi di abbattimento dell'inceneritore ospite, e rispetto alle quali rappresentano un contributo trascurabile (dell'ordine dell'1%).

In termini concettuali, il processo WBRM potrebbe essere considerato anche come un sistema estremamente efficace di inertizzazione delle ceneri, in quanto sia il vetro sia le fibre con esso ottenute contengono quantitativi rilevanti di vari metalli pesanti (Pb, Zn, Cr, Cu, Cd, Ni, Co, ecc.) stabilmente legati in un reticolo vetroso di silicati.

In un singolo passaggio, oltre l'80% dei metalli pesanti presenti nelle miscele base dei rifiuti viene fissato nella struttura vetrosa delle fibre, mentre la parte restante viene allontanata coi fumi e raccolta dai sistemi di abbattimento, rientra a far parte delle ceneri leggere e viene quindi riciclata all'impianto di trattamento.

In definitiva, se si tiene conto di questo effetto di riciclaggio si può valutare che praticamente tutti i metalli pesanti vengono fissati nella matrice vetrosa.

Le valutazioni sul ciclo completo di vita dei prodotti WBRM hanno evidenziato vantaggi ambientali considerevoli in termini di riduzione del prelievo di materie prime e dei consumi energetico e consentono di qualificare questo processo come tecnologia pulita.

#### Il mercato europeo delle fibre vetrose

In Europa, nell'anno 2000, sono state prodotte circa 700.000 t di materiali vetrosi da rinforzo, pari a circa il 28% dell'intera produzione mondiale.

Alla produzione europea va aggiunta una produzione di fibre alcali-resistenti pari a circa 2.500 t nell'anno 2000.

Il 96÷98% dell'intero mercato mondiale (ed europeo) delle fibre da rinforzo è rappresentato da vetro di tipo E.

#### Tessuti non tessuti (TNT)

Il principale utilizzatore di fibre vetrose è il settore dei tessuti non tessuti, seguono i settori per la produzione di materiali compositi, di isolanti termici, di silenziatori industriali, di filtri ecc.

Per la produzione di tessuti non tessuti vengono normalmente utilizzate fibre vetrose accoppiate lunghe 60 mm.

Nel corso del progetto WBRM sono state prodotte e sottoposte a caratterizzazioni alcune tipologie di tessuti non tessuti, in particolare sono stati confrontati campioni ottenuti con le fibre WBRM e campioni con le fibre E commerciali, a parità di spessore, 5,9  $\mu\text{m}$ , e grammage, 230  $\text{g}/\text{m}^2$ . I risultati hanno evidenziato che le proprietà termiche delle fibre WBRM sono del tutto eguali a quelle delle fibre di vetro E.

Sono stati condotti esperimenti di isolamento termico secondo il test standard NF EN 31092. Il non tessuto viene posto su una piastra con temperatura regolata (35 °C), mentre sulla parte opposta del non tessuto viene fatto passare un flusso d'aria parallelo (1 m/s, 20 °C). Una misurazione della potenza elettrica necessaria per conservare la piastra a temperatura costante dà la resistenza termica dei campioni sottoposti alla prova; minore è la potenza elettrica fornita, minore è lo scambio conduttivo piastra – non-tessuto in quanto maggiore è la sua capacità isolante.

I risultati ottenuti vengono riportati nella tabella seguente:

Campione	e	R'	R'/e
1 – Fibre convenzionali di vetro E	5,9	0,173	0,029
2 – Fibre convenzionali di vetro E	10,6	0,286	0,027
3 – WBRM C3	5,8	0,151	0,026

Legenda: e = spessore ( $\mu\text{m}$ ) R' = resistenza termica specifica conduttiva ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

A parte l'ovvia correlazione tra resistenza termica ( $R' = e/\lambda$ ) e spessore delle fibre, il risultato più interessante è costituito dal parametro R'/e che dimostra come i campioni prodotti con le fibre WBRM diano comportamenti praticamente identici agli altri prodotti commerciali. Le fibre WBRM C3 indicate in tabella sono fibre

multifilamento particolarmente ricche di carbonati che hanno mostrato tra i 15 tipi di fibre vetrose analizzate, i migliori risultati in termini di proprietà chimiche, fisiche, meccaniche e di produzione industriale.



#### Leganti polimerici fibrorinforzati (FRP)

Nel progetto è stata verificata la possibilità di impregnare dei feltri in tessuto non tessuto WBRM con resine termoindurenti (es. PET termoindurente, EP) Sono stati prodotti dei provini 15x15 cm, sia con feltri WBRM sia con feltri di vetro E.

L'incidenza ponderale dello strato rinforzante è leggermente inferiore nel vetro E e risulta evidente che le fibre WBRM sono impregnabili in maniera soddisfacente con resine termoindurenti.

È stato così dimostrato che le proprietà meccaniche dei materiali plastici rinforzati con le fibre WBRM sono del tutto simili a quelle dei materiali rinforzati con fibre di vetro tradizionali; risultato che conferma come le fibre WBRM siano particolarmente idonee per questa specifica applicazione. I leganti polimerici così ottenuti vengono spesso indicati con l'acronimo GFRP (Glass Fibers Reinforced Polymer).

#### Materiali bituminosi fibrorinforzati (FRBC)

Nel settore dei materiali bituminosi le fibre vengono largamente impiegate per migliorare la resistenza alla trazione e soprattutto alla lacerazione di membrane impermeabilizzanti. Il supporto fibroso (non tessuto) risulta poi fondamentale per la produzione industriale delle membrane, dato che è questo lo strato di base su cui viene "costruita" la membrana stessa, mediante successivi passaggi di impregnazione e deposizione con bitume ed altri componenti.

In questo settore la fibra più utilizzata è il poliestere PE, che rappresenta l'80÷85% del mercato, mentre la fibra di vetro E copre il restante 15÷20%. Il principale fattore che limita l'impiego di queste ultime fibre è la loro incidenza economica, pari circa al doppio di quella delle fibre poliestere. La disponibilità di fibre vetrose a basso costo (come le fibre WBRM) potrebbe ampliare in maniera notevole la loro quota di mercato in questo settore, attualmente pari a 2.500 t/anno solo in Italia.

Un'altra applicazione estremamente interessante per le fibre WBRM consiste nel rinforzo dei conglomerati bituminosi destinati all'uso stradale. La recente introduzione sul mercato di bitumi modificati ad elevata resistenza, per la realizzazione di strati porosi di usura "antipioggia", ha stimolato la ricerca per la realizzazione di materiali compositi fibrorinforzati ad elevatissime prestazioni. Le fibre sino ad ora utilizzate in queste applicazioni sono principalmente fibre di cellulosa. Anche in questo caso risulta fondamentale il rapporto qualità/prezzo delle fibre che è decisamente a favore delle fibre WBRM. L'impiego di fibre WBRM nei conglomerati bituminosi applicati con energia di compattazione forte risulta, quindi, estremamente interessante anche se per questo tipo di applicazioni le informazioni ottenute nel corso di questo progetto non appaiono esaustive e si ritiene sarebbe necessario compiere ulteriori studi e qualificazioni. L'effetto dell'aggiunta di fibre sulla stabilità Marshall di un conglomerato bituminoso sono riportate nella seguente tabella:

Tipo di fibra	Quantità di fibra (%)	Compattazione media (kN)	Compattazione forte (kN)
Cellulosa	0.0	7.50	9.93
Cellulosa	0.3	6.55	9.20

Cellulosa	0.5	5.09	9.81
Cellulosa	1.0	3.64	9.50
WBRM	0.0	7.50	9.93
WBRM	0.2	5.83	11.64
WBRM	0.3	6.29	11.97
WBRM	0.5	3.81	12.88
WBRM	1.0	3.68	3.53

Si nota che il dosaggio ottimale di fibre vetrose è dello 0.5% sulla quantità di bitume, lo stesso vale per le fibre di cellulosa; è evidente che una quantità maggiore porta ad un comportamento troppo fragile in quanto la stabilità diminuisce esponenzialmente, quindi bisogna porre molta attenzione nella fase progettuale di mix design. I valori di stabilità risultano comunque superiori a quanto ANAS e Società Autostrade propongono.

Queste fibre, però, devono essere per sicurezza adeguatamente protette mediante un rivestimento resinoso (apprettatura), per evitare la dissoluzione della silice amorfa di cui sono costituite, nell'ambiente alcalino dei sistemi a base bituminosa nel quale si trovano ad operare. L'appretto è un copolimero acrilico in soluzione acquosa o acido policarbossilico sempre in soluzione acquosa.

Nell'ambito del progetto le fibre sono state prodotte dapprima come filamenti singoli, apprettati e non, utilizzando un impianto da laboratorio, e quindi come fibre accoppiate ed apprettate utilizzando un impianto pilota dotato di filiera multibava.

Si riportano solamente i dati relativi alle fibre monofilamento: diametro  $5\div 24 \mu\text{m}$ , densità  $2.54\div 2.61 \text{ g/cm}^3$ , tensione di rottura  $\sigma_r = 900\div 1500 \text{ MPa}$ , deformazione a rottura  $\varepsilon_r = 1.00\div 1.20 \%$ ,  $d_{\text{TEX}} = 0.16\div 6.00 \text{ g}$  (nell'industria tessile il peso lineare è normalmente espresso in "d<sub>TEX</sub>" che equivale al peso in grammi di 10.000 metri di fibra). Inoltre, sono state effettuate prove, dopo l'immersione in soluzioni alcaline per dei periodi prefissati, per misurare la capacità di resistenza agli alcali nelle diverse fibre.



#### Materiali cementizi fibrorinforzati (FRC)

Il conglomerato cementizio ordinario possiede generalmente una resistenza a trazione limitata ed un comportamento post-picco quasi fragile; ciò significa presentare nel ramo di post-rottura scarse capacità di deformazione. È possibile modificare le predette caratteristiche e, in particolare, ridurre la fragilità disperdendo, nella fase di impasto, fibre discontinue (di acciaio, di vetro, di plastica, ecc.) utilizzate largamente negli Stati Uniti. Le fibre, specialmente quelle metalliche, hanno la funzione di intercettare le fessure che insorgono e si sviluppano nella fase di post-rottura. Le fibre metalliche, inoltre, presentano generalmente opportune sagomature volte a migliorare l'aderenza con la matrice cementizia acquisendo in tal modo la capacità di limitare, anche apprezzabilmente, l'evoluzione del processo di fessurazione (maggiore tenacità e resistenza all'urto).

Accanto alle fibre metalliche, le cui applicazioni sono ormai ben note, sono disponibili commercialmente fibre di vetro alcali-resistenti aventi funzione di rinforzo strutturale e fibre "crack-stop", di bassa resistenza chimica (vetro E commerciale), utilizzate per contrastare la fessurazione indotta nel conglomerato cementizio da fenomeni di ritiro, in particolare allo stato fresco; il calcestruzzo che si ottiene è indicato GFRC sul mercato, ossia "Glass Fibers Reinforced Concrete".

Alla luce dei risultati sperimentali ottenuti, le fibre di vetro prodotte con il processo WBRM sono idonee ad essere impiegate quanto meno come armatura diffusa in calcestruzzo, insieme a quelle metalliche per contenere gli effetti delle variazioni dimensionali dovute a ritiro idraulico oppure a deformazione per escursione termica. Conglomerati cementizi fibrorinforzati sono quindi ottimi per la stesa di pavimentazioni rigide, armate e non armate, soggette a forti sollecitazioni come quelle riscontrabili in campo aeroportuale.



- **FIBRE DI CELLULOSA.**

Il prodotto messo a punto con i più importanti produttori nel settore della cellulosa, è una microfibrilla stabilizzante, addensante, finemente fibrillata, compatibile con l'ambiente, prodotta da cellulosa di ottima qualità.

La funzione principale delle fibre di cellulosa è quella di stabilizzare termicamente, addensare e fare da "supporto" al legante bituminoso, nel senso che permette alla miscela di essere omogeneamente impastata, trasportata e messa in opera, senza che il bitume normale o modificato possa separarsi dagli inerti e dagli eventuali modificanti o additivi, e colare, senza contare che uno strato più spesso attorno agli aggregati presenta una maggiore resistenza all'azione del traffico ed agli agenti atmosferici.

Le miscele ottenute con l'uso di tali fibre nei conglomerati bituminosi chiusi, semichiusi o aperti, molto diverse dai normali conglomerati sono costituite da una base di aggregati legati o "cementati", non solo dal bitume modificato o standard, più o meno fillerizzato, ma da un vero e proprio mastice che conferisce al conglomerato caratteristiche di:

- Stabilità, notevole resistenza alla deformazione elastica ed all'effetto ormaia (deformazione permanente);
- Elevata rugosità superficiale;
- Minore rumorosità, perché la cellulosa attorno agli inerti lapidei smorza il contatto reciproco tra di essi; lo stesso avviene utilizzando polverino di pneumatici riciclati attualmente in fase di sperimentazione;
- Riduzione della fastidiosa nebulizzazione dell'acqua in caso di pioggia, perché il manto risulta essere con una percentuale di vuoti maggiore grazie all'azione addensante sul bitume che circonda di più gli aggregati;
- Maggiore resistenza dei conglomerati allo sbalzo termico (fessurazioni di origine termica);
- Minore invecchiamento del legante.

Le fibre di cellulosa vengono applicate in tutti quei conglomerati bituminosi dove necessita ottenere prestazioni particolari come maggior rugosità superficiale, resistenza a forti variazioni termiche, addensamento, resistenza alla deformazione, ecc.

Vengono usate essenzialmente per confezionare Splitt Mastix Asphalt (SMA, conosciuto anche come *Stone Mastix Asphalt* specie nell'Europa del Nord) tappeti drenanti fonoassorbenti, microtappeti a caldo e a freddo.



Le microfibre in pura cellulosa naturale, vengono aggiunte nel mescolatore dell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, così come tutti gli altri additivi, al fine di stabilizzare ed addensare il legante bituminoso.

#### *SPECIFICHE*

Aspetto:	fibre
Colore:	grigio
Densità:	25 g/l
pH:	7

Il dosaggio delle fibre varia dallo 0.2% allo 0.4% sul peso degli inerti. Dosaggi diversi dallo 0.5% (ottimale) all'1.5% possono essere necessari quando particolari proprietà sono richieste alla nuova pavimentazione. E' imballata in sacchi, risulta stabile alle normali temperature e viene stoccata nei contenitori, chiusi ed al coperto.

#### **(3.d) ADDITIVI "FLUIDIFICANTI"**

L'abbassamento della temperatura di produzione e stesa del conglomerato, ottenuta mediante una riduzione della viscosità, ha lo scopo principale di ridurre le emissioni di fumi, polveri, odori e biossido di carbonio (anidride carbonica) CO<sub>2</sub>.

La temperatura di miscelazione dei conglomerati bituminosi tradizionali è variabile tra 170 °C e 180 °C, per i conglomerati di bitume modificato e alcuni additivati è 190 °C o maggiori. I metodi allo studio, soprattutto in Germania, si basano sull'aggiunta di particolari additivi (paraffine Fischer-Tropsch® e zeoliti) o sull'impiego di miscele di bitumi ad alta penetrazione e schiumati. Le applicazioni sperimentali sono già in uno stato avanzato.

#### Premessa

Varie ricerche ed esperienze precedenti hanno mostrato che l'emissione di fumi dal bitume e, di conseguenza, dal conglomerato appena steso in opera, aumenta con la temperatura. Un innalzamento di 8-10 °C di temperatura fa praticamente raddoppiare il volume dei fumi prodotti, in accordo con la legge di Arrhenius che prevede una dipendenza logaritmica della velocità di reazione dalla temperatura per le reazioni del primo ordine. Ciò sembra confermare che i fumi che si formano ad alta temperatura derivino più da reazioni di *cracking* che da componenti già presenti nel bitume.

Modeste riduzioni della temperatura di produzione e di applicazione del conglomerato possono quindi produrre significative riduzioni dei fumi emessi. Il problema è particolarmente sentito per le applicazioni a temperature relativamente alte, come quelle relative all'asfalto colato, ai conglomerati di PMB, e al *gussasphalt* (miscele chiuse ad altissima impermeabilità e resistenza alla fatica, impiegate soprattutto per gli impalcati di opere d'arte così come è stato fatto per il ponte sullo stretto Storebaelt, in Danimarca).

E' quindi logico che la Germania, grande utilizzatrice del *gussasphalt*, sia all'avanguardia nelle ricerche per la messa a punto di processi capaci di lavorare a temperature ridotte, rispetto quelle attuali.

#### • *GLI ADDITIVI ORGANICI: LE CERE PARAFFINICHE.*

Le ricerche per abbassare la temperatura di stesa e produzione di un conglomerato bituminoso di almeno 15-20 °C, si sono fin dall'inizio rivolte verso la sperimentazione di additivi organici solubili nel bitume. Tra gli additivi più promettenti sperimentati in Germania figurano le cere paraffiniche prodotte negli impianti Fischer-Tropsch® (FT).

La sintesi FT, messa a punto a partire dagli anni '20 in Germania e sviluppata soprattutto in concomitanza della II Guerra mondiale, produce combustibili e carburanti liquidi a partire dal carbone, tramite la formazione di gas di sintesi (CO, H<sub>2</sub>) e successiva trasformazione catalitica del gas in idrocarburi. Dopo la guerra la FT ha trovato estesa applicazione in Sud Africa nelle varie versioni dei processi Sasol.

Oggi ci sono prospettive interessanti per la produzione di idrocarburi liquidi a partire dal gas naturale (seguendo il ciclo: metano – gas di sintesi – idrocarburi liquidi); un processo è stato messo a punto anche da una importante industria nazionale. La disponibilità di paraffine FT dovrebbe quindi essere assicurata anche da questi processi.



Apparentemente sembra un controsenso aggiungere paraffine al bitume per variarne la viscosità, in quanto è noto che in molti paesi esiste un limite (normalmente intorno al 2%, 2.5% per CNR B.U. 66/78) per il contenuto di paraffine nel bitume.

Va però notato che il comportamento delle paraffine nel bitume dipende dalla loro struttura chimica. Così le paraffine da petrolio hanno catene contenenti da circa 18 a 45 atomi di carbonio, con un intervallo di fusione compreso in genere tra 15 e 70 °C. Le paraffine del bitume (cere microcristalline) si pongono nelle zone superiori di tali intervalli, tipicamente tra 45 e 60 °C per la fusione; oltre a influenzare le proprietà a bassa temperatura, quindi, le paraffine del bitume fondono proprio nell'intervallo di utilizzazione stradale del conglomerato bituminoso, specie nella stagione estiva (ecco perché la loro quantità è contenuta).

Le paraffine FT contengono idrocarburi alifatici con catene più lunghe (40÷100 atomi di carbonio) e hanno punto di fusione compreso tra 70 e 120 °C. Esse quindi mantengono la propria consistenza fino a circa 100 °C e poi fondono, riducendo la viscosità del bitume nell'intervallo che interessa per l'abbassamento delle temperature di miscelazione con gli inerti e per la stesa. Come detto, infatti, scopo dell'additivo deve essere quello di ridurre la viscosità del bitume nel campo delle temperature di applicazione e non di uso.

Il maggiore peso molecolare delle paraffine FT le rende più vicine all'intervallo medio dei PM (pesi molecolari) dei componenti del bitume, inferiormente però al PM degli asfalti, la frazione più pesante (Fig. 1, Fig. 2).

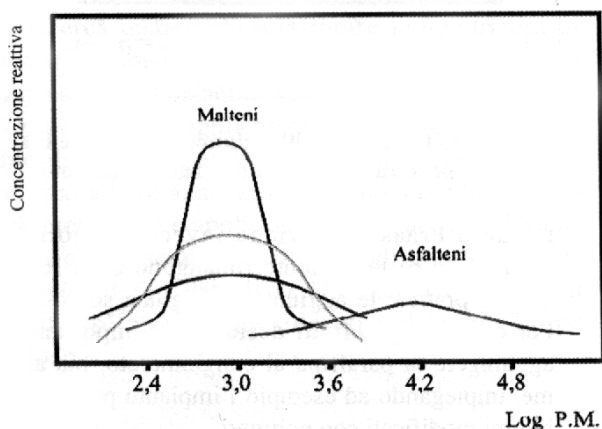


Fig. 1 - Distribuzione tipica dei pesi molecolari (P.M.) dei componenti del bitume

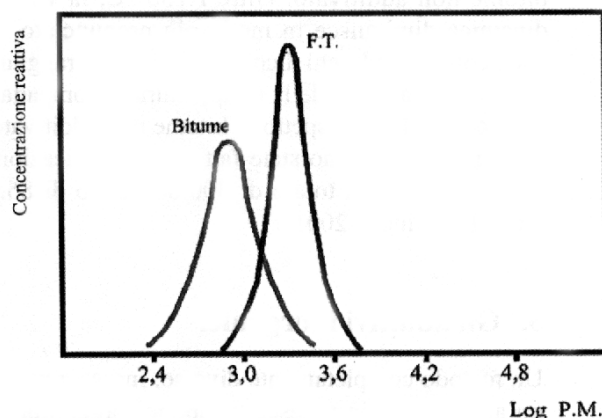


Fig. 2 - Distribuzione tipica dei pesi molecolari (P.M.) delle paraffine da bitume e da F.T.

Dato il loro bassissimo valore di penetrazione (Tab. 1), le paraffine FT aumentano la consistenza del bitume in esercizio, quindi la sua resistenza all'ormaiamento (maggiore temperatura di rammollimento, vedi prova P&A, CNR B.U. 35/73), la loro aggiunta comporta inoltre l'abbassamento della temperatura di miscelazione a 100 °C; se invece aggiungessimo cere paraffiniche del bitume, o del petrolio peggio ancora, ci sarebbero enormi problemi di perdita di consistenza del bitume (trasudazione) anche alle medie temperature, perché verrebbe diminuita la temperatura di rammollimento, e le strade diverrebbero completamente lisce!

/	Cere da bitume	Cere F.T.
Punto di fusione (°C)	70	100
Penetrazione a 25 °C, (0,1mm)	120	<1
Peso molecolare medio (g/mole)	800	1600
n-paraffine (%)	14	73

Tab. 1. Differenze tra le cere paraffiniche del bitume e le cere Fischer-Tropsch.

La formazione del conglomerato bituminoso a 100 °C è possibile grazie alla fusione a quella temperatura delle cere FT, e dalle cere di bitume contenute per un massimo del 2.5%, già fuse alla temperatura P&A del bitume usato.

Il punto Fraass non viene invece sensibilmente influenzato se le aggiunte rimangono al di sotto del 4%. In pratica le aggiunte consigliate sono del 3%.

Per ottenere gli effetti desiderati è importante non aggiungere la paraffina al conglomerato, come additivo, ma al bitume, impiegando ad esempio l'impianto per produrre i bitumi modificati con polimeri. Le cere FT si configurano quindi più come modificanti che come additivi.

Riguardo ai risultati pratici raggiungibili, se si aggiunge il 3% in peso a un bitume 70/100, a 100 °C si ottengono le stesse viscosità che si hanno a 110 °C con il bitume non additivato con cere FT. Oltre i 130 °C, la viscosità dinamica diminuisce in modo più pronunciato, così che i colleghi tedeschi dichiarano possibile raggiungere un abbassamento della temperatura di compattazione (la compattazione deve avvenire appena steso il manto) anche di 40 °C rispetto al bitume non additivato.

A partire dal 1998 sono state fatte varie applicazioni in Germania, per un totale di 300.000 m<sup>2</sup> o di 85.000 tonnellate, fino al 2001.

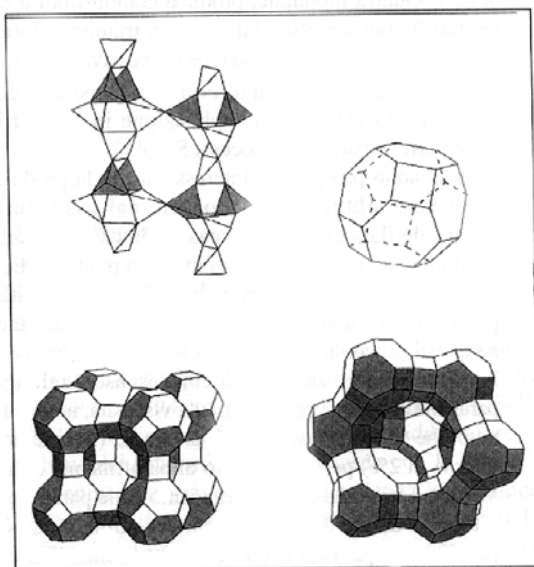
- **GLI ADDITIVI INORGANICI: ZEOLITI NATURALI ED ARTIFICIALI.**

Un metodo completamente diverso, messo a punto da un'altra industria tedesca, propone l'aggiunta dello 0.3% di un additivo solido (zeolite) al conglomerato, per ridurre la temperatura di stesa anche di 30 °C.

Le zeoliti sono silico-alluminati cristallini e di uno o più metalli alcalini o alcalino-terrosi (in genere sodio e calcio, talvolta potassio, bario e stronzio), ben noti ai chimici che si occupano di catalisi e di adsorbimento. Ora prodotte sinteticamente, le zeoliti sono presenti anche in natura in materiali di origine vulcanica e plutonica; il nome deriva dalle parole greche vapore e pietra e indica le proprietà di questi materiali di sviluppare vapore se riscaldati. Hanno composizione chimica simile a quella dei feldspati, ma con reticolo strutturale più aperto, contenente larghe cavità, nei quali i cationi si trovano debolmente legati e perciò possono essere facilmente scambiati con altri ioni.

Le zeoliti, infatti, sono in grado di intrappolare l'acqua nei loro microscopici canalicoli (Fig. 4) e di liberarla in parte, se riscaldate, senza alterazioni del reticolo. Possono essere ottenute anche per via sintetica mediante fusione di sabbia, feldspato, caolino e soda; queste ultime, denominate anche *permutiti*, hanno le medesime proprietà di scambio e di assorbimento di quelle naturali, ma in un grado fino a sei volte superiore.

Per la riduzione delle temperature di miscelazione del conglomerato nell'intervallo di temperature da 100 °C a 200 °C è stato selezionato un particolare tipo di zeolite.



**Fig. 4 – Tipiche strutture delle zeoliti**

Per la preparazione del conglomerato può essere impiegato qualsiasi tipo di legante, modificato e/o additivato o normale, e gli aggregati tradizionali. Sperimentazioni con aggregati innovativi e zeoliti non sono ancora state condotte, quindi nulla si può dire circa il loro utilizzo congiunto. L'aggiunta non interferisce con le prestazioni dell'impianto di miscelazione: si può usare la stessa procedura adottata per l'aggiunta delle fibre.

La riduzione di viscosità della miscela, che a sua volta permette la riduzione della temperatura di miscelazione, deriva dalla produzione, da parte della zeolite, di vapore d'acqua. La zeolite viene aggiunta agli inerti preriscaldati, insieme al bitume; il vapore che immediatamente si libera dalla zeolite produce un effetto espansivo (un po' come nel caso del bitume cosiddetto "schiumato"). La micro-schiuma crea a sua volta una micro-porosità nel bitume che aumenta la lavorabilità della miscela. E' importante che la zeolite possa perdere il suo contenuto di acqua in più fasi e non in una sola. La compattazione sembra possibile fino ad una temperatura minima di circa 100 °C; l'adesione tra inerte e bitume non è influenzata.

Come per l'aggiunta della paraffina FT, la possibilità di lavorare a minori temperature riduce l'emissione di fumi, di particolato e di CO<sub>2</sub>. Nel caso delle zeoliti viene dichiarata anche una significativa riduzione degli odori e una minor alterazione ossidativa del bitume, di conseguenza una maggiore resistenza all'invecchiamento.

La pavimentazione parte da un livello di ossidazione minore, in quanto a seguito del minore riscaldamento il bitume risulta più ricco della sua frazione leggera, gli aromatici; un manto così realizzato risulterà sempre, a parità di condizioni, più elastico di uno steso a normale temperatura., quindi meno fragile.

La perdita per riscaldamento in stoccaggio (CNR B.U. 50/76) e per riscaldamento in strato sottile (CNR B.U. 54/76) di un bitume con additivi "fluidificanti" è uguale, a meno delle variazioni normali consentite da provino a provino (ripetibilità e riproducibilità), o maggiore, a quella di un bitume tradizionale, sicuramente mai minore. La volatilità minore è sul campo che si riscontra, non in laboratorio, in quanto il legante viene scaldato di meno grazie alla perdita di consistenza maggiore causata dalla fusione a una temperatura più bassa prevista, degli additivi aggiunti.

- *IL METODO WAM.*

Un altro sistema proposto per la riduzione della temperatura è stato denominato WAM (*Warm Asphalt Mixture*), letteralmente conglomerato "tiepido".

Gli aggregati vengono dapprima miscelati con bitume soffice (ad alta penetrazione) in modo che la temperatura di miscelazione  $T_m$  sia minore e successivamente con un bitume a bassa penetrazione, così da avere un prodotto finale con la penetrazione voluta. Il componente più "duro" è aggiunto sotto forma di schiuma, o di emulsione, in modo che  $T_m$  non vari, l'ulteriore apporto è sostanzialmente a freddo. Le temperature di miscelazione e di stesa variano da 100 °C a 120 °C.

Lo sviluppo del processo WAM è iniziato nel 1995, impiegando una emulsione per l'introduzione del bitume a più bassa penetrazione; successivamente la preferenza è andata all'uso della schiuma. Dal 1999 al 2002 sono state applicate 28.000 tonnellate, con risultati dichiarati confrontabili con quelli ottenuti impiegando il conglomerato classico a caldo. Viene dichiarata una decisa riduzione di fumi, polveri e CO<sub>2</sub>, nonché di energia.

Per permettere la produzione del conglomerato WAM-*Foam* (schiumato) occorre un investimento aggiuntivo di circa 25.000 € per le modifiche all'impianto tradizionale, aspetto questo che scoraggia il suo utilizzo.

Al momento esistono due impianti in Norvegia.

### Conclusioni

La ricerca tendente a migliorare le condizioni di lavoro e ambientali sta seguendo varie strade. Una di queste consiste nella riduzione della temperatura di produzione e applicazione del conglomerato, al fine di ridurre l'emissione di fumi.

Le ricerche intraprese 8-10 anni fa cominciano a produrre risultati interessanti e applicazioni sperimentali. Per una diffusione generalizzata dei metodi proposti occorrerà attendere i dati di verifica circa l'assenza di effetti collaterali indesiderati nel medio-lungo periodo.



### (3.e) POLVERE E GRANULATO DI PNEUMATICI USATI

Con il passare del tempo, tutti i materiali presi dalla natura, come l'acqua, i combustibili fossili, la sabbia, la ghiaia e anche il caucciù, vengono reimmessi nell'ambiente in una forma chimicamente e fisicamente modificata (emissioni gassose, immissioni liquide, rifiuti). Il riciclaggio dei rifiuti si impone quando nel complesso è più vantaggioso per l'ambiente rispetto allo smaltimento o alla fabbricazione di nuovi prodotti. Per quanto concerne i vecchi pneumatici, si attribuisce particolare importanza a quei procedimenti che consentono un riciclaggio materiale diretto. Per determinarne l'impatto ambientale ci si fonda sugli additivi (agenti inquinanti) contenuti nei pneumatici (zinco, zolfo, piombo) che possono compromettere l'ecocompatibilità dei prodotti del riciclaggio. In quest'ottica, è auspicabile che a titolo di prevenzione i fabbricanti riducano al minimo il tenore di queste sostanze nei loro prodotti, evitando così conseguenze controproducenti per l'ambiente al momento del ricupero. I sistemi di riciclaggio che funzionano bene (per esempio per i conglomerati bituminosi) non devono essere messi in pericolo dall'uso di farina di gomma proveniente dal ricupero dei pneumatici usati. Pertanto, i prodotti contenenti gomma riciclata dovrebbero poter essere identificati e separati facilmente dagli altri rifiuti destinati al ricupero.

È praticamente impossibile separare a posteriori i composti secondo le singole componenti per riciclarle miratamente o smaltirle in altro modo. Dal punto di vista ecologico, il riciclaggio dei pneumatici usati nei composti non è pertanto vantaggioso.

Considerato che l'impiego di pneumatici usati in ambiti riservati ai materiali di origine minerale ne rende più difficile lo smaltimento, bisognerebbe rinunciare al granulato di pneumatici usati per il calcestruzzo, i mattoni, le pavimentazioni stradali ecc. Farebbero eccezione solamente casi speciali dettati da necessità tecniche.

La ricerca in ambito stradale considerando queste premesse sta cercando di valutare l'opportunità di impiegare vantaggiosamente la polvere di pneumatici usati ed il granulato di pneumatici, esaminandone sia le prestazioni sia le possibilità di riciclaggio di una pavimentazione realizzata con tale additivo "innovativo".

#### ✓ *Polvere di pneumatici (polverino)*

La polvere di pneumatici viene usata soprattutto per la fabbricazione di nuove miscele di gomma e pneumatici nuovi. Diversi fabbricanti aggiungono già oggi fino al 2% di polvere per la fabbricazione di pneumatici nuovi. Si stanno attualmente testando miscele con un tenore fino al 20%. Nella costruzione di strade, viene impiegata per la realizzazione di rivestimenti chiusi silenzianti, una polvere di pneumatici speciale con un tenore massimo del 2% della miscela; la fonoassorbente deriva dal fatto che il polverino con funzione anche di fillerizzante per il bitume attenua il contatto diretto "pietra su pietra" degli aggregati nel conglomerato. La polvere viene inoltre usata in campo edile per gli adesivi di latex e quale additivo per le guarnizioni. Per queste ultime tre applicazioni esistono di solito specificazioni che pongono severi limiti per la qualità della polvere di pneumatici.

#### ✓ *Granulato di pneumatici*

I pneumatici vecchi possono essere usati come granulato, per il rivestimento in gomma nella posa di binari al fine di ridurre le emissioni foniche. In questo caso, occorre badare a non mescolare la gomma con la massiccata (ballast) o i materiali edili di origine minerale, in modo da facilitarne la separazione al momento dello smantellamento e garantendone così lo smaltimento nel rispetto dell'ambiente; il granulato, in ambito ferroviario, viene perciò impiegato per la realizzazione del sottoballast o (sub-ballast) nelle linee ad alta velocità A.V. (A.C.), in conglomerato bituminoso dello spessore di 20 cm massimo, contribuendo al miglioramento della stabilità strutturale della piattaforma mantenendo inalterata la geometria del binario, diminuendo le vibrazioni, aumentando il comfort di viaggio.

Tale prodotto è impiegato anche, assieme agli inerti lapidei, per la realizzazione dello strato di base e/o strati superficiali di nuovi conglomerati bituminosi antivibranti. Non sempre è stato possibile rintracciare un filo comune tra le risultanze delle diverse esperienze di ricerca sul suo uso in ambito stradale, anzi, data anche la loro estrema varietà, queste si sono rivelate, talvolta, contraddittorie. E' da sottolineare che esse sono orientate, in generale, alla conferma delle attese sul miglioramento delle prestazioni offerte dai conglomerati confezionati con gomma, soprattutto in termini di resistenza all'indurimento per ossidazione, alla fessurazione di origine termica, di resistenza a fatica ed all'ormaiamento. L'introduzione del granulato di gomma nelle miscele bituminose

avviene secondo una classica tecnica con due possibili processi differenti, chiamati “Wet Process” e “Dry Process”. Il granulato può inoltre essere usato per la costruzione dei parapalle negli stand di tiro.

#### Generalità e note storiche

La storia dell’impiego di granuli di gomma riciclata da pneumatici fuoriusciti in tecnica stradale può farsi risalire al 1940, se non addirittura prima (Re Giorgio IV, nel 1823, aveva concesso un brevetto per l’applicazione della gomma naturale nelle costruzioni stradali), quando negli Stati Uniti fu incominciata ad essere commercializzata.

Le prime applicazioni sistematiche di questo tipo si devono, intorno al 1960, a Charles MacDonald il quale, grazie ad una intuizione scaturita da una occasione del tutto fortuita, sperimentò sulle strade di Phoenix, in Arizona, i benefici apportati dalla gomma come modificante aggiunto a caldo nel bitume nella riparazione di buche. Nel 1989 fu messo a punto da Scopfield il Processo Wet.

Dall’altra parte dell’Oceano, più precisamente in Svezia, sempre negli anni ’60, due compagnie svedesi cominciarono a produrre un tipo di miscela stradale per strati superficiali, capace di resistere alle azioni aggressive esercitate dai pneumatici chiodati e dalle catene da neve. La tecnica che qui si andava delineando è oggi nota come Processo Dry. Nel 1991, il Congresso degli Stati Uniti d’America rendeva obbligatorio l’uso della gomma da riciclo di pneumatici nell’ambito dei progetti di costruzioni stradali finanziati dagli Stati Federali, imponendo l’uso e lo studio del CRM (*Crumb-Rubber Modifier*, vedi paragrafo seguente) da parte delle Highway Agencies.

#### Procedimenti a confronto: Processo Wet, Processo Dry

Come già detto il granulato di gomma può essere introdotto nelle miscele bituminose con due distinti processi: Processo Wet e Processo Dry. Nel primo la gomma ed il bitume vengono fatti reagire insieme (la gomma rappresenta di solito il 18÷26% in peso rispetto al bitume) a temperature elevate, in modo che il legante ottenuto, noto come AR (*Asphalt-Rubber*), risulti idoneo al confezionamento di conglomerati bituminosi stradali.



Il ciclo di produzione dell’Asphalt-Rubber (AR)

Fonte: “Rubberized Asphalt Concrete Technology Center”.

Diversamente dal Processo Wet, dove la gomma finisce per far parte del legante, il Processo Dry prevede che il granulato di gomma venga aggiunto all’aggregato lapideo (tale aggiunta, in realtà, avviene in sostituzione di un pari volume di inerte lapideo, di stessa granulometria, generalmente nel campo della sabbia) prima della miscelazione col bitume. Così facendo la gomma introdotta agisce sia da inerte che da legante in quanto, durante la fase di miscelazione, essa reagisce, anche se solo parzialmente, con il bitume.

Nel Processo Wet quindi il granulato si configura come agente modificante, mentre nel Processo Dry più come additivo, anche se non totalmente. Il granulato di gomma da riciclo di pneumatici viene comunemente indicato come CRM (*Crumb-Rubber Modifier*) intendendo anche la tecnologia comprendente un insieme di procedimenti per il suo impiego in tecnica stradale: il CRM è definito come “agente modificante” dato che la sua introduzione, quale che sia il procedimento seguito, modifica i tradizionali prodotti bituminosi destinati alle pavimentazioni stradali.

I due processi prima definiti portano a prodotti differenti: quando il CRM viene unito al bitume, a seguito della reazione tra i componenti si forma un legante modificato (AR) che, introdotto in una miscela di conglomerato

bituminoso a caldo HMA, origina il cosiddetto HMRA (*Hot Mix Rubber Asphalt*). Altre possibili applicazioni del Processo Wet si hanno, inoltre, nel campo dei trattamenti superficiali, delle membrane (SAM e SAMI) e delle sigillature delle fessure.

Il Processo Dry, invece, si presta al solo ottenimento di HMA con parte dell'aggregato sostituito dal granulato di gomma, cosiddetto RUMAC (*Rubber Modified Asphalt Concrete*). I due processi differiscono, ovviamente, non solo per i prodotti ottenuti, ma anche per la quantità e la granulometria della gomma impiegata, nonché per le attrezzature necessarie ad effettuare la produzione in impianto.

Nelle miscele di tipo RUMAC, il granulato di gomma introdotto rappresenta dal 2.5% al 5% in peso dell'aggregato (costituente minimo il 90% del conglomerato), da qui la considerazione che il Processo Dry è in grado di riciclare da due a quattro volte il quantitativo di gomma impiegabile nel Processo Wet, dove si utilizza massimo il 26% di gomma in peso rispetto al bitume (la percentuale di bitume in peso, sul peso dell'inerte è massimo consigliata 6.5% per una miscela).

Inoltre, la necessità di far reagire insieme il bitume e la gomma (si tratta di granuli con dimensioni inferiori a quelle consentite nel Processo Dry, generalmente comprese tra  $75 \mu\text{m}$  ed 1 mm, polverino di gomma quindi) finché la miscela ottenuta manifesti il raggiungimento d'una condizione di viscosità stabile, comporta per il Processo Wet il bisogno di equipaggiamenti specifici (per la miscelazione e per la reazione ad elevate temperature) mai necessari, invece, per il Processo Dry.

Ne deriva, quindi, che il Processo Dry è più facile da effettuare, mentre il Processo Wet offre il vantaggio di governare più attentamente le proprietà del legante. Vi sono numerose formulazioni di miscele brevettate realizzate con il Processo Dry, la più famosa delle quali è commercializzata sotto il nome di PlusRide® negli Stati Uniti e come Rubit® in Europa; quest'ultima è stata messa a punto grazie ad una ampia sperimentazione di campo condotta in Alaska ed in altri stati degli USA, durata più di un lustro, dal 1979 al 1985. Nella miscela bituminosa si prevede l'introduzione di gomma triturrata da pneumatici fuori uso, nella fase di miscelazione in sostituzione di una frazione granulometrica dell'ossatura litica, in quantità variabili tra l'1 ed il 3% sul peso totale del conglomerato. La gomma triturrata consiste in particelle di gomma di dimensioni granulometriche variabili da 4.2 mm fino a 2 mm. La percentuale di vuoti di progetto dei conglomerati da realizzarsi è, in questo caso, fissata tra il 2 ed il 4% (manti chiusi) ed è solitamente ottenuta con un tenore di bitume nella miscela variabile nell'intervallo tra il 7.5 ed il 9%.

L'argomento in discussione, in realtà, è di gran lunga più complesso rispetto a quanto fin qui esaminato, data l'estrema variabilità dei risultati conseguiti con entrambi i processi da diversi Autori. La letteratura riferisce, infatti, in maniera a volte addirittura contrastante sugli esiti dell'impiego di conglomerati ottenuti con i due metodi.

Le sperimentazioni sin qui eseguite sono state condotte prevalentemente all'estero, in Australia, Stati Uniti (Alaska, California, Florida, Minnesota, New York State, Oregon, Texas, Arizona, British Columbia), Republic of South Africa. Da qui è discesa la necessità di un esame critico delle conoscenze attuali, che riguardi i punti salienti dell'impiego del CRM in tecnica stradale, come passo obbligato dello studio di laboratorio e di campo attualmente in corso presso il Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie (DIIV) di Palermo, ricerca cofinanziata dal MIUR (PRIN 2001) ed intitolata "Tecniche innovative per pavimentazioni stradali con impiego di scarti di pneumatici usati". Studi su tale tema sono stati anche affrontati dal DCT dell'U. d. S. di Padova.

Il granulato di gomma può essere ottenuto tramite processo criogenico, sconsigliabile perché produce granuli lisci, o tramite macinazione a temperatura ambiente per mezzo di lame e coltelli rotanti, preferibile perché fornisce particelle con superfici irregolari, porose ( $\gamma_G \cong 300 \text{ kg/m}^3$ ), e di gran lunga maggiori a pari dimensione nominale dei granuli ottenuti con il primo procedimento. Il granulato si presenta con granulometria variabile da 0.5 a 5 mm, e dovrebbe essere costituito almeno per il 30% da gomma naturale (preferibili pneumatici di autocarro, tuttavia lo sviluppo delle gomme sintetiche ha portato a identiche prestazioni).

La posa in opera del conglomerato ottenuto sia dal processo Dry che dal Processo Wet, avviene con macchine ed attrezzature classiche da cantiere stradale.

#### Rassegna dei risultati ottenuti con il Processo Dry

- Maggiore flessibilità e resistenza a fatica della pavimentazione soprattutto alle basse deformazioni e temperature non elevate;
- Resistenza alla fessurazione specie alle basse temperature (rottura fragile);
- Il modulo resiliente (resistenza alla rottura fragile) aumenta al diminuire della granulometria dei granuli;
- Maggiore deformabilità a compressione in prove di creep statico rispetto le miscele tradizionali, all'aumentare del tempo di carico e della temperatura (simulazione pavimentazione sotto carichi lenti o veicoli fermi);
- In prove di creep dinamico (carichi ciclici), pendenza della retta di deformazione minore rispetto quella di miscele tradizionali, maggiore plasticità ossia elevate deformazioni che il manto tollera senza rotture;
- Maggiore intervallo di elastoplasticità;
- Inadeguatezza della prova Marshall per mix design di miscele Dry, utilizzare il protocollo Superpave;
- Migliore tenuta all'acqua, che deriva dall'effetto benefico giocato nella miscela dagli additivi della gomma (composti dello zinco che, si suppone, promuovono una migliore adesione del legante con l'aggregato);
- Minore tendenza all'invecchiamento per ossidazione, grazie alla presenza degli antiossidanti contenuti nella gomma;
- Si ha una certa riduzione del rumore prodotto dai pneumatici dei veicoli in transito;
- Anche senza l'uso di sali antighiaccio si ha una notevole riduzione delle distanze di arresto, eliminazione del ghiaccio dal manto più velocemente (DOT, Department of Transportation, Alaska);
- Resistenza all'ormaiamento maggiore rispetto a conglomerati di bitume modificato (confronto delle prestazioni fornite da granulato e polimeri PBD, EVA, SBS);
- Tempi di miscelazione col bitume brevi che non consentono la "digestione" completa dei granuli da parte del legante (assorbimento della gomma degli oli aromatici del bitume), basso grado di modifica, granuli come aggregati prevalentemente;
- Consigliabile l'utilizzo di bitumi molli (ad elevata penetrazione) in quanto parte degli aromatici del bitume vengono assorbiti dai granuli e si ha una ossidazione iniziale maggiorata del legante idrocarburico, rispetto un conglomerato tradizionale, con pericolo di infragilimento;
- Scarso supporto tecnico di chi commercializza tale tecnologia;
- Grande eco-efficienza, riciclaggio di pneumatici altamente dannosi per l'ambiente se inviati in discarica;
- Prestazioni che in genere non giustificano gli accresciuti costi di produzione;
- Riduzione del problema della colatura del bitume dagli aggregati alla massima temperatura di esercizio, nonostante il suo contenuto sia più elevato rispetto ad una miscela tradizionale, grazie all'assorbimento da parte del granulato del legante idrocarburico stesso;
- Miscela più suscettibili ad eventuali problemi di costipamento;
- Sperimentazioni americane su tratti stradali studio con risultati fortemente negativi (vedi ricerche di campo Oregon State DOT, Texas DOT, CALTRANS, Minnesota DOT, New York State DOT).
- Problemi non indifferenti di formazione di buche;

#### Rassegna dei risultati ottenuti con il Processo Wet

- Presentano il più favorevole rapporto benefici/costi, in relazione alla maggiore efficienza e durata in servizio delle pavimentazioni realizzate;
- Reazione di assorbimento degli oli aromatici presenti nel bitume, all'interno delle catene polimeriche che costituiscono i componenti principali della gomma, naturale e sintetica, contenuta nel CRM: è bene usare bitumi molli o aggiungere aromatici che favoriscono il rigonfiamento del granulato di gomma, per controllare l'ossidazione iniziale del legante;
- L'aggiunta in miscela di oli aromatici (4% sul peso totale del conglomerato) o di oli inerti (in alternativa usare bitumi molli), contribuisce a migliorare la vita a fatica di miscele Wet;
- Più elevato contenuto di legante (8÷10%) per il confezionamento della miscela Wet, rispetto una tradizionale (3.5÷6.5% sul peso degli aggregati);



- Tempi di reazione bitume-granulato modificante, da almeno 45' a circa 2 h, per produrre un legante modificato, a viscosità stabile, idoneo al confezionamento di HMRA, alla temperatura di reazione  $170 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 215 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Al fine di diminuire il tempo di reazione (grado di reazione maggiore) si consiglia l'utilizzo di granuli con elevata superficie specifica (porosi e/o di piccole dimensioni), sforzi di taglio imposti dalla miscelazione meccanica non inferiori a 500 rpm (giri al minuto primo), alta temperatura di reazione;
- I migliori risultati si ottengono quando il legante modificato PMB bitume-gomma (AR), viene impiegato per il confezionamento del conglomerato il più presto possibile, a meno di 16 ore a partire dalla sua preparazione; I leganti bitume-gomma non utilizzati immediatamente devono essere raffreddati per poi essere riscaldati prima dell'uso;
- L'introduzione del CRM con Processo Wet comporta la formazione di pellicole di legante di rivestimento dei grani più spesse, con conseguenti miglioramenti della durabilità (aumento della resistenza allo spogliamento degli inerti) e della resistenza alla fessurazione di riflesso;
- Prove di modulo complesso (creep dinamico) su conglomerati con legante AR (da Processo Wet) hanno dimostrato che alle alte temperature tali miscele presentano un modulo complesso più elevato rispetto le tradizionali, invece, valori del modulo inferiori alle basse temperature, quindi migliore flessibilità della miscela (Kaloush, ricercatore Arizona DOT, 2003);
- Grado di ormaiamento inferiore rispetto le miscele di bitume modificato con polimeri (PBD, EVA, SBS) o con bitume multigrado;
- Rispetto un classico bitume per uso stradale il legante AR ha Punto Fraass notevolmente inferiore, e alla temperatura di  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  presenta una viscosità ben maggiore (sino a 400 volte);
- Grande resistenza all'accumulo di deformazione permanente per fluage alle alte temperature di esercizio ed elevata elasticità alle basse;
- La possibilità di ridurre gli spessori degli strati di usura (*Friction Course*) realizzati con legante AR, rispetto al caso di impiego di conglomerati bituminosi tradizionali (in British Columbia, lo spessore realizzato con le miscele AR è stato diminuito a 38 mm (HMRA *Gap Graded*) rispetto ai 50 mm del caso classico (DACE, *Asphalt Concrete Dense Graded*);
- Possibilità di impiegare metodi classici di mix design, come il metodo Marshall;
- Migliore lavorabilità delle miscele;
- Possibilità di raggiungere per miscele AR, la compattezza richiesta con un numero di passaggi di rulli inferiore a quello altrimenti occorrente per i conglomerati bituminosi di riferimento, ovvero il fatto che la compattazione possa avvenire a temperature inferiori a quelle necessarie per il caso tradizionale, impiegando comuni rulli gommati (legante AR Rub-Arb™, 15÷30% di gomma triturata in peso sul bitume, tratte sperimentali British Columbia DOT, 1995);
- Accresciuta resistenza all'azione aggressiva degli pneumatici chiodati o con catene da neve;
- L'impiego più promettente del CRM si ha nelle miscele bituminose chiuse confezionate a caldo a granulometria discontinua (ARHM-GG), per le quali si sono stabiliti dei fattori di equivalenza degli spessori e si ottiene una attenuazione dei fenomeni di "splash and spray" in caso di pioggia (California e Sud Africa; in California le pavimentazioni sono progettate per una vita utile di servizio di 10 anni);
- Miscela AR con scarso o nullo miglioramento nel ritardo della fessurazione trasversale di origine termica, effetto benefico invece relativamente alla risalita delle fessure dalla vecchia pavimentazione sottostante;
- Grado di irrigidimento per ossidazione manto ARHM-GG minore di quello di un manto DACE, a pari spessore, quindi deflessioni sopportabili senza fessurarsi apprezzabilmente più elevate;
- Incremento della visibilità in condizioni diurne e notturne, dovuto al maggior contrasto della pavimentazione con l'ambiente circostante urbano;
- Riduzione del rumore di rotolamento grazie anche alla possibile tessitura più aperta del manto;
- Il risparmio dei costi di manutenzione e la salvaguardia di risorse energetiche e naturali, grazie all'uso produttivo e alla valorizzazione di prodotti di scarto;
- Elevati costi unitari di costruzione, mitigati dalla riduzione degli spessori, per questo l'ottenimento di un favorevole rapporto benefici/costi porta a realizzare con AR solo gli strati superficiali;
- Eccessiva variabilità nel passato dei risultati conseguiti;

- Impiego delle miscele aperte (OGFC, *Open Graded Friction Course*) prescritto per tutte le infrastrutture viarie di tipo Multilane (a più di una corsia), con velocità di progetto non inferiori a 75 km/h; miscele chiuse (DGFC, *Dense Graded Friction Course*) per strade urbane; contenuti tipici di legante come percentuale del peso totale della miscela pari a 7.1% e 6.5% rispettivamente per OGFC e DGFC; per questi ultimi la stabilità Marshall minima è 670 kg ( $\approx 1500$  lb), mentre per lo scorrimento si ammettono valori compresi nell'intervallo 2.00÷3.50 mm; Creep dinamico min 10 MPa,  $R_{\text{trazione indiretta}}$  min 0.55 MPa,  $N_{\text{max}} = 208$  alla pressa giratoria (metodologia SHRP) (Roberts et al., Florida, 1989);
- Percentuale di vuoti lasciati liberi dallo scheletro minerale (VMA), valore minimo imposto 15.5%; percentuale di vuoti d'aria nella miscela, ammessa variabile tra il 4 e il 6%, ed il contenuto effettivo di bitume minimo posto pari al 5.5%;
- Valori della vita di servizio calcolati delle pavimentazioni con legante AR di 23 anni, elevata capacità strutturale residua;
- Impiego ottimale nei casi di strade a elevato traffico, su manti già degradati e dove la posa dello strato in AR possa significativamente ridurre la necessità di interventi di manutenzione su strade fortemente congestionate (per la possibilità di ridurre i disagi apportati alla mobilità nel caso di chiusure parziali della sezione trattata);
- Miglioramento del Performance Grade (PG) con riferimento ad entrambi gli estremi dell'intervallo, così come definito nel protocollo Superpave; in generale, tempi di reazione più elevati comportano un minor incremento del PG del legante, pur mantenendo gli effetti benefici della gomma sulla resistenza all'ossidazione ed all'indurimento (grazie agli agenti antiossidanti presenti nella gomma triturrata) (TxDOT-Texas DOT, e TTI-Texas Transportation Institute)

### Conclusioni

I giudizi più negativi, avuti soprattutto per il Processo Dry, sono tuttavia forniti dagli studi più datati e, comunque, da coloro che, per la valutazione delle prestazioni offerte da questi materiali innovativi, si sono avvalsi di prove statiche (Marshall e Trazione Indiretta, la maggior parte) che caratterizzano il materiale sulla sola base del comportamento a rottura in condizioni di sollecitazione ben diverse da quelle che si hanno in opera, sotto i carichi viaggianti.

Diversamente da quanto osservato per il Processo Dry, l'adozione del Processo Wet ha raccolto, negli anni e praticamente in tutto il mondo una significativa uniformità di giudizi positivi, come evidenziato dal lungo elenco delle considerazioni che sono state singolarmente riferite per ogni paese che ha sperimentato tale tecnica, lasciando intravedere futuri ed ancora indispensabili sviluppi della ricerca a riguardo.

#### • PAVIMENTAZIONI ANTIVIBRANTI.

Le vibrazioni generate dal traffico stradale costituiscono un problema diffuso in molte città, soprattutto nei centri storici, per gli effetti a lungo termine che si possono avere sugli edifici e sulle persone.

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

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

I metodi di mitigazione presi in esame, oltre all'additivazione della miscela con granulato di pneumatici (intervento "morbido"), sono rappresentati anche da modifiche strutturali della pavimentazione o da inserimento di elementi di schermatura adiacenti ad essa:

- Irrigidimento della pavimentazione tramite sostituzione dell'intero strato in conglomerato bituminoso con uno strato in conglomerato cementizio (pavimentazioni rigide);
- Irrigidimento della pavimentazione tramite sostituzione dello strato in stabilizzato granulometrico (misto granulare di fondazione) con un strato di materiale legato a cemento (il riciclaggio a freddo con bitume

- schiumato o emulsione bituminosa, e cemento, consente di ottenere questa soluzione, la pavimentazione è tuttavia ancora definibile come flessibile);
- Miglioramento delle caratteristiche del terreno di sottofondo (stabilizzazione meccanica, granulometrica, con leganti);
  - Inserimento di una trincea in conglomerato cementizio a fianco della pavimentazione.

Dagli interventi proposti risulta evidente che anche le pavimentazioni semirigide (strato di base in misto cementato) e ancor di più le pavimentazioni composite polifunzionali (PCP, lastra in c.a. ad armatura strutturale continua al posto di binder e base) si propongono come valide soluzioni attenuanti le vibrazioni.

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

In seguito ad un'analisi parametrica volta alla valutazione dell'influenza del tipo di materiali impiegati e delle caratteristiche geometriche degli interventi si è verificato che l'uso di tali sistemi di attenuazione consente di ottenere riduzioni di velocità dell'onda tra il 50% e l'80%. In particolare, i risultati ottenuti con il *modello del semispazio libero* (rappresentante ad es. zone di campagna attraversate dall'infrastruttura stradale) permettono di sostenere che le sovrastrutture rigide e le barriere d'onda costituite da materiali con elevato modulo elastico consentono di ridurre le accelerazioni in maniera simile se ci si riferisce a punti posti ad una certa distanza (8-10 metri) dalla sorgente di disturbo.

Dallo studio di un *modello con struttura in elevazione adiacente* si è invece osservato che nonostante l'effetto positivo per entrambi gli interventi, l'irrigidimento della sovrastruttura riduce l'intensità del fenomeno vibratorio, mentre si conserva l'andamento del carico; le barriere invece agiscono soprattutto sull'andamento dell'oscillazione che va a smorzamento in modo più lineare. Complessivamente i risultati ribadiscono l'efficacia di queste tipologie di interventi al fine di schermare dalle vibrazioni zone particolarmente sensibili.



#### **(4) PRODOTTI COMPLEMENTARI INNOVATIVI**

##### **(4.a) RETI ELETTROSALDATE PER LE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI**

Il termine “rinforzo” implica un miglioramento nella capacità portante o strutturale ma, così come avviene per qualunque applicazione di un rinforzo, occorre che il materiale utilizzato sia caratterizzato da una rigidità superiore a quella dei materiali da rinforzare, cioè dei materiali bituminosi, cementizi, e lapidei non legati. Nella realtà, invece, molti dei cosiddetti prodotti di rinforzo sono caratterizzati da rigidità molto scarsa e non comportano direttamente alcun miglioramento strutturale: semplicemente impediscono alcuni processi di dissesto della pavimentazione, quali la propagazione della rottura (es. fibre di vetro, geotessili, geogriglie polimeriche) o la penetrazione dell'acqua all'interno della sovrastruttura stradale (es. membrane SAM/SAMI).

In molti paesi il deterioramento delle strade d'asfalto costituisce un problema crescente. Possiamo cercarne l'origine generalmente nell'incremento del traffico, del carico per asse o nell'impiego di pneumatici singoli maggiorati; ma le fessurazioni sono anche causate dalle sollecitazioni termiche. Le risorse per i lavori di manutenzione sono limitate e comunque non sufficienti a mantenere le strade in condizioni adeguate. C'è quindi molto da fare per trovare nuovi sistemi economici di intervento. Il progetto descritto si propone di sviluppare una nuova metodologia di costruzione e manutenzione stradale attraverso l'impiego di *conglomerati bituminosi rinforzati* con reti d'acciaio elettrosaldate. Il presente documento rappresenta il report tecnico finale del progetto comunitario EU REFLEX. La sigla REFLEX significa "Reinforcement of Flexible Road Structures with Steel Fabrics to Prolong Service Life" (Rinforzo di Strutture Stradali Flessibili con Reti d'acciaio per Prolungarne la Vita Utile).

Tale progetto rientra nell'ambito del quarto Programma Quadro dell'Unione Europea chiamato BRITE/EURAM III della DGXII. Il progetto REFLEX ha avuto una durata di tre anni e mezzo, da marzo 1999 ad agosto 2002, e si prefiggeva lo scopo di studiare i seguenti argomenti in relazione alla nuova tecnologia di rinforzo:

- Sviluppo del prodotto;
- Ricerca di base sul sistema composito;
- Test accelerati a scala reale;
- Studio dello stato di fatto delle strade esistenti;
- Elaborazione di test su strada;
- Modello teorico;
- Aspetti economici ed ecologici;
- Report finale consistente in un manuale per la diffusione della nuova tecnologia costruttiva.

##### *a) Obiettivi di REFLEX.*

Il progetto "Reinforcement of Flexible Road Structures with Steel Fabrics to Prolong Service Life" mira a:

- Approfondire la conoscenza del tipo di materiale e ottimizzare la geometria delle reti di acciaio;
- Valutare il rendimento delle strutture stradali con reti d'acciaio;
- Ottimizzare il design delle strutture stradali rinforzate.

Lo scopo principale del progetto REFLEX è l'elaborazione di una nuova tecnologia per la costruzione e la manutenzione stradale. L'idea è l'impiego di rinforzi con reti d'acciaio nelle pavimentazioni flessibili per ottimizzare i costi di costruzione delle strutture stradali allungando la vita di quelle nuove e sviluppando un metodo ottimale di manutenzione per quelle esistenti, economizzando quindi risorse naturali e consentendo un maggior contenimento dei costi per la collettività. Prima di avviare il progetto si è tenuto conto della seguente considerazione preliminare.

Rinforzando la costruzione stradale attraverso l'impiego di reti d'acciaio (Fig. 1) nello strato di asfalto (AC-Asphalt Concrete) o nello strato non legato sottostante (UGM-Unbound Granular Material), si possono ridurre i costi.

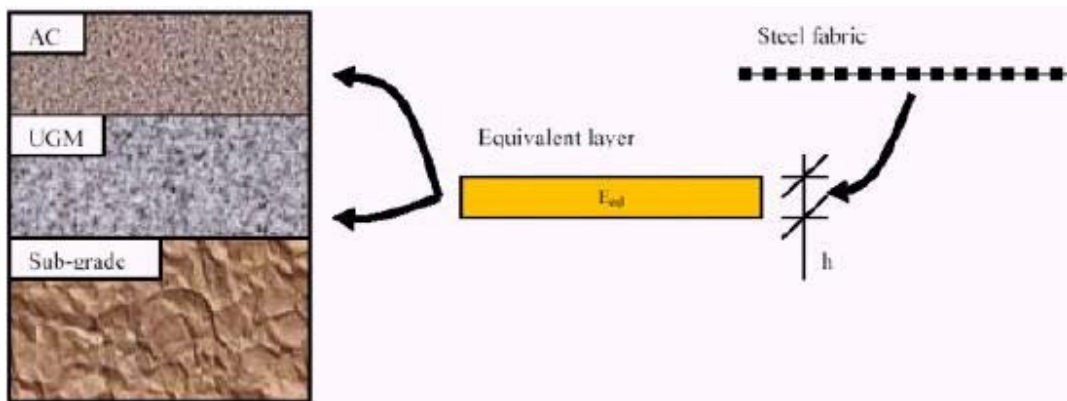


Fig. 1. Strato equivalente (rete) nella sezione stradale, come da modello teorico del multistrato elastico.

Infatti il costo totale della strada è costituito dai costi iniziali, che ovviamente comprendono anche quello aggiuntivo della rete compresa la messa in opera (che rappresentano solamente una percentuale limitata sullo stesso costo iniziale), sommati a quelli relativi agli interventi di manutenzione e risanamento durante la vita complessiva della strada.

I grafici riportati in fig. 2 rappresentano qualitativamente come si può pervenire alla riduzione della spesa totale. Le possibili alternative sono due: nella prima si ha un prolungamento di vita utile con un numero inferiore di interventi di riparazione, nella seconda a parità di vita utile si ha una riduzione dei costi di manutenzione complessivi perché si riduce il quantitativo di conglomerato impiegato o si limita l'intervento al solo strato di usura.



Fig. 2. Analisi benefici-costi metodologia REFLEX.

Ricerche condotte in Svezia e Finlandia hanno indicato che la pavimentazione flessibile rinforzata con reti d'acciaio rappresenta un metodo economicamente efficace per la prevenzione delle fessurazioni longitudinali causate dai cicli di gelo e disgelo. Ricerche effettuate in campo e in laboratorio hanno inoltre individuato altre possibili applicazioni del rinforzo per la realizzazione di strade con prestazioni finali migliori, quali:

- Incrementare la capacità portante;
- Aumentare la resistenza a fatica;
- Prevenire le deformazioni plastiche (ormaiamenti);
- Prevenire le fessurazioni riflesse;
- Prevenire i cedimenti dei bordi;
- Prevenire le fessurazioni che possono realizzarsi tra strade esistenti ed ampliamenti.

Il progetto si è sviluppato attraverso attività sperimentali, svolte sia in laboratorio sia in campo, ed attività teoriche. Di grande importanza è stata la costruzione di tratti stradali-test in Europa e la valutazione del loro rendimento; in particolare per l'Italia ne sono stati realizzati tre: il primo in un tronco dell'autostrada A 23 tra Udine e Palmanova, il secondo in una strada provinciale in località marina Salmastro vicino Grado (Udine), ed il terzo rappresentato dall'allargamento della terza corsia della tangenziale di Mestre.

I primi due tratti, a quattro anni dalla realizzazione, confrontati con i tratti normali di riferimento, presentano un comportamento decisamente migliore. In particolare nella strada realizzata in località Salmastro, un tratto della pavimentazione di riferimento realizzata senza l'utilizzo della rete ha già subito consistenti interventi di ripristino, mentre quella rinforzata è ancora in ottime condizioni.

Molte imprese europee specializzate nei lavori stradali sono state coinvolte, enti pubblici di ricerca soprattutto svedesi (VTI, Swedish National Road and Transport Research Institute), finlandesi (VTT.CI.IE, Technical Research Centre of Finland), e tedeschi, università (TUMUC.PBL, Technical University of Munich), gestori privati e pubblici di infrastrutture stradali (SNRA.RE, Swedish National Road Administration, FNRA.PC, Finnish National Road Administration).

Tra i partners del progetto vi è anche una impresa italiana specializzata nel settore degli acciai da costruzione e una importante società di gestione autostradale del nord-est del nostro paese (AUVE, Autovie Venete S.p.a).

#### *b) Soluzioni proposte da REFLEX.*

L'incremento del traffico e dei carichi per asse accelera il processo di deterioramento delle pavimentazioni stradali flessibili, causando molti disagi al traffico. Questo studio ha l'obiettivo di fornire una breve sintesi delle problematiche che possono essere totalmente o parzialmente risolte attraverso l'impiego di rinforzi con reti d'acciaio sia nelle nuove costruzioni che negli interventi di manutenzione.

I problemi che maggiormente si evidenziano sulla superficie stradale sono gli ormaiamenti e le fessurazioni: i primi sono provocati da usura o dal carico per ruota, le seconde da fatica dell'asfalto; spesso le fessurazioni compaiono a fianco o nelle ormaie. La forma degli ormaiamenti racconta ad un occhio esperto la natura del problema: un ormaiamento largo può indicare un problema negli strati più profondi della costruzione, un ormaiamento stretto invece un problema negli strati più superficiali.

L'interesse iniziale del progetto REFLEX è stato quello di analizzare in laboratorio gli effetti conseguenti all'inserimento delle reti elettrosaldate planari ( $\Phi_{\text{MIN}} = 6 \text{ mm}$ ,  $R_{\text{aMIN}} = 400 \text{ MPa}$  (Fe 430), maglia 75x75 mm o anche 100÷150 mm di lato) nelle pavimentazioni stradali, sia sulla capacità portante che sulle fessurazioni riflesse e di effettuare test accelerati in scala reale con un Heavy Vehicle Simulator, chiamato HVS-Nordic. Con questo strumento è stato possibile eseguire test accelerati per simulare il numero di applicazioni di carico che possono sopportare le strutture in condizioni controllate.

Questo speciale veicolo, unico in Europa, è in grado di far scorrere le ruote, sia singole sia gemellate, alla velocità di 12 km/h con un carico da 20 a 110 kN.

Successivamente si sono paragonati i risultati ottenuti per le strutture rinforzate con quelli di strutture convenzionali non rinforzate. Si sono effettuati tre test accelerati in scala reale: due in Svezia e uno in Finlandia (comprensivi delle prove su due sezioni diverse di reti d'acciaio e un test aggiuntivo senza reti quale riferimento). In tutti i tre test le pavimentazioni con reti d'acciaio hanno conseguito risultati migliori rispetto alle pavimentazioni di riferimento. In questo capitolo si presentano soluzioni e raccomandazioni che si basano sui risultati dei test di laboratorio, dei test HVS-Nordic, delle considerazioni teoriche e su esperienze pratiche.

Ricordiamo che l'espressione "longitudinale" significa seguire la direzione della strada e "trasversale" la direzione ortogonale. Descriviamo di seguito solamente i risultati ottenuti concernenti l'ormaiamento, rimandando al manuale pubblicato l'intero studio.

#### *b.1) ORMAIAMENTO*

L'ormaiamento è dovuto all'usura o al carico per ruota. In questa trattazione non ci si sofferma sull'ormaiamento dovuto ad usura con pneumatici chiodati.

L'ormaiamento causato da carichi del traffico si suddivide in:

- 1) Ormaiamento per flusso di materiali negli strati di asfalto (AC);
- 2) Ormaiamento degli strati non legati (UGM), quali fondazioni e sottofondazioni.

✓ *Ormaiamento per flusso di materiali negli strati AC.*

L'ormaiamento per flusso di materiali dipende principalmente dalla temperatura e dal tipo di asfalto. Tali caratteristiche sono state considerate costanti sia nei test in laboratorio che nei test HVS-Nordic: la temperatura nello strato AC si aggira sui +40 °C, +45 °C. Con i test effettuati ci si proponeva di ricercare gli effetti delle reti d'acciaio sulla riduzione delle deformazioni permanenti causate dalla bassa resistenza allo sforzo di taglio negli strati bituminosi. I maggiori sforzi di taglio si verificano solitamente nei primi 5÷10 cm sotto la superficie stradale. Le reti in acciaio vengono quindi poste nel binder per evitare che la miscela di asfalto si muova orizzontalmente a causa di tali sforzi.

I risultati indicano che le reti in AC posticipano in modo considerevole la formazione di ormaiamenti per flusso di materiali. L'AC rinforzato ha tollerato dal 30% al 40% di ripetizioni del carico in più nel caso di ormaie profonde 20 mm; con profondità superiori la soglia di tollerabilità è aumentata ulteriormente. Questo significa che, nel caso di ormaie con una profondità di 20 mm, la presenza della rete induce ad un incremento dei carichi per asse dei veicoli pesanti del 30% o, mantenendo costante il numero annuale di veicoli pesanti (cioè a parità di carico), il 30% di vita utile in più.

Secondo calcoli teorici la profondità ottimale per le reti varia tra i 40 e i 100 mm dalla superficie della pavimentazione e la performance migliora nel caso di maglie di piccola dimensione (due sono le tipologie di rete elettrosaldata, che differiscono solamente per la dimensione della maglia quadrata, avente lati di 7.5 cm e di 15.0 cm). Nei climi mediterranei lo strato AC è sottoposto a temperature superiori rispetto a quella dei paesi nordici e la soluzione migliore al problema del flusso di materiali è quella di utilizzare un tipo di asfalto più viscoso e opportuno per tale applicazione.

Osservazioni:

- L'ormaiamento per flusso di materiali si verifica solo sopra la rete d'acciaio, mentre in pavimentazioni non rinforzate si verifica in tutti gli strati bituminosi;
- Nel caso di carichi ripetuti può accadere che l'inflessione della rete che reagisce a tali carichi verticali, crei una superficie di distacco orizzontale fra lo strato superiore e quello inferiore al rinforzo. Comunque nei casi studiati non si sono rilevate fessurazioni dovute a tale fenomeno;
- Anche l'AC rinforzato tende a rigonfiarsi ai bordi delle impronte delle ruote, soprattutto su strade strette dove queste seguono sempre lo stesso percorso. Si tratta tuttavia di un fenomeno piuttosto raro in quanto le impronte delle ruote sono normalmente abbastanza ampie;
- Se la rete viene posata in un cassonetto fresato nel vecchio AC è necessario assicurarsi che ci sia spazio sufficiente per compensare la dilatazione termica dell'acciaio e che sia stato fatto il costipamento nell'ordine giusto;
- Nelle barre di acciaio che costituiscono le reti si sono misurati sforzi superiori a  $250 \text{ N/mm}^2 = 2500 \text{ kg/cm}^2$ .

✓ *Ormaiamento in strati non legati UGM.*

Se le pavimentazioni presentano uno strato bituminoso di spessore limitato (meno di 100 mm), negli strati non legati si possono formare degli ormaiamenti o deformazioni permanenti. Le pavimentazioni sono particolarmente sensibili a tali deformazioni soprattutto se le sottofondazioni sono caratterizzate da una bassa portanza dovuta all'alto livello della falda o ai cicli di gelo e disgelo o ad altri problemi. Questo tipo di ormaiamento è stato studiato nel Pavement Testing Facility (PTF, Impianto Test Pavimentazioni) dell'Università di Oulu e al VTT in un test HVS-Nordic precedenti al progetto REFLEX. Anche il test HVS-Nordic finlandese (REFLEX 03) può considerarsi analogo.

Nel test PTF di una pavimentazione rinforzata si è analizzato il comportamento degli strati non legati su una sottofondazione avente bassa portanza; la superficie bituminosa era costituita da una miscela fredda e sottile in modo tale da non influire sull'ormaiamento dovuto appunto alla bassa capacità portante.

Il caso Net A simula una sottofondazione poco portante realizzata con il nuovo sistema costruttivo, ed il caso Net B la sottofondazione durante il disgelo. In entrambi i casi, la rete d'acciaio ha contribuito considerevolmente alla riduzione della formazione di ormaie nella parte inferiore dello strato non legato UGM (Figura 3.1).

In questi test PTF si è visto che a parità di ormaiamento la pavimentazione armata con reti posizionate nello strato UGM sopporta un numero di cicli di carico doppio rispetto a quella non rinforzata; le deformazioni sono state misurate a 50 mm al di sotto della rete.



Infatti considerando ad esempio il numero di cicli necessari alla realizzazione di una deformazione permanente di 3 mm, in condizioni ambientali di disgelo senza rete (Ref B), è pari a 2000; con la nuova tecnica costruttiva (Net B) a parità di condizioni esterne, i cicli necessari sono 6000, con un incremento quindi del 200%.

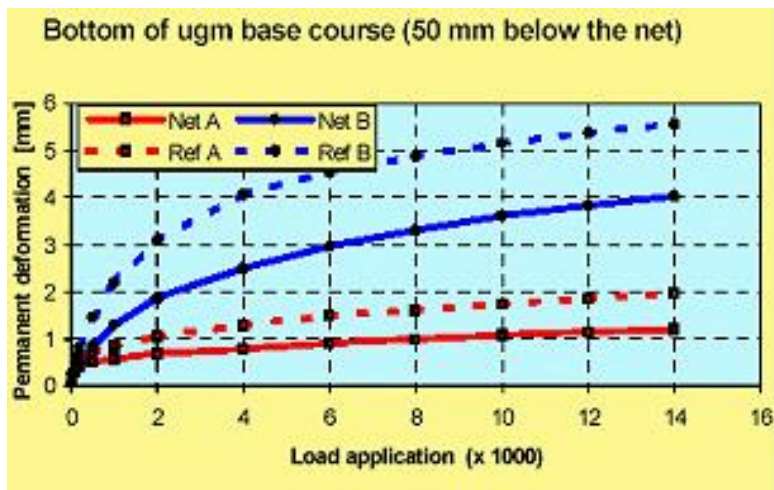


Fig. 3.1: Ormaiamento alla base dell'UGM.

In genere si può affermare che, sia in condizioni di disgelo, sia a temperatura normale, considerando uno stesso livello di deformazione (ormaiamento), la strada rinforzata con rete, rispetto a quella senza, è in grado di sopportare da 100 a 350% cicli di carico in più.

Anche un altro test HVS precedente alla ricerca REFLEX, eseguito in Finlandia, ha dimostrato che una sezione rinforzata costruita su una sottofondazione suscettibile al gelo tollera fino al 100%, 250% (a seconda del livello di ormaiamento) di ripetizioni del carico in più rispetto alla struttura di riferimento senza reti a parità di ormaiamento durante il periodo dello scongelamento.

Questa pavimentazione stradale era meno resistente di quella presa in esame dal progetto REFLEX. Nel test REFLEX HVS-Nordic 03 le sezioni rinforzate hanno tollerato dal 50% al 100% (a seconda del livello di ormaiamento da 20 mm a 50 mm) di ripetizioni del carico in più rispetto alla struttura di riferimento (*reference*) senza reti a parità di ormaiamento (Figura 3.2).

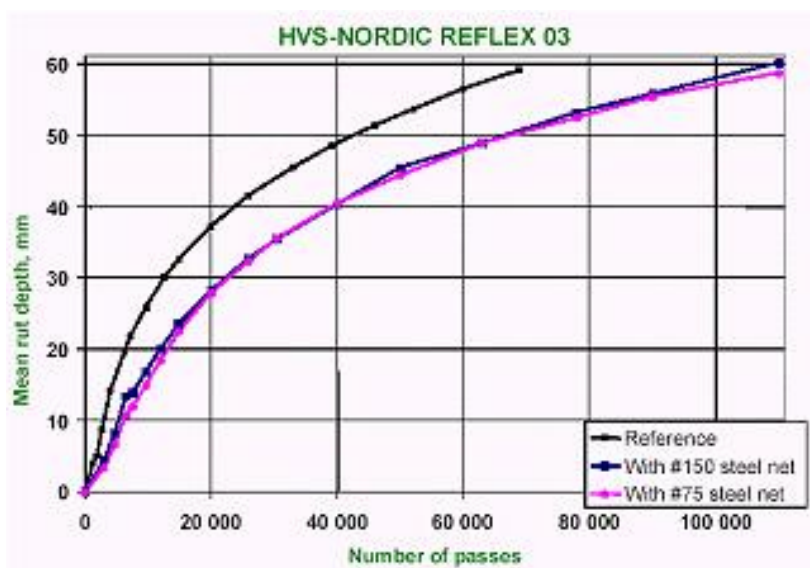


Fig. 3.2: Risultati del test HVS-NORDIC REFLEX 03.

Si è trattato di un test di capacità portante effettuato alla temperatura normale della pavimentazione (10 °C) con reti d'acciaio inserite nello strato di fondazione non legato alla profondità di 200 mm dalla superficie di estradosso dello stesso.

Come fare:

- Verificare che la superficie dello strato non legato sia ben spianata e formata correttamente, rimuovere perciò le pietre ed i ciottoli, costituenti il misto granulare, isolati di grandi dimensioni;
- Sistemare le reti d'acciaio sulla superficie in modo che le barre longitudinali siano disposte in alto;
- E' opportuno effettuare giunzioni mediante sovrapposizioni tra reti adiacenti in senso longitudinale per evitare fessurazioni trasversali, anche se dall'esperienza risulta non indispensabile in strati UGM;
- E' consigliabile aggiungere una mano di attacco come protezione contro la corrosione, soprattutto nel caso di aggregati aggressivi nello strato UGM. Spruzzare sulle reti, sempre prive di ossidazione, due volte ad angoli di 45° (la prima volta da destra, la seconda da sinistra), in alternativa utilizzare la rete zincata o meglio con l'innovativo rivestimento protettivo Bezinal® (Zn 95% + Al 5%), più omogeneo (spessore di 125 g/m<sup>2</sup>), duttile e tre volte più resistente a NaCl e SO<sub>2</sub>;
- Stendere sopra le reti il nuovo strato di fondazione non legato di spessore variabile tra i 150 e i 350 mm; si raccomanda, comunque, pari ad almeno 200 mm circa. La massima granulometria dell'UGM varia generalmente tra i 32 e i 50 mm.

Osservazioni:

- Le reti d'acciaio negli strati non legati producono effetti benefici riducendo ormaie e fessurazioni provocate da molteplici cause. Di conseguenza non esiste una profondità ottimale esatta per la loro collocazione, essa sarà legata al tipo di problema prevalente. Inoltre da questi test non è stato riscontrato un chiaro beneficio al variare dell'apertura delle maglie formanti le reti oltre che della profondità di posa;
- La presenza delle reti riduce la possibilità di ormaimento in UGM sia sopra sia sotto il livello di posa delle reti stesse.

c) *Esempi applicativi in Italia.*

- *STRADA PROVINCIALE, SALMASTRO, AQUILEIA (UDINE).*

Stato di fatto e progetto.

Si tratta di una strada provinciale, danneggiata gravemente a causa della bassa capacità portante del substrato. L'intervento di manutenzione è stato effettuato nel 1998. In totale, sono stati ricostruiti e rinforzati 500 m di strada, di larghezza pari a 5 m, con reti elettrosaldate formate da barre in acciaio di Ø = 6 mm in maglie di 100 mm. Le reti, larghe 4,9 m per coprire tutta la larghezza della strada, sono state collocate con giunzioni *finger* trasversali e fissate allo strato di asfalto sottostante con chiodi a forma di U. L'inserimento di questi elementi ha richiesto tempi lunghi e costi che a posteriori si sono dimostrati non necessari. Le reti sono state poste su uno strato di asfalto di 40 mm e ricoperte da 80 mm di conglomerato bituminoso che è stato steso con normali finitrici. Non si sono riscontrati problemi durante queste fasi esecutive.

Misurazioni e risultati.

Il tratto analizzato è stato esaminato tramite ripetute ispezioni visive effettuate in tempi diversi. La superficie della strada in corrispondenza della zona rinforzata con rete elettrosaldata è risultata in buone condizioni.

Si sono notate alcune fessure longitudinali al bordo della strada in corrispondenza dell'estremità dei pannelli (Fig.7.40), a causa della insufficiente larghezza di questi rispetto a quella del manto stradale. I pannelli, infatti, sono larghi 4.900 mm, mentre la strada 5.000 mm. Si è poi osservata un'unica fessura trasversale dovuta probabilmente a un errore nella giunzione trasversale dei pannelli di rete.





Fig. 7.40. Fessura trasferita al bordo della zona rinforzata.

Nei tratti sperimentali adiacenti, rinforzati con reti in fibra di vetro (geogriglie), sono apparse fessure longitudinali quasi continue (Fig.7.41) e diverse fessure locali nei punti dove grava il carico delle ruote. La sezione di riferimento eseguita tradizionalmente senza alcun rinforzo, a distanza di due anni dal rifacimento, ha già subito diversi interventi di manutenzione consistiti nella stesura di un nuovo strato sottile di asfalto e tuttavia presenta ancora cedimenti importanti (Fig.7.42).



Fig. 7.42. Sezione di riferimento: nuovo cedimento dopo la riparazione.

#### Conclusioni.

La zona rinforzata con rete elettrosaldata presenta un buon aspetto a distanza di due anni, mentre le altre zone (il riferimento e i tratti rinforzati con geotessuti di altra natura) sono già danneggiate. Alcune fessure trasversali, di limitata entità, si sono prodotte a causa di errori nella realizzazione delle giunzioni dei pannelli o a causa della loro dimensione inferiore, in alcuni tratti, all'estensione della strada. Questo ha dimostrato che la posa dei pannelli deve essere eseguita con attenzione e che la larghezza delle reti non deve mai essere inferiore a quella della strada. Questa esperienza evidenzia che reti in acciaio, progettate e costruite nel modo appropriato, sono in grado di evitare la formazione di fessurazioni dovute a capacità portante insufficiente perché realizzate su terreni scadenti o perché sottodimensionate per situazioni di traffico meno gravose.

- *AUTOSTRADA A 23, TRATTO PALMANOVA – UDINE.*

Tre tratte sperimentali, ognuna della lunghezza di 200 m, sono state realizzate in sequenza lungo la A 23 (E 55) nel tratto Palmanova-Udine. Nel primo tratto la rete elettrosaldata è stata posta al di sopra dello strato non legato in misto granulare di fondazione, nel secondo tratto è stata sistemata a metà dello strato di base in misto bitumato, mentre il terzo tratto non è stato rinforzato considerandolo come di riferimento. Riportiamo la sezione

di pavimentazione rinforzata con rete al di sotto della base, al fine di evidenziare i materiali e la disposizione degli strati del cassonetto, comune per tutti e tre i tratti (fig.7.44a).

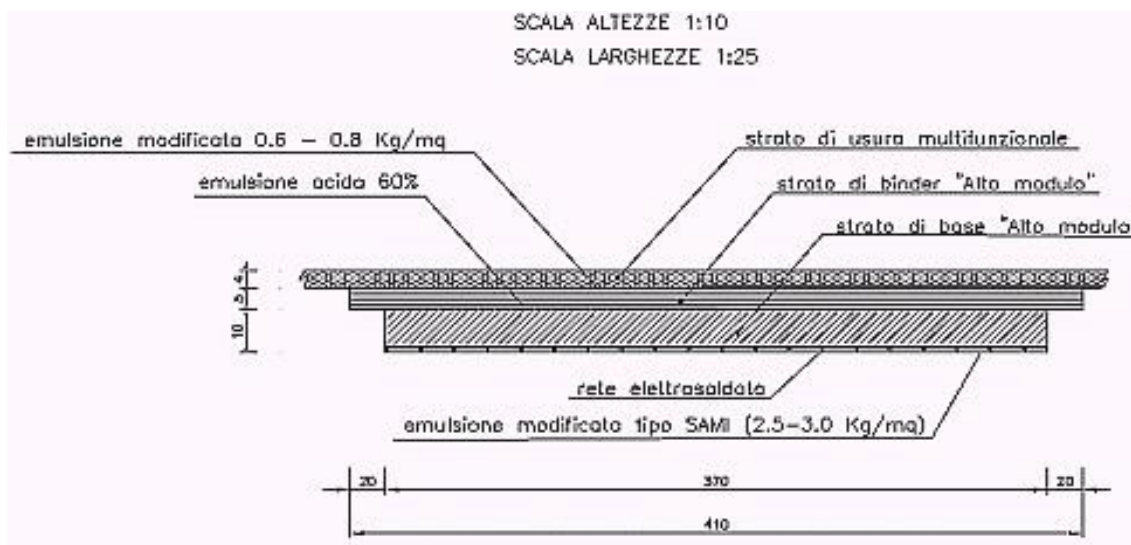


Fig. 7.44a. Sezione di pavimentazione rinforzata: rete al di sotto della base.

In base a questi parametri è stata scelta una rete elettrosaldata a filo liscio di diametro 6 mm e maglia quadra da 100 mm, eventualmente zincata nel caso di immersione o ancoraggio su strati non legati a bitume, fornita in pannelli di lunghezza max 245 cm e larghezza sufficiente a coprire le esigenze di rinforzo, con giunti laterali aventi sporgenze opportune per una corretta sovrapposizione longitudinale dei pannelli stessi; questi ultimi devono avere, all'atto dell'arrivo in cantiere, una planarità complessiva migliore di 20 mm. Queste caratteristiche consentono di ridurre al minimo le criticità della posa, migliorare l'efficacia del nodo di saldatura, sovrapporre i pannelli correttamente (Fig.7.45) e senza pericolo per la transitabilità dei mezzi durante le fasi costruttive, evitando del tutto il posizionamento di graffe od altri simili ancoraggi.

La dimensione adeguata delle maglie consente la completa penetrazione del conglomerato attraverso queste ultime e di conseguenza la garanzia di ancoraggio sullo strato sottostante; quest'ultimo, nel caso di rinforzo posto al di sotto dello strato di base, è stato preventivamente trattato con mano d'attacco tipo SAMI, simile a quella usata nel caso delle usure drenanti. La posa in opera risulta molto veloce: nel caso delle tratte in esame, due addetti hanno sollevato e posizionato tutti i pannelli in meno di due ore (Fig. 7.46).

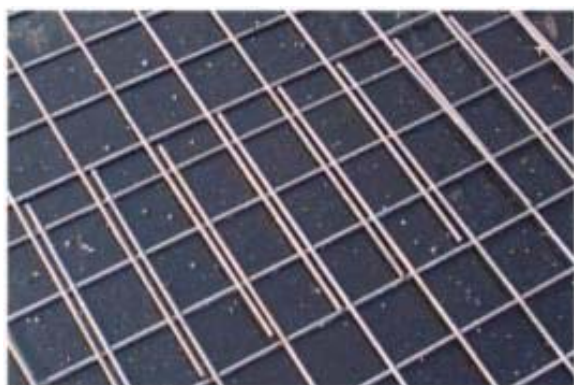


Fig. 7. 45. Sovrapposizione "finger type" dei pannelli



Fig. 7. 46. Posa in opera della rete elettrosaldata.

La sperimentazione ha avuto successo anche nel caso di posizionamento della rete nel mezzo dello strato di base: in questo caso il conglomerato è stato steso in due fasi successive, attendendo il necessario raffreddamento prima della posa della rete e del ricoprimento.

In futuro potranno essere proficuamente impiegate nuove macchine vibrofinitrici in grado di realizzare due strati contemporaneamente, modificate opportunamente per consentire l'inserimento della rete; l'operatività delle macchine convenzionali è comunque pienamente compatibile con questo tipo di tecnologia, che non influenza nemmeno la loro capacità in termini di produzione oraria.

Alcune verifiche sull'efficacia degli interventi in esame sono state condotte essenzialmente attraverso i risultati sperimentali di sezioni armate in scala reale opportunamente attrezzate con sensori (prove sperimentali con Heavy Vehicle Simulator condotte dagli Istituti di ricerca VTI e VTT) ma anche dall'interpretazione dei dati forniti dalle prove con deflettometro a massa battente, sia di tipo standard FWD che pesante HWD (Fig. 7.47). Questi ultimi monitoraggi sono stati condotti sulla tratta sperimentale di Autovie Venete a partire dall'epoca di costruzione e in diverse condizioni climatiche stagionali.



Fig.7.47. Controlli tramite deflettometro.

La tabella 1 sottostante, indica la maggiore linearità e tenuta del modulo complesso per le sovrastrutture rinforzate, con valori assoluti piuttosto buoni, nonostante la sostanziale differenza tra i valori del modulo di sottofondo per i tratti rinforzati (Section A e Section B) e quello di confronto (Section C, quest'ultimo presenta un modulo di sottofondo marcatamente migliore, come visibile dai dati di tabella).

**REFLEX Project: monitoring the E55 reinforced and unreinforced sections with FWD & HWD**

Period	E1 (20°C)			E2			E3		
	Sections			Sections			Sections		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
02/00	7834	8105	7605						
07/00	7005	7829	7479	595	801	735	99	84	121
03/01	7773	8978	8415	827	937	844	94	94	124
09/01	8288	9480	8332	804	859	913	127	139	183

Tabella 1. Valori dei moduli della pavimentazione (Back calculation).

Legenda tabella:

E1 = modulo complesso strati superficiali (usura e binder), (MPa);

E2 = modulo complesso base (MPa);

E3 = modulo complesso sottofondo sabbioso con frazioni coesive (MPa);

Section A: primo tratto con rete nell'estradosso del sottofondo;  
Section B: secondo tratto con rete a metà dello strato di base;  
Section C: terzo tratto di riferimento non armato.

*d) Conclusioni.*

Il progetto REFLEX, sulla scorta di esperienze nate nel Nord Europa, ha messo a punto un nuovo sistema di costruzione e di risanamento delle pavimentazioni stradali che prevede l'utilizzo della rete elettrosaldata. Si tratta di posizionare un pannello di rete elettrosaldata (in genere realizzata con fili di piccolo diametro,  $\Phi$  6-8 mm, e con maglia di 10 cm) nello strato di conglomerato bituminoso, oppure nello strato di base non legato. Una industria italiana, partner del gruppo di ricerca, ha realizzato delle reti elettrosaldate speciali con fili lisci, caratterizzate da punti di saldatura con tenuta doppia rispetto alle reti normali. Esse collaborano con lo strato legato o non legato, in cui sono presenti, creando un nuovo sistema di pavimentazione flessibile, in grado di distribuire uniformemente i carichi del traffico e di aumentare notevolmente la capacità portante, eliminando anche l'apertura di fessurazioni riflesse e fessurazioni conseguenti alle variazioni termiche.

La sperimentazione realizzata su strade convenzionali non armate e su strade armate con rete elettrosaldata, ha permesso di valutare il notevole incremento dei cicli di carico che si ottiene con la nuova tecnologia costruttiva a parità di deformazione permanente finale. Il progetto REFLEX ha messo a punto anche diversi sistemi di calcolo, tarati con le prove di laboratorio realizzate nell'ambito della ricerca. Il più interessante è quello che considera la rete elettrosaldata come uno *strato equivalente*, determinandone il relativo modulo di elasticità sia nel caso essa sia posizionata nel conglomerato bituminoso sia in quello della rete posizionata nel sottofondo non legato. E' possibile quindi, in ogni programma di calcolo multi-strato, lineare elastico o non lineare, utilizzare questi valori per dimensionare correttamente la pavimentazione stradale.

Dal punto di vista ambientale l'LCA (*Life Cycle Assessment*) conferma un maggiore impatto ambientale della tecnologia REFLEX rispetto alla convenzionale, in fase costruttiva; i conglomerati impattano prevalentemente su acidificazione ed effetto serra, mentre la produzione della rete suddivide i suoi impatti tra smog, metalli pesanti ed acidificazione (impatto specifico dell'acciaio). L'impatto risulta però pienamente riassorbito nella fase manutentiva, effetto più riscontrabile nelle autostrade che nelle provinciali e locali, ed è principalmente dovuto alla ridotta frequenza degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. In generale è anche emerso che il sistema REFLEX garantisce prestazioni ambientali migliori nelle applicazioni in clima continentale rispetto a quello mediterraneo per tutte le tipologie di strade considerate, in quanto il clima continentale richiede una frequenza maggiore degli interventi manutentivi.

Nel complesso la tecnologia REFLEX può essere quindi considerata una "cleaner technology".

#### **(4.b) GEOWEB**

In occasione del XX Congresso Mondiale della Strada (A.I.P.C.R.) tenutosi in Canada a Montreal, gli Stati Uniti hanno presentato, tra le tante altre cose, un interessante sistema di confinamento cellulare per le opere in terra realizzato da una conosciuta impresa a livello internazionale, e chiamato Geoweb.

Si tratta di un materasso di strisce di polietilene (PE) conformate in modo da realizzare celle chiuse (geocelle) all'interno delle quali il terreno resta confinato. Le forze di confinamento nascono dalla resistenza a trazione delle strisce di polietilene, dalla resistenza passiva delle celle adiacenti e dall'attrito tra il terreno contenuto nella cella e le sue pareti.

L'utilizzo che si può fare di questo sistema è molteplice, ad esempio esso può essere impiegato come irrigidimento degli strati di base e di fondazione delle pavimentazioni stradali flessibili, e per rilevati tradizionali o alleggeriti, con una riduzione delle pressioni di contatto sugli strati sottostanti, oppure può essere utilizzato per evitare gli spostamenti laterali per strati di ballast nelle sovrastrutture ferroviarie.

Il Geoweb trova applicazione anche per la realizzazione di muri di sostegno per mezzo della sovrapposizione di più strati oppure, in ambito dell'ingegneria idraulica, nella protezione dalla erosione di canali non rivestiti o di scarpate sia inerbite che spoglie.

#### (4.c) GEOGRIGLIE, TESSUTI NON TESSUTI, GEOMEMBRANE

Per sua natura il conglomerato bituminoso è caratterizzato da una bassa resistenza a trazione, il cui limite può essere facilmente superato anche da valori di tensione indotti da deformazioni di entità molto bassa; in prossimità dei crocevia (intersezioni), poi, dove i veicoli con effetto maggiore se pesanti, applicano una coppia concentrata di una certa entità, si genera un'azione torcente con effetto di trascinamento a livello del manto d'usura, che provoca nel tempo molteplici danni. E' facile capire che, per attenuare il problema degli ammaloramenti è necessario incrementare la resistenza a trazione del conglomerato bituminoso, eliminando il "picco di tensione" che una fessura non ancora emersa può generare sulla superficie del manto d'usura.

Siccome il picco di tensione non può essere intercettato lungo il suo sviluppo, il suo abbattimento avviene agendo alla base ad esempio con reti elettrosaldate, cioè direttamente sulla causa generante, oppure agendo in superficie, cioè nella parte terminale, dove è più pericoloso l'effetto di una sua azione.

Agendo alla base, che nella maggior parte dei casi ha luogo nel sottofondo, si va incontro a problemi di gestione ben più rilevanti (scavi, sospensione del traffico per giorni, ecc.) oltre che ad un maggior investimento in materiali e mezzi.

Agendo in superficie invece, si interviene sulla parte inferiore del manto d'usura, distribuendo le tensioni indotte su un'area più ampia e aumentando la resistenza a trazione dello strato di conglomerato bituminoso (Fig. 1).

Sempre con l'obiettivo di incrementare la resistenza a trazione della miscela, senza considerare l'impasto ma il manto già steso, quindi non modificando il bitume né additivando il conglomerato, si è sviluppata nei primi anni '90 l'applicazione dei geotessili. Inizialmente nati per applicazioni geotecniche, si sono presentati sul mercato come una vantaggiosa soluzione nel campo dei problemi legati all'ingegneria stradale e ferroviaria, grazie alla loro economicità e semplicità di utilizzo.

I geotessili sono prodotti costituiti da una o più fibre sintetiche (polimeri quali poliammide, poliestere PET, polipropilene PP, polietilene PE) di diversa forma e lunghezza, intrecciate tra di loro e coesionate termicamente per fusione, meccanicamente per agotramento, o chimicamente per impregnazione con adesivi. In base al diametro medio dei pori, o apertura delle maglie, a seconda della loro struttura derivante dal diverso procedimento tecnologico di produzione, si classificano in ordine decrescente del parametro geometrico caratteristico, come:

- Geogriglie (o georeti);
- Tessuti non tessuti TNT (o geotessili);
- Geomembrane impermeabilizzanti (o semplicemente membrane).

I *geosintetici* sono prodotti ad alta tecnologia di tipo prefabbricato, costituiti dall'unione di materie prime derivanti in parte dall'industria tessile e in parte dall'industria petrolchimica. I *geocompositi*, invece sono ottenuti dall'unione di più geosintetici, o meglio, dall'unione di fibre di più polimeri diversi, come evidenziato più chiaramente nella tabella seguente (Tab. 1). Più comunemente in generale i geosintetici ed i geocompositi vengono chiamati indifferentemente con il nome di *geotessili*.

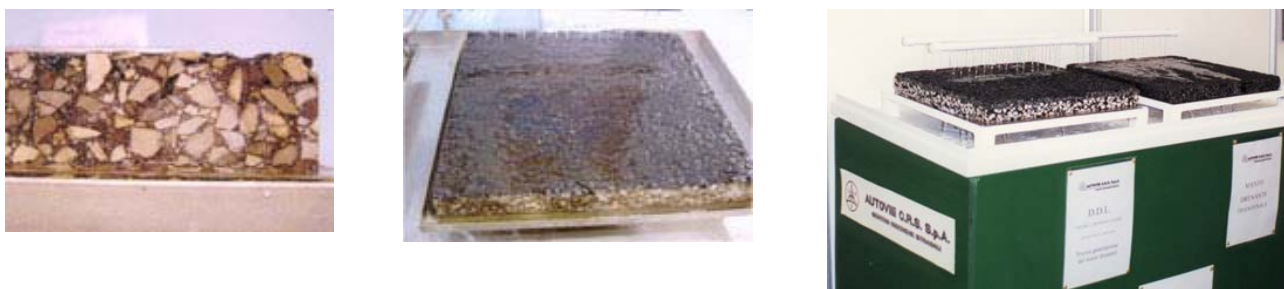


Fig. 1. Conglomerati drenanti e DDL (*Double Draining Layer*) rinforzati con geotessili.

MATERIALE POLIMERICO	VANTAGGI	SVANTAGGI	PROPRIETA' INFIAMMABILI
POLIPROPILENE (PP) POLIETILENE (PE)	Grande inerzia chimica nei confronti di soluzioni acide e basiche.	Mediocre modulo elastico, elevata deformazione plastica a carico costante.	Brucia facilmente emettendo fumo nerastro e odore di candela.
POLIESTERE (PET)	Elevato modulo elastico, scarsa deformazione a carico costante.	Sensibilità all'azione di soluzioni fortemente basiche (PH>11).	Bassa infiammabilità.
POLIAMMIDE (PA)	Elevatissimo modulo elastico, grande resistenza all'abrasione.	Perdita di caratteristiche meccaniche per permanenza prolungata in acqua.	Bassa infiammabilità.

Tab. 1: Caratteristiche dei più diffusi geotessili per applicazioni stradali.

Le miscele di polimeri sono tuttavia considerate con molta attenzione, sia nella scelta del materiale stesso, sia nella opportuna scelta delle proprietà tecniche che li caratterizzeranno (spessore, resistenza a trazione o al taglio, allungamento e coefficiente di permeabilità, comportamento alle alte temperature), sia, ancora, nell'adeguata scelta del singolo tipo di geosintetico a seconda del compito che deve svolgere una volta posto in opera.

Tra i vari materiali che in genere costituiscono i geosintetici, il poliestere (PET) risulta il più adatto ad una applicazione stradale, in quanto ha modulo elastico "molto elevato" come quello del bitume, è imputrescibile e stabile alla luce, e presenta una elevata resistenza alla temperatura, fondendo a 250 °C (durante una stesa la temperatura del conglomerato si aggira attorno ai 140÷200 °C a seconda del legante idrocarburico utilizzato).

Fibre di poliammide sono parzialmente imputrescibili e instabili alla luce, fibre di polipropilene, imputrescibili ma instabili alla luce. Data la collocazione del geotessile nel sottosuolo e la sua soggezione alle azioni meteoriche, alle variazioni termiche, alle sollecitazioni meccaniche, all'aggressione delle muffe, dei batteri, dei piccoli animali (insetti, roditori, ecc.), esso deve essere inalterabile nel tempo.

La resistenza alla temperatura è molto importante soprattutto per le applicazioni in cui il geotessile va da "armare" il manto; un utilizzo di questo tipo lo si ha negli strati superficiali di pavimentazioni drenanti fonoassorbenti, in quanto impiegando inerti pressochè monogranulari i punti di contatto tra i granuli sono minori: ne consegue che per ottenere una indispensabile resistenza è necessario impiegare bitumi migliorati di ottima adesione, e meglio ancora anche reti di filato sintetico (*tessuti non tessuti* o in alternativa *geogriglie*), le quali non intaccano le proprietà drenanti e distribuiscono le sollecitazioni soprattutto nei mesi caldi (si pensi a un TIR da 300 q a 100 km/h).

Geotessili di vario tipo si pongono anche alle volte al di sotto dello strato di base per formare strati drenanti sopra la fondazione, sia per pavimentazioni aperte sia per pavimentazioni in conglomerato chiuso (vuoti residui in opera < 5%). Per quest'ultima applicazione è necessario però prevedere dei dreni laterali alla sovrastruttura, con la funzione di raccogliere e smaltire l'acqua percolante dall'alto nel misto granulare.



✓ *Geogriglie.*

Il geotessile più adatto a questa applicazione è quello che va a ricostruire le caratteristiche di resistenza del manto, che sono venute meno o che si pensa possano venire meno nel corso del tempo.

Una volta applicate le geogriglie, a maglie quadrate più o meno aperte (min 5 mm), hanno la funzione di ripartire il carico (il picco di carico da concentrato a distribuito) con l'effetto di trasformare l'unica fessura in tante piccole fessure distribuite (microfessurazioni).

Una geogriglia è una maglia che può essere costituita da più diversi materiali, dal *plastico* al *metallico*. Se in materiale plastico, questo è intrecciato in modo tale da formare una specie di graticcio, garantendo la stessa funzione statica di ripartitore che hanno le reti elettrosaldate. La griglia è in grado di assorbire e distribuire le tensioni di trazione su tutta la superficie, grazie alla sua grande area aperta, che consentendo il contatto diretto tra gli strati, ne migliora l'aderenza, aumentando esponenzialmente la capacità resistente degli stessi.

Le georeti vengono utilizzate anche negli interventi di rifacimento locale del manto con piccoli rattoppi di conglomerato. Questo può accadere a causa di manutenzioni ordinarie e straordinarie di sottoservizi (interventi profondi) non collocati, come invece sarebbe auspicabile, in cunicoli pluriservizi percorribili (G.U. 11/03/1999, n. 58) oppure per ricostruzione di superfici ammalorate (interventi superficiali) con fessurazione diffusa a "pelle di cocodrillo".

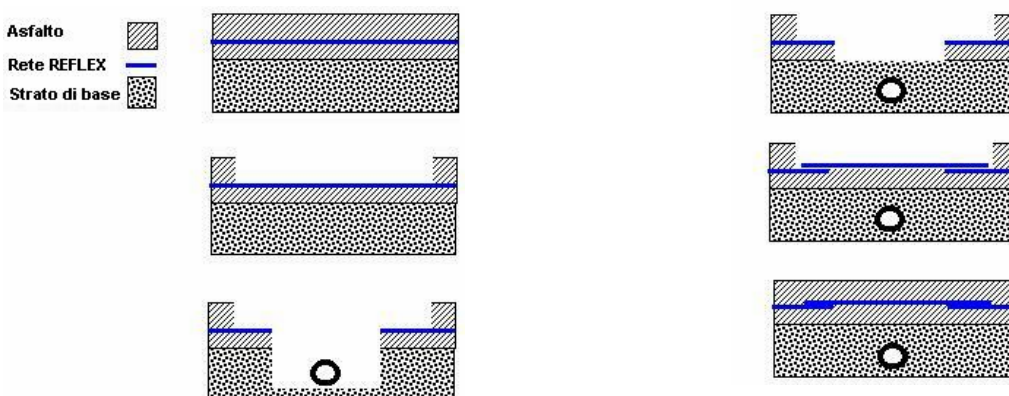
Il problema nasce dal solo utilizzo di conglomerato bituminoso, il quale può creare dopo un certo tempo nella zona interessata, dei cedimenti differenziali del manto (Fig. 1), generando dei veri e propri corridoi per interventi che si sviluppano per una certa lunghezza.



Fig. 1. Nuovi cedimenti dopo il rattoppo con semplice conglomerato bituminoso.

Anche in questi casi è dunque conveniente l'utilizzo di una opportuna geogriglia, o materiale similare (geotessili o le innovative *reti metalliche a doppia torsione* "Mesh Track<sup>TM</sup>" a maglie esagonali con fili piatti torsionati trasversali, o le *reti torsionate* "Road Mesh®" con fili semplici trasversali), come struttura ripartitrice di carico.

Si riporta la sequenza di operazioni da eseguire nel caso di intervento profondo localizzato in una tubazione posta nello strato di fondazione, per una pavimentazione armata con rete elettrosaldata tecnologia REFLEX, sita negli strati legati. Nelle figure sottostanti per strato di base si intende strato di fondazione in misto granulare non legato, e per asfalto conglomerato bituminoso.



Per quanto riguarda gli interventi di rifacimento superficiale in pavimentazioni armate REFLEX lo smantellamento delle reti è possibile, ma in linea di principio inutile.

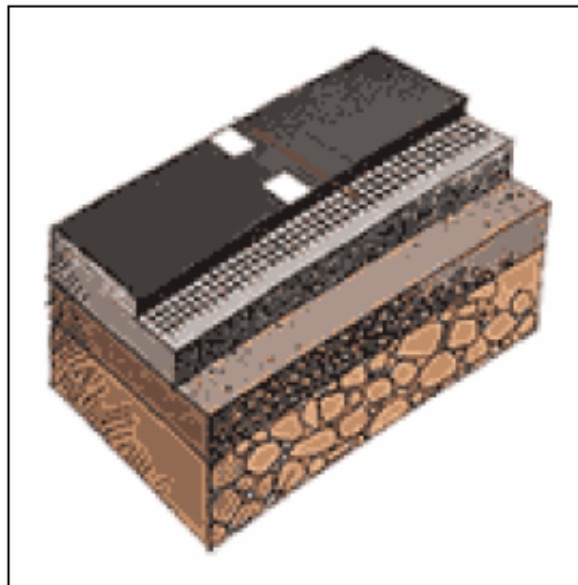
Infatti in tutte le applicazioni dove la rete è stata collocata nello strato non legato (UGM) o alla base degli strati in conglomerato bituminoso non esiste la necessità di rimuoverla durante gli interventi di manutenzione, eventualmente è possibile fresare e sostituire solo il manto di usura superiore. Anche nei casi in cui la rete viene posizionata a 50÷60 mm di profondità sotto il manto di usura (profondità ottimale per rete in strato AC), è possibile effettuare la manutenzione fresando e sostituendo questo strato senza intervenire sui pannelli d'acciaio.

Sono stati effettuati dei test per rimuovere lo strato in conglomerato bituminoso rinforzato assieme alle reti; i risultati hanno evidenziato che ciò è possibile ma anche non conveniente economicamente con le apparecchiature esistenti. Il modo migliore di procedere consiste nell'eseguire dei tagli realizzando delle "fasce" larghe 50 cm lungo la direzione longitudinale prima della fresatura.

In generale per entrambi gli interventi descritti, superficiali e profondi, singolari, in pavimentazioni non rinforzate, si utilizzano geogriglie polimeriche, geotessili, o reti "Road Mesh", quasi mai reti elettrosaldate con diametro min  $\Phi$  6, impiegate nella costruzione di nuovi tronchi stradali flessibili e in estesi interventi di rifacimento.

Le geogriglie sono adottate anche per la realizzazione di microtappeti armati a caldo (SMA, Splitt Mastix Asphalt armato) e a freddo (Slurry Seal armato).

Al LSS (Laboratorio Sperimentale Stradale) del Politecnico di Milano è in corso una ricerca teorico-pratica per lo studio delle geogriglie di rinforzo per pavimentazioni flessibili.



Schema della pavimentazione con geogriglia di rinforzo

L'obiettivo è quello di verificare l'efficacia di tecniche di rinforzo delle pavimentazioni che prevedono l'inserimento di geogriglie tra gli strati di conglomerato bituminoso.

La ricerca, che ha anche il sostegno del Comune di Carpiano (Milano), prevede, da un lato, la realizzazione di una campagna di prove in laboratorio per lo studio, tramite prove dinamiche, dell'efficacia della geogriglie nel controllo della propagazione di fessure da fatica, nonché dell'influenza del tipo di mano d'attacco utilizzata per la posa della geogriglie, dall'altra di opportune tratte sperimentali sottoposte a traffico pesante ed opportunamente monitorate rispetto all'evoluzione dei dissesti in presenza o meno delle geogriglie.

Presso il campo prova è prevista la realizzazione di diverse tipologie di pavimentazione, allo scopo di verificare il comportamento delle stesse al variare della posizione della geogriglia all'interno del pacchetto della pavimentazione. Il tutto sarà completato da una simulazione numerica, che, partendo dalle prove di laboratorio, permetterà di mettere a punto un modello di pavimentazione in grado di considerare, nelle fasi di progetto e dimensionamento, anche il meccanismo di rinforzo relativo alla geogriglia.



✓ *Tessuti non tessuti (TNT).*

Negli ultimi anni si è affermato e largamente diffuso anche in Italia un materiale nuovo simile nell'aspetto ad un tessuto, ma ottenuto con un procedimento non di tessitura ma piuttosto di feltratura (da cui anche il nome di *feltri*), il quale è caratterizzato da elevate proprietà filtranti e da buone proprietà meccaniche. Viene realizzato con fibre di poliestere, fibre di vetro tipo E, fibre WBRM (vedi punto (2.c)), o altre resine sintetiche, più raramente anche congiuntamente (tessuti non tessuti geocompositi).

Il diametro medio dei pori del TNT deve essere pari alla metà circa del diametro medio dei granuli del terreno con il quale si trova ad operare, ma non troppo piccolo per evitare l'occlusione dei pori stessi e quindi il blocco della sua azione di drenaggio. Spesso il verso di posa corretto è unico, in quanto i pori sono realizzati a forma di imbuto, quindi è importantissimo rispettarlo a meno di conseguenze sgradite (la drenabilità si annulla se si dispone il feltro a contatto del terreno di sottofondo con il lato ove i pori hanno diametro maggiore, poiché le particelle fini, per azione di "pumping", occluderebbero le aperture, impedendo all'acqua dello strato di fondazione in misto di uscire e viceversa favorendo la risalita capillare dal di sotto).

Nei tratti in cui il corpo stradale deve superare in rilevato, o in trincea, terreni di scarsa capacità portante, tipo terreni torbosi e argillosi, il TNT, disteso sul terreno naturale prima di eseguire il rilevato con materiale granulare, resiste bene alle azioni conseguenti alle deformazioni del sottofondo provocate dai sovraccarichi in transito sul piano viabile, svolgendo anche così un'efficace funzione di ripartizione del carico sovrastante.

In definitiva il non tessuto svolge le funzioni di:

- *Rinforzante e ripartitore del carico veicolare* degli strati di fondazione stradali, di rilevati in terra o alleggeriti con argilla espansa, e di strati in conglomerato bituminoso;
- *Drenante della strato di fondazione*, con pori cilindrici, in presenza di sottofondo non coesivo (ghiaia o sabbia);
- *Drenante anticapillare antigelo della fondazione*, con pori ad imbuto, per livello di falda alto nel sottofondo e terreni coesivi (interrompe l'eventuale risalita di acqua capillare dal terreno naturale al di sotto della sovrastruttura);
- *Antigelo del sottofondo se gelivo*, impedendo all'acqua eventuale nella fondazione di fuoriuscire al di sotto (si pone il feltro ad "imbuti rovesci"); sono necessari però in questo caso dei dreni della fondazione, laterali alla sovrastruttura stradale.

La posa in opera può essere effettuata direttamente a contatto del terreno, oppure meglio al di sopra di una "gettata" di materiale lapideo con elementi aventi spigoli non aguzzi: nella scelta dell'uno o dell'altro sistema hanno influenza prevalentemente l'eventuale moto dell'acqua e la tecnologia di produzione del TNT. In particolare durante la stesa del tessuto non tessuto si dovrà curare la sovrapposizione, almeno per 30 cm, dei

singoli teli in senso longitudinale e trasversale; inoltre i teli non dovranno essere sottoposti in alcun modo al transito diretto dei mezzi di cantiere (per evitare strappi e lacerazioni) prima di essere ricoperti con il materiale utilizzato per la fondazione o rilevato stradale.

#### TNT termosaldati a filamento continuo precompressi

Non tessuti di ultima concezione a media grammatura (valore medio del grammage, u.m. g/m<sup>2</sup>) utilizzabili sia come filtro sia come separatore, realizzati con una particolare tecnica produttiva in grado di fornire un materiale a basso intasamento, ad elevata resistenza, con prestazioni meccaniche ed idrauliche costanti nel tempo.

La coesionatura è effettuata termicamente per termosaldatura ed il prodotto è monitorato con raggi  $\beta$  e ultrasuoni sull'intero ciclo produttivo.

In particolare questo TNT può essere posato anche in condizioni atmosferiche sfavorevoli, senza la necessità di eseguire il fermo cantiere. In casi di violenti acquazzoni o risalite dell'acqua di falda dal sottofondo, la stesa di un non tessuto tradizionale sarebbe impraticabile poiché tenderebbe ad impregnarsi, con un effetto "carta assorbente". Il TNT innovativo può essere posato poiché non manifesta tendenze all'assorbimento dell'acqua, non incrementa il suo peso e pertanto conserva la maneggevolezza. Particolarmente utilizzati sono come strati anticontaminanti del ballast ferroviario e della fondazione stradale; recentemente sono stati impiegati nella costruzione dell'autostrada svizzera A 2 nel tratto Lucerna-Basilea.

Proprietà:

- Isotropico;
- Uniformità della superficie, compattezza, ridotto spessore;
- Distribuzione superficiale dei pori casuale, a differenza dei TNT tradizionali con distribuzione superficiale geometricamente ordinata indotta dalla tecnologia produttiva della agugliatura;
- Precompresso, in modo da non variare le prestazioni idrauliche, sotto carico, in presenza d'acqua, nel tempo;
- Resistente al danneggiamento meccanico indotto dalle fasi di posa e realizzazione della sovrastruttura (test di danneggiamento meccanico, assorbimento di energia, studi condotti dal Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale Norvegese);
- A basso intasamento (*clogging*) da parte della componente fina del terreno di sottofondo che naturalmente migra verso gli strati a granulometria maggiore (fondazione); nei non tessuti classici, a maggior spessore, le particelle fini rimangono imprigionate formando nel tempo una barriera di terreno che impedisce il drenaggio e la circolazione dell'acqua interstiziale;
- Sviluppo nel sottofondo in prossimità del TNT di un filtro naturale di particelle fini, con successivo strato "ponte" superiore a ridosso del non tessuto stesso (*Filter Formation and Bridging Network*), il quale risulta una controbarriera al passaggio di piccoli granuli nella pavimentazione;
- Valori di permeabilità (drenaggio) costanti al variare della pressione di confinamento;
- Resistente alle azioni meccaniche, massime nella fase di costruzione dell'infrastruttura, numero di cicli di carico sopportabili maggiore;
- Elevato modulo elastico;
- Tra i TNT è quello che presenta il minimo abbassamento, rilevabile in asse al carico gravante, quindi è in grado di accumulare percentuali rilevanti di tensione che altrimenti andrebbero ad agire sul terreno di sottofondo, a scapito della stabilità dell'intera stratigrafia (test con carico ciclico di 80 kPa = 0.8 kg/cm<sup>2</sup> su piastra quadrata di 250 mm di lato, area equivalente ad un pneumatico);
- Resistenza minima di 100 anni, conservazione delle caratteristiche meccaniche al 100% se soggetto ad aggressione (di ossidazione PrEN ISO 13438, chimica EN 14030, microbiologica EN 12225);

#### ✓ *Geomembrane.*

La geomembrana è costituita da un materiale sottile, spesso qualche millimetro, ma flessibile ed impermeabilizzante, ottenuta con prodotti polimerici (*geomembrane elastomeriche* prodotte con elastomeri naturali o sintetici, e *geomembrane plastomeriche* ottenute con polimeri naturali o di sintesi) o bituminosi (*geomembrane bituminose*, se armate derivate dall'impregnazione di tessuti non tessuti o geogriglie, in poliestere o fibra di vetro, con miscele di idrocarburi).

Le geomembrane costituiscono una tecnologia di impermeabilizzazione particolarmente indicata per i viadotti o comunque per gli impalcati in calcestruzzo che possono presentare irregolarità anche notevoli del fondo. Si tratta sostanzialmente di un pacchetto di trattamenti che consentono la realizzazione di un manto continuo con bitume modificato “speciale” (con cariche minerali ad esempio) e l’interclusione di un tessuto non tessuto in poliestere (da filo continuo o fiocco) che nella fase di lavorazione protegge il manto impermeabilizzante dai mezzi operativi (Fig. 2).

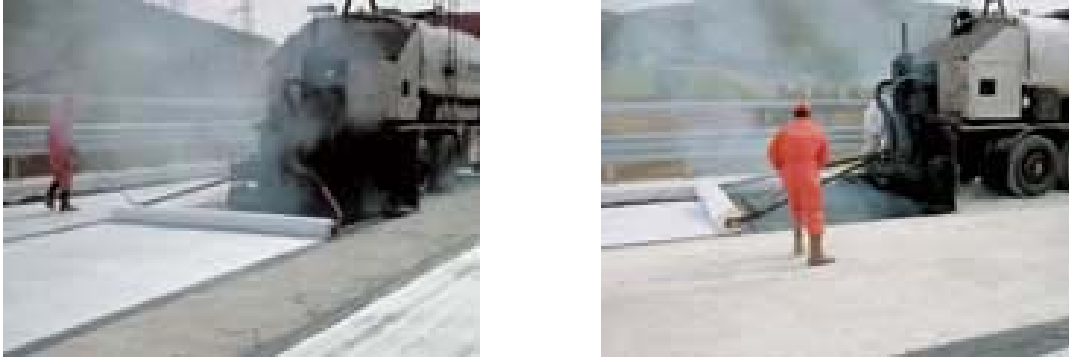


Fig. 2. Fase di stesa del tessuto non tessuto in poliestere.

Le cariche (o *extender*) del bitume svolgono il compito di dare coesione e spessore al prodotto, oltre che conferire alcune caratteristiche tipiche (il caolino migliora la plasticità, la silice incrementa la durezza superficiale ecc.), ma più spesso svolgono il ruolo di semplice riempitivo per abbassare il prezzo specifico del prodotto. Solitamente si impiegano il solfato di bario ( $BaSO_4$ ), il carbonato di calcio ( $CaCO_3$ ), il talco e altri minerali sempre ridotti in polvere finissima (si potrebbe utilizzare anche sabbia semplice). Se le cariche sono in eccesso producono un decadimento del potere coprente e della qualità complessiva del prodotto.

È una tecnologia che a fronte di una rapida esecuzione e di costi contenuti permette la realizzazione di un manto impermeabile continuo perfettamente aderente al calcestruzzo, senza bolle d’aria o umidità e senza giunti trasversali, né longitudinali. In sostanza la membrana impermeabilizzante è ottenuta per composizione a strati successivi, dal basso (es. estradosso dell’impalcato in c.a. di un ponte) così identificabili: antiaderente e autoprotezione, compound bituminoso (Fig. 3), “armatura”, compound bituminoso, antiaderente e autoprotezione. In realtà quasi sempre con sole due passate dell’automezzo la geomembrana è già eseguita, il primo passaggio comprende le prime tre operazioni, il secondo passaggio le ultime due fasi, come si può anche chiaramente vedere dalle fotografie disponibili.



Fig. 3. Stesa a caldo del compound bituminoso sull’impalcato di un cavalcavia autostradale.

Le geomembrane vengono utilizzate anche per coperture piane o in pendenza, fondazioni sotto falda, estradossi di gallerie, ed in ogni qualsiasi altra situazione ove vi sia l'esigenza di impermeabilizzazione, perfetta adesione al supporto e discreta resistenza alle sollecitazioni meccaniche. Si hanno ridotti tempi di messa in opera e costi nella norma, conosciuti.

Con bitumi modificati, o emulsioni da essi derivate, è possibile realizzare anche *mani d'attacco* con caratteristiche migliorate, le quali possono essere assimilate a geomembrane. Una vera membrana impermeabile che è fondo ideale anche per conglomerati drenanti e fonoassorbenti, sulla quale defluiscono le acque assorbite dal manto stradale, è la membrana SAM (senza interstrato di rinforzo) o la membrana SAMI.

Le membrane SAMI (*Stress Adsorbing Membrane Interlayer*) sono inoltre particolarmente indicate su vecchie pavimentazioni fresate e fessurate, per impermeabilizzarle, costituire un diaframma che ripartisce gli sforzi, garantire un perfetto ancoraggio del manto e prevenire la risalita di eventuali fessure dagli strati inferiori. Consentono perfetta adesione del manto al supporto dove sono applicate ed aderenza tra i diversi strati della pavimentazione eliminando i rischi di scivolamento. Ricordiamo infatti che è sempre importantissimo stendere la mano d'attacco per legare i vari strati bituminosi tra loro per aumentare la vita utile della pavimentazione, ma anche tra lo strato di fondazione "bianco" e lo strato di base è utile farlo. I costi risultano elevati ma si hanno risultati duraturi. Di elevatissime prestazioni è la geomembrana SAMI+geotessile+SAMI, anche se di contro risulta molto onerosa e applicabile solamente per situazioni molto particolari o di ricerca. Esistono anche membrane SAMI realizzate con bitume modificato con granulato di gomma riciclato da pneumatici fuori uso secondo il Processo Wet, anch'esse caratterizzate da un grande comportamento meccanico elastoplastico.

### Conclusioni

Per la manutenzione delle pavimentazioni stradali sono possibili diverse tecniche di intervento; in relazione allo stato del degrado della stessa si deve scegliere se intervenire in profondità (risanamento strutturale) o superficialmente, limitando l'intervento allo strato di usura ed eventualmente di binder (risanamento funzionale). L'impiego di geotessili in campo stradale permette di migliorare le caratteristiche di resistenza degli strati legati e non legati, contribuendo non poco all'effettiva riuscita delle applicazioni ove sono coinvolti, quindi anche in entrambi i risanamenti sopra citati.

### **(4.d) MATERIALI E TECNICHE DI SIGILLATURA DELLE FESSURE**

La manutenzione di un'infrastruttura stradale rappresenta quel complesso di operazioni e attività tese a conservare le caratteristiche funzionali e strutturali. Progettazione, realizzazione, esercizio e manutenzione sono solo tappe successive di uno stesso disegno generale che non può essere scisso, concettualmente e praticamente, né dai progettisti, né dagli esecutori, né dai gestori dell'infrastruttura.

Infine è opportuno ricordare che è più vantaggioso, in termini economici ed operativi, intervenire per sanare degradazioni superficiali piuttosto che strutturali. Di fondamentale importanza è impedire, attraverso la sigillatura, che l'acqua penetri entro fessure e giunti: oltre a degradare gli strati legati e a ridurre la capacità portante di quelli non legati (producendo il dilavamento delle frazioni fini cementanti il misto granulare, o peggio ancora causando il rigonfiamento di eventuali materiali coesivi, tipo argilla e limo, in esso presenti), con conseguente accelerazione del fenomeno di fatica in atto, accentua gli effetti del gelo e disgelo.

Il tipo di intervento manutentivo più appropriato dipende principalmente dallo stato della pavimentazione e quindi dalla densità e delle condizioni generali delle fessure:

- Una densità elevata necessita di trattamenti superficiali o profondi a seconda dei casi (rifacimento degli strati neri esclusivamente o anche risistemazione fondazione per problemi strutturali);
- Una densità moderata, con un livello di deterioramento elevato delle superfici laterali (fessurazione "a pelle di cocodrillo" (Fig. 1) dovuta a bassa capacità portante, ormaimento, fatica), necessita di operazioni di rappezzo (o rattoppo) eseguibili in modo migliore anche con geogriglie polimeriche o metalliche;
- Una densità limitata, con un livello di deterioramento delle superfici moderato, necessita di operazioni di sigillatura o riempimento (fessurazioni longitudinali, trasversali, oblique).

Quest'ultima è la tecnica preferibile, giacché è buona norma intervenire proprio quando la densità delle fessure non è elevata e le condizioni non sono ancora critiche. Tuttavia, poiché questo non sempre avviene, è bene evidenziare che la sigillatura ed il riempimento di fessure molto dense e deteriorate, oltre ad essere antieconomico e tecnicamente inadatto, produce una azione lenitiva il cui effetto risulterà molto breve.

Le *fessure trasversali* (Fig. 2), orientate ortogonalmente all'asse stradale, sono dovute al ritiro naturale della pavimentazione alle basse temperature o all'azione del gelo; le *fessure longitudinali* (Fig. 3) invece dipendono principalmente dalle ripetute azioni di carico (fenomeni di fatica), ma anche da una non corretta tecnica costruttiva (es. errata posa di reti metalliche o nell'ampliamento di una carreggiata), dall'uso di macchinari inadatti, e da condizioni climatiche ed ambientali severe; rare sono invece le *fessure oblique* (le quali ad esempio si formano per la presenza di pozzetti vari e caditoie in intersezioni stradali a raso), più difficili da trattare.



Fig. 1. Ormaiature e fessure a pelle di cocodrillo prima della manutenzione, Strada 771 Hysta-Arkhyttan, Svezia.



Fig. 2. Fessura trasversale dovuta alle basse temperature.



Fig. 3. Fessura longitudinale: si nota il suo termine all'inizio della zona rinforzata con rete elettrosaldata, Strada 742 Aneset-Flarken, Svezia.

Ricordiamo inoltre il fenomeno della *fessurazione riflessa* che consiste nella propagazione delle fessure della vecchia pavimentazione attraverso il nuovo strato superficiale d'usura dopo la ripavimentazione, se non si adottano opportuni provvedimenti, come le geogriglie o meglio reti elettrosaldate d'acciaio.

✓ *Sigillatura e riempimento a caldo.*

Per *sigillatura* di una fessura si intende il posizionamento di materiale bituminoso, quasi sempre modificato, intorno in superficie e dentro la zona lesionata in modo da prevenire infiltrazioni di acqua e realizzare una miscela che aderisca completamente ai bordi della lesione così da essere in grado di chiuderla totalmente. In genere sono preferibili materiali bituminosi modificati perché creano un composto elastico in grado di seguire i movimenti continui di apertura e chiusura della fessura, soprattutto alle basse temperature.

Per *riempimento* di una fessura si intende invece il posizionamento di materiale bituminoso solo dentro la zona lesionata, allo scopo di ridurre l'infiltrazione d'acqua e di rinforzare la pavimentazione; in questo caso essendo consentiti piccoli movimenti della sovrastruttura, si ha la possibilità di usare materiali meno specializzati e quindi più economici. Nelle pavimentazioni rigide i prodotti riempitivi sono materiali come legno dolce, fibre sintetiche (polimeriche), juta, elementi plastici in genere, al di sopra dei quali si esegue sempre la sigillatura a caldo (usando bitume prevalentemente) o a freddo (resine mono/bicomponenti, preformati compressibili).

La sigillatura, oltre ad essere di più difficile esecuzione, richiede maggiori precauzioni, costi più elevati, tecniche più sofisticate; tuttavia essa è più efficace del riempimento ed aumenta la vita utile dell'infrastruttura viaria.

I materiali più usati sono il tradizionale mastice bituminoso (bitume + filler + sabbia), il mastice di bitume modificato, leganti polimerici "caricati" con sabbia od aggregati di piccola granulometria, resine o polimeri bicomponenti (o copolimeri, ossia ottenuti dalla polimerizzazione di due o più monomeri diversi) con sabbia.

*Il mastice d'asfalto*

Generalmente è il prodotto risultante dalla mescolanza a caldo di bitume con polvere di roccia asfaltica avente un tenore di bitume del 15%; viene messo in commercio in pani cilindrici del peso di 25 kg circa. L'aggregato minerale, che può essere anche filler o sabbia, deve risultare passante al setaccio di 2 mm.

Semplice oltre ad essere utilizzato per trattamenti di fessure a caldo, è impiegato nelle impermeabilizzazioni di terrazze e simili; mescolato a ghiaietto serve per realizzare pavimentazioni stradali in asfalto colato, soprattutto nei marciapiedi delle strade urbane.

Le operazioni da seguire nel trattamento delle fessure sono le seguenti:

- Incisione della fessura;



- Pulitura ed asciugatura della fessura;
- Preparazione ed applicazione del materiale;
- Finitura/modellamento del materiale utilizzato;
- Protezione del trattamento.

La prima attività e le ultime due possono essere considerate opzionali. L'incisione della fessura viene eseguita quando si opera in regioni con significative variazioni di temperatura annuali, tipiche quindi delle Regioni del Nord, in modo da ottenere un fattore di forma che possa fornire una adeguata flessibilità e quindi una maggiore resistenza ai movimenti relativi della fessura.

L'obiettivo di questa operazione è quello di creare un serbatoio di forma rettangolare e più uniforme possibile per tutta la lunghezza della fessura, aspetto fondamentale per la realizzazione *backer rod*. La pulitura e asciugatura della fessura è probabilmente il passaggio più importante nelle operazioni di sigillatura o riempimento: infatti, la più alta percentuale di insuccesso in questi trattamenti è rappresentata dalla perdita di adesione, fenomeno in genere dovuto alla presenza di polvere o all'umidità all'interno delle pareti delle fessure. Le procedure utilizzate per effettuare tale trattamento sono essenzialmente quattro: pulitura a getto d'aria fredda o calda, sabbiatura, spazzolatura. La preparazione ed applicazione del materiale riguarda le indicazioni sulla minima temperatura di applicazione e sulla massima temperatura alla quale può essere scaldato il materiale senza che questo perda le sue caratteristiche (cosiddetta temperatura di sicurezza, che in genere è maggiore di 11÷17 °C rispetto alla minima), il tempo per il quale il riscaldamento può essere prolungato, nonché la temperatura e l'umidità della pavimentazione, necessarie per poter effettuare correttamente il trattamento.

La finitura/modellamento del materiale utilizzato può essere eseguita in due modi: il primo consiste nell'attaccare un apposito disco modellatore alla parte terminale della lancia di distribuzione del materiale, mentre il secondo consiste nell'utilizzare, in serie con l'ugello applicatore del sigillante, un raschiatoio per modellare il prodotto colato mediante un apposito elemento a forma di "U" o "V".

La protezione del trattamento, effettuata mediante una sua temporanea copertura per mezzo di carta assorbente, sabbia o polvere calcarea, risulta necessaria per prevenire fenomeni di *fluage* (scorrimento viscoso). E' alle volte impiegato un prodotto innovativo, il bitume modificato con granulato di gomma da pneumatici ottenuto con Processo Wet (legante AR), altamente prestazionale.



#### ✓ *Sigillatura a freddo.*

Le operazioni descritte risultano evidentemente semplificate nelle applicazioni a freddo. In modo particolare l'utilizzo di *nastri autoadesivi elastoplastici bituminosi*, estrusi e prefabbricati industrialmente, permette di effettuare l'intervento di manutenzione con un elevato controllo dei dosaggi, mediante l'utilizzo di semplici attrezzature, minimizzando le operazioni di preparazione e applicazione del sigillante, eliminando le fasi di finitura e modellamento affidate all'azione costipante del traffico. Nel mercato vi sono anche nastri compressibili di neoprene (policloroprene) o di altre gomme sintetiche (SBR, EPDM, TPE) pigmentabili con vari colori per andare incontro alle esigenze estetiche più svariate (vedi pavimentazioni colorate, punto (1.g)), anche se il nerofumo garantisce la migliore stabilità cromatica. Gli elastomeri sintetici sono utilizzati anche nella costruzione di ammortizzatori antivibranti e antisismici, nei "compensatori di deformazione" su cui vengono posate le travi prefabbricate dei ponti o di altre grandi strutture.

Le migliori prestazioni in opera sono ottenibili con nastri in mastice di bitume opportunamente modificato e/o additivato, con cariche minerali, tali da garantire le seguenti caratteristiche:

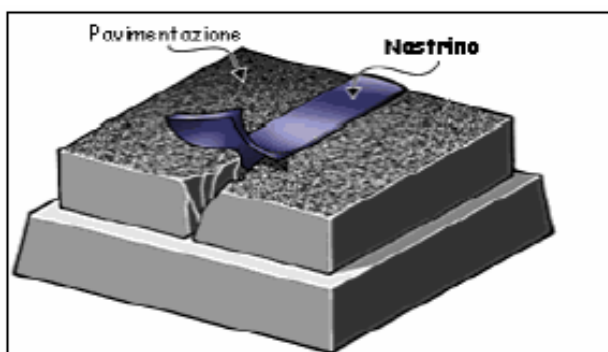
Punto di rammollimento (CNR 35/73)	> 200 °C
Penetrazione a 25 °C (CNR 24/71)	20÷30 dmm
Adesività sul cls (DIN 1996 p.19 mod)	70÷80 N/cm <sup>2</sup>
Scorrimento verticale a 60 °C/5h (SNV671916)	0.0 mm
Plasticità/Resilienza (DIN 1996 p.19 mod)	> 70%
Viscosità Brookfield (EN 13072-2)	> 150.000 cPs
Durezza (Shore A) (ASTM D 2240)	70
Resistenza Attrito Radente (CNR 105/85)	> 65

La posa non richiede particolari accorgimenti: le superfici interessate devono essere asciutte, sgrassate e libere da polvere o impurità. In presenza di lesioni di larghezza maggiore a 10 mm e non superiore a 20 mm, occorre riempire la fessura con mastice o emulsione bituminosa prima dell'applicazione. Il nastro deve essere semplicemente appoggiato sulla lesione o in corrispondenza del giunto e si fissa in maniera definitiva con l'azione costipante del traffico. Non deve essere posato a temperature inferiori a 10 °C; in tal caso si dovrà riscaldare leggermente la superficie di posa, o meglio optare per sigillature a caldo.



Misura di temperatura durante la stesa del nastro

Il profilo idoneo va scelto considerando che per effetto della rullatura del traffico veicolare, nei mesi successivi all'applicazione, la superficie del nastro si allarga in funzione del clima e dei carichi applicati. Il nastro va montato orizzontalmente lungo la fessura, in modo che sia equamente diviso tra i lembi della lesione. Per agevolare le operazioni di posa è disponibile un *trolley* applicatore manuale, che consente di semplificare maggiormente l'applicazione.



Posizionamento di nastro sulla fessura



Posa in opera di nastro su fessura con primer

Terminata l'applicazione, anche per la sigillatura a freddo, si consiglia di cospargere la superficie del nastro con sabbia o polvere (ardesia, calce, cemento o gesso), poi lasciare scorrere il traffico.

E' stato realizzato dal Laboratorio Sperimentale Stradale (LSS) del Politecnico di Milano un campo prova per la verifica di sigillature stradali con nastri preformati, a fini di studio.

L'obiettivo della ricerca è quello di sottoporre alle azioni del traffico pesante tratte di pavimentazioni sulle quali si sono eseguite applicazioni sperimentali di sigillature innovative con nastri preformati applicati alla pavimentazione in presenza di fessure, per pervenire a prodotti compatibili con la pavimentazione, incrementando le prestazioni e la durata nel tempo degli interventi. Prove di accettazione sono state eseguite in laboratorio come la prova statica di trazione, idonea a valutare la resistenza del nastrino alle azioni tangenziali indotte dai veicoli in moto.



Prova statica di trazione su nastrino

### Conclusioni

Le procedure di interventi di sigillatura, come esposto, richiedono l'esecuzione di lavorazioni articolate, per le quali è richiesta una competenza specifica. Le nuove frontiere offerte dalla sigillatura con nastri preformati scavalcano gli ostacoli delle difficoltà esecutive, offrendo un valido strumento di manutenzione stradale.

### **(4.e) MATERIALI INNOVATIVI PER LA SEGNALETICA ORIZZONTALE**

L'importanza dell'utilizzo di colori nelle pavimentazioni in genere, di qualsiasi tipo esse siano, la si è già sottolineata a proposito dei leganti polimerici (vedi punto (1.g)).

Esistono *vernici termoplastiche colorate monocomponenti*, contenenti *microaggregati antisdrucchiolevoli* (o antiderapanti), con ottima ritenzione del colore e stabilità alla luce ultravioletta, a rapido indurimento, applicabili a rullo, spruzzo, spazzola, regolo, o estrusione, in rilievo o non, ad alto *coefficiente di luminanza retroriflessa* RL (luminosità di un segnale illuminato con i proiettori dell'autoveicolo), elevato *contrasto diurno* CD e *notturno* CN (parametri misurati con Ecodyn, secondo UNI EN 1434, Fig. 1), per demarcazione e separazione degli spazi stradali (attraversamenti pedonali, corsie, carreggiate, isole, zone speciali e vietate), delimitazione parcheggi auto, indicazioni stradali. Sempre per quanto concerne la segnaletica orizzontale, si stanno adottando trattamenti superficiali con *microbilie di vetro* ed *ossido di titanio* (TiO), che permettono una maggiore visibilità notturna e in condizioni di pioggia, attraverso la retroriflessione della luce dei fari dei veicoli, presentanti tuttavia per ora, un elevato costo applicativo.

La norma UNI EN 1436 prende in considerazione gli ulteriori parametri così definiti:

- $Q_d$ , *coefficiente di luminanza in condizioni di illuminazione diffusa*, che rappresenta la luminosità di un segnale orizzontale percepita dal conducente di un autoveicolo alla luce diurna o con illuminazione stradale;
- SRT, *resistenza al derapaggio*, che fornisce informazioni sulla scivolosità del segnale;
- *Coordinate cromatiche*, rappresentanti il colore; bianco, giallo, rosso i tre più usati in Italia in ambito stradale, ai quali si aggiunge il nero in campo aeroportuale.

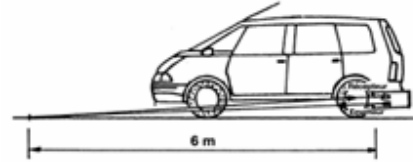


Fig. 1. Ecodyn per la simulazione e misura della visibilità della segnaletica (RL) da una distanza di 30 m.

Vernici economiche, a rapida essiccazione, e durevoli sono a base di *clorocaucciù*; per ogni segnalazione da tracciare è bene stendere prima o contemporaneamente un velo di *primer* disponibile in nero o in versione trasparente.

In commercio si trovano inoltre *inserti stradali catarifrangenti* applicati generalmente sulle strisce longitudinali di definizione delle corsie, per una loro migliore individuazione specie in tratti difficilmente illuminabili, e *barre preformate adesive* (es. in neoprene o altre resine e gomme sintetiche), di larghezza variabile, ad elevata resistenza di attrito ed usura, poste trasversalmente all'asse della carreggiata in microrilievo per segnalare l'obbligo di rallentamento, anche tramite le vibrazioni ed il rumore indotti.



## **(5) CONSIDERAZIONI FINALI E INNOVAZIONI DI RICERCA**

Al termine della relazione è importante evidenziare gli argomenti di maggiore attualità e le linee di ricerca più rilevanti per i prossimi anni nel campo delle innovazioni e della tutela dell'ambiente in rapporto ai conglomerati bituminosi.

Nuove potenzialità e conseguentemente nuovi campi di ricerca si aprono per un corretto utilizzo dei conglomerati stradali soprattutto in termini di riduzione degli impatti.

Tra gli argomenti più interessanti possiamo ricordare:

### **A) Tecniche e materiali in corso di sperimentazione:**

- L'utilizzo di bitumi schiumati per il riciclaggio in sito di strati di fondazione e strati di base come già avviene, e per strati superficiali come nuova strategia di ripristino della pavimentazione;
- Le possibilità di sviluppo dei nuovi tappeti drenanti e fonoassorbenti a doppio strato anche in ambito urbano (i "bi-strato" o DDL (*Double Draining Layer*), con la parte superiore in microdrenante, ossia con le stesse capacità di drenare l'acqua ma mediante inerti basaltici con diametro minore, e la parte inferiore con grandi vuoti e aggregati di calcare, che nell'insieme ottimizza l'uso dei materiali, usando meno materiale pregiato negli strati superiori, oltre a diminuire l'emissione sonora di rotolamento, percepita all'interno dell'auto; il bi-strato, grazie allo strato di granulometria più piccola, emette meno rumore, a parità di capacità drenante);
- “*Hydraulic bound materials*” (ceneri di fondo dell'inceneritore di rifiuti solidi urbani (RSU), e ceneri volanti “fly ash” di acciaieria) per la produzione di aggregati granulari innovativi impiegabili nelle costruzioni stradali;
- Irruvidimenti speciali monostrato a freddo (es. legante bicomponente resina e bitume applicato a 60÷80 °C con bauxite calcinata LA<10%; legante bicomponente e aggregati di cromite (scoria di acciaieria) LA<22%);
- Per quanto riguarda le pavimentazioni rigide in calcestruzzo PCC (*Portland Cement Concrete*) il sistema Flexarm+ per la realizzazione dell'armatura; la tecnica, peraltro già nota, consiste nell'utilizzare in alternativa all'armatura ordinaria, lamiere metalliche, fornite in rotoli da 250/400 metri, delle quali è più semplice ed ammortizzabile la messa in opera. Consente una automazione più spinta del cantiere, un risparmio nel tempo di realizzazione della pavimentazione ed un risparmio sulla quantità di acciaio, a parità di controllo delle aperture da fessurazione. I costi del procedimento, una volta commercialmente introdotto, dovrebbero essere più vantaggiosi di quello tradizionale;
- Conglomerati per strati di usura con loppe d'altoforno (“incinerator bottom ash” o equivalentemente “blast furnace slag”);
- Trattamenti superficiali con il metodo della pallinatura e della bocciardatura.

### **B) Nuove tecnologie in fase di miglioramento:**

- La reale applicabilità delle tecniche di riciclaggio a freddo con emulsione bituminosa, cemento, ed impiego di fresato (RAP, *Reclaimed Asphalt Pavement*) fino al 100% per la realizzazione di strati di base e di fondazione;
- Le potenzialità offerte anche dal punto di vista della tutela dell'ambiente dalle nuove pavimentazioni “perpetue” (*perpetual pavements*) o a manutenzione zero;
- Applicazione di processi biotecnologici nelle sovrastrutture stradali (potenzialità applicative di un particolare batterio, il *bacillus pasteurii*, nel campo delle costruzioni stradali; lo studio ha visto la collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e quello di Biologia molecolare dell'Università degli Studi di Palermo, il quale ha consentito di intraprendere una originale sperimentazione interdisciplinare finalizzata a verificare se il batterio, capace di produrre carbonato di calcio CaCO<sub>3</sub> (presente anche nella pasta di calcestruzzo indurita a seguito della carbonatazione), possa essere utilizzato per migliorare le caratteristiche strutturali degli strati che costituiscono le pavimentazioni stradali (il calcare prodotto è un ottimo fillerizzante, stabilizzante per il bitume));
- Sistemi di recupero del calore dalle pavimentazioni (tubazioni e pompe di calore);

- Le possibilità di impiego del diossido di titanio  $TiO_2$  (o biossido di titanio), già utilizzato nelle pavimentazioni in masselli di calcestruzzo come agente anti-smog per l'eliminazione del biossido di azoto ( $NO_2$ ), anche nei conglomerati bituminosi (reazioni di fotodegradazione ed adsorbimento);
- Rilevatori nelle pavimentazioni per segnalazioni automatiche di intervento manutentivo necessario;
- Progetto pilota per lo sviluppo di un sistema dinamico riguardante la costruzione delle pavimentazioni flessibili (manto posato mediante grandi rulli come una moquette, e recuperato allo stesso modo alla fine della sua vita utile, o per interventi di sostituzione straordinaria), finanziato dal Ministero Olandese dei Trasporti dal 1996;
- Lo studio, la progettazione e la realizzazione di nuovi conglomerati bituminosi antivibranti, per strati di base con parte dello scheletro litico costituito da granulato di gomma;
- Le possibilità di impiego e ottimizzazione delle tecniche di riciclaggio a caldo e a freddo, anche per i conglomerati bituminosi drenanti e fonoassorbenti.

*C) Problemi in fase di studio e soluzione:*

- Il problema connesso al controllo ed al monitoraggio degli IPA (idrocarburi policiclici aromatici condensati) contenuti nei conglomerati bituminosi e nei bitumi, ed all'impatto sull'ambiente e sulla salute pubblica conseguente alla loro dispersione in atmosfera a causa della *lisciviazione* della matrice stradale;
- Lo studio e la valutazione del trasporto degli inquinanti sulla superficie stradale ed il loro rapporto con le caratteristiche dei conglomerati bituminosi (*build up and wash off*);
- Evoluzione di macchine e tecnologie per i lavori stradali; l'introduzione di tappeti a basso spessore (*thin layer*) e del manto DDL, hanno fatto sviluppare pavimentatrici capaci di stendere contemporaneamente due strati di conglomerato, mentre l'esigenza di aggregati aventi dimensioni sempre maggiori (per la drenabilità, stabilità e durata), ha altresì influenzato lo sviluppo delle tecniche di stesa e compattazione *high frequency roller*, 54÷71 Hz (ad ampiezza dell'onda diminuita, 0.3÷0.7 mm), specie per manti DFA.

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

## (6) BIBLIOGRAFIA

- Pubblicazione “Strade & Autostrade”, numeri vari;
- Pubblicazione “Rassegna del bitume”, SITEB, numeri vari;
- “Indagine sperimentale sul riciclaggio a freddo delle pavimentazioni stradali degradate con bitume schiumato e cemento”, S. Colagrande, Università degli Studi di L’Aquila, M. De Vincentis, convegno Roseto degli Abruzzi 13/03/2004;
- “Riqualificazione di pavimentazioni con riciclaggio a freddo mediante emulsione di bitume schiumato”, P. Bernardinetti, L. Lanucara, Autostrade S.p.a., Infravia 2001;
- “Le argille espanse nella costruzione di rilevati artificiali”, C. Di Prisco, Politecnico di Milano, C. Luisi, Laterlite S.p.a.;
- “L’esperienza del gruppo ASTM nel riciclaggio a freddo delle pavimentazioni”, E. Santagata e G. Chiappinelli, Politecnico di Torino, M. Garozzo e M. Mori, Sineco;
- “Conglomerati bituminosi e tutela dell’ambiente: esperienze dell’Università di Bologna; Le strade nel territorio: una progettazione ambientalmente sostenibile; V sessione convegno (Strade e asfalti: soluzioni ecobiocompatibili)”, A. Simone, Università di Bologna, San Marino di Bentivoglio (BO) 19/09/2003;
- “Applicazioni con emulsioni bituminose per una tecnologia a ridotto impatto ambientale; Le strade nel territorio: una progettazione ambientalmente sostenibile; V sessione convegno (Strade e asfalti: soluzioni ecobiocompatibili)”, S. Ravaoli, SITEB, San Marino di Bentivoglio (BO) 19/09/2003;
- “Esperienze aeroportuali: pavimentazioni realizzate con i prodotti della linea Agip Eliflex®”, F. Orengo, Agip petroli, giornata di studio sul bitume stradale, auditorium EniTecnologie, 16/10/2002;
- “Sviluppi normativi nel campo dei bitumi stradali”, M. R. Valentinetti, Agip petroli, giornata di studio sul bitume stradale, auditorium EniTecnologie, 16/10/2002;
- “Manuale del Geometra”, AA.VV., Edizioni Cremonese, 1998;
- “Tecnologia dei materiali e delle costruzioni”, vol. 2 tomo 2, G. L. Rinaldi, Ed. Zanichelli, 2002;
- “Corso di Costruzioni”, vol. 3/2, U. Alasia, Ed. SEI, 1999;
- “Chimica applicata ai materiali da costruzione”, P. Bassi, Ed. SEI, 1993;
- “Tecnica stradale, introduzione allo studio delle prove d’accettazione dei materiali”, M. Pasetto, Università degli Studi di Padova, Istituto di Strade e Trasporti, 1994;
- “Potenziamento strutturale di pavimentazioni stradali ed aeroportuali mediante reti in acciaio composite” (Reti “Mesh Track<sup>TM</sup>”), M. Pasetto, N. Baldo, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, XIII Convegno Nazionale SIIV – U. d. S. Padova, 30/31 ottobre 2003 –;
- “Studio delle possibilità di impiego delle macerie di demolizione per la costruzione degli strati di sottofondo delle sovrastrutture stradali – Caso di studio: Strada Provinciale n° 1, Cagliari – ”, Silvia Portas, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, XIII Convegno Nazionale SIIV – U. d. S. Padova, 30/31 ottobre 2003 –;
- “Studio teorico-sperimentale di sovrastrutture flessibili rinforzate con reti metalliche” (Reti “Road Mesh®”), G. Bosurgi – Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate, Università di Messina –, S. Cafiso, S. Taormina – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Catania –, XIII Convegno Nazionale SIIV – U. d. S. Padova, 30/31 ottobre 2003 –;
- “Studio sperimentale sull’impiego del CRM (Crumb Rubber Modifier) nei conglomerati bituminosi secondo processo Dry”, B. Celauro, C. Celauro, A. Di Francisca, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e Centro Interdipartimentale di Ricerca per il Monitoraggio dell’Economia e del Territorio, XIII Convegno Nazionale SIIV – U. d. S. Padova, 30/31 ottobre 2003 –;
- “Studio di conglomerati bituminosi con granulato di gomma proveniente da pneumatici dimessi”, G. Di Mino, P. Tripodi, Università degli Studi di Palermo, DIIV, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;
- “Valutazione comparativa di emulsioni bituminose modificate per il riciclaggio a freddo dei conglomerati bituminosi”, E. Santagata, G. Chiappinelli, Politecnico di Torino, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;

- “Stone Mastix Asphalt: performance e caratteristiche superficiali”, F. G. Praticò – Università Mediterranea di Reggio Calabria, DIMET –, R. Vaiana – Università degli Studi di Palermo, DIIV –, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;
- “Analisi della dissipazione dell’energia e dell’accumulo del danno per la valutazione del comportamento a fatica del *Gussasphalt*”, E. Santagata, C. Graffi, Politecnico di Torino, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;
- “Impiego dei materiali di riciclo nella confezione dei misti cementati”, M. Bocci, F. Cardone – Istituto di Strade e Trasporti, U. d. S. Ancona –, S. Colagrande – Dipartimento di Architettura e Urbanistica, U. d. S. L’Aquila –, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;
- “Caratterizzazione reologica dei leganti nei conglomerati bituminosi riciclati a caldo”, M. Bocci, G. Cerni, S. Tattolo, Istituto di Strade e Trasporti, U. d. S. Ancona, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;
- “Influenza della geometria e forma degli aggregati sulle proprietà volumetriche di conglomerati bituminosi chiusi ed aperti”, E. Santagata – DITIC, Politecnico di Torino –, F. Canestrari – IST, U. d. S. Ancona –, F. Giuliani – DICATA, U. d. S. Parma –, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;
- “Stese sperimentali per la valutazione delle proprietà volumetriche e meccaniche dei conglomerati bituminosi”, M. Bassani, E. Santagata – Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino –, XII Convegno Internazionale SIIV – U. d. S. Parma, 30/31 ottobre 2002 –;
- Capitolato Speciale d’Appalto – Progetto Esecutivo dei lavori di ordinaria manutenzione per il risanamento del ponte sul fiume Adige a Ceradello (opera n° 254 a pr. km 197+308) – A 22, Autostrada del Brennero S.p.A., Trento;
- Capitolato Speciale d’Appalto – Progetto Esecutivo Linea Ferroviaria A.C. Milano-Venezia, Tratta A.C. Verona-Venezia, Sub-tratta A.C. Padova-Mestre, Lotto 04 – Italferr S.p.A., Roma;
- “Sperimentazioni in vera grandezza”, LSS, DIAR, Politecnico di Milano;
- “Manuale REFLEX”, Progetto di ricerca, contract no.: BRPR-CT98-0816 ([www.buildup.it](http://www.buildup.it)).

Si ringraziano le seguenti imprese, enti di ricerca, ed enti di gestione, pubblici o privati, per il materiale di carattere tecnico-informativo e fotografico:

- ADBRUF, Road Safety Materials;
- CRS, Centro Ricerche Stradali, Autovie Venete S.p.a.;
- ANAS S.p.a.;
- Autovie Venete S.p.a.;
- Eco.Pne.Us., consorzio per il recupero e il riutilizzo dei pneumatici;
- Bitem Group;
- Contento Trade;
- Iterchimica;
- Giachino Bitumi;
- STARASPHALT S.r.l..





