CHI_mar_C&giavarini_XP 7-04-2004 10:29 Pagina 68

di Carlo Giavarini
Presidente Siteb (Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade). carlo.giavarini@uniroma1.it

ASFALTO E INNOVAZIONE

L'articolo riassume alcune delle recenti innovazioni introdotte nei leganti e conglomerati stradali, a dimostrazione dell'attuale dinamicità dell'industria del settore. Vengono citati i manti drenanti-fonoassorbenti, il bitume espanso, gli asfalti colorati e "tiepidi", nonché altre recenti innovazioni introdotte in Olanda (asfalto in rulli e recupero di calore dalle pavimentazioni). Viene altresì sottolineato il crescente impiego dei materiali polimerici nei manti stradali.

Nel linguaggio comune la parola asfalto assume un significato molto esteso, comprendendo sia il bitume (e cioè il legante dei conglomerati stradali), sia il conglomerato con cui sono fatte le pavimentazioni, nonché il prodotto naturale, noto e usato da tempo immemorabile (1-4). È per ciò che spesso usiamo questo termine, sicuri di essere capiti da tutti, per superare la confusione nata già nell'antichità quando, per indicare lo stesso materiale, i Greci adottarono la radice accadica di asfalto, mentre i Romani usarono la derivazione sanscrita della parola bitume. Questo pasticcio permane ancora oggi, in quanto gli Americani continuano a chiamare asfalto ciò che in Europa si definisce bitume. L'asfalto è un protagonista del nostro paesaggio e della città metropolitana.

Meriterebbe quindi un posto di rispetto, se non altro per l'estensione e l'ubiquità della sua presenza; eppure figura fra gli esclusi. È talmente connaturato con l'immagine urbana ed extraurbana, che non vi prestiamo più attenzione. Il legante del conglomerato asfaltico, ovvero il bitume, viene oggi prodotto quasi esclusivamente in raffineria, dove costituisce il residuo della distillazione sotto vuoto del grezzo. L'asfalto naturale (in Figura è mostrato un capitello artistico fatto con asfalto naturale di Ragusa (3)) trova applicazione per usi particolari (per esempio asfalto colato per marciapiedi).

L'industria che gravita intorno al variegato mondo dell'asfalto presenta molte sfaccettature; nel suo complesso essa può sembrare statica, e forse lo è stata per un lungo periodo. Ora però, già da uno o due decenni, si sta muovendo con un'accelerazione crescente: gli sviluppi e le innovazioni sono tanti, alcuni di essi non immaginabili fino a pochi anni fa. Tentiamo, nel seguito, di sintetizzare alcuni degli aspetti più innovativi degli ultimi tempi, relativi ai leganti del conglomerato bituminoso. Tralasciamo, per il momento, la citazione dei notevoli progressi fatti (soprattutto negli Stati Uniti) nel campo della chimica dei bitumi e delle interazioni tra legante bituminoso e aggregati. Omettiamo anche di parlare dell'evoluzione, in senso prestazionale, della normativa, con conseguente "trionfo" della reologia, nel campo dei leganti asfaltici.

La rivoluzione dei manti drenanti

Una piccola rivoluzione nel settore è stata, negli ultimi 10-20 anni, la diffusione e il progressivo perfezionamento dell'asfalto cosiddetto "poroso", ovvero delle pavimentazioni drenanti-fonoassorbenti.

Si è ribaltato il concetto che voleva il manto stradale assolutamente impermeabile, per passare a pavimentazioni capaci di assorbire l'acqua (alla stregua di immense superfici filtranti), rimanendo sempre asciutte. Con un'adatta distribuzione dei vuoti, tali pavimentazioni riescono anche ad assorbire parte della rumorosità prodotta dal rotolamento dei pneumatici (Figura 2).

Per il profano è difficile immaginare tutta la ricerca e la tecnologia che stanno dietro a questa innovazione. La creazione di porosità nel manto asfaltico è ottenuta tramite una discontinuità nella granulometria degli inerti, che vengono quindi ad avere meno punti di contatto tra di loro. Per mantenere elevate le caratteristiche meccaniche del conglomerato, occorre un legante con superiori caratteristiche rispetto ai bitumi tradizionali: la superficie di contatto su cui il legante può agire è infatti drasticamente ridotta. Sono stati quindi messi a punto bitumi "modificati" con piccole percentuali (3-6%) di polimeri, onde migliorare le caratteristiche visco-elastiche, adesive

e reologiche in genere (5, 6). I polipropileni atattici ("cere propileniche"), sottoprodotto della polimerizzazione del propilene con i vecchi processi, erano da tempo impiegati per produrre membrane bituminose impermeabilizzanti (7). In tal caso, però, al polimero (di basso costo e impiegato in percentuali elevate 12-20% in peso), non vengono richieste particolari doti di stabilità o viscoelastiche: la membrana viene infatti fabbricata e immediatamente raffreddata, dopo la miscelazione del bitume con il polimero.

Il bitume modificato (PMB) per usi stradali deve invece mantenere una sua relativa omogeneità anche durante lo stoccaggio a caldo ad alte temperature 150-170 °C, senza segregare il polimero. Ciò non è facile date le diverse densità e viscosità dei due materiali (il polimero e il bitume), costretti ad un matrimonio che non amano; nel caso più generale non si creano infatti legami chimici tra additivo polimerico e bitume. Inoltre, per avere un prodotto efficace, occorre (pur impiegando la minima quantità possibile di polimero, per ovvie ragioni economiche) creare una fase continua di polimero in cui il bitume, pur essendo preponderante (ca. 95%) viene disperso nel polimero sotto forma di minute particelle (5).

Le proprietà termiche e la "lavorabilità" del legante non devono essere sostanzialmente modificate, onde permetterne l'applicazione con le normali tecniche stradali. Pur essendo stati studiati e messi a punto vari sistemi polimerici (6), i prodotti oggi più usati appartengono alla classe dei termoelastomeri del tipo SBS (stirene-butadiene-stirene); sono stati impiegati anche polimeri come l'EVA (etilen-vinilacetato) e altri ancora.

L'estensione dei manti drenanti/fonoassorbenti non potrà che aumentare l'uso dei PMB, che oggi in Italia rappresentano circa il 7÷8%, rispetto ai bitumi tradizionali. Considerando che il consumo annuale di bitume nel nostro paese è di ca. 2,5 milioni di t/anno, le potenzialità di impiego dei polimeri in questo settore non vanno sottovalutate. I leganti modificati offrono anche la possibilità di produrre pavimentazioni ad "alto modulo" (ad esempio per gli aeroporti e per i piazzali per container) con elevate caratteristiche di resistenza, capaci di sopportare l'impatto anche dei futuri colossi dell'aria (airbus, A-600). In tal caso la pavimentazione sarà "chiusa" e non porosa. Sia in Europa sia negli Usa sono allo studio pavimentazioni cosiddette "long lasting", o addirittura "perpetual", basate sull'uso di questi leganti speciali. L'introduzione sempre più estesa dei PMB ha creato anche la necessità di avere normative speciali (per esempio EN-12591/99) per la loro valutazione; le loro caratteristiche, infatti, sono diverse da quelle dei tradizionali leganti bituminosi.

Il bitume "schiumato" e le tecniche "a freddo"

La prima crisi petrolifera del 1973 aveva incentivato l'introduzione, soprattutto in Francia, dei conglomerati cosiddetti "a freddo", prodotti impiegando emulsioni acquose di bitume, anziché bitume tal quale (8). Tale tecnica evita la necessità di produrre e stendere il conglomerato ad alta temperatura (per rammollire il bitume) ed evita anche la produzione di fumi e odori.

L'impiego di adatti agenti emulsionanti e la necessità di "maitriser" la rottura dell'emulsione al momento giusto, rendono questa tecnica più "sofisticata" di quelle a caldo; la sua diffusione è stata quindi limitata ad alcuni Paesi (soprattutto Francia). Le emulsioni trovano comunque impieghi essenziali, quali impermeabilizzanti e "mani di attacco" tra gli strati di conglomerato, nonché, oggi, nel riciclaggio *in situ* dei manti asfaltici.

Anche le emulsioni vengono oggi modificate con polimeri. Pur avendo l'emulsione di bitume un notevole "contenuto chimico" ed essendo più che mai attuale (soprattutto nella forma modificata con polimeri), non la vogliamo annoverare tra le innovazioni recenti, per lasciare spazio ad un'altra applicazione innovativa, che si sta

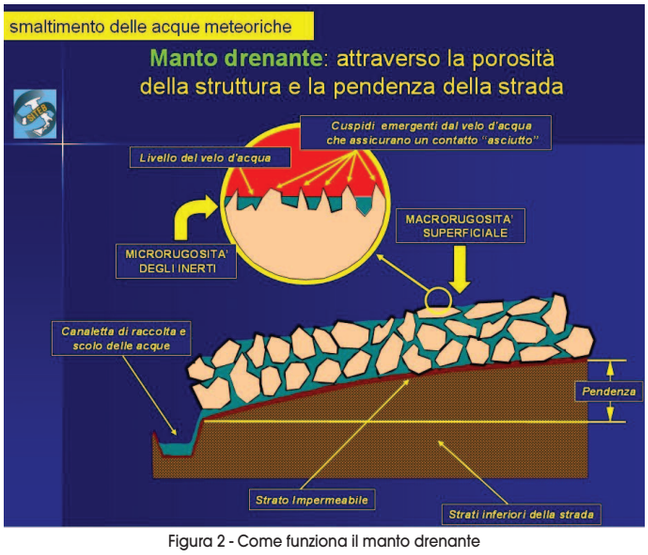

Figura 2 - Come funziona il manto drenante

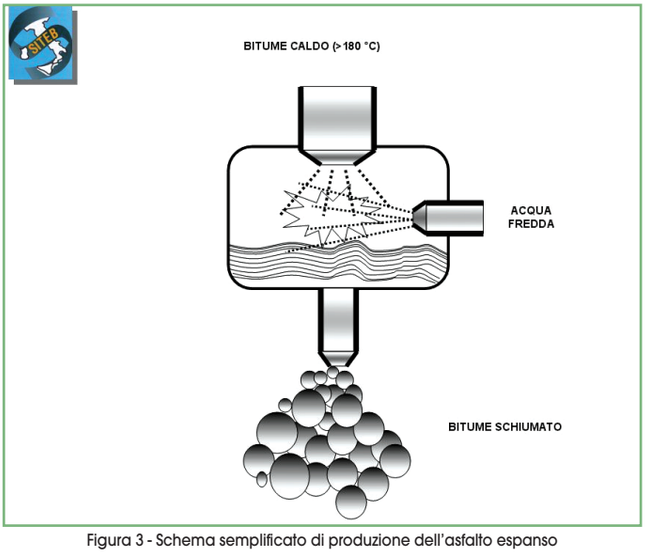

Figura 3 - Schema semplificato di produzione dell'asfalto espanso

CHI_mar_C&giavarini_XP 7-04-2004 10:30 Pagina 70

rapidamente diffondendo: il bitume espanso, o "schiumato" come viene comunemente chiamato dagli addetti lavori (9). Note già da quasi cinquant'anni (10), le potenzialità del bitume espanso sono state sfruttate solo nei tempi recenti. Il premio conferito recentemente da Siteb a tre importanti lavori applicativi fatti con l'impiego di questa tecnica, ne dimostra l'importanza e la rapida diffusione (11). Quando l'acqua fredda (15-25 °C) viene a contatto con il bitume a 160-200 °C, si ha un'istantanea esplosione della miscela, dovuta alla violenta evaporazione dell'acqua (Figura 3). Il bitume aumenta di circa dieci volte il proprio volume, alterando temporaneamente le proprie caratteristiche fisiche, così da acquisire una ridotta viscosità, ideale per la miscelazione con gli aggregati. La quantità di umidità necessaria per raggiungere le proprietà richieste è generalmente del 2,0÷2,5% in peso.

L'aggiunta di additivi tensioattivi può aumentare il rapporto di espansione fino a 15 volte e più, con tempi di dimezzamento (tempo in secondi che la schiuma impiega a dimezzare il proprio volume) di 60". Il bitume espanso può venir impiegato per consolidare gli strati di sottofondo e per i lavori di riciclaggio a freddo. Non è normalmente adatto per gli strati superiori, o comunque ad alta resistenza, delle pavimentazioni.

Gli asfalti colorati

I manti colorati permettono di differenziare le carreggiate, con notevoli vantaggi per la sicurezza; essi migliorano inoltre l'impatto con l'ambiente e aumentano la riflessione della luce nei tunnel o nelle ore notturne. In città è possibile migliorare l'aspetto estetico e la compatibilità con il patrimonio architettonico (12), nonché separare spazi multifunzionali (aree giochi, piazze, piste ciclabili ecc.). La recente mostra organizzata dalla Triennale di Milano e patrocinata da Siteb, ha evidenziato l'interesse degli architetti e degli urbanisti per questi materiali (Figura 4) (13). Il successo degli asfalti colorati, rispetto ad altri materiali, deriva da una serie di vantaggi: rapidità di messa in opera e in servizio, adattabilità a qualsiasi sottofondo, costi limitati, impiego di tecnologie tradizionali. L'asfalto colorato si può produrre in vari modi, dipendentemente dal prodotto che si desidera ottenere alla fine. Determinate colorazioni, come il bruno-rosso e il verde-scuro, possono ottenersi con i normali bitumi neri, giocando sull'impiego di pigmenti e inerti colorati.

Un'ulteriore variazione del colore e della luminosità può essere ottenuta, dopo avere scelto gli inerti adatti, mediante leggera abrasione superficiale, per mettere in maggior evidenza gli inerti stessi. Si possono anche impiegare bitumi parzialmente deasfaltenati: togliendo gli asfalteni, responsabili del colore nero, il bitume appare più chiaro (ma anche meno "consistente").

Per avere però colorazioni brillanti, per esempio gialle, rosa, azzurre o bianche, si deve però ricorrere a leganti completamente trasparenti, di tipo polimerico. Anche questo è un importante campo (fra l'altro in notevole espansione) di impiego dei polimeri.

Quello dei leganti polimerici per le pavimentazioni in conglomerato o per i mastici "asfaltici" è un settore tutt'ora aperto alla ricerca applicata: il problema è quello di trovare un materiale polimerico (o una miscela di materiali) non eccessivamente costoso, durevole e avente caratteristiche viscoelastiche e termiche simili a quelle del bitume. Per il momento vengono usati polimeri del tipo SBS, EVA, e miscele varie, opportunamente pigmentate. Si possono così produrre manti aventi qualsiasi colorazione, impiegando le normali tecnologie di stesa (ovviamente con macchine perfettamente pulite).

Gli asfalti "tiepidi"

La produzione e stesa del conglomerato bituminoso possono dar luogo, specie se effettuate ad alte temperature (>150-160 °C), all'emissione di fumi e odori. Questo problema è maggiore per l'asfalto cosiddetto "colato" (steso senza rullatura, per esempio sui marciapiedi) per il quale si devono impiegare temperature più alte del consueto, fra l'altro, spesso, in ambiente urbano o chiuso.

L'emissione di fumi aumenta con la temperatura con legge esponenziale tipo quella di Arrhenius: un abbassamento di soli 10 °C può quindi dimezzare l'emissione di fumi. Recenti studi e prove hanno dimostrato che si può abbassare, anche di 30-40 °C, la temperatura di produzione e applicazione mediante l'aggiunta di speciali additivi: "speciali" per gli applicatori dell'asfalto, ma non certamente per i chimici (14). Uno di questi additivi è costituito dalle paraffine prodotte dai processi Fischer-Tropsch (F.T.), oggi rivitalizzati per trasformare il gas naturale in prodotti liquidi ("gas to liquid"). Apparentemente sembra un controsenso aggiungere paraffine al bitume per variarne la viscosità, in quanto è noto che in molti Paesi esiste un limite per il contenuto di paraffine nel bitume. Il comportamento delle

Figura 4 - Esempio di applicazione di pavimentazioni colorate

CHI_mar_C&giavarini_XP 7-04-2004 10:30 Pagina 71

paraffine nel bitume, però, 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 tra 15 e 70 °C circa; le cere microcristalline del bitume si pongono nelle zone superiori di tali intervalli (tipicamente tra 40 a 60 °C, per la fusione). Oltre a influenzare le proprietà a bassa temperatura (punto Fraass), le paraffine del bitume fondono proprio nell'intervallo di utilizzazione (soprattutto estivo) del conglomerato bituminoso stradale. Le paraffine F.T. contengono idrocarburi alifatici con catene più lunghe e hanno punti di fusione compresi fra 80 e 110 °C, come mostrato dalle curve DSC (Differential Scanning Calorimeter) riportate in Figura 5. Le paraffine F.T. aumentano anche la consistenza del legante e, se aggiunte in percentuali inferiori al 4%, non sembrano influenzare il punto di rottura Fraass a bassa temperatura. In pratica, le aggiunta consigliate sono del 3% per abbassare di 30-40 °C la

INQUINAMENTO E FOTODEGRADAZIONE

Disinquinare l'ambiente dagli effetti nocivi del traffico, degli impianti di riscaldamento, dei reattori industriali sfruttando i processi di fotodegradazione catalitica innescata da opportuni additivi all'asfalto (ambiente esterno), ai muri delle nostre case (ambiente interno): questa è la notizia che attraverso articoli più o meno scientifici, più o meno divulgativi, è ripetutamente trapelata sulla stampa quotidiana e su quella specialistica. C'è da crederci? La base scientifica è corretta. Infatti i processi fotocatalitici mediati dai semiconduttori permettono di degradare una grande varietà di molecole potenzialmente tossiche.

La meccanica quantistica descrive la struttura elettronica dei semiconduttori attraverso la teoria delle bande: le bande interessate al processo catalitico sono l'ultima occupata (o livello di Fermi) e la prima vuota (o di conduzione); in condizioni normali, gli elettroni non sono in grado di saltare dal livello di Fermi a quello di conduzione. In seguito ad un opportuno stimolo però (quale ad esempio uno stimolo luminoso) tale barriera energetica può essere superata: se un fotone di opportuna lunghezza d'onda colpisce la particella del semiconduttore, cedendo la propria energia ad un elettrone nella banda di valenza, quest'ultimo potrà saltare nella banda vuota di conduzione. Questo insieme di eventi porta alla generazione di una lacuna elettronica nel livello di Fermi che può dare inizio, di concerto con l'elettrone passato nel livello di conduzione, ai seguenti processi:

- l'elettrone può tornare nel livello di partenza dal quale è stato eccitato, cedendo all'ambiente il proprio surplus energetico sotto forma di calore;
- l'elettrone può realizzare un processo di riduzione, venendo ceduto ad una specie riducibile presente in soluzione;
- la lacuna elettronica può realizzare un processo ossidativo strappando un elettrone ad una specie ossidabile presente in soluzione.

Questi processi avvengono all'interfaccia liquido/semiconduttore ossia quando le coppie elettrone/lacuna positiva formatesi nell'ossido per interazione con la radiazione si sono diffuse sulla superficie del semiconduttore. Affinché il processo catalitico sia attivo è importante che i meccanismi di cattura di elettroni e lacune positive avvengano in un intervallo di tempo minore rispetto a quello richiesto per la ricombinazione, nell'ossido semiconduttore, della coppia elettrone/ lacuna positiva. Nel caso dell'ossido di titanio (in forma cristallina anatasio più attiva del rutilo e della brookite) la letteratura esistente fornisce, per il processo fotocatalitico in soluzione acquosa un possibile meccanismo di tipo radicalico:

$$TiO_2 \xrightarrow{h\nu} e^- + h^+ \qquad (h^+ = \text{lacuna elettronica})$$

$$H_2O + h^+ \longrightarrow OH^\bullet + H^+$$

$$OH^\bullet + \text{inquinante} \longrightarrow OH^- + \text{frammenti inorganici}$$

$$O_2 + e^- \longrightarrow O_2^{\bullet\bullet} \xrightarrow{H^+} HO_2^\bullet$$

$$2HO_2^\bullet \longrightarrow O_2 + H_2O_2 \xrightarrow{O^{\bullet\bullet}} OH^\bullet + OH^-$$

Allora aggiungendo alla composizione dell'asfalto od a quella dell'intonaco per pareti interne una certa quantità di biossido di titanio e sfruttando la luce solare, o di lampade che la simulano, si potrebbe supporre di fotodegradare cataliticamente alcuni comuni inquinanti dispersi nell'ambiente. In effetti le cose non stanno esattamente così per differenti motivi. Innanzitutto la fotodegradazione è processo diverso dalla fotomineralizzazione in quanto quest'ultima corrisponde all'ultimo stadio della prima e comporta la formazione di anidride carbonica, acqua, ossidi di zolfo e di azoto e ioni comuni. Spesso invece le fotodegradazioni si fermano a stadi intermedi. Il secondo punto riguarda la particolare situazione dell'asfalto dove, se il biossido di titanio occupa volumi troppo interni, rischia di non ricevere la radiazione solare, mentre se è superficiale viene facilmente rimosso dalle ruote dei veicoli che vi passano sopra e dal calpestio. Infine per quanto riguarda i muri, essendo interni, la radiazione solare è poco attiva e la luce artificiale, in relazione all'intervallo di lunghezza d'onda che la caratterizza, non ha l'energia sufficiente a promuovere gli elettroni di valenza nella banda di conduzione del TiO_2. Molto più ragionevole allora rispetto alle ipotesi formulate sulla stampa, appare quella di membrane che immobilizzano TiO_2 e che, operando in vasche di idonee dimensioni esposte alla luce solare, possono catalizzare il risanamento di effluenti industriali inquinanti.

Luigi Campanella
Università di Roma "La Sapienza"

CHI_mar_C&giavarini_XP 7-04-2004 10:30 Pagina 72

temperatura di compattazione del conglomerato (ca. 120 °C anziché 150 °C). Un altro recente metodo per abbassare la temperatura di stesa (di circa 30 °C), propone di aggiungere al conglomerato lo 0,3% di un'adatta zeolite. La riduzione di viscosità della miscela, che a sua volta permette di ridurre la temperatura di miscelazione e stesa del conglomerato, deriva dall'emissione, da parte della zeolite, di vapor d'acqua. Tale vapore produce un effetto espansivo tramite la formazione di microschiuma, che aumenta la lavorabilità della miscela. È importante che la zeolite possa perdere il proprio contenuto d'acqua in più fasi e non in una sola.

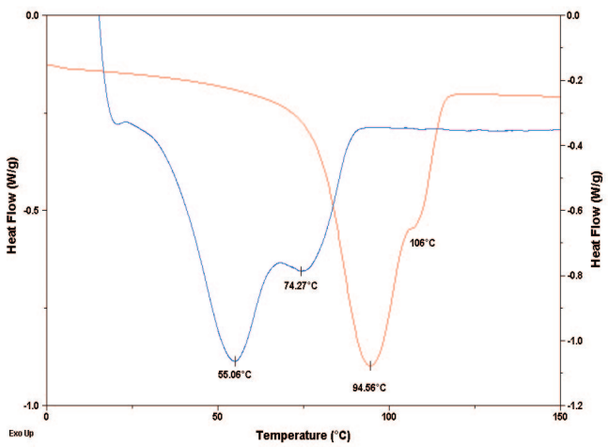

Figura 5 - Curve DSC di una cera microcristallina (curva a sinistra) e di un cera Fischer-Tropsch (curva a destra)

La gomma nell'asfalto

Esistono due possibilità di incorporare la gomma dei pneumatici fuori uso (P.F.U.) nei manti asfaltici: addizionare direttamente il polverino ottenuto dai pneumatici (per triturazione o tramite processi criogenici) o aggiungere il granulato di gomma al conglomerato asfaltico, come fosse un inerte; il primo sistema prende il nome di "wet process", il secondo di "dry process" (15). Il processo *wet* si è affermato da alcuni decenni negli Stati Uniti, soprattutto in Arizona, dove nacque ad opera dell'ing. McDonald già negli anni Sessanta dello scorso secolo. Anche in Sud Africa esiste una lunga e documentata esperienza di tali

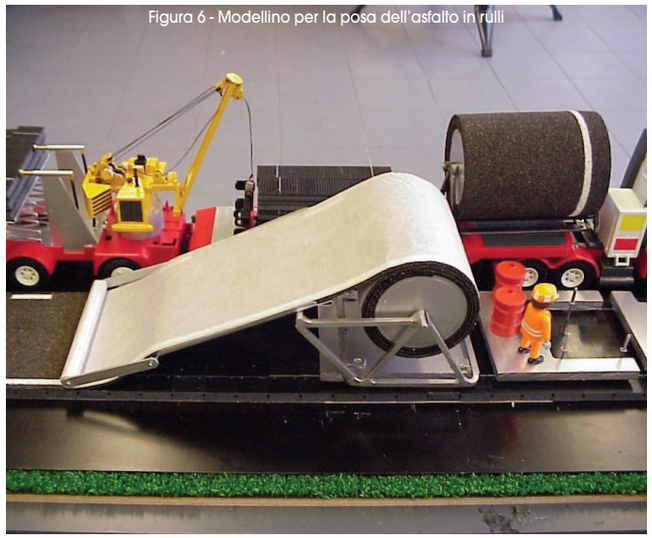

Figura 6 - Modellino per la posa dell'asfalto in rulli

applicazioni. La direttiva comunitaria che a partire dal 2006 proibisce di portare in discarica i copertoni usurati, ha dato un notevole impulso anche in Europa alle ricerche per l'utilizzo della gomma nei manti stradali. L'introduzione della gomma dei P.F.U. riduce la rumorosità e le vibrazioni. Anche le Ferrovie Italiane hanno preso in considerazione la possibilità di impiegare la gomma granulata nel "sub-ballast" (strato asfaltico al di sotto della massicciata).

Per non parlar d'altro...

Oltre alle innovazioni relative ai leganti asfaltici (citate solo in parte), esistono altri aspetti innovativi che interessano le pavimentazioni. Ne citiamo solo due, tra quelli presentati nei convegni Siteb, durante la recente manifestazione Asphaltica di Padova (3-5 dicembre 2003). Due progetti pilota olandesi, già sperimentati in alcune tratte stradali, prevedono un sistema dinamico per la stesa dei manti stradali (16). In pratica lo strato superiore dell'asfalto (il cosiddetto "tappeto di usura") viene predisposto in fabbrica su grandi rulli e messo in opera su strada (ovvero srotolato) come se fosse una moquette (Figure 6 e 7). La differenza tra i due progetti è che il primo (The un-rollable road, ovvero la strada da non rullare) è costituito da un doppio strato drenante di 30 mm di spessore, fatto in funzione

ABSTRACT

Asphalt and Innovation

In the last decade, the asphalt industry has been more active and open to new ideas and technologies then in the previous years. The article summarizes some recent innovations, mostly related to the road binders. Porous asphalts, foamed bitumen, colored and "warm" asphalts are mentioned, together with some recent innovative Dutch projects, such as roll-paved asphalt and heat recovery from the pavements. The growing use of polymers in road construction is also considered.

Figura 7 - Applicazione dello strato di manto asfaltico predisposto su rulli

Figura 8 - Esempio di applicazione del sistema di recupero del calore dalla pavimentazione di un ponte in Olanda, prima della stesa del manto asfaltico

fonoassorbente e applicato su un conglomerato cementizio dotato di risuonatori di Helmohltz (per assorbire ulteriormente il rumore). Il secondo progetto (Rollpave) è anch'esso uno strato di 30 mm che può essere sia attaccato sia rimosso grazie ad uno speciale adesivo termosensibile costituito da un copolimero stirenico a blocchi; è sufficiente un riscaldamento con un microonde per straccare il tappeto e riavvolgerlo. I copolimeri stirenici a blocchi possono essere impiegati anche al posto del bitume nella preparazione dello strato di conglomerato Rollpave, che comunque deve essere rinforzato da una rete polimerica di supporto. Sempre in Olanda è stato sviluppato un sistema per recuperare (in estate), il calore dalla pavimentazione asfaltiche, riutilizzandolo poi in inverno (16). In pratica il sistema funziona così: in estate viene pompata acqua dal sottosuolo e trasportata mediante tubazioni all'interno delle pavimentazioni. L'acqua si scalda con il sole e, attraverso uno scambiatore, il calore viene trasportato in un altro serbatoio sotterraneo (hot reservoir). In inverno il sistema lavora in senso opposto, e cioè il calore immagazzinato fluisce dal serbatoio caldo alla pavimentazione (contro il gelo) o/e agli edifici limitrofi per riscaldarli.

La Figura 8 mostra i lavori in corso su un ponte di Rotterdam per l'applicazione del sistema sopra descritto. Molto accurata è stata la scelta del materiale costituente i tubi "annegati" nell'asfalto, onde fossero resistenti sia dal punto di vista chimico (corrosione) sia meccanico. Si è optato per una "lega" a base polimerica.

Bibliografia

(1) C. Giavarini, *Le Strade,* 2002, **11,** 134.

(2) C. Giavarini, Seimila anni di asfalto, in "Asfalto, il carattere della città", a cura di M. Zardini, Electa, Milano, 2003, 265.

(3) C. Giavarini, P. Rovigatti, C. Zipelli, *La Rassegna del Bitume,* 2003, **45/03,** 21.

(4) C. Giavarini, M. Scarsella, *Chimica e Industria,* 1993, **75**(11), 754.

(5) C. Giavarini, Polymer-modified bitumen, in "Asphaltenes and Asphalt", F. Yen, G.V. Chilingarian (Eds.), Elsevier Science, Amsterdam, 1994, 318.

(6) C. Giavarini, *La Rassegna del Bitume,* 1998, **31/98,** 11.

(7) C. Giavarini, M.L. Santarelli, *La Rassegna del Bitume,* 1997, **28/97,** 13.

(8) N. Boussad, E. Cornet, B. Lombardi, *La Rassegna del Bitume,* 1998, **30/98,** 11.

(9) K.J. Jenkins, M.F.C. Van De Ven, Mix design considerations for foamed bitumen mixes, 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Capsa 1999, Victoria Falls, 1998.

(10) L.H. Csanyi, Foamed asphalt in bituminous pavements, Transportation Research Record 160, TRB Nat. Res. Council, Washington DC, 1957, 109.

(11) Siteb-Sintexcal, Premio consegnato a Padova durante la manifestazione Asphaltica (3-5 dicembre 2003) alle ditte Carta Isnardo, Pavimental e Viastrade.

(12) F. Parati, *Le Strade,* 2003, **10,** 156.

(13) M. Schwartz, Colore, in "Asfalto, il carattere della città", a cura di M. Zardini, Electa, Milano, 2003, 90.

(14) C. Giavarini, *La Rassegna del Bitume,* 2003, **45/03,** 45.

(15) C. Giavarini, *Rassegna del Bitume,* 2003, **43/03,** 27.

(16) Asfalto e innovazione, a cura di C. Giavarini, Siteb, Roma, marzo 2004.