

Conglomerati bituminosi a bassa energia. Lo stato dell'arte

Low energy bituminous mixes: the state of the art

MARIO BONOLA

Consulente per le tecnologie - Pavimental

LUCIA DE FERRARIIS

Anonima Petroli Italiana

Riassunto

In diversi Paesi europei molte imprese stradali propongono, nella gamma dei loro prodotti, conglomerati bituminosi tiepidi (WMA), le cui temperature di fabbricazione e stesa sono sensibilmente inferiori a quelle dei conglomerati a caldo classici.

I procedimenti di produzione di questi conglomerati sono variegati, ma gli obiettivi sono comuni (es. risparmio di energia, diminuzione delle emissioni in genere e in particolare di quelle dei gas serra).

L'articolo propone lo stato dell'arte di questa nuova tipologia di miscela bituminosa.

Summary

In different European countries, many road contractors propose, among their products, warm bituminous mixes, whose producing and laying temperatures are lower than hot bitumens mixes.

Production procedures of these mixes are different, but the targets are common: energy saving, reduction of emission, etc.

The paper reports the state of the art of this new bituminous mixes.

1. Generalità

I conglomerati bituminosi costituiscono la parte preponderante delle moderne pavimentazioni stradali e le loro caratteristiche meccaniche derivano da un'intima combinazione tra legante idrocarburico e scheletro litico, grazie alla quale il prodotto finale è in grado di resistere alle sollecitazioni indotte dal traffico autoveicolare.

Nel corso del tempo sono state messe a punto svariate tecniche per la realizzazione di pavimentazioni in asfalto, ma i processi produttivi più utilizzati impiegano il calore per realizzare la migliore miscelazione tra bitume e inerti e al tempo stesso facilitarne la lavorabilità fino alla compattazione, in modo da garantire durabilità e affidabilità alla pavimentazione.

In questo ambito, negli ultimi anni del secolo scorso si è avuto un fiorire di attività di ricerca e sviluppo del tutto innovative, in sintonia con le attese sempre più diffuse nella società civile. Salvaguardia dell'ambiente, tutela della salute e della sicurezza sul posto di lavoro sono tra gli obiettivi dell'industria delle pavimentazioni, specie nei paesi del Nord Europa, dove da tempo si dà risalto ai problemi legati all'effetto serra ed alla riduzione delle emissioni di CO₂, che inevitabilmente si associano ad ogni attività industriale.

A tale proposito, occorre precisare che l'opinione pubblica nutre, nei confronti dell'impiego del bitume sui cantieri stradali uno scarso gradimento, se non un vero e proprio rifiuto. Fumi, emissioni e odori sgradevoli ancora oggi, nonostante i progressi tecnologici, nell'im-

maginario collettivo, sono indissolubilmente abbinati ai cantieri di lavoro per le pavimentazioni stradali.

A questi aspetti, già di per sé sufficientemente ponderosi, si sono poi aggiunti quelli associati all'onerosità della bolletta energetica che penalizza pesantemente l'economia di molti paesi ad alta industrializzazione che non hanno sul proprio territorio disponibilità di risorse energetiche di natura fossile.

I conglomerati in esame vengono individuati con l'acronimo inglese WMA (Warm Mix Asphalt, traducibile in Miscela Bituminosa Tiepida) e sono ottenuti da processi in cui le temperature risultano di decine di gradi inferiori a quelle tipiche delle tecniche per la produzione di conglomerati a caldo HMA (Hot Mix Asphalt), ma tendenzialmente intendono replicarne le caratteristiche prestazionali.

La riduzione delle temperature in gioco presenta il vantaggio di abbattere non solo il consumo di carburante ma anche l'emissione dei fumi che, a temperature più basse, possono essere praticamente eliminati insieme agli odori a essi associati. Vantaggio, quest'ultimo, che assume particolare rilievo in aree dove le prescrizioni di legge per la qualità dell'aria sono particolarmente severe, come negli ambiti urbani.

Oggi giorno, in diversi paesi europei molte imprese stradali propongono, nella gamma dei loro prodotti, conglomerati bituminosi tiepidi o WMA, le cui temperature di fabbricazione e stesa sono sensibilmente inferiori a quelle dei conglomerati a caldo classici. I procedimenti sono variegati, ma gli obiettivi sono comuni: risparmio di energia, diminuzione delle emissioni in genere e in particolare di quelle dei gas serra.

Tutto ciò è il risultato dello sforzo teso all'innovazione tecnologica da parte dell'industria delle pavimentazioni, che ha dato luogo ad una significativa serie di cantieri stradali sperimentali per la realizzazione di prove sul campo dove, specie negli ultimi anni, si sono accumulate numerose esperienze secondo nuove linee di ricerca. Il reale interesse, manifestato di recente anche in Italia, sta ad attestare la consistenza del fenomeno, da annoverare certamente non tra gli episodi di moda passeggera.

Alcune date, a dimostrazione della rapida diffusione dell'attività di ricerca e sviluppo: fu nel 1997 che con il "Bitumen Forum" [16] in Germania si avvia la fase speri-

mentale per la messa a punto di tecnologie innovative più rispettose dei vincoli posti dall'igiene del lavoro e dalla tutela dell'ambiente. A questo sforzo parteciparono attivamente tutte le organizzazioni interessate dall'esecuzione dei lavori di pavimentazione stradali, Istituzioni dello Stato comprese. Su questa linea anche altre nazioni si mossero successivamente [20].

Nel 2002 la statunitense National Asphalt Pavement Association organizzò una missione in Europa al fine di studiare il problema delle pavimentazioni WMA sulle quali veniva riconosciuto un profondo gap tecnologico dell'industria d'oltre oceano rispetto all'Europa. Come già avvenuto con il progetto SHARP, in pochi anni in diversi stati USA sono stati aperti cantieri sperimentali e prestigiose istituzioni federali (NCAT, FHA, AASHTO...) hanno in corso progetti di valutazione delle diverse tecnologie.

"Semicaldi", "tiepidi", "semitiepidi", "a bassa temperatura", "a bassa energia", "a risparmio energetico" qualunque sia la denominazione o la tecnica applicata, questi nuovi conglomerati sono caratterizzati dal loro comune obiettivo progettuale teso a ridurre i consumi di energia e quindi a contrarre le emissioni. Al tempo stesso questi nuovi conglomerati dovranno garantire prestazioni identiche a quelle dei conglomerati a caldo, prodotti con tecnologie tradizionali.

Senza dubbio si tratta di una vera e propria rivoluzione tecnologica e culturale che vede un'industria, quella delle costruzioni stradali, la cui attività è spesso sotto accusa in maniera violenta e definitiva, anche al di là degli effettivi demeriti, assumere una posizione di rilievo nella tutela dell'ambiente e nella pratica di una politica globale, tesa a realizzare concretamente uno sviluppo sostenibile.

Nel testo vedremo quanto di questo quadro idilliaco sia oggi praticamente realizzabile per i tecnici delle pavimentazioni stradali e quale dovrebbe essere l'obiettivo finale di questo sforzo, in atto ormai da più di un decennio. L'auspicio è che le Istituzioni non perdano anche questa occasione per l'affermazione di tecnologie innovative in linea con gli impegni già assunti con il protocollo di Kyoto, cui la recente sottoscrizione da parte della Russia ha conferito rilevanza giuridica internazionale di trattato. Non è certo rassicurante, da questo punto di vista, l'esperienza attinente le tecniche

di riciclaggio, la cui diffusione non dà sicuramente la misura delle reali potenzialità tecnico-economiche che, allo stato dell'arte, ne presupporrebbero invece un massiccio utilizzo. È questa una significativa situazione messa in luce da una pubblicazione [1], risalente ormai a circa dieci anni fa, in cui l'OCDE (Organisation de Cooperation et Développement Économique), a seguito di una indagine su scala internazionale in tema di strategie di riciclaggio nei lavori stradali, riconosceva i vantaggi delle tecniche in questione e ne auspicava un sempre maggior impiego nei lavori di manutenzione, individuando in vere e proprie azioni di sostegno, oltre che di tipo normativo, da parte dei governi nazionali, la spinta necessaria all'industria del settore per superare gli ostacoli.

In ogni caso, in diversi paesi europei (Svezia, Olanda, Inghilterra, Spagna, Francia) il processo di innovazione è irreversibilmente avviato e, in particolare, a partire dal 2005, i cugini di oltralpe hanno avviato cantieri sperimentali sia in aree urbane, sia su strade extraurbane e su autostrade, dove vengono testate scelte tecnologiche diverse, il che dimostra l'elevato grado di interesse, oltre che di concorrenza effettiva, favorita dai recuperi di efficienza realizzati da innovazioni tecnologiche a valore aggiunto.

I risultati ottenuti sul campo sono positivi, manca ovviamente il conforto della loro evoluzione nel tempo. Resta comunque la convinzione da parte degli operatori che esistano tutti i presupposti per il successo definitivo, purché esista l'intento di dare realmente il via a questa svolta radicale sui cantieri stradali che, oltretutto, riuscirà ad abbattere in molte persone l'immagine dei cantieri fossilizzata a non molti anni addietro, quando gli operai rimaneggiavano, anche se con buoni risultati finali ma con scarse misure di igiene e sicurezza, materiali altamente fumosi e maleodoranti, in breve, inquinanti.

Una volta confermati nel tempo i dati positivi iniziali e raggiunto l'equilibrio tra domanda e offerta su prezzi competitivi, questi nuovi conglomerati saranno senza dubbio chiamati a svolgere un ruolo importante sul mercato e il loro successo sarà tanto maggiore quanto più ampia sarà la gamma di prodotti offerti, includendovi pavimentazioni speciali quali ad esempio i tappeti drenanti, fonoassorbenti e quelli antisdrucchiolevoli.

2. Tipologie di processo

Il confezionamento di miscele di conglomerato bituminoso storicamente è nato con i processi a caldo. In definitiva questo materiale composito può dare ottimi risultati, qualora si riesca a trarre vantaggio dai materiali componenti: gli inerti e il legante idrocarburico. In sintesi, il concetto alla base è quello di costituire uno scheletro litico meccanicamente resistente, mantenuto in essere dalle forze di coesione esercitate tra gli aggregati a contatto grazie ad un film di bitume che singolarmente li riveste saldamente.

L'azione di rivestimento del film di bitume è essenziale per l'ottenimento di un prodotto resistente, le cui caratteristiche però dipenderanno anche da un adeguato addensamento mediante energia meccanica. Sono stati richiamati brevemente questi concetti di base solo per sottolineare la necessità di avere un materiale legante di per sé a bassa viscosità e tale da realizzare una miscela con gli inerti avente adeguata fluidità (lavorabilità), per tutte le fasi produttive, fino alla compattazione finale.

Il bitume, materiale elasto-plasto-viscoso, ha una spiccata suscettività termica per cui, mentre a temperatura ambiente è solido, alle elevate temperature diviene liquido e presenta bassi valori di viscosità. Da qui la necessità di riscaldarlo a 160-180 °C.

Per quanto riguarda gli aggregati, invece, la necessità di un loro riscaldamento è duplice:

- ▶ innanzitutto occorre essicarli completamente, in modo da garantire la migliore adesione tra grani e film di bitume che, in presenza di acqua, potrebbe essere danneggiata nel tempo (spoliazione del bitume);
- ▶ nel momento della miscelazione con il bitume l'equilibrio termico che si raggiunge è fortemente condizionato dalla massa degli inerti (circa 19 volte quella del bitume) e pertanto anch'essi vengono riscaldati pressoché alla stessa temperatura del bitume.

All'interno dell'intervallo di temperatura individuato dalle tradizionali tecniche a freddo e a caldo, proprio in base agli sviluppi tecnologici più recenti, si può procedere ad un'ulteriore suddivisione, così come risulta nella successiva Tab. 1.

In effetti, questa ulteriore caratterizzazione è conseguente ad una serie di considerazioni fondamentali

Tab. 1 Processi di confezionamento dei conglomerati bituminosi

Temperatura	Tipologia di processo
10÷30 °C	A freddo
40÷90 °C	Semitiepido
120÷135 °C	Semicaldo
150÷170 °C	A caldo

per le tecnologie tiepide, abbinate ad alcuni fenomeni legati agli scambi di calore che normalmente avvengono negli impianti. In particolare, si fa riferimento alla temperatura di 100 °C, che per quanto riguarda gli aggregati, ne distingue la fase di essiccaimento da quella di riscaldamento, mentre per quanto riguarda l'acqua presente tra gli inerti la stessa temperatura ne caratterizza il fenomeno di cambiamento di stato in vapore, nel corso del quale l'energia calorica serve a far evaporare tutta l'acqua presente (calore latente di vaporizzazione), senza contribuire a riscaldare ulteriormente la parte litica. In Fig. 1 questo fenomeno è rappresentato schematicamente, per una determinata miscela e per un determinato grado di umidità, dalla linea spezzata in giallo che mostra il variare della temperatura della miscela in funzione dell'assorbimento del calore prodotto nel tamburo dal bruciatore.

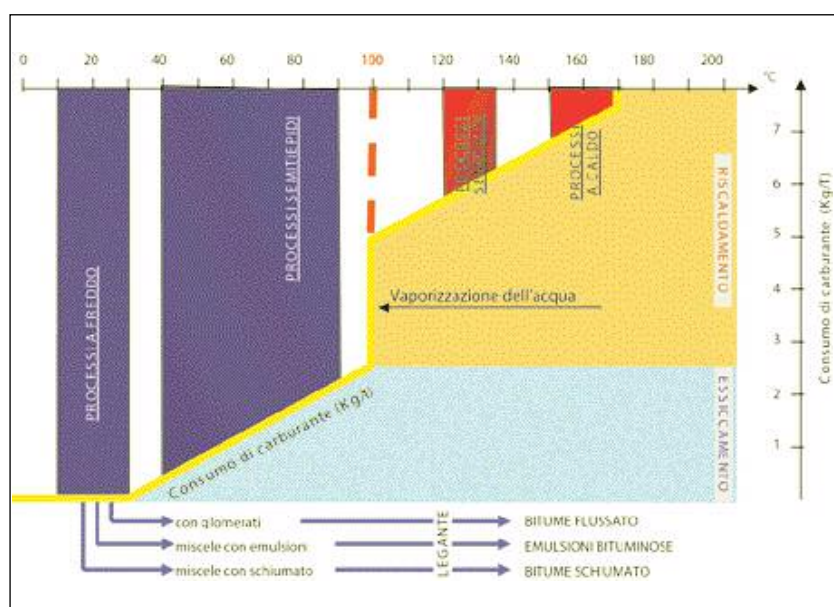


Fig. 1 Relazione tra temperatura e assorbimento di calore

Anche in tema di scambi calorici, e quindi di efficienza (rendimento), la temperatura di 100 °C rappresenta un valore limite oltre il quale il rendimento complessivo si riduce sensibilmente, tenuto conto che [6,12,29]:

- ▶ l'energia necessaria a riscaldare gli inerti secchi alla temperatura di rivestimento è 5 volte inferiore a quella impegnata per innalzare alla stessa temperatura una massa equivalente di acqua;
- ▶ il calore latente di evaporazione dell'acqua rappresenta 5 volte l'energia necessaria a sollevare la stessa massa d'acqua da 0 a 100 °C.

Pertanto, risparmi sostanziali di energia, ossia rendimenti maggiori, saranno possibili solo se la temperatura di miscelazione sarà mantenuta inferiore ai 100 °C; in tal modo, si può affermare che le miscele tiepide si ottengono, oltre che abbassando la temperatura delle tecniche a caldo, anche elevando quella dei processi a freddo. Seguendo questa impostazione, però, ritorna in tutta la sua importanza il problema della fluidità del legante e la lavorabilità della miscela, per le quali vengono mutate tecniche sviluppate per le tecniche a freddo, opportunamente adeguate allo scopo, come verrà illustrato successivamente.

La tecnologia di confezionamento a freddo tradizionale si caratterizza ovviamente per i ridotti consumi energetici e i bassissimi livelli di emissioni e si basa sull'impiego di emulsioni bituminose in grado di veicolare tra gli aggregati, a temperatura ambiente, il bitume sottoforma di gocce minute disperse nella fase acquosa.

Un aspetto critico di questa tecnica è che il rivestimento degli inerti inizia solo dopo la "rottura" dell'emulsione e, pertanto, il raggiungimento delle adeguate caratteristiche meccaniche necessita di un periodo di maturazione che può durare anche mesi. Più recente è la tecnologia a freddo che utilizza il bitume schiumato che, come è noto, si ottiene iniettando all'interno di apposite camere di espansione dell'acqua fredda nebulizzata in un idoneo bitume preventivamente riscaldato a 180 °C.

La formazione di schiuma garantisce l'effetto legante, che, manifestandosi imme-

diatamente e per contatto puntuale sulla frazione fine degli aggregati, non presenta le criticità legate ai meccanismi di rottura e di maturazione tipici delle emulsioni bituminose. Inoltre le caratteristiche fisiche della schiuma agevolano la lavorabilità della miscela pertanto, una volta terminata la compattazione, è possibile una rapida rimessa in servizio, anche in presenza di traffico pesante.

Per completezza d'esposizione, per quanto riguarda le tecnologie a freddo, che hanno anticipato nettamente l'avvio della ricerca sulle tecnologie tiepide, occorre precisare che non hanno accumulato sufficiente "anzianità di servizio" per ottenere una validazione sul campo. Inoltre, uno degli aspetti critici connessi alla durata delle miscele a freddo si deve al fatto che il legante può non rivestire adeguatamente gli aggregati, dato che spesso l'emulsione bituminosa non riveste completamente le pezzature più grossolane degli aggregati frantumati mentre il bitume schiumato risulta particolarmente efficace solo sulle frazioni fini.

Con la messa a punto delle miscele "tiepide" si ottiene una serie di vantaggi di cui i più immediati riguardano sia il risparmio energetico, sia l'abbattimento delle emissioni presso l'impianto di produzione e sul cantiere, abbattimento che è reso ancora più evidente dal fatto che la riduzione delle temperature influisce non solo sulla quantità dei fumi emessi, ma anche sulla loro composizione.

La diminuzione delle temperature di processo comporta anche una minore usura dei mezzi utilizzati nell'ambito del processo di produzione, specie nell'impianto di confezionamento, nel quale anche il fenomeno di invecchiamento del bitume, associato alla sua ossidazione e alla perdita di sostanze aromatiche, risulta ridotto o quantomeno contenuto dal che si comprende come e perché le miscele tiepide possano durare più a lungo rispetto alle tradizionali miscele a caldo.

Di seguito si riportano i risvolti positivi sull'organizzazione dei lavori sui cantieri di costruzione/manutenzione delle pavimentazioni:

- ▶ estensione del periodo lavorativo anche nelle stagioni meno calde;

- ▶ a parità di temperatura finale, copertura di maggiori distanze di trasporto del materiale proveniente dagli impianti di confezionamento;
 - ▶ riduzione dei tempi di attesa per l'apertura al traffico di tratti di pavimentazione appena messa in opera.
- Volendo classificare le tecnologie tiepide messe a punto dall'industria delle pavimentazioni (v. successiva Tab. 2), si possono individuare due categorie principali che rappresentano le tecniche adottate per rendere fluidi il legante e la miscela.

Tab. 2 Classificazione delle tecnologie per il confezionamento di miscele tiepide

Additivazioni con fluidificanti del bitume	Formazione di schiuma del bitume
N.B.: Una ulteriore suddivisione potrebbe essere effettuata sulla base delle sostanze usate, ma queste non determinano modifiche sostanziali alle tecniche di produzione	- Schiuma di emulsione - Bitume schiumato con aggregati riscaldati - Sistema a due componenti di legante - Conglomerati bituminosi a bassa energia - Additivazione con zeoliti

Pertanto un primo gruppo riguarda l'impiego di additivi che riducono la viscosità del bitume e un secondo gruppo, molto più articolato, ma accomunato dallo sfruttamento della fluidità conferita alla miscela dalla schiuma di bitume. Le ricerche condotte alla fine degli anni '90 in Europa e negli Stati Uniti hanno avuto come risultato una serie di tecnologie per la produzione di WMA che si riconducono a processi brevettati.

3. Descrizione delle tecniche WMA

3.1 Additivazione con fluidificanti del bitume

Nella fase iniziale della ricerca sulle tecniche "tiepide" vi fu, tra le varie opzioni, un orientamento a favore dell'impiego di sostanze organiche solubili nel bitume atte a modificarne le caratteristiche reologiche in rapporto alle variazioni di temperatura. Tra tali additivi, maggior successo ebbero le paraffine o cere cristalline, che esplicano la loro azione attraverso il meccanismo reversibile del cambiamento di stato fisico (fusione-cristallizzazione):

- ▶ fondendo a temperature superiori a 80 °C riducono la viscosità del legante e conferiscono fluidità alle temperature di confezionamento e stesa dei conglomerati;
- ▶ cristallizzando al di sotto delle temperature di fusione conferiscono rigidità al conglomerato anche a temperature di esercizio elevate.

Le attività di laboratorio furono correlate ad applicazioni sul campo finalizzate ad ottenere miscele "tiepide" con prestazioni del tutto simili o superiori a quelle dei tradizionali conglomerati a caldo, specie per quanto riguarda la resistenza a fatica, la resistenza alle deformazioni permanenti e la lavorabilità sul cantiere (temperatura di compattazione 100-120 °C).

Gli agenti fluidificanti in esame includono paraffine Fischer-Tropsch, esteri acidi Montan, esteri acidi carbossilici della lignite a lunga catena lineare (C28), altri derivati da acidi grassi, polietilene a basso peso molecolare.

Gli additivi più promettenti si dimostrarono le cere paraffiniche di sintesi, caratterizzate da idrocarburi alifatici con catena lunga che si formano nella fase di gassificazione del carbone nel processo Fischer-Tropsch per la produzione di carburanti e combustibili liquidi.

L'additivazione del bitume, sia modificato che tal quale, avviene a circa 120 °C mediante agitazione per circa due ore e senza necessità di un miscelatore ad elevata azione meccanica. Il comportamento reologico del bitume ne risulta così modificato:

- un effetto fluidificante, con diminuzione della viscosità dinamica al di sopra di 130 °C (Fig. 2) che favorisce il rivestimento degli aggregati e la lavorabilità;
- un effetto irrigidente con innalzamento del punto di rammollimento (Palla-Anello), una diminuzione della penetrazione a 25 °C (Fig. 3) e maggiori moduli misurati con il Dynamic Shear Rheometer;
- nessun effetto significativo alle basse temperature, come risulta dalla determinazione del punto di Fraass (Fig. 4);
- mediante l'uso del Bending Rheometer il 4% di FT si è dimostrato un valore di soglia oltre il quale può aversi un effetto negativo.

Il tenore di paraffina varia da un minimo del 3% in peso del bitume fino ad un massimo del 4%, valore che si consiglia di non superare per evitare problemi di suscettibilità in presenza di elevate temperature. È opportuno mescolare le paraffine direttamente col

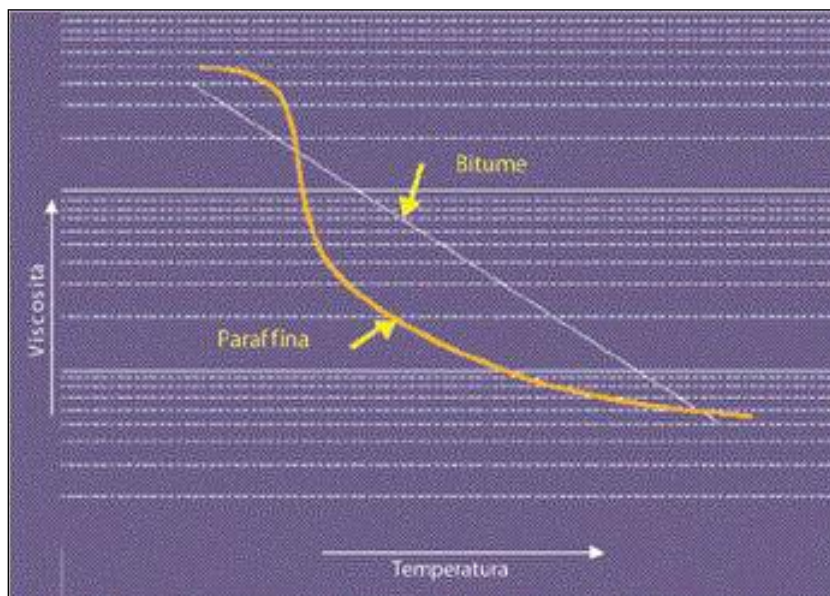


Fig. 2 Viscosità in funzione della temperatura di un bitume tal quale e di bitume additivato con paraffina

bitume in quanto l'aggiunta di questi prodotti direttamente negli impianti di produzione non è consigliabile ai fini dell'ottenimento di una miscela omogenea. L'uso di paraffine nella formulazione di conglomerati bituminosi potrebbe sembrare a prima vista del tutto illogico, visto che nelle normative esistono limitazioni al loro contenuto nel bitume (in genere non superiore al 2%). In realtà si tratta di sostanze diverse, visto che le paraffine naturali presenti nel bitume hanno un numero di atomi di carbonio inferiore a 45 e presentano una temperatura di fusione compresa tra 45 e 70 °C, mentre le paraffine FT contengono idrocarburi con catene più lunghe fino a 100 atomi di carbonio.

Grazie a processi di ricristallizzazione si può elevare fino ai 90÷100 °C il punto di fusione delle FT. Pertanto, poiché al di sopra di dette temperature ha luogo la fusione e la conseguente successiva riduzione della viscosità del bitume, la miscelazione con gli inerti è possibile in un intervallo di temperature inferiori a quelle raggiunte con le tecniche a caldo tradizionali. Nella successiva Tab. 3 si riportano valori indicativi rappresentativi delle paraffine da bitume e di quelle ottenute dal processo Fischer-Tropsch.

A temperature inferiori al punto di fusione le paraffine formano all'interno del bitume una struttura tipo

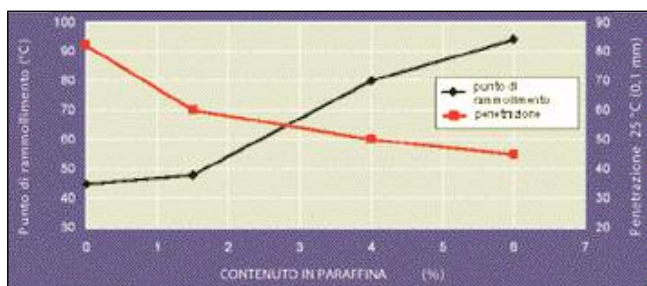


Fig. 3 Bitume 70/100 - Punto di Rammollimento e Penetrazione in funzione del contenuto in paraffina



Fig. 4 Bitume 70/100 - Punto di Fraass in funzione del contenuto in paraffina

lattice, cui è attribuibile il miglioramento delle prestazioni meccaniche del conglomerato, soprattutto in termini di resistenza alle deformazioni permanenti. Rientrano in questa categoria anche le tecnologie che impiegano altre sostanze additanti aventi effetti simili sul comportamento reologico del bitume, quali ad esempio i composti esterificati a basso peso molecolare derivati principalmente di esteri di grassi paraffinici.

3.2 Formazione di schiuma di bitume

3.2.1 Emulsione schiumata

L'impiego delle emulsioni è tipico delle tecnologie a freddo per il confezionamento dei conglomerati bituminosi e

Tab. 3 Caratteristiche delle cere di bitume e cere FT

Caratteristica	Cere da bitume	Cere da FT
Punto di fusione, °C	50÷70	90÷110
Penetrazione a 25 °C, 0,1 mm	100÷130	" 1
Peso molecolare medio, g/mole	300	1600
N-Paraffine, %	15÷20	70÷75

dei processi di riciclaggio in situ delle pavimentazioni stradali. I risultati conseguiti risultano estremamente interessanti dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici e con l'avvento delle emulsioni elastomerizzate e sovrastabilizzate tale tecnica si è rivelata idonea anche nel caso di interventi su strade soggette a traffico pesante.

Il vantaggio di fondo delle tecnologie a freddo sta nella capacità di veicolare il legante bituminoso (emulsionato o schiumato), garantendo il ricoprimento degli inerti freddi senza apporto di calore.

Le emulsioni bituminose si ottengono mediante una intensa azione meccanica di miscelazione tra bitume e acqua in un mulino colloidale, previa aggiunta di una sostanza emulsionante che agevoli la dispersione nella fase acquosa del bitume sotto forma di gocce minute. Tipicamente, un'emulsione bituminosa è costituita per il 60% da bitume e per il 40% da acqua ed, essendo a temperatura ambiente liquida, può essere miscelata agli aggregati freddi.

Altra tecnica a freddo è quella che utilizza la schiumatura del bitume ottenuta mediante il suo riscaldamento a 180 °C in un impianto pressurizzato e successiva immissione nella camera di espansione di una piccola quantità di acqua (2-3% in peso sul bitume). Una volta andata in ebollizione l'acqua consente al bitume di espandersi dando luogo alla formazione di schiuma con aumento di volume fino a 15 volte quello originario.

La produzione di miscele con bitumi schiumati richiede che il legante sia molto caldo e che nel materiale da stabilizzare vi sia una quantità sufficiente di frazione fine (5-15% di passante a 75 µ), tale da garantire un rivestimento più efficace grazie alla formazione di una malta con azione collante.

A differenza della tecnica a freddo, quella tiepida non richiede una particolare compatibilità con gli inerti in modo da assicurare un adeguato tempo di rottura dell'emulsione e la miscela finale è caratterizzata da un rapido accrescimento delle caratteristiche di resistenza. Talora la presenza di acqua nella schiuma e/o l'uso di aggregati freddi e umidi spesso comportano la necessità di additivare il bitume con dops di adesione.

A questa tecnica si rifanno applicazioni sviluppate in diverse parti del mondo.

Negli USA è stata sviluppata la tecnologia Evotherm® che fondamentalmente si basa su una miscela di sostanze

chimiche additivanti tese a migliorare le caratteristiche di rivestimento lavorabilità, adesione e agenti emulsionanti. La temperatura di stoccaggio è di 80 °C e il dosaggio del complesso additivante è dello 0,5% in peso dell'emulsione, che normalmente è composta al 70% di bitume.

Al momento, la tecnologia è stata sperimentata su differenti cantieri in diversi paesi del mondo (Stati Uniti d'America, Canada, Sud Africa e Cina). In particolare, in Sud Africa, in un tamburo a flusso parallelo, è stato confezionato un conglomerato bituminoso chiuso i cui inerti erano di natura silicea. La temperatura di processo all'impianto è stata pari a 71 °C, mentre sul cantiere le temperature di stesa e compattazione hanno raggiunto i 60 °C. Un progetto analogo è stato realizzato presso Indianapolis (USA) utilizzando aggregati di natura dolomitica e un'emulsione con bitume PG 64-22. In Spagna e Portogallo, a partire da ottobre 2001, sono stati svolti studi di laboratorio orientati alla messa a punto di tecniche "tiepide" per il riciclaggio, presso impianti fissi continui o discontinui, del 100% del materiale proveniente dalla fresatura di strati di pavimentazioni flessibili. Uno dei vincoli posti allo studio era che la temperatura del materiale, dopo il riscaldamento, non eccedesse i 90 °C.

I risultati, oltremodo promettenti, hanno portato alla sperimentazione su strada, nel corso della quale il conglomerato sul cantiere presentava una lavorabilità simile a quella delle tradizionali miscele a caldo e una temperatura variabile da 78 a 90 °C. La compattazione finale veniva effettuata al di sopra di 70 °C, mediante rulli vibranti seguiti da rulli gommati.

Particolare cura è stata dedicata alla formulazione dell'emulsione di bitume modificato a rottura media, che in questo caso doveva tenere nel debito conto la presenza di tasso elevato di frazione fina derivante dalla fresatura a freddo degli strati di pavimentazione. Lavori analoghi in Galizia e Austria hanno interessato anche strati di usura drenante, sostituiti da miscele di aggregati frantumati miscelati con emulsioni cationiche di bitume flussato e modificato con polimeri. In questo caso, la temperatura all'impianto non avrebbe dovuto superare gli 80 °C. Le emulsioni impiegate potevano essere a rottura sia media che lenta.

Anche in Gran Bretagna presso i laboratori della Total UK, è stato effettuato uno studio dove si sono verifi-

cate le prestazioni di miscele tiepide confezionate con emulsione schiumata, confrontandole con quelle delle miscele tradizionali a caldo.

Per la formulazione in laboratorio sono stati impiegati aggregati con granulometria conforme alle specifiche tecniche inglesi per strati di base e provenienti da tre formazioni geologiche diverse, una delle quali molto prossima al materiale fresato. Come legante da sottoporre alla schiumatura è stata utilizzata un'emulsione al 67% di bitume. Le miscele sono state compatte a diversi tenori di legante mediante pressa giratoria alla temperatura 85 °C e analoga procedura è stata adottata per la formulazione delle miscele a caldo (170 °C) con impiego dello stesso bitume di base 80÷120 presente nelle emulsioni.

Le prove di compattazione hanno mostrato valori simili della percentuale dei vuoti e della densità massima per entrambi i tipi di miscele.

Le prove a trazione indiretta hanno mostrato prestazioni migliori per le miscele a caldo rispetto a quelle tiepide realizzate con emulsione schiumata; i risultati per la miscela contenente l'aggregato di granulometria simile al fresato differiscono solo del 10% rispetto a quelli delle miscele a caldo.

Le prove di suscettività all'acqua, valutata con prove di resistenza condotte dopo cicli successivi di immersione, indicano che le miscele con maggiori contenuti di legante mostrano una minore riduzione della resistenza.

La capacità di resistere alle deformazione permanenti è risultata per le WMA meno buona di quella delle miscele a caldo, ma pur sempre accettabile.

In conclusione, gli accertamenti di laboratorio indicano che le miscele tiepide con emulsioni schiumate raggiungono un livello prestazionale iniziale di poco inferiore a quello delle miscele a caldo, ma suscettibile di miglioramento con il passare del tempo.

Al termine degli studi in corso per ottimizzare il *mix design* e delle prove su strada tese a valutare le caratteristiche di resistenza dopo un adeguato tempo di maturazione, sarà possibile esprimere un giudizio più ponderato sulle potenzialità di impiego della tecnologia descritta.

3.2.2 Bitume schiumato con aggregati riscaldati

Questa tecnologia è il risultato di un lavoro congiunto tra tecnici sudafricani e olandesi e rappresenta un'evol-

luzione del processo di stabilizzazione mediante bitume schiumato brevettato nel 1957 dal Prof. Csany, sfruttando l'attitudine del bitume a diminuire la sua viscosità una volta trasformato in schiuma, mediante iniezione di acqua e aria.

In particolare, sotto l'egida della amministrazione stradale olandese, nel quadro di un partenariato per l'innovazione tecnologica, la Nynas Bitumen e quattro imprese stradali olandesi, hanno messo a punto il procedimento LT-Asphalt® (*low temperature asphalt*). Sulla base dell'esperienza acquisita nell'utilizzo della tecnologia del bitume schiumato, è noto che la temperatura degli aggregati durante la lavorazione ha un ruolo molto importante ai fini delle prestazioni del prodotto finale.

Per lungo tempo ci si è preoccupati del rapporto tra temperatura minima degli inerti e quella ambientale, mentre sono stati trascurati i potenziali vantaggi derivanti da un riscaldamento preliminare, anche moderato, degli aggregati. La ricerca iniziale mirava a valutare l'efficacia del processo ai fini del rivestimento degli inerti, della compattazione e delle caratteristiche meccaniche di miscele semitiepide formulate con aggregati riscaldati a temperature inferiori a 100 °C prima di immettere il bitume schiumato.

La scelta della temperatura di riscaldamento degli aggregati è strategica in termini di risparmi energetici ed è conseguente alle considerazioni svolte nel paragrafo 1, per i quali oltrepassare la soglia dei 100 °C significa dissipare calore per conferire l'energia necessaria per l'evaporazione dell'acqua, senza benefici in termini di riscaldamento degli aggregati (Fig. 5).

I risultati dello studio possono sintetizzarsi nelle seguenti conclusioni:

- ▶ l'efficacia del ricoprimento degli aggregati da parte del legante aumenta con la temperatura degli aggregati stessi (Fig. 6);
- ▶ è opportuno conferire umidità alla miscela per facilitare la compattazione. L'indice dei vuoti può diminuire del 30% se la temperatura di compattazione varia tra 45 a 90 °C;
- ▶ le miscele semitiepide con bitume schiumato raggiungono resistenze a compressione più elevate rispetto a quelle ottenute a temperatura ambiente. Nel confronto con le miscele a caldo i valori di resistenza diventano comparabili quanto più diminuisce il diva-

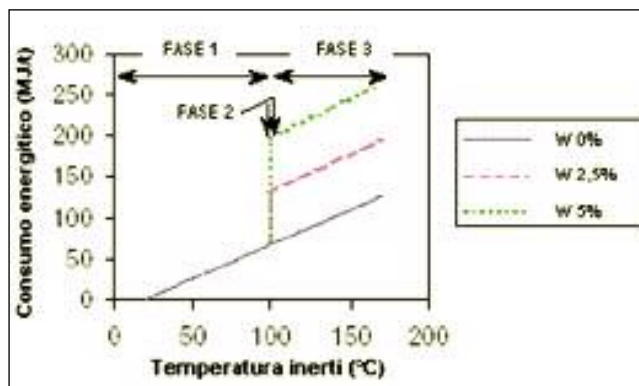


Fig. 5 Consumi energetici per diverse temperature di riscaldamento di aggregati a diversi tassi di umidità w

rio tra le temperature di confezionamento. Valutazioni analoghe valgono per la resistenza al taglio;

- ▶ l'energia necessaria alla rottura a compressione o a taglio evidenzia un comportamento simile a quello delle miscele tradizionali a caldo;
- ▶ la presenza del fresato conferisce migliori caratteristiche di resistenza al taglio rispetto a miscele formulate con inerti vergini;
- ▶ la resistenza a fatica è equivalente a quella delle miscele tradizionali a caldo;
- ▶ per temperature di riscaldamento degli inerti superiori ai 100 °C si ottengono maggiori resistenze a taglio, ma diminuiscono ovviamente i vantaggi energetici;
- ▶ il tasso d'umidità finale della miscela dipende dalle condizioni degli aggregati in cumulo, dalla durata del loro riscaldamento, dal tempo intercorso tra le fasi di confezionamento e posa in opera.

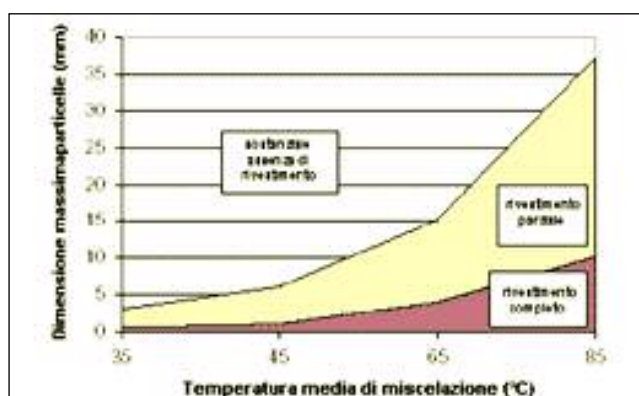


Fig. 6 Distribuzione del bitume schiumato in funzione di dimensioni e temperatura degli inerti

La differenza sostanziale tra i conglomerati con schiumato a freddo, semicaldo e quelli a caldo sta nella temperatura di produzione e nella umidità. L'umidità nello schiumato a freddo disperde il bitume in forma di filamenti piuttosto che in modo continuo. Ovviamente questo determina diverse caratteristiche del mastice di bitume. Per quanto riguarda invece il conglomerato con schiumato semicaldo la temperatura di miscelazione degli aggregati influenza la distribuzione del bitume e quindi il rivestimento e la coesione degli inerti.

In un primo tempo la graniglia viene riscaldata a 90 °C poi viene mescolata alla schiuma di bitume. Poiché la temperatura è inferiore a quella di evaporazione dell'acqua, la graniglia non viene essiccata completamente. La presenza di acqua residua nei vuoti d'aria sotto forma di vapore acqueo facilita la stesa e la compattazione dei conglomerati a bassa temperatura. Questa umidità sparisce per asciugatura spontanea e grazie anche all'azione della frazione di fini igroscopici.

La tecnologia LT-asphalt® può essere adottata in un impianto di asfalto classico facendo alcuni adattamenti del processo di essiccamento, di miscelazione dei granulati e di iniezione del legante. I risparmi di energia e la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra sono nell'ordine del 40%.

3.2.3 Sistema a due componenti di legante

A metà degli anni '90, a causa dei limiti sempre più stringenti posti in tema di contenimento delle emissioni di CO₂, fu avviata una ricerca congiunta franco-norvegese finalizzata all'individuazione di tecniche di produzione di conglomerati bituminosi a bassa temperatura che non implicassero modifiche sostanziali all'assetto degli impianti esistenti e che garantissero le stesse prestazioni dei conglomerati a caldo (HMA).

La tecnologia messa a punto, denominata Wam-Foam, è un procedimento sviluppato da Shell Bitumens che consiste nell'abbassare la temperatura di rivestimento e di stesa dei conglomerati di 50 °C circa rispetto alla produzione classica. La tecnica si basa sull'uso, in fase di miscelazione, di bitumi *hard* e *soft* (rispettivamente a bassa e ad alta penetrazione) e utilizza impianti standard, sia continui che discontinui, corredati di attrezzatura specifica per la schiumatura del bitume *hard*.

A tale riguardo giova precisare che nella fase d'avvio della sperimentazione il legante a bassa penetrazione veniva introdotto sotto forma di polvere alla stregua di un filler. A causa di problemi di carattere ambientale si preferì passare all'utilizzo di emulsioni bituminose, per arrivare nel 1998 alla decisione di impiegare il bitume *hard* sotto forma di schiuma.

Il legante, complessivamente pari a circa il 6% in peso sulla miscela, è costituito da bitume *soft* (30%) immesso per primo nel miscelatore attraverso le tubazioni standard e da bitume *hard* (70%) che, prima di essere inviato al miscelatore, viene convogliato attraverso una tubazione in una camera di espansione dove avviene la schiumatura. L'azione combinata dei due bitumi garantisce una buona omogeneità della miscela finale, le cui caratteristiche prestazionali dipendono dalla bontà del processo, oltre che dalla qualità dei due leganti.

Il processo prevede che gli aggregati vengano riscaldati a circa 130 °C nell'essiccatore, per essere poi mescolati a circa 110 °C, mentre la temperatura di posa in opera delle miscele è stata impostata tra gli 80 e i 90 °C. L'applicazione di questa tecnica non ha limitazioni per quanto riguarda differenti tipi di conglomerati ottenuti con materiali sia vergini che riciclati.

Circa 100.000 t di conglomerati sono state prodotte in impianti continui e discontinui, pertanto la tecnologia è entrata nella sua fase di applicazione industriale tenuto anche conto dei risultati positivi ottenuti su lavori svolti principalmente nei paesi scandinavi.

Consideriamo, senza entrare troppo in dettagli tecnici, le ragioni per le quali la miscelazione avviene in due fasi, a differenza di quanto avviene per una normale miscela a caldo HMA, dove la temperatura di miscelazione è quella necessaria ad ottenere una viscosità sufficientemente bassa (in genere 0,2 Pa*s) corrispondente ad una temperatura tra 120 e 160 °C (Fig. 7).

Nel caso delle miscele tiepide si parte da un bitume *soft* che raggiunge la viscosità di 0,2 Pa*s a temperature più basse (110-120 °C), il che significa che la miscelazione tra bitume e aggregati risulta altrettanto efficace quanto quella ottenibile con processi a caldo, ma con l'impiego di un bitume *soft* la miscela finale potrebbe risultare poco resistente e soggetta alla formazione di ormaie sotto traffico. Per migliorare le caratteristiche

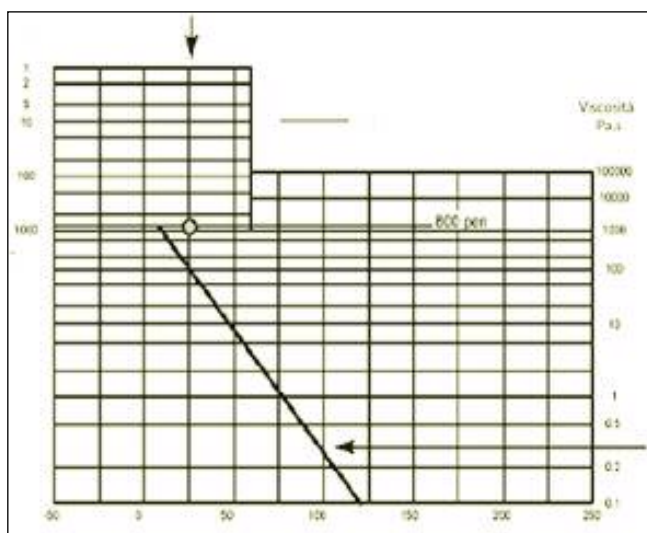


Fig. 7 Diagramma di correlazione di T °C, viscosità e penetrazione

di resistenza del prodotto finale si rende pertanto necessaria l'aggiunta di legante *hard*.

È comunque importante che il bitume *soft* ricopra omogeneamente gli inerti in modo da evitare che l'acqua necessaria alla formazione della schiuma penetri all'interno degli aggregati, a causa della loro microporosità, pregiudicando in tal modo l'adesione bitume-aggregato e quindi la coesione della miscela finale. Durante le fase di laboratorio sono state condotte prove comparative tra miscele tiepide e miscele tradizionali a caldo, con particolare riferimento alle prove di resistenza alle deformazioni permanenti e di resistenza alla fatica (Fig. 8).

Le prove sul campo sono state effettuate utilizzando per la produzione impianti tradizionali sia discontinui che continui; su entrambe le tipologie si sono rese necessarie modifiche marginali per inserire la linea di schiumatura del bitume *hard*. Nel corso di misurazioni, a parità di condizioni atmosferiche e di umidità degli inerti, si è constatata una riduzione nelle emissioni di CO₂ pari al 31,6% e contestualmente l'abbattimento delle emissioni di CO, NO_x, di polveri e di fumi.

Oltre al risparmio energetico e alla riduzione dei gas a effetto serra il Wam Foam®

presenta ulteriori vantaggi: la stesa di conglomerati resta possibile a temperature ambientali più basse, il che consente di lavorare anche in inverno. Inoltre l'apertura al traffico è più rapida che nel caso di impiego di conglomerati a caldo classico (Fig. 8).

Per quanto riguarda infine l'aspetto energetico, in fase di confezionamento si è riscontrata una riduzione dei consumi di carburanti che, per una produzione di 125 t/h, è risultata pari a circa il 30% portando il consumo dai 6-6,5 l/t ai 4,4 l/t.

3.2.4. Conglomerati bituminosi a bassa energia

Negli ultimi anni in Francia si è avuta un'intensa attività di ricerca con l'obiettivo primario di contenere la temperatura di processo al di sotto dei 100 °C, che ha portato alla messa a punto, presso alcune fra le maggiori imprese, di nuovi processi accomunati da una non completa rimozione dagli aggregati dell'acqua naturale e da una schiumatura del bitume agevolata dall'uso di additivi.

La presenza di acqua residua conferisce una buona lavorabilità alla miscela anche a temperature di stesa di circa 70 °C. Qualora invece si voglia ottenere una schiumatura naturale occorre avere uno stretto controllo dell'umidità della miscela attraverso l'eventuale apporto di acqua prima dell'introduzione del bitume.

Questi procedimenti sono praticabili in tutti i tipi di impianto di asfalto attraverso adattamenti marginali

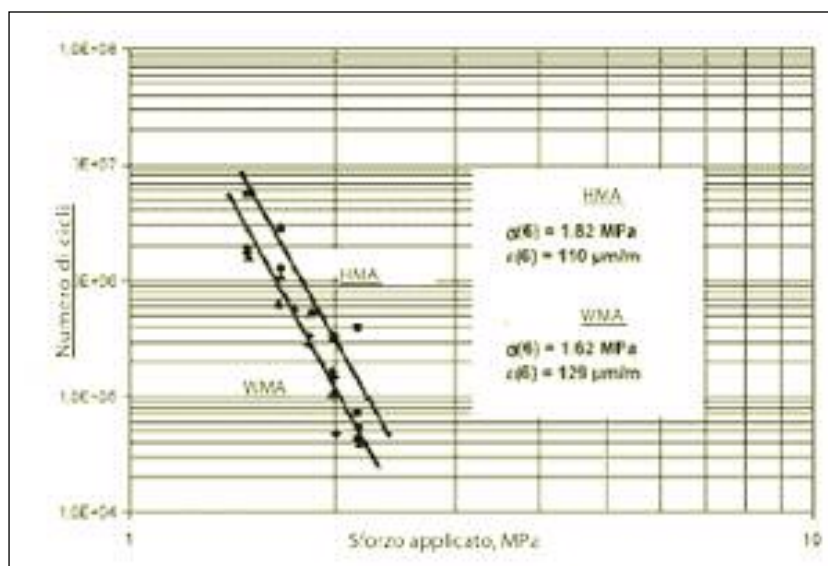


Fig. 8 Diagrammi di rottura a fatica per provini WMA e HMA

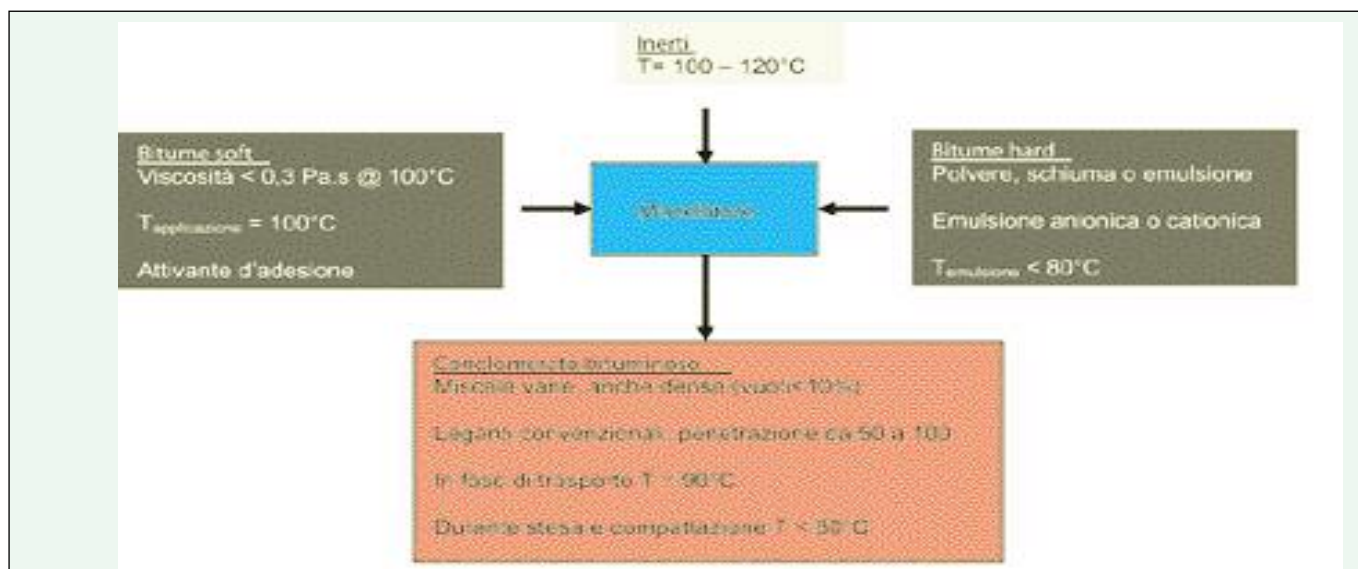


Fig. 9 Schema del processo WAM FOAM

(montaggio di una barra per la spruzzatura, attrezzata con un misuratore di portata dell'acqua).

La società Eiffage Travaux Publics ha depositato con il marchio EBT (conglomerati a bassa temperatura) i brevetti di un procedimento di fabbricazione intorno ai 90 °C le cui prestazioni sono in tutto comparabili con quelle di un conglomerato a caldo tradizionale. A sua volta, la società di servizi Fairco propone il procedimento EBE (v. pag. successiva), che consiste nel riscaldamento della sola frazione grossolana presente negli aggregati e nel conservare temperatura e umidità naturali nella parte sabbiosa, che contiene la maggior parte dell'acqua.

Anche il Gruppo Colas è stato partecipe in questo sforzo di innovazione tecnologica proponendo con il marchio 3E tre diverse tecniche che consentono di abbassare la temperatura di confezionamento di circa 40 °C. Su questo punto la società ha assunto una posizione molto prudente, decidendo di non scendere mai al disotto dei 110 °C, eliminando così possibili rischi di instabilità nel prodotto finale dovuti a presenza di acqua nel conglomerato.

I risultati dei numerosi lavori sperimentali svolti sui cantieri stradali cominciano a dare i loro riscontri che mostrano il delinearsi di nuovi equilibri. È recente l'ufficializzazione dell'accordo in forza del quale la Eiffage Travaux Publics utilizzerà nei propri impianti la tecnologia Fairco.

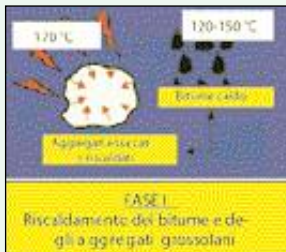
Vediamo in dettaglio il processo EBE (ovvero Enrobage à Basse Energie equivalente, secondo la terminologia inglese, a LEA – Low Energy Asphalt) risultato da un progetto di ricerca che si connota in maniera del tutto peculiare, pur avendo gli stessi obiettivi strategici di risparmio energetico e abbattimento dell'emissione comuni a tutte le altre tecnologie WMA.

Partendo da una rivisitazione dei fenomeni termodinamici tesa a ottimizzare i rendimenti energetici e traendo vantaggio dalle proprietà fisiche del bitume (fluidità a caldo per bagnare solo gli inerti grossi e attitudine a formare "schiuma" per rivestire le sole frazioni fini) la peculiarità del sistema si manifesta attraverso la messa a punto di modalità operative che si discostano il meno possibile da quelle adottate per le tradizionali tecniche a caldo.

Utilizzando un singolo bitume è possibile ottenere, con trascurabili modifiche a un impianto di produzione tradizionale, una miscela dotata di buone caratteristiche meccaniche sfruttando gli effetti combinati di temperatura, acqua ed energia di miscelazione oltre che un modesto riscaldamento dell'aggregato grosso. Nelle tradizionali tecnologie a caldo, il calore conferito agli inerti ha un duplice scopo:

- essiccare gli inerti per evitare futuri distacchi del film di bitume dagli aggregati, a causa dell'acqua residua;

Schema del processo EBE



Il processo, illustrato schematicamente nelle figure a lato, sfrutta la caratteristica del bitume di dar luogo a emulsioni o a schiuma in presenza di acqua.

L'acqua necessaria a queste trasformazioni è quella contenuta nella frazione fine nell'aggregato rimasta umida, a differenza dell'aggregato grosso che viene riscaldato a una temperatura moderata.

I. Gli aggregati vengono separati in due frazioni (pietrisco più sabbia grossa, sabbia fine e filler) che saranno immesse separatamente e in tempi successivi nel miscelatore;

II. l'aggregato grosso viene essiccato e riscaldato a temperatura inferiore a 150 °C; il calore assorbito verrà ceduto in parte per riscaldare la frazione fine e il filler che verranno immessi nel miscelatore umidi e a temperatura ambiente;

III. il bitume viene riscaldato alle usuali temperature di lavorazione (140-180 °C); ad esso viene aggiunto un additivo *antistripping* che favorisce il rivestimento degli aggregati umidi e migliora l'espansione, ovvero consente la formazione di schiuma, impedendo allo stesso tempo che l'acqua possa successivamente spoliare gli aggregati grossi;

IV. tutto il bitume previsto nella miscela di progetto riveste l'aggregato grosso in modo uniforme, garantendo la formazione di un film spesso che si avrebbe nella tecnica tradizionale (si tenga conto che la superficie specifica della frazione grossolana è minore di quella fina) e saldamente collegato alla superficie dell'inerte;

V. eventuali correzioni di umidità della frazione fina potranno essere fatte prima del suo inserimento nel miscelatore. Eventuali eccessi d'acqua saranno soggetti a condensa, grazie agli scambi di calore con la frazione riscaldata, il che determina una migliore lavorabilità anche a temperature inferiori a 100 °C;

VI. al termine della miscelazione è possibile aggiungere acqua che si disperderà sotto forma di piccole gocce attorno al film di bitume, ritardandone la presa e migliorando, di conseguenza, la lavorabilità.

Alla temperatura di 70 °C gli asfalti "a bassa energia" hanno le stesse caratteristiche dei conglomerati a caldo.

Sia il tamburo che l'impianto di raccolta dei fumi potranno essere di dimensioni contenute, visto le minori temperature operative e l'assenza di frazioni fini.

► riscaldare gli inerti ad una temperatura adeguata per il loro rivestimento da parte del bitume.

In base alle precedenti considerazioni relativamente ai rendimenti energetici degli scambi di calore in fase di confezionamento dei conglomerati bituminosi, la temperatura prescelta per il processo è inferiore ai 100 °C. In queste condizioni l'acqua presente negli aggregati non viene eliminata del tutto, ma può essere sfruttata per assicurare migliori lavorabilità e compattazione al di sotto dei 100 °C, consentendo, magari con l'uso di un tensioattivo, di interagire con il bitume senza conseguenze sulle prestazioni meccaniche del prodotto finale. Per quanto riguarda la frazione fine (sabbia fine e filler) occorre precisare che non è necessario che essa venga essiccata ai fini del suo completo rivestimento da parte del legante, qualora si sfruttino a tal fine le proprietà del bitume allo stato di schiuma anziché di liquido, poiché la schiuma di bitume è molto più efficace su inerti fini che sui grossolani mantenuti a bassa temperatura.

I punti cardine del processo si rifanno alla tecnica del cosiddetto rivestimento sequenziale:

- riscaldamento ed essiccazione degli aggregati grossolani a meno di 150 °C;
- rivestimento degli aggregati con il bitume alla normale temperatura d'impiego nella quantità totale prevista per l'intera miscela;
- aggiunta della sabbia umida e a temperatura ambiente.

I tradizionali impianti, siano essi discontinui o continui, possono essere impiegati così come sono salvo modifica con idonei kit che consentano l'alimentazione delle due frazioni di aggregati nella bilancia prima del miscelatore.

La ridotta formazione di polvere richiede poi una minore superficie filtrante e quindi entrambi i dispositivi di essiccazione e di filtraggio possono entrambi essere di dimensioni più contenute di quanto normalmente richiesto visto che dovranno trattare solo il 60% circa delle sostanze minerali complessive, per di più in assenza di parti fini.

È inoltre utile ribadire il fatto che questa tecnica consente il confezionamento e la messa in opera di conglomerati bituminosi la cui formulazione segue le stesse procedure usate per quelli tradizionali a caldo,

ovvero:

- negli studi di laboratorio si utilizzano le stesse prove caratterizzanti le miscele a caldo;
- si utilizzano le normali gradazioni di bitume stradale;
- i campi di applicazione sono gli stessi;
- le caratteristiche meccaniche si raggiungono subito dopo la stesa;
- il residuo di acqua è inferiore allo 0,5%.

Sui cantieri di lavoro si è riscontrato che il risparmio energetico e l'abbattimento delle emissioni sono risultati entrambi superiori a quelli riscontrati per le altre tecnologie tiepide.

Le applicazioni sul campo hanno confermato la possibilità di ottenere con le miscele tiepide un livello prestazionale del tutto analogo a quello raggiunto dai conglomerati a caldo, pur necessitando naturalmente di ulteriori verifiche a lungo termine. Per quanto riguarda lavori di riciclaggio, la tecnologia in esame può essere utilizzata sostituendo, parzialmente o totalmente, la sabbia con il fresato a temperatura ambiente.

3.2.5. Additivazione con zeoliti

Secondo questa tecnologia franco-tedesca la riduzione delle temperature di confezionamento dei conglomerati bituminosi dai 150÷250 °C ai 130÷145 °C si ottiene additivando il bitume con zeoliti sintetiche, secondo la tecnica messa a punto dalla gruppo Eurovia che nel 2000 avviò un programma di ricerca.

Le zeoliti, silico-alluminati cristallini, presenti anche in natura in rocce vulcaniche, sono strutturate internamente come delle vere e proprie spugne aventi la capacità di trattenere acqua fino a circa il 21% del loro peso e di emettere vapore, una volta riscaldate, tra gli 85 e i 180 °C. La riduzione della viscosità è in questo caso conseguenza diretta dell'emissione da parte delle zeoliti di vapore acqueo, che determina a sua volta l'espansione del bitume e la conseguente formazione di schiuma in grado di garantire una buona lavorabilità della miscela. Per il miglior risultato finale è importante che l'emissione del vapore avvenga in più fasi e non in maniera istantanea. Le zeoliti prodotte, con il nome commerciale di AsphaMin®, vengono aggiunte contemporaneamente al bitume in ragione dello 0,3% in peso sulla miscela, senza limitazioni particolari riguardo al bitume (modificato o tal quale) e/o gli aggregati (frantumati o fresa-

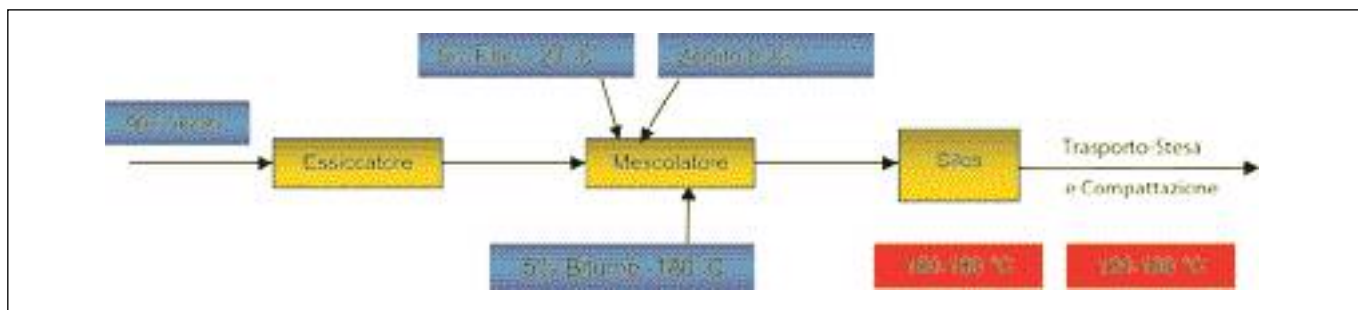


Fig. 10 Schema di confezionamento di WMA con sostanze inorganiche

to), secondo formulazioni del tutto analoghe a quelle utilizzate per le miscele a caldo.

L'impianto di confezionamento del conglomerato può essere del tipo tradizionale, in quanto l'impiego delle zeoliti richiede solo un dispositivo dosatore simile a quello previsto per aggiungere fibre, come illustrato in Fig. 10. Nel corso dei lavori sperimentali le miscele con zeoliti hanno mostrato un livello prestazionale del tutto simile a quello dei conglomerati a caldo tradizionali. Sulla base di misurazioni condotte sul campo si è verificato un risparmio energetico dell'ordine del 30%, in corrispondenza di una riduzione di 30÷35 °C della temperatura di produzione.

In particolare, per una riduzione della temperatura di confezionamento pari a 26 °C, la riduzione delle emissioni è risultata pari al 75%, mentre valori superiori sono stati riscontrati in fase di posa in opera, dove le emissioni si sono ridotte ad 1/10 per una diminuzione di 35 °C. È stata inoltre verificata, a parità di ogni altra condizione, la lavorabilità di miscele per strati di usura confezionate con e senza zeoliti rispettivamente a 140 e 170 °C in un impianto discontinuo. Nella tabella seguente vengono riportati i risultati di alcune misurazioni effettuate su provini differenziati non solo in base alle modalità di confezionamento (con o senza zeoliti), ma anche a quella di compattazione.

Tab. 4 Processi di confezionamento dei conglomerati bituminosi

Modalità di confezionamento	Compattazione	Caratteristica dei provini		
		Spessore (cm)	Vuoti (%)	Modulo (Mpa)
Senza zeoliti – T = 170 °C	Immediata	6,1	6,7	11000
	Ritardata	4,9	8,5	10630
Con zeoliti – T = 140 °C	Immediata	4,8	5,3	12400
	Ritardata	4,5	11,8	9700
Senza zeoliti – T = 140 °C	Immediata	6,0	8,5	10400

Nelle Fig. 11 e 12 sono riportate delle sistemazioni di impianti d'asfalto tradizionali in cui lo stoccaggio delle zeoliti è realizzato rispettivamente in silos o in sacchi e l'alimentazione avviene direttamente nel tamburo o nell'anello per il riciclaggio del fresato. Ad oggi in Francia e in Germania sono stati realizzati lavori su circa una cinquantina di cantieri per una produzione complessiva di circa 50.000 tonnellate di conglomerati. Altri cantieri sperimentali sono previsti in Canada e Stati Uniti d'America.

4. Conclusioni

Nell'arco degli ultimi dieci anni nel settore delle pavimentazioni flessibili hanno avuto luogo trasformazioni la cui portata va ben oltre il normale processo di miglioramento tecnologico. La ricerca ha permesso la messa a punto di numerose tecniche innovative basate su risparmio energetico, salvaguardia dell'ambiente e tutela della salute sui cantieri di lavoro.

Il concomitante rilancio delle tecniche di riciclaggio è stato certamente una risposta significativa al problema del consumo di risorse non rinnovabili e la crescente diffusione delle tecniche in sito ne aumenta ulteriormente l'efficienza, il cui *optimum* si raggiunge nei processi a freddo.

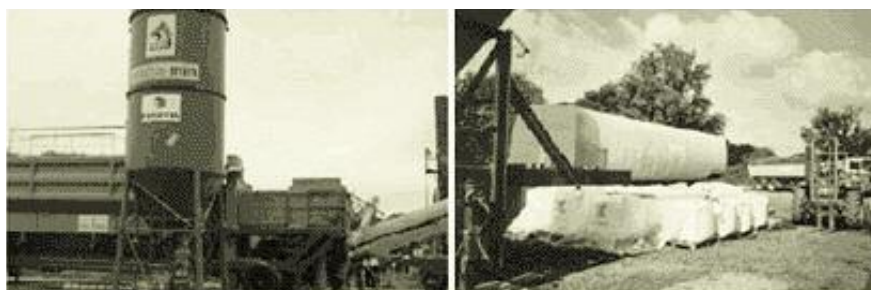


Fig. 11 Predisposizione, all'impianto di asfalto, di zeoliti in silos o in sacchi



Fig. 12 Immissione delle zeoliti nel tamburo essiccatore

In questo quadro generale si collocano le tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi a bassa energia ovvero le *Warm Mix Asphalt* che, rispetto alle tradizionali tecniche a caldo, arrivano a ridurre del 40% le temperature di processo, dando luogo a un sensibile risparmio energetico e a un cospicuo abbattimento delle emissioni con evidenti vantaggi in termini ambientali e di condizioni di lavoro.

Un elemento comune a tutte le tecniche WMA è l'obiettivo di ottimizzare il processo sfruttando alcune caratteristiche chimico-fisiche del bitume al fine di ottenere una miscela composta estremamente lavorabile durante tutto il processo produttivo fino alla sua compattazione, in modo da acquisire rapidamente le caratteristiche meccaniche richieste per sopportare le sollecitazioni indotte dal traffico stradale.

Dalla presente nota si può ricavare l'impressione che la notevole gamma di proposte tecnologiche possa essere il risultato di una ricerca alquanto casuale che, magari un po' a tentoni, è andata a interessare tutte le possibili tecniche di confezionamento di miscela a caldo e a freddo. Una visione globale degli sforzi sviluppati dall'industria di settore mette invece in risalto un percorso logico teso a trarre vantaggio da tutte le possibilità offerte da varianti di tecniche sperimentate e applicate sui cantieri stradali per prodotti finali del tutto equipollenti.

A tale riguardo, nonostante che in alcuni casi vengano utilizzate, come spesso accade, idee nate per tutt'altre applicazioni, va sottolineata l'originalità di alcune tecniche messe a punto e già utilizzate per la messa in opera di quantità significative di materiale su strada.

In attesa di conoscere l'esito degli ulteriori studi e sperimentazioni in corso nonché della valutazione delle prestazioni nel tempo, è tuttavia possibile esprimere un primo giudizio sulle tecnologie illustrate in base ai risultati già ottenuti e all'impatto sull'organizzazione dei mezzi di produzione.

In generale si può osservare che con i conglomerati a bassa energia (processo EBE/LTA) si ottengono le maggiori riduzioni delle temperature di processo e che al tempo stesso detta tecnica richiede modifiche marginali sia alla configurazione dell'impianto di confezionamento a caldo sia alle sue tradizionali modalità operative. Giova comunque sottolineare che altre opzioni tecnologiche rappresentano valide soluzioni senza dubbio meritevoli di ulteriori approfondimenti volti ad aumentarne la diffusione.

L'efficienza delle tecniche WMA sarà definitivamente sancita quando potrà essere possibile la loro adozione sui treni di riciclaggio in sito. In questo caso, ai risparmi energetici già realizzati si aggiungerebbero anche quelli relativi all'impiego totale del fresato e alla riduzione dei costi di trasporto dei materiali da e per il cantiere di lavoro.

A tale proposito uno degli annunci più recenti, se non l'ultimo, riguarda la messa a punto da parte dell'impresa francese Screg di una tecnologia tiepida, brevettata con il marchio commerciale Ecomac, che utilizza un tamburo montato su *chassis* per "l'intiepidimento" di un conglomerato bituminoso precedentemente confezionato a freddo [46].

Con riferimento alle tecnologie WMA descritte in precedenza, nella tabella 5 della pagina successiva si riporta una sintesi di alcuni aspetti qualificanti in termini di:

- natura e dosaggio degli additivi impiegati;
- temperature di processo durante miscelazione, stesa e compattazione;
- dispositivi di miscelazione e problemi produttivi;

► applicazioni e prestazioni della pavimentazione.

Dai dati in tabella si evince che alcuni punti sono, entro certi limiti, comuni a tutte le tecniche WMA:

- ridotti consumi di energia;
- ridotta formazione di CO₂;
- meno fumi e aerosol nel processo di stesa;
- minore dimensione del dispositivo di filtraggio dell'impianto di asfalto;
- minor invecchiamento del legante e quindi maggiore resistenza alla fessurazione;
- minori emissioni all'impianto di confezionamento;
- migliori caratteristiche prestazionali del prodotto.

A completamento e integrazione di quanto sopra si possono fare le seguenti considerazioni:

- la maggior parte dei processi esaminati necessita di additivi speciali e/o di modifiche delle attrezzature esistenti. Nel valutarne la fattibilità, dal punto di vista economico; è pertanto necessaria una particolare attenzione in quanto i costi di investimento potrebbero essere controbilanciati dai costi di attivazione e viceversa;
- le prestazioni in termini di risparmi ambientali ed energetici non sono necessariamente correlate alle prestazioni della pavimentazione o all'ampiezza del loro spettro applicativo;
- è importante notare che le tecniche tiepide fin qui esaminate conducono a miscele con prestazioni vici-

ne o perfino migliori delle miscele a caldo convenzionali. Basta considerare ad esempio che le minori temperature di processo, implicando un minore invecchiamento del bitume, ne determinano migliori caratteristiche di resistenza alle fessurazioni;

- a causa delle minori temperature di lavorazione, tutte le tecniche esaminate intervengono sulla viscosità del bitume e/o sulla fluidità della miscela, le misure adottate, se non studiate adeguatamente o stressate oltre certi limiti, hanno implicato il rischio di abbassare la resistenza alla formazione di ormaie;
- l'umidità residua presente nella miscela se da una parte offre il vantaggio di una maggiore lavorabilità in fase di stesa e compattazione, dall'altra pone il problema della possibile spolazione del film di bitume dagli inerti, fenomeno che va affrontato seriamente e ovviato, se del caso, con agenti cosiddetti *antistripping*;
- in ogni caso occorre sottolineare la necessità di progettare attentamente ogni singolo intervento, specie dal punto di vista chimico-fisico, proprio per evitare i rischi appena accennati. A tale riguardo occorre aggiungere che i produttori di additivi mettono a disposizione dei produttori di asfalto una vasta gamma di materiali in grado di affrontare con successo le varie problematiche, in modo da scongiurare l'eventualità di potenziali fallimenti nelle applicazioni di tecnologie tiepide. ►

Quadro sinottico informativo relativo alle tecniche di lavorazione di miscele in asfalto con processi a bassa temperatura

Note applicative / Processo	Additivi		Risparmi	Caratteristiche aggiuntive	Problemi produttivi	Temperatura stoccaggio bitume	Temperatura di miscelazione	Temperatura di posa	Impianto di confezionamento	Applicazioni	Caratteristiche medie prestazionali
	Natura	Dose									
Additivazione con fluidificante del bitume	Paraffine FT	2-4% su bitume	Energia di riduzione fumi, Temp. ridotti per miscelazione e compattazione	Intingimento del bitume. Stessa p.u. veloce	Aumentata di immissione additivo e unità di mescolamento	30°C inferiore alla temperatura usuale di stoccaggio	130-150°C	120-130°C	Impianti continui e discorinui	Basi e tapelli inclusi conglomerati chiusi, SMA, mastici	Maggiore resistenza a omalimento rispetto alle HMA
Schiuma di emulsione	Agente schiumante e emulsificante	N/A	Energia di riduzione fumi	Bassa ossidazione bitume. Richiede stoccaggio tepido del bitume	Aumentata sottopressione di 2,5 bar	80-90°C surriscaldato alla miscela a 110-125°C	Aggregato 110-120°C	75-90°C in funzione del legante	Treni di riciclaggio a caldo. Impianti con miscela con emulsioni a freddo	Arcia gamma di miscele e caricamenti e con RAP	Resistenza a omalimento tra miscele chiuse e S/A. Compattatori e simile a HMA
Bitume schiumato e aggregati riscaldati	Dopo l'adesione il composto reagisce in un reattore riscaldato	N/A	Energia di riduzione fumi	Miscela lavorabile quanto quelle tradizionali HMA	Bene di immissione schiuma di bitume calibrata per ambiente caldo e polveroso	Temperatura di stoccaggio bitume abituale	Aggregato 90°C	60-70°C	Continui e discorinui, con adattamenti unitari a carica scaturita per discorinui	Basi chiuse e tapelli con ampia gamma di caricamenti e con RAP	Stessa delle miscele a caldo
Sistema a due componenti di legante	Dopo l'adesione nel bitume soft. Agente schiumante e nell'hard	N/A	30% di carburante & 30% CO ₂ e 50-60% riduzione di polvere	Miscela con più lunga stabilità allo stoccaggio. Impianto riscaldamento e raccolta polveri più semplici	Modifiche all'impianto per sciumatura a. Possibile necessità alimentatori e asfalto	Temperatura di stoccaggio legante abituale	100-120°C	70-100°C	Impianti continui e discorinui	Adatto per basi e tapelli	Stesse prestazioni HMA (omale, elasticità e tessitura superficiale) per miscele dense
Conglomerati bituminosi a bassa energia	Dopo l'adesione	0,3% mix	50% energia & 50% CO ₂ e IPA	Assolutamente polveri e pulizia all'altezza	Unità di riciclo sul bitume	Normale (120-160°C)	60-90°C	60-70°C	Impianti continui e discorinui	Arcia gamma di miscele con RAP e modificato	Stessa delle Miscele a caldo
Additivazione con Zeoliti	Zeoliti nella miscela	0,3% mix	30% carburante, 75% fumi. riduzione particelle	Nessuna influenza sulla ammissione dell'impianto. Meno ossidazione bitume	Sistema di stoccaggio, nastro alimentatore dispositivi per zeoliti	Solita (120-160°C)	130-145°C	100°C	Impianti continui e discorinui	Arcia gamma di miscele e incuso modificato, asfatti con RAP e mastici	Stessa delle Miscele a caldo

Riferimenti bibliografici

- [1] OCDE, *Recherche en matière de routes et de transports routiers. Stratégie de recyclage dans les travaux routiers*, 1997
- [2] J.H. Dijkink., dr R. C. Reintjes, ing. K.P.Wilms, *Steamed asphalt pavement design & construct project service area A15-Rotterdam NL*, 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcellona 2000
- [3] Koenders et al, *Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures*, 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000
- [4] K. J. Jenkins, A. A. A. Molenaar et al, *Foamed bitumen treatment of warmed aggregates*, 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000
- [5] Australian Asphalt Pavement Association, *Warm Mix Asphalt-a state of the art review*, Advisory note 17
- [6] K. J. Jenkins, A. A. A. Molenaar, J. L. A. De Groot, *Foamed asphalt produced using warmed aggregates*, Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 71, 2002
- [7] R. Fioravanti, F. Bergliardi, S. Tattolo, G. Heiling, *Bitumi modificati a bassa temperatura di miscelazione – caratterizzazione del bitume modificato con cera sintetica*, Strade & Autostrade n° 2 2003
- [8] C. Giavarini, *Produzione e stesa del conglomerato a più basse temperature*, RASSEGNA DEL BITUME, N° 45/03, pag 45-48
- [9] J. Bonvallet, *Les enrobés sont pluriel*, Revue Générale des Routes et des Aéroports, N° 799
- [10] C. Giavarini, *Le ricerche per ridurre la temperatura del conglomerato*, Asfalto e Innovazione in Europa - ASPHALTICA 2003, pag 103-110,- Ed. SITEB
- [11] W. Barthel, J. P. Marchand, M. Von Devivere, *Warm Asphalt Mixes by adding a synthetic zeolite*, Technical Paper
- [12] A. Romier, M. Audéon, J. David, Y. Martineau, *Low energy asphalt (LEA) with the performance of hot mix asphalt (HMA)*, European Roads Review, Special Issue, RGRA 2-2004
- [13] L. Drüschner, *Low temperature asphalt – Experience in rolled asphalt*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004
- [14] J. H. Jellie, A. Sewerll, I. Walsh, P. Phillips, A. R. Wooside, *Assessing performance of cold mix foamed emulsion asphalt mixes*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004
- [15] P. A. Landa, T. Kneepkens, J. Th. Vd. Zwan, *Low temperature-asphalt, a production process with the possibility to produce and pave hot mix asphalt at temperatures below 100 °C or 212 °F*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004
- [16] R. Rühl, *The German Bitumen Forum – Co-Operation in Partnership*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004
- [17] J. A. Soto, A. Blanco, *Maintenance of porous wearing course by using warm open graded mixes with polymer modified medium setting emulsions*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004
- [18] J. A. Soto, A. Blanco, *Warm in-plant recycling with bituminous emulsions*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004
- [19] Van De Ven, Mangus et al, *Experiences with Half-Warm Foamed Bitumen treatment process in The Netherlands*, extract from CAPSA 2004 Papers
- [20] R. Van Wlik, *The environmental management act, energy efficiency in dutch asphalt industry*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004
- [21] J. P. Planche, S. Mariotti, A. Stawiarski, *New trends in working temperature reduction of asphalt pavement*, Technical Paper
- [22] J. N. Onfield, *Les Enrobés Tièdes, une alternative*, Route Actualité n° 136, Juillet-Août 2004
- [23] J. N. Onfield, *EBE, les enrobés économes en énergie, l'une des voies de R&D du Groupe COLAS en technique à froid*, Route Actualité n° 136, Juillet-Août 2004
- [24] J. N. Onfield, *EBE, des enrobés bitumineux mis en oeuvre entre 60 et 90 °C*, Route Actualité n° 140, décembre 2004
- [25] J. N. Onfield, *EBE, les enrobés économes en énergie, l'une des voies de R&D du Groupe COLAS en technique à froid*, Route Actualité n° 140, décembre 2004
- [26] B. D. Prowell, P. E. Graham, C. Huerley, *Evaluation of Aspha Min® zeolite for use in Warm Mix Asphalt*, National Center for Asphalt Technology, Report 05-04, June 2005

- [27] B. D. Prowell, P. E. Graham, C. Huerley, *Evaluation of Sasobit® for use in Warm Mix Asphalt*, National Center for Asphalt Technology, Report 05-06, june 2005
- [28] Aashto Standing Committee on Highways, *Warm mix Asphalt Technology*, Technical Committee, September 18, 2005
- [29] A. Romier, *Le procédé EBE. Une innovation récemment prouvée par la FNTP*, l'ingénieur constructeur, novembre 2005
- [30] M. F. Ossola, *Les basses calories font recette*, Revue Générale des Routes et des Aerodromes n° 845, février 2006, pag. 76-78
- [31] L'asphalte et l'environnement. *L'approche Néophalte basse température*, Revue Générale des Routes et des Aerodromes n° 846, février 2006, pag. 45-47
- [32] *Experimentation: Enrobés basse calorie*, Revue Générale des Routes et des Aerodromes n° 846, février 2006, pag. 86-91
- [33] J. N. Onfield, *Revêtement bitumineux à basse calorie. L'urbain comme milieu d'application de prédilection*, Route Actualité n° 149, mars 2006, pag 30-31
- [34] J. N. Onfield, *COLAS, Quand la recherche trouve*, Route Actualité n° 149, mars 2006 pag 32-33
- [35] J. N. Onfield, *Enrobés Basse Energie. Plus de 5.000 t mises en oeuvre*, Route Actualité n° 150, avril 2006 pag 12-13
- [36] J. N. Onfield, *Quelle liants pour quelles performances ?*, Route Actualité n° 151, mai 2006 pag 34-36
- [37] *Un sujet chaud, les enrobés basses calories*, bitume info, n° 12, mai 2006
- [38] X. Carbonneau, J. P. Henrat, F. Létaudin, *Enrobés 3 E de Colas, une réponse sûre à la problématique des enrobés dits «tièdes»*, Revue Générale des Routes et des Aerodromes n° 849, june 2006, pag. 70-75
- [39] C. Huerley, B. D. Prowell, *Evaluation of Evotherm® for use in Warm Mix Asphalt*, National Center for Asphalt Technology, Report 06-02, june 2006
- [40] G. C. Huerley, B. D. Prowell, *Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix Asphalt*, National Center for Asphalt Technology, june 2006
- [41] M. Bonola, L. De Ferrariis, *Tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi con processi a bassa temperatura*, Associazione Mondiale della Strada - AIPCR, Comitato Nazionale Italiano, XXV Convegno Nazionale Stradale, Comitato Tecnico C.4.3. "Pavimentazioni Stradali", Napoli 4-7 Ottobre 2006
- [42] M. d. M. Colas, J. Soto, *Recyclage demi chaud (tiède) avec émulsion bitumineuse*, Congres Mondial de l'Emulsion 2006, Lyon 3.6 Octobre 2006
- [43] E. Crews, *Emulsion-based warm mix asphalt materials and field performance*, 2006 World Congres of Emulsion, Lyon October 3rd and 6th 2006
- [44] J. J. Potti J. L. Pe-a, M. Martinez, *Warm bituminous mixes with emulsion. A step forward to eco-effectiveness*, 2006 World Congres of Emulsion, Lyon October 3rd and 6th 2006
- [45] J.N. Onfield: *Une solution environnementale intégrale*, Route Actualité n° 155 Octobre 2006 pag 21-22
- [46] Procédés et Produits, *Le guide de l'innovation, SCREG, Ecomac, beton bitumineux à l'émulsion*, Revue Générale des Routes et des Aérodroemes n° 852, octobre 2006 ■