

## Conglomerati bituminosi ad alta lavorabilità per la realizzazione di pavimentazioni ad elevate prestazioni strutturali ed ambientali in ambito urbano

Prof. Andrea Simone \*

Dott. Ing. Matteo Pettinari \*

Dott. Ing. Francesco Petretto \*

Dott. Alberto Madella \*\*

\* DICAM Strade - Università di Bologna

\*\* API Bitumi spa

### 1. Introduzione

È in corso di avanzata realizzazione nella città di Bologna la sovrastruttura stradale a servizio del nuovo sistema di trasporto pubblico a guida vincolata (CIVIS). Il nuovo mezzo di trasporto su gomma è caratterizzato da un sistema di guida ottica che determina la necessità di una elevata regolarità del piano di via e di particolari caratteristiche illuminotecniche dello stesso. La frequenza elevata dei passaggi prevista in fase di esercizio, la bassissima variabilità delle traiettorie, il carico elevato per singolo asse e la particolare conformazione dei pneumatici utilizzati unitamente ad elevate pressioni di gonfiaggio hanno determinato la progettazione di una pavimentazione con materiali innovativi al fine di garantire le migliori prestazioni in termini di resistenza all'ormaiamento e al danno per fatica (utilizzo di bitumi modificati e di conglomerati bituminosi ad alto modulo).

Le operazioni di cantiere particolarmente difficili nel centro storico hanno indirizzato la scelta su materiali che assicurassero una elevata lavorabilità (bitumi tiepidi) per garantire, una migliore posa in opera ed in definitiva una maggiore durabilità della pavimentazione.

Le verifiche effettuate in sito mediante l'impiego della termo camera per la mappatura delle temperature di stesa e le prove di controllo delle prestazioni effettuate sui materiali messi in opera hanno permesso di valutare l'affidabilità delle lavorazioni e delle ipotesi progettuali.

### 2. Il sistema di Trasporto Pubblico a Guida Vincolata della città di Bologna

Negli ultimi anni, lo sviluppo di Bologna e dei centri urbani limitrofi ha determinato la formazione di agglomerati urbani senza soluzione di continuità. All'interno di queste aree si genera una domanda di mobilità considerevole che necessita di un sistema di trasporto innovativo ma soprattutto efficiente. La soluzione a guida vincolata su gomma è risultata essere quella che meglio si adattava alle problematiche relative alla morfologia storico urbanistica tipica delle città italiane.

Il progetto di Trasporto Pubblico a Guida Vincolata (TPGV) di Bologna prevede l'utilizzo di una nuova tipologia di filobus, denominati "Civis" (Figura 1) che servirà i cittadini del bacino est di Bologna attraverso quattro differenti linee.

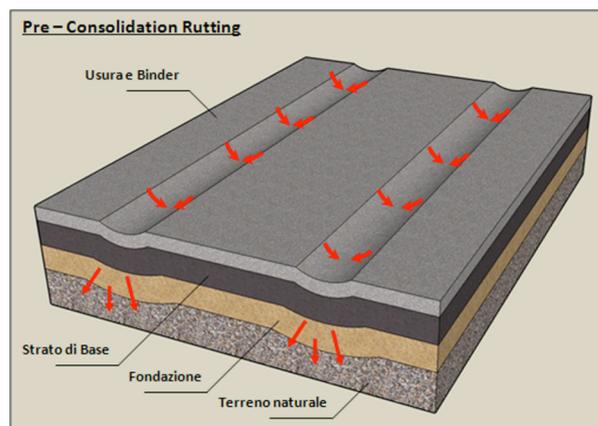


Figura 1: il veicolo a guida ottica vincolata "Civis".

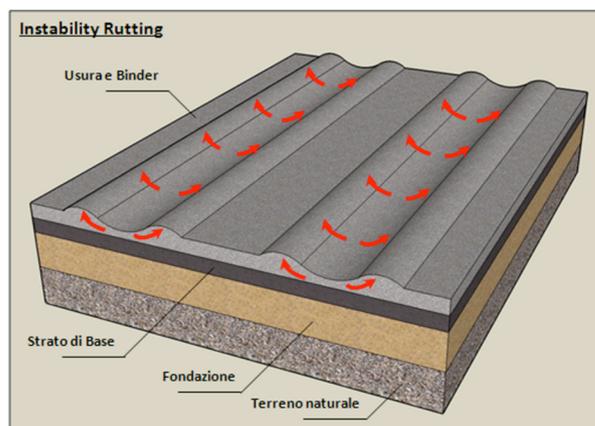
I veicoli Civis, dotati di motori elettrici, sono alimentati da corrente elettrica continua ottenuta dal collegamento della linea aerea tramite trolley sfruttando lo stesso sistema impiegato dai normali filobus. Il voltaggio della linea aerea sarà portato a 750 Volt, dagli attuali 600 Volt, consentendo

maggiori potenze e un miglioramento delle condizioni di viaggio. Questa tipologia di motore comporta una riduzione al minimo dell'inquinamento ambientale e acustico. I veicoli Civis hanno emissioni zero e sono caratterizzati da una notevole silenziosità e da vibrazioni prodotte dal contatto pneumatico-pavimentazione ridotte. Esse dipendono fortemente dalle condizioni di manutenzione e regolarità del manto stradale. La frequenza elevata dei passaggi necessari a soddisfare la domanda di trasporto del bacino di utenza genera condizioni di carico che inducono livelli tenso-deformativi critici all'interno del solido stradale. Inoltre il mezzo è caratterizzato da una particolare conformazione dei pneumatici utilizzati (2\*495/45 R22.5) e da pressioni di gonfiaggio di circa 0.80 MPa. Queste caratteristiche tipologiche degli organi di rotolamento adottati derivano dall'elevato carico massimo che il mezzo deve trasmettere alla pavimentazione negli assi più carichi (130 kN). La guida ottica vincolata, che indirizza il mezzo sempre lungo la stessa direzione, induce ad una trascurabile variabilità delle traiettorie e quindi della traccia dei pneumatici generando condizioni di carico disomogenee sulla sezione stradale. La principale forma di ammaloramento che si sviluppa in queste particolari condizioni di carico è l'accumulo di deformazioni permanenti. Il meccanismo di ormaio s'innescia progressivamente con l'aumento del numero dei passaggi della ruota e quindi del numero delle applicazioni di carico ed è generalmente somma di due distinti fenomeni [Bahuguna et al., 2006]. Il primo, definito di post-compattazione (*Pre-Consolidation Rutting* Fig. 2a), è dovuto all'incremento del livello di addensamento degli strati in conglomerato bituminoso, con conseguente modifica delle proprietà denso-volumetriche del materiale. Il secondo fenomeno, conseguente al primo, è l'ormaiamento vero e proprio, che si manifesta a volume costante con conseguente abbassamento della zona attraversata dai pneumatici, a cui seguono evidenti fenomeni di refluentamento laterale (*Instability Rutting*), il cui volume

risulta all'incirca uguale a quello relativo al cedimento sopracitato (Figura 2b).



**Figura 2a:** Deformazione degli strati per ormaio di post-compattazione



**Figura 2b:** Deformazione degli strati per ormaio per refluentamento laterale

La formazione di ormaie sulla superficie viabile provoca grossi disagi alla guida dei veicoli creando un effetto "rotaia" durante la percorrenza del tratto stradale interessato dall'ammaloramento. Inoltre tale fenomeno porta al ristagno delle acque meteoriche in corrispondenza delle ormaie creando potenziali situazioni di pericolo che portano all'acquaplaning del veicolo e unitamente a questo accelerano l'invecchiamento della sovrastruttura stradale. Al fine di garantire una maggiore sicurezza della circolazione ed una elevata resistenza della pavimentazione si è deciso di intervenire con un intervento strutturale profondo sulle pavimentazioni interessate dal nuovo sistema di trasporto unitamente all'utilizzo di materiali innovativi.

### 3. La Pavimentazione stradale

L'intervento di rigenerazione della pavimentazione stradale interessata dal passaggio del Civis ha previsto la sostituzione dei vecchi strati in conglomerato bituminoso, ormai ammalorati, con miscele ad alto modulo complesso e maggiormente performanti. Nella figura 3 sono visibili gli spessori degli strati e la sezione della pavimentazione.

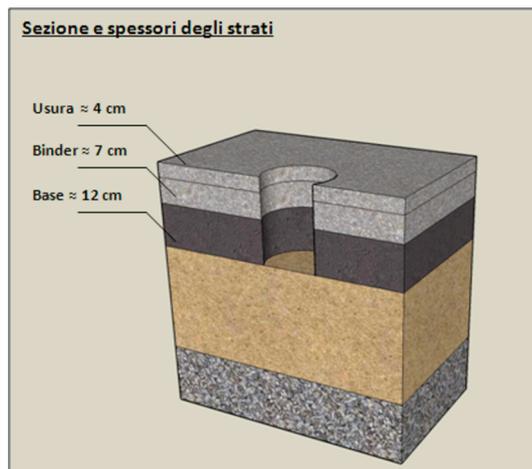


Figura 3: Strati pavimentazione

Le miscele impiegate per il rifacimento di tale infrastruttura viaria sono state realizzate utilizzando prevalentemente porfido ed in quantità minori inerti calcarei. Il legante scelto, per tutte e tre le miscele, è stato modificato con un elastomero di tipo SBS per migliorarne le proprietà reologiche. Ai fini del miglioramento della lavorabilità, il bitume è stato preventivamente additivato con un flussante che ne ha modificato la viscosità, il che ha permesso di stendere e compattare i conglomerati ad una temperatura minore, circa 100° - 110°, con evidenti benefici sia ambientali che pratici. La pezzatura dello strato di usura è tipica di uno Splitt Mastix Asphalt (SMA), con dimensione massima degli aggregati pari a 8 mm. Lo strato di collegamento e di base hanno una granulometria rispettivamente di 0 - 22 mm e 0 - 32 mm, (Fig. 4) mentre lo strato di fondazione, in stabilizzato granulometrico, è rimasto quello esistente previa azione di stabilizzazione meccanica che ne ha migliorato il grado di addensamento.

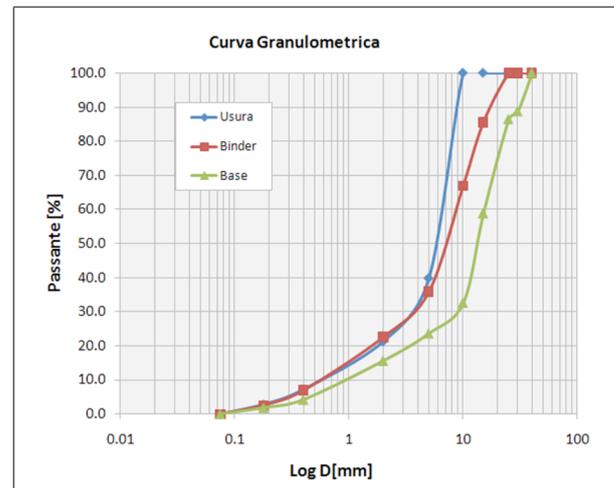


Figura 4: Curve granulometriche

### 4. Il programma sperimentale

#### 4.1 La termocamera ad infrarossi

La telecamera ad infrarossi è uno strumento ad alto rendimento che permette di rilevare in continuo e su vaste aree le temperature superficiali degli oggetti da essa ripresi.

L'utilizzo della termocamera è risultato essere, in ambito stradale, una soluzione ottimale per il controllo della qualità delle lavorazioni ed in particolare dell'omogeneità di stesa dei conglomerati bituminosi. Numerose ricerche internazionali hanno evidenziato come l'omogeneità della temperatura dei conglomerati durante la loro lavorazione in sito sia direttamente correlata con una uniformità di compattazione e di prestazioni durante la vita utile. La termocamera infatti è in grado di monitorare le temperature in tutte le fasi di lavorazione del materiale e distinguere chiaramente durante la stesa e la compattazione le aree più fredde e conseguentemente meno facilmente addensabili. Il dipartimento dei trasporti dello stato di Washington (WSDOT) ha dimostrato come la disomogeneità termica possa essere identificata come una preliminare forma di ammaloramento [Willoughby et al., 2001]. Le verifiche effettuate in laboratorio dallo stesso dipartimento su campioni prelevati in sito, su aree a differente temperatura di compattazione, hanno confermato come i campioni prelevati dalle aree a temperature inferiori, rispetto a quelle ottimali

della miscela di riferimento, presentino una minore densità apparente e conseguentemente una maggiore tendenza alla segregazione ed all'ammaloramento.

Tale dispositivo ad alto rendimento è stato adottato al fine di verificare la bontà delle lavorazioni di rifacimento delle sovrastrutture stradali dedicate al nuovo mezzo di trasporto pubblico di Bologna. Sono state monitorate e registrate le temperature durante tutte le fasi di lavorazione dei conglomerati bituminosi impiegati.

Un primo aspetto da sottolineare è la temperatura media di stesa che, grazie all'introduzione di fluidificanti nel bitume, è risultata essere decisamente inferiore alle temperature normalmente adottate per i conglomerati tradizionali (Fig. 5).

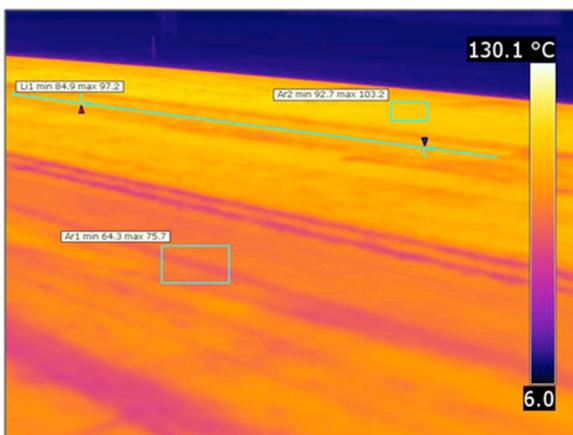


Figura 5: immagine ad infrarossi durante la stesa.

Dall'immagine si può notare come nel tratto appena posato la temperatura massima sia inferiore ai 130°C. Inoltre è possibile individuare tre differenti zone: Ar1, Ar2 e Li1.

Le prime due aree evidenziano le passate delle vibro finitrici, che in occasione lavoravano in parallelo, ed i corrispondenti delta termici mentre la linea continua mostra l'effetto del passaggio del rullo compattatore ed il relativo  $\Delta T$  generato (Fig. 5).

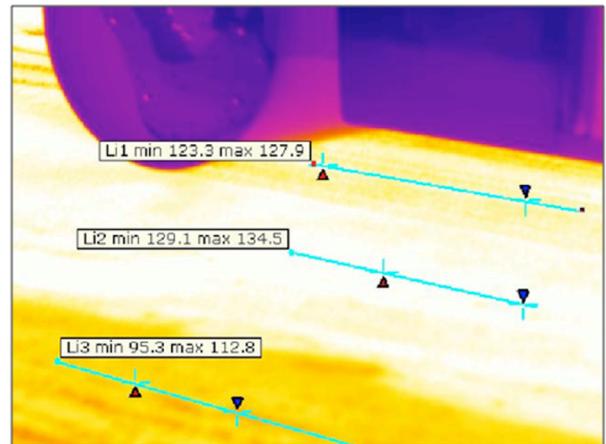


Figura 6: immagine ad infrarossi durante la stesa.

In Figura 6 sono state evidenziate tre linee corrispondenti a tre differenti fasi di lavorazione. Li1 ed Li2 confermano come il passaggio del rullo riduca la temperatura della zona interessata dalla compattazione per effetto dell'acqua erogata dallo stesso. Li3 permette di individuare lo scarto termico generato dalle vibro finitrici e la conseguente formazione del tipico giunto longitudinale (Fig. 6).

Complessivamente è stata riscontrata una notevole omogeneità termica durante la fase di stesa e compattazione effettuata ad una temperatura inferiore ai 130°C. Unitamente a questa è stata programmata una campagna di prove di laboratorio per verificare le proprietà volumetriche e meccaniche delle miscele stese.

#### 4.2 La caratterizzazione in laboratorio

Le prime prove condotte sono state quelle di tipo fisico, i cui dati hanno mostrato il basso valore di vuoti d'aria presenti sia nello strato di usura (< 4 %) che negli strati di binder e base. In accordo con quanto studiato dal prof. C.L. Monismith [Monismith et al., 1994] e riportato nel report americano NCHRP 1-37A [2004], ad un basso tenore di vuoti equivalgono migliori performance, in termini di elevati valori del modulo di rigidità e minore tendenza all'accumulo di deformazioni permanenti dovute al fenomeno della post-compattazione.

I dati confermano quanto visto in precedenza con l'analisi delle immagini termiche in merito alla omogeneità della stesa del materiale. Infatti andando

ad analizzare i singoli valori del contenuto di vuoti riscontrati nelle carote prelevate in sito, si nota che lo scostamento dal valore medio è contenuto in circa il 16% a prova del fatto di una ottima omogeneità di stesa (Fig. 7).

kPa come prescritto dalla normativa Europea EN 12697 – 25, si evince che i materiali mostrino un comportamento omogeneo con valori di deformazione accumulata finale racchiusi in un range ristretto (Fig. 8).

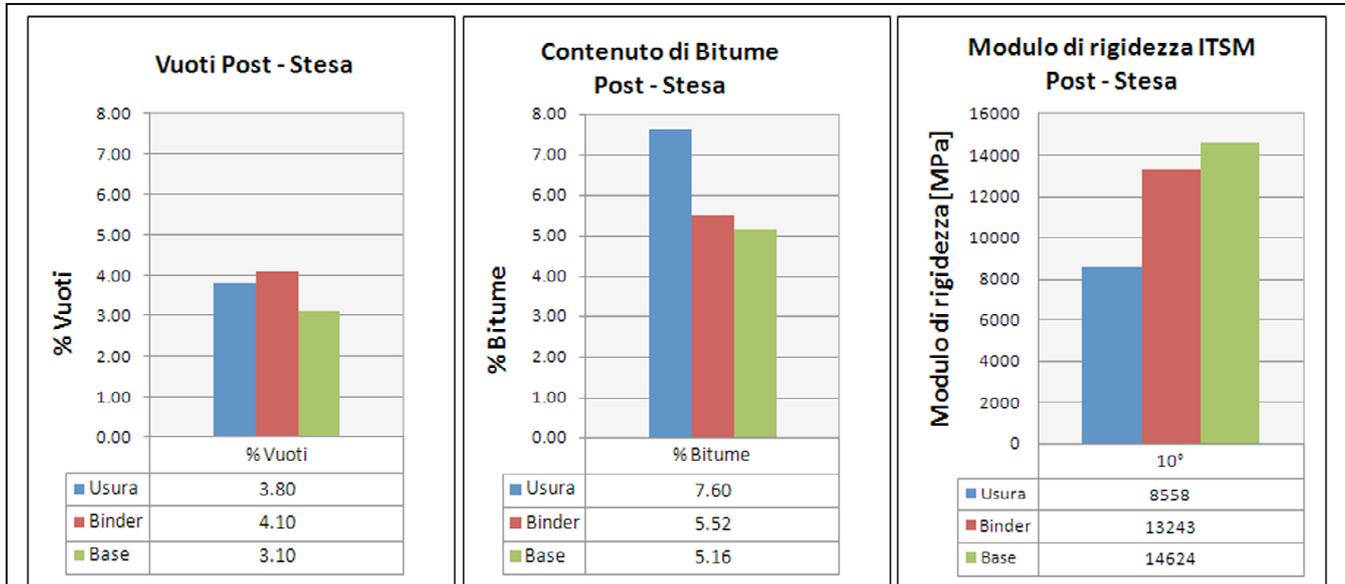


Figura 7: % Vuoti d'aria, contenuto di bitume riferito alla massa di inerte secco e Moduli di rigidezza

Successivamente alla caratterizzazione volumetrica del materiale, sono state eseguite le prove di tipo meccanico fini alla valutazione della tendenza ad ormaiamento delle miscele messe in opera. Una prova di laboratorio rappresentativa di questo fenomeno è la Creep uniassiale confinata che applica un carico dinamico costante definendo la deformazione accumulata in relazione al numero di cicli di carico [Petretto et al., 2011].

Per avvicinarsi maggiormente alle reali condizioni di impiego è stata variata la tensione verticale applicata al campione durante il test, portandola a 220 kPa (Fig. 9).

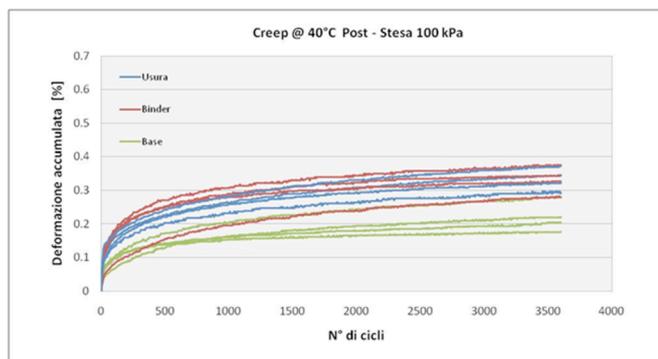


Figura 8: Curve di Creep a 100 kPa Post - Stesa

Le prove confermano quanto verificato sino a questo punto, infatti anche dai test eseguiti con carico di 100

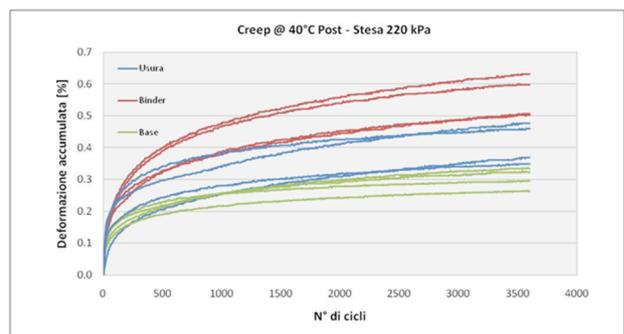


Figura 9: Curve di Creep a 220 kPa Post - Stesa

I risultati evidenziano come le resistenze all'accumulo delle deformazioni permanenti delle tre miscele siano dipendenti dalla composizione litica del materiale e dal differente contenuto di bitume. Le prove condotte applicando un carico maggiore confermano che i materiali stesi e compattati alle temperature corrette garantiscono una omogeneità di comportamento e

presumibilmente una garanzia di migliori prestazioni in opera.

## 5. Conclusioni

L'applicazione dei conglomerati bituminosi ad alta lavorabilità a tutti gli strati legati a bitume della pavimentazione si è rilevata determinante non solo per un maggiore rispetto ambientale ed una maggiore sicurezza nel cantiere e per le zone poste a margine dello stesso grazie ad una riduzione delle temperature di stesa e dei fumi prodotti ma anche per la qualità della stesa in termini di uniformità e grado di addensamento raggiunto.

Le verifiche effettuate in sito e le prove di controllo delle prestazioni sui materiali messi in opera hanno permesso di quantificare l'affidabilità delle lavorazioni e di garantire le ipotesi progettuali.

L'estesa campagna di prove sperimentali ha ribadito l'importanza, per garantire la qualità dell'opera e la durabilità della pavimentazione, di passare da capitolati di tipo prescrittivo (requirement – related) a capitolati di tipo prestazionale (performance-related).

In particolare si sono proposte specifiche procedure per la valutazione della resistenza alle deformazioni permanenti dei conglomerati bituminosi tiepidi che siano in grado di cogliere il reale comportamento per diverse condizioni di messa in opera e sistemi di controllo in continuo delle temperature di stesa per la valutazione ed il controllo delle proprietà termiche delle miscele.

## Bibliografia

Bahuguna S., Panoskaltis V, Papoulia K., "Identification and Modeling of Permanent Deformations of Asphalt Concrete", ASCE Journal Transportation Engineering, Vol. 132, pg 231-239 2006.

Monismith C. L. et al., Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes, *The strategic Highway Research Program Rep. No. SHRP – A – 415*, National Research Council, Washington D.C., 1994.

NCHRP 1-37A (2004). Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Draft

Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Petretto F., Sangiorgi C., Pettinari M., Dondi G., "The mix gradation influence on the permanent deformations resistance of compacted WMA", 5<sup>th</sup> ICONFBMP pp. 1403 – 1412, volume II, Salonicco, 2011 ISBN: 978-960-99922-0-6.

Willoughby Kim A., Mahoney Joe P., Pierce Linda M., Uhlmeyer Jeff S., Anderson Keith W., Read Steven A., Muench Stephen T., Thompson Travis R., Moore Robyn, "Construction-Related Asphalt Concrete Pavement Temperature Differentials and the Corresponding Density Differentials", Research report WA-RD 476.1, Washington State Department of Transportation, pp. 1-162, Luglio 2001.