

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

**Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Infrastrutture Viarie, Ambientale e
Rilevamento – Sezione di Infrastrutture Viarie**



INDAGINE SPERIMENTALE SULLE CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DI CONGLOMERATI BITUMINOSI TIEPIDI

Relatore: Prof. Ing. Emanuele TORALDO

Correlatore: Ing. Edoardo MARIANI

Tesi di Laurea di:

Flavia GALASSO

Matricola 735736

Anno Accademico 2010-2011

INDICE

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| INDICE | I |
| INDICE DELLE FIGURE..... | II |
| INDICE DEI GRAFICI | III |
| INDICE DELLE TABELLE | IV |
| ABSTRACT | 1 |
| 1 INTRODUZIONE | 3 |
| 2 LE MISCELE BITUMINOSE | 6 |
| 2.1 LE MISCELE BITUMINOSE ORDINARIE (HMA)..... | 6 |
| 2.2 LE MISCELE BITUMINOSE TIEPIDE (WMA) | 9 |
| 2.2.1 <i>Le tecnologie</i> | 11 |
| 2.2.1.1 I conglomerati bituminosi a bassa energia (Low-Energy Asphalt) | 12 |
| 2.2.1.2 La schiumatura del bitume | 13 |
| 2.2.1.3 Le emulsioni bituminose..... | 18 |
| 2.2.1.4 La modifica delle caratteristiche reologiche del bitume | 19 |
| 2.2.2 <i>La produzione</i> | 22 |
| 2.2.3 <i>La messa in opera</i> | 23 |
| 2.2.3.1 Il Trasporto | 23 |
| 2.2.3.2 La Stesa..... | 24 |
| 2.2.3.3 La Compattazione | 24 |
| 2.2.3.4 Giunto longitudinale..... | 25 |
| 2.2.3.5 Igiene dell'ambiente..... | 25 |
| 3 MATERIALI, PIANO SPERIMENTALE E METODOLOGIA DI PROVA | 27 |
| 3.1 LE PAVIMENTAZIONI STRADALI | 27 |
| 3.1.1 <i>Gli aggregati lapidei</i> | 29 |
| 3.1.2 <i>Il Bitume</i> | 30 |
| 3.2 I MATERIALI | 31 |
| 3.2.1 USURA HMA | 31 |
| 3.2.2 <i>Usura WMA</i> | 33 |
| 3.2.3 <i>L'additivo</i> | 34 |
| 3.3 IL CAMPO PROVE IN ITALIA..... | 35 |
| 3.4 LE PROVE DI LABORATORIO | 39 |
| 3.4.1 <i>Determinazione della massa volumica massima (TMD)</i> | 41 |
| 3.4.2 <i>La pressa giratoria</i> | 43 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.2.1 | Confezionamento dei provini..... | 46 |
| 3.4.2.2 | Lavorabilità e auto-addensamento delle miscele..... | 49 |
| 3.4.2.3 | Determinazione della massa volumica e del contenuto dei vuoti residui | 52 |
| 3.4.3 | <i>Determinazione del modulo di rigidezza tramite macchina dinamica.....</i> | <i>55</i> |
| 3.4.4 | <i>Roller compactor con sliding plates.....</i> | <i>60</i> |
| 3.4.4.1 | Procedura di compattazione..... | 64 |
| 3.4.5 | <i>Wheel Tracking Test.....</i> | <i>73</i> |
| 4 | ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI..... | 78 |
| 4.1 | CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE | 78 |
| 4.1.1 | <i>Caratteristiche volumetriche dei provini confezionati con la pressa giratoria</i> | <i>78</i> |
| 4.1.2 | <i>Caratteristiche volumetriche dei provini confezionati con roller compactor</i> | <i>89</i> |
| 4.1.3 | <i>Caratteristiche volumetriche: pressa giratoria e roller compactor a confronto.....</i> | <i>96</i> |
| 4.2 | CARATTERISTICHE MECCANICHE..... | 100 |
| 4.3 | ORMAIAMENTO | 105 |
| 5 | CONCLUSIONI..... | 108 |
| | BIBLIOGRAFIA | 111 |

Indice delle figure

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 | STRATI COMPOSITIVI DI UNA PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE | 28 |
| FIGURA 2 | LOCALIZZAZIONE DELLA STRADA..... | 35 |
| FIGURA 3 | RULLO METALLICO VIBRANTE A DOPPIO TAMBURO..... | 38 |
| FIGURA 4 | MANTO DI USURA DI HMA | 38 |
| FIGURA 5 | MANTO DI USURA DI WMA | 39 |
| FIGURA 6 | PICNOMETRO RIEMPIUTO CON MISCELA ED ACQUA DISTILLATE E COLLEGATO ALLA POMPA | 42 |
| FIGURA 7 | PRESSA GIRATORIA | 44 |
| FIGURA 8 | SFORZI CUI È SOTTOPOSTO IL CAMPIONE COMPATTATO CON PRESSA GIRATORIA | 44 |
| FIGURA 9 | CONFRONTO TRA LA COMPATTAZIONE IN SITO TRAMITE RULLO E QUELLA IN LABORATORIO TRAMITE PRESSA GIRATORIA | 45 |
| FIGURA 10 | SCHERMATA DEL SOFTWARE DI CONTROLLO PER LA COMPATTAZIONE CON PRESSA GIRATORIA | 46 |
| FIGURA 11 | FUSTELLA..... | 48 |
| FIGURA 12 | CAMPIONI CONFEZIONATI CON PRESSA GIRATORIA E CONTRASSEGNA TI | 49 |
| FIGURA 13 | PROVINI A BAGNO NELL'ACQUA | 53 |
| FIGURA 14 | BILANCIA CON LA QUALE VIENE EFFETTUATA LA PESATA IDROSTATICA DEL CAMPIONE..... | 54 |
| FIGURA 15 | CASTELLO DI CARICO DELLA MACCHINA DINAMICA | 57 |
| FIGURA 16 | SCHEMA DI APPLICAZIONE DEL CARICO DELLA MACCHINA DINAMICA | 58 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 17 SLIDING PLATE | 60 |
| FIGURA 18 MACCHINARIO DI PROVA ROLLER COMPACTOR/WHEEL TRACKER | 61 |
| FIGURA 19 EFFETTUAZIONE DI COMPATTAZIONE CON ROLLER COMPACTOR | 62 |
| FIGURA 20 EFFETTUAZIONE DEL WHEEL TRACKING TEST | 63 |
| FIGURA 21 INTERFACCIA GRAFICA DEL SOFTWARE | 64 |
| FIGURA 22 RISCALDAMENTO DELLO STAMPO E CONTROLLO TEMPERATURA | 65 |
| FIGURA 23 DISTANZIALI CON ASSEMBLAGGIO A CROCE | 66 |
| FIGURA 24 STESA DEL MATERIALE ALL'INTERNO DELLO STAMPO..... | 66 |
| FIGURA 25 INSERIMENTO DELLE SLIDING PLATES NELLO STAMPO | 67 |
| FIGURA 26 CARRELLO | 68 |
| FIGURA 27 INTERFACCIA DELL'ARCHIVIO | 69 |
| FIGURA 28 WHEEL TRACKING TEST: PROVA IN ATTO..... | 76 |

Indice dei grafici

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRAFICO 1 CURVA GRANULOMETRICA HMA..... | 32 |
| GRAFICO 2 CURVA GRANULOMETRICA WMA..... | 33 |
| GRAFICO 3 NUMERO DI CICLI DI COMPATTAZIONE IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA NELL'HMA | 79 |
| GRAFICO 4 NUMERO DI CICLI DI COMPATTAZIONE IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA DI COMPATTAZIONE NEL WMA..... | 80 |
| GRAFICO 5 NUMERO DI CICLI DI COMPATTAZIONE DI HMA E WMA A CONFRONTO | 80 |
| GRAFICO 7 AUTO-ADDENSAMENTO C_1 NELL'HMA | 81 |
| GRAFICO 8 LAVORABILITÀ K NEL WMA..... | 82 |
| GRAFICO 9 AUTO-ADDENSAMENTO C_1 NEL WMA..... | 82 |
| GRAFICO 10 CONFRONTO DELLA LAVORABILITÀ K ALLE VARIE TEMPERATURE | 83 |
| GRAFICO 11 CONFRONTO DELL'AUTO-ADDENSAMENTO C_1 ALLE VARIE TEMPERATURE..... | 84 |
| GRAFICO 12 NUMERO DI CICLI DI COMPATTAZIONE DI HMA E WMA PER OTTENERE IL 4% DI VUOTI A CONFRONTO..... | 86 |
| GRAFICO 13 CURVA DI COMPATTAZIONE DELL'HMA A 160°C - PROVINO 1..... | 87 |
| GRAFICO 14 CURVA DI COMPATTAZIONE DEL WMA A 120°C - PROVINO 1 | 87 |
| GRAFICO 15 LAVORABILITÀ K DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA..... | 88 |
| GRAFICO 17 NUMERO DI CICLI DI COMPATTAZIONE DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA | 89 |
| GRAFICO 18 LAVORABILITÀ K DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA..... | 95 |
| GRAFICO 19 AUTO-ADDENSAMENTO C_1 DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA | 95 |
| GRAFICO 20 NUMERO DI CICLI DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA | 96 |
| GRAFICO 21 CONFRONTO TRA K, C_1 E NUMERO DI CICLI DI ROLLER COMPACTOR E PRESSA GIRATORIA NELL'HMA..... | 97 |
| GRAFICO 22 CONFRONTO TRA K, C_1 E NUMERO DI CICLI DI ROLLER COMPACTOR E PRESSA GIRATORIA NEL WMA | 98 |
| GRAFICO 23 CONFRONTO DELLE LAVORABILITÀ K NELL'HMA..... | 98 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| GRAFICO 24 CONFRONTO DEGLI AUTO-ADDENSAMENTI C_1 NELL'HMA | 99 |
| GRAFICO 25 CONFRONTO DELLE LAVORABILITÀ K NEL WMA | 99 |
| GRAFICO 26 CONFRONTO DEGLI AUTO-ADDENSAMENTI C_1 NEL WMA..... | 100 |
| GRAFICO 27 ANDAMENTO DEI MODULI DI RIGIDEZZA DELL'HMA IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA DI COMPATTAZIONE DEL PROVINO | 101 |
| GRAFICO 28 ANDAMENTO DEI MODULI DI RIGIDEZZA DEL WMA IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA DI COMPATTAZIONE DEL PROVINO | 102 |
| GRAFICO 29 ANDAMENTO DEI MODULI DI RIGIDEZZA IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA | 103 |
| GRAFICO 30 DIFFERENZA TRA MODULI DI RIGIDEZZA DI HMA E WMA..... | 104 |
| GRAFICO 31 MODULI DI RIGIDEZZA DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA | 105 |
| GRAFICO 32 ABBASSAMENTI PROVOCATI DAL TEST DI ORMAIAMENTO | 106 |
| GRAFICO 33 ABBASSAMENTI NELL'HMA A 160°C E NEL WMA A 120°C PER UNA T DI PROVA PARI A 40°C..... | 107 |

Indice delle tabelle

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELLA 1 ANALISI GRANULOMETRICA HMA | 32 |
| TABELLA 2 ANALISI GRANULOMETRICA WMA | 33 |
| TABELLA 3 CARATTERISTHE TECNICHE DI PROVA PER COMPATTAZIONE CON PRESSA GIRATORIA..... | 48 |
| TABELLA 4 CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE DELLE MISCELE | 78 |
| TABELLA 5 VARIAZIONI DI K E C_1 IN FUNZIONE DEL NUMERO DI CICLI DI COMPATTAZIONE | 85 |
| TABELLA 6 PRESTAZIONI DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA | 88 |
| TABELLA 7 DATI IDENTIFICATIVI E CARATTERISTICHE PROVA HMA-20110117-120 | 90 |
| TABELLA 8 DATI IDENTIFICATIVI E CARATTERISTICHE PROVA HMA-20110118-120 | 90 |
| TABELLA 9 DATI IDENTIFICATIVI E CARATTERISTICHE PROVA HMA-20110117-160 | 91 |
| TABELLA 10 DATI IDENTIFICATIVI E CARATTERISTICHE PROVA HMA-20110118-160 | 91 |
| TABELLA 11 DATI IDENTIFICATIVI E CARATTERISTICHE PROVA WMA-20110117-120 | 92 |
| TABELLA 12 DATI IDENTIFICATIVI E CARATTERISTICHE PROVA WMA-20110118-160 | 92 |
| TABELLA 13 PARAMETRI $C_{1/RC}$ E K_{RC} PER HMA 120°C..... | 93 |
| TABELLA 14 PARAMETRI $C_{1/RC}$ E K_{RC} PER HMA 160°C..... | 93 |
| TABELLA 15 PARAMETRI $C_{1/RC}$ E K_{RC} PER WMA 120°C..... | 93 |
| TABELLA 16 PARAMETRI $C_{1/RC}$ E K_{RC} PER WMA 160°C..... | 94 |
| TABELLA 17 PRESTAZIONI DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA | 94 |
| TABELLA 18 CONFRONTO TRA K, C_1 E NUMERO DI CICLI DI ROLLER COMPACTOR E PRESSA GIRATORIA NELL'HMA | 96 |
| TABELLA 19 CONFRONTO TRA K, C_1 E NUMERO DI CICLI DI ROLLER COMPACTOR E PRESSA GIRATORIA NEL WMA | 97 |
| TABELLA 20 VALORI DEI MODULI DI RIGIDEZZA NELL'HMA | 101 |
| TABELLA 21 VALORI DEI MODULI DI RIGIDEZZA NEL WMA | 101 |
| TABELLA 22 MODULI DI RIGIDEZZA | 102 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELLA 23 DIFFERENZA TRA MODULI DI RIGIDEZZA DI HMA E WMA | 103 |
| TABELLA 24 MODULI DI RIGIDEZZA DELL'HMA E DEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA..... | 105 |
| TABELLA 25 ABBASSAMENTO CONSEGUENTE IL WHEEL TRACKING TEST | 106 |
| TABELLA 26 ABBASSAMENTI [MM] NELL'HMA E NEL WMA ALLE TEMPERATURE DI MESSA IN OPERA | 107 |

Abstract

Questo elaborato espone, innanzitutto, le differenti tecnologie utilizzate per la produzione di conglomerati bituminosi tiepidi illustrandone i vantaggi, notevoli soprattutto sotto il punto di vista ambientale.

In seguito vengono analizzati, attraverso una serie di test effettuati in laboratorio, i comportamenti di due miscele, una calda e l'altra tiepida, differenti nella ricetta solo per l'aggiunta di un additivo organico (con il quale è stato additivato il Warm Mix Asphalt, WMA).

Per ogni tipologia di materiale e per ognuna delle 5 fasce di temperatura prese in esame (da 80°C a 160°C con intervalli di 20°C tra una fascia e l'altra) sono stati confezionati 3 provini con la pressa giratoria. Sono, inoltre, state compattate 8 piastre (escludendo quelle di prova con massa non corretta) con roller compactor: 4 con HMA a 120°C e 160°C e 4 con WMA alle medesime temperature.

Su questi campioni, dopo averne calcolate le caratteristiche volumetriche, sono state eseguite una serie di prove meccaniche: sui provini compattati con giratoria sono stati determinati i moduli di rigidità attraverso una macchina dinamica alla temperatura di 20°C; su quelli confezionati con roller compactor, invece, sono stati effettuati dei wheel tracking test alle temperature di prova di 40°C e 60°C.

Sono stati, infine, analizzati i risultati emersi dalla caratterizzazione volumetrica e meccanica di tutti i provini e studiati i pregi ed i difetti di entrambe le miscele, proponendo dei possibili utilizzi del nuovo materiale WMA e suggerendo degli spunti per la ricerca.

First of all, this thesis exposes the different technologies used to produce WMA mixture, displaying the remarkable advantages, especially within environment.

Through a series of laboratory test, it has been possible to study the behavior of two different mixes, one hot and the other warm. The only difference between them is the addition of an organic additive to the Warm Mix Asphalt, WMA.

For each material and for each range of temperature (from 80°C to 160°C, with a difference of 20°C between ranges) 3 samples have been compacted with the gyratory press. Also, 8 plates have been made with roller compactor: 4 with HMA at 120°C and at 160°C and 4 others with WMA at the same temperatures.

On these samples, after calculating the volumetric parameters, have been performed a series of mechanical tests: on the specimens compacted with gyratory press the stiffness moduli at the temperature of 20°C have been determined, thanks to a dynamic machine; on the plates have been conducted wheel tracking tests, instead, at the temperature of 40°C and 60°C.

At last, the results emerged from the volumetric and mechanical characterization of all samples have been analyzed and the pros and cons of both mixtures have been studied.

In the end there are some suggestions about possible uses of this new material and a few ideas for future researches.

1 Introduzione

Con il passare degli anni il rispetto dell'ambiente acquisisce un'importanza sempre maggiore, sono stati fatti passi da gigante in tutti gli ambiti. Basti solo pensare all'ambito quotidiano, dall'incentivazione all'utilizzo dei mezzi di trasporto pubblico, alla raccolta differenziata, alle energie rinnovabili.

In particolare, dal momento che ogni anno nel mondo vengono costruiti migliaia di chilometri di strade, si sono messi in moto dei meccanismi atti a cercare di ridurre l'inquinamento in generale e nello specifico i gas serra prodotti durante tali lavorazioni. Un primo documento, entrato in vigore nel 1994, ha posto come obiettivo *"raggiungere la stabilizzazione delle concentrazioni dei gas serra in atmosfera a un livello abbastanza basso per prevenire interferenze antropogeniche dannose per il sistema climatico"*.

Dal febbraio 2007 è entrato in vigore anche il protocollo di Kyoto (dopo la ratifica della Russia), un trattato internazionale in materia ambientale relativo al riscaldamento globale. Tale trattato prevede l'obbligo in capo ai paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti (biossido di carbonio ed altri cinque gas serra, ovvero metano, ossido di diazoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi ed esafluoruro di zolfo) in una misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990 - considerato come anno base - nel periodo 2008-2012.

Sotto tali intenzioni, anche nel campo delle infrastrutture di trasporto sono state sviluppate nuove tecnologie; nello specifico questo elaborato si occuperà dello studio delle potenzialità e delle caratteristiche di un conglomerato bituminoso tiepido (WMA). Tale materiale è nato per ridurre l'impatto della costruzione di nuove strade - o del rinnovo di quelle già esistenti - cercando di limitare i danni all'ambiente con l'ausilio di processi che permettano di ridurre le emissioni, sia in termini di fumi tossici che di odori, garantendo un buon risparmio energetico.

Tali riduzioni sono possibili grazie soprattutto ad un drastico abbattimento della temperatura di produzione e stesa delle miscele, riduzione che si aggira intorno ai 30°C (la maggior parte delle miscele bituminose calde sono compattate a circa 150°C, mentre quelle tiepide a circa 120°C). Questo significa che gli impianti di produzione avranno bisogno di meno energia e quindi i costi da sostenere saranno inferiori, senza considerare le notevoli diminuzioni di gas nocivi prodotti, quali la CO₂ (una delle principali cause dell'effetto serra).

Un altro potenziale vantaggio di queste miscele è la facilità di compattazione, grazie allo sviluppo di tecniche e all'utilizzo di additivi che ne favoriscono l'idonea lavorabilità anche alle basse temperature.

Tale tecnologia ha, quindi, un triplice vantaggio: è eco-friendly, riduce le spese relative all'energia consumata per la realizzazione degli strati in conglomerato bituminoso (impianti, combustibili, riscaldamento degli inerti, etc.) e ne permette la loro lavorazione anche alle basse temperature (richiedendo anche minor energia di compattazione).

Occorre adesso capire se questa nuova tecnica, così innovativa ed efficace da un punto di vista ambientale, possa garantire le stesse prestazioni di una pavimentazione flessibile in conglomerato bituminoso tradizionale (HMA), non solo in termini di prestazioni in esercizio, ma anche di vita utile, alle differenti condizioni climatiche e di carico.

In questa tesi sono stati riportati esperimenti e risultati di un'indagine comparativa effettuata su di un conglomerato classico e uno tiepido, confezionato con la metodologia che prevede l'aggiunta alla miscela di un additivo organico, descritto in dettaglio nel seguito dell'elaborato.

Sono state effettuate una serie di prove di laboratorio atte a studiare le caratteristiche volumetriche e meccaniche di entrambi i mix, in tal modo sono emersi sia i pregi che i difetti di questa nuova metodologia in cui l'additivazione si ripercuote sulle prestazioni del conglomerato bituminoso, in termini di compattazione, auto-

addensamento e lavorabilità ed anche nei confronti del modulo di rigidità e dell'attitudine all'accumulo di deformazioni permanenti (ormaiamento).

Scopo della tesi è stato quindi valutare e testare attentamente questi metodi nuovi, "verdi" ed innovativi al fine di determinare la loro possibilità di impiego, sulla base dei carichi di esercizio, dei dati di traffico e delle condizioni climatiche della zona di applicazione, evitando quindi interventi per i quali non risulterebbero idonei ed avrebbero vita utile molto breve, costituendo – quindi – più che un risparmio un inutile spreco di tempo e risorse.

2 Le Miscele Bituminose

2.1 Le Miscele Bituminose Ordinarie (HMA)

[1] Le miscele bituminose sono composti artificiali confezionati a caldo costituiti da materiale lapideo di diverse granulometrie (filler, sabbia, pietrisco), ottenuto per frantumazione, e da un legante idrocarburico (bitume).

Il bitume riveste ad uno ad uno gli elementi granulari, permettendo la creazione di un legame tra questi ultimi al fine di formare un unico elemento capace di resistere alle sollecitazioni indotte dal traffico ed alle aggressioni degli agenti atmosferici. Dalla qualità di questa pellicola dipenderà la durata nel tempo del conglomerato. In particolare, la forza di adesione che il film ha sui grani lapidei, rappresenta il punto critico di tutto il processo di fabbricazione di una pavimentazione stradale.

Le miscele bituminose vengono prodotte in appositi impianti centralizzati che mescolano gli *“ingredienti”* a temperature particolarmente elevate, in modo da favorire la ricopertura del materiale lapideo da parte del legante. Infatti un parametro di fondamentale importanza nella creazione della miscela è la viscosità del legante che risulta essere inversamente proporzionale alla temperatura: ad alte temperature si avranno, pertanto, valori di viscosità molto bassi e viceversa a basse temperature accadrà il contrario. A viscosità basse, infatti, il bitume presenta una fluidità tale da ricoprire facilmente gli aggregati della miscela, formando un sottile film su ogni singolo grano di materiale lapideo.

Per raggiungere la viscosità ottimale di miscelazione, il processo di produzione prevede che i materiali lapidei vengano riscaldati, all'incirca, alla stessa temperatura del bitume (150-170°C), successivamente miscelati al fine di ottenere l'assortimento granulometrico desiderato e, infine, si spruzza il bitume all'interno della camera di miscelazione. Il riscaldamento e l'essiccazione degli aggregati avviene per mezzo di forni a tamburo rotante [2]. La funzione principale dei forni, definiti cilindri

essiccatori, è quella di eliminare prima l'umidità contenuta negli aggregati e, successivamente, di riscaldarli alla temperatura di miscelazione voluta.

I forni a tamburo rotante sono costituiti da un cilindro rotante e da un bruciatore e possono operare sia in "equicorrente" che in "controcorrente". Normalmente gli equicorrente vengono utilizzati per impianti di produzione dei conglomerati bituminosi di tipo "continuo", mentre i controcorrente vengono utilizzati negli impianti tradizionali o "discontinui".

In un forno a tamburo rotante che opera in controcorrente, il cilindro, schematicamente, può essere considerato composto da tre zone:

- nella prima, gli aggregati vengono riscaldati fino a raggiungere la temperatura di ebollizione dell'acqua, senza perdere umidità;
- nella seconda, la frazione lapidea perde tutta l'umidità contenuta, essiccandosi, in questa zona la temperatura non aumenta ma rimane costante;
- nella terza, la temperatura degli aggregati, completamente essiccati, aumenta fino a che il materiale non esce dal cilindro.

I forni a tamburo rotante, se ben progettati e fabbricati, devono garantire una velocità dell'aria, all'interno del cilindro, maggiore o uguale a 6 m/s; inoltre, la differenza tra la temperatura di uscita e quella di entrata del materiale litico deve essere almeno di 140°C. Discorso a parte deve essere fatto sull'umidità degli aggregati all'uscita del cilindro che, normalmente, deve essere $\leq 0,5\%$; infatti, questa dipende da diverse variabili, fra le quali: l'umidità iniziale, la qualità degli inerti alimentati, la qualità dell'aria in ingresso al bruciatore e la velocità di attraversamento del cilindro essiccatore.

[3] A seconda della pezzatura dell'aggregato si distinguono due differenti tipologie di conglomerati: quelli "aperti" comprendono tipicamente una sola pezzatura, quelli "chiusi", invece, possono comprendere anche tutte le frazioni granulometriche; l'assortimento granulometrico permette di ridurre l'indice dei vuoti fino a poche unità percentuali, ottenendo così un valore ottimale del 3-4%.

Dopo la fase di confezionamento dei conglomerati bituminosi, la realizzazione di una pavimentazione stradale prevede le fasi di trasporto, stesa e compattazione.

I conglomerati vengono trasportati al luogo di posa attraverso autocarri dotati di cassone adeguatamente coibentato, in grado di mantenere la miscela ad una temperatura adatta alla lavorazione - e stesi da macchine altamente automatizzate che provvedono anche ad un primo costipamento del materiale.

L'adesione tra bitume-inerte, come precedentemente specificato, è il punto critico di tutto il processo di realizzazione di un conglomerato bituminoso; di fondamentale importanza per l'ottenimento di una pavimentazione in grado di mantenere adeguate prestazioni durante la sua vita utile è, però, la compattazione, che deve essere effettuata con una adeguata energia meccanica, ma, soprattutto, ad una temperatura tale da garantire una idonea viscosità della miscela bituminosa.

Ovviamente le caratteristiche del materiale dipendono dalla posizione che lo stesso occupa nell'insieme degli strati della pavimentazione; il contenuto di vuoti, ad esempio, sarà minimo per il manto di usura - che deve garantire l'impermeabilità della sovrastruttura – ed andrà via via crescendo con la profondità degli strati.

Il controllo del contenuto di vuoti residui raggiunto dopo costipamento è uno dei momenti essenziali nello studio di una miscela bituminosa. Questa verifica non solo permette di verificare uno dei requisiti richiesti al conglomerato, ma fornisce anche un'informazione sintetica su altre proprietà della miscela, in quanto tale caratteristica volumetrica è legata alla granulometria dell'aggregato, al contenuto di legante e all'efficacia della compattazione.

Un altro controllo fondamentale è quello relativo alle caratteristiche meccaniche della miscela, strettamente dipendente dalla temperatura di prova e dalla velocità di applicazione del carico.

2.2 Le Miscele Bituminose Tiepide (WMA)

[4] Con il termine “tiepido” si indicano tutti quei materiali di nuova generazione che coniugano il carattere ecologico del conglomerato a freddo con le prestazioni del conglomerato a caldo e al tempo stesso abbattano sostanzialmente l’impatto ambientale per tutta la filiera produttiva: dall’impianto al cantiere. La tecnologia “tiepida” consente infatti di produrre lo stesso tipo di materiale (il conglomerato bituminoso) utilizzando le medesime macchine ma con temperature di lavorazione decisamente più basse.

Le nuove metodologie operative sviluppate, come già detto, permettono la produzione e la messa in opera delle miscele bituminose a temperature significativamente inferiori rispetto ai tradizionali conglomerati bituminosi a caldo. Con queste tecnologie le temperature possono infatti essere ridotte fino al 30% e, ciononostante, il bitume riesce a ricoprire adeguatamente l’aggregato durante la miscelazione in impianto e raggiungere la lavorabilità desiderata in sito. Principio di tali tecnologie è quindi la riduzione della viscosità di un determinato bitume ad una data temperatura.

I vantaggi sono notevoli:

- l’abbattimento del consumo energetico - del 30-40% - rispetto alle risorse impiegate per la produzione dell’HMA;
- la riduzione di possibili emissioni ed odori dagli impianti (non solo in termini di quantità ma anche di composizione);
- il miglioramento delle condizioni di lavoro sia in impianto che in sito;
- la possibilità di stesa a basse temperature con riduzioni fino a 30-40°C e a distanze elevate dagli impianti di confezionamento;
- il minore impatto del traffico stradale, il quale rallenta i rifornimenti ai cantieri di stesa;

- il confezionamento ed il trasporto di grandi quantità di conglomerati bituminosi, evitando le interruzioni della fase di stesa;
- i lavori di pavimentazione possono essere eseguiti in condizioni climatiche più severe;
- una minore usura dei mezzi utilizzati nell'ambito del processo di produzione;
- il fenomeno di invecchiamento del bitume, associato ad alte temperature alla sua ossidazione ed alla perdita di sostanze aromatiche, risulta estremamente contenuto [5].

La riduzione delle emissioni è altamente critica specie nelle aree con livelli di inquinamento particolarmente elevati, come ad esempio grandi aree metropolitane e città aventi restrizioni inerenti la qualità dell'aria.

Come precedentemente accennato, alcuni contractors ed agenzie stanno studiando l'uso del WMA per poter permettere la stesa delle pavimentazioni anche con temperature particolarmente rigide. In dipendenza dalla località e dal clima, la posa del manto in conglomerato bituminoso viene generalmente proibita dopo una certa data sul calendario in quanto temperature molto basse riducono drasticamente il tempo disponibile per le operazioni di compattazione del mix al fine di raggiungere la densità desiderata. Attraverso la tecnologia del WMA, le miscele possono risultare lavorabili a temperature più basse, aumentando la finestra di opportunità per la compattazione. Ciò rende il WMA una opzione adottabile per quei progetti di fine stagione che è indispensabile portare a termine senza comprometterne la qualità.

Le prime indicazioni asseriscono che il WMA garantisce tutti questi vantaggi senza sacrificare le prestazioni a lungo termine della pavimentazione. Prima di essere adottata in maniera diffusa, però, tale tecnologia deve dimostrare di fornire le stesse prestazioni a lungo termine del conglomerato bituminoso tradizionale (HMA).

2.2.1 Le tecnologie

I più noti processi per produrre conglomerati a bassa temperatura sono quelli che hanno avviato questo nuovo percorso sul terreno dello sviluppo tecnologico dell'industria delle pavimentazioni stradali. In particolare si tratta di tecniche che utilizzano additivi organici o minerali (cere o zeoliti), o tecniche che prevedono il doppio impiego di bitume "molle" e schiuma di bitume "duro" o la sola schiuma di bitume con aggregati parzialmente scaldati. Queste tecniche consentono riduzioni della temperatura di confezionamento nell'ordine dei 30-40°C rispetto alla tecnica tradizionale (160-170°C) con un risparmio di energia nel riscaldamento della frazione litica valutabile nell'ordine del 25%. Esistono però anche altre tecnologie il cui risparmio di energia necessaria al riscaldamento degli inerti è maggiore e può raggiungere il 40-50%. Il bilancio energetico teorico è confermato dai dati di consumo rilevati dall'impianto al termine del confezionamento. L'abbassamento delle temperature di fabbricazione da 160°C a 120°C costituisce una vera e propria novità tecnologica, resa possibile da un nuovo approccio ai conglomerati.

La possibilità di economizzare all'impianto fino al 50% dell'energia fossile costituisce un fattore reale di competitività a vantaggio dei conglomerati tiepidi, specie se rapportato all'onerosità e alle incertezze del costo dell'energia petrolifera o gassosa. In una prospettiva di sviluppo sostenibile, uno degli obiettivi strategici delle imprese stradali è certamente quello della riduzione delle emissioni, in particolare dei gas a effetto serra; per ogni tonnellata di conglomerato tiepido, a seconda dell'impianto e della tecnica adottata, si ottiene una riduzione delle emissioni stimabile da 3 a 6 kg di CO₂. Questo fatto si inquadra nel sistema di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra, anticipando il futuro sistema di scambio di quote d'emissione di CO₂. Il riconoscimento dei crediti d'emissione (v. Trattato di Kyoto) da ultimo potrà, attraverso la rivendita delle eccedenze, accentuare concretamente la competitività di questi conglomerati.

In quest'ottica dell'industria stradale, già con i conglomerati fabbricati sotto i 130°C, il WMA contribuisce al raggiungimento degli obiettivi posti dallo sviluppo durevole in termini di riduzione delle emissioni, obiettivi che verranno ancor più centrati grazie alla maggiore efficienza delle tecnologie innovative di ultima generazione che prevedono ulteriori abbattimenti di temperatura.

Le tecniche ad oggi note ed utilizzate per il confezionamento di miscele tiepide WMA sono:

- I conglomerati a bassa energia (*Low-Energy Asphalt*)

- La schiumatura del bitume

- Le emulsioni bituminose

- La modifica delle caratteristiche reologiche del bitume

2.2.1.1 I conglomerati bituminosi a bassa energia (*Low-Energy Asphalt*)

[10] Un altro processo per la produzione del WMA, sviluppato in Francia, usa un aggregato fine bagnato. Questo processo è denominato conglomerato a bassa energia (Enrobage a Basse Energie, EBE o Low Energy Asphalt, LEA).

La chiave del risparmio energetico in questo processo consiste nel fatto che per far evaporare tutta l'acqua presente all'interno degli aggregati è necessaria un'energia 5 volte superiore rispetto a quella necessaria per scaldare l'aggregato da 0° a 100°C, grazie a questa tecnica, invece, solamente la frazione grossolana è asciugata e scaldata ad una temperatura inferiore a 150°C. Il calore assorbito dall'aggregato grosso viene ceduto in parte per riscaldare l'aggregato fine ed il filler immessi nel

miscelatore umidi e a temperatura ambiente. Questo processo, difatti, è basato sulle proprietà fisiche del bitume: la fluidità a caldo che consente di bagnare gli inerti grossi e l'attitudine a produrre schiuma che facilita il rivestimento delle frazioni fini.

Attraverso l'utilizzo di un solo bitume, ed effettuando modifiche minime all'impianto di produzione, è possibile ottenere una miscela avente buone caratteristiche meccaniche grazie agli effetti combinati di temperatura, acqua ed energia di miscelazione. Al legante, riscaldato alle usuali temperature (140-180°C), viene aggiunto un tensioattivo, specificamente formulato per favorire il rivestimento degli aggregati umidi e consentire la formazione di schiuma, impedendo al tempo stesso che l'acqua possa spogliare gli aggregati grossi. Tali aggregati grossi sono successivamente ricoperti dal legante, che crea una pellicola spessa e saldamente collegata alla superficie dell'inerte. La frazione fine (sabbie e filler), la cui umidità residua (pari allo 0,5%) assicura una migliore compattazione, è infine mescolata a quella grossolana ricoperta di bitume, sviluppando un'azione schiumogena che aiuta la copertura dell'aggregato fine.

2.2.1.2 La schiumatura del bitume

Tale tecnologia prevede la riduzione della viscosità del legante e una sua maggiore capacità di miscelazione con gli aggregati a basse temperature, attraverso la modifica del suo stato fisico: non più sotto forma di liquido ma di schiuma, con alto potere di dispersione e dotata di elevata superficie specifica. Esistono differenti metodologie per ottenere la schiumatura del bitume, e di seguito se ne riportano alcune.

La prima tecnica, denominata WAM FOAM, è basata sull'utilizzo in fase di miscelazione di bitumi hard e soft (rispettivamente a bassa ed alta penetrazione) ed si serve di impianti standard - continui o discontinui - forniti di attrezzature specifiche per la schiumatura del bitume hard. La tecnica è stata sviluppata a causa dei limiti sempre più rigidi riguardanti il contenimento delle emissioni di CO₂, grazie

all'avvio di una ricerca congiunta Franco-Norvegese avente come scopo l'individuazione di tecniche di produzione di conglomerati bituminosi a bassa temperatura che non rendessero necessarie modifiche sostanziali all'assetto degli impianti esistenti e che garantissero le medesime prestazioni dei conglomerati a caldo. Nella fase di avvio di tale sperimentazione, che ha avuto inizio nella metà degli anni '90, il legante a bassa penetrazione veniva introdotto sotto forma di polvere. Successivamente, a causa di problemi di carattere ambientale, si decise di passare all'utilizzo di emulsioni bituminose e poi, nel 1998, di impiegare il legante hard sotto forma di schiuma [12]. Il processo prevede la miscelazione degli aggregati (scaldati a circa 130°C nell'essiccatore) con il legante a circa 110°C. Tale legante, che costituisce il 6% del peso totale della miscela, è composto dal 30% di bitume soft e dal restante 70% di bitume hard. La miscelazione avviene in due fasi: inizialmente si immette nel miscelatore il legante ad alta penetrazione attraverso le tubazioni standard dell'impianto e, successivamente quello a bassa penetrazione - previamente convogliato attraverso un'apposita tubazione in una camera di espansione in cui avviene la schiumatura-. L'azione combinata dei due bitumi garantisce l'omogeneità della miscela finale, le cui caratteristiche prestazionali dipendono sia dalla bontà del processo che dalla qualità dei due leganti.

Queste due tipologie di bitume hanno, ovviamente, funzioni molto differenti: quello soft, che raggiunge una bassa viscosità a temperature di circa 110-120°C, serve a garantire una miscelazione efficace tra bitume ed aggregato, quello hard, invece, migliora le caratteristiche meccaniche del prodotto finale. È fondamentale che il legante ad alta penetrazione ricopra omogeneamente gli inerti così da evitare la penetrazione negli aggregati microporosi dell'acqua - necessaria per la formazione della schiuma.

Un ulteriore metodo è l'aggiunta di particolari additivi alla miscela, ad esempio additivi minerali che hanno internamente dei legami ad acqua sono stati utilizzati come additivi per introdurre acqua all'interno di una miscela di HMA. Questi minerali, che vanno aggiunti nel miscelatore contemporaneamente al bitume, contengono una

data percentuale di acqua cristallizzata, programmata per essere rilasciata, sotto forma di vapore acqueo, a temperature comprese fra gli 85° e i 180°. Come conseguenza di questo fenomeno, si attiva una sorta di processo di espansione del bitume e di schiumatura controllata che agevola il ricoprimento degli aggregati - e, quindi, la lavorabilità della miscela - sia nel caso di conglomerati realizzati con bitumi tradizionali che con bitumi modificati. In quest'azione di schiumatura il legante liquido si comporta come un estensore e lubrificante e semplifica la lavorabilità della miscela alle basse temperature e, conseguentemente, ne rende più facile la compattazione. Per un miglior risultato finale occorre che l'emissione del vapore avvenga in più fasi e non in maniera istantanea.

La riduzione della viscosità, quindi, consente di diminuire le temperature del processo produttivo che possono essere ridotte ad un range di 130-145°C.

Oppure è possibile ricorrere ad additivi sintetici prodotti industrialmente come ad esempio:

- Double Barrel Green System

[13] Questo prodotto, fabbricato dalla Astec, è una nuova tecnologia che permette il risparmio energetico e l'eliminazione di fumi ed emissioni senza compromettere la qualità del conglomerato. Il Double Barrel Green System non richiede l'aggiunta di additivi ma utilizza l'acqua per produrre bitume schiumato che è privo di odori, non produce fumo ed ha maggiore durata. L'immissione dell'acqua nella miscela fa sì che il legante schiumi ed aumenti di volume. L'azione di schiumatura aiuta la copertura degli aggregati ad una temperatura che normalmente varia tra 110°C e 130°C (a differenza delle temperature tradizionali comprese tra 150°C e 170°C).

I maggiori benefici del Double Barrel Green System sono:

- o una maggiore lavorabilità: il bitume schiumato liquido ha una viscosità più bassa;

- non vi sono fumi né odori: gli oli leggeri presenti nel bitume liquido non raggiungono mai il punto di ebollizione, eliminando i vapori e i corrispondenti odori;
 - possibilità di utilizzare alte percentuali di materiale riciclato, mantenendo gli stessi standard del conglomerato bituminoso tradizionale;
 - estensione della vita utile della pavimentazione, dovuta ad una ridotta ossidazione del mix e ad una compattazione più uniforme;
 - 14% di carburante in meno utilizzato per l'essiccazione degli aggregati;
 - aumento della produttività del 14%.
- Advera®

[14] Advera® è un additivo comunemente utilizzato per la produzione di WMA costituito da una sottile polvere di zeolite sintetica (alluminio silicato di sodio) cristallizzata che trattiene al suo interno tra il 18 e il 22% d'acqua. La zeolite rilascia l'acqua che crea una schiuma utile a ridurre la viscosità aumentando la lavorabilità. Questo processo di schiumatura facilita la copertura degli aggregati da parte del legante; una volta che quest'ultimo si è raffreddato l'acqua condensa e viene riassorbita dalla zeolite, in maniera da non avere effetti sulla reologia della miscela. Il dosaggio raccomandato di Advera® è lo 0,25% sul peso del mix, può essere inserito nell'impianto di confezionamento attraverso un alimentatore effettuando una piccola modifica all'impianto. Il meccanismo di funzionamento di Advera® è simile a quello di un altro additivo chiamato Aspha-Min® zeolite. Una preoccupazione comune relativa al confezionamento di WMA con questa tecnica è costituita dal fatto che la produzione a basse temperature preveda una gran presenza di umidità all'interno del conglomerato durante il processo di miscelazione. Inoltre, se l'umidità contenuta in Advera® non dovesse evaporare completamente durante il processo di produzione o riassorbirsi, la situazione potrebbe addirittura peggiorare. Il potenziale danno apportato ad un conglomerato viene valutato attraverso la determinazione del TSR (tensile strength ratio), in accordo con la normativa AASHTO T 283.

Il Montana Department of Transportation (MDT) ha studiato l'ormaiamento su campioni di WMA additivati con Advera® in cui l'acqua non era totalmente evaporata, prelevati nel Parco Nazionale di Yellowstone (NYP). [15] Le indagini di laboratorio hanno rilevato che le piastre confezionate con l'aggiunta di Advera® hanno presentato un ormaiamento molto maggiore rispetto alla miscela di riferimento al punto da non aver superato gli standard previsti dal MDT (che prevede una profondità massima dell'ormaia di 13 mm dopo 10000 cicli). Oltre allo studio di laboratorio è stata anche condotta un'indagine su scala reale in corrispondenza di alcune sezioni della pavimentazione dell'autostrada I-70 in Colorado. In tale caso la temperatura di produzione della miscela di WMA era di 121°C mentre per l'HMA di riferimento, avente un legante con PG 28-58, di 138°C. È stato dimostrato che l'aggiunta di Advera® non ha alterato il PG del legante di riferimento, ma è stato anche confermato che la miscela contenente Advera® è quella avente prestazioni più deludenti in termini di deformazioni permanenti.

Tao e Mallik hanno analizzato la possibilità di utilizzare come base di partenza una pavimentazione riciclata (fresato) al 100% con l'aggiunta di differenti dosaggi di Advera® (0,3%, 0,5%, e 0,7% sul peso totale della miscela) in un processo di compattazione a basse temperature. La lavorabilità di tale miscela aumenta con l'additivazione a temperature di circa 110°C. A temperature inferiori ad 80°C, l'aggiunta di Advera® ha indurito la miscela, con effetti che si sono ripercossi anche sui moduli sismici e sui risultati del ITS test.

I risultati migliori sono stati ottenuti con l'aggiunta dello 0,3% di Advera® al mix. La variazione di contenuto di Advera® non ha avuto alcun effetto sulla massa volumica della miscela bituminosa. Molto probabilmente l'interazione dell'additivo con il legante contenuto nel fresato ha giocato un ruolo fondamentale nella compattazione facendo in modo che il bitume non schiumasse completamente.

La sensibilità all'umidità ha costituito un problema anche per un altro studio eseguito su una miscela modificata con Advera® additivato in due maniere differenti: nel primo è stato aggiunto lo 0,6% di Advera®, mentre nel secondo il 6% di Advera® e lo 0,5% di AD-here®HP Plus. I valori di TSR della miscela di riferimento e di quella cui è stato incorporato l'additivo, entrambe compattate alla temperatura di 149°C sono rispettivamente di 0,56 e 0,48. Ad una temperatura di compattazione inferiore (121°C), invece, il valore di TSR della miscela con Advera® modificata è risultato significativamente ridotto (0,48). Questi mix non sono rientrati negli standard di TSR richiesti dall'Oklahoma Department of Transportation (ODOT) che richiedono dei valori di TSR $\geq 0,80$. È, però, interessante notare che i valori di ITS a 121°C sono stati particolarmente più bassi rispetto a quelli a 149°C, inoltre il valore di TSR della miscela con Advera® - modificata con l'agente è aumentato allo 0,77. Osservazioni simili sono state fatte valutando i risultati del HWT stripping inflection point test, difatti vi è stato un notevole aumento della profondità di ormaia dove è stato aggiunto l'additivo AS.

2.2.1.3 Le emulsioni bituminose

Un processo basato sull'emulsione bituminosa si serve di un pacchetto chimico che include agenti emulsionanti, materiali che migliorano la lavorabilità, ed altri che incentivano l'adesione. Il conglomerato viene quindi prodotto utilizzando, nell'impianto tradizionale, l'emulsione bituminosa (bitume disperso in acqua) in sostituzione integrale del bitume caldo.

L'emulsione bituminosa si ottiene miscelando in un mulino colloidale con un'intensa azione meccanica bitume ed acqua, previa aggiunta di una sostanza emulsionante che agevoli la dispersione del bitume nella soluzione acquosa. Il prodotto finale risulta tipicamente costituito per il 60% da bitume e per il restante 40% da acqua [11].

Questa miscela a temperatura ambiente risulta liquida, può quindi essere miscelata agli aggregati; per ricomporre la fase liquida continua le gocce di bitume devono fondersi tra loro (coalescenza) dopo che il fenomeno di rottura si sia innescato, ossia dopo che l'emulsione sia diventata instabile.

Le caratteristiche applicative dell'emulsione sono strettamente dipendenti dai tempi necessari per tale rottura: le emulsioni a rottura rapida saranno utilizzate nei trattamenti superficiali, quelle a rottura più lenta per riciclaggi in sito.

Questa tecnica è certamente quella che realizza il più alto risparmio energetico.

2.2.1.4 La modifica delle caratteristiche reologiche del bitume

La modifica delle caratteristiche reologiche del bitume avviene mediante l'aggiunta al legante di opportuni additivi.

Tali additivi possono essere organici e solubili (cere) nel bitume ed atti a modificarne le caratteristiche reologiche in funzione della temperatura sono mescolati al legante; essi difatti ne riducono la viscosità a temperature superiori a 100°C e ne permettono il suo incremento a temperature al di sotto di 100°C.

Questi speciali additivi hanno un effetto fluidificante sulla miscela rendendola già lavorabile anche a 120-130 °C. Il cambiamento da riduzione di viscosità ad incremento della stessa nel legante avviene in prossimità del punto di solidificazione della cera che, a seconda di origine e composizione chimica della cera, oscilla tra 80 e 140°C; la maggioranza di tali sostanze è, difatti, costituita da paraffine o cere cristalline che agiscono in base al meccanismo della fusione/cristallizzazione:

- fondendo al di sopra di 80°C riducono la viscosità del legante e conferiscono fluidità alle temperature di confezionamento e stesa dei conglomerati;
- cristallizzando al di sotto di 80°C conferiscono rigidità anche a temperature di esercizio elevate [8].

Gli additivi vengono aggiunti al bitume quando la miscela raggiunge una temperatura di circa 120°C, senza necessità di miscelatori ad elevata azione meccanica e per un intervallo di tempo limitato (meno di due ore); il dosaggio delle paraffine raccomandato varia tra il 2 e il 4% in peso sul legante.

Come specificato in precedenza, l'additivazione al bitume provoca una serie di effetti sul comportamento reologico della miscela finale:

- un effetto fluidificante con diminuzione della fluidità dinamica al di sopra di 130°C che riduce la viscosità del legante e favorisce il rivestimento degli aggregati;
- alle temperature di esercizio della pavimentazione, un effetto irrigidente con innalzamento del punto di rammollimento (palla-anello), una diminuzione della penetrazione a 25°C e maggiori moduli misurati con Dynamic Shear Rheometer;
- nessun effetto rilevante alle basse temperature, come riscontrabile dal punto di rottura Frass [9].

Tali agenti fluidificanti includono le 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.

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, ad esempio, le paraffine ottenute con il processo Fischer-Tropsch contengono idrocarburi con catene più lunghe fino a 100 atomi di carbonio.

Attraverso processi di ricristallizzazione finalizzati ad elevare il punto di fusione si può fare in modo che esse mantengano la loro consistenza fino a 90-100°C.

Al di sopra di 100°C si ha pertanto la fusione e la conseguente riduzione della viscosità del bitume che rende possibile la miscelazione con gli aggregati in un intervallo di temperature inferiori a quelle raggiunte con le tecniche tradizionali.

A temperature inferiori al punto di fusione le paraffine formano una struttura di tipo lattice all'interno del bitume e a ciò è attribuibile il miglioramento delle prestazioni meccaniche del conglomerato, soprattutto in termini di resistenza alle deformazioni permanenti.

Il tenore di paraffina varia da un minimo del 3% in peso sulla miscela fino ad un massimo del 4%, valore che si consiglia di non superare per evitare problemi di suscettibilità in presenza di elevate temperature.

Per ottenere una miscela omogenea le paraffine vengono preventivamente mescolate direttamente con il bitume e non nella camera di miscelazione con gli aggregati che ne comprometterebbe l'uniformità di dispersione.

Grazie a questa tecnica le temperature del processo produttivo si abbassano di almeno 10°C.

Un esempio di additivo atto alla modifica delle caratteristiche reologiche del legante bituminoso è l'Asphaltan B[®], una cera sintetica fabbricata dalla Romonta GmbH, sita ad Amsdorf, Germania. Questo esemplare, appartenente alla famiglia delle cere della Romonta, è un mix dei componenti della cera Montan e di idrocarburi aventi elevato peso specifico. È possibile trovare la cera Montan grezza in Germania, Europa dell'Est, in alcune aree degli USA in corrispondenza dei giacimenti di lignite e di carbone fossile. Questi giacimenti si sono formati milioni di anni fa dalla trasformazione in fossili della vegetazione sub-tropicale fiorita durante il periodo Terziario. La cera che ha protetto le foglie delle piante dalle condizioni climatiche estreme non si è decomposta ma è andata ad arricchire il carbone. L'insolubilità in acqua della cera e la sua elevata stabilità hanno fatto sì che essa si conservasse per

lunghe ere geologiche. Mentre la cera Montan si stava formando, avvenne nella composizione un cambiamento che portò alla formazione di sostanze aventi un altissimo peso molecolare. Dopo l'estrazione, la cera Montan viene separata dal carbone attraverso l'utilizzo di un solvente di toluene distillato e rimossa attraverso vapore a temperature molto elevate.

Romonta attualmente produce tre cere sintetiche utilizzate come fluidificanti: Romonta N[®], Asphaltan A[®] ed Asphaltan B[®]. Le prime due sono specificamente formulate per essere usate con mastici bituminosi (utilizzati ad esempio per la sigillatura di fessure e/o giunti), mentre Asphaltan B[®] è stato studiato per bitumi utilizzati nei conglomerati bituminosi. Oltre a ridurre la viscosità del legante, il miglior pregio di Asphaltan B[®] è quello di aumentare il punto di rammollimento del legante bituminoso. Ad ogni modo questo aumento non è così ingente come nelle cere Fischer-Tropsch, a causa delle differenti dimensioni molecolari e dei legami a catena di Asphaltan B[®] (Asphaltan B[®] ha, difatti, legami di carbonio nel range di 24-32 atomi). L'adesione del legante con l'aggregato viene incrementata dall'utilizzo di Asphaltan B[®].

Romonta ne raccomanda l'aggiunta di una percentuale compresa tra il 2 e il 4% rispetto al peso del legante. Le temperature di compattazione sono di 20°C inferiori rispetto alla norma e non hanno creato effetti collaterali sulla lavorabilità della miscela. Asphaltan B[®] può essere confezionato in polvere in buste da 25 kg ed aggiunto direttamente nell'impianto di confezionamento.

2.2.2 La produzione

Per adeguare gli impianti esistenti alla tecnologia in questione, un impianto tradizionale, non importa se continuo o discontinuo, fisso o mobile, occorrono piccole modifiche in funzione della tecnologia adottata. A esempio il ricorso alla schiumatura del bitume, renderà necessaria l'installazione, lungo la linea di

alimentazione dei fini al miscelatore, di un dispositivo che consenta l'irrorazione di una quantità calibrata di acqua in modo che il contenuto finale di acqua residua del conglomerato tiepido sia compresa tra l'1 e il 5%. Nel caso invece del ricorso agli additivi organici (ad esempio cere), in grado di modificare le proprietà reologiche del legante, è richiesta la sola premiscelazione di tali elementi con il bitume, senza apportare modifiche sostanziali all'impianto.

2.2.3 La messa in opera

[16] La messa in opera di conglomerati "tiepidi" è una tecnica che, per quanto recente, non presenta particolari difficoltà rispetto a quella tradizionale a caldo e, pertanto, non entra in conflitto con il *know how* acquisito dalle imprese stradali tradizionali.

Basti considerare, ad esempio, il fatto che i metodi di stesa e compattazione sono gli stessi utilizzati abitualmente per i conglomerati bituminosi a caldo tradizionali.

2.2.3.1 Il Trasporto

Anche in questa fase dei lavori vanno rispettate le regole generali adottate nel trasporto dei conglomerati a caldo; la copertura con teloni è altrettanto necessaria in quanto la ventilazione indotta determinerebbe l'evaporazione di parte dell'acqua residua presente nella miscela con conseguente abbassamento della sua temperatura e quindi la riduzione della lavorabilità su strada, il che interessa ovviamente sia la stesa che la compattazione. Come accennato la differenza di temperatura tra l'ambiente circostante e il conglomerato tiepido è, ovviamente, inferiore rispetto al caso dei conglomerati a caldo. Nel caso di una temperatura esterna di 15°C, la durata massima possibile del trasporto aumenta, incrementando di conseguenza il raggio d'azione degli impianti. Ovviamente non va dimenticato il fatto che esiste sempre un

limite minimo della temperatura di stesa che sarà definito in base a ciascuna formulazione della miscela di conglomerato.

2.2.3.2 La Stesa

Anche in questo caso prima della stesa occorre realizzare una mano d'attacco che, conferendo una continuità materiale agli strati della sovrastruttura, contribuisce alla resistenza e alla durabilità della pavimentazione stradale, non importa se realizzata con tecniche a caldo o a freddo. Pertanto possono essere utilizzati gli stessi tipi di emulsione bituminosa impiegati per strati di pavimentazione realizzati con tradizionale conglomerato a caldo. Come visto, la temperatura minima di stesa dipende dalla formulazione del conglomerato e dalla tecnica adottata.

Per la stesa del materiale la problematica è analoga a quella dei loro omologhi a caldo. Considerata la sensibile differenza di viscosità con i conglomerati tiepidi, è necessario uno scrupoloso rispetto del mantenimento, a livello costante, del riempimento della camera di ripartizione della vibro finitrice e della corretta altezza da terra della coclea di distribuzione, così come la sua "immersione" nella massa di materiale defluente.

2.2.3.3 La Compattazione

A parità di formulazione della miscela, la compattazione del conglomerato tiepido è analoga a quella dei conglomerati a caldo. Ovviamente la sequenza delle passate deve essere calibrata in funzione della formulazione adottata per la miscela. In Francia, tutti i conglomerati, siano essi caldi o a bassa temperatura, sono compattati mediante un adeguato rullo gommato seguito sempre da un rullo metallico. Rispetto ai conglomerati a caldo, ovviamente, quelli tiepidi (compattati a 120°-130°) riscaldano meno i pneumatici del rullo gommato. Questo fatto implica che tali rulli

gommati debbano essere equipaggiati con una efficiente barra spruzzatrice di liquido anti-collante.

Va poi precisato che l'energia di compattazione necessaria può essere leggermente superiore a quella dei conglomerati a caldo tradizionali, il che eventualmente si traduce in qualche passata supplementare. Per una compattazione più efficace talora vengono utilizzati opportuni additivi, spesso di origine vegetale e biodegradabili, i quali congiuntamente all'umidità residua della miscela rendono più agevole questa fase di lavoro.

Va sottolineato infine che al termine del processo di raffreddamento le caratteristiche meccaniche raggiunte dal conglomerato risultano definitive.

2.2.3.4 Giunto longitudinale

Anche il giunto di costruzione che si crea fra lo strato preesistente (freddo) adiacente a quello in corso di stesa (tiepido) richiede la stessa lavorazione adottata nel caso dei conglomerati a caldo tradizionali.

2.2.3.5 Igiene dell'ambiente

Con i conglomerati tiepidi le temperature di confezionamento e di stesa sono notevolmente ridotte pertanto per gli operai addetti alla lavorazione si riducono notevolmente sia il rischio di ustioni sia la intensa sensazione di caldo, specie durante i periodi estivi.

La drastica diminuzione di fumi e odori riduce ulteriormente problemi e fastidi alle squadre di stesa e anche alla popolazione che vive e opera in prossimità dei cantieri

di lavoro. I cassoni dei camion, gli alimentatori e la coclea della finitrice, le pale e i rastrelli utilizzati dagli operai restano sempre molto puliti grazie anche alla leggera condensazione in finissime goccioline del vapore acqueo sulle parti metalliche. Questo fatto determina un minore impiego di solventi per la pulizia delle attrezzature.

3 Materiali, piano sperimentale e metodologia di prova

3.1 Le Pavimentazioni stradali

[22] La pavimentazione stradale è la struttura, sovrapposta al rilevato o al terreno in sito delle trincee, idonea a garantire il traffico dei veicoli secondo le previsioni progettuali. Generalmente tale sovrastruttura ha il compito di ripartire sul terreno sottostante le azioni trasmesse dai veicoli (assicurando un'elevata capacità portante in termini sia di resistenza strutturale che di adeguata risposta deformativa ai carichi applicati), proteggere il terreno sottostante dagli agenti atmosferici (in maniera da preservare uniformità e portanza della pavimentazione), garantire ai veicoli una superficie di rotolamento regolare (così da garantire all'utenza sicurezza e comfort di marcia).

Per motivi costruttivi ed economici le pavimentazioni stradali sono costituite dalla sovrapposizione di una serie di strati di materiali differenti, di caratteristiche meccaniche e di durabilità decrescenti funzione della profondità dello strato (tali caratteristiche saranno migliori nello strato superficiale di usura, sul quale l'azione deteriorante dei veicoli e dei fattori ambientali è maggiore).

I vari strati possono essere formati da semplici aggregati o da miscele tra inerti e leganti idraulici o organici, da qui il termine di pacchetti legati e non legati. Se il legante è il bitume, la pavimentazione viene chiamata flessibile.

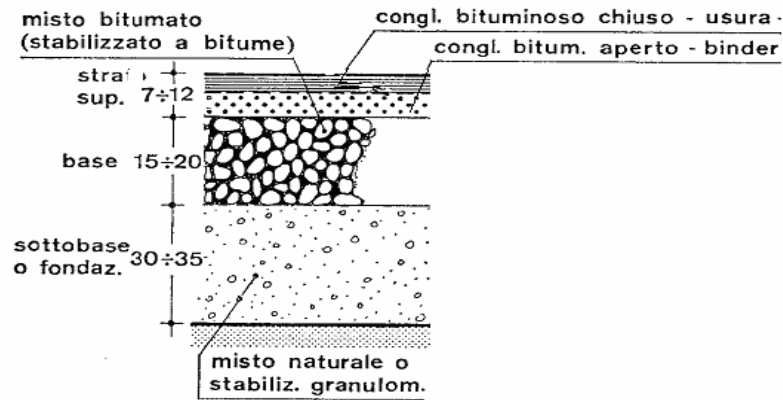


Figura 1 Strati compositivi di una pavimentazione flessibile

Come si può vedere dalla Figura 1, gli strati di una pavimentazione aumentano di spessore con l'aumentare della profondità. Gli strati di una pavimentazione flessibile sono i seguenti:

- *usura*: di spessore compreso fra 3 e 5 cm ha pezzature di 0/12 mm; tale strato, direttamente sollecitato sia dai veicoli che dagli agenti climatici, è costituito da aggregati lapidei qualitativamente migliori rispetto a quelli presenti negli altri strati. Tali aggregati devono, difatti, avere un'ottima resistenza sia all'usura che agli agenti atmosferici, presentare spiccata microrugosità e forma poliedrica. I conglomerati adoperati tradizionalmente per lo strato di usura hanno percentuale dei vuoti inferiore al 5% e sono costituiti miscelando a caldo gli inerti con bitume (in percentuali variabili tra il 4,5% e il 6%);
- *binder (o collegamento)*: questo strato ha uno spessore tra i 4 e gli 8 cm e pezzature di 0/25 mm. Situato al di sotto del manto di usura ne integra le funzioni portanti e assicura la collaborazione con gli strati inferiori. Gli aggregati utilizzati devono assicurare resistenza meccanica a fatica; sono soggetti a restrizioni minori rispetto a quelli adoperati per l'usura. La struttura del binder può anche essere semiaperta ed avere percentuali di vuoti variabili tra il 4 e l'8%. Il tenore di bitume, invece, varia tra il 4 e il 6%. Lo strato di collegamento è legato agli strati adiacenti mediante mani d'attacco realizzate con legante bituminoso (generalmente emulsioni);

- *base*: di spessore compreso tra 10 e 15 cm e pezzature presenti di 0/30 mm, questo strato è indispensabile sia per ripartire i carichi verticali che assorbire - deformandosi - l'azione flettente trasmessa dagli strati superficiali. È costituito da conglomerati bituminosi rigidi con percentuali di bitume variabili tra il 3,5 e il 5%.
- *fondazione*: Quest'ultimo strato è costituito da misto granulare o terre stabilizzate. La stabilizzazione viene fatta nel caso in cui non siano disponibili aggregati che soddisfino le caratteristiche fisiche e di portanza richieste e consiste nel miglioramento di tali proprietà mediante la correzione granulometrica o tramite l'impiego di leganti quali calce, cemento o bitume. Lo spessore varia tra 20 e 40 cm ed è funzione anche della capacità portante del sottofondo. Le pezzature presenti sono di 0/70 mm.

3.1.1 Gli aggregati lapidei

Gli aggregati lapidei costituiscono lo scheletro degli strati che compongono la pavimentazione; dall'attrito interno dei granuli che costituiscono la miscela, difatti, dipende la capacità di ogni strato di resistere agli sforzi conservandosi sufficientemente integro ed indeformabile. Tali aggregati possono essere costituiti da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce di cava massive o di origine alluvionale e da elementi naturali a spigoli vivi o arrotondati. I diversi componenti, e in particolare le sabbie, devono essere privi di materie organiche, solubili, alterabili e friabili. Le caratteristiche fondamentali richieste agli aggregati sono:

- La resistenza all'abrasione e all'urto;
- Una forma a spigoli vivi ed una buona microtessitura.

Gli aggregati lapidei vengono classificati in tre gruppi fondamentali in base alla loro pezzatura:

- *aggregato grosso*: comprende pietrisco, pietrischetto e graniglia, ossia le pezzature trattenute al setaccio di 2 mm di apertura; è importante che questo tipo di materiale abbia granuli con forma poliedrica e spigoli vivi in modo da esercitare un elevato attrito interno e buone caratteristiche meccaniche, costituendo l'ossatura portante del conglomerato bituminoso;
- *aggregato fine*: comprende le pezzature la cui parte preponderante sia inclusa tra i setacci con aperture di 2 e 0,075 mm, ossia le sabbie; deve possedere buone caratteristiche meccaniche e di forma, riempire parzialmente i vuoti tra i granuli di aggregato grosso ed è in parte responsabile dell'indice dei vuoti di una miscela bituminosa;
- *aggregato finissimo*: coincide con la frazione polverosa passante in prevalenza al setaccio da 0,075 mm (filler); in un conglomerato bituminoso ha la funzione di additivo per il bitume e svolge azione addensante. Deve essere dosato con attenzione data la sua influenza sulla stabilità termica e meccanica dei conglomerati ed ha la proprietà di irrigidire il bitume (innalzandone il punto di rammollimento), impedendone il rifluimento.

3.1.2 Il Bitume

Il bitume puro è un composto idrocarburico derivato dalla distillazione frazionata del petrolio grezzo o dall'estrazione da giacimenti naturali (in tali bitumi, chiamati bitumi naturali, la fase di distillazione è avvenuta naturalmente nel corso delle ere geologiche). Dal punto di vista chimico è formato principalmente da carbonio (81-88%) e idrogeno (8-10%), nonché da zolfo, ossigeno ed azoto in proporzioni variabili. Tale materiale, che conferisce capacità legante agli aggregati lapidei nei conglomerati bituminosi, ha una reologia variabile in funzione della temperatura, dei modi e dei tempi di applicazione dei carichi.

Il bitume modificato, invece, è bitume ordinario miscelato insieme a polimeri che ne esaltano alcune qualità. I polimeri utilizzati sono di tipo elastotermico, termoplastico

o termoindurente, e sono presenti in quantità variabile in funzione del grado di modifica desiderato.

3.2 I materiali

I materiali analizzati sono l'usura tradizionale (HMA) e quella tiepida (WMA), entrambe utilizzate, come specificato nel successivo paragrafo 3.3, per la realizzazione di un campo prove sito in Lonate Pozzolo.

A livello di ricetta i due conglomerati bituminosi si differenziano sostanzialmente per l'aggiunta dell'additivo Leadcap® nel WMA, che ne garantisce una maggiore fluidità anche a temperature più basse (tale materiale è stato, difatti, messo in opera a $T=120^{\circ}\text{C}$ - a differenza dell'HMA è stato steso a 160°C).

Di seguito sono riportate le specifiche di entrambi i materiali

3.2.1 Usura HMA

Contenuto di bitume riferito agli aggregati 6,10 %

Contenuto di bitume riferito alla miscela 5,75 %

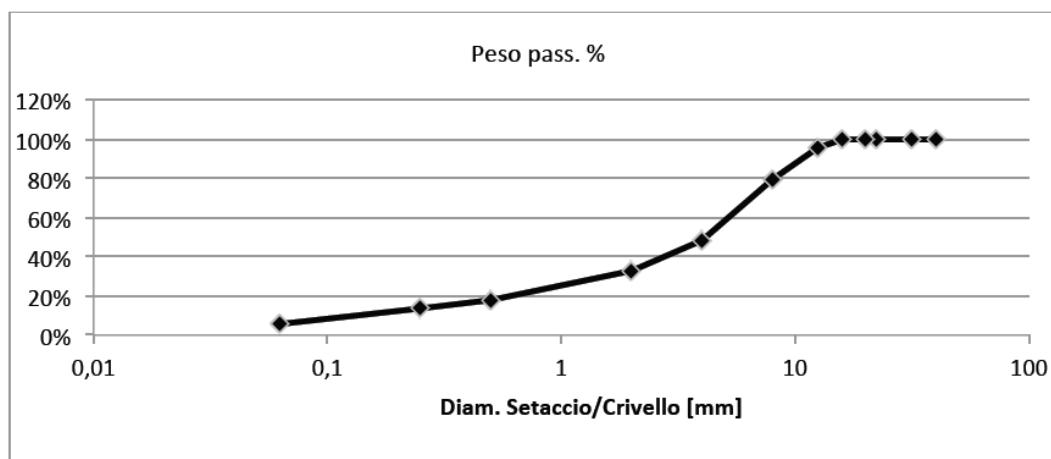


Grafico 1 Curva Granulometrica HMA

| GRANULOMETRIA | | | | |
|------------------------|--------------|-------------|------------|------------|
| | UNI EN 933-1 | Peso tratt. | Peso prog. | Peso pass. |
| | [mm] | [g] | [%] | [%] |
| SETACCI ISO 3310-1 e 2 | 40 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 31,5 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 22,4 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 20 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 16 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 12,5 | 81,9 | 5,1% | 94,9% |
| | 8 | 322,5 | 20,0% | 75,0% |
| | 4 | 446,30 | 27,6% | 47,4% |
| | 2 | 263,00 | 16,3% | 31,1% |
| | 0,5 | 248,10 | 15,4% | 15,8% |
| | 0,25 | 73,30 | 4,5% | 11,2% |
| | 0,063 | 95,20 | 5,9% | 5,3% |

Tabella 1 Analisi Granulometrica HMA

3.2.2 Usura WMA

Contenuto di bitume riferito agli aggregati 5,97 %

Contenuto di bitume riferito alla miscela 5,62 %

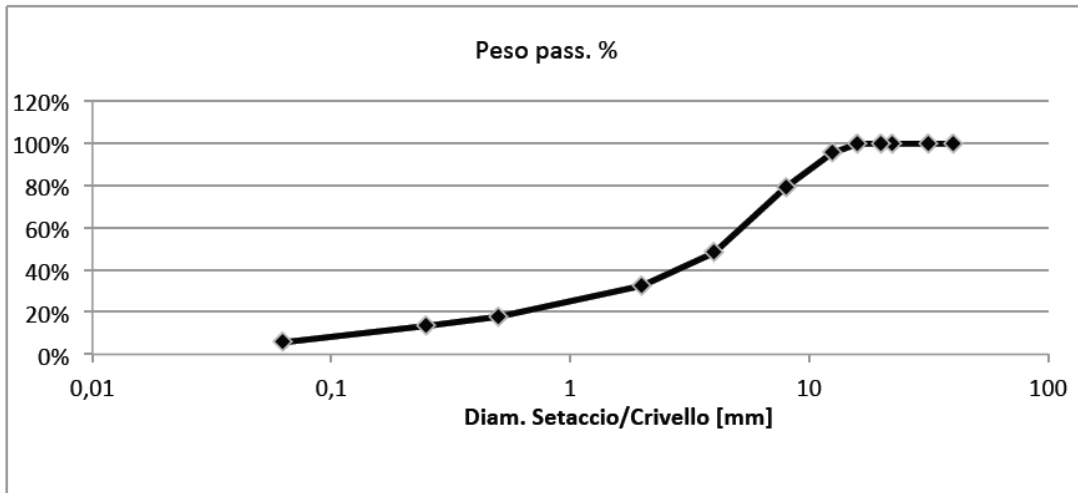


Grafico 2 Curva Granulometrica WMA

| GRANULOMETRIA | | | | |
|------------------------|-------|-------------|------------|------------|
| UNI EN 933-1 | | Peso tratt. | Peso prog. | Peso pass. |
| [mm] | | [g] | [%] | [%] |
| SETACCI ISO 3310-1 e 2 | 40 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 31,5 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 22,4 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 20 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 16 | 0,00 | 0,0% | 100,0% |
| | 12,5 | 68,40 | 4,5% | 95,5% |
| | 8 | 241,70 | 16,0% | 79,5% |
| | 4 | 471,00 | 31,2% | 48,2% |
| | 2 | 235,00 | 15,6% | 32,7% |
| | 0,5 | 222,90 | 14,8% | 17,9% |
| | 0,25 | 64,30 | 4,3% | 13,6% |
| | 0,063 | 121,00 | 8,0% | 5,6% |

Tabella 2 Analisi Granulometrica WMA

3.2.3 L'additivo

Come accennato nel capitolo 2, c'è un'ampia gamma di additivi utilizzati per produrre miscele di WMA; nel paragrafo che segue si parlerà dell'additivo utilizzato per la miscela tiepida presa in analisi in questo elaborato di tesi.

Il nome di questo additivo, prodotto da due importanti istituti coreani specializzati nello sviluppo di materiali petrolchimici e tecnologie costruttive, deriva da "Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement with Chemical" (pavimentazione bituminosa additivata con agenti chimici avente basse richieste energetiche e basse emissioni di biossido di carbonio), che era inizialmente il nome dell'additivo. Da un punto di vista prettamente chimico, uno dei maggiori problemi relativi alla maggior parte degli additivi utilizzati per la produzione di bitume tiepido sono la durezza e la fragilità alle basse temperature. Questo additivo coreano rappresenta un'innovazione in questo campo in quanto contiene degli elementi che riducono la durezza ed aumentano la resistenza a fessurazione alle basse temperature.

Gli altri additivi spesso presentano una scarsa adesione tra aggregati e legante; al contrario questo contiene agenti che favoriscono l'adesione e ne migliorano la sensibilità all'umidità della miscela.

[18] L'additivo utilizzato nella presente ricerca ha una composizione a base di cere ed è caratterizzato da un punto di fusione più basso rispetto a quello del bitume tradizionale e può essere aggiunto alle miscele bituminose o ai leganti, permettendo la produzione e la messa in opera del mix a temperature inferiori di 30°C rispetto al conglomerato bituminoso caldo. Tale additivo viene generalmente aggiunto in percentuali variabili tra il 2% e il 4% sul peso del legante ed attualmente ne esistono tre differenti tipologie:

- Modello - c64;
- Modello - c70 (utilizzato nel campo prove in Italia e sul quale sono state eseguite le prove trattate in questo elaborato);
- Modello – c76.

3.3 Il Campo prove in Italia

Questo materiale è stato utilizzato in Italia per sostituire il manto di usura deteriorato di un tratto di strada di 200 m di Via del Gregge, una strada sita a Lonate Pozzolo, cittadina di 12012 abitanti nell'estremità Sud-Ovest della provincia di Varese (Figura 2).

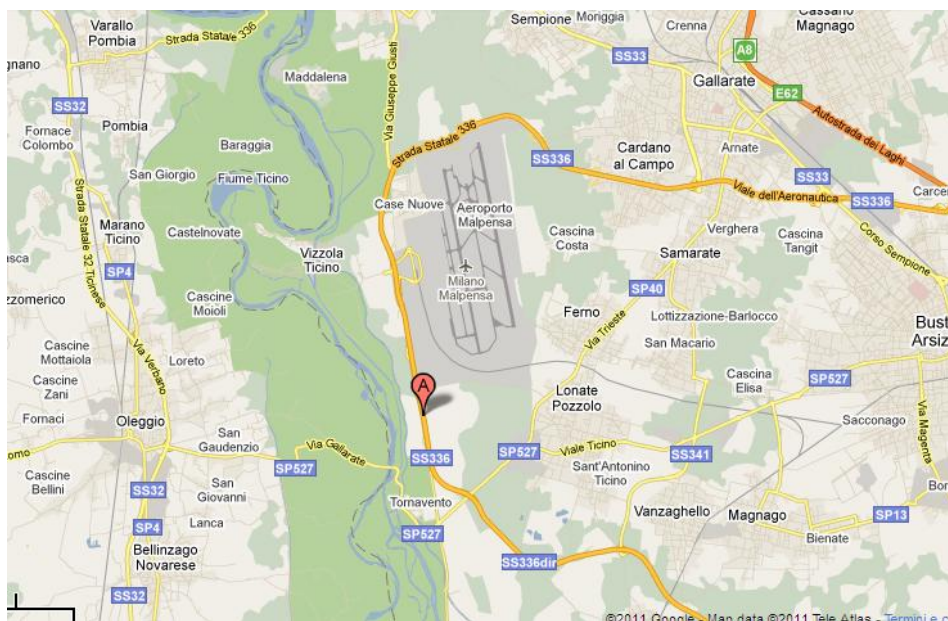


Figura 2 Localizzazione della strada

Questa strada si sviluppa per la maggior parte della sua estensione parallelamente alla SS 336, una strada di tipo B che collega, dal comune di Busto Arsizio, l'autostrada Milano - Varese ai due terminal dell'Aeroporto Intercontinentale di Milano Malpensa. Prosegue poi, con le caratteristiche di strada a viabilità ordinaria (carreggiata unica) passando per Somma Lombardo scavalcando il Ticino e terminando infine a Varallo Pombia, dove si immette sulla strada statale 32 Ticinese.

Secondo il DM 5/11/2011 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", Via del Gregge viene considerata una strada di tipo C2 (extraurbana secondaria a traffico limitato); essa difatti ha una singola carreggiata avente una corsia per senso di marcia (di 3,50 m ciascuna) e due banchine laterali (una per senso di marcia) di 1,25 m.

I lavori di stesa del manto di usura in Via del Gregge sono iniziati l'11 novembre 2010 ad opera di due aziende in collaborazione con il Politecnico di Milano. Lo scopo di questa applicazione era quello di confrontare il conglomerato tradizionale caldo (HMA) con quello tiepido (WMA) cui era stato aggiunto l'additivo. Sono state asfaltate due strisce della lunghezza di 100 m aventi l'ampiezza di una corsia, una con HMA e l'altra con WMA.

Le fasi operative sono state le seguenti:

- Fresatura del vecchio manto;

- Spruzzatura di emulsione bituminosa;

- Rifacimento e compattazione dello strato inferiore, controllando temperatura e densità;

- Prelievo delle miscele per effettuare test di laboratorio;

- Spruzzatura di emulsione bituminosa;

- Rifacimento e compattazione di entrambe le superfici di usura mediante posa di conglomerato bituminoso HMA e WMA controllandone tipo, spessore e temperatura;

La fresatura consiste nel tritare il materiale che può essere riciclato o riutilizzato, questa operazione viene effettuata con apparecchiature molto grandi, alcune possono fresare fino a 13000 m² al giorno ad una velocità di 1,5 km/h (ovviamente questi parametri dipendono dalla profondità dello strato da sminuzzare). Nel caso di Via del Gregge sono stati rimossi 8 cm della vecchia pavimentazione per sostituirli con una nuova. Immediatamente dopo questa operazione la superficie è stata accuratamente pulita in modo da rimuovere detriti e sporcizia.

Dopo la fresatura è stato spruzzato un sottile strato di bitume liquido, che viene applicato tra gli strati per favorire l'adesione tra le due superfici. Un'adeguata adesione tra la parte superiore della strada esistente ed il manto di usura è fondamentale per la struttura della pavimentazione, gli strati devono comportarsi come un unico elemento per poter garantire una capacità portante adeguata. Se gli strati adiacenti non si legano l'un l'altro si comportano come una serie di singoli strati sottili indipendenti, nessuno dei quali ha le caratteristiche per far fronte ai carichi di traffico per cui l'intera pavimentazione è stata progettata. Le conseguenze della mancata adesione tra strati possono essere la delaminazione, le fessure longitudinali, fessure a pelle di cocodrillo, buche ed altre forme di degrado come l'ormaiamento, che riduce notevolmente la vita utile della pavimentazione. Il bitume liquido è stato spruzzato sia tra la superficie fresata e lo strato inferiore che tra quest'ultimo e il manto superficiale.

Lo strato inferiore di HMA dello spessore di 5 cm è stato steso sulla superficie fresata e compattato con un rullo vibrante metallico a doppio tamburo, fino al raggiungimento della densità richiesta .



Figura 3 Rullo metallico vibrante a doppio tamburo

È stato infine steso un manto di usura dello spessore di 3 cm, l'area è stata suddivisa in due parti lunghe 100 m dello spessore di una corsia. Nel primo tratto è stato steso l'Hot Mix Asphalt (Figura 4), mentre nel secondo il Warm Mix Asphalt contenente l'additivo® (Figura 5).



Figura 4 Manto di usura di HMA



Figura 5 Manto di usura di WMA

Come si può osservare dalle fotografie sopra riportate, l'HMA produce quantità di fumo ed umidità molto maggiori rispetto al WMA. Anche il manto di usura è stato compattato come lo strato inferiore.

3.4 Le prove di laboratorio

Nel seguente paragrafo sarà esposto il piano sperimentale seguito, nello specifico saranno illustrate le prove effettuate su entrambi i materiali considerati.

Le miscele, come spiegato nel precedente paragrafo, sono state confezionate presso un impianto di produzione per conglomerati bituminosi. Durante la messa in opera, sono stati prelevati dei campioni e trasportati al Laboratorio Sperimentale Stradale del Politecnico di Milano la fine di permetterne lo studio e l'analisi tramite prove di laboratorio.

La procedura di indagine inerente tali materiali ha previsto il confezionamento di provini attraverso la compattazione con pressa giratoria a diverse temperature (80, 100, 120, 140 e 160°C); tali provini hanno diametro di 150 mm ed uno spessore circa pari a 75 mm.

Attraverso tale attività è stato possibile valutare la variazione delle caratteristiche volumetriche in funzione delle differenti temperature di compattazione, pervenendo ad un confronto tra le due tipologie di materiale analizzate. I parametri volumetrici

considerati sono stati: il contenuto dei vuoti residui (secondo la norma UNI-EN 12697-8) e la massa volumica apparente mediante procedimento a superficie satura secca (in conformità con la norma UNI-EN 12697-6). L'indice dei vuoti è un parametro fondamentale, poiché influisce direttamente ed in modo preponderante sulle caratteristiche meccaniche del campione stesso, infatti minore sarà il contenuto di vuoti residui maggiore sarà la resistenza meccanica del campione. E' stato inoltre possibile valutare, attraverso la compattazione con pressa a taglio giratorio, anche ulteriori parametri legati alla capacità della miscela di lasciarsi addensare durante le operazioni di stesa e compattazione, ossia lavorabilità k e auto-addensamento C_1 .

Successivamente sono state eseguite prove di caratterizzazione meccanica su ciascun provino, nello specifico è stata effettuata la prova di determinazione del modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (tramite macchina dinamica). Tale modulo di rigidezza permette di caratterizzare la capacità di una miscela di deformarsi in conseguenza delle tensioni dovute all'applicazione di un carico sinusoidale; è uno dei parametri che riesce a definire il comportamento reologico dei conglomerati bituminosi. Data la natura visco-elastica dei conglomerati bituminosi il modulo di rigidezza dipende fortemente, oltre che dal grado di compattazione del provino, anche dalla temperatura e dalla frequenza di prova.

Successivamente sono stati confezionati provini prismatici (piastre) con entrambi i materiali attraverso compattazione con roller compactor (alle temperature di 120°C e 160°C per entrambi i materiali) ed alla determinazione dell'indice dei vuoti delle stesse. Anche in questo caso, oltre al contenuto di vuoti, è stata valutata la lavorabilità k di ciascuna miscela con tale metodologia di compattazione e confrontata con quanto ottenuto mediante la pressa a taglio giratorio, al fine di determinare una eventuale correlazione tra le due tecniche di compattazione di laboratorio. Infine, si è deciso di studiare il comportamento delle suddette piastre con il wheel tracker per valutare la predisposizione alla formazione di ormaie, ovvero la suscettibilità all'accumulo di deformazioni permanenti alle temperature di prova di 40 e 60°C.

3.4.1 Determinazione della massa volumica massima (TMD)

Per prima cosa si è calcolata la massima massa volumica (TMD) per entrambi i conglomerati, indispensabile per il calcolo dell'indice dei vuoti dei provini cilindrici e delle piastre confezionate con il roller compactor.

Da questa prova viene, appunto, ricavata la massima massa volumica (TMD) di una miscela di conglomerato non compattato e nelle condizioni di addensamento limite, corrispondenti all'assenza di vuoti residui. Tale valore rappresenta la massa volumica degli aggregati rivestiti del film di bitume che ha la funzione di legante. Essa è definita anche teorica poiché, nella pratica, non è effettivamente raggiungibile.

Tale prova è stata effettuata in conformità con la norma UNI-EN 12697-5 inserendo all'interno di un picnometro di vetro graduato circa 400 g di conglomerato, precedentemente riscaldato e suddiviso manualmente in grani; in seguito si versa dell'acqua distillata – precedentemente deaerata - nel contenitore e lo si collega ad una pompa di aspirazione dell'aria (Figura 6). Lo strumento va lasciato in posa almeno 45 minuti e delicatamente scosso per far sì che non vi siano bolle d'aria. Il picnometro viene pesato in tutte le fasi di prova: inizialmente - vuoto ed asciutto - , dopo aver inserito il materiale e alla fine, aggiungendo un tappo di vetro, avente una cannula sporgente, riempito d'acqua distillata fino alla tacca graduata. Misurando con un termometro a mercurio la temperatura dell'acqua, e ricavandone la densità da tabella, sarà possibile ricavare la TMD del materiale.



Figura 6 Picnometro riempito con miscela ed acqua distillate e collegato alla pompa

La massa volumica massima della miscela [kg/m^3] viene calcolata attraverso la seguente formula:

$$I = i * \frac{c}{h}$$

Con

c = massa del materiale secco [g]

i = massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova [kg/m^3]

h = massa del materiale secco + massa del picnometro e acqua a temperatura prova –
massa del picnometro con acqua e materiale [g]

Questa prova è stata fatta per entrambi i materiali presi in esame, ottenendo i seguenti risultati.

$$\text{TMD}_{\text{HMA}} = 2547 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{TMD}_{\text{wMA}} = 2524 \text{ kg/m}^3$$

Una volta note le densità si è pensato di studiare entrambi i materiali attraverso due differenti approcci: suddividendoli in 5 fasce di temperatura, comprese tra gli 80 e i 160°C e confezionando con la pressa giratoria 30 provini cilindrici, aventi diametro di 150 mm (come accennato in precedenza); adoperando il roller compactor per creare delle piastre alle temperature di messa in opera dei materiali (120° e 160° C).

3.4.2 La pressa giratoria

La pressa giratoria (Figura 7) è un macchinario utilizzato per la compattazione dei conglomerati bituminosi.

Essa permette di preparare campioni cilindrici aventi caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in sito mediante la compattazione dei rulli di cantiere.

Secondo la normativa di riferimento UNI-EN 12697-31 tale apparecchiatura può essere utilizzata per:

- determinare il volume dei vuoti di una miscela ad un numero dato di rotazioni;
- determinare una curva di addensamento in funzione del numero di rotazioni;
- confezionare provini di una data altezza ad una predeterminata densità, da sottoporre successivamente a prove per determinarne le caratteristiche meccaniche.

Il materiale è collocato all'interno di una fustella metallica e sottoposto ad una pressione costante, la cui direzione di applicazione risulta essere inclinata rispetto all'asse della fustella stessa. Inoltre, durante il processo di compattazione, quest'ultima ruota attorno al proprio asse ad una velocità costante.



Figura 7 Pressa Giratoria

Questa metodologia di compattazione è preferibile a quella Marshall, poiché essa riproduce molto più fedelmente l'addensamento del materiale subito durante la fase di stesa in cantiere, dal momento che il campione è sottoposto sia ad uno sforzo di compressione verticale, che di taglio orizzontale dovuto alla rotazione della fustella attorno ad un asse inclinato. Per maggior chiarezza si osservi la Figura 8.

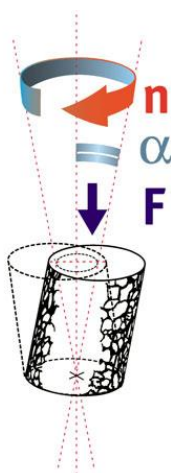


Figura 8 Sforzi cui è sottoposto il campione compattato con Pressa Giratoria

Le macchine impulsive quali la Marshall inducono, invece, un progressivo avvicinamento dei granuli che si interrompe all'atto della formazione di zone di saldo contatto. Al contrario, la compattazione giratoria determina una redistribuzione degli aggregati, formando nuove strutture granulari aventi una distribuzione di vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che avviene in sito (Figura 9).

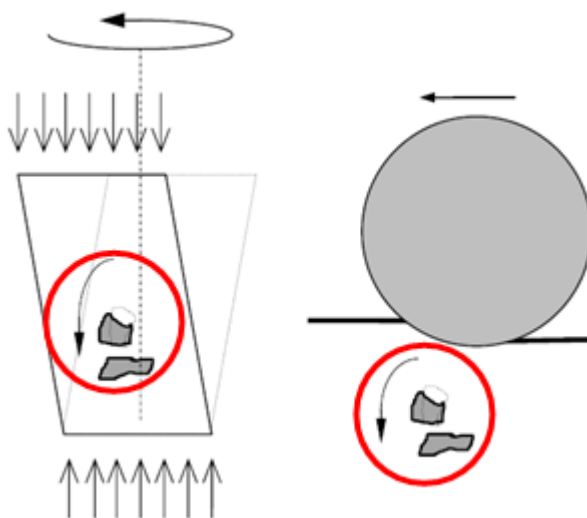


Figura 9 Confronto tra la compattazione in sito tramite rullo e quella in laboratorio tramite pressa giratoria

La pressa giratoria utilizzata per il presente lavoro di ricerca presenta caratteristiche conformi alle prescrizioni tecniche delle norme SHRP M-002, UNI-EN 12697-10, UNI-EN 12697-31, ASTM-D6307.

Grazie alla connessione con un personal computer è possibile monitorare in continuo l'altezza raggiunta dal provino ad ogni giro; i risultati possono essere visualizzati durante l'esecuzione della prova e salvati per una successiva elaborazione (Figura 10).

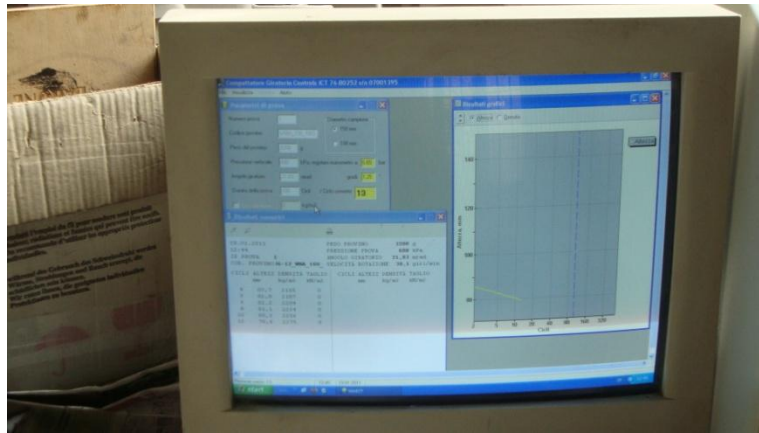


Figura 10 Schermata del software di controllo per la compattazione con Pressa Giratoria

La pressa giratoria è predisposta in modo tale da poter impostare i parametri di prova, quali l'angolo giratorio, attraverso controlli analogici presenti sui lati e sul retro, sulla parte frontale della macchina è presente un manometro dal quale è possibile avere un riscontro sulla pressione di compattazione, infine, sul fianco è presente un quadro con un disco graduato dal quale è possibile riscontrare l'angolo giratorio selezionato.

Tutte queste grandezze devono essere date in input al personal computer connesso al macchinario attraverso una porta seriale, il quale attraverso un software fornito dal costruttore mostra, come anticipato sopra, l'evolversi della prova e restituisce un file sul quale è memorizzato come l'altezza del provino vari ad ogni giro compiuto dalla fustella.

La pressa giratoria dispone di due tipi di fustelle, per il confezionamento di due categorie di provini di diametro differenti una da 100 mm ed una da 150 mm.

3.4.2.1 Confezionamento dei provini

Per realizzare i provini è necessario, innanzitutto, riscaldare il materiale in forno; successivamente verrà inserito nella fustella (con profilo interno cilindrico e diametro da 150 mm). Le miscele sono state compattate alla temperature di circa 80°C, 100°C, 120°C, 140°C e 160°C per studiare gli effetti dell'additivo® al variare della

temperatura sulla miscela tiepida e confrontare i risultati ottenuti con il comportamento dell'usura tradizionale nelle medesime condizioni.

La massa di materiale da inserire all'interno della fustella è stata calcolata attraverso la seguente relazione, atta a definirne il quantitativo ottimale in funzione del volume e della TMD della miscela, ipotizzando di voler ottenere un indice dei vuoti pari al 4%.

Sapendo che il volume del provino è dato dalla seguente formula:

$$V = \frac{\pi}{4} * d^2 * h = \left(\frac{\pi}{4} * 15^2 * 0,75 \right) * 10^{-3} = 1325,4 \text{ cm}^3$$

con

$D = 15$ diametro del provino [cm]

$h = 0,75$ altezza imposta [cm]

e che l'indice dei vuoti %v si calcola come:

$$\%v = 1 - \left(\frac{M}{TMD} * \frac{1}{V} \right)$$

Si ha

$$4\% = 1 - \frac{1}{TMD} * \left(\frac{M}{1325,4} \right)$$

Quindi

$$M = 1325,4 * TMD * (1 - 0,04)$$

Si avrà per l'usura tradizionale HMA una $M=3240,7\text{g} \approx 3241 \text{ g}$ e per l'usura tiepida (WMA) $M=3211,5 \text{ g} \approx 3212 \text{ g}$.

In forno, oltre al conglomerato bituminoso, devono essere riscaldati la fustella, i due piatti, uno spessore aggiuntivo e il fondo della fustella. Quest'ultima e tutte le altre

parti metalliche vanno unte con grasso – per far sì che il bitume non aderisca alle pareti dello stampo - ed assemblate (Figura 11).



Figura 11 Fustella

Il materiale, una volta raggiunta la temperatura di compattazione - come precedentemente accennato - , si versa all'interno della fustella e, per evitarne il contatto diretto con i piatti, sono inoltre inseriti due dischetti di carta; si posiziona quindi la fustella nella camera di compattazione e si richiude il plexiglass di protezione.

I parametri di prova per il confezionamento dei provini sono riassunti nella Tabella 3.

| CARATTERISTICHE TECNICHE DI PROVA | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Pressione di consolidazione | 650 kPa |
| Angolo di rotazione | 0.76 - 1.6° |
| Velocità di rotazione | 15-60 rpm |
| Numero di giri | 500 |
| Fustelle | 150 mm |
| Metodo operativo | Altezza imposta 75 mm |

Tabella 3 Caratteristiche tecniche di prova per compattazione con Pressa Giratoria

Con tali parametri si sono ottenuti provini dello spessore di 75 mm con un numero di giri variabile tra i 29 (WMA 120°C) e 183 (HMA 80°C).

Raggiunta l'altezza di compattazione imposta, la pressa si ferma consentendo di estrarre la fustella e porla nell'estrusore che, mediante un pistone azionato elettricamente, permette di sfilare il provino dalla stessa.

Estratti i campioni dalla fustella, si rimuovono i piatti ed i dischetti di carta a contatto con il conglomerato e li si lascia raffreddare a temperatura ambiente; a questo punto sono pesati, misurati (ricavando altezza e diametro medi) e contrassegnati (Figura 12).



Figura 12 Campioni confezionati con Pressa Giratoria e contrassegnati

3.4.2.2 Lavorabilità e auto-addensamento delle miscele

La pressa giratoria è dotata di sensori che permettono di registrare in ogni fase della compattazione alcune caratteristiche volumetriche della miscela; in funzione del numero di giri essa fornisce i valori di altezza e peso del provino, densità, taglio e grado di compattazione.

Attraverso tali risultati sono state ricavate le curve di compattazione, che solitamente si ottengono riportando su un grafico semi-logaritmico il numero di giri in ascissa e il grado di addensamento in ordinata.

Il grado di addensamento calcolato ad ogni giro del processo di compattazione in base al peso e all'altezza del campione è denominato "non corretto" (C_{ux}).

Il grado di compattazione "non corretto" ad un determinato numero di giri "x" è calcolato come percentuale della massima massa volumica teorica del conglomerato bituminoso mediante la seguente equazione.

$$C_{ux} = \frac{100}{TMD} * \frac{W_m}{V_{mx}}$$

Dove:

- V_{mx} = volume del provino a "x" giri pari a $\pi * d^2 * \frac{h_x}{4}$ [cm³];
- W_m = massa inserita nella fustella [g];
- TMD = massima massa volumica del conglomerato bituminoso [g/cm³];
- d = diametro del campione [cm];
- h_x = altezza del campione a "x" giri [cm].

Terminato il processo di compattazione si può misurare la massa volumica del campione, che deve essere usata per correggere il valore "non corretto" C_{ux} . Per compiere tale correzione si utilizza la seguente equazione.

$$C_x = \frac{C_{ux} * TMD * V_{mm}}{W_m}$$

Dove:

- C_x = grado di compattazione corretto espresso come percentuale della massima massa volumica teorica [%];
- V_{mm} = volume del campione calcolato al massimo numero di giri [cm³].

La relazione analitica che lega i parametri di compattazione è la seguente.

$$C(\%) = C_1(\%) + k * \log(N)$$

Dove:

- C_1 indica l'auto-addensamento della miscela dopo il primo giro;
- k indica la lavorabilità della miscela, ovvero la capacità del materiale o comunque di una miscela di compattarsi e deformarsi sotto l'azione di una forza;
- $C(\%)$ rappresenta il grado di costipamento, ossia il complementare a 100% della percentuale dei vuoti;
- N è il numero di giri.

Dall'esame delle curve di compattazione si derivano i due parametri che esprimono in maniera quantitativa la lavorabilità: la pendenza (k) della curva di compattazione, la lavorabilità, e la sua ordinata d'origine (C_1), auto-addensamento.

Tali parametri sono stati determinati mediante regressione lineare dalle curve di compattazione di ciascun provino.

L'auto-addensamento è legato alle caratteristiche granulometriche degli aggregati ed è tanto maggiore quanto più la granulometria è vicina a quella del massimo addensamento, inoltre esso varia con il valore di attrito interno della miscela che risulta molto sensibile alla forma degli aggregati.

La lavorabilità, invece, dipende dalle caratteristiche e dal contenuto di bitume ed è associata alla viscosità della miscela.

Entrando più nello specifico, la messa in opera di un conglomerato bituminoso avviene "vincendo" la forza di taglio intergranulare della miscela stessa.

$$\tau = c + \sigma * \tan \varphi$$

dove possiamo distinguere la coesione c (che rappresenta la fase legante, il contributo apportato dal bitume) e il contributo dovuto agli aggregati ϕ detto angolo di attrito interno.

Il valore di resistenza al taglio non deve essere troppo alto (in quanto sarebbe difficile da superare con i mezzi d'opera) né tanto meno troppo basso (poiché il conglomerato non terrebbe la forma una volta steso). Ovviamente, come tutte le grandezze relative ai conglomerati bituminosi ed al bitume, anche nel caso della lavorabilità sono molteplici i fattori che ne influenzano l'entità. In primo luogo la granulometria ed il grado di angolosità degli aggregati, in quanto essi agiscono sull'angolo di attrito interno ϕ in maniera marcata (gli aggregati di frantumazione hanno sì una resistenza maggiore, ma causano una minor lavorabilità in quanto si rende più difficoltoso il mutuo scorrimento tra i granuli).

Sempre con riferimento agli aggregati, un fattore molto importante risulta essere il diametro massimo degli inerti, poiché un suo aumento porta ad un aumento del volume degli aggregati e quindi della miscela, con un conseguente aumento della resistenza a taglio della miscela stessa. Per quanto concerne il legante, un aumento della percentuale di bitume inizialmente porta benefici in termini di lavorabilità (effetto "lubrificante", che permette un più facile scorrimento dei granuli), ma una volta raggiunto il valore ottimale, qualunque aumento risulta essere deleterio (aumento della viscosità del mastice che porta la miscela vicino a condizioni di plasticità, squeezing).

3.4.2.3 Determinazione della massa volumica e del contenuto dei vuoti residui

Una volta terminata la compattazione dei campioni tramite la pressa giratoria, si è proceduto alla determinazione della massa volumica apparente per ottenere successivamente il volume dei vuoti presente nei campioni.

Mentre con il TMD si ricava la massima massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una data temperatura di prova, con la pesata

idrostatica si determina la massa volumica apparente, cioè la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria ad una nota temperatura di prova, del campione in considerazione.

Tale prova può essere eseguita in due modi:

- sigillando il campione con la paraffina, a questo punto il provino non sarà più utilizzabile per ulteriori prove;
- senza paraffina, l'acqua satura i pori, e si può trovare la massa umida del campione a superficie secca; la prova non pregiudica le condizioni del provino che può essere riutilizzato per ulteriori prove.

Per il presente lavoro di ricerca, è stato seguito il secondo procedimento.

Dopo qualche giorno dal confezionamento i campioni sono stati pesati uno ad uno per ricavarne la massa a secco.

Successivamente sono stati immersi in bacinelle contenenti acqua per almeno un'ora, scuotendoli e girandoli di tanto in tanto per facilitare la fuoriuscita delle bolle d'aria (Figura 13).



Figura 13 Provini a bagno nell'acqua

Il passo seguente consiste nel pesare i singoli campioni in un bagno d'acqua con bilancia, collegata ad un gancio e ad una rete metallica all'interno della quale collocare il provino, che permetta di effettuare questa operazione (Figura 14).



Figura 14 Bilancia con la quale viene effettuata la pesata idrostatica del campione

Successivamente si estrae il provino dall'acqua e lo si pesa di nuovo previa asciugatura della sua superficie, ricavando così anche la massa umida del provino stesso.

E' inoltre necessario conoscere la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova in cui viene immerso il provino durante la pesata stessa.

Noti questi parametri, si determina il volume del campione, e quindi anche la massa volumica apparente cercata, attraverso la seguente relazione.

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

Dove:

- ρ_{bssd} è la massa volumica apparente, [kg/m³];
- m_1 è la massa del provino asciutto, [g];
- m_2 è la massa del provino in acqua, [g];
- m_3 è la massa del provino saturato con la superficie asciutta, [g];
- ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova, [kg/m³].

Ottenuta la massa volumica apparente di ogni singolo campione è possibile trovare il relativo indice dei vuoti, il quale ne indica la percentuale di vuoti interni, utilizzando la seguente relazione.

$$\%v = 100 * \left(1 - \frac{\rho_{bssd}}{TMD}\right)$$

Dove:

- v è l'indice dei vuoti cercato [%].

3.4.3 Determinazione del modulo di rigidezza tramite macchina dinamica

[23] I test di laboratorio hanno il compito di riprodurre gli stati tenso-deformativi ai quali il conglomerato bituminoso è sottoposto a seguito dell'azione ciclica dei carichi del traffico veicolare, per poter dedurre le leggi di comportamento necessarie al progetto di una pavimentazione. Le deformazioni, che il conglomerato bituminoso subisce in funzione delle sollecitazioni applicate, hanno un ritardo nel tempo a causa

del comportamento visco-elastico proprio del materiale il quale varia in funzione del carico applicato e della temperatura.

La parte elastica del conglomerato bituminoso è regolata dal legame costitutivo sforzi-deformazioni secondo il modulo elastico - o modulo di Young - , per la parte viscosa, invece, non è possibile definire un modulo come un semplice rapporto sforzi-deformazioni. Materiali visco-elastici, quali il conglomerato bituminoso, non possono essere rappresentati da una legge costitutiva univoca, essa difatti dipende dalle condizioni a cui si trova il materiale, in particolare dalla temperatura, dalla velocità di carico e dalla modalità di applicazione del carico [24].

Le prove per la determinazione del Modulo complesso sottopongono provini prismatici, trapezoidali o cilindrici a carichi ciclici di compressione, trazione o flessione, variabili nel tempo, in genere con legge sinusoidale. Per la natura viscoelastica del materiale, la deformazione conseguente all'applicazione dei carichi avviene con un certo ritardo nel tempo, dipendente dalla temperatura e dalla frequenza di carico. L'andamento della deformata segue la stessa legge di variazione del carico. Per questo motivo si è portati alla definizione di due tipi di modulo, quello statico e quello dinamico. Il primo si determina attraverso delle prove sui conglomerati bituminosi con carichi costanti nel tempo, il secondo attraverso carichi ciclici.

Esistono 4 moduli dinamici calcolabili in laboratorio, essi sono:

- *Il modulo complesso;*
- *Il modulo secante;*
- *Il modulo resiliente;*
- *Il modulo di rigidezza.*

Nello svolgimento del presente piano sperimentale si è determinato il modulo di rigidezza con una macchina dinamica; tale modulo viene comunemente utilizzato per fornire indicazioni sulle caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso.

L'apparecchiatura con la quale sono state effettuate le prove su ciascun provino presenta caratteristiche conformi alla normativa UNI-EN 12697-26 (Figura 15).

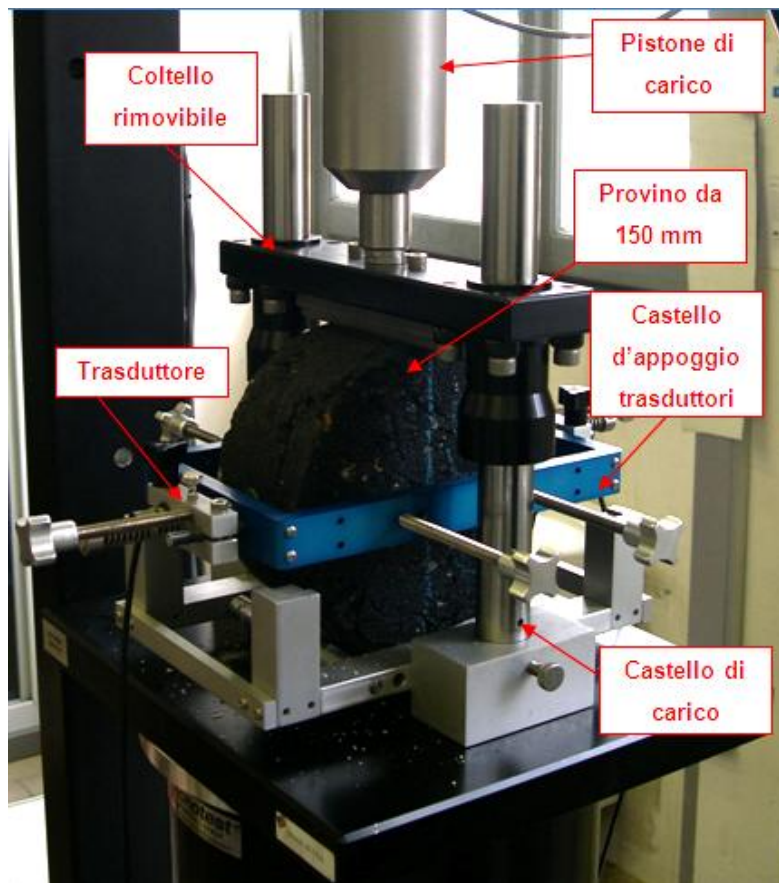


Figura 15 Castello di carico della macchina dinamica

Tale macchinario ricava la misura del modulo di rigidezza applicando una trazione indiretta a provini cilindrici e rilevando le deformazioni orizzontali reversibili, agendo in modo non distruttivo.

Il carico è applicato mediante un dispositivo oleopneumatico, fissato su un telaio d'acciaio, ed è distribuito lungo tutto lo spessore del provino, attraverso due barre d'acciaio di dimensioni standard, detti coltelli, e con raggio di curvatura pari a quello

del provino da testare (Figura 16). La macchina è dotata di due serie di coltelli adatti ad effettuare prove sia su campioni da 150 mm che da 100 mm.

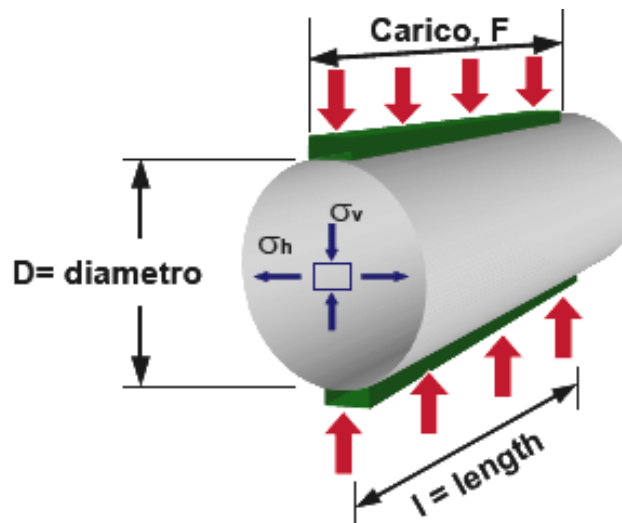


Figura 16 Schema di applicazione del carico della macchina dinamica

Il coltello inferiore è fissato saldamente alla base di appoggio, mentre quello superiore è rimovibile e trasmette il carico attraverso un perno d'acciaio che garantisce l'applicazione di una forza assiale.

La cella di carico del sistema misura la forza applicata dal dispositivo ad ogni ciclo. Il sistema di misurazione della deformazione determina le deformazioni orizzontali massime perpendicolari alla direzione di applicazione del carico attraverso i trasduttori di spostamento fissati mediante un supporto sul diametro del provino.

La macchina dinamica è collegata ad una centralina, la quale a sua volta è collegata ad un computer su cui è installato il software di funzionamento della macchina stessa.

Prima di iniziare il test occorre aprire il software ed impostare i parametri di esecuzione della prova. Il programma permette di salvare e di esportare in vari formati i risultati delle prove eseguite.

La prova può essere effettuata in due modi:

- a deformazione controllata;
- a carico controllato.

Nel caso presente è stato seguito il primo procedimento, impostando una deformazione di 7 μm su campioni da 150 mm di diametro.

I provini, prima di essere testati, sono stati sottoposti ad un condizionamento specifico secondo il piano sperimentale.

Una volta posizionato il provino sull'apposito castello di carico, si utilizza il software della macchina il quale dà la possibilità di impostare i seguenti parametri di prova:

- temperatura di prova [$^{\circ}\text{C}$];
- diametro del provino [mm];
- spessore del provino [mm];
- modulo di Poisson;
- tempo di picco [ms];
- numero di impulsi di preconditionamento;
- numero dei cicli di prova;
- deformazione imposta [μm].

Una volta inseriti i parametri di input occorre posizionare i trasduttori che rilevano la deformazione orizzontale in prossimità del diametro del provino.

La prova inizia applicando al provino un numero prefissato di impulsi per calibrarne l'ampiezza, necessaria a raggiungere la deformazione imposta.

La geometria del provino è nota, la forza e la deformazione sono misurate, pertanto la tensione massima ed il modulo di rigidità sono automaticamente calcolati dal software ad ogni ciclo di carico.

La stessa operazione è in seguito effettuata ruotando il campione di 90° , cioè sollecitando il diametro ortogonale a quello di partenza. Le rilevazioni effettuate hanno un tempo di picco di 124 ms, 30 colpi di pre-condizionamento e 5 colpi di prova. La media dei valori medi calcolati sui due diametri, per ciascun tempo di picco, rappresenta il modulo di rigidità del materiale sottoposto a prova alla data frequenza di carico (ricordando che la frequenza è data da $f = \frac{1}{4 \cdot t_p}$ [Hz] dove t_p è il tempo di picco espresso in secondi).

3.4.4 Roller compactor con sliding plates

Questa tipologia di compattatore a piastra ha la particolarità di richiedere l'uso di "lamelle" in grado di trasmettere il carico, proveniente da ruote o rulli, al materiale presente nello stampo. Tali sliding plates (Figura 17) devono essere libere di traslare in direzione verticale, guidati dalle superfici interne dello stampo. Inoltre esse devono necessariamente avere numero e dimensioni tali da permetterne l'inserimento con la massima precisione all'interno della fustella e da assicurare una trasmissione del carico in modo efficiente, evitando il più possibile la risalita di bitume ed aggregati tra le lamelle. Il rullo applicante il carico deve essere in grado di muoversi liberamente in direzione verticale, così da assicurare la corretta trasmissione della forza F , la quale durante la prova a carico costante deve avere oscillazioni inferiori al $\pm 20\%$.



Figura 17 Sliding Plate



Figura 18 Macchinario di prova Roller Compactor/Wheel Tracker

Questa tipologia di compattazione viene anche chiamata metodo kneading, poiché durante il passaggio del rullo solo una parte della miscela bituminosa subisce il processo di compattazione, così da avere uno stress minore del materiale durante la realizzazione della prova. Questa tecnica, peraltro contemplata nella Norma EN 12697-33, ha il vantaggio di ridurre di per sé le anisotropie di bordo prodotte dai “compattatori a dondolo” e di confinare completamente il conglomerato tra elementi metallici preriscaldati e ad elevata inerzia termica, tali da mantenere pressoché costante la temperatura del materiale durante la compattazione [24].

Per il lavoro qui descritto si è fatto uso di una innovativa attrezzatura di laboratorio in grado di svolgere due funzioni (Figura 18): la compattazione di piastre in conglomerato bituminoso e l’esecuzione di prove di ormaimento sulle piastre così realizzate. In questo paragrafo se ne riportano le caratteristiche tecniche salienti

nonché tutti i requisiti di utilizzo. Come descritto nel manuale d'uso della macchina, essa deve essere utilizzata solo per:

- Compattazione di conglomerato bituminoso in accordo alla norma UNI EN 12697 – 33;
- Ormaiamento di lastre di conglomerato bituminoso in accordo alla normativa UNI EN 12697-22.

La macchina adoperata utilizza il metodo kneading per la realizzazione dei campioni. La possibilità di effettuare anche il test di ormaiamento è data dalla particolare architettura della macchina, visibile nelle Figure 19 e 20.

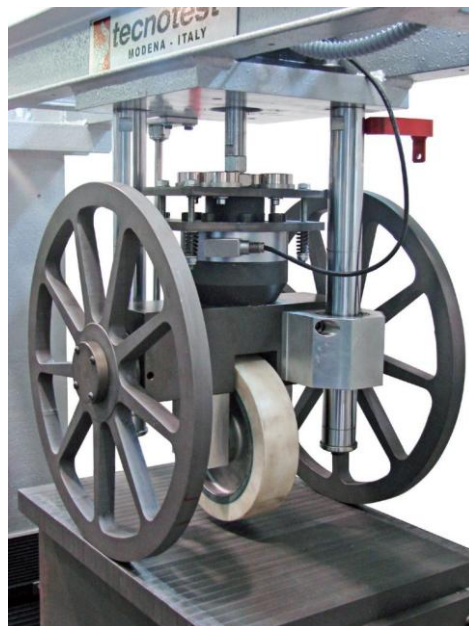


Figura 19 Effettuazione di compattazione con roller compactor

Il particolare profilo delle sliding plates, nonché la diversa disposizione verticale dei due dischi coassiali di compattazione e della ruota usata per l'ormaiamento, fanno sì che con le sliding plates presenti nella fustella la ruota di ormaiamento rimanga sospesa e dunque non in grado di trasmettere carichi, mentre rimuovendo tali lamelle i dischi coassiali possano scendere oltre il bordo dello stampo così da permettere alla ruota centrale di funzionare correttamente.

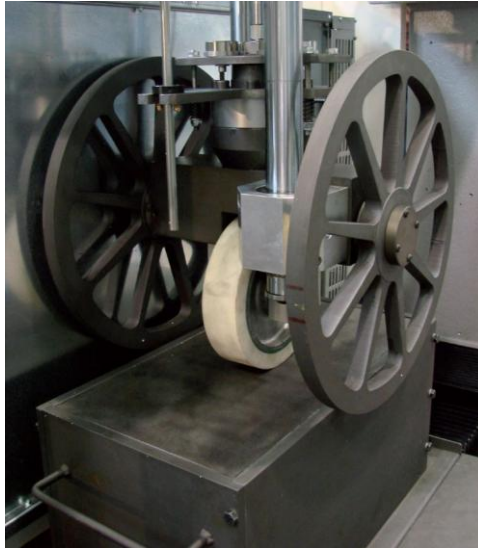


Figura 20 Effettuazione del Wheel Tracking Test

Il sistema dei due dischi coassiali e della ruota di ormaiamento è bloccato nella macchina e libero di muoversi solo verticalmente, al contrario il piano di supporto dello stampo è in grado di traslare orizzontalmente così da permettere la compattazione di tutto il materiale presente.

Per quanto concerne le caratteristiche meccaniche, la macchina è composta da un asse orizzontale mosso da un motore accoppiato ad un gruppo vitechiocciola a ricircolo di sfere e da un asse verticale mosso da un martinetto alimentato da una servo-valvola pneumatica. Si hanno tre sensori installati: un encoder per la posizione dell'asse orizzontale, un trasduttore magnetostriativo per la posizione dell'asse verticale ed una cella di carico per valutare la forza applicata. La camera di prova è provvista di sportelli dotati di sensori di apertura ed è racchiusa in una cella climatica ventilata con termoregolazione automatica fino a 60°C, necessaria per la prova di ormaiamento. Completano la macchina un computer con schermo di tipo touch-screen attraverso il quale è possibile utilizzare il software di controllo delle impostazioni di prova, nonché tenere sotto controllo continuo tutti i parametri salienti del compattatore a piastra (Figura 21).



Figura 21 Interfaccia grafica del software

3.4.4.1 Procedura di compattazione

Precedentemente alla preparazione del materiale all'interno dello stampo di compattazione, occorre riscaldare lo stampo stesso, le sliding plates ed il conglomerato bituminoso per qualche ora fino al raggiungimento di un'ideale temperatura di compattazione. Il primo può essere portato alla temperatura ottimale utilizzando le piastre di riscaldamento posizionate nel carrello ad altezza variabile ed il coperchio coibentato, mentre sliding plates e materiale vengono inseriti in un forno apposito. Il controllo della temperatura della fustella è effettuabile tramite il foro presente nel coperchio coibentato, nel quale è inseribile una sonda termica (Figura 22).



Figura 22 Riscaldamento dello stampo e controllo temperatura

Lo stampo risulta assemblato tramite 12 viti a testa esagonale e 2 viti a brugola, al suo interno è posizionata la base mobile di supporto su cui verrà poi steso il materiale, nonché i distanziali tra il suddetto piano ed il fondo della struttura. Tali spessori portano la piastra di base ad un'altezza tale da permettere l'immersione delle sliding plates nello stampo per almeno 2 cm ad inizio compattazione e di massimo 8 cm a fine procedura, senza che raggiungano la posizione di fine corsa verticale durante la fase di prova. Viene fornito in dotazione un set di distanziali con assemblaggio a croce di diverse altezze (Figura 23).



Figura 23 Distanziali con assemblaggio a croce

Raggiunta la temperatura ottimale, si rimuove il coperchio coibentato, si unge di grasso tutta la superficie interna dello stampo e si pone un foglio di carta da forno sulla base mobile, così da facilitare il distacco della lastra compattata dal piano di appoggio dopo il suo raffreddamento.

Si inserisce dunque il materiale preriscaldato, fino a raggiungere la quantità stabilita, avendo massima cura di disporre lo stesso nel modo più uniforme possibile lungo tutto lo spazio disponibile (Figura 24).



Figura 24 Stesa del materiale all'interno dello stampo

Si pongono dunque le due aste di ausilio lungo i due lati longitudinali dello stampo e, facendo uso di opportuni DPI (guanti termici date le alte temperature presenti), si inseriscono le sliding plates, posizionando le due lamelle più sottili agli estremi, a diretto contatto con le pareti laterali, onde evitare la risalita di materiale. Si rimuovono infine le due aste ausiliarie e si lasciano scivolare naturalmente le sliding plates all'interno dello stampo: la procedura di preparazione del materiale è conclusa (Figura 25).



Figura 25 Inserimento delle Sliding Plates nello stampo

A questo punto si sblocca il carrello (Figura 26) e lo si posiziona a diretto contatto con la parte anteriore della macchina, in corrispondenza degli sportelli di apertura. Utilizzando le due leve di movimentazione fornite di serie si fa scorrere lo stampo sulle apposite guide e lo si inserisce nella tavola mobile dentro la camera di compattazione.



Figura 26 Carrello

Fissata quindi la struttura alla tavola mobile tramite le quattro viti a testa esagonale fornite in dotazione, è possibile chiudere la camera ed impostare il software del compattatore

Dal pannello di controllo, dopo aver disattivato gli allarmi scattati in seguito all'apertura del vano di compattazione durante l'inserimento dello stampo, è possibile impostare le caratteristiche della prova da effettuarsi. Si inseriscono dunque i dati anagrafici del provino, i parametri di prova quali carico iniziale e finale, incremento di carico e/o deformazione per ciclo, numero massimo di cicli e spessore finale della piastra desiderato (Figura 27).

Figura 27 Interfaccia dell'archivio

A questo punto è possibile dare il via alla prova, la quale terminerà con l'arresto del piano mobile ed il sollevamento dei rulli di compattazione. Svitando le quattro viti di unione tra tavola mobile e fustella ed utilizzando le due leve di movimentazione è quindi possibile estrarre lo stampo e riposizionarlo nel carrello apposito. Si procede infine alla pulizia tramite apposito solvente delle sliding plates, quindi si estrae il materiale compattato con la piastra di base mobile, nonché si puliscono tutte le rimanenti parti.

Attraverso l'uscita USB presente nel pannello di controllo è possibile ricavare i dati di output della prova in formato XML, i quali possono quindi essere utilizzati nei diversi applicativi presenti in commercio di trattamento dati. A questo punto è possibile spegnere, in successione, il software di controllo della macchina, il computer, il compattatore stesso e quindi il compressore ed il deumidificatore. Dopo almeno 24 ore dalla prova, il materiale può ritenersi sufficientemente raffreddato ed è quindi possibile, utilizzando piccoli scalpelli, rimuovere il conglomerato compattato dalla piastra di base ed eliminare i residui di carta da forno dal provino realizzato.

Dall'analisi dei risultati ottenuti su un alto numero di prove è stato individuato un procedimento standardizzato per la realizzazione di provini in grado di ottenere

caratteristiche sufficientemente omogenee e precise, coerenti con gran parte delle richieste della Normativa UNI EN 12697 – 33.

Grazie al lavoro di tesi di Andrea Benedetti ed Andrea Copponi, i quali hanno svolto uno studio proprio su questo macchinario di prova e sul confezionamento rapido, semplice e preciso di piastre di conglomerato bituminoso aventi determinate caratteristiche volumetriche, per la compattazione si è fatto ricorso ad una procedura di compattazione “a cicli aperti e massa corretta”, con la quale è stato possibile ottenere delle lastre in conglomerato bituminoso aventi tutte le caratteristiche desiderate: spessore di 50 mm (± 2 mm), indice dei vuoti 4% ($\pm 0,5\%$). Il numero di cicli necessari alla macchina per ottenere i risultati finali è stato decisamente discontinuo.

Seguendo questo procedimento si va prima a realizzare una o più piastre “di calibrazione” in conglomerato bituminoso con un numero di cicli non fissato ma vincolato esclusivamente al raggiungimento dell’altezza desiderata.

La massa da inserire in questa prima fase è pari a:

$$M = L * l * e * TMD * \left(\frac{100 - \%v_{\text{obiettivo}}}{100} \right)$$

Dove:

- L, l = dimensioni finali della piastra, rispettivamente pari a 500 mm e 260 mm;
- e = altezza finale desiderata;
- TMD = massa volumica massima (theoretical maximum density);
- $\%v_{\text{obiettivo}}$ = indice dei vuoti desiderato, pari al 4%.

Prodotta tale piastra, se ne va a misurare l'indice dei vuoti e se questo risulterà non conforme al vincolo imposto del $4 \pm 0,5\%$, occorre realizzare una nuova prova, questa volta inserendo nello stampo una massa pari a:

$$M_{corretta} = M + M_{correzione}$$

$$= L * l * e * TMD * \left(\frac{100 - v\%_{obiettivo}}{100} + \frac{\%v_{reale} - \%v_{obiettivo}}{100} \right)$$

A questo punto si va nuovamente ad effettuare una verifica della massa volumica e se l'indice dei vuoti ottenuto non si avvicina sufficientemente al valore desiderato, si ripete il ciclo di correzione della massa – produzione piastra compattata – verifica indice dei vuoti fino al raggiungimento dell'obiettivo.

Per quanto riguarda la modalità di compattazione si prevede, preliminarmente alla realizzazione di ogni prova, una prima fase di precompattazione allo scopo di livellare il materiale presente nello stampo, attraverso la realizzazione di 10 cicli di carico in controllo di deformazione con abbassamento di 0,5 mm/ciclo. In questo modo si ha una parziale redistribuzione del materiale all'interno dello stampo, nonché un livellamento delle sliding plates, le quali altrimenti potrebbero in alcuni casi presentare dei dislivelli reciproci eccessivi.

In analogia con quanto previsto dalla compattazione con pressa giratoria, è stato possibile analizzare le caratteristiche delle curve di compattazione ottenute tramite l'uso del compattatore a piastra. Utilizzando i dati di output forniti dalla macchina, in particolare l'abbassamento medio delle *sliding plates* ad ogni ciclo di carico, è stato studiato l'andamento del grado di compattazione C_{ux} all'aumentare dei cicli di carico, attraverso la seguente relazione:

$$C_{ux}[\%] = \frac{\frac{Massaprovino}{Volumeprovino}}{TMD} * C_x * 100$$

Dove:

- Massa provino = massa inserita all'interno dello stampo per la compattazione;
- Volume provino = volume dato dalle dimensioni L ed I del provino (note e rispettivamente pari a 500 mm e 260 mm) nonché dall'altezza h, variabile ad ogni ciclo di carico e ricavabile dai dati di *output* prodotti dalla macchina a fine prova.
- TMD = massa volumica massima propria del material, ottenuta seguendo la Norma UNI EN 12697-5;
- C_x = coefficiente che permette di tenere conto anche del valore di massa volumica ottenuta con il metodo a superficie secca, pari a:

$$C_x = \frac{Mv,sss}{Mv,geometrica}$$

Dove:

- Mv,sss = massa volumica del provino individuata tramite metodo a superficie secca;
- $Mv,geometrica$ = massa volumica ricavata geometricamente, impostando L = 500 mm, I = 260 mm e h pari all'altezza media del campione rilevata dalla macchina nell'ultimo ciclo di carico.

Mettendo in correlazione la percentuale di compattazione con Log_{10} (numero di cicli) si ottengono degli andamenti della percentuale di compattazione in funzione dei cicli

di carico. Si può a questo punto definire l'equazione di una retta d'interpolazione avente parametri $C_{1,rc}$ e k_{rc} , del tipo:

$$y = k_{rc} * x * C_{1,rc}$$

3.4.5 Wheel Tracking Test

Questo test viene effettuato per determinare la tendenza a deformarsi sotto carico dei conglomerati bituminosi ed è applicabile a miscele aventi dimensioni degli aggregati ≤ 33 mm e a campioni confezionati in laboratorio o prelevati in situ.

La deformabilità dei materiali viene testata attraverso il passaggio ripetuto di una ruota caricata a temperatura costante. La procedura può essere eseguita su dispositivi aventi tre differenti dimensioni: large, extra-large e small. Nei primi due casi i campioni sono condizionati in aria durante il test, per quanto riguarda i dispositivi piccoli, invece, i provini possono essere condizionati sia in aria che in acqua e, a differenza degli altri dispositivi, la procedura di condizionamento viene effettuata prima di iniziare la prova. (EN 1267-22:2003+A1 Bituminous Mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking).

In questo caso specifico si è utilizzato un dispositivo di taglia piccola, l'apparato di wheel-tracking consiste, pertanto, in una ruota caricata che esercita pressioni su un campione inserito nella fustella e saldamente assicurato ad una superficie piana, sottostante la fustella, attraverso quattro viti a testa esagonale; un dispositivo apposito, inoltre, controlla il valore in corrispondenza del quale si inizi a sviluppare un solco sulla superficie del campione testato. Il gioco verticale nel meccanismo della ruota caricata non deve superare i 25 mm.

Il carico della ruota in condizioni standard deve essere di

$$\left[\left(700 * \frac{w}{50} \right) \pm 10 \right] N$$

Gli spessori nominali delle lastre per i dispositivi di piccola taglia saranno quelli effettivi dello strato steso sulla strada; per calcolare, però, lo spessore della piastra nel dettaglio si misurano le quattro altezze nel punto centrale di ciascun lato, queste misure non devono differire dallo spessore nominale per più di 2,5 mm (per uno spessore nominale minore o uguale a 50 mm) e la loro media rappresenta lo spessore del campione. Per quanto riguarda, invece, la regolarità della superficie, essa risulta accettabile se presenta una distorsione inferiore a 2 mm.

Il macchinario utilizzato è, come già specificato, lo stesso adoperato per il confezionamento delle piastre.

Per prima cosa si inseriscono alla base della fustella, di cui si sono precedentemente assemblate tre pareti, i quattro distanziali cilindrici che possono essere avvitati e svitati per far sì che la piastra su cui si vuole effettuare la prova si trovi perfettamente a pari con il livello dei bordi della fustella. Tali differenziali si distinguono da quelli a croce, utilizzati per la precedente compattazione, in quanto permettono di regolare con precisione al millimetro l'altezza di ciascun appoggio.

Si procede in seguito a posizionare sui distanziali la base mobile, e su di essa la piastra in conglomerato bituminoso, confezionata con la metodologia spiegata nel precedente paragrafo, e a regolare l'altezza di ciascun appoggio stringendo o allentando le viti presenti su di esso con una chiave inglese. Una volta terminata quest'operazione è possibile finire di montare la fustella, posizionando l'ultima parete ed avvitando le 12 viti a testa esagonale e le 2 a brugola, ed effettuare sulla

piastra, con un trapano, due fori diametralmente opposti per l'inserimento delle sonde che permetteranno di rilevare la temperatura di prova.

Si inserisce, dunque, la fustella all'interno della macchina, si collocano le sonde nei fori predisposti e si avvia il software per la prova.

Occorre adesso impostare i parametri per il condizionamento della piastra; le prove sono, difatti, state eseguite sia a 40°C (come previsto dalla normativa vigente) che a 60°C (per studiare il comportamento dei materiali in condizioni più sfavorevoli). Attraverso gli apparecchi di ventilazione presenti all'interno del macchinario, la camera viene riscaldata alla T predisposta e le sonde rilevano la temperatura della piastra all'interno dei fori di sondaggio.

La normativa prevede che, per provini aventi uno spessore minore o uguale di 60 mm, una volta raggiunta la temperatura di prova $\pm 1^\circ\text{C}$, il provino si lasci condizionare per un periodo di tempo di minimo 4 e massimo 24 ore.

Il processo di condizionamento può avvenire sia in aria che in acqua, in questo caso le piastre sono state sottoposte a condizionamento in aria.

Dopo il tempo di condizionamento previsto alla temperatura impostata si fa partire la procedura di prova [Figura 28].



Figura 28 Wheel Tracking Test: prova in atto

Occorre fare una lettura dell'abbassamento della ruota inizialmente e poi almeno 6-7 volte nell'arco della prima ora del test ed in seguito almeno una volta ogni 500 cicli di carico. La posizione verticale della ruota costituisce il valore medio relativo al profilo del campione su di una lunghezza di ± 50 mm rispetto al centro dell'area di carico nel mezzo della traversa, misurata in almeno 25 punti approssimativamente equidistanti. La posizione verticale della ruota dovrebbe essere rilevata senza fermarla. Generalmente per questo tipo di procedura vengono effettuati 10.000 cicli di carico, al termine dei quali la ruota si solleva dalla piastra ed il test si riterrà concluso. Qualora, invece, l'ormaia raggiunga una profondità di 20 mm il test viene bloccato prima e, in tale caso, si registra il numero di cicli che hanno determinato tale profondità del solco.

Uno dei parametri fondamentali rilevabili da questa prova è il rateo di crescita della profondità di impronta della ruota (WTS_{air} - Wheel-tracking slope in air), determinata come segue:

$$WTS_{air} = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5}$$

Dove:

- WTS_{air} è il wheel-tracking slope, in mm per 10^3 cicli di carico;
- d_{5000} , d_{10000} rappresentano le profondità dell'ormaia rispettivamente dopo 5000 e 10000 cicli di carico (in mm).

Altri risultati importanti che si possono evincere da questo tipo di test sono la profondità proporzionale media dell'ormaia PRD_{air} (mean proportional rut depth, in air) e la profondità media dell'ormaia RD_{air} (mean rut depth, in air).

4 Analisi e discussione dei risultati

In questo capitolo si esaminano i risultati ottenuti dalle prove volumetriche, effettuate sia con la pressa giratoria che con il roller compactor con sliding plates, meccaniche e dal wheel tracking test.

4.1 Caratteristiche volumetriche

4.1.1 Caratteristiche volumetriche dei provini confezionati con la pressa giratoria

Come precedentemente specificato, sono stati compattati con pressa giratoria per ciascun materiale una serie di campioni a differenti temperature (3 per ogni materiale per ogni fascia di temperatura, per un totale di 30 campioni).

| | T | MV | %vuoti | k | C ₁ | N [^] CICLI |
|---------------------------------------|-----|---------|--------|------|----------------|----------------------|
| USURA TRADIZIONALE HMA | 160 | 2494,98 | 2,06 | 8,65 | 82,26 | 67 |
| | 140 | 2504,60 | 1,68 | 8,78 | 81,63 | 82 |
| | 120 | 2500,93 | 1,83 | 8,69 | 81,68 | 81 |
| | 100 | 2507,71 | 1,56 | 8,55 | 81,28 | 104 |
| | 80 | 2503,74 | 1,72 | 8,25 | 80,10 | 183 |
| WARM MIX ASPHALT WMA | 160 | 2495,52 | 1,15 | 8,68 | 83,82 | 54 |
| | 140 | 2484,31 | 1,59 | 8,67 | 85,09 | 34 |
| | 120 | 2481,41 | 1,70 | 8,85 | 85,37 | 29 |
| | 100 | 2486,39 | 1,51 | 8,96 | 83,07 | 54 |
| | 80 | 2477,60 | 1,86 | 9,22 | 82,17 | 58 |

Tabella 4 Caratteristiche volumetriche delle miscele

Come si può notare dalla Tabella 4 le masse volumiche apparenti hanno valori simili al variare della temperatura di compattazione sia per quanto riguarda l'HMA che il WMA, la stessa cosa si può dire della percentuale di vuoti. Questi risultati sono dovuti al metodo di compattazione utilizzato: si è scelto, difatti, di impostare il macchinario in maniera che ciascun provino avesse un'altezza imposta di 75 mm e si era calcolata la massa da inserire all'interno della fustella per ottenere una percentuale dei vuoti di circa il 4%. Dal momento che tutti i provini hanno la stessa altezza, le percentuali dei vuoti al loro interno non dovranno discostarsi molto l'una dall'altra. Tuttavia il WMA presenta dei valori di indici dei vuoti lievemente più bassi, questo comportamento è, probabilmente, dovuto alla presenza dell'additivo che serve a fluidificare la miscela aumentandone la facilità di compattazione.

Analizzando il numero di cicli di compattazione, si nota che nell'HMA tale grandezza aumenta notevolmente al diminuire della temperatura; passando da 160°C a 80°C è, difatti, quasi triplicata (Grafico 3).

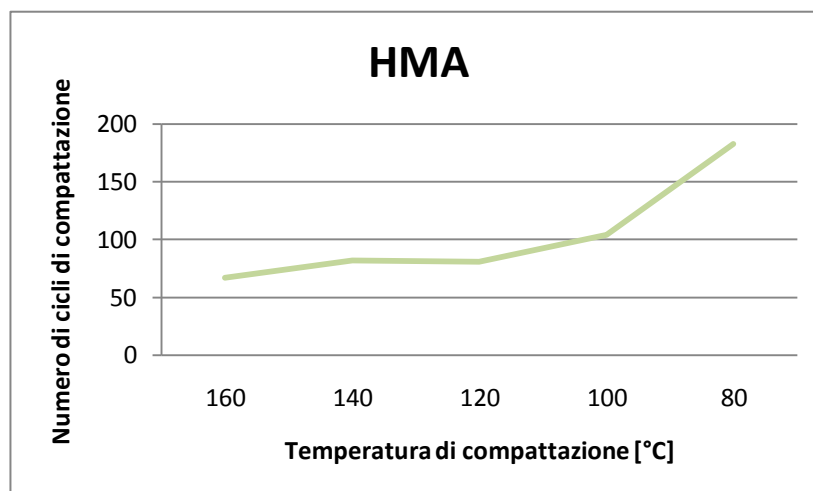


Grafico 3 Numero di cicli di compattazione in funzione della temperatura nell'HMA

Il WMA, invece, ha un numero di cicli sempre bassissimo (pressoché costante al variare della temperatura di compattazione) in relazione a quello della stessa miscela senza aggiunta di additivo, dimostrando quindi l'efficacia di tale agente. La compattazione con il minor numero di cicli si ha, però, in corrispondenza di 120°C, il

che è comprensibile dal momento che, come specificato in precedenza, dal momento che questa miscela sarà messa in opera a tale temperatura è proprio in questa fascia che essa deve garantire le migliori prestazioni e deve compattarsi più facilmente per garantire la medesima efficacia del passaggio del rullo compattatore (Grafici 4 e 5).

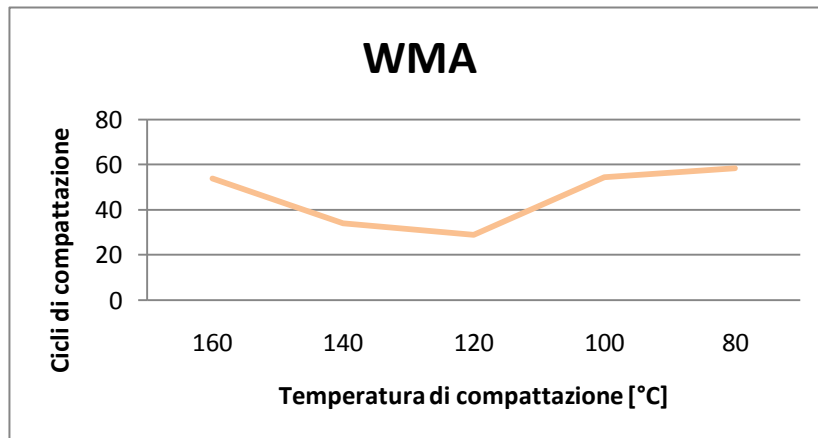


Grafico 4 Numero di cicli di compattazione in funzione della temperatura di compattazione nel WMA

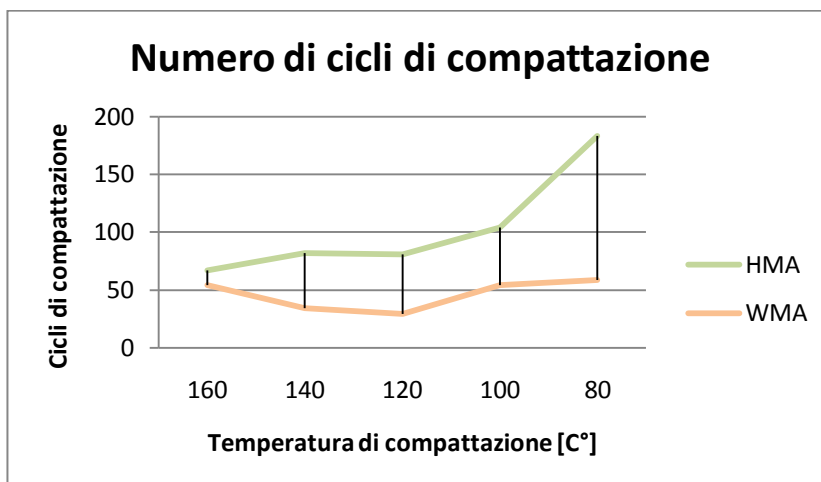


Grafico 5 Numero di cicli di compattazione di HMA e WMA a confronto

Un discorso a parte va, invece, fatto per la lavorabilità k e per l'auto-addensamento C_1 .

Per quanto riguarda la lavorabilità, come si può osservare nel Grafico 6, nelle miscele bituminose tradizionali (HMA) decresce con il diminuire della temperatura, con l'unica eccezione dei provini confezionati a 140°C che addirittura hanno una

lavorabilità maggiore anche rispetto al conglomerato bituminoso tiepido (WMA) alla medesima temperatura di compattazione (Grafico 7).

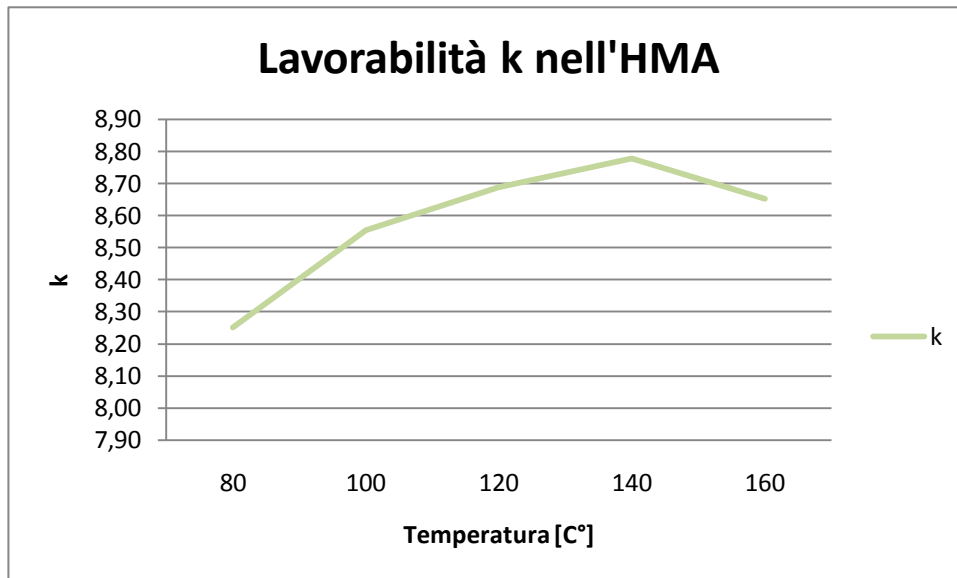


Grafico 6 Lavorabilità k nell'HMA

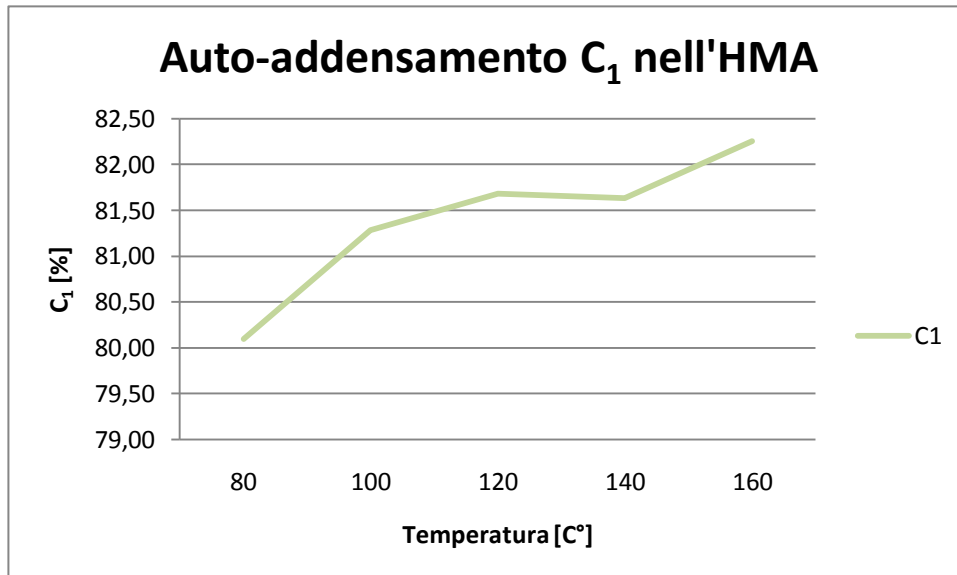


Grafico 7 Auto-addensamento C1 nell'HMA

Anche i valori di auto-addensamento rilevati denotano una forte dipendenza dalla temperatura di compattazione, come si può notare dal Grafico 7.

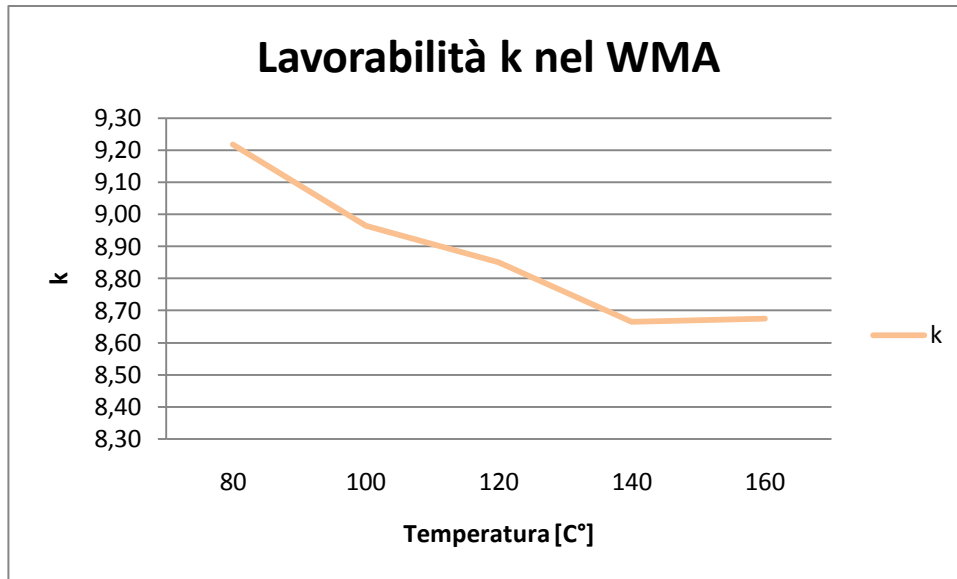


Grafico 8 Lavorabilità k nel WMA

I campioni prodotti con conglomerato tiepido, invece, al contrario di quelli di HMA, presentano una lavorabilità inversamente proporzionale rispetto alla temperatura di compattazione (Grafico 8). Questo perché l'additivo utilizzato ne facilita la compattazione anche a temperature inferiori, i valori di k, quindi, non risentono del decremento di temperatura e del conseguente aumento di viscosità, cui invece sono soggette le miscele bituminose standard.

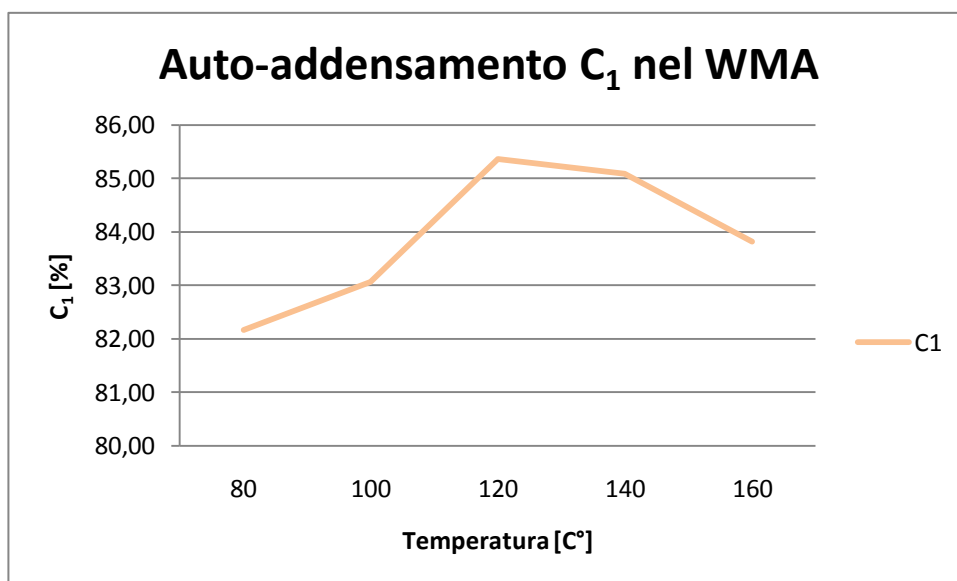


Grafico 9 Auto-addensamento C1 nel WMA

Lo stesso fenomeno si presenta relativamente ai valori di auto-addensamento, che risultano indipendenti dalla temperatura (Grafico 9): i valori massimi di C_1 sono rilevati a 120°C e 140°C. Questo fenomeno è probabilmente imputabile al fatto che tale materiale sia stato studiato e progettato per essere messo in opera a 120°C; è, quindi in questa fascia che fornisce le prestazioni migliori e il materiale si addensa maggiormente per garantire una migliore compattazione.

Di seguito sono riportati dei grafici riassuntivi (Grafici 10 e 11) che mettono a confronto i dati emersi dalla compattazione dei provini delle due miscele oggetto di indagine.

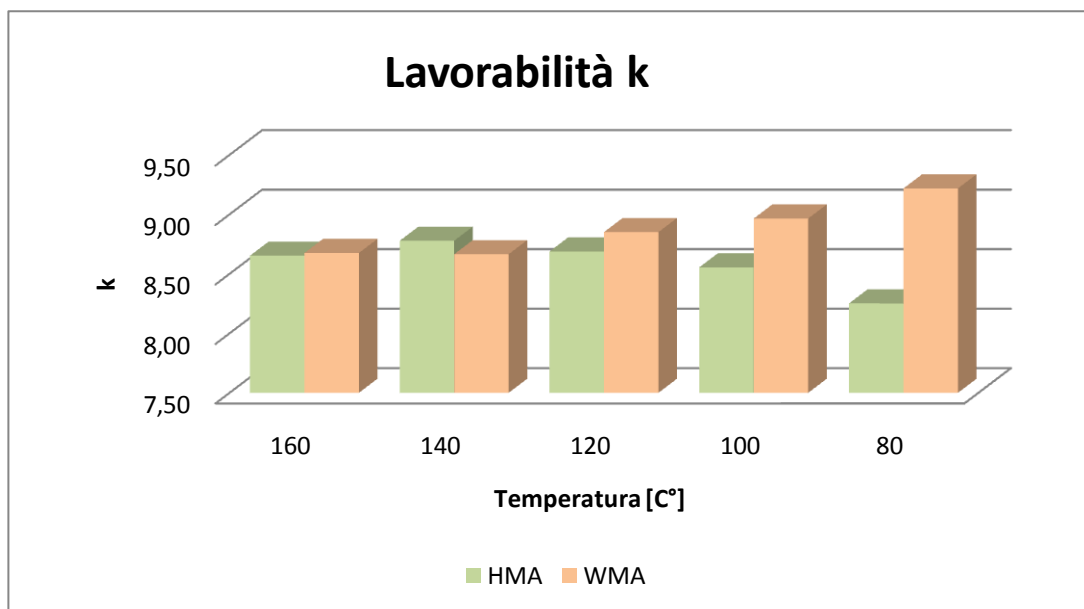


Grafico 10 Confronto della lavorabilità k alle varie temperature

La lavorabilità k mostra valori abbastanza simili per le compattazioni effettuate con materiale a 120°C e 160°C; le differenze sono, invece, notevoli a 100°C e a 80°C.

Nei provini costipati a temperature più basse la lavorabilità presenta valori molto diversi in quanto le miscele di WMA non risentono della viscosità del bitume alle basse temperature in quanto l'additivo conferisce un'ottima fluidità alla miscela indipendentemente dalla temperatura di compattazione.

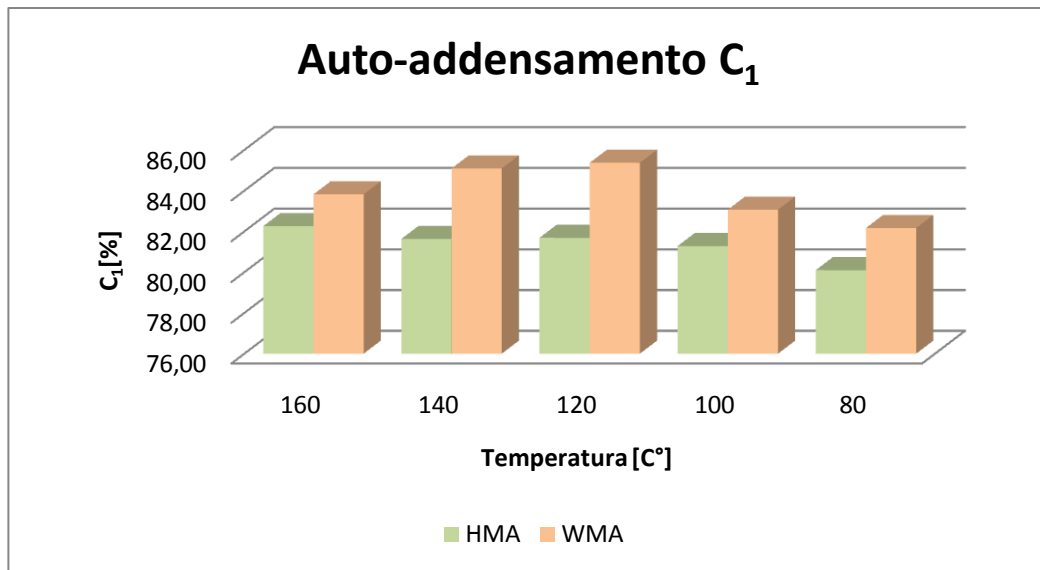


Grafico 11 Confronto dell'auto-addensamento C₁ alle varie temperature

Per quanto riguarda, invece, i valori di C₁, il WMA ha valori più elevati dell'HMA per tutte le fasce di temperatura. Questo perché, come specificato in precedenza, l'additivo favorisce l'auto-addensamento della miscela già a partire dalle basse temperature.

Nella Tabella 5 sono stati analizzati i valori di lavorabilità ed auto-addensamento in funzione della variazione del numero dei cicli di compattazione considerati. Per ciascun materiale e ad ogni temperatura di compattazione sono difatti riportati k e C₁ dopo 10, 15 e 20 cicli (quindi i valori iniziali) e a 10, 15 e 20 cicli dalla fine del processo di compattazione (la n rappresenta il numero di cicli necessari al raggiungimento dell'altezza di 75 mm, differente per ciascuna categoria di campioni). Sono, infine, stati evidenziati i numeri di cicli necessari al raggiungimento del 4% di vuoti (che ci si era posti come obiettivo nel calcolo relativo al quantitativo di materiale da inserire all'interno della fustella).

| | HOT MIX ASPHALT | | | | | WARM MIX ASPHALT | | | | |
|------------|-----------------|------|------|------|------|------------------|------|------|------|------|
| | 160 | 140 | 120 | 100 | 80 | 160 | 140 | 120 | 100 | 80 |
| k_{n-10} | 8,00 | 8,11 | 7,95 | 7,38 | 5,70 | 8,48 | 8,55 | 8,89 | 7,68 | 7,04 |
| k_{n-15} | 8,00 | 7,79 | 7,76 | 7,27 | 6,00 | 8,45 | 8,58 | 8,91 | 7,79 | 7,13 |

| | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k_{n-20} | 8,02 | 7,84 | 7,72 | 7,22 | 6,15 | 8,50 | 8,74 | 9,05 | 7,93 | 7,38 |
| k_{10} | 7,94 | 8,16 | 8,14 | 8,14 | 8,59 | 7,84 | 8,08 | 8,36 | 8,78 | 8,87 |
| k_{15} | 8,25 | 8,46 | 8,39 | 8,44 | 9,02 | 8,17 | 8,36 | 8,64 | 9,01 | 9,19 |
| k_{20} | 8,42 | 8,63 | 8,55 | 8,60 | 9,21 | 8,35 | 8,52 | 8,78 | 9,08 | 9,34 |
| $k > 4\%$ | 8,66 | 8,86 | 8,75 | 8,79 | 9,09 | 8,46 | 8,46 | 8,64 | 9,12 | 9,43 |
| $k < 4\%$ | 8,10 | 8,04 | 8,00 | 7,55 | 7,61 | 8,61 | 8,61 | 8,85 | 8,18 | 7,68 |
| K | 8,65 | 8,78 | 8,69 | 8,56 | 8,25 | 8,62 | 8,67 | 8,85 | 8,96 | 9,22 |
| CICLI 4% | 45 | 43 | 44 | 51 | 83 | 26 | 19 | 16 | 28 | 31 |
| CICLI TOT | 67 | 82 | 81 | 104 | 183 | 54 | 34 | 29 | 54 | 58 |
| C_{1n-10} | 82,71 | 82,88 | 82,99 | 83,55 | 85,37 | 84,19 | 85,31 | 85,37 | 85,19 | 85,71 |
| C_{1n-15} | 82,87 | 83,16 | 83,35 | 83,77 | 84,71 | 84,24 | 85,26 | 85,36 | 85,00 | 85,58 |
| C_{1n-20} | 82,89 | 83,11 | 83,43 | 83,86 | 84,37 | 84,15 | 85,03 | 85,17 | 84,77 | 85,15 |
| C_{110} | 82,01 | 81,94 | 81,97 | 81,47 | 79,28 | 84,31 | 85,41 | 85,62 | 83,16 | 82,27 |
| C_{115} | 81,86 | 81,81 | 81,85 | 81,33 | 79,00 | 84,16 | 85,28 | 85,50 | 83,04 | 82,12 |
| C_{120} | 81,75 | 81,72 | 81,76 | 81,24 | 78,87 | 84,06 | 85,19 | 85,41 | 83,00 | 82,03 |
| $C_{1 > 4\%}$ | 81,57 | 81,55 | 81,61 | 81,11 | 79,01 | 83,98 | 85,23 | 85,49 | 82,97 | 81,98 |
| $C_{1 < 4\%}$ | 82,75 | 82,92 | 82,90 | 83,23 | 81,76 | 83,98 | 85,21 | 85,43 | 84,37 | 84,64 |

Tabella 5 variazioni di k e C_1 in funzione del numero di cicli di compattazione

Dalla tabella sovrastante si evince che, per quanto riguarda la lavorabilità di ciascuna miscela, k aumenta durante i primi 20 cicli (al 20-mo ciclo generalmente raggiunge il valore più alto) e poi decresce sia per l'HMA che per il WMA a 100°C e a 80°C. Questo fenomeno potrebbe essere dovuto sia ad un parziale raffreddamento della miscela (e quindi ad un aumento di viscosità per quanto riguarda l'HMA) sia al fatto che con il diminuire dei vuoti al suo interno il conglomerato diventa più difficile da compattare e risulta, quindi, meno lavorabile. Per quanto riguarda, invece, i restanti provini di WMA, l'additivo fluidifica il mix, che reagisce meglio alle alte temperature, quindi la lavorabilità è indipendente dal numero di cicli e dall'indice dei vuoti e tende ad

aumentare anche una volta che il contenuto di vuoti all'interno del campione risulta minore del 4%.

L'auto-addensamento C_1 si comporta in maniera opposta rispetto a k : tende infatti ad aumentare verso la fine del processo di compattazione sia per l'HMA che per il WMA a 80°C e a 100°C, al contrario diminuisce per il WMA a 120°C, 140°C e 160°C.

Il numero di cicli di compattazione per ottenere il 4% dei vuoti conferma la tendenza rilevata dal numero di cicli totale, generalmente sono necessari circa la metà dei cicli necessari rispetto a quelli per la compattazione dei campioni con altezza di 75 mm (tranne per l'HMA a 160°C che richiede qualche ciclo in più) (Grafico 12).

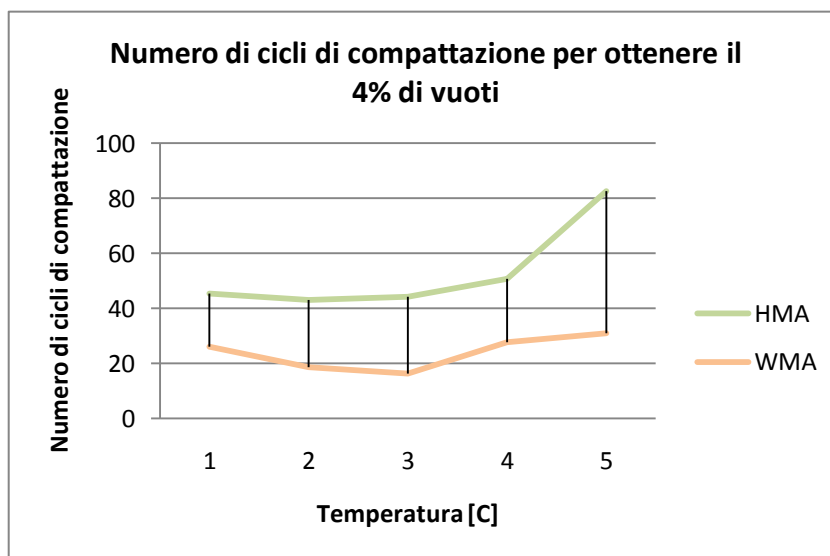


Grafico 12 Numero di cicli di compattazione di HMA e WMA per ottenere il 4% di vuoti a confronto

Vengono, in ultimo, considerate le caratteristiche volumetriche dei provini confezionati con la pressa girettoria alle temperature di messa in opera – registrate durante la stesa dei materiali in occasione del campo prove - per entrambe le miscele, in maniera tale da avere un'idea di quelle che saranno le effettive prestazioni di entrambi i materiali durante le fasi di messa in opera.

Si sono considerate, quindi, una temperatura di 160°C per l'usura tradizionale HMA ed una di 120°C per il WMA.

Vengono di seguito riportate le curve di compattazione di entrambi i materiali alle temperature date (Grafici 13 e 14).

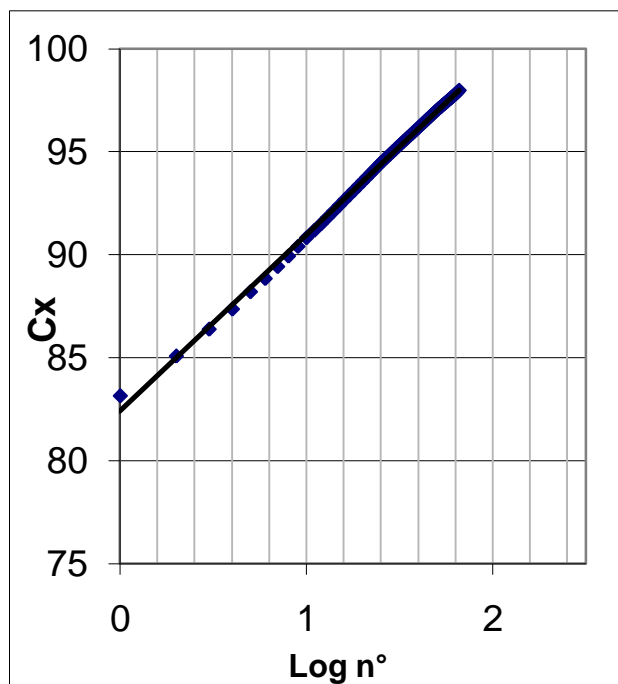


Grafico 13 Curva di compattazione dell'HMA a 160°C - Provino 1

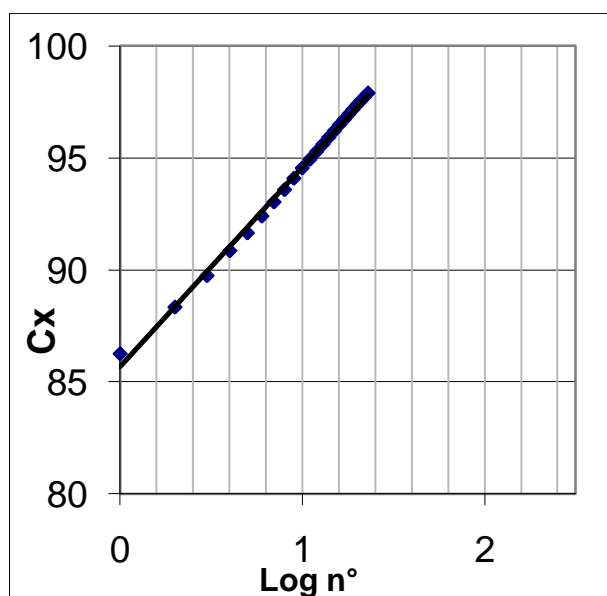


Grafico 14 Curva di compattazione del WMA a 120°C - Provino 1

A livello grafico si nota immediatamente che i valori di C_x nell'usura tiepida sono maggiori rispetto a quelli dell'usura tradizionale. Anche all'effettiva temperatura di messa in opera (120°C), quindi, il WMA risulta più lavorabile (Tabella 6 e Grafici 15, 16 e 17).

| | HMA 160°C | WMA 120°C |
|-----------|--------------|--------------|
| k | 8,65 | 8,85 |
| C_1 | 82,26 | 85,37 |
| NR. CICLI | 67 | 29 |

Tabella 6 Prestazioni dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

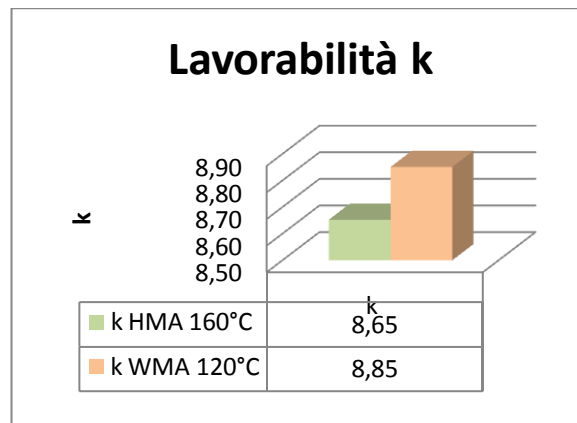


Grafico 15 Lavorabilità k dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

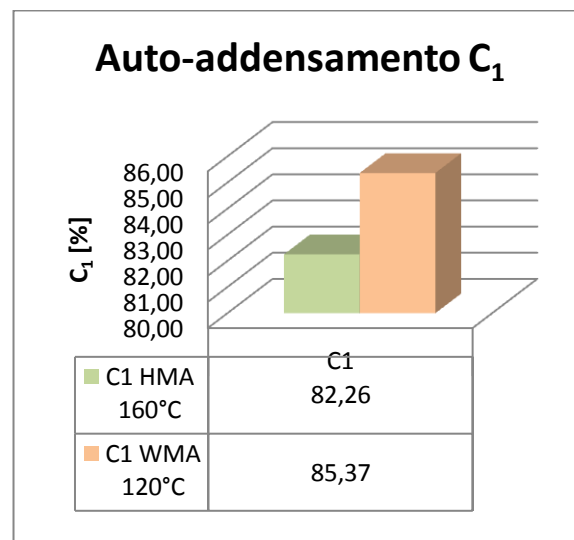


Grafico 16 Auto-addensamento C_1 dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

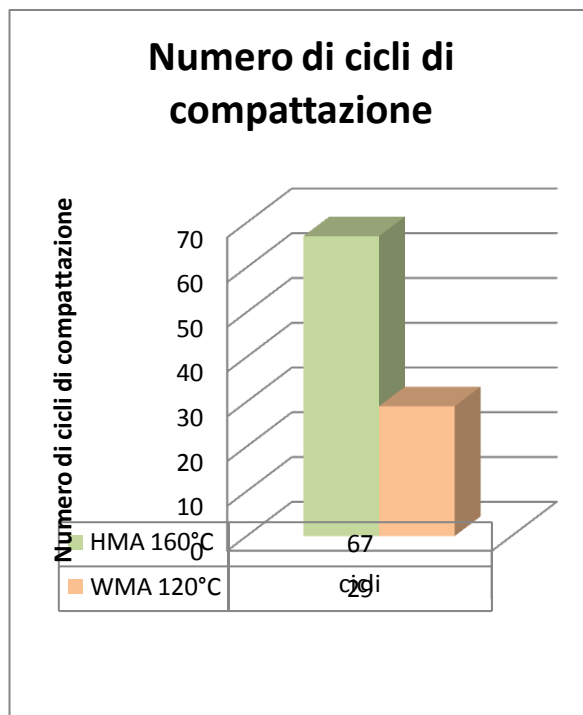


Grafico 17 Numero di cicli di compattazione dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

Il WMA nelle condizioni di posa in opera presenta caratteristiche nettamente migliori rispetto a quelle dell'HMA. Risulta, difatti, più facilmente lavorabile, necessita di un numero di cicli di compattazione inferiore e raggiunge livelli di auto-addensamento più elevati rispetto alla medesima miscela cui non è stato aggiunto l'additivo.

4.1.2 Caratteristiche volumetriche dei provini confezionati con roller compactor

Si riportano di seguito, dalla Tabella 7 alla Tabella 12, i risultati volumetrici medi in seguito alla compattazione di piastre con Roller Compactor. Si ricorda che sono state confezionate piastre di HMA e di WMA alle temperature di compattazione di 120°C e 160°C.

HMA 120°C

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------------|
| IDENTIFICATIVO CAMPIONE | HMA-20110117-120 |
| DATA CONFEZIONAMENTO | 17/01/2011 |
| ALTEZZA FINALE DESIDERATA [mm] | 50 |
| MASSA DA INSERIRE [g] | 16168 |
| NUMERO CICLI | 8 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{sss} | 4,25 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{geometr} | 5,84 |
| ALTEZZA MEDIA MISURATA CON CALIBRO [mm] | 51,84 |

Tabella 7 Dati identificativi e caratteristiche Prova HMA-20110117-120

HMA 120°C CON MASSA CORRETTA

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------------|
| IDENTIFICATIVO CAMPIONE | HMA-20110118-120 |
| DATA CONFEZIONAMENTO | 18/01/2011 |
| ALTEZZA FINALE DESIDERATA [mm] | 50 |
| MASSA DA INSERIRE [g] | 16168 |
| NUMERO CICLI | 7 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{sss} | 4,09 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{geometr} | 6,59 |
| ALTEZZA MEDIA MISURATA CON CALIBRO [mm] | 52,26 |

Tabella 8 Dati identificativi e caratteristiche Prova HMA-20110118-120

HMA 160°C

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------------|
| IDENTIFICATIVO CAMPIONE | HMA-20110117-160 |
| DATA CONFEZIONAMENTO | 17/01/2011 |
| ALTEZZA FINALE DESIDERATA [mm] | 50 |
| MASSA DA INSERIRE [g] | 16097 |
| NUMERO CICLI | 8 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{sss} | 3,73 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{geometr} | 5,68 |
| ALTEZZA MEDIA MISURATA CON CALIBRO [mm] | 51,50 |

Tabella 9 Dati identificativi e caratteristiche Prova HMA-20110117-160

HMA 160°C CON MASSA CORRETTA

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------------|
| IDENTIFICATIVO CAMPIONE | HMA-20110118-160 |
| DATA CONFEZIONAMENTO | 18/01/2011 |
| ALTEZZA FINALE DESIDERATA [mm] | 50 |
| MASSA DA INSERIRE [g] | 16097 |
| NUMERO CICLI | 7 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{sss} | 4,24 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{geometr} | 7,11 |
| ALTEZZA MEDIA MISURATA CON CALIBRO [mm] | 52,30 |

Tabella 10 Dati identificativi e caratteristiche Prova HMA-20110118-160

WMA 120°C

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------------|
| IDENTIFICATIVO CAMPIONE | WMA-20110117-120 |
| DATA CONFEZIONAMENTO | 17/01/2011 |
| ALTEZZA FINALE DESIDERATA [mm] | 50 |
| MASSA DA INSERIRE [g] | 15750 |
| NUMERO CICLI | 3 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{sss} | 4,71 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{geometr} | 7,17 |
| ALTEZZA MEDIA MISURATA CON CALIBRO [mm] | 51,69 |

Tabella 11 Dati identificativi e caratteristiche Prova WMA-20110117-120

WMA 160°C

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------------|
| IDENTIFICATIVO CAMPIONE | WMA-20110118-160 |
| DATA CONFEZIONAMENTO | 18/01/2011 |
| ALTEZZA FINALE DESIDERATA [mm] | 50 |
| MASSA DA INSERIRE [g] | 15750 |
| NUMERO CICLI | 3 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{sss} | 4,42 |
| INDICE DEI VUOTI OTTENUTO [%] MV_{geometr} | 7,08 |
| ALTEZZA MEDIA MISURATA CON CALIBRO [mm] | 51,64 |

Tabella 12 Dati identificativi e caratteristiche Prova WMA-20110118-160

Come si può osservare dalle precedenti tabelle, entrambi i materiali richiedono un numero di cicli di compattazione particolarmente basso per il raggiungimento del 4%

dei vuoti e dell'altezza desiderata. Si nota, ancora una volta, come il WMA necessiti un minor numero di cicli di compattazione per raggiungere le caratteristiche geometriche richieste.

I valori di k e C_1 rilevati dal roller compactor (Tabelle 13, 14, 15 e 16) risultano più alti rispetto a quelli forniti dalla pressa giratoria. Questa differenza potrebbe dipendere dalle differenti metodologie di compattazione, aventi entrambe i propri pregi ed i propri limiti.

| PROVA | CICLI | $C_{1,rc}$ | k_{rc} |
|------------------|-------|------------|----------|
| HMA-20110117-120 | 4 | 84,754 | 12,753 |
| HMA-20110118-120 | 7 | 85,902 | 12,304 |

Tabella 13 Parametri $C_{1,rc}$ e k_{rc} per HMA 120°C

| PROVA | CICLI | $C_{1,rc}$ | k_{rc} |
|------------------|-------|------------|----------|
| HMA-20110117-160 | 8 | 85,682 | 12,077 |
| HMA-20110118-160 | 7 | 86,153 | 11,852 |

Tabella 14 Parametri $C_{1,rc}$ e k_{rc} per HMA 160°C

| PROVA | CICLI | $C_{1,rc}$ | k_{rc} |
|------------------|-------|------------|----------|
| WMA-20110110-120 | 4 | 87,538 | 13,950 |
| WMA-20110117-120 | 3 | 87,987 | 15,842 |

Tabella 15 Parametri $C_{1,rc}$ e k_{rc} per WMA 120°C

| PROVA | CICLI | $C_{1,rc}$ | k_{rc} |
|------------------|-------|------------|----------|
| WMA-20110110-160 | 4 | 87,651 | 14,860 |
| WMA-20110117-160 | 3 | 88,415 | 15,430 |

Tabella 16 Parametri $C_{1,rc}$ e k_{rc} per WMA 160°C

La tendenza è, però, la medesima riscontrata nei provini confezionati con la giratoria: i parametri k e C_1 risultano più alti nelle piastre con il materiale cui è stato aggiunto l'additivo: tale sostanza, difatti, ha la peculiarità di garantire lavorabilità e auto-addensamento elevati anche a temperature di stesa basse; come si nota dai risultati riportati nelle Tabelle 13 e 14, difatti, k_{cr} e $C_{1,cr}$ nel WMA compattato a 120°C risultano maggiori rispetto agli stessi parametri ottenuti con il conglomerato bituminoso tradizionale, così come il numero di cicli risulta inferiore per le miscele additivate. L'additivo, difatti, fornisce maggiore fluidità al mastice bituminoso e ne modifica le proprietà reologiche alle basse temperature così da favorirne la compattazione anche a temperature inferiori.

Verrà qui di seguito effettuato il medesimo confronto fatto per i provini di HMA e WMA a 160°C e 120°C compattati con la pressa giratoria.

Alle temperature di messa in opera le caratteristiche volumetriche dei materiali saranno le seguenti (Tabella 17 e Grafici 18, 19 e 20).

| | HMA 160°C | WMA 120°C |
|-----------|-----------|-----------|
| k | 11,965 | 14,896 |
| C_1 | 85,918 | 87,763 |
| NR. CICLI | 8 | 4 |

Tabella 17 Prestazioni dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

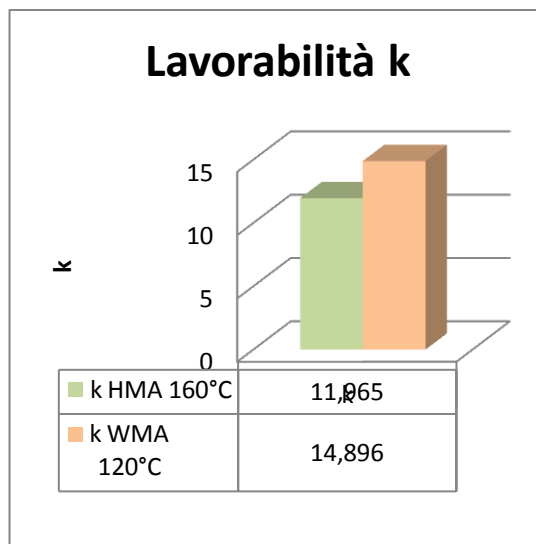


Grafico 18 Lavorabilità k dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

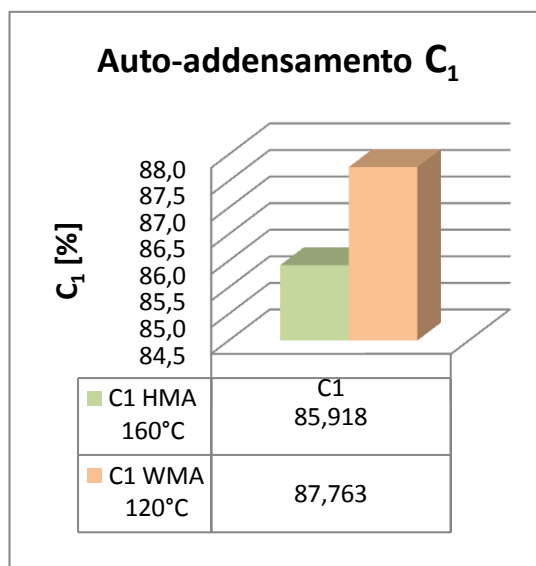


Grafico 19 Auto-addensamento C_1 dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

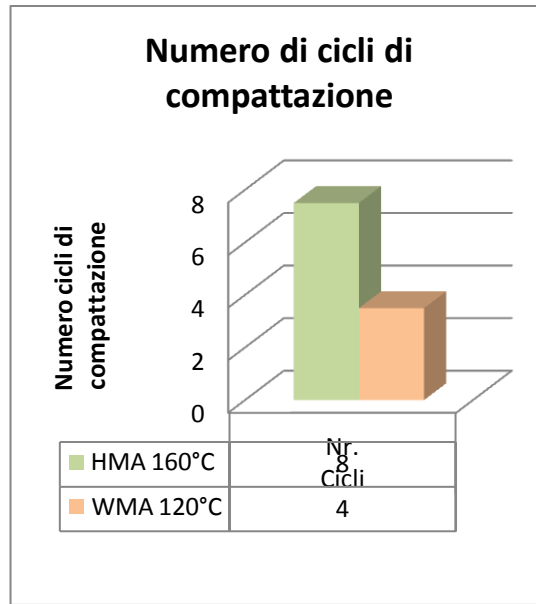


Grafico 20 Numero di cicli dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

Come già riscontrato nell'analisi dei provini compattati con la pressa giratoria, il conglomerato tiepido ha migliori caratteristiche nelle condizioni di messa in opera della miscela grazie all'aggiunta dell'additivo che rende il mix più fluido e facilmente lavorabile.

4.1.3 Caratteristiche volumetriche: pressa giratoria e roller compactor a confronto

A differenza di quanto riscontrato nei dati rilevati dalla compattazione con giratoria, però, al variare della temperatura – nell'ambito del medesimo materiale – non vi sono ingenti variazioni in relazione a k e C₁ ottenuti con Roller Compactor.

| | HMA | | | |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ROLLER COMPACTOR | PRESSA GIRATORIA | ROLLER COMPACTOR | PRESSA GIRATORIA |
| | 120 | 120 | 160 | 160 |
| k | 12,529 | 8,688 | 11,965 | 8,652 |
| C1 | 85,328 | 81,685 | 85,918 | 82,257 |
| NR. CICLI | 6 | 81 | 8 | 67 |

Tabella 18 Confronto tra k, C₁ e numero di cicli di roller compactor e pressa giratoria nell'HMA

| WMA | | | | |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ROLLER COMPACTOR | PRESSA GIRATORIA | ROLLER COMPACTOR | PRESSA GIRATORIA |
| | 120 | 120 | 160 | 160 |
| k | 14,896 | 8,851 | 15,145 | 8,675 |
| C1 | 87,763 | 85,368 | 88,033 | 83,819 |
| NR. CICLI | 4 | 29 | 4 | 54 |

Tabella 19 Confronto tra k, C₁ e numero di cicli di roller compactor e pressa giratoria nel WMA

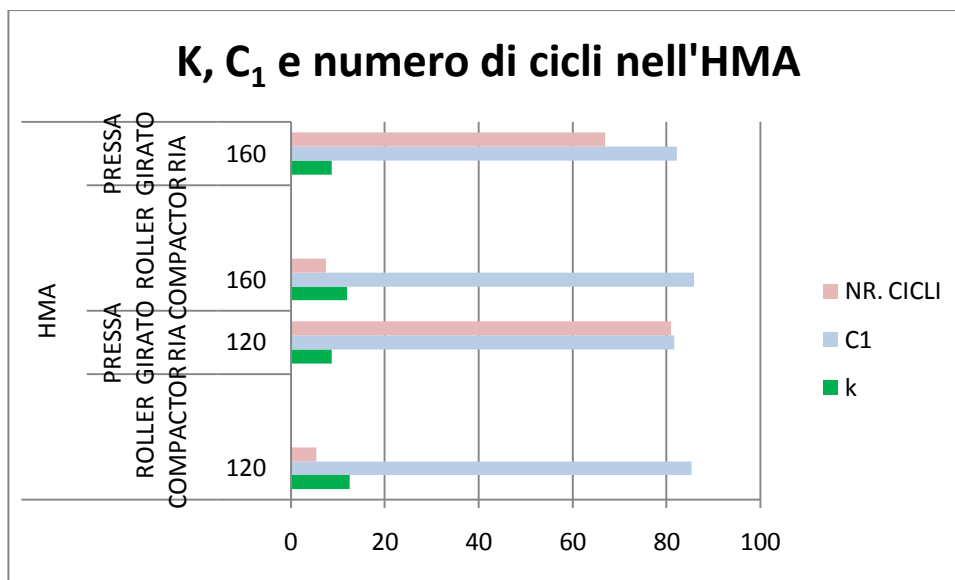


Grafico 21 Confronto tra k, C₁ e numero di cicli di roller compactor e pressa giratoria nell'HMA

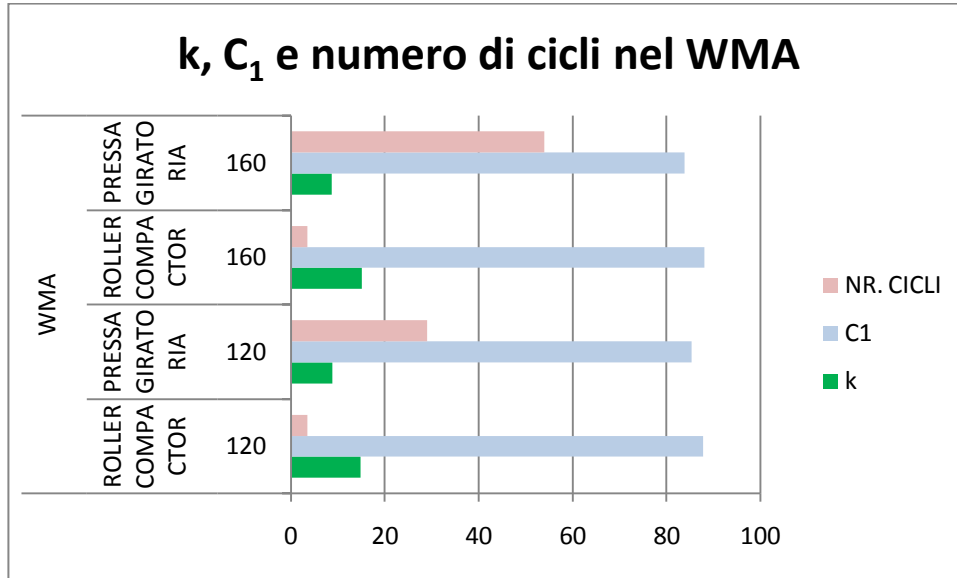


Grafico 22 Confronto tra k, C₁ e numero di cicli di roller compactor e pressa giratoria nel WMA

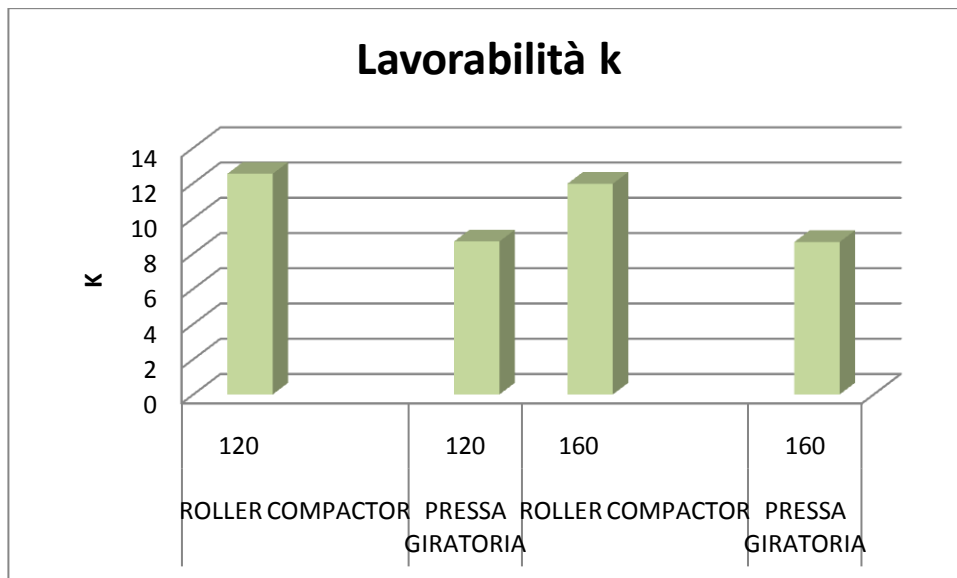


Grafico 23 Confronto delle lavorabilità k nell'HMA

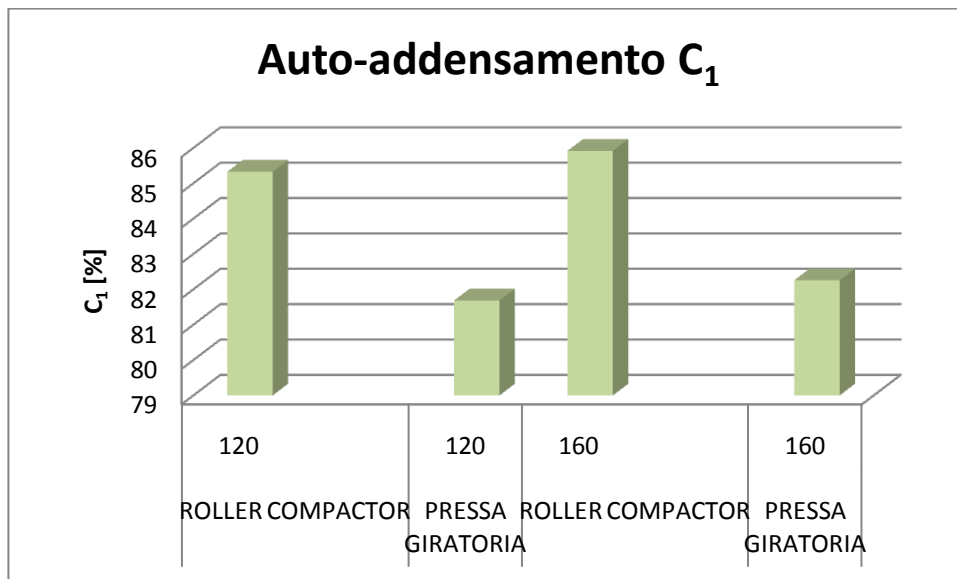


Grafico 24 Confronto degli auto-addensamenti C_1 nell'HMA

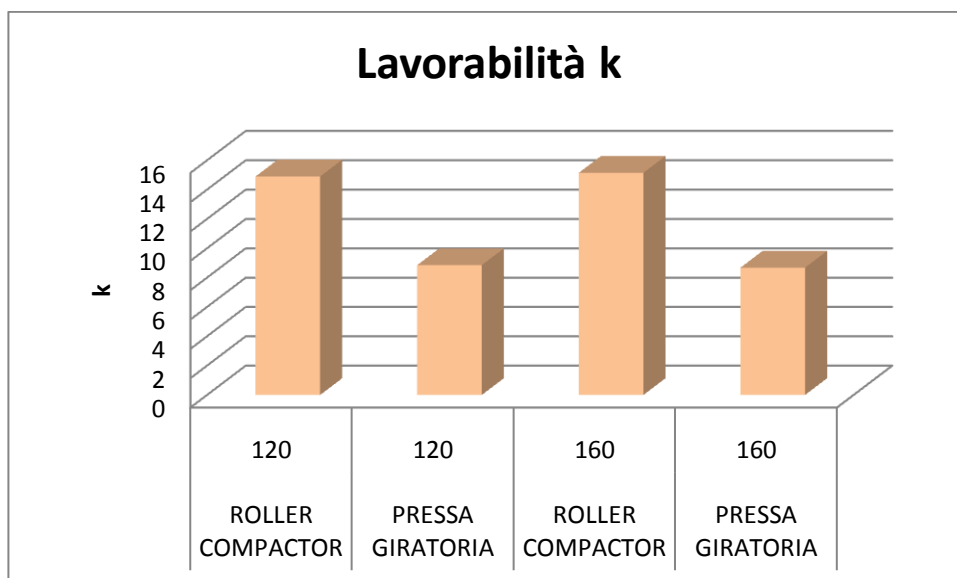


Grafico 25 Confronto delle lavorabilità k nel WMA

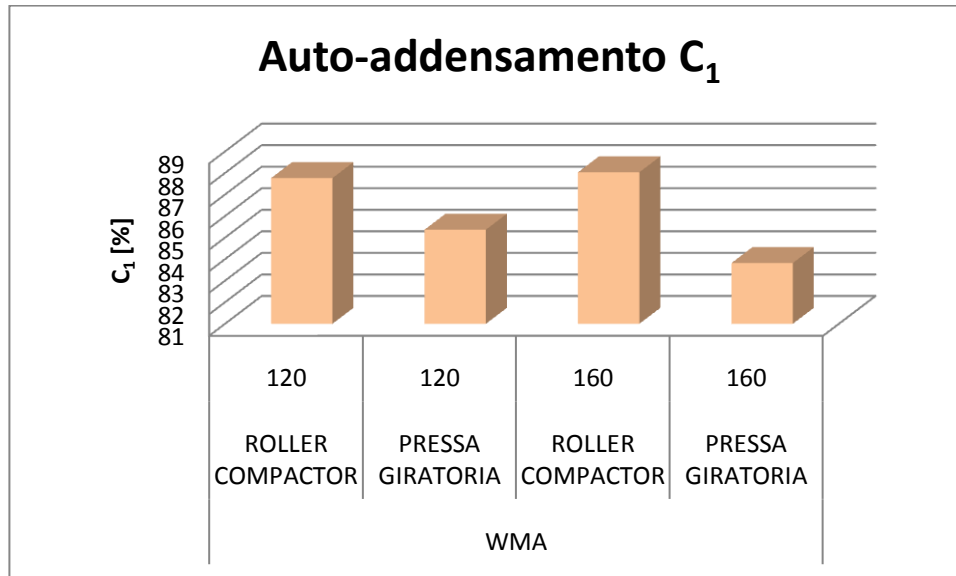


Grafico 26 Confronto degli auto-addensamenti C_1 nel WMA

Come si nota dai grafici precedentemente riportati sia per quanto riguarda l'HMA che il WMA sia la lavorabilità che l'auto-addensamento risultano lievemente maggiori nelle piastre compattate con roller compactor, ciononostante il trend è il medesimo: il WMA risulta avere prestazioni migliori con entrambe le tipologie di prova, sia per quanto riguarda il numero di cicli (il divario tra numero di cicli di compattazione per l'usura tradizionale e per quella tiepida è notevole soprattutto nella compattazione con giratoria) che relativamente a k e C_1 .

4.2 Caratteristiche meccaniche

Si analizzeranno di seguito gli andamenti dei moduli di rigidezza totali sia dell'HMA che del WMA ed infine verranno confrontati tali valori.

Per quanto riguarda l'HMA la temperatura di compattazione influisce notevolmente sul valore dei moduli di rigidezza e quindi sulla resistenza del materiale relativamente all'applicazione di carichi ciclici; nel passaggio da 80°C a 160°C il valore del modulo è quasi raddoppiato (come si nota dalla Tabella 20).

| HMA | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| 2992,65 | 4087,50 | 4297,65 | 4885,06 | 5460,93 |

Tabella 20 Valori dei moduli di rigidezza nell'HMA

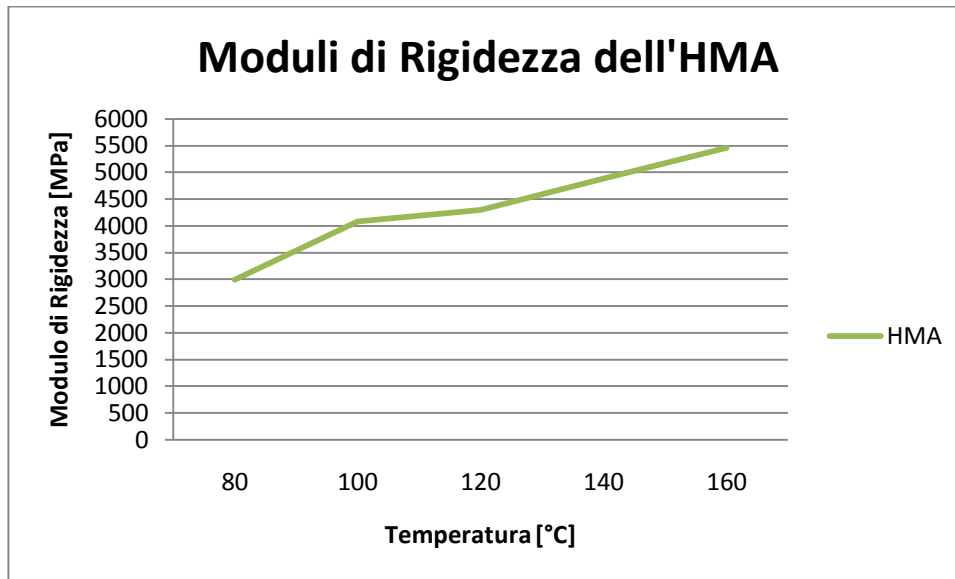


Grafico 27 Andamento dei moduli di rigidezza dell'HMA in funzione della temperatura di compattazione del provino

Questo comportamento era facilmente prevedibile in quanto le miscele tradizionali presentano valori più elevati di modulo all'aumentare della temperatura di compattazione, che determina una migliore costipazione del materiale, un minore indice dei vuoti e quindi un maggiore ingranamento dello scheletro solido.

Verranno ora riportate i dati relativi al conglomerato tiepido (Tabella 21 e Grafico 28).

| WMA | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| 2550,83 | 2961,14 | 3657,64 | 3830,84 | 4189,60 |

Tabella 21 Valori dei moduli di rigidezza nel WMA

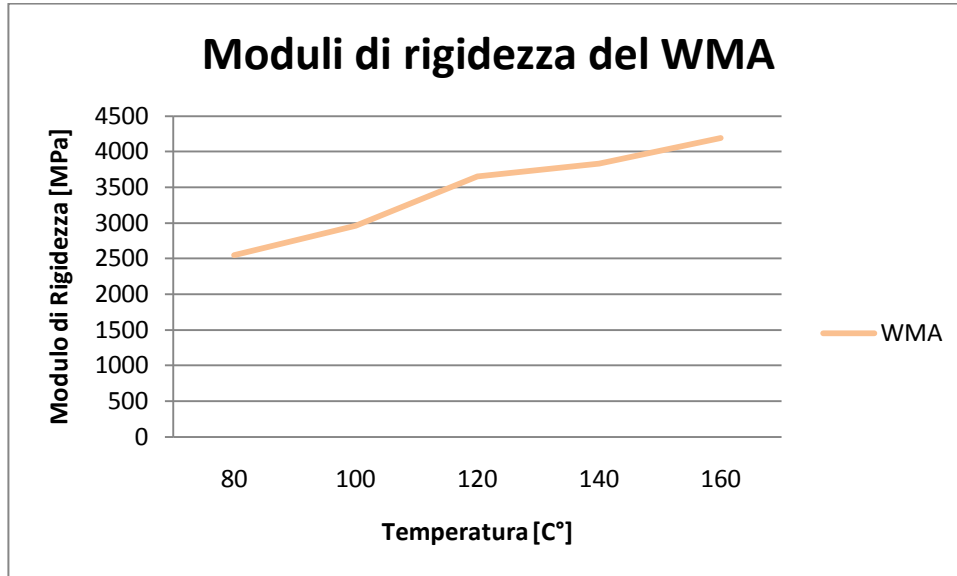


Grafico 28 Andamento dei moduli di rigidezza del WMA in funzione della temperatura di compattazione del provino

Anche nella miscela contenente l’additivo il valore dei moduli cresce con l’incremento della temperatura di compattazione dei provini.

Come si può osservare, il WMA – anche per quanto riguarda le prestazioni meccaniche - risente molto dell’aggiunta dell’additivo. Il modulo di rigidezza di tale miscela è, difatti, di molto inferiore rispetto a quello dell’HMA (Tabella 22).

| MODULI ELASTICI TOTALI | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 80 | | 100 | | 120 | | 140 | | 160 | |
| HMA | WMA | HMA | WMA | HMA | WMA | HMA | WMA | HMA | WMA |
| 2992,65 | 2550,83 | 4087,50 | 2961,14 | 4297,65 | 3657,64 | 4885,06 | 3830,84 | 5460,93 | 4189,60 |

Tabella 22 Moduli di Rigidezza

Il Grafico 7 evidenzia con maggior chiarezza quanto riportato in tabella:

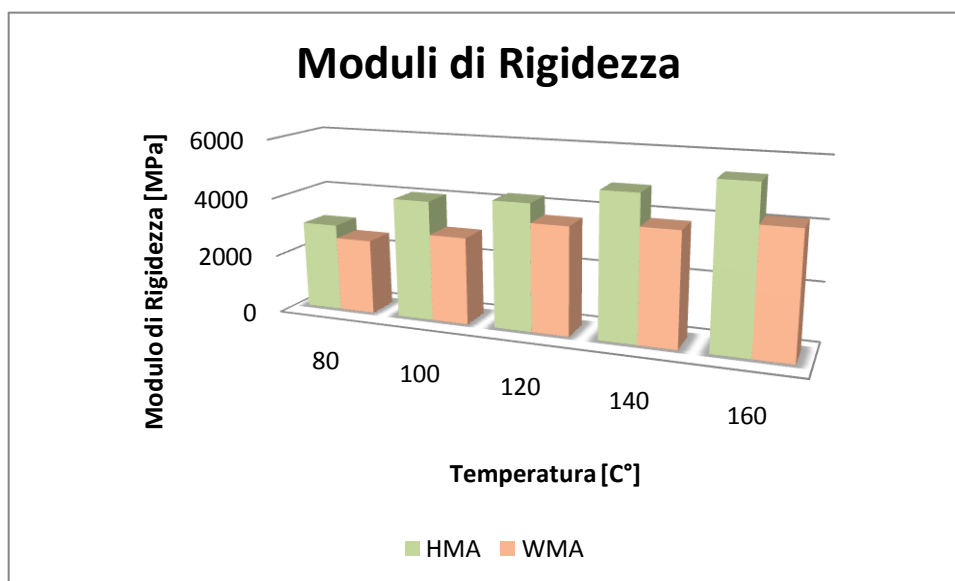


Grafico 29 Andamento dei moduli di rigidezza in funzione della temperatura

Entrambi i materiali hanno, quindi, prestazioni che migliorano all'aumentare della temperatura. Le caratteristiche del WMA, però, risultano di molto inferiori a quelle dell'HMA, specie alle temperature di 120 e 160 gradi. Nella Tabella 23 sono riportate le differenze tra i moduli di rigidezza medi dell'HMA e del WMA per ogni temperatura di compattazione. Per maggior chiarezza viene anche riportato il Grafico 30.

| TEMPERATURA DI COMPATTAZIONE [°C] | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|---------|----------|
| DIFFERENZA TRA MODULO DI RIGIDEZZA DI HMA E WMA [MPa] | 441,821 | 1126,355 | 640,0103 | 1054,22 | 1271,323 |

Tabella 23 Differenza tra Moduli di rigidezza di HMA e WMA

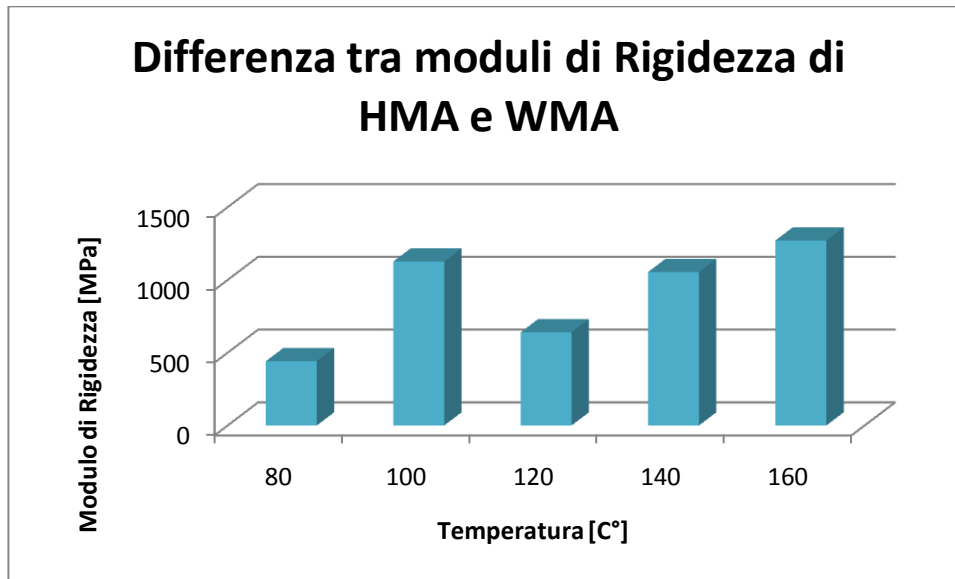


Grafico 30 Differenza tra Moduli di rigidezza di HMA e WMA

I valori riportati nel Grafico 30 sono più bassi in corrispondenza di 80°C e 120°C. Dal momento che gli indici dei vuoti di entrambi i materiali si aggirano attorno allo stesso valore - quindi non è possibile attribuire le variazioni dei moduli di rigidezza esclusivamente alle caratteristiche volumetriche dei provini - si potrebbe ipotizzare che i moduli del WMA, in corrispondenza di queste temperature, siano meno distanti da quelli dell'HMA perché:

- i campioni confezionati con conglomerato tradizionale e compattati ad 80°C, a causa della bassa temperatura - e quindi di una procedura di compattazione non ottimale - avranno moduli più bassi;
- a 120°C, invece, dal momento che il WMA è stato progettato per essere steso proprio a questa temperatura, avranno delle caratteristiche migliori rispetto ai campioni confezionati con la stessa miscela a 100°C, 140°C e 160°C e, quindi, i suoi valori del modulo di rigidezza si avvicineranno di più a quelli del bitume caldo.

Si andranno ora ad analizzare i valori dei moduli per i provini di HMA compattati a 160°C e di WMA compattati a 120°C (tali, difatti, risultano essere le temperature di messa in opera di tali materiali).

| MODULI DI RIGIDEZZA | |
|---------------------|-----------|
| HMA 160°C | WMA 120°C |
| 5460,93 | 3657,64 |

Tabella 24 Moduli di rigidezza dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

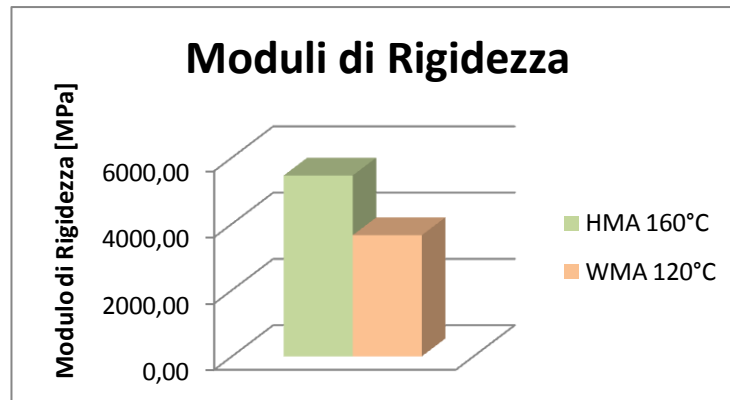


Grafico 31 Moduli di rigidezza dell'HMA e del WMA alle temperature di messa in opera

Il WMA, quindi, in fase di esercizio ed a una temperatura di 20°C risulta avere moduli più bassi rispetto all'HMA. Questo perché l'additivo influenza notevolmente i legami tra bitume ed aggregati, che non riescono a costituire un solido scheletro, facilitando deformazioni sul materiale molto più elevate.

4.3 Ormaiamento

Dalle prove effettuate con il wheel tracker test sono emersi dei risultati concordi con i moduli di rigidezza: il WMA ha minore resistenza anche alle deformazioni plastiche, specie alle alte temperature di esercizio.

Quando le piastre sono state condizionate a 40°C sia le piastre in HMA che quelle in WMA hanno dato risultati non particolarmente discordanti; quando, invece, la prova di ormaiamento è stata effettuata ad una temperatura di 60°C,

le carenze meccaniche e strutturali delle lastre confezionate con WMA si sono fatte sentire moltissimo (Tabella 25 e Grafico 32).

| ABBASSAMENTO [mm] | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HMA | | | | WMA | | | |
| 40 | | 60 | | 40 | | 60 | |
| 120 | 160 | 120 | 160 | 120 | 160 | 120 | 160 |
| 1,803 | 1,199 | 5,585 | 2,963 | 2,399 | 1,224 | 0,000 | 6,695 |

Tabella 25 Abbassamento conseguente il wheel tracking test

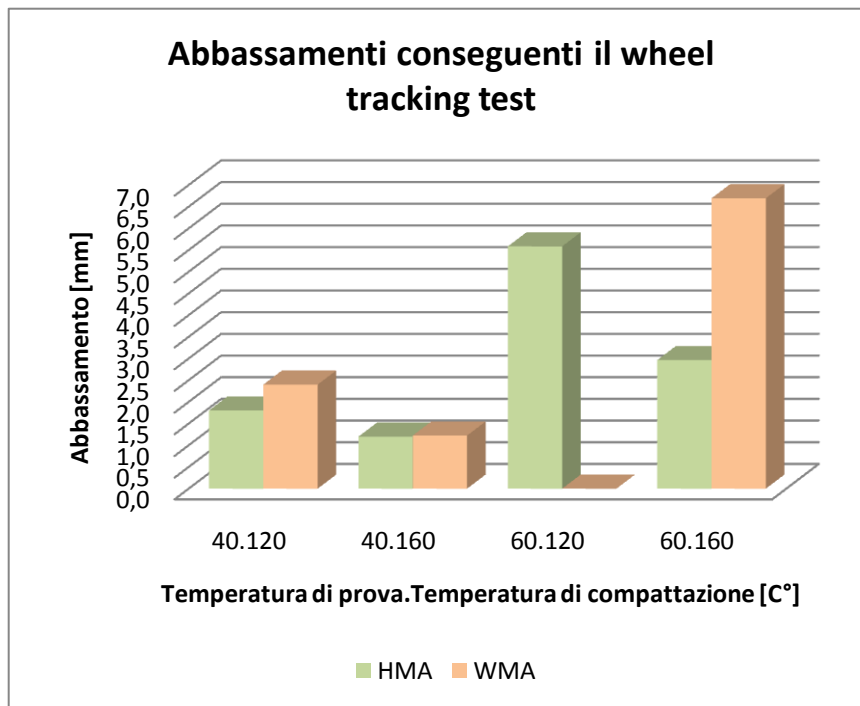


Grafico 32 Abbassamenti provocati dal test di ormaiamento

Si analizzerà, ora, il comportamento delle piastre di HMA compattate a 160°C e di WMA compattate a 120°C (Tabella 26).

| HMA 160°C | | WMA 120°C | |
|-----------|-------|-----------|----|
| 40 | 60 | 40 | 60 |
| 1,199 | 2,963 | 2,399 | |

Tabella 26 Abbassamenti [mm] nell'HMA e nel WMA alle temperature di messa in opera

I wheel tracking test sono stati effettuati a due differenti temperature.

Per T=40°C i valori dell'ormaiamento differiscono tra di loro di circa 1 mm.

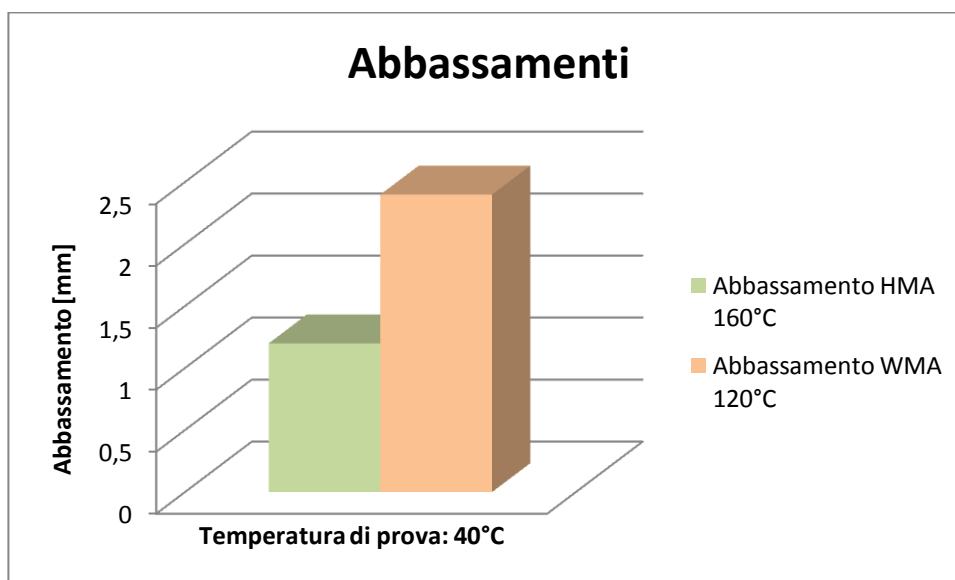


Grafico 33 Abbassamenti nell'HMA a 160°C e nel WMA a 120°C per una T di prova pari a 40°C

Questi risultati, come accennato all'inizio del paragrafo, confermano quanto già osservato nell'analisi dei moduli di rigidità: il WMA ha una notevole tendenza a deformarsi e denota, quindi, caratteristiche meccaniche inferiori rispetto all'HMA compattato alla temperatura indicata dalla COBIT.

5 Conclusioni

L'analisi di questa nuova miscela con l'aggiunta di additivo capace di ridurre le temperature di compattazione del conglomerato bituminoso, abbassando la viscosità del bitume, ed il confronto con il medesimo conglomerato senza additivazione hanno fatto emergere diversi spunti di riflessione.

Come si è osservato dalle prove di laboratorio, e come dimostrano i risultati, il conglomerato "tiepido" (WMA) ha una fluidità, una lavorabilità ed un auto-addensamento molto alti anche a temperature alle quali normalmente il bitume è particolarmente viscoso - e quindi le miscele con esso realizzate sono molto difficili sia da stendere che da compattare. Questo conglomerato risulta di facile costipazione a qualsiasi temperatura e con pochissimi cicli di carico, soprattutto se lavorato a 120°C. Esso rappresenta una grandissima innovazione sotto questo punto di vista perché, come specificato nei capitoli precedenti, presenta numerosissimi vantaggi, primo fra tutti la riduzione dell'emissione dei gas serra conseguente ad un risparmio energetico - ovvero una riduzione del consumo di carburante. Oltre a tali vantaggi è possibile considerare l'opportunità di stendere i conglomerati bituminosi anche in stagioni più fredde o in zone con climi più rigidi senza ripercussioni sulla reologia della miscela.

Tuttavia i risultati dei test che hanno avuto come scopo lo studio del comportamento meccanico e della tendenza all'accumulo di deformazioni permanenti (ormaiamento) di campioni confezionati con questa tecnologia hanno lasciato qualche perplessità in quanto la ricetta additivata, a parità di tutte le altre condizioni, non ha dato dei risultati particolarmente soddisfacenti; i moduli di rigidezza sono più bassi di quelli della miscela tradizionale calda e l'ormaiamento ha dei valori di abbassamento molto elevati, soprattutto alla temperatura di prova pari a 60°C.

Dal momento che l'unica differenza tra i due materiali è costituita dall'aggiunta dell'additivo, è possibile affermare che tale sostanza, per quanto comporti numerosi vantaggi, influisce negativamente sulla rigidità del materiale e sulla sua resistenza alle deformazioni, specie a temperature di esercizio elevate.

Senza alcun dubbio il campo prove servirà quale validazione dei risultati ottenuti in laboratorio e fornirà, con il tempo, risultati più accurati e veritieri relativamente al comportamento di questo nuovo materiale; ad esempio se ne valuteranno le deformazioni permanenti e le ormaie per quelle che saranno le effettive condizioni di traffico. Sarebbe interessante misurare i parametri di prova per un arco di tempo tale da permettere un'analisi dettagliata del variare delle caratteristiche prestazionali della pavimentazione sia in condizioni climatiche differenti che con il passare del tempo ad intervalli regolari. Alcuni test da effettuare in sito potrebbero essere, per esempio, lo skid test - atto a misurare l'aderenza della pavimentazione, l'altezza in sabbia - che fornisce le caratteristiche tessiturali dello strato di usura della pavimentazione, le misurazioni di densità, e così via.

Potrebbero avere grande utilità test di laboratorio che studino il comportamento dei provini alle basse temperature o in presenza di acqua (come il test di sensibilità al gelo e all'acqua), dal momento che questo materiale sembra avere delle buone prestazioni a temperature di esercizio non particolarmente elevate. Ovviamente ulteriori prove di carattere meccanico, come ad esempio il TSR o la prova di trazione indiretta, aiuterebbero a comprendere meglio il comportamento del materiale sotto sforzo e garantirebbero una maggior precisione nella definizione delle caratteristiche prestazionali del WMA.

Alcuni sviluppi rilevanti potrebbero derivare dalla standardizzazione della procedura di confezionamento del WMA con questo specifico additivo, estendendo il campo prove a più continenti, in maniera da studiare più approfonditamente il comportamento in differenti condizioni climatiche e di traffico di questa miscela.

Le informazioni raccolte sul campo ed in laboratorio potrebbero essere implementate in un database in maniera da conoscere e confrontare i dati ed analizzare la risposta di questa miscela di WMA ai vari test.

Anche monitorare la pavimentazione per tutta la sua vita utile potrebbe costituire un grosso vantaggio, trattandosi di un materiale relativamente nuovo del quale si conoscono ancora poco le caratteristiche funzionali e strutturali in esercizio, le la regolarità e l'aderenza ed i dissesti che verranno a formarsi. Grazie a questo controllo continuo sarà possibile sia effettuare tempestivamente interventi di manutenzione mirati, sia comprendere gli effetti indotti sulle caratteristiche funzionali e strutturali della pavimentazione, sia misurarne la durata media.

Bibliografia

Asphalt Institute, "The Asphalt Handbook", Seventh Edition, 2007, [1], [6];

Associazione mondiale della strada - Comitato Nazionale Italiano, "Tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi con processi a basse temperature", [7], [9], [10], [11];

Bryan D. Prowell, P. E. Graham, C. Hurley, "Evaluation of Sasobit for use in Warm Mix Asphalt", National Center for Asphalt Technology", Report 05-06, June 2000, [11];

Fabio Picariello, "Studio del modulo di rigidezza dinamico ISTM dei conglomerati bituminosi con test di trazione indiretta mediante l'utilizzo del Matta", Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Trasporti, Università degli studi di Bologna, 2006, [24];

"Roller Compaction and Wheel Tracking Apparatus", Tecnotest® Newsletter, Maggio 2010, [24];

Jae-Jun Lee, Jae-Kyu Lim et al., "Preliminary Study from Korea Warm-Mix Asphalt, 2010, [21];

Joe W. Button, Cindy Estakhri, Andrew Wimsatt, "A synthesis of Warm mix Asphalt", Austin, Texas, October 2007, [5];

KICT and Kumho Petrolchemical, "Sustainable Asphalt Pavement Using LEADCAP", 2010, [17];

Koenders et al, "Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000, [12], [16];

Le Strade LS Aeroporti Autostrade e Ferrovie, Casa Editrice La Fiaccola Srl, "*Tutti i vantaggi del tiepido*" di Francesco Santarella, Novembre 2007, [2] ;

Marini Fayat Group, Rivista del SITEB – Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade, "Rassegna del bitume" 55/07 , Anno XXXIII, I quadrimestre 2007, [4];

Massimo Losa, Massimo Dringoli , "Predisposizione delle linee guida per la progettazione ed il controllo delle pavimentazioni stradali per la viabilità ordinaria", Progetto Leopoldo in collaborazione con la Regione Toscana e l'università di Pisa, [22] ;

Paolo Ferrari, Franco Giannini, "*Ingegneria Stradale – Volume II – Corpo stradale e pavimentazioni*", Isedi , 2007, [3];

R. Fioravanti, F. Bergliardi, S. Tattolo, G. Heiling, "Bitumi modificati a bassa temperatura di miscelazione – caratteristiche del bitume modificato con cera sintetica", Strade e Autostrade n°2 2003, [8];

Sara Ghiraldini, "Studio sperimentale per la caratterizzazione reologica di conglomerati bituminosi tramite prove di flessione su quattro punti", Tesi di Laurea in Ingegneria Civile presso Università degli studi di Bologna, A.A. 2007-2008, [23];

W. Barthel, J. P. Marchand, M. Von Devivere, “Warm Asphalt Mixes by adding a synthetic zeolite”, Technical Paper, [13];

Yongjoo Kim, “Warm-Mix Asphalt Pavement in Korea”, [19];

Yongjoo Kim, Jaejun Lee et al., “Building Sustainable Pavements with Wax-based Compound Using a Warm-Mix Asphalt Technology in Korea”, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2011, [18];

Yongjoo Kim, Kyudong Jeonget et al., “laboratory and Field Experiences of Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement in Korea”, 2010, [20];

Zahid Hossain, Musarraf Zaman, Edgar A. O’Rear and Da-Hao Chen, “Effectiveness of Advera® in Warm Mix Asphalt”, GeoHunan International Conference, 2011, [15];

Zahid Hossain, Musarraf Zaman, Edgar A. O’Rear and Da-Hao Chen, “Laboratory Evaluation of Water-bearing Additive for Warm Mix Asphalt”, TRB Annual Meeting, Washington DC, 2011, [14];

on web: www.astecinc.com – Astec Inc., [15];