Comune di Messina

IMPRESA APPALTATRICE

NUOVA CO. E D. MAR.

30015 Chioggia (VE)
Banchina F - Val da Rio
www.coedmar.it

Tel. +39 041 4967 925
Fax +39 041 4967 914
contratti@coedmar.it

COOPTATA

CONSORZIO INTEGRA

40132 Bologna
Via M. E. Lepido, 182/2
www.consorziointegra.it

Tel. +39 051 3161 300
integra@consorziointegra.it

PROGETTAZIONE

F&M ingegneria

30035 Mirano (VE)
Viale Belvedere, 8/10
www.fm-ingegneria-com

Tel. +39 041 5785 711
Fax +39 041 4355 933
tremestieri@fm-ingegneria.com

IDROTEC

20148 Milano
Via Caccialepori, 27

Tel. +39 02 8942 2685
Fax +39 02 8942 5133
mail@idrotec-ingegneria.it

Ing. Vincenzo Iacopino — Viale Regina Elena, 125 - Messina

Studio Tecnico Falzea — Via 1° Settembre, 37 - Messina

Arch. Claudio Lucchesi — Via Roma, 117 - Pace del Mela (ME)

Ing. Manlio Marino — Via Placida, 6 - Messina

Dott. Geol. Sergio Dolfin — Via Marina, 4 - Torre Faro (ME)

PROGETTO

COMUNE DI MESSINA
LAVORI DI COSTRUZIONE DELLA PIATTAFORMA LOGISTICA INTERMODALE TREMESTIERI CON ANNESSO SCALO PORTUALE - PRIMO STRALCIO FUNZIONALE

EMISSIONE

PROGETTO ESECUTIVO

TITOLO

H - STRUTTURE DI BANCHINA

Relazione di calcolo delle pavimentazioni

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1					
2					
3					
4					
5					

ELABORATO N.

H001

DATA:	SCALA:	FILE:	J.N.
Ottobre 2017	-	1044_H001_0.doc	1044
PROGETTO	**DISEGNO**	**VERIFICA**	**APPROVAZIONE**
I. De Benetti	C. Sangiorgi	L. Masiero	T. Tassi

INDICE

1 PROPOSTA ALTERNATIVA PER LE PAVIMENTAZIONI 2
1.1 PAVIMENTAZIONI A CONFRONTO: SOVRASTUTTURE, MATERIALI E LAVORAZIONI 2
1.1.1 SOVRASTRUTTURE 2
1.1.2 MATERIALI 3
1.1.3 LAVORAZIONI 6
2 CALCOLO DELLE PAVIMENTAZIONI ALTERNATIVE 9
2.1 SOFTWARE DI CALCOLO ALIZE-LCPC 9
2.2 CARICHI DI PROGETTO, MODELLAZIONI E LEGGI DI FATICA 9
2.3 ANALISI DEI RISULTATI 13
3 CONCLUSIONI 18

1 PROPOSTA ALTERNATIVA PER LE PAVIMENTAZIONI

Le soluzioni alternative proposte per le pavimentazioni di Tipo 1 e 2, sono volte a massimizzare le prestazioni richieste, comportando **vantaggi in termini di vita utile dell'opera ed ottimizzando le lavorazioni e le tempistiche di cantiere**.

In sintesi, le soluzioni tecniche descritte e verificate nei paragrafi a seguire, prevedono:

1. **L'impiego di conglomerato bituminoso modificato tipo SMA per lo strato di usura;**
2. **L'impiego di conglomerato bituminoso modificato tipo ad Alto Modulo per lo strato di collegamento;**
3. **L'impiego di conglomerato bituminoso tipo Cold Mix Asphalt, realizzato con tecnica a freddo confezionato con fresato, emulsione bituminosa per riciclaggio e cemento;**
4. **L'utilizzo della tecnologia Wirtgen KMA220 in cantiere per la produzione ottimizzata della fondazione in Misto Cementato e dello strato di base in Cold Mix Asphalt;**
5. **L'eliminazione della geogriglia in fibra di vetro tra lo strato di usura e quello di binder;**
6. **L'eliminazione della stabilizzazione a cemento del materiale di sottofondo esistente.**

Per le sovrastrutture dello scalo si propone l'impiego di materiali ad elevate prestazioni in termini meccanici ed ambientali, nonché l'ottimizzazione degli spessori e delle lavorazioni per una maggiore durabilità dell'opera.

A seguire, ai fini della presente relazione tecnica:

- le pavimentazioni del progetto originario sono poste a confronto con quelle alternative che comprendono le soluzioni migliorative proposte;
- è descritto il software di calcolo Alize-LCPC impiegato per il calcolo strutturale di confronto;
- sono rappresentati i carichi, i modelli e le simulazioni approntate per il confronto;
- sono analizzati i risultati ottenuti dai modelli, traendo le conclusioni più significative.

1.1 PAVIMENTAZIONI A CONFRONTO: SOVRASTUTTURE, MATERIALI E LAVORAZIONI

1.1.1 Sovrastrutture

In Figura 1 sono poste a confronto diretto le pavimentazioni Tipo 1 e 2 originarie con quelle corrispondenti della proposta alternativa.

In termini di spessori si osserva nel complesso una riduzione di 1 cm dello spessore dei pacchetti passando dai 53 cm originari ai 52 cm per la pavimentazione Tipo 1 e dai 43 cm ai 42 cm per la pavimentazione Tipo 2. Tuttavia, pur considerando una minima riduzione dello spessore complessivo dei pacchetti, si può osservare una generale **ottimizzazione dello spessore degli strati legati a bitume, a tutto vantaggio delle prestazioni meccaniche e di durabilità delle sovrastrutture**.

In entrambe le pavimentazioni lo strato di usura passa da 5 a 4 cm, quello di binder dagli 8 cm originari passa a 6 cm, mentre lo strato di base è incrementato dai 10 cm originari ai 12 cm della soluzione alternativa proposta. Lo strato di fondazione non presenta invece variazioni di spessore rispetto la soluzione originaria.

Figura 1: Sovrastrutture a confronto: originarie (sx) ed alternative (dx).

1.1.2 Materiali

Le soluzioni alternative prevedono la sostituzione dei conglomerati bituminosi delle sovrastrutture originarie, con le seguenti miscele:

- Lo **strato di usura** basaltica di 5 cm originario è sostituito con uno **strato di 4 cm di spessore costituito da conglomerato bituminoso modificato di tipo Splitt Mastix Asphalt (SMA)**. Tale tipo di conglomerato è in grado di assolvere ai necessari aspetti funzionali della sovrastruttura legati all'interazione tra gli pneumatici ed il piano viabile, ovvero in termini di aderenza, regolarità e drenaggio superficiale delle acque. La composizione della particolare miscela e le caratteristiche degli aggregati e del legante bituminoso, lo rendono notoriamente più tenace e resistente alle sollecitazioni tangenziali di un qualsiasi altro conglomerato bituminoso di usura. Numerosi studi ne hanno evidenziato un incremento di vita utile pari al 30 %. Una nota pubblicazione della European Asphalt Pavement Association (EAPA) intitolata "*Heavy Duty Surfaces: the arguments for SMA*", sottolinea come "*le fessurazioni superficiali, l'esfoliazione e la striatura del manto non siano fenomeni di degrado rilevanti per uno SMA. L'eccellente durabilità dello SMA deriva dalla tenacità del mastice bituminoso che lo caratterizza. La ricchezza di bitume e la riduzione dei vuoti tipici di tali conglomerati preservano il legante dal deterioramento ossidativo*". Ne consegue uno spiccato aumento della durabilità del piano viabile in progetto e, quindi, una netta riduzione degli interventi manutentivi richiesti. Inoltre, l'intero pacchetto risente di tali benefici, risultando gli strati sottostanti preservati dalle percolazioni di acqua e di agenti contaminanti. Ne derivano quindi importanti vantaggi ambientali ed economici, in relazione all'ottimizzazione degli interventi di manutenzione necessari nel corso della vita utile della sovrastruttura. Non da ultimi sono da sottolineare i vantaggi di tipo funzionale: lo SMA, per la natura degli aggregati che lo compongono, presenta anche risorse di durabilità in termini di abrasione superficiale. L'impiego di aggregati tenaci assicura il mantenimento delle proprietà di aderenza nel tempo, legate alla microrugosità degli aggregati a contatto con gli pneumatici; inoltre la sua macrorugosità consente di garantire lo smaltimento non superficiale delle acque con la conseguente riduzione degli effetti negativi che l'acqua ha sull'aderenza.
  Oltre a questi aspetti, lo strato d'usura di tipo SMA, per via della spiccata macrorugosità superficiale del conglomerato finito, attribuisce al piano viabile caratteristiche fonoassorbenti nei confronti dei rumori prodotti dal moto dei veicoli, riscontrate da svariati studi internazionali condotti su strada; in particolare, analogamente a quanto accade per i conglomerati porosi drenanti e fonoassorbenti, la distribuzione dei meati superficiali è tale da costituire un insieme di cavità entro le quali le onde sonore a frequenza più elevata, in

genere quelle più fastidiose per l'uomo, vengono attenuate. L'abbattimento dei livelli di pressione sonora percepiti all'esterno della pavimentazione è, quindi, dovuto alla capacità che la tessitura superficiale del conglomerato ha di intercettare i raggi sonori provenienti dal motore e dagli altri organi di trasmissione, così come quelli riflessi al di sotto della scocca del veicolo. L'effetto positivo dello SMA sull'inquinamento acustico ha, in realtà, una maggiore rilevanza in quanto la pavimentazione stessa è tale da ridurre le emissioni rumorose ad una delle fonti principali: il contatto ruota-piano viabile. È sempre la tessitura superficiale che interviene limitando i fenomeni generativi di air-pumping e quelli amplificativi del tipo "effetto corno" tipici delle pavimentazioni superficialmente chiuse. In termini quantitativi i livello di pressione sonora normalizzato può essere ridotto anche oltre i 3 dB(A) corrispondenti, in pratica, al raddoppio della distanza del ricettore dall'asse stradale.

- Lo **strato di binder**, originariamente in conglomerato bituminoso tradizionale dallo spessore di 8 cm, è sostituito con **l'impiego di un legante bituminoso modificato ad elevata consistenza** ed una curva granulometrica in grado di amplificare la rigidezza del miscela bituminosa, che diviene pertanto **di tipo modificato ad Alto Modulo**. Il miglioramento della caratteristiche meccaniche del conglomerato ne permette la riduzione dello spessore, che passa dagli 8 cm ai 6 cm. Il beneficio diretto è una maggiore capacità portante ed una accresciuta durabilità dello strato e, quindi, del pacchetto complessivo che lo contiene. La peculiarità di questa miscela, consiste nell'utilizzo di aggregati selezionati e di bitume modificato a bassa penetrazione, in grado di preservare la pavimentazione da fenomeni di ammaloramento dovuti alle fessurazioni di tipo bottom-up, che si propagano dalla base dello strato bituminoso, verso gli strati più superficiali. I degradi legati alle deformazioni permanenti degli strati profondi sono ridotti a fronte della bassissima deformabilità dello strato che, non a caso, rendono la miscela ampiamente diffusa per interventi di pavimentazione di aeroporti, porti ed interporti ove i carichi gravanti possono essere di gran lunga superiori a quelli stradali ed hanno, altresì, la peculiarità di generare notevoli sollecitazioni tangenziali tipiche dei mezzi di movimentazione a ridotto raggio di sterzata. Sono quindi evidenti anche in questo caso i benefici ambientali ed economici in termini di aumento della durabilità e quindi riduzione degli interventi manutentivi nel corso della vita utile dell'opera. Infine, il comportamento della miscela nel range delle temperature di esercizio, è più prossimo a quello di un conglomerato bituminoso ideale (Figura 2).

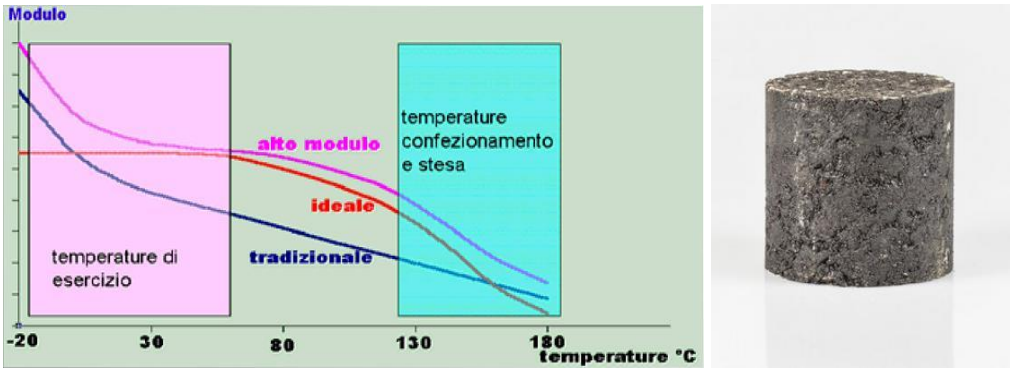

Figura 2: Caratteristiche di rigidezza tipiche di un c. b. tradizionale e ad Alto Modulo.

- Lo **strato in conglomerato bituminoso di base è portato a 12 cm** di spessore dai 10 cm originari, ed è costituito da un materiale **tipo Cold Mix Asphalt** dal forte contenuto tecnologico e ambientale in quanto confezionato a freddo in impianto grazie all'impiego di emulsione bituminosa modificata sovrastabilizzata specifica per il riciclaggio e cemento. La

componente litica è in parte costituita da aggregati di fresato opportunamente selezionati e vagliati al fine di ottenere, legati in miscela, un materiale omogeneo e compatto dalle elevate caratteristiche meccaniche, garantite dalla presenza irrigidente del fresato d'asfalto. La curva granulometrica è opportunamente studiata ed integrata con l'aggiunta di aggregati vergini. Si ottiene dunque un materiale con prestazioni paragonabili, se non superiori, a quelle di un conglomerato bituminoso tradizionale a caldo, in quanto cemento e legante bituminoso sono convenientemente dosati secondo uno studio volumetrico *ad hoc* atto a soddisfare i requisiti di resistenza a trazione indiretta e rigidezza dinamica (Figura 3).

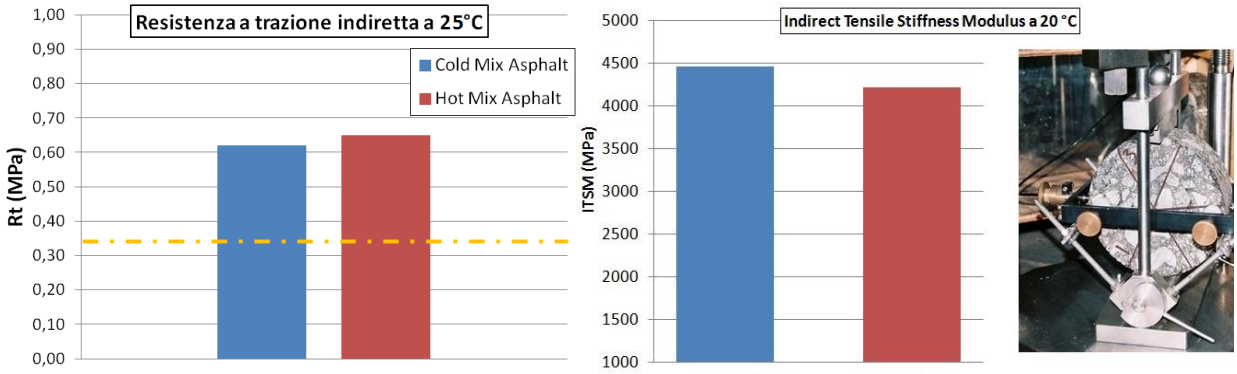

Figura 3: Test di resistenza a trazione indiretta e ITSM per Cold e Hot Mix Asphalt.

Oggi, il riciclaggio a freddo dei conglomerati bituminosi è sempre più una valida alternativa alle tecniche tradizionali, sia per la manutenzione, sia per la costruzione di nuove pavimentazioni stradali. Senza comportare particolari difficoltà in fase realizzativa si hanno apprezzabili vantaggi dal punto di vista ambientale: **riduzione del prelievo da cave, riduzione del consumo di combustibile per il riscaldamento ed il trasporto dei materiali, riduzione delle conseguenti emissioni in atmosfera, soluzione al problema della gestione del fresato**. La tecnica tradizionale prevede il riscaldamento del bitume e degli aggregati ad alte temperature, solitamente superiori a 160 °C, per abbattere la viscosità del bitume sia in fase di miscelazione, sia in fase di posa in opera del conglomerato, per una efficace compattazione. La tecnica a freddo con emulsione bituminosa, per raggiungere le stesse finalità, prevede l'abbattimento della viscosità veicolando il bitume nell'impasto tramite l'acqua dell'emulsione; tutte le lavorazioni, dalla produzione alla stesa in opera, avvengono quindi a temperatura ambiente garantendo sensibili vantaggi ambientali ed il miglioramento delle condizioni di lavoro per le maestranze (Figura 4).

Figura 4: Posa in opera di c.b. con tecnica a caldo (sx) e con tecnica a freddo (dx).

Infine, sono da sottolineare i benefici ambientali derivanti dall'utilizzo di fresato, e dalla lavorazione in impianto mobile Wirtgen KMA220. All'atto del confezionamento della miscela, sono nettamente ridotti i costi energetici di produzione e tutte le esternalità negative derivanti dall'emissione di fumi e di sostanze potenzialmente nocive. La posa è eseguita tramite vibrofinitrice a tutto vantaggio della efficacia della compattazione finale.

1.1.3 Lavorazioni

La soluzione alternativa prevede le seguenti migliorie legate alle lavorazioni:

- La scelta di adottare un **conglomerato bituminoso tipo Cold Mix Asphalt** determina sensibili vantaggi legati alla lavorazione e al confezionamento della miscela, in quanto si abbattono le emissioni di fumi nell'ambiente circostante, e sono superate le criticità della dipendenza del conglomerato bituminoso dalla temperatura all'atto del trasporto in cantiere ed della posa in opera;
- Le miscele di base e fondazione proposte, saranno confezionate in impianto Wirtgen KMA220 (Figura 5). L'impianto mobile per il riciclaggio a freddo KMA 220 è stato studiato per permettere il totale riutilizzo dei materiali stradali; con una capacità produttiva che può arrivare fino alle 220 t/h, esso consente di confezionare le miscele nelle immediate vicinanze del cantiere, comportando sensibili vantaggi ambientali: si **riducono infatti al minimo i tragitti di trasporto dal sito di produzione al cantiere**, inoltre non occorre né essiccare, né riscaldare i materiali di partenza e ciò si traduce in ridotte emissioni di CO_2 equivalente. Il KMA garantisce quindi elevate produzioni giornaliere e una qualità costante delle miscele: un mescolatore bialbero a regime forzato assicura una miscelazione omogenea di tutti i materiali componenti l'impasto. Dal punto di vista qualitativo inoltre, il confezionamento delle miscele in impianto Wirtgen KMA220 consente un **elevato controllo delle caratteristiche granulometriche del Cold Mix di base e del Misto Cementato di fondazione**; tra gli altri aspetti tecnologici di rilievo il dosaggio dei leganti avviene per mezzo di una cella di carico ed è controllata da un microprocessore. Tale impianto mobile è in grado di produrre i conglomerati sia in lotti, sia in continuo: il nastro di scarico orientabile consente di convogliare il conglomerato direttamente nel cassone di un autocarro o di stoccarlo in cumulo.

Figura 5: Impianto mobile Wirtgen KMA220 in fase di trasporto (sx) e in fase di produzione (dx).

- La pavimentazione alternativa prevede **l'eliminazione della geogriglia in fibra di vetro** posta tra lo strato di binder e quello di usura. Da studi e sperimentazioni internazionali è emerso che questo tipo di geogriglia, essendo costituita da elementi spessi e rigidi, crea un netto scollegamento tra gli strati tra cui è posta, essendo concepita per impedire la riflessioni delle fessurazioni pregresse presenti in pavimentazioni ammalorate. Proprio per le sue

peculiarità strutturali questo tipo di geogriglia ha infatti effetti benefici se posata nel ripristino di pavimentazioni già fessurate, dove è espressamente richiesto che vi sia separazione tra gli strati al fine di evitare la risalita delle fessurazioni dagli strati più profondi verso quelli superficiali (Figura 6).

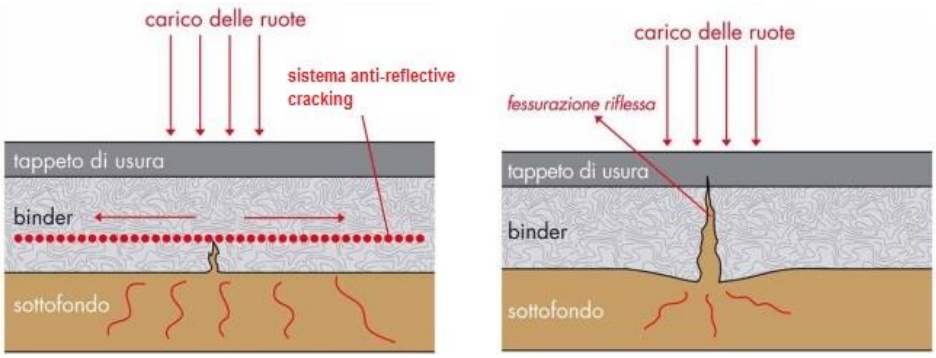

Figura 6: Sistema anti-reflective cracking (sx) e propagazione della fessura negli strati superficiali (dx).

In Figura 7 è rappresentato un travetto di conglomerato bituminoso rinforzato con geogriglia in fibra di vetro sottoposto a test di flessione dinamica su 3 punti: si osservi la rottura per distacco della geogriglia e la separazione degli strati bituminosi.

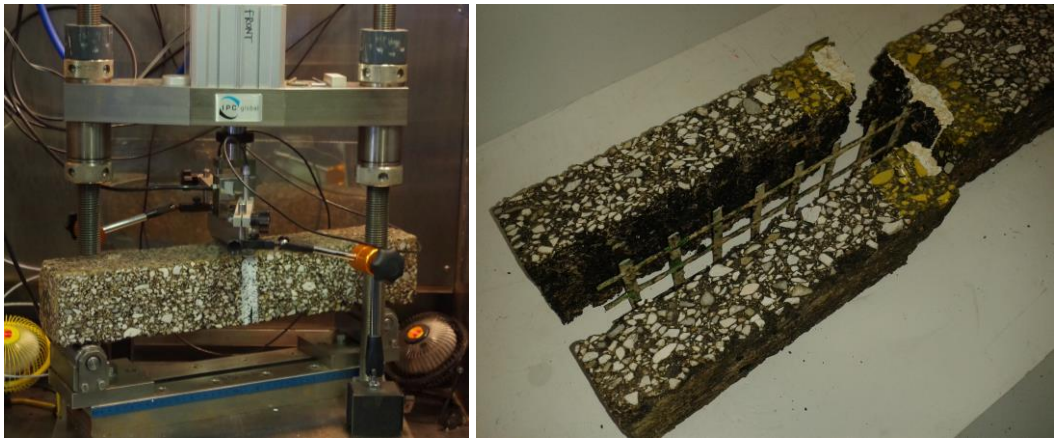

Figura 7: Flessione dinamica su travetto di c.b. rinforzato (sx) e travetto a rottura (dx).

- Per quanto riguarda lo strato di sottofondo, la soluzione originaria prevedeva il trattamento a cemento del terreno. Tuttavia, sulla base dei risultati delle prove di portanza effettuate con piastra di carico circolare (**Rep. 2542 tremestieri – me**), si ritiene che **le caratteristiche strutturali di portanza che si possono raggiungere** tramite una corretta compattazione dei materiali di sottofondo esistenti **siano sufficienti e tali da non richiedere ulteriori interventi di stabilizzazione**, a tutto vantaggio del ridotto impatto del cantiere.

punto di prova	Modulo di deformazione 1° ciclo (MPa) M_d	Modulo di deformazione 2° ciclo (MPa) M_d'	Grado di costipamento (M_d/M_d')
1	3,4	17,1	0,198
2	10,4	128,6	0,081
3	9,5	98,4	0,096
4	13,4	50,8	0,264
5	12,1	44,2	0,275
6	10,0	76,9	0,130
7	12,6	128,6	0,098

Tabella 1: Risultati prove PLT.

- Per impedire la formazione di polveri e, allo stesso tempo, favorire la protezione ed il mutuo collegamento tra gli strati della pavimentazione, è prevista sullo strato in Misto Cementato di fondazione, la stesa di una **mano di ancoraggio e protezione in emulsione bituminosa** a rottura controllata e bassa viscosità, con dosaggio in bitume residuo di 0,3 kg/m^2, distribuita uniformemente sullo strato finito mediante apposita macchina spruzzatrice.
  Analogamente, in seguito alla compattazione dello strato di base in Cold Mix Asphalt e dello strato di binder ad Alto Modulo, è prevista la stesa di una mano d'attacco in emulsione bituminosa, in grado di **garantire il collegamento tra gli strati di conglomerato ed impermeabilizzare la superficie trattata**, preservando gli strati sottostanti dalle infiltrazioni (Figura 8).

Figura 8: Stesa con macchina spruzzatrice di mano d'attacco in emulsione bituminosa.

2 CALCOLO DELLE PAVIMENTAZIONI ALTERNATIVE

2.1 SOFTWARE DI CALCOLO ALIZE-LCPC

Il metodo di progetto di una pavimentazione stradale non differisce da quello di una qualsiasi altra struttura civile: note le caratteristiche dei materiali impiegati ed i carichi trasmessi dai veicoli, si tratta di dimensionare lo spessore dei singoli strati e del pacchetto complessivo al fine di contenere entro certi limiti lo stato tenso-deformativo che tali carichi ivi determinano. **Per il calcolo comparativo proposto si è impiegato il software francese Alize-LCPC**, per la modellazione del multistrato elastico ed il carico di tensioni e deformazioni nella sovrastruttura. Il software Alize-LCPC è stato creato per implementare il metodo razionale di progettazione delle sovrastrutture, così come sviluppato dalle organizzazioni francesi dell'LCPC e SETRA. Il metodo costituisce l'approccio standardizzato per il calcolo delle pavimentazioni del network infrastrutturale francese ed, inoltre, è stato adottato da molti altri enti di gestione e sviluppo di infrastrutture viarie.
In accordo coi più comuni metodi razionali e con la teoria di Burmister, le sovrastrutture sono schematizzate come una serie di strati sovrapposti, orizzontalmente illimitati, ma con spessore costante e realizzati con materiali aventi proprietà di omogeneità, isotropia ed elasticità lineare. Il sottofondo su cui le sovrastrutture poggiano è illimitato anche inferiormente. Si ammette, inoltre, che il collegamento tra gli strati componenti il pacchetto sia variabile in funzione delle condizioni di interfaccia. Ogni materiale è caratterizzato da un Modulo Elastico "E" e da un coefficiente di Poisson "ν".
I carichi agenti sulla superficie della sovrastruttura sono quelli verticali trasmessi dalle ruote dei veicoli pesanti, che si ritengono uniformemente distribuiti su superfici di impronta circolari, il cui raggio risulta dipendente dalla pressione di gonfiaggio degli pneumatici. Poiché l'entità del carico applicato è inferiore rispetto al carico di rottura dei materiali, la singola deformazione risulta essere, con ragionevole approssimazione, reversibile, dunque tale deformazione può essere considerata, in prima analisi, elastica. La scelta di un modello costitutivo elastico trova quindi giustificazione nell'entità delle deformazioni.
Il problema presenta condizioni di simmetria tali per cui individuato un sistema di riferimento tri-ortogonale è possibile conoscere in ciascun punto del sistema avente coordinate x, y e z, lo stato tenso-deformativo descritto dalle sei componenti di tensione e di deformazione agenti sulle facce di un elementino di sovrastruttura delimitato da piani paralleli al sistema di riferimento.
I dati di input da introdurre nel modello per il calcolo di tensioni e deformazioni nelle sovrastrutture a confronto sono i seguenti:

1. Caratteristiche meccaniche e geometriche della pavimentazione (moduli, coefficienti e spessori);
2. Carichi di progetto: forza (kN), pressione (kPa), posizione (x, y, z);
3. Punti di calcolo: occorre indicare in quali punti si calcolano gli stati tenso-deformativi.

Ai fini delle modellazioni, si assume che, laddove non ci siano discontinuità tra gli strati costituenti le pavimentazioni in esame, vi sia perfetto collegamento indipendentemente dall'evoluzione delle condizioni delle sovrastrutture nel tempo. Ove invece siano presenti elementi che alterino significativamente le condizioni di collegamento tra gli strati quali, ad esempio, la geogriglia in fibra di vetro prevista nella pavimentazione originaria, **si assume un collegamento parziale tra gli strati a contatto**.

2.2 CARICHI DI PROGETTO, MODELLAZIONI E LEGGI DI FATICA

Ai fini del calcolo di confronto tra la pavimentazione originaria e quella della proposta alternativa, si sono realizzati altrettanti **modelli al multistrato elastico tramite il software Alize-LCPC** descritto. Essendo le due pavimentazioni originarie (Tipo 1 e 2) tra loro simili, tranne che per lo

spessore dello strato di fondazione, per semplicità, e a favore di sicurezza, si è scelto di effettuare il calcolo ed il successivo confronto solo per quella con fondazione di spessore minore.
La Figura 9 mostra lo schema di calcolo impiegato per confrontare, a seconda della verifica condotta, gli stati tenso-deformativi all'interno della sovrastruttura stradale originaria, con quelli ottenuti dalla proposta alternativa. Per lo schema di carico a ruote gemelle ed asse da 120 kN, sono stati presi in considerazione i **punti di controllo all'interno del pacchetto stradale allineati sull'asse di mezzeria di una ruota**, che rappresentano la condizione più critica per la tipologia di carico preso in considerazione. I punti sono collocati a differenti profondità allo scopo di confrontare i risultati ivi ottenuti tra di loro e con i valori limite di riferimento presenti in letteratura, o comunque noti da prove di laboratorio, per i materiali utilizzati. Nel modello l'origine degli assi è da considerarsi centrato tra le due ruote gemelle.

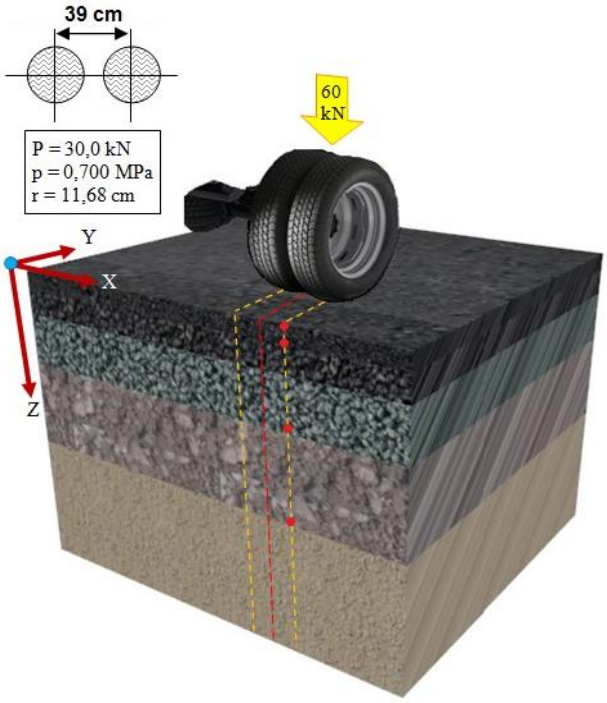

Figura 9: Schema di sovrastruttura, asse di carico, pressioni di gonfiaggio e punti di controllo adottati.

Nello specifico, per il caso in esame si sono considerati:

1. gli spostamenti verticali sul piano superficiale (deflessioni verticali del piano viabile);
2. le tensioni e deformazioni orizzontali alla base degli strati bituminosi;
3. le tensioni orizzontali alla base dello strato in misto cementato;
4. le tensioni e deformazioni verticali sulla sommità del sottofondo.

I risultati del calcolo sono riportati in forma tabellare ed analizzati dettagliatamente nel paragrafo successivo. Nelle tabelle di Figura 10 sono invece riportati **i dati di input dei due modelli posti a confronto**. In particolare, si evidenziano gli spessori di ciascuno strato ed i corrispondenti valori dei parametri elastici (Moduli Elastici e Coefficienti di Poisson) assunti, oltre alle caratteristiche del collegamento all'interfaccia tra due strati sovrapposti.

Basis structure

	thick. (m)	modulus (MPa)	Nu	material type
unbond.	0,05	4200	0,35	other
bonded	0,08	3700	0,35	other
bonded	0,1	3000	0,35	other
bonded	0,2	2250	0,25	other
	infinite	140	0,45	other

Basis structure

	thick. (m)	modulus (MPa)	Nu	material type
bonded	0,04	5000	0,35	other
bonded	0,06	8000	0,35	other
bonded	0,12	3000	0,35	other
bonded	0,2	2250	0,25	other
	infinite	140	0,4	other

Figura 10: Tabelle dei dati di input per i modelli: originario (sx) e alternativo (dx).

I moduli elastici dei conglomerati bituminosi sono stati desunti da consolidata bibliografia ed esperienze dirette di laboratorio su conglomerati bituminosi modificati di tipo SMA, Alto Modulo e Cold Mix Asphalt. Per i primi due conglomerati bituminosi a caldo, sono stati adottati valori di Modulo rispettivamente di 5000 e 8000 MPa; per la miscela realizzata a freddo in via cautelativa è stato utilizzato un valore di 3000 MPa. Per tutte le miscele bituminose, come noto dalla letteratura scientifica, è stato utilizzato un valore del coefficiente di Poisson pari a 0,35.
Per quanto riguarda i materiali legati a cemento, nel caso in esame lo **strato in fondazione in Misto Cementato**, essi presentano caratteristiche di rigidezza variabili nel tempo. In particolare, questi materiali sono caratterizzati da una elevata rigidezza iniziale che deperisce nel corso della vita utile, sotto l'effetto dei carichi. La Figura 11 riporta schematicamente ed a titolo esemplificativo il fenomeno. Di ciò si è tenuto conto nell'attribuzione dei valori di Modulo per lo strato di fondazione di ciascuna delle pavimentazioni modellate. Pertanto, per conoscere il reale stato tenso-deformativo del materiale è opportuno introdurre nel calcolo il modulo elastico del materiale fessurato, cioè di quel materiale elastico ideale che ha la stessa deformabilità di quello lesionato. Si assume perciò un valore pari a 2250 MPa per il modulo elastico ed un coefficiente di Poisson pari a 0,25.

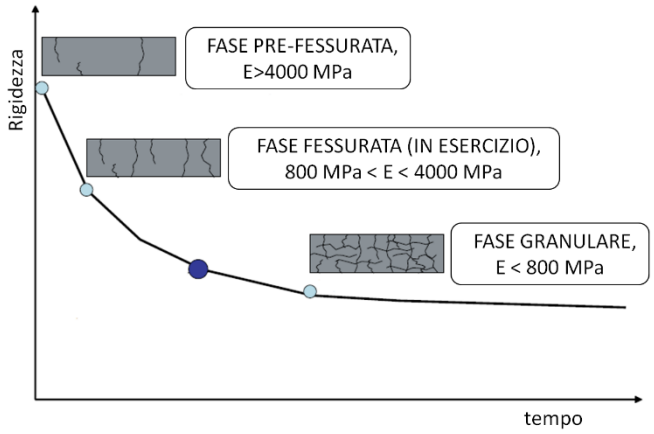

Figura 11: Schematizzazione delle variazioni di rigidezza per materiali granulari legati a cemento.

Per gli **strati di sottofondo**, considerando non necessario l'intervento di stabilizzazione a cemento, sulla base dei risultati delle prove di portanza di carico con piastra riportate in precedenza, si è assunto per entrambe le pavimentazioni, un valore di Modulo pari a 140 MPa ed un coefficiente di Poisson pari a 0,45. Il valore del Modulo dinamico del sottofondo deriva da una relazione proposta da Ferrari e Giannini, secondo cui:

$$E_{din} = E_{st} \cdot 69 \text{ [MPa]}$$

in cui E_{st} rappresenta il Modulo statico, derivante dalle prove di carico con piastra.

Ai fini del confronto **si sono poi impiegati i dati deformativi ottenuti dalle simulazioni per applicarli alle più note leggi di fatica** relative a:

- le verifiche in termini di fessurazioni per trazione alla base del pacchetto dei conglomerati bituminosi;
- le verifiche in termini di deformazioni permanenti superficiali prodotte per effetto delle deformazioni specifiche sulla sommità del sottofondo.

Per quanto riguarda la fatica e le relative verifiche per le pavimentazioni in esame, essa è un fenomeno meccanico per cui un materiale sottoposto a carichi variabili nel tempo (in maniera regolare o casuale) si danneggia fino alla rottura (cedimento a fatica o rottura per fatica) anche se sia rimasto nel suo limite d'elasticità, cioè nonostante durante la sua vita utile l'intensità massima dei carichi in questione si sia mantenuta ad un valore sensibilmente inferiore alla tensione di rottura caratteristica per quel materiale.
La rottura per fatica è quindi legata all'innesco di fenomeni di micro-deformazioni plastiche locali, indotte dalla ripetizione ciclica delle sollecitazioni.
Le leggi di fatica assunte sono tratte dalla letteratura scientifica di settore e sono ampiamente utilizzate per verifiche strutturali di pavimentazioni stradali e non.
Per le **verifiche a fatica nel lembo inferiore del pacchetto degli strati bituminosi** si è assunta la legge originariamente proposta da Verstreaten, ed adattata alla realtà italiana secondo la formulazione della società Autostrade per l'Italia S.p.A., che tiene conto dei fenomeni di autoriparazione dei conglomerati, dei tempi intercorrenti fra successive applicazioni di carico e della variabilità delle traiettorie veicolari per cui:

$$\varepsilon_N = 47{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot N^{-0{,}234}$$

con ε_N deformazione unitaria orizzontale alla rottura per trazione, per un numero N di applicazioni di carico espresso in Assi Equivalenti Standard (ESA) da 120 kN.
Ai fini della **verifica dell'ormaiamento superficiale della pavimentazione** si riporta quanto descritto in "*The Shell Bitumen Handbook*" (2003) secondo il quale lo sviluppo di cedimenti superficiali si genera dall'accumulo di deformazioni permanenti all'interno della sovrastruttura. Un calcolo della profondità dei cedimenti per via analitica è alquanto complesso.
Tuttavia, se le deformazioni verticali del piano di posa della pavimentazione sono mantenute al di sotto di un certo livello, l'esperienza ha mostrato come non si verifichino condizioni gravose di cedimento, a meno che i materiali superficiali non siano mal progettati o non adeguatamente compattati. Pertanto, il calcolo della pavimentazione nei confronti dei cedimenti si riduce al controllo delle deformazioni specifiche verticali sulla sommità del piano di posa.
É dunque possibile calcolare il numero di ripetizioni di carico ammissibili per limitare le deformazioni permanenti della pavimentazione, mediante la formula che lega la deformazione unitaria verticale ε_{zz} sul piano di posa con il numero N di applicazioni di carico di Assi Standard ESA da 80 kN:

$$N_{80\kappa N} = 10^6 \cdot (\varepsilon_{zz}/569)^{-4}$$

Il valore di ESA da 80 kN che si ricava può essere convertito in numero di ESA da 120 kN impiegando il fattore di equivalenza, riportato nelle specifiche del "Road Note 29" inglese, in questo caso pari a 5,7.
Sono infine state valutate le sollecitazioni di trazione ammissibili per gli strati in conglomerato bituminoso e per la fondazione in misto cementato, al fine di verificare che gli stati tensionali indotti dal carico considerato siano lontani dai valori caratteristici a rottura.

2.3 ANALISI DEI RISULTATI

Si riportano, nelle Figure 12, 13, 14 e 15 seguenti, i **risultati del calcolo di confronto condotto con software Alize-LCPC**. L'output è fornito direttamente in forma tabellare e consente di confrontare agevolmente i valori tenso-deformativi calcolati nei punti di controllo per la pavimentazione di progetto originario e per quella di variante proposta.
Il confronto si basa sui punti di controllo (Zcalcul) preliminarmente individuati, per ognuno dei quali si riportano le deflessioni superficiali, le deformazioni specifiche e le tensioni sotto carico.
In particolare, la deflessione superficiale indica l'attitudine del piano viabile a deformarsi sotto carico ed esprime una sintesi della capacità portante complessiva della sovrastruttura; le deformazioni orizzontali alla base dei conglomerati bituminosi rappresentano il valore di controllo per la genesi di fessurazioni di tipo bottom-up ed è opportuno che siano le più contenute possibili; analogamente, le deformazioni verticali sulla sommità del sottofondo descrivono, indirettamente, la capacità di diffusione dei carichi da parte del pacchetto sovrastante e consentono di esprimere un giudizio sulle potenziali deformazioni permanenti a cui la pavimentazione potrà essere soggetta.
Su questi ultimi parametri sono basati anche i calcoli a fatica per il confronto relativo del numero di applicazioni di carico possibili prima che insorga la crisi a livello del punto di controllo.
In termini di tensioni, è bene che quelle orizzontali di trazione alla base dei conglomerati bituminosi e dello strato in misto cementato siano minori dei valori tipici a rottura, così come lo siano quelle verticali sulla sommità del sottofondo.

thick. (m)	modulus (MPa)	Poisson coeff.	Zcalcul (m)	EpsX (µdef)	EpsY (µdef)	EpsZ (µdef)
0,050	4200,0	0,350	0,000	22,2	22,5	73,7
	unbond.		0,050	-89,2	-105,8	206,7
0,080	3700,0	0,350	0,050	82,6	106,1	13,8
	bonded		0,130	-13,6	-12,7	99,6
0,100	3000,0	0,350	0,130	-13,6	-12,7	119,6
	bonded		0,230	-28,6	-40,8	84,0
0,200	2250,0	0,250	0,230	-28,6	-40,8	106,4
	bonded		0,430	-67,8	-97,2	67,7
infinite	140,0	0,450	0,430	-67,8	-97,2	199,7

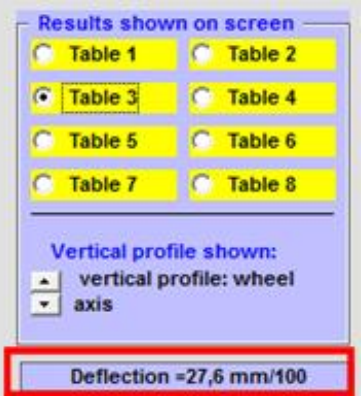

Figura 12: Risultati per le deformazioni specifiche per la pavimentazione originaria.

thick. (m)	modulus (MPa)	Poisson coeff.	Zcalcul (m)	EpsX (µdef)	EpsY (µdef)	EpsZ (µdef)
0,040	5000,0	0,350	0,000	63,6	83,3	3,0
	bonded		0,040	24,6	33,2	45,3
0,060	8000,0	0,350	0,040	24,6	33,2	16,6
	bonded		0,100	-24,3	-30,4	61,8
0,120	3000,0	0,350	0,100	-24,3	-30,4	115,7
	bonded		0,220	-27,9	-40,7	69,5
0,200	2250,0	0,250	0,220	-27,9	-40,7	81,0
	bonded		0,420	-56,3	-78,2	54,7
infinite	140,0	0,400	0,420	-56,3	-78,2	178,8

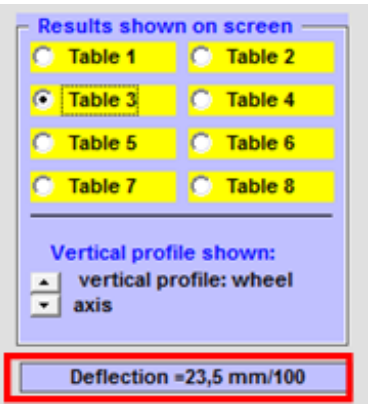

Figura 13: Risultati per le deformazioni specifiche per la pavimentazione alternativa.

Figura 14: Risultati per le tensioni per la pavimentazione originaria.

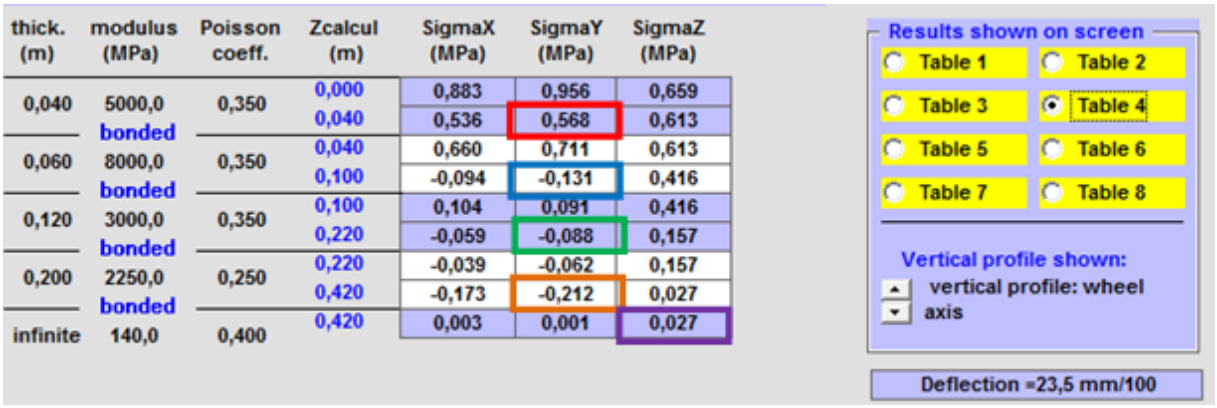

Figura 15: Risultati per le tensioni per la pavimentazione alternativa.

Di seguito sono **analizzati i risultati della simulazione al multistrato elastico, suddivisi per strato delle sovrastrutture in esame**. Il software Alize-LCPC consente inoltre di restituire in forma grafica 2D o 3D gli andamenti dei vari parametri sotto l'area soggetta al carico.

Confronto della deflessione superficiale massima u_{zz}:

Per la sovrastruttura di progetto originaria è stata calcolata una deflessione pari a 0,276 mm. Il valore calcolato per la sovrastruttura alternativa è inferiore e pari a 0,235 mm. La verifica di confronto è pertanto soddisfatta e, nella sovrastruttura alternativa proposta, si ottiene una riduzione del 15 % della freccia massima sulla sommità del pacchetto stradale (Figura 16).

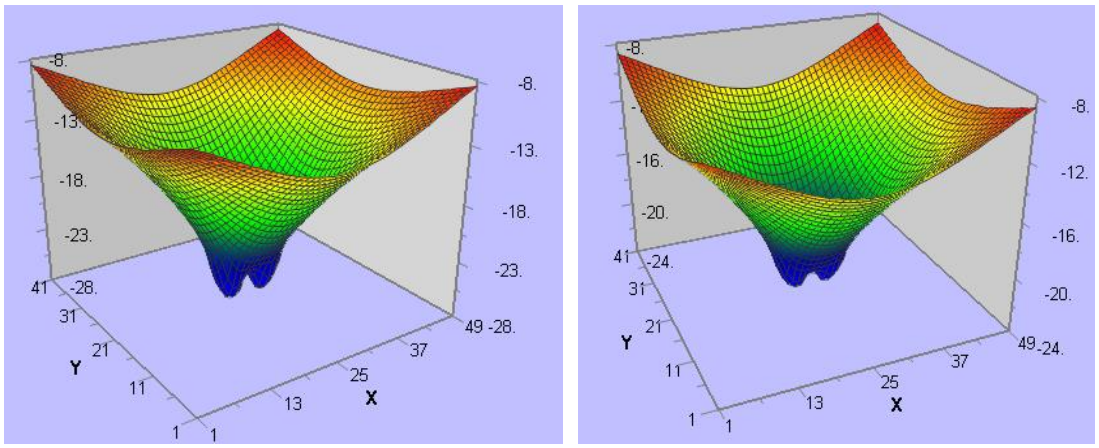

Figura 16: Deflessioni verticali in superficie per la pavimentazione originaria (sx) alternativa (dx) (mm/100).

Confronto delle tensioni alla base dello strato di usura:

Per la pavimentazione originaria, alla base dello strato di usura si osserva un importante livello tensionale di trazione del conglomerato bituminoso pari a 0,287 MPa, che si genera per via del ridotto collegamento all'interfaccia con lo strato sottostante, determinato dalla presenza della geogriglia in fibra di vetro. La rimozione di quest'ultima nella soluzione alternativa, comporta un più elevato collegamento tra gli strati che si traduce, di fatto, nella totale eliminazione di stati di trazione alla base dello strato di usura.

Verifica delle deformazioni e delle tensioni orizzontali alla base dello strato di collegamento:

Per una soddisfacente resistenza a fatica dei conglomerati bituminosi le deformazioni unitarie di trazione orizzontali debbono risultare inferiori ai 300 με. Per lo strato di collegamento della sovrastruttura alternativa è stato calcolato un livello deformativo di trazione pari a 30,4 με, sensibilmente al di sotto di valori critici di trazione.

Lo stato tensionale di trazione alla base dello strato di bituminoso di collegamento per la pavimentazione alternativa è pari a 0,13 MPa, valore di molto inferiore alle tensioni di trazione critiche per i conglomerati bituminosi di tipo Alto Modulo. A titolo esemplificativo, facendo riferimento a sperimentazioni svolte presso noti centri di ricerca, i valori massimi di resistenza a trazione indiretta a 25 °C per tali miscele possono essere assunti superiori agli 1,20 MPa.

Verifica delle deformazioni e delle tensioni orizzontali alla base dello strato di base:

Come detto, il valore della deformazione unitaria orizzontale di trazione alla base dei conglomerati bituminosi quando sottoposti al massimo carico statico non deve superare, di norma, i 300 με.

Il valore calcolato alla base del pacchetto bituminoso della sovrastruttura alternativa è pari a 40,7 με, valore di molto inferiore agli stati deformativi critici per strati bituminosi.

Per conglomerati di tipo Cold Mix, in maniera cautelativa, si può assumere un valore minimo di resistenza a trazione indiretta a 25°C pari a 0,50 MPa. Lo stato tensionale di trazione alla base del pacchetto bituminoso per la pavimentazione alternativa è pari a 0,088 MPa, valore nettamente inferiore alle tensioni di trazione critiche per strati bituminosi riciclati a freddo (Figura 17).

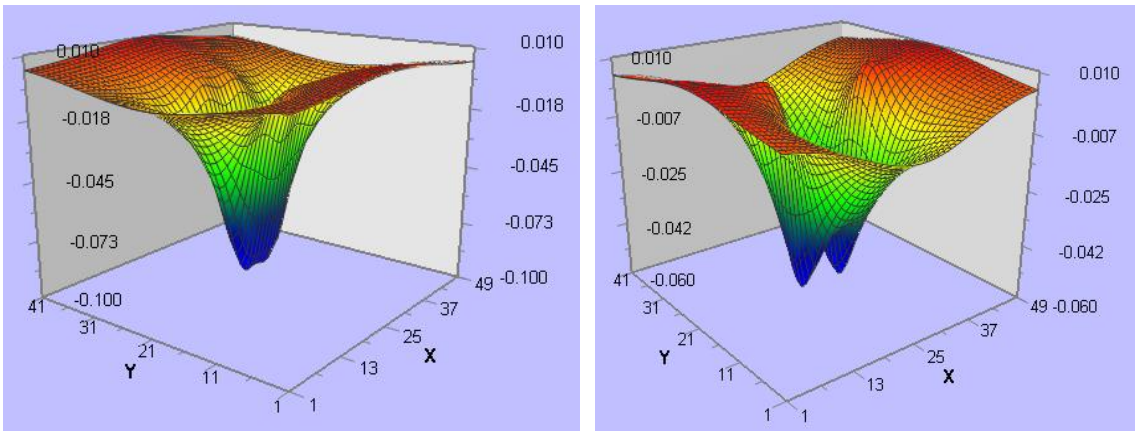

Figura 17: Andamento delle tensioni nel piano YY (sx) e XX (dx) alla base dei c.b. (MPa).

Verifica e confronto a fatica alla base dei conglomerati bituminosi:

Il confronto a fatica per il pacchetto dei conglomerati bituminosi può essere eseguito calcolando il numero di passaggi di Assi Standard da 120 kN che può verificarsi prima del danneggiamento fessurativo alla base del pacchetto bituminoso, ottenuto inserendo la deformazione unitaria di trazione alla base dei conglomerati bituminosi nella formula di Verstreaten sopra citata.

Dal calcolo per la sovrastruttura di progetto originaria si ottengono $6{,}69 \cdot 10^8$ applicazioni di carico espresse in ESA 120 kN per lo sviluppo di fessurazioni per trazione alla base dei conglomerati bituminosi. Dal calcolo a fatica per la sovrastruttura alternativa, si ottiene un numero di $6{,}76 \cdot 10^8$ applicazioni prima del deterioramento del pacchetto, comportando un aumento dell' 1% dei cicli di carico ammissibili.
Si osservi come tale verifica di confronto non tenga conto delle condizioni di danneggiamento in cui verseranno gli strati di usura e di collegamento sovrastanti. Per quanto visto lo strato di usura della sovrastruttura originaria sarà soggetto a stati di trazione che ne ridurranno man mano le caratteristiche meccaniche a svantaggio degli strati sottostanti.

Verifica della tensioni di trazione alla base della fondazione in Misto Cementato:
Il valore minimo generalmente ammesso per le tensioni di trazione in un misto cementato, legato con un dosaggio di cemento indicativamente pari al 3 % in peso sugli aggregati, è pari a circa 0,35 MPa. Ricordando che il misto cementato è considerato già fessurato nel calcolo al multistrato elastico, la tensione di trazione calcolata per la sovrastruttura alternativa in esame è pari a 0,21 MPa, valore inferiore agli stati tensionali critici per lo strato. Per la sovrastruttura originaria invece è stato calcolato un valore di tensione a trazione di 0,26 MPa. La verifica è pertanto soddisfatta e, nella sovrastruttura alternativa proposta, si ottiene una riduzione del 19 % della tensione di trazione alla base dello strato di fondazione (Figura 18).

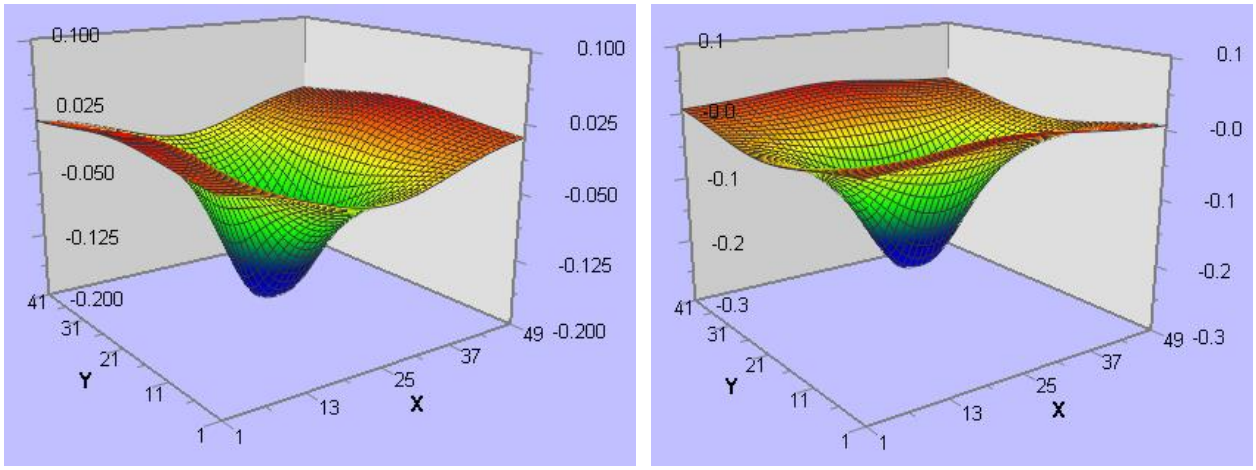

Figura 18: Andamento delle tensioni nel piano XX (sx) e YY (dx) alla base dello strato di fondazione (MPa).

Confronto delle tensioni verticali sul sottofondo:
La tensione verticale calcolata sul sottofondo per la pavimentazione originaria è pari a 0,034 MPa. Nella proposta alternativa si ottiene una tensione di compressione pari a 0,027 MPa, corrispondente ad una riduzione del 20 % dello stato tensionale (Figura 19).

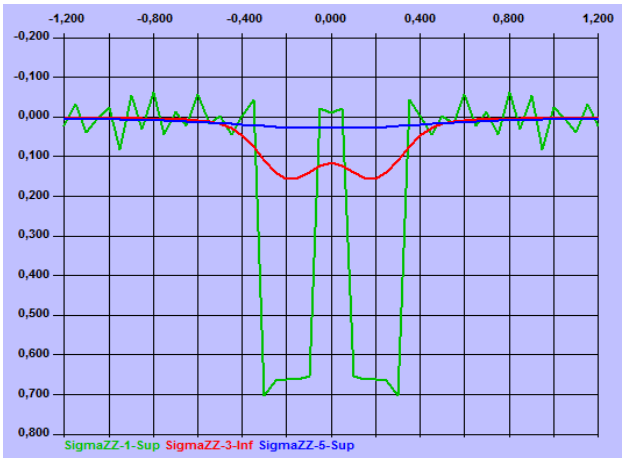

Figura 19: Andamento delle tensioni verticali a varie profondità, per la pavimentazione alternativa (MPa).

Confronto della resistenza alle deformazioni permanenti:

Il valore della deformazione specifica verticale calcolato nella parte sommitale del sottofondo, per la sovrastruttura originaria, è pari a 199,7 με a cui corrispondono, secondo la formulazione della Shell Bitumen e la successiva trasformazione in assi da 120 kN del Road Note 29 inglese, $6{,}59 \cdot 10^{7}$ applicazioni di carico. Con la proposta progettuale alternativa, si ottiene una riduzione del 10 % della deformazione verticale di compressione, pari a 178,8 με a cui corrispondono $1{,}03 \cdot 10^{8}$ passaggi di assi da 120 kN, corrispondenti ad un incremento di durabilità della sovrastruttura nei confronti dell'ormaiamento del 55 %.

3 CONCLUSIONI

Le pavimentazioni stradali alternative proposte r**ispondono positivamente sia alle verifiche degli stati tenso-deformativi semplici, sia a quelle di fatica e di resistenza alle deformazioni permanenti**, mostrando un netto miglioramento della durabilità delle sovrastrutture rispetto alle soluzioni progettuali originarie, con conseguenti vantaggi in termini di vita utile e, quindi, di manutenzione in fase di esercizio.
Sulla base dei dati ottenuti dalle modellazioni risulta giustificata sia l'eliminazione della geogriglia in fibra di vetro, che in questo caso non pare contribuire al rinforzo strutturale, sia l'eliminazione del trattamento a cemento del sottofondo, in quanto la sola stabilizzazione meccanica, è in grado di garantire adeguate caratteristiche di portanza anche senza interventi di stabilizzazione con leganti.
In sintesi, i vantaggi offerti dalle soluzioni alternative proposte per le pavimentazioni di Tipo 1 e 2 sono:

- **incremento della prestazione strutturale e della vita utile dei pacchetti** secondo quando dimostrato dal calcolo comparativo al multistrato elastico condotto con Alize-LCPC;
- **utilizzo di conglomerati bituminosi con bitumi modificati in miscele dalle prestazioni notoriamente superiori** (SMA ed Alto Modulo), con conseguente miglioramento delle caratteristiche meccaniche degli strati, della durabilità dei pacchetti e delle caratteristiche funzionali del piano viabile ai fini della sicurezza (aderenza e regolarità);
- **impiego di materiali di riciclo (fresato) per il confezionamento dello strato bituminoso di base in Cold Mix**, con notevoli vantaggi ambientali ed economici, a parità di prestazioni, compresa la lavorazione ed il confezionamento della miscela in impianto mobile Wirtgen KMA220;
- **miglioramento delle fasi operative di cantiere, grazie alla produzione a piè d'opera del Cold Mix e del Misto Cementato per mezzo dell'impianto mobile Wirtgen KMA220**, con sensibili vantaggi in termini ambientali per via della riduzione degli spostamenti per il trasporto delle miscele, in termini di tempo, grazie alla elevata produzione oraria ed in termini di qualità dei prodotti, grazie al controllo del proporzionamento dei costituenti delle miscele;
- **miglioramento dell'impatto del cantiere sull'ambiente esterno**, per effetto dell'eliminazione delle lavorazioni per la stabilizzazione a cemento del terreno di sottofondo e dell'impiego dell'impianto KMA220;
- **eliminazione della fornitura e posa in opera della geogriglia in fibra di vetro** posta tra lo strato di usura e quello di collegamento.