

**S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLÌ  
LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA  
DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389**

**PROGETTO DEFINITIVO**

COD. CA22

PROGETTAZIONE: ANAS – DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

**PROGETTISTA E RESPONSABILE INTEGRATORE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE**

Ing. M. RASIMELLI  
Ordine Ingegneri Provincia di Perugia n. A632

**GRUPPO DI PROGETTAZIONE**

Ing. D. BONADIES	Ing. M. PROCACCI
Ing. P. LOSPENNATO	Ing. R. CERQUIGLINI
Ing. S. PELLEGRINI	Ing. M. CARAFFINI
Ing. A. POLLI	Geom. M. BINAGLIA
Ing. M. MARELLI	
Ing. A. LUCIA	

**IL RESPONSABILE DEL S.I.A.**

Arch. E. RASIMELLI

**IL GEOLOGO**

Dott. S. PIAZZOLI

**COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE**

Ing. L. IOVINE

**VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO**

Ing. F. RUGGIERI

PROTOCOLLO

DATA:

**IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:**



Str. del Colle, 1/a - Fraz. Fontana  
06132 Perugia - Italia



UNI ISO 9001:2008



UNI EN ISO 14001:2004

MANDATARIA



**PINI SWISS ENGINEERS SA**  
Via Basso 7 - 6900 Lugano - Svizzera

MANDANTE



**PINI SWISS ENGINEERS Srl**  
Via Cavour 2 - 22074 Lomazzo (CO) - Italia

MANDANTE

**PROGETTO STRADALE**

**SEZIONI TRASVERSALI, TIPOLOGICI E PARTICOLARI COSTRUTTIVI  
RELAZIONE DI CALCOLO PAVIMENTAZIONE STRADALE**

CODICE PROGETTO

PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.
D P C A 2 2	D	2 0 0 2

NOME FILE  
P00\_PS00\_TRA\_RE01\_A

CODICE ELAB.	P 0 0	P S 0 0	T R A	R E 0 1
--------------	-------	---------	-------	---------

REVISIONE

PAG.

A

1 di 33

D					
C					
B					
A	PRIMA EMISSIONE	SETT. 2020	LOSPENNATO	LOSPENNATO	RASIMELLI
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 2 di 33</p>
---	--

## SOMMARIO

1	Introduzione .....	3
2	Il misto cementato .....	4
3	Il bitume modificato .....	7
4	Il progetto delle sovrastrutture stradali flessibili .....	10
5	Il dimensionamento sovrastrutturale con metodo razionale .....	12
6	Verifica a fatica dei materiali legati .....	14
6.1	Materiali legati a bitume .....	14
6.2	Miscele legate a cemento.....	14
7	Verifica all'ormaiamento .....	16
7.1	Materiali legati a bitume .....	16
7.2	Materiali non legati.....	19
8	La pavimentazione di progetto .....	20
9	Dati di traffico .....	21
10	Parametri di calcolo assunti .....	23
11	Analisi dei risultati .....	27
12	Conclusioni .....	30
13	Bibliografia .....	31
	Appendice A – Output di calcolo del software BISAR .....	32

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 3 di 33</p>
--	--

## 1 INTRODUZIONE

Nell'ambito del progetto definitivo della "SS 389 Tronco Villanova – Lanusei – Tortoli; Lotto Bivio Villagrande – Svincolo Arzana" si prevede una pavimentazione di tipo semirigido, costituita da uno strato di usura in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard di 4 cm, uno strato di binder in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard di 6 cm, uno strato di base in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard di 12 cm, uno strato di sottobase in misto cementato di 20 cm e uno strato di fondazione in misto granulare stabilizzato di 25 cm.

La verifica degli spessori ipotizzati per i vari strati è stata eseguita mediante il calcolo razionale della pavimentazione mediante il software BISAR, sviluppato dalla Shell Research.

Tale software permette di calcolare le tensioni, le deformazioni e gli spostamenti in ogni punto di un sistema a multistrato elastico sottoposto a uno o più carichi uniformemente distribuiti su di un'impronta circolare. A loro volta, le tensioni e le deformazioni costituiscono i parametri di ingresso delle leggi di decadimento (leggi di fatica e ormaiamento) relative a ciascun materiale. Tali leggi permettono di stabilire il numero di ripetizioni di carico ammissibile secondo un meccanismo di rottura che non arriva al collasso istantaneo, ma per progressiva riduzione del livello di servizio fino a valori non più tollerabili. Il numero di cicli di carico che rappresenta la vita utile della pavimentazione è stato quindi confrontato con il traffico previsto nello specifico studio redatto da ANAS.

<p>ANAS S.p.A. S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389 <b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A Data: Settembre 2020 Pag. 4 di 33</p>
---	--

## 2 IL MISTO CEMENTATO

Il misto cementato è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego e/o di riciclo impastata con acqua e cemento. Dopo un adeguato tempo di stagionatura, il misto cementato assume una resistenza meccanica durevole ed apprezzabile mediante prove eseguibili su provini di forma assegnata.

L'inserimento di uno strato di misto cementato nella sovrastruttura stradale conferisce una maggior rigidità alla pavimentazione, garantendo una maggiore distribuzione dei carichi di traffico sulla fondazione e sul sottofondo e una riduzione delle deformazioni nei sovrastanti strati in conglomerato bituminoso.

Già da molti anni si usa mettere uno strato di misto cementato nelle pavimentazioni, in particolare in quelle soggette ad un elevato transito di mezzi pesanti. Il miglioramento prestazionale in termini di vita utile è notevole come risulta dai modelli di calcolo utilizzati per il dimensionamento delle pavimentazioni stradali e dalle esperienze maturate nel tempo.

Per la produzione del misto cementato vengono normalmente utilizzati materiali di primo impiego (aggregati ottenuti dalla frantumazione di materiale lapideo estratto da cave) e/o di riciclo (misti granulari di vecchie fondazioni stradali, scarti di costruzione o demolizione C&D, fresato di conglomerato bituminoso, ecc.), nel rispetto delle norme ambientali.

Il misto cementato viene per lo più confezionato in impianti fissi, trasportato in cantiere e posto in opera mediante vibrofinitrice. Poiché non sono necessari apparati di grosse dimensioni, come per i conglomerati bituminosi a caldo, sono assai diffusi anche gli impianti mobili che si possono facilmente installare nei pressi del cantiere.

Negli ultimi anni, con il progressivo affermarsi anche in Italia delle tecniche di stabilizzazione con calce e/o cemento, è via via aumentata la disponibilità di macchine stabilizzatrici (pulvimixer) ed il conseguente loro utilizzo nella miscelazione in sito del misto cementato.

Le Norme Tecniche dei più diffusi Capitolati prescrivono per i misti cementati il fuso granulometrico e le caratteristiche degli aggregati, i valori di resistenza a compressione e trazione indiretta per la miscela, i requisiti di addensamento e portanza per lo strato finito.

Tali parametri possono essere facilmente raggiunti sia che si utilizzi la metodologia tradizionale (impianto fisso di miscelazione e vibrofinitrice), sia che si utilizzi il pulvimixer.

Quando la miscela viene prodotta con impianti fissi o mobili installati in cantiere la stesa viene eseguita impiegando macchine finitrici. Il tempo massimo tra l'introduzione dell'acqua nella miscela del misto cementato e l'inizio della compattazione non deve superare i 60

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 5 di 33</p>
---	--

minuti.

Le operazioni di compattazione dello strato sono realizzate con apparecchiature idonee a produrre il grado di addensamento e le prestazioni richieste. La stesa della miscela non deve essere eseguita con temperature ambiente inferiori a 5 °C e superiori a 30 °C, mai sotto la pioggia.

Qualora le condizioni climatiche (temperatura, soleggiamento, ventilazione) comportino un'elevata velocità di evaporazione, è necessario provvedere ad un'adeguata protezione delle miscele sia durante il trasporto che durante la stesa.

Il tempo intercorrente tra la stesa di due strisce affiancate non deve superare di norma le due ore per garantire la continuità della struttura.

Particolari accorgimenti devono adottarsi nella formazione dei giunti longitudinali che andranno protetti con fogli di polietilene o materiale simile. Il giunto di ripresa deve essere ottenuto terminando la stesa dello strato a ridosso di una cassaforma e togliendo la cassaforma al momento della ripresa della stesa. Se non si fa uso della cassaforma si deve, prima della ripresa della stesa, provvedere a tagliare l'ultima parte dello strato precedente, in modo che si ottenga una parete perfettamente verticale. Non devono essere eseguiti altri giunti oltre quelli di ripresa.

Nei casi in cui la miscelazione avviene direttamente in sito con pulvimixer, la miscela di aggregati viene riportata sullo strato di fondazione dopo aver accertato per questo la rispondenza ai requisiti geometrici, di compattazione e di portanza,

Prima di procedere allo spandimento del cemento, si dovrà stabilire l'umidità del materiale in sito, procedendo con metodi speditivi, ed eseguendo le verifiche in più punti ed a più profondità.

In presenza di valori che si discostano di  $\pm 2\%$  dall'umidità ottima determinata in laboratorio, si deve aerare il materiale in caso di eccesso di umidità, oppure annaffiare se troppo asciutto, per raggiungere il grado di umidità desiderato.

Acquisita l'umidità ottima, o comunque compresa nel range sopra definito, si procede alla stesa del cemento, mediante impiego di uno spanditore a dosaggio volumetrico regolato in funzione della velocità di avanzamento, tale da raggiungere la percentuale prevista in sede di progetto della miscela.

Ultimata la stesa del cemento si esegue la miscelazione, che deve essere realizzata con una o due passate di pulvimixer, e la compattazione con rullo vibrante, di peso superiore a 12 t e rullo gommato di peso superiore a 24 t, fino a raggiungere densità del secco pari (o superiori) al 98% di quella ottenuta in laboratorio con la prova AASHTO modificata.

Lo spandimento del cemento deve interessare una superficie non superiore a quella che

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 6 di 33</p>
--	--

può essere trattata nella stessa giornata lavorativa e non deve mai essere effettuato in presenza di forte vento per garantire la sicurezza degli addetti e l'esattezza del dosaggio della miscela.

Le modalità operative indicate e le macchine impiegate comportano la creazione di giunti trasversali e longitudinali. I giunti longitudinali ottenuti dalla lavorazione di strisce contigue devono risultare sovrapposti per almeno 15 cm. Nei giunti trasversali la miscela già costipata va ripresa in tutte quelle zone nelle quali il contenuto di cemento, lo spessore, o il grado di compattazione risultino inadeguati e/o disomogenei. Le riprese devono essere eseguite all'inizio della successiva giornata lavorativa, nello strato indurito, in modo da presentare superficie verticale, per evitare che si manifestino successive fessurazioni.

Le condizioni ambientali richieste per la lavorazione sono le stesse indicate per la stesa con vibro finitrice.

Subito dopo il completamento della rullatura, sullo strato finito deve essere applicato un velo protettivo di emulsione bituminosa acida al 60% di bitume, in ragione di 1,2 kg/m<sup>2</sup>, immediatamente ricoperto con sabbia o graniglia piccola.

Il tempo di maturazione protetta non deve essere inferiore a 72 ore, durante le quali il misto cementato non deve essere esposto al gelo.

Il transito di cantiere potrà essere ammesso sullo strato a partire dal terzo giorno dopo quello in cui è stata effettuata la stesa e limitatamente ai mezzi gommati. Strati eventualmente compromessi dalle condizioni meteorologiche o da altre cause devono essere rimossi e sostituiti a totale cura e spese dell'Impresa.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 7 di 33</p>
---	--

### 3 IL BITUME MODIFICATO

L'esigenza di migliorare le caratteristiche reologiche dei bitumi ha portato all'introduzione sul mercato di prodotti modificati con sostanze di natura diversa (agenti di modifica), le quali consentono di alterare il comportamento originale del bitume.

Gli agenti di modifica oggi disponibili possono essere di varie categorie e selezionati sulla base di scelte progettuali, produttive o ambientali. Tra i più comuni ci sono le gomme provenienti dal riciclo di pneumatici, i filler, le cere paraffiniche, le fibre, i catalizzatori e i polimeri.

La maggior parte degli additivi aggiunti al bitume puro è di natura polimerica. Il polimero è una sostanza formata da macromolecole la cui struttura è composta da piccole unità monometriche di una (omopolimero) o più specie (copolimero). La grande varietà di polimeri a disposizione permette il miglioramento mirato di specifiche prestazioni del bitume offrendo così un'ampia versatilità del prodotto finito.

I polimeri maggiormente impiegati in campo stradale sono i termoplastici di tipo elastomerico o plastomerico e danno origine, a seconda della loro concentrazione, natura e compatibilità con il bitume, a diverse situazioni microstrutturali cui corrispondono differenti proprietà del legante (Isacsson and Lu., 2000).

Gli elastomeri sono copolimeri costituiti da blocchi di estremità stirenici e blocchi mediani gommosi solitamente identificati come SBS (stirene-butadiene-stirene), SIS (stirene-isoprene-stirene) e SEBS (stirene-etilene/butadiene-stirene). L'impiego di questi polimeri nel bitume permette il miglioramento del comportamento elastico e duttile della miscela finale con conseguente incremento della deformazione e della sollecitazione a rottura.

D'altra parte i plastomerici sono caratterizzati da regioni nelle quali le macromolecole si dispongono in strutture regolari e i più comuni sono il polietilene (PE), il polipropilene (PP), l'etilene-vinilacetato (EVA). In seguito alla miscelazione con il bitume, questi polimeri non modificano in maniera significativa la risposta elastica della miscela ma ne determinano un sostanziale incremento della sollecitazione a rottura.

Generalmente il polimero viene miscelato con il bitume per mezzo di mescolatori ad alto gradiente di taglio che ne consentono l'omogenea dispersione all'interno della massa. Tuttavia, non tutti i bitumi sono adatti ad essere modificati in quanto devono sussistere le condizioni di compatibilità tra il legante e il polimero (Santagata E., 1996). In particolare, le condizioni di compatibilità dipendono dal polimero (peso molecolare, solubilità) e dal bitume (caratteristiche e rapporto asfaltini/malteni).

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 8 di 33</p>
---	--

La modifica del bitume, in funzione della quantità e della tecnica, è detta “soft” o “medium” se le caratteristiche meccaniche variano entro un intervallo ristretto o “hard” se si influenza in maniera sostanziale il comportamento reologico del bitume stesso potendo assimilarlo a quello del polimero integrato.

Per livelli di additivazione modesti (modifica “soft”) la fase continua è costituita dal bitume all’interno del quale è disperso il polimero che rinforza la matrice bituminosa alle alte temperature e ne mitiga la fragilità alle basse temperature. Nel caso in cui venga superato un certo valore di soglia del contenuto di polimero (modifica “hard”), all’interno del sistema si forma una matrice polimerica continua nella quale il bitume funge da plastificante. Nel bitume modificato hard avviene la cosiddetta inversione di fase per cui si passa da una matrice di bitume in cui sono disperse le molecole di polimero ad una fase polimerica continua nella quale risultano intrappolate le molecole di asfalteni. Poiché le proprietà della miscela dipendono dalla fase dominante, nel primo caso sono fortemente influenzate dagli asfalteni del bitume, mentre nel secondo caso sono principalmente dipendenti dalle caratteristiche e dal dosaggio del polimero. Infine per livelli intermedi (modifica “medium”) la struttura del sistema è mista, costituita da due fasi continue interconnesse.

Il miglioramento del bitume, al fine di ottenere specifiche prestazioni, permette enormi vantaggi sia dal punto di vista della resistenza meccanica che delle caratteristiche funzionali (Bahia, 2001, Bonnetti et al., 2002, Airey, 2004, Bocci et al., 2006).

In generale i miglioramenti ottenuti dalla modifica con polimeri del bitume sono:

- Maggiore resistenza alle deformazioni permanenti
- Maggiore resistenza a rottura
- Incremento delle proprietà elastiche
- Maggiore viscosità del legante alle temperature di servizio
- Minore suscettibilità termica
- Maggiore flessibilità alle basse temperature
- Maggiore coesione alle alte temperature
- Maggiore resistenza all’acqua e allo spogliamento

Nella tabella 2.1 sono riportate le caratteristiche del bitume modificato hard proposto per gli strati di base, binder ed usura.



<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 9 di 33</p>
---	--

<b>BITUME MODIFICATO HARD</b>			
<i>Parametro</i>	<i>Normativa</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori richiesti</i>
Penetrazione a 25°C	UNI EN1426	dmm	50-70
Punto di rammollimento	UNI EN1427	°C	> 70
Viscosità dinamica a 160°C, $\gamma = 10s^{-1}$	UNI EN 13702-1	Pa·s	max 0.8
Punto di rottura (Fraass)	UNI EN12593	°C	≤ - 15
Tube test 3 gg @ 180°C	UNI EN13399	°C	P.A. < 3
Ritorno elastico a 25°C	UNI EN13398	%	> 75
<b>Valori dopo RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test UNI EN 12607/1</b>			
Percentuale del valore di penetrazione residua a 25°C dopo RTFOT	UNI EN1426	%	≥ 60
Innalzamento del punto di rammollimento dopo RTFOT	UNI EN1427	°C	≤ 10

*Tabella 2.1: Caratteristiche meccaniche del bitume modificato hard*

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI          LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 10 di 33</p>
---	---

## **4 IL PROGETTO DELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI FLESSIBILI**

Le pavimentazioni stradali svolgono la funzione di ripartire sul terreno i carichi trasmessi dai veicoli, in particolare da quelli pesanti.

In linea di principio il metodo di progetto di una pavimentazione stradale non differisce sostanzialmente da quello di una qualsiasi altra struttura dell'ingegneria civile: note le caratteristiche meccaniche dei materiali da impiegare ed i carichi trasmessi dai veicoli, la sovrastruttura deve garantire un certo livello di integrità entro la così detta vita utile.

In pratica però la grande variabilità dei materiali che possono essere impiegati, la difficoltà di definire compiutamente il danno subito e i livelli di carico, rendono il problema estremamente complesso.

Due sono i punti fondamentali che distinguono il progetto di una pavimentazione stradale da quello di una qualsiasi altra struttura civile:

1. la difficoltà di individuare la natura e le caratteristiche intrinseche dei materiali impiegati, estremamente variabili con le condizioni climatiche e con la modalità di applicazione dei carichi;
2. il trascurare gli effetti prodotti dal peso proprio, in quanto la loro incidenza sullo stato tenso-deformativo è minimo rispetto a quella dei carichi accidentali (veicoli) e delle condizioni ambientali (temperatura e umidità).

Le moderne tecniche numeriche, basate sull'applicazione della teoria degli elementi finiti o del multistrato elastico, consentono di ricostruire al calcolatore un modello teorico della pavimentazione, costituita dalla sovrapposizione di differenti strati di conglomerato bituminoso, approssimando in modo più fedele possibile il suo comportamento reale. Tale algoritmo rientra tra i "metodi razionali" per il calcolo delle pavimentazioni flessibili che negli ultimi anni hanno sostituito i "metodi empirici" basati invece sull'osservazione diretta di tronchi stradali sperimentali.

I metodi fondati su una valutazione "razionale", cioè "per via di calcolo", si basano sullo studio del comportamento tenso-deformativo dei vari strati della pavimentazione attraverso cui si procede:

1. alla verifica del danno da fatica accumulato nei vari strati durante la vita utile della pavimentazione (legge di Miner);
2. alla verifica della profondità delle ormaie prodotte al termine della vita utile, le quali non

<p style="text-align: center;">ANAS S.p.A. S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p style="text-align: center;"><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A Data: Settembre 2020 Pag. 11 di 33</p>
--	---

devono superare il limite di tollerabilità per la funzionalità e la sicurezza del piano viabile.

Questo consente di associare ad ogni pavimentazione stradale, sottoposta ad un certo traffico, una vita utile, cioè di quel periodo di tempo, o di cicli di carico, al di là del quale la degradazione da essa subita ne rende necessario il rifacimento.

Si evidenzia che la vita utile della pavimentazione non esclude la necessità di interventi manutentivi non strutturali relativi al ripristino delle condizioni superficiali di regolarità ed aderenza.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 12 di 33</p>
---	---

## **5 IL DIMENSIONAMENTO SOVRASTRUTTURALE CON METODO RAZIONALE**

Il processo progettuale per il dimensionamento strutturale di una pavimentazione stradale si basa principalmente su cinque passaggi:

- la definizione preliminare degli spessori di ogni singolo strato;
- la scelta dei materiali da impiegare;
- la conoscenza dei dati di traffico e delle condizioni climatiche di esercizio;
- il calcolo delle tensioni indotte dall'applicazione dei carichi;
- l'applicazione degli appropriati criteri di verifica.

In particolare, la durata di una pavimentazione viene correlata al numero massimo di passaggi dell'asse standard che è in grado di sopportare prima di raggiungere il collasso strutturale.

Nota pertanto la classe di traffico assunta come riferimento, si determinerà il relativo stato tenso-deformativo indotto risolvendo la sovrastruttura tramite modelli di calcolo. Il massimo valore della deformazione orizzontale di trazione alla base degli strati legati sarà quindi utilizzato come dato di input per determinare, dalle curve di fatica, il numero massimo di cicli sopportabili dalla pavimentazione.

Sperimentalmente è stato dimostrato che tale operazione risulta cautelativa in quanto le curve di fatica determinate in laboratorio, o gli eventuali fattori di traslazione laboratorio-sito, sottovalutano il fenomeno del recupero (autoriparazione).

Tenuto conto che le proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi si modificano sensibilmente al variare della temperatura, tale operazione deve essere ripetuta per ciascun periodo dell'anno (stagione, mese, ecc.) a cui si associa una stessa temperatura media dell'aria.

In particolare, sulla base delle temperature medie mensili dell'aria ricavate dalla stazione meteo più vicina alla zona interessata dal progetto, si può risalire alla temperatura del conglomerato bituminoso alla profondità  $z$  (espressa in centimetri) secondo la nota formula introdotta di Witczak:

$$T_z = (1.467 + 0.043 \cdot z) + (1.362 - 0.005 \cdot z) \cdot T_a$$

dove  $T_z$  è la temperatura alla profondità  $z$  e  $T_a$  è la temperatura media dell'aria.

Ammettendo una ripartizione del traffico proporzionale nei giorni dell'anno di ciascun

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 13 di 33</p>
---	---

periodo (stagione, mese, ecc.), sarà possibile determinare il numero totale dei passaggi dell'asse standard che produce la rottura per fatica della pavimentazione sfruttando la legge di Miner, meglio nota come la legge "di accumulo lineare del danno da fatica".

La legge di Miner può essere enunciata nel modo seguente:

"Se  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k$  sono le ampiezze delle deformazioni corrispondenti rispettivamente ad  $n_1, n_2, \dots, n_k$  cicli di carico applicati ad un materiale senza alcun ordine particolare, si produce la rottura per fatica quando la seguente disequazione è verificata con il segno di uguaglianza:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

dove  $N_i$  è il numero di cicli di deformazione che porterebbe a rottura il materiale qualora l'ampiezza di deformazione fosse mantenuta costante pari a  $\epsilon_i$ .

Supposto di aver risolto la struttura per un numero di periodi dell'anno pari a  $k$  determinando altrettante coppie di valori ( $\epsilon_i, N_i$ ), l'equazione che consentirà di determinare il numero  $N_x$  di passaggi dell'asse standard che porta al collasso per fatica la pavimentazione sarà la seguente:

$$\sum_{i=1}^k \frac{\left(\frac{N_x}{k}\right)}{N_i} = 1$$

Una volta individuato il numero totale  $N_x$  dei passaggi riferiti all'asse standard che la pavimentazione può sopportare, la determinazione della vita utile espressa in anni è calcolata dividendo tale valore  $N_x$  per la popolazione dei veicoli annui in assi standard equivalenti.

Nel caso si decida di suddividere l'anno in quattro periodi corrispondenti alle quattro stagioni, la determinazione del numero massimo di passaggi dell'asse standard assume la seguente espressione:

$$N_{tot} = \frac{4N_{tot1} \cdot N_{tot2} \cdot N_{tot3} \cdot N_{tot4}}{N_{tot2}N_{tot3}N_{tot4} + N_{tot1}N_{tot3}N_{tot4} + N_{tot1}N_{tot2}N_{tot4} + N_{tot1}N_{tot2}N_{tot3}}$$

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLÌ</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 14 di 33</p>
---	---

## 6 VERIFICA A FATICA DEI MATERIALI LEGATI

### 6.1 MATERIALI LEGATI A BITUME

La legge di fatica assunta per l'analisi dei materiali legati a bitume è la legge di Finn.

La procedura che ha portato ad ottenere i modelli di fatica più utilizzati, tra cui il modello di Finn, è quella di determinare le prestazioni a fatica del materiale in laboratorio, per poi, attraverso opportuni fattori di traslazione, ottenere risultati compatibile con il comportamento in esercizio.

La legge di Finn può essere espressa come:

$$N_t = 10^{-3.083} \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$$

dove:

$N_t$  = è il numero di cicli di applicazione del carico, riferito all'asse standard considerato, che causa la fessurazione del 10% della superficie stradale.

$\varepsilon_t$  = è la deformazione orizzontale di trazione massima alla base degli strati legati a bitume riferita all'inizio della vita della pavimentazione.

$E$  = è il modulo elastico (espresso in MPa) dello strato più profondo in conglomerato bituminoso riferito alla temperatura effettiva dello strato stesso.

### 6.2 MISCELE LEGATE A CEMENTO

In maniera analoga a quanto esposto per le miscele trattate con cemento ed emulsione, anche gli strati in misto cementato presentano un comportamento evolutivo molto diverso a seconda che vengano considerati i primi anni di servizio (prima fase) o il periodo successivo (seconda fase).

I misti cementati nella prima fase mostrano un effettivo comportamento a fatica in cui il materiale si presenta a "blocchi" ma comunque rigido e coeso per poi fessurarsi progressivamente fino ad assumere, nella seconda fase, un comportamento simile ai misti granulari.

Benché questo cambiamento di comportamento avvenga gradualmente nel tempo, la modellazione della struttura prevede una schematizzazione in due fasi consecutive distinte tra loro:

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 15 di 33</p>
---	---

- nella prima fase la sovrastruttura viene calcolata attribuendo un valore di modulo iniziale al misto cementato e si presenta a blocchi di dimensioni da 1 a 10 volte lo spessore dello strato stesso. In questo caso viene definita la vita a fatica sulla base della massima deformazione di trazione subita dallo strato  $\epsilon_t$  e della massima deformazione di trazione ammissibile  $\epsilon_b$ . In questa fase i parametri fondamentali che entrano in gioco sono il modulo elastico iniziale, lo spessore dello strato, la massima deformazione alla base dello strato stesso e la deformazione critica;
- nella seconda fase lo strato passa da uno stato a “blocchi” di dimensioni circa uguali allo spessore dello strato ad uno stato granulare. L’interna sovrastruttura viene ricalcolata con un valore di modulo ridotto e viene applicata una legge di trasferimento che tiene in considerazione la massima tensione di compressione subita dallo strato  $\sigma_v$  e il rispettivo valore ammissibile UCS. In questa fase i parametri fondamentali che entrano in gioco sono il modulo ridotto (valore che tiene in considerazione la natura fessurato/granulare dello strato), lo spessore dello strato, la massima tensione di compressione in sommità dello strato stesso e la rispettiva tensione di compressione critica.

In tale ambito, numerose ricerche (de Beer, 1990, Theyse et al., 1996) sono state svolte al fine di fornire i valori di riferimento (in funzione dei materiali impiegati) per ognuno dei parametri sopraelencati e di tarare adeguate leggi previsionali per la vita utile dello strato cementato e le sue ripercussioni all’interno dell’intera sovrastruttura.

Andando perciò a distinguere le due fasi comportamentali dello strato in misto cementato è possibile affermare che, durante la prima fase, la deformazione di trazione è il parametro chiave nella determinazione della vita utile a fatica. La vita a fatica è definita come il numero di ripetizioni di carico che determina la riduzione del modulo fino a raggiungere un valore critico in funzione del tipo di miscela. Il criterio proposto è basato sulla seguente equazione:

$$N_f = 10^{6.84 \left(1 - \frac{\epsilon_t}{7.63 \epsilon_b}\right)}$$

Dove  $N_f$  sono il numero di cicli di carico di asse standard ammissibile durante il periodo di vita a fatica effettivo,  $\epsilon_t$  è la massima deformazione di trazione alla base dello strato e  $\epsilon_b$  è la massima deformazione di trazione ammissibile.

Infine, tale valore viene relazionato allo spessore dello strato  $d$  per mezzo di uno Shift Factor (SF), o fattore di traslazione, definito secondo la seguente equazione:

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 16 di 33</p>
---	---

$$SF = 10^{(0.00285d - 0.293)}$$

Dopo aver calcolato il numero di cicli di carico che determinano la fine della prima fase (fase a fatica con materiale non fessurato), si passa allo studio della seconda fase nella quale il materiale si comporta in maniera analoga ad uno strato granulare e la legge a cui si fa riferimento per strade ad alto traffico è la seguente:

$$N_{Ca} = 10^{8.184 \left(1 - \frac{\sigma_v}{1.2UCS}\right)}$$

Dove  $\sigma_v$  è la tensione di compressione in sommità dello strato e UCS è la tensione massima a compressione ammissibile.

In maniera analoga a quanto descritto per gli strati trattati con cemento ed emulsione, il valore totale dei cicli di carico sopportati dallo strato trattato con cemento risulta essere la somma dei cicli accumulati durante le due fasi.

$$N = N_f + N_{Ca}$$

## 7 VERIFICA ALL'ORMAIAMENTO

### 7.1 MATERIALI LEGATI A BITUME

Le “ormaie” sono definite come depressioni sotto la traccia delle ruote dei veicoli, accompagnate talvolta da rifluimenti trasversali. Per ormaia si intende quindi una depressione canalizzata e parallela all'asse stradale di una pavimentazione che si sviluppa in corrispondenza del passaggio degli pneumatici. L'ormaiamento, oltre che compromettere la resistenza strutturale della pavimentazione, determina un degrado funzionale riducendo la regolarità e di conseguenza la sicurezza ed il confort di guida dell'utente.

In generale gli elementi che contribuiscono all'ormaiamento negli strati superficiali in conglomerato bituminoso, senza cedimento degli strati portanti, possono essere diversi: gli aggregati lapidei, il tipo ed il dosaggio del bitume, la compattazione e le proprietà volumetriche della miscela bituminosa.

La tessitura superficiale e la forma degli aggregati giocano un ruolo fondamentale, specialmente in climi caldi al fine di ostacolare il rifluimento del bitume. A tale fine sono da



<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 17 di 33</p>
---	---

preferire aggregati di frantumazione ad elevata micro-rugosità rispetto agli aggregati alluvionali, lisci e tondeggianti. Dal punto di vista granulometrico risultano migliori le miscele più ricche di graniglia in quanto sviluppano elevati sforzi di attrito intergranulari che permettono la stabilità della struttura litica.

Per quanto riguarda i bitumi, si consigliano leganti duri (a più alta viscosità), stabili termicamente per dare alla miscela maggiore rigidità e minore sensibilità alle alte temperature. In tale ambito l'impiego di bitumi modificati con polimeri risulta particolarmente efficace incrementando la resistenza all'ormaiamento e la rigidità della miscela senza pregiudicare le prestazioni di flessibilità alle basse temperature. Occorre inoltre evitare le miscele troppo chiuse, con alti dosaggi di bitume, in quanto il bitume in eccesso, con temperature elevate, equivale all'aggiunta di una sostanza lubrificante tra i granuli che rende la miscela estremamente soggetta a deformarsi.

Al fine di valutare l'entità degli ammaloramento si individuano generalmente tre livelli in relazione alla profondità dell'ormaia:

- bassa gravità: per profondità inferiori ai 15 mm;
- media gravità: per profondità inferiori ai 30 mm;
- alta gravità: per profondità superiori ai 40 mm.

Per le pavimentazioni delle strade extraurbane secondarie la deformazione massima accettabile è usualmente fissata a 2 cm.

Per una valutazione più razionale del fenomeno ormaiamento e soprattutto per una oggettiva previsione del comportamento della pavimentazione a lungo termine si utilizzano specifici modelli di calcolo.

Tra i tanti modelli previsionali presenti in letteratura quello su base visco-plastica risulta particolarmente efficace nella previsione dello sviluppo delle deformazioni permanenti causate dal rifluimento del conglomerato bituminoso degli strati superficiali.

In particolare, a differenza di altri modelli, questo permette di valutare in via diretta l'influenza di alcuni parametri caratteristici dei conglomerati bituminosi il tipo ed il dosaggio del bitume.

Il meccanismo di deformazione visco-plastica degli strati superficiali è interpretato con la seguente legge:

$$\varepsilon_p = A \cdot \left( \frac{N}{f \cdot 10^3} \right)^B$$

dove  $\varepsilon_p$  è la deformazione visco-plastica degli strati superficiali,  $N$  è il numero dei cicli di carico,  $f$  la frequenza di carico,  $V_L$  il volume del bitume,  $V_v$  il volume dei vuoti,  $E^*$  il modulo

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 18 di 33</p>
---	---

complesso,  $\sigma_1$  lo sforzo principale verticale,  $\sigma_3$  lo sforzo principale orizzontale B una costante, generalmente compresa tra 0,14 e 0,35, A è una funzione della composizione della miscela e degli sforzi indotti dal carico, definita dalla relazione:

$$A = \frac{V_L}{(V_L + V_V)} \cdot \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E^*} \right)$$

Nei metodi razionali, gli sforzi  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  sono generalmente calcolati per mezzo della teoria elastica, valutando l'effetto dell'applicazione di un carico statico, ovvero l'impronta della ruota dell'asse standard da 80 kN a ruote gemellate con pressione di gonfiaggio di 577 kPa. La soluzione proposta da Boussinesq in funzione della profondità di calcolo mette in relazione le tensioni verticali e orizzontali ipotizzando il materiale come un semispazio elastico, isotropo e omogeneo caricato da una forza distribuita su di un'area circolare (impronta della ruota).

$$\sigma_1 = p \cdot (1 - \text{sen}^3 \alpha)$$

$$\sigma_3 = \frac{p}{2} \cdot (1 + 2 \cdot \nu - 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \text{sen}^3 \alpha)$$

Dove  $p$  è la pressione verticale trasmessa dallo pneumatico,  $\nu$  il coefficiente di Poisson,  $\alpha$  è l'angolo compreso tra l'orizzontale e la congiungente del bordo dell'area di impronta e il punto alle profondità di misura sotto l'asse dell'area di impronta.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 19 di 33</p>
---	---

## 7.2 MATERIALI NON LEGATI

La natura ciclica dei carichi che transitano sulla superficie stradale è tale da produrre sulla sommità dello strato di fondazione o del terreno di sottofondo delle tensioni verticali  $\sigma_z$  che possono creare avvallamenti sul piano viabile per effetto di accumulo di deformazioni plastiche  $\varepsilon_z$ . Tale evenienza è tanto più probabile quanto più elevato è il livello tenso-deformativo trasferito dalla sovrastruttura.

Analogamente a quanto visto per le leggi di fatica, esistono diversi criteri per la verifica razionale dello strato di fondazione e sottofondo.

Per lo strato di fondazione in misto granulare stabilizzato previsto nelle pavimentazioni di progetto è stata utilizzata la legge proposta dal South African Mechanistic Pavement Design and Analysis (SAMPDAM):

$$N_B = 10^{(2.605122 \cdot F + 3.707667)}$$

dove  $N_B$  è il numero di cicli riferito all'asse standard considerato che causa l'accumulo critico di deformazioni permanenti ed  $F$  è un fattore di sicurezza che si determina con la seguente formula:

$$F = \min \left[ \left( \frac{c_{term}}{1000 \cdot (|\sigma_{ZZ}| + \sigma_{XX,YY \max})} \right)_{y=0}, \left( \frac{c_{term}}{1000 \cdot (|\sigma_{ZZ}| + \sigma_{XX,YY \max})} \right)_{y=-0,1575} \right]$$

con:

$\sigma_{XX}$ ,  $\sigma_{YY}$  e  $\sigma_{ZZ}$  = valori di tensione nelle tre direzioni determinati alla profondità intermedia dello strato di fondazione;

$c_{term}$  = coefficiente tabulato in funzione del tipo di materiale granulare.

Il criterio proposto per il sottofondo stradale riprende il modello sviluppato dal Transport Research Laboratory (TRL):

$$\log N_z = -7.21 - 3.95 \cdot \log \varepsilon_z$$

dove:

$N_z$  = è il numero di cicli riferito all'asse standard considerato che causa l'accumulo critico di deformazioni permanenti;

$\varepsilon_z$  = è la deformazione verticale di compressione sulla sommità dello strato (fondazione o sottofondo).

## 8 LA PAVIMENTAZIONE DI PROGETTO

La pavimentazione di progetto è costituita da 25 cm di fondazione in misto granulare stabilizzato, 20 cm di sottobase in misto cementato, 12 cm di base in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard, 6 cm di binder in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard e 4 cm di usura in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard (figura 8.1).

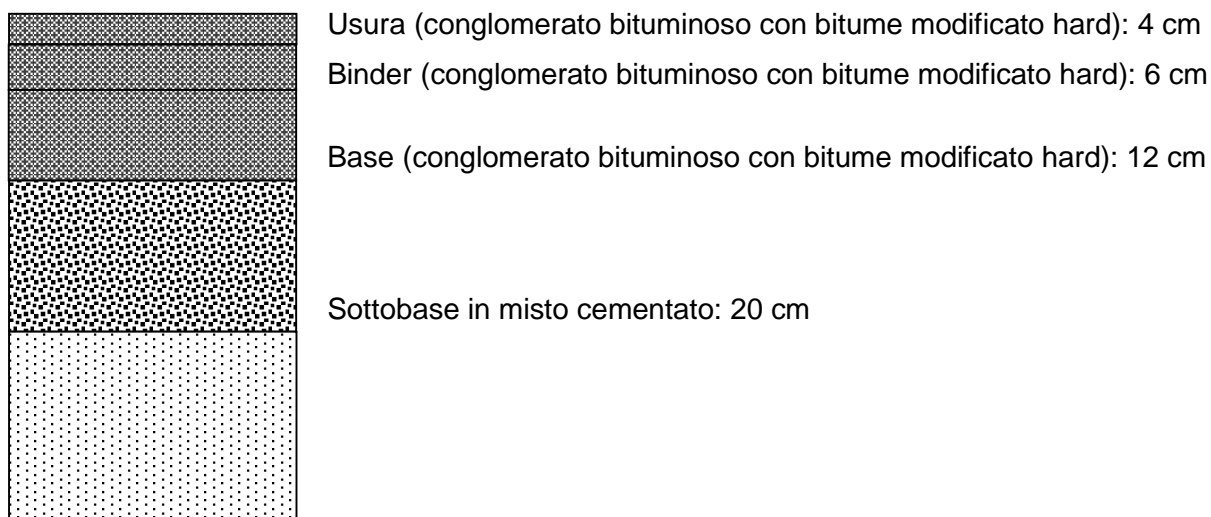


Figura 8.1: Pavimentazione di progetto

Ai fini del calcolo a fatica, è stata assunta come pavimentazione di progetto la sovrastruttura costituita da 22 cm di conglomerato bituminoso con bitume modificato hard, 25 cm di sottobase in misto cementato, 20 cm di fondazione in misto granulare stabilizzato e dal sottofondo considerato un semispazio.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 21 di 33</p>
---	---

## 9 DATI DI TRAFFICO

Nell'elaborato "Studio del Traffico", facente parte del Progetto Definitivo della S.S. 389 Tronco Villanova – Lanusei – Tortoli, Lotto Bivio Villagrande – Svincolo di Arzana, si riporta che "all'entrata in esercizio (anno 2027) sul nuovo asse, sulla base della crescita di domanda adottata, si stima ci sia un traffico giornaliero medio totale di circa 2.939 veicoli/giorno", di cui 111 sono veicoli pesanti (3,78%). Tale risultato è stato ricalcolato al fine di convertire il valore di traffico in assi standard da 80 kN a ruote gemellate, come riportato dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali redatto dal C.N.R..

Per la conversione del traffico sono stati utilizzati i fattori di equivalenza come esposto in tabella 9.1. Nella stessa tabella è riportato anche il coefficiente di equivalenza *C.E.* che esprime il numero medio di assi standard per veicolo commerciale.

Extraurbane secondarie (Categoria C) - spettro di traffico								
Categoria veicoli	%	carico per asse					Coef.equiv	C.E.
3 - Autocarri medi e pesanti	58,80	40	80	-	-	-	1,06	0,62
4 - Autocarri medi e pesanti	29,40	50	110	-	-	-	3,73	1,10
6 - Autocarri pesanti	5,90	60	100	100	-	-	5,20	0,31
8 - Autotreni e articolati	2,80	60	100	100	100	-	7,64	0,21
13 - Mezzi d'opera	0,20	50	120	130	130	130	26,13	0,05
16 - Autobus	2,90	50	80	-	-	-	1,15	0,03
<b>SOMMA PERCENTUALE</b>	<b>100,00</b>						<b>TOT. C.E.</b>	<b>2,33</b>

Tabella 9.1: Spettro di traffico e coeff. di equivalenza

Il numero di assi standard annuo *N* è stato poi calcolato sulla base della seguente formula:

$$N = TGM \cdot p_c \cdot p_{sm} \cdot gg \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r} \cdot C.E.$$

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 22 di 33</p>
---	---

dove:

$TGM$  è il traffico giornaliero medio (2.939 veic/giorno),

$p_c$  è la percentuale di veicoli commerciali (3,78%),

$p_{Sm}$  è la percentuale di veicoli per senso di marcia, assunta pari a 60% a favore di sicurezza,

$gg$  sono i giorni di traffico (365 giorni),

$r$  è il tasso di incremento annuo del traffico, assunto pari al massimo valore (2,5%, anno 2032) previsto nello Studio del Traffico del Progetto Definitivo nell'orizzonte temporale 2027-2037,

$n$  è la vita utile di progetto della sovrastruttura (20 anni),

$C.E.$  è il coefficiente di equivalenza per lo spettro di traffico considerato (2,33).

Quindi, dalle ipotesi di partenza, i passaggi annui di asse equivalente standard da 80 kN sono risultati di  $N = 1.444.916$ .

## 10 PARAMETRI DI CALCOLO ASSUNTI

Lo scopo dello studio è quello di simulare il comportamento tenso-deformativo della pavimentazione in presenza dei carichi di traffico mediante il software BISAR. Nella modellazione, gli strati di conglomerato bituminoso confezionati con lo stesso legante, sono stati rappresentati unitamente come uno strato unico con caratteristiche meccaniche equivalenti.

Poiché il conglomerato bituminoso è un materiale estremamente sensibile alla temperatura, per procedere nello studio con le effettive caratteristiche nei diversi periodi dell'anno è necessario conoscere le temperature medie stagionali della zona di intervento.

Nel caso specifico, sono state prese dalla "Relazione Tecnica - Climatologia della Sardegna per il trentennio 1981-2010" a cura dell'ARPAS le temperature mensili minime e massime registrate dalla stazione meteo di Orgosolo. Tali temperature sono state mediate tra loro per ottenere il valore medio orientativo nella zona dove sarà realizzata la strada. Successivamente è stato possibile determinare le temperature della pavimentazione (tabella 10.1) per mezzo della formula di Witczak.

$$T_p = (1.467 + 0.043 \cdot z) + (1.362 - 0.005 \cdot z) \cdot T_a$$

dove  $T_p$  è la temperatura alla profondità  $z$  (profondità media dello strato) e  $T_a$  è la temperatura dell'aria.

Stazione meteo di Orgosolo			
Mese	Temperatura minima [°C]	Temperatura massima [°C]	Temperatura media [°C]
Gennaio	4.6	10.6	7.60
Febbraio	4.6	11.5	8.05
Marzo	6.2	15	10.60
Aprile	8	17.3	12.65
Maggio	12.3	23.7	18.00
Giugno	16.1	29.4	22.75
Luglio	19.2	33.8	26.50
Agosto	19.5	33.5	26.50

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 24 di 33</p>
---	---

Settembre	15.3	26.7	21.00
Ottobre	12.4	21.8	17.10
Novembre	8.4	15.1	11.75
Dicembre	5.5	10.8	8.15

Tabella 10.1: Temperature mensili registrate presso la stazione meteo di Orgosolo.

Il valore del modulo elastico del bitume è stato determinato sulla base dei principi del nomogramma di Van der Poel, a partire dai valori di penetrazione, temperatura di rammollimento, frequenza di carico e la temperatura di riferimento. Noto il modulo del bitume alla temperatura di riferimento e le caratteristiche volumetriche della miscela bituminosa, per la determinazione del modulo di rigidità del conglomerato bituminoso si è fatto uso della teoria di Francken di seguito descritta.

$$E^* = E_\infty \cdot |R^*|$$

$$E_\infty = 1.436 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^{0.55} \cdot e^{-5.840 \cdot 10^{-2} \cdot V_v}$$

$$\log|R^*| = \log|F^*| - 1.35 \log|F^*| \cdot \left(1 - e^{-0.13 \frac{V_a}{V_b}}\right) \cdot (1 + 0.11 \log|F^*|)$$

$$|F^*| = \frac{S_b}{3000}$$

dove:

$E^*$ : modulo complesso del conglomerato bituminoso

$E_\infty$ : modulo vetroso del conglomerato bituminoso

$F^*$ : modulo ridotto del bitume

$V_a$ : percentuale di aggregati

$V_b$ : percentuale di bitume

$V_v$ : percentuale di vuoti

In conclusione, sulla base della temperatura del conglomerato bituminoso nella stagione di riferimento, delle caratteristiche meccaniche del bitume e della composizione della miscela si sono ricavati i valori del modulo degli strati in conglomerato bituminoso nelle stagioni di riferimento (tabella 10.2).



<b>ANAS S.p.A.</b> S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389 <b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b>	P00_PS00_TRA_RE01_A Data: Settembre 2020 Pag. 25 di 33
---	--

Temperatura pav stagionale [°C]	Sb [MPa]	G* [MPa]	F*	logR*	R*	E [MPa]	E <sub>hard</sub> [MPa]
13.4	46.5	15.5	0.015	-0.586	0.260	8716	10894
25.2	10.0	3.3	0.003	-0.956	0.111	3714	4643
34.2	2.0	0.7	0.001	-1.429	0.037	1251	1564
18.1	26.7	8.9	0.009	-0.710	0.195	6554	8192
Profondità calcolo [cm]	11	Percentuale su aggregati		Percentuale sul cb			
R&B [°C]	58	Pa [%]	100	Pa [%]	95.2		
Pen [dmm]	50	Pb [%]	5.0	Pb [%]	4.8		
A	0.036	γ <sub>a</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	2.7				
IP	0.62	γ <sub>b</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	1.02				
f [Hz]	8	γ <sub>max</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	2.50				
t	0.020	γ <sub>mix</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	2.39				
V <sub>a</sub> [%]	84.3						
V <sub>b</sub> [%]	11.2						
V <sub>v</sub> [%]	4.5						
C [MPa]	14360						
E <sub>inf</sub> [MPa]	33579						

*Tabella 10.2: Modulo del conglomerato bituminoso con bitume modificato hard*

Per i conglomerati confezionati con bitume modificato hard sono stati assunti i moduli elastici del conglomerato con bitume normale aumentati del 25%. In realtà l'impiego del bitume modificato può determinare incrementi del modulo elastico anche modesti, ma permette certamente di ottenere miglioramenti della resistenza a fatica e all'ormaiamento molto più consistenti fino ad un ordine di grandezza. Nel caso specifico, poiché la legge di fatica utilizzata è la stessa, il miglioramento prestazionale derivante dall'impiego del bitume modificato è notevolmente sottostimato in quanto connesso al solo incremento del modulo elastico (25%).

Per lo strato di misto cementato sono stati impiegati parametri indicati dal metodo Sud Africano e relativi ad un materiale codificato come C3: valore del modulo di 2000 MPa nella prima fase di vita utile, di 300 MPa nella seconda fase di vita utile,  $\epsilon_b$  assunto pari a 125  $\mu$ strain e UCS pari a 2250 kPa.

Per lo stato di misto granulare stabilizzato (pavimentazioni di tipo B e D), sulla base delle indicazioni del metodo Sud Africano, sono stati assunti i parametri relativi ad un materiale codificato come G3 con un valore del modulo di 200 MPa.

Per il sottofondo è stato adottato prudenzialmente un modulo elastico di 80 MPa.

Nella successiva tabella 10.3 sono riepilogati i parametri di calcolo adottati.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 26 di 33</p>
---	---

<b>Parametri di calcolo della pavimentazione di progetto</b>				
<b>Modulo elastico [MPa]</b>	inverno	primaver a	estate	autunno
Conglomerato bituminoso modificato*	10894	4643	1564	8192
Misto cementato	Ph1 2000 - Ph2 300			
Misto granulare	200			
Sottofondo	80			
<b>Coef. Poisson</b>	inverno	primaver a	estate	autunno
Conglomerato bituminoso modificato*	0,30	0,35	0,40	0,35
Misto cementato	0,30			
Misto granulare	0,35			
Sottofondo	0,40			
<b>Spessori [cm]</b>				
Conglomerato bituminoso modificato*	22			
Misto cementato	20			
Misto granulare	25			
Sottofondo	inf,			
*usura con bit. mod. hard 4 cm; binder con bit. mod. hard 6 cm; base con bit. mod. hard 12 cm				

*Tabella 10.3: Parametri di calcolo della pavimentazione di progetto*

## 11 ANALISI DEI RISULTATI

Coerentemente con i criteri di calcolo e i parametri assunti per le pavimentazioni di progetto sono state eseguite le opportune verifiche, a fatica e alle deformazioni permanenti, degli strati legati a bitume, del misto cementato, del misto granulare stabilizzato e del sottofondo. Gli output di calcolo del software BISAR sono riportati nell'Appendice A, mentre nella tabella 12.1 sono riassunti i risultati ottenuti.

Pavimentazione di progetto			Verifica < di traffico di progetto [1.4E+06 ESAL]
Materiale	Criterio di rottura	Cicli a rottura	
Conglomerato bituminoso modificato	Fatica	1.78E+07	VERIFICATO
Misto cementato	Fatica/ormaiamento	1.05E+08	VERIFICATO
Misto granulare	Ormaiamento	1.94E+17	VERIFICATO
Sottofondo	Ormaiamento	4.61E+07	VERIFICATO

Tabella 12.1: Cicli di carico a rottura della pavimentazione di progetto

Dai risultati di calcolo si può rilevare che **la pavimentazione di progetto va in crisi dopo 20,2 milioni di cicli di carico di asse standard da 80 kN, nettamente superiori rispetto al traffico previsto (1,44 milioni).**

Nelle successive tabelle si presenta l'elaborazione effettuata per la verifica all'ormaiamento del conglomerato bituminoso. Nello specifico, le tabelle 12.2-12.5 mostrano il calcolo delle tensioni deviatoriche alle profondità critiche nelle varie stagioni, mentre le tabelle 12.6-12.9 riportano le profondità delle ormaie risultanti. Infine nella tabella 12.10 si riassume il valore finale per la verifica.

<b>ANAS S.p.A.</b> S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389 <b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b>	P00_PS00_TRA_RE01_A Data: Settembre 2020 Pag. 28 di 33
---	--

INVERNO						
z [cm]	2	4	7	10	16	22
$\alpha$	0.19	0.36	0.59	0.76	0.99	1.13
$\sigma_1$ [kPa]	573.65	551.38	478.88	388.03	239.99	152.99
$\sigma_3$ [kPa]	323.38	207.74	94.83	38.95	3.08	-3.29
$\sigma_1 - \sigma_3$ [kPa]	250.27	343.64	384.05	349.07	236.92	156.29

*Tabella 12.2: Tensione deviatorica alle profondità critiche, inverno*

PRIMAVERA						
z [cm]	2	4	7	10	16	22
$\alpha$	0.19	0.36	0.59	0.76	0.99	1.13
$\sigma_1$ [kPa]	573.65	551.38	478.88	388.03	239.99	152.99
$\sigma_3$ [kPa]	346.85	226.33	107.69	47.91	7.81	-0.48
$\sigma_1 - \sigma_3$ [kPa]	226.80	325.05	371.19	340.11	232.18	153.47

*Tabella 12.3: Tensione deviatorica alle profondità critiche, primavera*

ESTATE						
z [cm]	2	4	7	10	16	22
$\alpha$	0.19	0.36	0.59	0.76	0.99	1.13
$\sigma_1$ [kPa]	573.65	551.38	478.88	388.03	239.99	152.99
$\sigma_3$ [kPa]	370.32	244.93	120.54	56.87	12.54	2.34
$\sigma_1 - \sigma_3$ [kPa]	203.33	306.45	358.33	331.15	227.45	150.66

*Tabella 12.4: Tensione deviatorica alle profondità critiche, estate*

AUTUNNO						
z [cm]	2	4	7	10	16	22
$\alpha$	0.19	0.36	0.59	0.76	0.99	1.13
$\sigma_1$ [kPa]	573.65	551.38	478.88	388.03	239.99	152.99
$\sigma_3$ [kPa]	346.85	226.33	107.69	47.91	7.81	-0.48
$\sigma_1 - \sigma_3$ [kPa]	226.80	325.05	371.19	340.11	232.18	153.47

*Tabella 12.5: Tensione deviatorica alle profondità critiche, autunno*

<b>ANAS S.p.A.</b> S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389 <b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b>	P00_PS00_TRA_RE01_A Data: Settembre 2020 Pag. 29 di 33
---	--

Strato	V <sub>L</sub> [%]	V <sub>V</sub> [%]	H	A	σ <sub>1</sub> – σ <sub>3</sub> max	ε <sub>p</sub> [cm]
Usura	11	5	0.6875	0.021685659	343.64	0.046
Binder	11	5	0.6875	0.024235498	384.05	0.052
Base	11	5	0.6875	0.014950844	236.92	0.032
						<b>0.130</b>

*Tabella 12.6: Calcolo della profondità dell'ormaia, inverno*

Strato	V <sub>L</sub> [%]	V <sub>V</sub> [%]	H	A	σ <sub>1</sub> – σ <sub>3</sub> max	ε <sub>p</sub> [cm]
Usura	11	5	0.6875	0.04813296	325.05	0.103
Binder	11	5	0.6875	0.05496578	371.19	0.118
Base	11	5	0.6875	0.034381812	232.18	0.074
						<b>0.295</b>

*Tabella 12.7: Calcolo della profondità dell'ormaia, primavera*

Strato	V <sub>L</sub> [%]	V <sub>V</sub> [%]	H	A	σ <sub>1</sub> – σ <sub>3</sub> max	ε <sub>p</sub> [cm]
Usura	11	5	0.6875	0.134690766	306.45	0.289
Binder	11	5	0.6875	0.157492633	358.33	0.337
Base	11	5	0.6875	0.099967762	227.45	0.214
						<b>0.840</b>

*Tabella 12.8: Calcolo della profondità dell'ormaia, estate*

Strato	V <sub>L</sub> [%]	V <sub>V</sub> [%]	H	A	σ <sub>1</sub> – σ <sub>3</sub> max	ε <sub>p</sub> [cm]
Usura	11	5	0.6875	0.027277555	325.05	0.058
Binder	11	5	0.6875	0.031149801	371.19	0.067
Base	11	5	0.6875	0.019484606	232.18	0.042
						<b>0.167</b>

*Tabella 12.9: Calcolo della profondità dell'ormaia, autunno*

Profondità dell'ormaia - progetto					
ε <sub>p</sub> inverno [cm]	ε <sub>p</sub> primavera [cm]	ε <sub>p</sub> estate [cm]	ε <sub>p</sub> autunno [cm]	ε <sub>p</sub> TOT [cm]	Verifica < 2 cm
0.130	0.295	0.840	0.167	<b>1.432</b>	<b>VERIFICATO</b>

*Tabella 12.10: Profondità dell'ormaia, TOTALE*

Sulla base del modello di calcolo utilizzato e dei parametri assunti, per la pavimentazione di progetto la profondità dell'ormaia, prevista sotto il carico di traffico stimato, è di 1,432 cm (ormaiamento di bassa gravità). **La verifica risulta quindi soddisfatta (< 2 cm).**

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 30 di 33</p>
--	---

## 12 CONCLUSIONI

Nell'ambito del progetto definitivo della "SS 389 Tronco Villanova – Lanusei – Tortoli; Lotto Bivio Villagrande – Svincolo Arzana" è stata dimensionata la pavimentazione di progetto che prevede una sovrastruttura di tipo semirigido, costituita da uno strato di usura in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard di 4 cm, uno strato di binder in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard di 6 cm, uno strato di base in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard di 12 cm, uno strato di sottobase in misto cementato di 20 cm e uno strato di fondazione in misto granulare stabilizzato di 25 cm.

La valutazione prestazionale, in termini di cicli di carico di asse standard da 80 kN a ruote gemellate, della sovrastruttura è stata eseguita attraverso il calcolo razionale della pavimentazione mediante il software software BISAR, sviluppato dalla Shell Research e ampiamente diffuso ed applicato anche in Italia.

Dai risultati di calcolo si può rilevare che la pavimentazione di progetto va in crisi dopo 20,2 milioni di cicli di carico di asse standard da 80 kN, nettamente superiori rispetto al traffico previsto (1,44 milioni) nei 20 anni di vita utile. Inoltre, anche la verifica della profondità dell'ormai prevista sotto il carico di traffico stimato risulta soddisfatta.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>S.S. 389 TRONCO VILLANOVA – LANUSEI – TORTOLI</p> <p>LOTTO BIVIO VILLAGRANDE – SVINCOLO DI ARZANA</p> <p>DAL Km 51+100,00 DELLA S.S. 389 VAR AL Km 177+930,00 DELLA S.S. 389</p> <p><b>Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale</b></p>	<p>P00_PS00_TRA_RE01_A</p> <p>Data: Settembre 2020</p> <p>Pag. 31 di 33</p>
---	---

## 13 BIBLIOGRAFIA

- Airey G. D., "Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials", International Journal on Pavement Engineering, vol. 5, pp 137-151, 2004.
- Bahia H. U., Hanson D. I., Zeng H., Zhai H., Khatri M. A., Anderson R. M., "Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design", NCHRP report 459, Washington D.C., 2001.
- Bocci M., Cardone F., Cerni G., Santagata E., "Rheological characterization of the fatigue resistance of asphalt binders", ISAP conference, Quebec City, Canada, 2006.
- Bonnetti K., Nam K., Bahia H. U., "Measuring and defining fatigue behaviour of asphalt binder", 8th TRB annual meeting, Washington D.C., 2002.
- De Beer M., "Aspects of the design and behaviour of road structures incorporating lightly cementitious layers", PhD dissertation, Pretoria, 1990.
- Finn F., Saraf C., Kulkarni R., Nair K., Smith W. And Abdullah A., "The use of distress prediction subsystems for the design of pavement structures", 4th International conference on structural design of asphalt pavements, 1977.
- Francken L., Partl M.N., "Complex Modulus Testing of Asphaltic Concrete: RILEM Interlaboratory Test Program", Transportation Research Record 1545:133-142, 1996.
- Jenkins K. J., "Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen", PhD Dissertation, University of Stellenbosch, 2000.
- Isacsson U. and Lu X., "Properties of bitumens modified with elastomers and plastomers", 2th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcellona, Spagna, 2000.
- Lesueur D., "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification", International Journal on Advances in colloid and interface science, vol. 145, pp 42-82, 2009.
- Loizos A., "In-situ characterization of foamed bitumen treated layer mixes for heavy-duty pavements", International Journal of Pavement Engineering, June 2007.
- Long F., H. Theyse, "Mechanical-empirical structural design models for foamed and emulsified bitumen treated materials", 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 2004.
- Theyse H. L., de Beer M., Rust F. C., "Overview of South African mechanistic pavement design method", Transport Research Record 1539, 1996.
- Theyse H. L., Muthern M. "Pavement analysis and design software (PADS) based on the South African mechanistic-empirical design method", CSIR, Pretoria, 2000.

## APPENDICE A – OUTPUT DI CALCOLO DEL SOFTWARE BISAR

Project: S.S.389 - Progetto 02-12-2020  
 Calculated: 02-Dec-2020 17.19.38

System: 1: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph1 - Inverno

Layer Number	Thickness (m)	Modulus Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horz. Load (kN)	Horz. Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0.22	9.42E+03	0.3	1	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01	0.00E+00
2	0.2	2.00E+03	0.3	2	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01	0.00E+00
3	0.25	2.00E+02	0.35									
4		8.00E+01	0.4									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (MPa)	Stress YY (MPa)	Stress ZZ (MPa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displacemer UX (µm)	Displacemer UY (µm)	Displacemer UZ (µm)
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	3.19E-01	2.07E-01	-6.68E-02	2.94E+01	1.39E+01	-2.38E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.79E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	3.23E-01	2.60E-01	-7.66E-02	2.84E+01	1.98E+01	-2.67E+01	0.00E+00	-2.68E+00	1.76E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	4.20E-01	1.18E-01	1.07E-01	-1.44E-02	4.51E+01	3.78E+01	-4.09E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.71E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	4.20E-01	1.11E-01	9.82E-02	-1.36E-02	4.30E+01	3.45E+01	-3.82E+01	0.00E+00	-5.79E+00	1.69E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	5.95E-03	5.47E-03	-9.91E-03	3.75E+01	3.43E+01	-6.95E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.61E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	5.71E-03	5.02E-03	-9.45E-03	3.63E+01	3.17E+01	-6.60E+01	0.00E+00	-5.26E+00	1.59E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	1.86E-04	4.11E-05	-7.52E-03	3.97E+01	3.72E+01	-9.51E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.53E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	1.55E-04	-7.50E-05	-7.28E-03	3.87E+01	3.47E+01	-9.13E+01	0.00E+00	-5.72E+00	1.52E+02

System: 2: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph1 - Primavera

Layer Number	Thickness (m)	Modulus Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horz. Load (kN)	Horz. Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0.22	4.33E+03	3.50E-01	1	1.00E+00	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01
2	0.2	2.00E+03	3.00E-01	2	2.00E+00	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01
3	0.25	2.00E+02	3.50E-01									
4		8.00E+01	4.00E-01									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (MPa)	Stress YY (MPa)	Stress ZZ (MPa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displacemer UX (µm)	Displacemer UY (µm)	Displacemer UZ (µm)
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	1.36E-01	6.39E-02	-8.96E-02	3.36E+01	1.10E+01	-3.69E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.00E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	1.41E-01	1.05E-01	-1.08E-01	3.27E+01	2.16E+01	-4.48E+01	0.00E+00	-2.58E+00	1.96E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	4.20E-01	1.46E-01	1.29E-01	-1.86E-02	5.64E+01	4.54E+01	-5.05E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.90E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	4.20E-01	1.37E-01	1.18E-01	-1.74E-02	5.33E+01	4.11E+01	-4.69E+01	0.00E+00	-6.94E+00	1.87E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	7.00E-03	6.30E-03	-1.24E-02	4.57E+01	4.09E+01	-8.52E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.78E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	6.69E-03	5.72E-03	-1.17E-02	4.40E+01	3.74E+01	-8.03E+01	0.00E+00	-6.26E+00	1.76E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	2.35E-04	2.47E-05	-9.13E-03	4.85E+01	4.48E+01	-1.16E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.68E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	1.95E-04	-1.30E-04	-8.79E-03	4.70E+01	4.13E+01	-1.10E+02	0.00E+00	-6.87E+00	1.66E+02

System: 3: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph1 - Estate

Layer Number	Thickness (m)	Modulus Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horz. Load (kN)	Horz. Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0.22	1.25E+03	4.00E-01	1	1.00E+00	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01
2	0.2	2.00E+03	3.00E-01	2	2.00E+00	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01
3	0.25	2.00E+02	3.50E-01									
4		8.00E+01	4.00E-01									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (MPa)	Stress YY (MPa)	Stress ZZ (MPa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displacemer UX (µm)	Displacemer UY (µm)	Displacemer UZ (µm)
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	-5.01E-02	-7.74E-02	-1.23E-01	2.40E+01	-6.55E+00	-5.76E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.39E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	-6.04E-02	-6.98E-02	-1.58E-01	2.46E+01	1.41E+01	-8.49E+01	0.00E+00	-5.27E-01	2.34E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	4.20E-01	1.86E-01	1.58E-01	-2.69E-02	7.33E+01	5.52E+01	-6.51E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.28E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	4.20E-01	1.73E-01	1.44E-01	-2.50E-02	6.87E+01	4.98E+01	-6.01E+01	0.00E+00	-8.46E+00	2.23E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	8.18E-03	7.03E-03	-1.75E-02	5.93E+01	5.15E+01	-1.14E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.12E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	7.75E-03	6.22E-03	-1.64E-02	5.66E+01	4.63E+01	-1.07E+02	0.00E+00	-7.84E+00	2.08E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	3.99E-05	-3.10E-04	-1.26E-02	6.49E+01	5.87E+01	-1.56E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.98E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	-3.93E-06	-5.30E-04	-1.20E-02	6.25E+01	5.33E+01	-1.47E+02	0.00E+00	-8.97E+00	1.95E+02

System: 4: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph1 - Autunno

Layer Number	Thickness (m)	Modulus Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horz. Load (kN)	Horz. Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0.22	5.68E+03	0.35	1	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01	0.00E+00
2	0.2	2.00E+03	0.3	2	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01	0.00E+00
3	0.25	2.00E+02	0.35									
4		8.00E+01	0.4									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (MPa)	Stress YY (MPa)	Stress ZZ (MPa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displacemer UX (µm)	Displacemer UY (µm)	Displacemer UZ (µm)
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	1.98E-01	1.13E-01	-8.15E-02	3.29E+01	1.27E+01	-3.35E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.92E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	2.03E-01	1.60E-01	-9.63E-02	3.19E+01	2.15E+01	-3.93E+01	0.00E+00	-2.71E+00	1.89E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	4.20E-01	1.36E-01	1.21E-01	-1.70E-02	5.24E+01	4.28E+01	-4.71E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.83E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	4.20E-01	1.28E-01	1.11E-01	-1.59E-02	4.97E+01	3.89E+01	-4.39E+01	0.00E+00	-6.55E+00	1.80E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	6.66E-03	6.04E-03	-1.14E-02	4.27E+01	3.86E+01	-7.94E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.72E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	6.38E-03	5.51E-03	-1.09E-02	4.12E+01	3.54E+01	-7.50E+01	0.00E+00	-5.91E+00	1.70E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	2.36E-04	5.08E-05	-8.51E-03	4.53E+01	4.20E+01	-1.08E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.62E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	1.98E-04	-8.99E-05	-8.21E-03	4.40E+01	3.89E+01	-1.03E+02	0.00E+00	-6.45E+00	1.61E+02

Figura A.1: Output di calcolo per la pavimentazione di progetto – fase 1



**Relazione di Calcolo Pavimentazione Stradale**

Project: S.S.389 - Progetto 02-12-2020  
 Calculated: 02-Dec-2020 17.19.38

System: 5: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph2 - Inverno

Layer Number	Thickness (m)	Modulus		Poisson's Ratio	Load Number	Vertical	Vertical	Horz. (Shear)		Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
		Load (kN)	Stress (MPa)			Load (kN)	Stress (MPa)						
1	0.22	9.42E+03		0.3	1	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01	0.00E+00
2	0.2	3.00E+02		0.3	2	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01	0.00E+00
3	0.25	2.00E+02		0.35									
4		8.00E+01		0.4									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement UX (μm)	Displacement UY (μm)	Displacement UZ (μm)
					XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX (μstrain)	YY (μstrain)	ZZ (μstrain)			
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	6.47E-01	4.77E-01	-3.51E-02	5.46E+01	3.12E+01	-3.95E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.20E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	6.42E-01	5.33E-01	-3.54E-02	5.23E+01	3.73E+01	-4.12E+01	0.00E+00	-5.47E+00	2.16E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	6.05E-03	6.47E-04	-3.51E-02	5.46E+01	3.12E+01	-1.24E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.20E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	5.78E-03	2.30E-03	-3.54E-02	5.23E+01	3.73E+01	-1.26E+02	0.00E+00	-5.47E+00	2.16E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	6.71E-03	6.20E-03	-1.29E-02	4.53E+01	4.19E+01	-8.73E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.88E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	6.48E-03	5.71E-03	-1.23E-02	4.40E+01	3.88E+01	-8.30E+01	0.00E+00	-6.44E+00	1.85E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	4.88E-05	-1.26E-04	-9.93E-03	5.09E+01	4.78E+01	-1.24E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.77E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	3.21E-05	-2.56E-04	-9.58E-03	4.96E+01	4.46E+01	-1.19E+02	0.00E+00	-7.36E+00	1.75E+02

System: 6: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph2 - Primavera

Layer Number	Thickness (m)	Modulus		Poisson's Ratio	Load Number	Vertical	Vertical	Horz. (Shear)		Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
		Load (kN)	Stress (MPa)			Load (kN)	Stress (MPa)						
1	0.22	4.33E+03		0.35	1	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01	0.00E+00
2	0.2	3.00E+02		0.3	2	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01	0.00E+00
3	0.25	2.00E+02		0.35									
4		8.00E+01		0.4									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement UX (μm)	Displacement UY (μm)	Displacement UZ (μm)
					XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX (μstrain)	YY (μstrain)	ZZ (μstrain)			
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	4.77E-01	3.34E-01	-5.33E-02	8.74E+01	4.30E+01	-7.79E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.58E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	4.82E-01	3.95E-01	-5.47E-02	8.37E+01	5.67E+01	-8.35E+01	0.00E+00	-7.97E+00	2.52E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	1.02E-02	-1.07E-05	-5.33E-02	8.74E+01	4.30E+01	-1.88E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.58E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	9.76E-03	3.53E-03	-5.47E-02	8.37E+01	5.67E+01	-1.96E+02	0.00E+00	-7.97E+00	2.52E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	9.17E-03	8.31E-03	-1.73E-02	6.15E+01	5.57E+01	-1.17E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.12E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	8.81E-03	7.54E-03	-1.63E-02	5.93E+01	5.08E+01	-1.10E+02	0.00E+00	-8.51E+00	2.09E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	4.37E-04	1.48E-04	-1.27E-02	6.80E+01	6.30E+01	-1.61E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.98E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	4.04E-04	-5.88E-05	-1.21E-02	6.60E+01	5.79E+01	-1.53E+02	0.00E+00	-9.65E+00	1.95E+02

System: 7: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph2 - Estate

Layer Number	Thickness (m)	Modulus		Poisson's Ratio	Load Number	Vertical	Vertical	Horz. (Shear)		Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
		Load (kN)	Stress (MPa)			Load (kN)	Stress (MPa)						
1	0.22	1.25E+03		0.4	1	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01	0.00E+00
2	0.2	3.00E+02		0.3	2	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01	0.00E+00
3	0.25	2.00E+02		0.35									
4		8.00E+01		0.4									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement UX (μm)	Displacement UY (μm)	Displacement UZ (μm)
					XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX (μstrain)	YY (μstrain)	ZZ (μstrain)			
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	2.03E-01	1.08E-01	-9.12E-02	1.57E+02	5.04E+01	-1.73E+02	0.00E+00	0.00E+00	3.20E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	2.16E-01	1.66E-01	-9.92E-02	1.52E+02	9.52E+01	-2.02E+02	0.00E+00	-1.16E+01	3.11E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	1.78E-02	-6.92E-03	-9.12E-02	1.57E+02	5.04E+01	-3.15E+02	0.00E+00	0.00E+00	3.20E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	1.69E-02	3.86E-03	-9.92E-02	1.52E+02	9.52E+01	-3.52E+02	0.00E+00	-1.16E+01	3.11E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	1.27E-02	1.10E-02	-2.50E-02	8.81E+01	7.64E+01	-1.67E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.49E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	1.21E-02	9.66E-03	-2.32E-02	8.40E+01	6.79E+01	-1.54E+02	0.00E+00	-1.16E+01	2.43E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	9.32E-04	3.78E-04	-1.72E-02	9.58E+01	8.61E+01	-2.22E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.29E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	8.62E-04	1.87E-05	-1.63E-02	9.20E+01	7.72E+01	-2.08E+02	0.00E+00	-1.31E+01	2.25E+02

System: 8: S.S.389 - Progetto 02-12-2020 - Ph2 - Autunno

Layer Number	Thickness (m)	Modulus		Poisson's Ratio	Load Number	Vertical	Vertical	Horz. (Shear)		Radius (m)	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Shear Angle (Degrees)
		Load (kN)	Stress (MPa)			Load (kN)	Stress (MPa)						
1	0.22	5.68E+03		0.35	1	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	-1.58E-01	0.00E+00
2	0.2	3.00E+02		0.3	2	2.00E+01	5.77E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.05E-01	0.00E+00	1.58E-01	0.00E+00
3	0.25	2.00E+02		0.35									
4		8.00E+01		0.4									

Position Number	Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement UX (μm)	Displacement UY (μm)	Displacement UZ (μm)
					XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX (μstrain)	YY (μstrain)	ZZ (μstrain)			
1	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	5.44E-01	3.95E-01	-4.60E-02	7.43E+01	3.89E+01	-6.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.44E+02
2	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	5.46E-01	4.54E-01	-4.69E-02	7.12E+01	4.91E+01	-6.99E+01	0.00E+00	-7.03E+00	2.39E+02
3	2	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	8.60E-03	4.32E-04	-4.60E-02	7.43E+01	3.89E+01	-1.62E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.44E+02
4	2	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	8.21E-03	3.12E-03	-4.69E-02	7.12E+01	4.91E+01	-1.68E+02	0.00E+00	-7.03E+00	2.39E+02
5	3	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01	8.27E-03	7.56E-03	-1.56E-02	5.55E+01	5.06E+01	-1.06E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.04E+02
6	3	0.00E+00	-1.58E-01	5.45E-01	7.96E-03	6.89E-03	-1.48E-02	5.36E+01	4.64E+01	-9.99E+01	0.00E+00	-7.75E+00	2.00E+02
7	4	0.00E+00	0.00E+00	6.70E-01	2.95E-04	5.24E-05	-1.16E-02	6.16E+01	5.74E+01	-1.47E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.91E+02
8	4	0.00E+00	-1.58E-01	6.70E-01	2.68E-04	-1.24E-04	-1.12E-02	5.99E+01	5.30E+01	-1.41E+02	0.00E+00	-8.81E+00	1.88E+02

Figura A.2: Output di calcolo per la pavimentazione di progetto – fase 2