

S.S. 398 "Via Val di Cornia"
Bretella di collegamento tra l'Autostrada Tirrenica A12
e il Porto di Piombino
LOTTO 1 - Svincolo di Geodetica-Gagno

PROGETTO ESECUTIVO

COD. **FI2**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GDG - ICARIA

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Nando Granieri
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A351

IL PROGETTISTA:

Dott. Ing. Luca Nani
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A2445

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini
Ordine dei Geologi della Regione Umbria n°108

IL R.U.P.

Dott. Ing.
Antonio Scalamandrè

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A1373

PROTOCOLLO

DATA

MARZO 2019

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

MANDANTI:



Dott. Ing. N. Granieri
Dott. Arch. N. Kamenicky
Dott. Ing. V. Truffini
Dott. Arch. A. Bracchini
Dott. Ing. F. Durastanti
Dott. Geol. G. Cerquiglini
Geom. S. Scopetta
Dott. Ing. L. Sbrenna
Dott. Ing. E. Sellari
Dott. Ing. E. Bartolucci
Dott. Ing. L. Dinelli
Dott. Ing. L. Nani
Dott. Ing. F. Pambianco
Dott. Agr. F. Berti Nulli

Dott. Ing. D. Carliaccini
Dott. Ing. S. Sacconi
Dott. Ing. G. Cordua
Dott. Ing. V. De Gori
Dott. Ing. C. Consorti
Dott. Ing. F. Dominici

Dott. Ing. V. Rotisciani
Dott. Ing. F. Macchioni
Geom. C. Vischini
Dott. Ing. V. Piunno
Dott. Ing. G. Pulli
Geom. C. Sugaroni



**PROGETTO STRADALE
ASSE PRINCIPALE**

Relazione di dimensionamento della pavimentazione stradale

CODICE PROGETTO

NOME FILE

P00-PS00-TRA-RE02

REVISIONE

SCALA:

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.

DPFI12 **E** **1801**

CODICE ELAB. **P00PS00TRA RE02**

A

-

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	Emissione	29/03/2019	M.De Tursi	S.Scopetta	N.Granieri

INDICE

1	PREMESSA.....	2
2	IL PROGETTO DELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI – METODO RAZIONALE	3
3	TRAFFICO DI PROGETTO	5
4	CONDIZIONI CLIMATICHE.....	11
5	PAVIMENTAZIONE PROPOSTA.....	13
6	PARAMETRI DI CALCOLO ASSUNTI	14
6.1	SOTTOFONDO	14
6.2	FONDAZIONE IN MISTO GRANULARE.....	14
6.3	SOTTOBASE IN MISTO CEMENTATO	15
6.4	STRATI IN CONGLOMERATO BITUMINOSO	15
6.5	SINTESI DEI PARAMETRI ADOTTATI	19
7	VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE	20
7.1	VERIFICA DEL SOTTOFONDO	20
7.2	VERIFICA DELLA FONDAZIONE IN MISTO GRANULARE	21
7.3	VERIFICA DELLA SOTTOBASE IN MISTO CEMENTATO.....	22
7.4	VERIFICA DEGLI STRATI IN CONGLOMERATO BITUMINOSO.....	24
8	ANALISI DEI RISULTATI	25
	ALLEGATO – OUTPUT DI CALCOLO DEL PROGRAMMA BISAR	26

1 PREMESSA

Al fine di verificare il dimensionamento della sovrastruttura stradale è stato condotto il calcolo della pavimentazione con metodo razionale mediante il software BISAR, sviluppato dalla Shell Research.

Tale strumento consente di definire lo stato tenso-deformativo all'interno di un sistema a multistrato elastico sottoposto a uno o più carichi uniformemente distribuiti su di un'impronta circolare. Le tensioni e le deformazioni costituiscono i parametri di ingresso delle leggi di degrado relative a ciascun materiale. Tali leggi permettono di stabilire il numero di ripetizioni di carico ammissibili 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.

La verifica è stata eseguita confrontando i cicli di carico di asse standard da 80 kN su ruote gemellate che portano al collasso della sovrastruttura con i cicli di carico previsti nei primi 20 anni di esercizio.

2 IL PROGETTO DELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI – METODO RAZIONALE

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

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.

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.

Il progetto di una pavimentazione stradale differisce da quello di una qualsiasi altra struttura civile sostanzialmente per due aspetti:

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 ed 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, 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 perviene alla verifica di "resistenza" della sovrastruttura, intesa come la capacità della stessa di garantire adeguati livelli di servizio entro un predefinito periodo temporale (vita utile); superato questo periodo di tempo, la degradazione subita dalla pavimentazione ne rende necessario il rifacimento.

Il processo progettuale "razionale" per il dimensionamento strutturale di una pavimentazione stradale si basa principalmente sui seguenti passaggi:

- la conoscenza dei dati di traffico;
- la conoscenza delle condizioni climatiche di esercizio;
- la definizione preliminare degli spessori di ogni singolo strato;
- la scelta dei materiali da impiegare;
- il calcolo dello stato tenso-deformativo indotto 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 opportuni modelli di calcolo.

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.

È opportuno sottolineare che non si tratta di metodi puramente razionali, in quanto l'empirismo non è del tutto eliminato: vi si rifà infatti per la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali e per lo studio delle leggi di degrado.

3 TRAFFICO DI PROGETTO

Il progetto di una pavimentazione stradale si basa sul confronto del numero di applicazioni di carico "ammissibili" con il numero di applicazioni di carico "previste".

I carichi che insistono sulla sovrastruttura derivano dai veicoli in transito e sono di entità variabile in funzione di:

- tipologia di veicoli;
- configurazione degli assi e delle ruote;
- distribuzione dei carichi sugli assi;
- area di contatto ruota-pavimentazione;
- velocità dei veicoli;
- posizione trasversale.

Alla luce della vasta eterogeneità dei carichi, ai fini del calcolo delle sovrastrutture risulta necessario riferirsi ad un carico di riferimento nel quale dover convertire tutti gli altri.

Gli effetti prodotti dagli assi sono espressi in termini di danno; il danno unitario è associato all'asse standard. Con l'omogeneizzazione dei carichi, il traffico nel suo complesso è trasformato in un equivalente numero di passaggi dell'asse standard.

I danni prodotti da ciascun asse si sommano sino a quando la sovrastruttura raggiunge condizioni di inservibilità (ipotesi di accumulo lineare del danno).

L'asse standard è stato individuato, nel corso dell'ASSHO Road Test, nell'asse singolo a ruote gemellate da 18 kips (80 kN) (Fig. 1) e furono sviluppate tabelle di conversione confrontando gli effetti in termini di PSI (Fig.2). Non vi sono preclusioni ad adottare altri tipi di assi, tuttavia normalmente ci si riferisce all'asse standard da 80 kN.

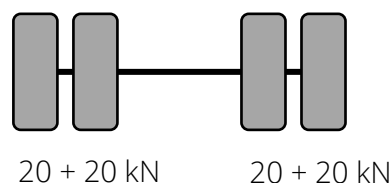


Fig. 1: Schematizzazione dell'asse standard da 80 kN.

Al fine della determinazione di un fattore di equivalenza rappresentativo dell'intera flotta di veicoli pesanti che interesseranno l'infrastruttura di progetto, è necessario avere una stima dello spettro di traffico; il Catalogo delle Pavimentazioni Stradali fornisce le configurazioni dei

RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLA PAVIMENTAZIONE

diversi tipi di veicoli commerciali (massa complessiva ≥ 3 t) (Tab. 1) e degli spettri tipici di traffico dei veicoli commerciali stessi, in funzione del tipo di strada (Tab. 2).

TABLE 6.4 Asphalt Institute's Equivalent Axle Load Factors

Axle load (lb)	Equivalent axle load factor			Axle load (lb)	Equivalent axle load factor		
	Single axles	Tandem axles	Tridem axles		Single axles	Tandem axles	Tridem axles
1000	0.00002			41,000	23.27	2.29	0.540
2000	0.00018			42,000	25.64	2.51	0.597
3000	0.00072			43,000	28.22	2.76	0.658
4000	0.00209			44,000	31.00	3.00	0.723
5000	0.00500			45,000	34.00	3.27	0.793
6000	0.01043			46,000	37.24	3.55	0.868
7000	0.0196			47,000	40.74	3.85	0.948
8000	0.0343			48,000	44.50	4.17	1.033
9000	0.0562			49,000	48.54	4.51	1.12
10,000	0.0877	0.00688	0.002	50,000	52.88	4.86	1.22
11,000	0.1311	0.01008	0.002	51,000		5.23	1.32
12,000	0.189	0.0144	0.003	52,000		5.63	1.43
13,000	0.264	0.0199	0.005	53,000		6.04	1.54
14,000	0.360	0.0270	0.006	54,000		6.47	1.66
15,000	0.478	0.0360	0.008	55,000		6.93	1.78
16,000	0.623	0.0472	0.011	56,000		7.41	1.91
17,000	0.796	0.0608	0.014	57,000		7.92	2.05
18,000	1.000	0.0773	0.017	58,000		8.45	2.20
19,000	1.24	0.0971	0.022	59,000		9.01	2.35
20,000	1.51	0.1206	0.027	60,000		9.59	2.51
21,000	1.83	0.148	0.033	61,000		10.20	2.67
22,000	2.18	0.180	0.040	62,000		10.84	2.85
23,000	2.58	0.217	0.048	63,000		11.52	3.03
24,000	3.03	0.260	0.057	64,000		12.22	3.22
25,000	3.53	0.308	0.067	65,000		12.96	3.41
26,000	4.09	0.364	0.080	66,000		13.73	3.62
27,000	4.71	0.426	0.093	67,000		14.54	3.83
28,000	5.39	0.495	0.109	68,000		15.38	4.05
29,000	6.14	0.572	0.126	69,000		16.26	4.28
30,000	6.97	0.658	0.145	70,000		17.19	4.52
31,000	7.88	0.753	0.167	71,000		18.15	4.77
32,000	8.88	0.857	0.191	72,000		19.16	5.03
33,000	9.98	0.971	0.217	73,000		20.22	5.29
34,000	11.18	1.095	0.246	74,000		21.32	5.57
35,000	12.50	1.23	0.278	75,000		22.47	5.86
36,000	13.93	1.38	0.313	76,000		23.66	6.15
37,000	15.50	1.53	0.352	77,000		24.91	6.46
38,000	17.20	1.70	0.393	78,000		26.22	6.78
39,000	19.06	1.89	0.438	79,000		27.58	7.11
40,000	21.08	2.08	0.487	80,000		28.99	7.45

Note: 1 lb = 4.45 N.

Fig. 2: Fattori di equivalenza proposti da Asphalt Institute (Huang, 1993)

Tab. 1: Tipi di veicoli commerciali, numero di assi, distribuzione dei carichi per asse (Catalogo delle Pavimentazioni Stradali)

Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in KN			
1) autocarri leggeri	2	↓10	↓20		
2) " "	"	↓15	↓30		
3) autocarri medi e pesanti	"	↓40	↓80		
4) " " "	"	↓50	↓110		
5) autocarri pesanti	3	↓40	↓80	↓80	
6) " "	"	↓60	↓100 ↓100		
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90	↓80	↓80
8) " "	"	↓60	↓100	↓100	↓100
9) " "	5	↓40	↓80	↓80	↓80
10) " "	"	↓60	↓90	↓90	↓100
11) " "	"	↓40	↓100	↓80	↓80
12) " "	"	↓60	↓110	↓90	↓90
13) mezzi d'opera	"	↓50	↓120	↓130	↓130
14) autobus	2	↓40	↓80		
15) " "	2	↓60	↓100		
16) " "	2	↓50	↓80		

Tab. 2: Tipici spettri di traffico di veicoli commerciali per ciascun tipo di strada (Catalogo delle Pavimentazioni Stradali).

Tipo di strada	Tipo di veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1) autostrade extraurbane	12.2	----	24.4	14.6	2.4	12.2	2.4	4.9	2.4	4.9	2.4	4.9	0.10	----	----	12.2
2) " urbane	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
3) strade extr. principali e secondarie a forte traffico	----	13.1	39.5	10.5	7.9	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.6	0.5	----	----	10.5
4) strade extraurb. second. ordin.	----	----	58.8	29.4	----	5.9	----	2.8	----	----	----	----	0.2	----	----	2.9
5) " extr. second. -turistiche	24.5	----	40.8	16.3	----	4.15	----	2	----	----	----	----	0.05	----	----	12.2
6) " urbane di scorrimento	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
7) " " di quartiere e locali	80	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	20	----	----
8) corsie preferenziali	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	47	53	----

Alla luce dei diversi spettri di traffico e dei fattori di equivalenza dei singoli assi, è stato possibile ottenere un fattore di equivalenza dell'intera flotta di veicoli commerciali che interessa ogni tipologia di strada; il procedimento può essere riassunto come segue:

1. conversione di ogni asse nel numero di passaggi equivalenti dell'asse standard (Equivalent Single Axle Load application);

2. somma dei fattori di equivalenza degli assi di ogni veicolo per la determinazione del fattore di equivalenza del veicolo stesso (F.E.V.);
3. prodotto tra F.E.V. e la rispettiva percentuale di presenza nel tipo di strada considerato;
4. somma dei valori ottenuti al punto 3 al fine della determinazione del fattore di equivalenza dell'intera flotta caratteristica di ogni tipologia di strada.

I risultati dell'operazione sono riassunti in Tab. 3; si riportano i valori relativi alla strada tipo III, che coerentemente alla classificazione delle strade del D.M. 5/11/2001 corrisponde alle Strade extraurbane principali, ossia di tipo B (come l'infrastruttura di progetto).

Tab. 3: determinazione del fattore di equivalenza dello spettro di traffico di veicoli commerciali di una strada di tipo B.

Tipo di veicolo	N° assi	Configurazione	F.E.	B & C (forte traffico)
1) autocarri leggeri	2	10s* 20s	0.0028	0.00
2) " "	2	15s 30s	0.0145	0.00
3) autocarri medi e pesanti	2	40s 80s	1.0460	0.41
4) " " "	2	50s 110s	4.3943	0.46
5) autocarri pesanti	3	40s 160t**	1.4163	0.11
6) " "	2	60s 200t	3.9758	0.10
7) autotreni e autoarticolati	4	40s 90s 80s 80s	3.7487	0.10
8) " "	4	60s 100s 100s 100s	8.5450	0.21
9) " "	5	200T*** 160t	2.0952	0.05
10) " "	5	240T 200t	5.4441	0.14
11) " "	5	140t 240T	2.4004	0.06
12) " "	5	170t 270T	4.6273	0.12
13) mezzi d'opera	5	170t 390T	17.1233	0.09
14) autobus	2	40s 80s	1.0460	0.00
15) "	2	60s 100s	3.0303	0.00
16) "	2	50s 80s	1.12171	0.12
				1.98

*: s = asse singolo; **: t = asse tandem; ***: T = asse tridem.

Per un corretto dimensionamento della pavimentazione, si dovrebbe conoscere il traffico che in futuro interesserà l'infrastruttura; non potendo disporre di tale valore del flusso veicolare, si procede alla determinazione di una sua stima partendo dal valore del volume di traffico che, all'inizio della messa in funzione dell'infrastruttura, interessa il tratto stradale oggetto di studio.

Partendo dunque dall'informazione sul traffico giornaliero medio su base annua (TGM), è possibile risalire al numero di applicazioni dell'asse di riferimento nel corso della vita utile dell'opera tramite la seguente relazione:

$$N_{80kN} = TGM \cdot 365 \cdot F^* \cdot \%VC \cdot FE \cdot D \cdot L$$

dove:

- TGM = Traffico Giornaliero Medio su base annua; moltiplicato per 365 consente di ottenere l'informazione sul flusso di traffico annuale;
- F^* = fattore di crescita, determinabile come:

$$F^* = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

con:

- r = tasso di crescita annuale (espresso in decimali);
- n = vita utile dell'infrastruttura.
- $\%VC$ = percentuale veicoli commerciali (espressa in decimali);
- FE = fattore di equivalenza dell'intera flotta di veicoli commerciali (vedi Tab. 3);
- D = percentuale di traffico nella singola direzione (espressa in decimali);
- L = percentuale di veicoli commerciali transitanti sulla corsia di calcolo. Non tutti i veicoli pesanti transitano sulla corsia "lenta" (corsia di destra); tipicamente si considera un 80%.

Adottando come dati di input quelli riportati nella relazione dello studio di traffico (TGM di 13.900 veicoli/giorno e $\%VC$ del 5,6%) e ipotizzando un tasso di crescita annuale del 2,5%, si ottiene, per una vita utile di 25 anni, un numero di applicazioni dell'asse di riferimento pari a 7.686.176. In Tab. 4 è riportata una sintesi dei dati di input.

RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLA PAVIMENTAZIONE

Tab. 4: sintesi dei dati di input per la determinazione di $N_{80\text{ kN}}$.

Condizioni di traffico	
TGM (Traffico Giornaliero Medio)	13900
% veicoli pesanti	5.6
tasso crescita	2.5
coefficiente di equivalenza	1.98
fattore direzionale	0.5
% traffico pesante su corsia di progetto	80
vita utile	25
↓	
7686176	

4 CONDIZIONI CLIMATICHE

Le proprietà meccaniche di alcuni materiali impiegati nella realizzazione delle pavimentazioni stradali (conglomerati bituminosi) risentono fortemente delle variazioni di temperatura, poiché essa influenza i valori del modulo complesso (parametro meccanico rappresentativo degli strati legati a bitume). Risulta necessario dunque suddividere l'anno in periodi caratterizzati da una temperatura media dell'aria pressoché uniforme (tipicamente 4 periodi della durata di 3 mesi ciascuno, corrispondenti alle 4 stagioni).

Nel caso in esame ci si è riferiti alle situazioni climatiche medie dell'Italia Centrale suggerite dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali; in Tab. 5 è riportata una sintesi della tabella presente nel Catalogo.

Tab. 5: Condizioni climatiche di progetto per le sovrastrutture flessibili e semirigide (rappresentatività territoriale 50% dell'Italia Centrale) – Valide per altitudini inferiori ai 1000m.

Periodo	[°C]	[°F]
Inverno	4,5	40,1
Primavera	11,5	52,7
Estate	22	71,6
Autunno	14	57,2

La conversione in gradi Fahrenheit è necessaria al fine della determinazione della temperatura media della pavimentazione tramite la relazione di Witczak (1972), di seguito riportata:

$$MMPT = MMAT \cdot \left[1 + \frac{1}{z + 4} \right] - \frac{34}{z + 4} + 6$$

dove:

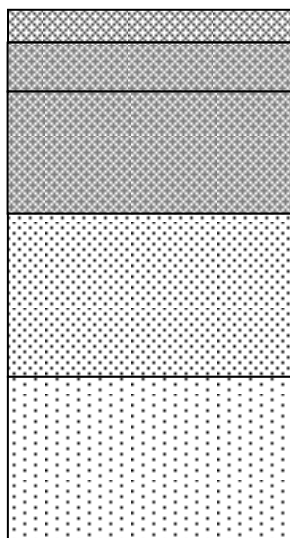
- MMPT = temperatura mensile media della pavimentazione, in °F (*Mean Monthly Pavement Temperature*);
- MMAT = temperatura mensile media dell'aria, in °F (*Mean Monthly Air Temperature*);

- z = profondità alla quale si determina la temperatura, in pollici. Tipicamente si considera un terzo della profondità dello strato del quale si sta determinando la temperatura.

I valori della temperatura nei diversi periodi all'interno della pavimentazione sono riportati al paragrafo 6.4.

5 PAVIMENTAZIONE PROPOSTA

La pavimentazione proposta è costituita da 4 cm di usura in conglomerato drenante, 6 cm di binder in conglomerato bituminoso con bitume modificato ("hard"), 10 cm di base in conglomerato bituminoso con bitume modificato ("soft"), 18 cm di sottobase in misto cementato e 20 cm di fondazione in misto granulare (Fig. 3).



Usura drenante: 4 cm

Binder (conglomerato bituminoso con bitume modificato): 6 cm

Base (conglomerato bituminoso con bitume modificato): 10 cm

Misto cementato: 18 cm

Fondazione in misto granulare: 20 cm

Fig.3: Pavimentazione di progetto

Relativamente allo strato di usura, il rispetto dei fusi granulometrici riferiti al "conglomerato bituminoso per strati di usura drenante" presenti nel Capitolato Speciale di Appalto ANAS (Parte 2ª Norme Tecniche – Pavimentazioni stradali - paragrafo 7.2.2) garantisce un'elevata fonoassorbenza.

6 PARAMETRI DI CALCOLO ASSUNTI

I metodi razionali per il calcolo delle pavimentazioni, come detto, si basano sulla determinazione dello stato tenso-deformativo all'interno della sovrastruttura stessa.

lo schema di riferimento è quello del multistrato elastico, caratterizzato da una serie di strati di spessore predefinito al di sopra di un semispazio elastico. Le ipotesi alla base di tale modello sono le seguenti:

- materiali elastici, omogenei ed isotropi;
- spessore costante dei singoli strati;
- sottofondo considerato come semispazio;
- perfetta aderenza tra gli strati;
- i carichi applicati sono considerati circolari (impronta di carico circolare con pressione uniforme).

Al fine di poter procedere al calcolo tenso-deformativo, risulta dunque necessario assegnare, ai diversi strati, dei parametri meccanici che meglio rappresentino il loro comportamento sotto carico.

6.1 SOTTOFONDO

Per il sottofondo, in accordo con numerose esperienze sperimentali le quali propongono per il modulo elastico un valore pari al doppio del modulo di deformazione determinato con piastra statica al primo ciclo di carico, è stato adottato un valore di modulo pari a 100 Mpa. Il coefficiente di Poisson è stato posto pari a 0,45.

6.2 FONDAZIONE IN MISTO GRANULARE

Il modulo dello strato di fondazione in misto granulare è stato stimato in riferimento alla relazione proposta da Shell Institute, secondo cui il modulo dello strato in misto granulare è influenzato dallo spessore dello strato stesso e dal modulo del sottofondo:

$$E_{mg} = 0,2 \cdot h_{mg}^{0.45} \cdot E_{sf}$$

dove:

- E_{mg} = modulo elastico dello strato in misto granulare;
- h_{mg} = spessore dello strato in misto granulare (20 cm);
- E_{sf} = modulo elastico del sottofondo (100 MPa).

Si ottiene dunque un valore di E_{mg} pari a 217 MPa.

Per il coefficiente di Poisson si è optato per un valore pari a 0,4.

6.3 SOTTOBASE IN MISTO CEMENTATO

Si presume che gli strati in misto cementato si fessurino, con fessure che si innescano nella parte inferiore e che si propagano verso la parte superiore. La condizione terminale è quando il materiale è fessurato in misura tale da avere una rigidità effettiva simile a uno strato granulare. Questa condizione è nota come lo "stato granulare equivalente" (*South African Pavement Engineering Manual*, 2013). È importante notare che lo stato di fessurazione non è tale da determinare una consistenza dello strato prossima a quella di un materiale granulare; si tratta generalmente di micro-fessurazioni non visibili, che determinano comunque delle proprietà meccaniche analoghe a quelle di uno strato in misto granulare. Una volta che un materiale cementato ha raggiunto la condizione ultima di materiale fessurato, entra in una nuova fase in cui si comporta come uno strato granulare equivalente.

In riferimento alla classificazione del metodo meccanicistico Sudafricano, è stato adottato un materiale codificabile come C3; pertanto è stato assunto un valore di modulo pari a 2000 MPa e un valore della massima deformazione di trazione ammissibile (ϵ_b) pari a 125 μ strain per la prima fase di vita, un modulo pari a 300 MPa e una tensione massima a compressione ammissibile (UCS) pari a 2,25 MPa. Il coefficiente di Poisson adottato è pari a 0,3.

6.4 STRATI IN CONGLOMERATO BITUMINOSO

La determinazione dei moduli degli strati in conglomerato bituminoso può essere effettuata attraverso la relazione di Franken e Vanelstraete (1996):

$$|E^*| = E_{\infty} \cdot R^*(T, f)$$

dove:

- E_{∞} = modulo vetroso del conglomerato bituminoso;
- R^* = modulo ridotto del conglomerato bituminoso, funzione della temperatura e della frequenza di carico.

Il modulo vetroso è il valore del modulo che il materiale manifesta alle alte frequenze o alle basse temperature; è possibile ottenere una stima di tale valore partendo dalle informazioni sulle caratteristiche volumetriche della miscela bituminosa, secondo la relazione:

$$E_{\infty} [MPa] = 14360 \cdot \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^{0,55} \cdot \exp(-0,0584 \cdot v)$$

dove:

- V_a = volume di aggregati (%);
- V_b = volume di bitume (%);
- v = volume di vuoti (%).

Sono stati ottenuti, per i 3 strati in conglomerato bituminoso, i seguenti valori del modulo vetroso:

Tab. 6: Proprietà volumetriche e modulo vetroso del conglomerato bituminoso dello strato di Base.

Proprietà volumetriche BASE	
V_{bit} [%]	10.70
V_{agg} [%]	84.30
v [%]	5.00
<hr/>	
$E_{\infty base}$ [MPa]	33372

Tab. 7: Proprietà volumetriche e modulo vetroso del conglomerato bituminoso dello strato di Binder.

Proprietà volumetriche BINDER	
V_{bit} [%]	10.70
V_{agg} [%]	84.30
v [%]	5.00
<hr/>	
$E_{\infty binder}$ [MPa]	33372

Tab. 8: Proprietà volumetriche e modulo vetroso del conglomerato bituminoso dello strato di Usura.

Proprietà volumetriche USURA	
V_{bit} [%]	8.00
V_{agg} [%]	72.00
v [%]	20.00
<hr/>	
$E_{\infty usura}$ [MPa]	14953

Il modulo ridotto, dato dal rapporto tra $|E^*|$ e E_∞ , dipende principalmente dalle caratteristiche del legante bituminoso e dalle caratteristiche volumetriche della miscela. L'espressione del modulo ridotto suggerita in letteratura è la seguente:

$$\log(R^*) = \log(B^*) - 1,35 \cdot \log(B^*) \cdot \left(1 - e^{-0,13 \cdot \frac{V_a}{V_b}}\right) \cdot (1 + 0,11 \cdot \log(B^*))$$

B^* è un coefficiente adimensionale detto modulo ridotto del bitume dato dal rapporto tra il modulo a taglio del legante G^* (alla temperatura e frequenza presa in esame, ed il modulo vetroso del legante (in corrispondenza di bassissime temperature o altissime frequenze), stimato pari a 1 GPa.

Il modulo a taglio del bitume G^* può essere determinato in funzione del modulo di rigidezza del bitume stesso S_b (Ullidtz, 1987):

$$|G^*(T, f)| = \frac{S_b}{2 \cdot (1 + \nu)} \approx \frac{S_b}{3} = \frac{1}{3} [1,57 \cdot 10^{-7} \cdot t^{-0,368} \cdot e^{-IP} \cdot (T_{PA} - T)^5]$$

dove:

- t = tempo di carico, pari a $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f}$, con f = frequenza [Hz] (nel caso in esame, è stata adottata una frequenza di 10 Hz);
- IP = indice di penetrazione, pari a $\frac{20 - 500\alpha}{50\alpha + 1}$;
- α = suscettività termica del bitume, pari a $\frac{\log(800) - \log(\text{PenT } 2)}{T_{PA} - 25}$;
- T_{PA} = temperatura di rammollimento, determinata dalla prova Palla-Anello [°C];
- T = temperatura alla quale si vogliono determinare le caratteristiche del bitume [°C].

Le caratteristiche dei bitumi, nel caso in esame di tipo modificato soft per lo strato di base e modificato hard per il binder e l'usura, sono state reperite dal Capitolato Speciale di Appalto di ANAS (Parte 2ª Norme Tecniche – Pavimentazioni stradali/autostradali, 2009); in Tab. 9 sono riportati i valori di penetrazione e di temperatura di rammollimento adottati. Sulla base della temperatura del conglomerato bituminoso nella stagione di riferimento (determinabile tramite la relazione di Witczak, paragrafo 4), delle caratteristiche meccaniche del bitume (Tab. 9) e della composizione della miscela (Tab. 6, 7 e 8), sono stati ricavati i valori del modulo complesso degli strati in conglomerato bituminoso nelle 4 diverse stagioni (Tab. 10, 11 e 12).

RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLA PAVIMENTAZIONE

Tab. 9: Proprietà meccaniche dei bitumi adottati.

PROPRIETA' BITUME			
	usura	binder	base
Penetrazione (25°C) [dmm]	60	60	60
Rammollimento [°C]	80	80	70

Tab. 10: Moduli complessi dello strato di Base.

BASE			
Temperatura pavimentazione [°C]			
Inverno	Primavera	Estate	Autunno
8.2	16.0	27.6	18.7
B*			
0.006	0.003	0.001	0.002
R*			
0.165	0.111	0.049	0.094
E* [Mpa]			
5511	3710	1652	3145

Tab. 11: Moduli complessi dello strato di Binder.

BINDER			
Temperatura pavimentazione [°C]			
Inverno	Primavera	Estate	Autunno
8.4	16.5	28.6	19.4
B*			
0.003	0.001	0.001	0.001
R*			
0.105	0.071	0.033	0.061
E* [Mpa]			
3510	2377	1109	2027

Tab. 12: Moduli complessi dello strato di Usura.

USURA			
Temperatura pavimentazione [°C]			
Inverno	Primavera	Estate	Autunno
8.6	17.1	29.9	20.2
B*			
0.003	0.001	0.000	0.001
R*			
0.138	0.092	0.041	0.078
E* [Mpa]			
2061	1383	619	1172

Relativamente al coefficiente di Poisson, è stato adottato per tutti e 3 gli strati il valore 0,35.

6.5 SINTESI DEI PARAMETRI ADOTTATI

In Tab. 13 sono riepilogati i parametri meccanici adottati per i diversi strati della pavimentazione di progetto.

Tab. 13: Parametri di calcolo della pavimentazione

Modulo Elastico [Mpa]				
	inverno	primavera	estate	autunno
Usura drenante	2061	1383	619	1172
Binder	3510	2377	1109	2027
Base	5511	3710	1652	3145
Sottobase	2000 (FASE I) / 300 (FASE II)			
Fondazione	217			
Sottofondo	100			
Coeff. Poisson				
Usura drenante	0.35			
Binder	0.35			
Base	0.35			
Sottobase	0.30			
Fondazione	0.40			
Sottofondo	0.45			

7 VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE

Una volta fissati i parametri di calcolo, è possibile determinare lo stato tenso-deformativo all'interno della pavimentazione mediante il software BISAR. Ottenuta la risposta della pavimentazione sotto carico, è necessario correlarla alla performance della pavimentazione stessa; ciò è possibile mediante le Leggi di Degrado.

In riferimento a specifici ammaloramenti della pavimentazione, si determina il numero di passaggi dell'asse standard che porta a condizioni ultime la pavimentazione relativamente al fenomeno di degrado considerato. Tale numero di passaggi "consentiti" (N_c) è poi paragonato al numero di passaggi "previsto" (N_p) (paragrafo 3) al fine di verificare la pavimentazione di progetto; chiaramente, la pavimentazione risulterà verificata se il rapporto tra N_p e N_c è minore di 1.

Le verifiche devono essere condotte in riferimento ai periodi in cui è stato suddiviso l'anno; nel caso in esame è stata prevista una ripartizione omogenea del traffico nei 4 periodi considerati. La verifica sarà dunque del tipo:

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

La pavimentazione manifesterà un certo numero di applicazioni dell'asse standard che la porta in condizioni ultime in termini dei diversi fenomeni di degrado associati ai diversi strati; la verifica dovrà essere condotta sulla base della condizione più gravosa, ossia del fenomeno di degrado che si sviluppa in corrispondenza del minor numero di applicazioni dell'asse standard.

7.1 VERIFICA DEL SOTTOFONDO

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

La legge di degrado adottata per la verifica del 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 = numero di cicli riferito all'asse standard considerato che causa l'accumulo critico di deformazioni permanenti;
- ε_z = deformazione verticale di compressione sulla sommità del sottofondo.

7.2 VERIFICA DELLA FONDAZIONE IN MISTO GRANULARE

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

$$N_B = 10^{(2.605122 \cdot F + 3.480098)}$$

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 le formule seguenti:

$$F = \frac{\sigma_3 \left[K \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) \right] + 2 K C \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

$$F = \frac{\sigma_3 \phi_{\text{term}} + C_{\text{term}}}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

dove:

- σ_1, σ_3 = tensioni principali determinate alla profondità intermedia dello strato di fondazione;
- C = coesione (assunta pari a 100 kPa per materiale di classe G5 e condizioni di umidità moderata);
- Φ = angolo di attrito interno (assunto pari a 45° per materiale di classe G5 e condizioni di umidità moderata);
- C_{term} = coefficiente tabulato in funzione del tipo di materiale granulare (115 per materiale di classe G5 e condizioni di umidità moderata);
- Φ_{term} = coefficiente tabulato in funzione del tipo di materiale granulare (3,30 per materiale di classe G5 e condizioni di umidità moderata);
- K = costante che dipende dalle condizioni di umidità (0,8 per condizioni di umidità moderata).

7.3 VERIFICA DELLA SOTTOBASE IN MISTO CEMENTATO

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:

- nella prima fase, quando il misto cementato si presenta a blocchi di dimensioni da 1 a 10 volte lo spessore dello strato, la sovrastruttura viene calcolata attribuendo al misto cementato un valore di modulo iniziale. In questo caso viene definita la vita a fatica sulla base della massima deformazione di trazione subita dallo strato ε_t e della massima deformazione di trazione ammissibile ε_b . I parametri fondamentali che entrano in gioco in questa prima fase 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 σ_v subita dallo strato 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 del 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 per strade con elevato traffico pesante è basato sulla seguente equazione:

$$N_f = 10^{6,72 \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_f}{7,49 \cdot \varepsilon_b}\right)}$$

dove N_f è il numero di cicli di carico di asse standard ammissibile durante il periodo di vita a fatica effettivo, ε_f è la massima deformazione di trazione alla base dello strato e ε_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:

$$SF = 10^{(0,00285d - 0,293)}$$

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:

$$N_{Ca} = 10^{7,386 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{1,09 \cdot UCS}\right)}$$

dove σ_v è la tensione di compressione in sommità dello strato e UCS è la tensione massima a compressione ammissibile.

Il valore totale dei cicli di carico sopportati dallo strato trattato con cemento risulta essere la somma dei cicli accumulati durante le due fasi.

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

Occorre notare che se durante la prima fase gli altri strati (" i ") che costituiscono la sovrastruttura hanno tutti una vita utile (N_{i1}) superiore a N_f tale eccesso ($N_{i1} - N_f$) va moltiplicato per il rapporto N_{i2}/N_{i1} dove N_{i2} è il numero di cicli dello stesso strato calcolato nelle condizioni di seconda fase. In tal caso la vita utile dello strato i -esimo risulterebbe essere

$$N_f + (N_{i1} - N_f) \cdot \frac{N_{i2}}{N_{i1}}$$

In caso contrario se uno strato qualsiasi della pavimentazione va in crisi per un numero di cicli N_i inferiore a N_f , è evidente che questo determina la vita utile dell'intera pavimentazione senza l'instaurarsi della seconda fase.

7.4 VERIFICA DEGLI STRATI IN CONGLOMERATO BITUMINOSO

Il fenomeno di degrado associato agli strati legati a bitume è la fessurazione per fatica. Il fenomeno è governato dalla massima deformazione di trazione orizzontale che si manifesta alla base dei suddetti strati.

La legge di fatica considerata nella presenta analisi è la legge di Finn:

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

dove:

- N_t = numero di cicli di applicazione del carico, riferito all'asse standard considerato, che causa la fessurazione del 10% della superficie stradale;
- ε_t = deformazione orizzontale di trazione massima alla base degli strati legati a bitume;
- E = modulo elastico (espresso in MPa) dello strato più profondo in conglomerato bituminoso riferito alla temperatura effettiva dello strato stesso.

8 ANALISI DEI RISULTATI

I risultati delle verifiche esposte nel paragrafo precedente sono riportati in Tab. 14. L'analisi tenso-deformativa, output del programma di calcolo BISAR, è riportata in allegato.

Tab. 14: Rapporti tra applicazioni dell'asse standard previste e applicazioni dell'asse standard a rottura per i diversi strati e i diversi periodi.

VERIFICHE				
	Conglomerato Bituminoso	Misto Cementato	Misto Granulare	Sottofondo
N_p/N_c inverno	0.1010	0.0800	0.0003	0.0400
N_p/N_c primavera	0.1213	0.0854	0.0039	0.0581
N_p/N_c estate	0.1474	0.0989	0.0673	0.0987
N_p/N_c autunno	0.1283	0.0879	0.0086	0.0661
N_p/N_c TOT	0.4979	0.3523	0.0800	0.2628
	VERIFICATA	VERIFICATA	VERIFICATA	VERIFICATA

Dai risultati delle diverse verifiche si può notare come la pavimentazione proposta risulti ben dimensionata; infatti il rapporto tra i cicli di carico previsti e i cicli di carico a rottura, per ciascuno strato, si mantiene al di sotto dell'unità.

La legge di degrado che mette in luce la maggiore criticità è quella relativa alla rottura per fatica degli strati in conglomerato bituminoso.

Si può concludere dicendo che la pavimentazione proposta risulta verificata essendo in grado di sopportare un numero di cicli di carico di assi standard da 80 kN superiore a quello previsto per i primi 25 anni di esercizio.

RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLA PAVIMENTAZIONE

System: 3: Fase I_Estate													
Layer	Thickness	Elasticity	Poisson's	Load	Vertical	Vertical	Horz. (Shear)	Horz. (Shear)	Radius	X-Coordinate	Y-Coordinate	Angle	Shear
Number	(m)	(MPa)	Ratio	Number	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(m)	(m)	(m)	(Degrees)	
1	0.04	6.19E+02	0.35	1	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.06	1.11E+03	0.35	2	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	0.1	1.65E+03	0.35										
4	0.18	2.00E+03	0.3										
5	0.2	2.17E+02	0.4										
6		1.00E+02	0.45										
Position	Layer	X-Coordinate	Y-Coordinate	Depth	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
Number	Number	(m)	(m)	(m)	XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX (µstrain)	YY (µstrain)	ZZ (µstrain)	UX (µm)	UY (µm)	UZ (µm)
1	3	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	-4.70E-02	-3.80E-02	-1.92E-01	2.04E+01	2.78E+01	-9.86E+01	8.19E-02	0.00E+00	2.26E+02
2	3	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	-7.58E-02	-2.65E-02	-9.72E-02	-1.97E+01	2.07E+01	-3.72E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.30E+02
3	4	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	-1.93E-02	-7.88E-03	-1.92E-01	2.03E+01	2.78E+01	-9.19E+01	7.28E-02	0.00E+00	2.26E+02
4	4	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	-7.10E-02	-9.09E-03	-9.72E-02	-1.95E+01	2.07E+01	-3.66E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.30E+02
5	4	0.00E+00	0.00E+00	3.80E-01	1.56E-01	1.94E-01	-3.09E-02	5.37E+01	7.80E+01	-6.79E+01	-9.60E+00	0.00E+00	2.14E+02
6	4	1.75E-01	0.00E+00	3.80E-01	1.59E-01	2.05E-01	-3.21E-02	5.38E+01	8.32E+01	-7.07E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.21E+02
7	5	0.00E+00	0.00E+00	4.80E-01	5.51E-03	8.02E-03	-2.19E-02	5.10E+01	6.72E+01	-1.26E+02	-9.62E+00	0.00E+00	2.01E+02
8	5	1.75E-01	0.00E+00	4.80E-01	6.43E-03	8.68E-03	-2.33E-02	5.66E+01	7.12E+01	-1.35E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.06E+02
9	6	0.00E+00	0.00E+00	5.80E-01	-2.58E-03	-1.54E-03	-1.70E-02	5.76E+01	7.27E+01	-1.52E+02	-1.09E+01	0.00E+00	1.88E+02
10	6	1.75E-01	0.00E+00	5.80E-01	-2.33E-03	-1.53E-03	-1.81E-02	6.49E+01	7.65E+01	-1.63E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.93E+02
System: 4: Fase I_Autunno													
Layer	Thickness	Elasticity	Poisson's	Load	Vertical	Vertical	Horz. (Shear)	Horz. (Shear)	Radius	X-Coordinate	Y-Coordinate	Angle	Shear
Number	(m)	(MPa)	Ratio	Number	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(m)	(m)	(m)	(Degrees)	
1	0.04	1.17E+03	0.35	1	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.06	2.03E+03	0.35	2	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	0.1	3.15E+03	0.35										
4	0.18	2.00E+03	0.3										
5	0.2	2.17E+02	0.4										
6		1.00E+02	0.45										
Position	Layer	X-Coordinate	Y-Coordinate	Depth	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
Number	Number	(m)	(m)	(m)	XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX (µstrain)	YY (µstrain)	ZZ (µstrain)	UX (µm)	UY (µm)	UZ (µm)
1	3	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	4.81E-02	7.20E-02	-1.62E-01	2.53E+01	3.55E+01	-6.48E+01	-1.55E+00	0.00E+00	2.08E+02
2	3	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	-3.31E-02	5.43E-02	-8.89E-02	-6.66E+00	3.08E+01	-3.06E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.11E+02
3	4	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	9.75E-03	2.55E-02	-1.62E-01	2.53E+01	3.56E+01	-8.61E+01	-1.56E+00	0.00E+00	2.08E+02
4	4	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	-3.22E-02	2.54E-02	-8.88E-02	-6.59E+00	3.08E+01	-4.34E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.11E+02
5	4	0.00E+00	0.00E+00	3.80E-01	1.44E-01	1.76E-01	-2.61E-02	4.96E+01	7.01E+01	-6.10E+01	-8.98E+00	0.00E+00	1.97E+02
6	4	1.75E-01	0.00E+00	3.80E-01	1.50E-01	1.86E-01	-2.72E-02	5.09E+01	7.46E+01	-6.39E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.02E+02
7	5	0.00E+00	0.00E+00	4.80E-01	5.73E-03	7.80E-03	-1.87E-02	4.65E+01	5.98E+01	-1.11E+02	-8.74E+00	0.00E+00	1.85E+02
8	5	1.75E-01	0.00E+00	4.80E-01	6.59E-03	8.40E-03	-1.99E-02	5.15E+01	6.31E+01	-1.19E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.89E+02
9	6	0.00E+00	0.00E+00	5.80E-01	-1.94E-03	-1.10E-03	-1.46E-02	5.14E+01	6.36E+01	-1.33E+02	-9.71E+00	0.00E+00	1.74E+02
10	6	1.75E-01	0.00E+00	5.80E-01	-1.70E-03	-1.06E-03	-1.55E-02	5.74E+01	6.67E+01	-1.42E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.78E+02

RELAZIONE SUL DIMENSIONAMENTO DELLA PAVIMENTAZIONE

System: 3: Fase II_Estate														
		Modulus			Vertical		Vertical		Horz. (Shear)		Horz. (Shear)			
Layer	Thickness	Elasticity	Poisson's	Load	Load	Stress	Load	Stress	Radius	X-Coordinate	Y-Coordinate	Shear		
Number	(m)	(MPa)	Ratio	Number	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(m)	(m)	(m)	(Degrees)		
1	0.04	6.19E+02	0.35	1	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		
2	0.06	1.11E+03	0.35	2	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00		
3	0.1	1.65E+03	0.35											
4	0.18	3.00E+02	0.3											
5	0.2	2.17E+02	0.4											
6		1.00E+02	0.45											
Position	Layer	X-Coordinate	Y-Coordinate	Depth	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement	
Number	Number	(m)	(m)	(m)	XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	UX (μm)	UY (μm)	UZ (μm)	
1	3	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	2.48E-01	3.13E-01	-1.18E-01	1.09E+02	1.63E+02	-1.91E+02	-1.01E+01	0.00E+00	3.04E+02	
2	3	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	6.66E-02	2.44E-01	-8.96E-02	7.69E+00	1.53E+02	-1.20E+02	0.00E+00	0.00E+00	3.11E+02	
3	4	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	1.35E-03	1.38E-02	-1.18E-01	1.09E+02	1.63E+02	-4.09E+02	-1.01E+01	0.00E+00	3.04E+02	
4	4	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	-2.07E-02	1.28E-02	-8.96E-02	7.78E+00	1.53E+02	-2.91E+02	0.00E+00	0.00E+00	3.10E+02	
5	4	0.00E+00	0.00E+00	3.80E-01	1.79E-02	2.67E-02	-4.48E-02	7.78E+01	1.16E+02	-1.94E+02	-1.43E+01	0.00E+00	2.56E+02	
6	4	1.75E-01	0.00E+00	3.80E-01	1.89E-02	2.86E-02	-4.78E-02	8.21E+01	1.24E+02	-2.07E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.66E+02	
7	5	0.00E+00	0.00E+00	4.80E-01	8.72E-03	1.28E-02	-3.10E-02	7.37E+01	1.00E+02	-1.82E+02	-1.41E+01	0.00E+00	2.35E+02	
8	5	1.75E-01	0.00E+00	4.80E-01	1.03E-02	1.38E-02	-3.36E-02	8.39E+01	1.07E+02	-1.99E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.44E+02	
9	6	0.00E+00	0.00E+00	5.80E-01	-2.51E-03	-7.71E-04	-2.32E-02	8.28E+01	1.08E+02	-2.17E+02	-1.60E+01	0.00E+00	2.18E+02	
10	6	1.75E-01	0.00E+00	5.80E-01	-2.07E-03	-7.54E-04	-2.50E-02	9.53E+01	1.14E+02	-2.38E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.25E+02	
System: 4: Fase II_Autunno														
		Modulus			Vertical		Vertical		Horz. (Shear)		Horz. (Shear)			
Layer	Thickness	Elasticity	Poisson's	Load	Load	Stress	Load	Stress	Radius	X-Coordinate	Y-Coordinate	Shear		
Number	(m)	(MPa)	Ratio	Number	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(m)	(m)	(m)	(Degrees)		
1	0.04	1.17E+03	0.35	1	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		
2	0.06	2.03E+03	0.35	2	2.00E+01	7.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.54E-02	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00		
3	0.1	3.15E+03	0.35											
4	0.18	3.00E+02	0.3											
5	0.2	2.17E+02	0.4											
6		1.00E+02	0.45											
Position	Layer	X-Coordinate	Y-Coordinate	Depth	Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement	
Number	Number	(m)	(m)	(m)	XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	μstrain	μstrain	μstrain	UX (μm)	UY (μm)	UZ (μm)	
1	3	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	4.00E-01	4.94E-01	-8.88E-02	8.21E+01	1.22E+02	-1.28E+02	-9.21E+00	0.00E+00	2.75E+02	
2	3	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	1.92E-01	4.14E-01	-7.35E-02	2.31E+01	1.18E+02	-9.06E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.83E+02	
3	4	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01	1.16E-03	1.04E-02	-8.87E-02	8.22E+01	1.22E+02	-3.07E+02	-9.22E+00	0.00E+00	2.75E+02	
4	4	1.75E-01	0.00E+00	2.00E-01	-1.21E-02	9.85E-03	-7.34E-02	2.32E+01	1.18E+02	-2.42E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.83E+02	
5	4	0.00E+00	0.00E+00	3.80E-01	1.58E-02	2.23E-02	-3.71E-02	6.74E+01	9.56E+01	-1.62E+02	-1.26E+01	0.00E+00	2.37E+02	
6	4	1.75E-01	0.00E+00	3.80E-01	1.71E-02	2.39E-02	-3.98E-02	7.30E+01	1.02E+02	-1.74E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.46E+02	
7	5	0.00E+00	0.00E+00	4.80E-01	8.06E-03	1.12E-02	-2.65E-02	6.54E+01	8.54E+01	-1.58E+02	-1.25E+01	0.00E+00	2.20E+02	
8	5	1.75E-01	0.00E+00	4.80E-01	9.42E-03	1.20E-02	-2.86E-02	7.42E+01	9.05E+01	-1.71E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.27E+02	
9	6	0.00E+00	0.00E+00	5.80E-01	-2.18E-03	-8.48E-04	-2.04E-02	7.36E+01	9.29E+01	-1.90E+02	-1.41E+01	0.00E+00	2.04E+02	
10	6	1.75E-01	0.00E+00	5.80E-01	-1.82E-03	-8.45E-04	-2.18E-02	8.38E+01	9.79E+01	-2.06E+02	0.00E+00	0.00E+00	2.11E+02	