

**AUTOSTRADA A2 "MEDITERRANEA"
COLLEGAMENTO PORTO GIOIA TAURO GATE SUD CON
AUTOSTRADA A2 - LOTTO 1 E LOTTO 2**

DG 54/17 LOTTO 1

COD. UC165

PROGETTO DEFINITIVO

COD. UC167

GRUPPO DI PROGETTAZIONE: R.T.I.: INTEGRA CONSORZIO STABILE (capogruppo mandataria)
Prometeoengineering.it S.r.l. - Dott. Geol. Andrea Rondinara

RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Prof. Ing. Franco BRAGA (Integra Consorzio Stabile)

CAPOGRUPPO MANDATARIA:



Direttore Tecnico:
Prof. Ing. Franco Braga

GEOLOGO:

Dott. Geol. A. CANESSA (Prometeoengineering.it S.r.l.)

COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Alessandro Orsini (Integra Consorzio Stabile)

MANDANTI:



Direttore Tecnico:
Dott. Ing. Alessandro FOCARACCI

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

Dott. Ing. Giuseppe Danilo Malgeri

Dott. Geol. Andrea Rondinara

PROGETTO STRADALE

Generale

Relazione tecnica pavimentazione

CODICE PROGETTO

PROGETTO
DPUC0165
DPUC0167

LIV. PROG. N. PROG.

D

21

NOME FILE

T00PS00TRARE03A.dwg

REVISIONE

SCALA:

CODICE
ELAB.

T00PS00TRARE03

A

A

EMISSIONE

Settembre 2022

Grevesse

Eusepi

Braga

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

AUTOSTRADA A2 "MEDITERRANEA"
COLLEGAMENTO PORTO GIOIA TAURO SUD CON AUTOSTRADA A2
1° Lotto, dal Km 0+000 al Km 0+900
2° Lotto, dal Km 0+900 al Km 2+297

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione tecnica pavimentazione

1	PREMESSA	3
2	RIFERIMENTI NORMATIVI	5
3	DATI DI BASE.....	6
	3.1 Obiettivo.....	6
	3.2 Traffico commerciale previsto	7
4	PREDIMENSIONAMENTO ATTRAVERSO IL CATALOGO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI	9
5	DESCRIZIONE DEL METODO "AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES"	10
6	NUMERO DI ASSI STANDARD SOPPORTABILE DALLA PAVIMENTAZIONE.....	12
7	NUMERO DI ASSI EQUIVALENTI PREVISTI NELL'ARCO DELLA VITA UTILE DELLA PAVIMENTAZIONE	15
	7.1 Traffico commerciale in assi standard	15
8	VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE.....	20
	8.1 Verifica delle alterazioni della pavimentazione stradale.....	20

1 PREMESSA

Nella presente relazione è riportata la verifica della pavimentazione stradale prevista nell'ambito Progetto Definitivo degli assi principali del collegamento tra il porto di Gioia Tauro Sud e l'autostrada A2. In generale il Progetto Definitivo "Collegamento Porto Gioia Tauro Gate Sud con Autostrada A2"

La configurazione della pavimentazione stradale, adottata per l'asse principale di progetto e per le rampe di svincolo è composta dai seguenti strati:

Strato	Materiale	Spessore [cm]
usura	conglomerato bituminoso	5
collegamento (binder)	conglomerato bituminoso	8
base	conglomerato bituminoso	14
fondazione	misto cementato	15
	misto granulare	15

L'applicazione di modelli verificati attraverso approfondite ed estese indagini può risultare di grande aiuto mantenendo però larghi margini di approssimazione, in particolare per quanto riguarda la composizione del traffico pesante. Infatti, al fine del dimensionamento, risultano fondamentali le sollecitazioni dovute al passaggio degli autocarri, rispetto alle quali possono essere ritenute trascurabili quelle dovute al traffico leggero (autovetture) anche se questo è di gran lunga più elevato come entità numerica. Occorre anche tener presente che i mezzi pesanti esercitano la propria azione in modo diverso a seconda del carico massimo raggiungibile ed in relazione alla distribuzione di tale carico sui differenti assi e ruote. Le sollecitazioni risultano più gravose quando sono ripetute, quando le ruote passano sempre sullo stesso punto; nella realtà ciò non si verifica esattamente, ma in genere si riscontrano dispersioni rispetto alla traiettoria media che dipendono oltre che da fattori soggettivi, dalla larghezza dell'area di impronta, dalla larghezza delle corsie, dai volumi di traffico, etc. Il primo aspetto che occorre considerare è quello di sapere quale è il numero medio di assi na per veicolo pesante.

Il predimensionamento della pavimentazione è stato eseguito mediante l'utilizzo del "Catalogo delle Pavimentazioni Stradali" redatto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. Tale operazione è stata necessaria in quanto i metodi di calcolo adottati in seguito richiedono come dati di ingresso gli spessori dei vari strati della pavimentazione. Si è proceduto ad una prima verifica della sovrastruttura stradale attraverso l'algoritmo di calcolo della "AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES" basato sui risultati dell'esperimento AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Tale metodo empirico permette di calcolare, tramite alcune relazioni, che tengono conto delle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti la sovrastruttura, il numero di passaggi di assi standard del peso di 8,2 ton. che la pavimentazione può sopportare prima di raggiungere un grado di ammaloramento, cioè un livello di funzionalità inaccettabile, in relazione alla "Affidabilità" richiesta. Il numero ricavato è stato poi confrontato

con il numero di passaggi di assi standard alla fine della "vita utile" calcolati attraverso lo spettro di traffico inserito nel "Catalogo delle Pavimentazioni Stradali".

Soddisfatta la verifica si procederà al calcolo con un metodo "razionale".

Il metodo schematizza la sovrastruttura come un multistrato elastico e permette di calcolare le sollecitazioni e le deformazioni in vari punti della sovrastruttura stessa. Noto lo stato tensionale e deformativo è stato possibile valutare:

- la durata della pavimentazione, applicando un criterio di fatica che ci ha permesso di valutare il danno cumulato in funzione del numero di assi standard tali da provocare l'innesco e la risalita in superficie delle fessure in relazione all'affidabilità richiesta e del numero di passaggi di assi standard alla fine della "vita utile";
- la deformazione permanente, "ormaie", della pavimentazione alla fine della vita utile e verificarne la loro ammissibilità rispetto ad un valore fissato.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

La presente relazione è stata redatta in conformità alla seguente normativa:

- D. L.vo 30/04/1992 n. 285: "Nuovo codice della strada";
- D.M. 05/11/2001: "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade";
- CNR - Bollettino Ufficiale - Norme Tecniche - Anno XXIX – N.178: "Catalogo delle pavimentazioni stradali".

Sono state considerate, inoltre, le indicazioni e prescrizioni riportate nei seguenti documenti:

- AASHTO: "Guide for Design of Pavement Structures";
- "Portanza dei sottofondi": Fondazione politecnica per il mezzogiorno d'Italia – P. Giannattasio, C. Caliendo, L. Esposito, B. Festa, W. Pellicchia – Napoli , Dicembre 1989.

3 DATI DI BASE

Di seguito si riportano i principali dati utili al dimensionamento della pavimentazione di progetto:

Dati di progetto	
Tipo di Strada	Stada extraurbana principale B1
Intervallo Velocità [km/h]	70-120
TGM [veicoli/giorno]	8 472
Incremento Annuo [%]	2%
Veicoli Commerciali [%]	9%
Mr - modulo resiliente del sottofondo [MPa]	100
Vita Utile [Anni]	25
Tn - Numero di veicoli commerciali transitanti, nell'arco della vita utile	5 081 093

3.1 Obiettivo

L'obiettivo che ci si prefigge nella progettazione delle sovrastrutture è quello, come si è accennato, di assicurare attraverso normali operazioni di manutenzione un livello minimo di funzionalità per un prefissato lasso di tempo.

E' opportuno osservare che il rifacimento dello strato di usura dopo un certo numero di anni è da considerarsi come un intervento manutentivo ordinario e prevedibile al fine di assicurare le necessarie caratteristiche di aderenza nelle pavimentazioni flessibili e semi-rigide.

Poiché, inoltre, le caratteristiche dei materiali utilizzati non si mantengono costanti nel tempo, i carichi sono dispersi per posizione ed entità, ed infine il fenomeno stesso della rottura per fatica risulta essere un fenomeno aleatorio, l'obiettivo deve essere definito in termini probabilistici.

Nel progetto delle pavimentazioni, l'obiettivo si sostanzia, quindi, attraverso la definizione di tre elementi:

- La vita utile, intesa come il numero di anni durante il quale la pavimentazione deve assicurare, attraverso normali operazioni di manutenzione, condizioni di funzionalità superiori allo stato limite, per il progetto in esame è stata posta pari a 25 anni;
- Lo stato limite, cioè il livello minimo di funzionalità della sovrastruttura ritenuto accettabile, superato il quale è necessario comunque intervenire, per il metodo empirico il parametro di riferimento è il PSI, per il metodo razionale si fa riferimento alla superficie di area affetta da fessurazione e alla profondità delle ormaie. Per quanto concerne la percentuale di area fessurata limite è stata fissata pari al 10% nelle wheel path e al 50% nella singola corsia, conformemente a quanto prescritto rispettivamente nel "Catalogo italiano delle pavimentazioni (CNR)" e nel metodo empirico - meccanicistico dell'AASHTO 2002, infine il valore limite della profondità media delle ormaie è stata scelta pari a 1,2 cm, il che garantisce livelli di sicurezza accettabili;

- L'affidabilità, cioè la probabilità che la sovrastruttura sia in grado di assicurare, con normali operazioni di manutenzione, condizioni di circolazione superiori allo stato limite per l'intera durata della vita utile, per il progetto in esame è stata posta pari al 90%.

3.2 Traffico commerciale previsto

Il numero di veicoli commerciali transitanti durante la vita utile della pavimentazione sulla corsia più carica è pari a:

$$T_n = (TGM) \cdot (\%Dir) \cdot (\%Pes) \cdot (N) \cdot (\%Cor pes) \cdot [((1+r)^{n-1}) / r]$$

dove:

- TGM = traffico giornaliero medio complessivo bidirezionale [veicoli/giorno];
- %Dir = ripartizione direzionale del TGM [%];
- (%Pes) = percentuale di veicoli commerciali [% TGM];
- (%Cor pes) = percentuale di veicoli commerciali sulla corsia di calcolo [% (%Pes)];
- n = vita utile [anni];
- r = tasso di incremento annuo del traffico [%];
- N = numero di giorni per anno di transito di veicoli commerciali [giorno/anno].

I valori del traffico giornaliero medio complessivo bidirezionale (TGM) e della percentuale di veicoli commerciali (%Pes) sono stati desunti dallo studio di impatto del traffico di cui all' "Analisi trasportistica" svolta nell'ambito del Progetto Definitivo.

Sono stati considerati i valori di TGM e %Pes corrispondenti al massimo traffico giornaliero medio complessivo bidirezionale riferito ai veicoli commerciali:

- TGM = 8 472 veicoli/giorno (Traffico giornaliero medio complessivo bidirezionale);
- %Pes = 9% (Percentuale di veicoli commerciali).

Per la ripartizione direzionale del TGM è stato considerato un valore pari a %Dir = 60%.

Per quanto riguarda la percentuale di veicoli commerciali sulla corsia di calcolo, tenendo conto che non tutti i veicoli definiti commerciali transitano sulla corsia di marcia (soprattutto quelli con minori carichi per asse raggiungono velocità tali da impegnare anche le altre corsie), è stato ipotizzato che il 95% di tutti i veicoli commerciali transiti sulla corsia di marcia, ovvero % Cor pes = 95%.

La vita utile della pavimentazione è stata assunta pari a n=25 anni.

Per quanto riguarda il tasso di incremento annuo del traffico, sulla base dei risultati dell' "Analisi trasportistica" è stato assunto un tasso di crescita pari a $r=2\%$.

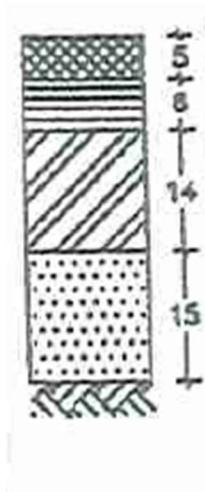
Il numero di giorni per anno di transito veicoli commerciali è stato considerato pari $N=365$.

Il calcolo del numero di veicoli commerciali T_n transitanti durante la vita utile della pavimentazione è riportato nella tabella seguente.

T_n (Numero di assi di veicoli commerciali nell'arco della vita utile lungo la corsia più carica)		
TGM [veicoli/giorno]	8 472	Traffico giornaliero medio complessivo bidirezionale
%Dir	60%	Ripartizione direzionale
%Pes	9%	Percentuale di veicoli commerciali
%Cor pes	95%	Percentuale di veicoli commerciali sulla corsia di calcolo
r	2%	Tasso di incremento annuo del traffico
n [anni]	25	Numero di anni di vita utile
N [giorni / anno]	365	Numero di giorni per anno di transito veicoli commerciali
T_n	5 081 093	

4 PREDIMENSIONAMENTO ATTRAVERSO IL CATALOGO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Il catalogo delle pavimentazioni stradali suggerisce al progettista un ventaglio di soluzioni di sovrastrutture stradali di varie tipologie per le condizioni di traffico e ambientali tipiche dell'Italia. Le tipologie di pavimentazioni che vengono considerate sono: flessibile, semirigida e rigida. Per ciascuna di esse, il catalogo, fornisce soluzioni che, per un determinato tipo di strada, portanza del sottofondo e condizioni di traffico, sono equivalenti tra loro sotto l'aspetto della durata strutturale, ma differenti per i materiali impiegati, per gli spessori degli strati e per i costi. In definitiva in funzione del numero totale di veicoli commerciali transitanti al venticinquesimo anno (TN= 5 081 093 veicoli) ed in funzione del modulo resiliente del sottofondo ($M_r=100$ MPa) è stata scelta la pavimentazione flessibile con i seguenti parametri $V_k=4.000.000$ ed $M_r=90$ MPa. Il catalogo fornisce i seguenti spessori:



Tuttavia, utilizzando lo strato di usura drenante, occorre aumentare lo spessore del binder di 2 cm; quindi si ha:

- Usura: 5 cm
- Binder: 8 cm
- Base: 14 cm
- Fondazione in misto granulare: 15 cm

5 DESCRIZIONE DEL METODO "AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES"

Per la verifica della pavimentazione è stato utilizzato il metodo empirico-statistico dell' "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures".

Il metodo "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures" è un metodo empirico-statistico, basato cioè su osservazioni sperimentali dei parametri in gioco, i quali sono opportunamente correlati da funzioni di regressione in modo che i legami funzionali siano fisicamente corretti.

Il metodo consente di determinare il numero di assi standard (l'asse standard è l'asse singolo con ruote gemelle da 18 Kpounds = 8,2 t = 80 kN) che la pavimentazione può sopportare raggiungendo un fissato grado di ammaloramento finale (PSIf). Tale valore è funzione di vari parametri, quali caratteristiche meccaniche dei materiali, spessori degli strati, portanza del sottofondo, grado di ammaloramento finale che, per questioni di comfort e sicurezza, la pavimentazione può raggiungere, coefficiente di sicurezza (fissato attraverso l'affidabilità, ovvero la probabilità che la pavimentazione resista al traffico che transita durante la sua vita utile).

Il numero di assi standard deve essere confrontato con il traffico dei veicoli commerciali (massa complessiva ≥ 3 t) che si stima passerà durante la vita utile della pavimentazione sulla corsia più carica (si dimensiona la corsia più carica, non essendo il traffico pesante equiparato tra le corsie).

Poiché il traffico commerciale che transita su strada è costituito da veicoli che si differenziano per numero di assi, carico per asse e tipologia di asse (singolo, tandem e tridem) è necessario determinare il numero di assi standard equivalenti, ovvero il numero di assi standard che determinano lo stesso danno alla pavimentazione provocato dagli assi dei veicoli reali.

Per determinare il numero di assi standard che transiteranno, è necessario stabilire preliminarmente i coefficienti di equivalenza tra ciascun asse reale e quello standard.

Tali coefficienti sono funzione di alcuni parametri, quali caratteristiche meccaniche dei materiali, spessori degli strati, grado di ammaloramento finale (per quanto riguarda la pavimentazione, carico per asse e tipologia di asse) (per quanto riguarda gli assi stessi). Noti i coefficienti di equivalenza di ciascun asse dei veicoli che compongono il traffico reale, bisogna determinare il coefficiente di equivalenza medio, che è funzione della composizione del traffico sulla strada in esame (ovvero dello spettro di traffico, cioè della frequenza relativa dei vari tipi di veicoli).

Infine, per determinare il numero di assi equivalenti che transiteranno sulla corsia più carica occorre moltiplicare il coefficiente di equivalenza medio per il numero di veicoli commerciali che si stima transiteranno durante la vita utile della pavimentazione sulla corsia più carica.

Per ottenere il numero di veicoli commerciali che transiteranno sulla corsia più carica della pavimentazione durante la vita utile, bisogna conoscere il TGM (Traffico Giornaliero Medio), la percentuale di veicoli commerciali, la suddivisione del traffico pesante tra le corsie ed il tasso di incremento annuo del traffico.

La verifica consiste nel controllare che il numero di assi standard che la pavimentazione può sopportare sia maggiore del numero di assi equivalenti che transitano durante la vita utile della pavimentazione.

6 NUMERO DI ASSI STANDARD SOPPORTABILE DALLA PAVIMENTAZIONE

La relazione per il calcolo del traffico sopportabile in termini di assi standard equivalenti da 8,2 t delle pavimentazioni flessibili è la seguente, in cui $W_{8.2}$ è il numero di assi singoli equivalenti da 18 Kpounds (8,2 t o 80 KN) sopportabile dalla pavimentazione.

$$\text{Log}W_{8,2} = Z_R * S_0 + 9,36 * \log\left(\frac{SN}{2,54} + 1\right) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{PSI_i - PSI_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{\left(\frac{SN}{2,54} + 1\right)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}M_R - 3,056$$

Nel seguito è riportato il significato dei vari parametri della formula ed i relativi valori.

Z_r (valore della variabile standardizzata legata all'affidabilità R)

Z_r è il valore della variabile standardizzata legata all'affidabilità R (che è la probabilità che il numero di ripetizioni di carico NTmax tali che $PSI=PSI_f$ sia maggiore o uguale al numero di ripetizioni di carico NT realmente applicati alla sovrastruttura).

Per le Strade Extraurbane Principali è consigliato un valore di affidabilità pari a $R=90\%$ in corrispondenza del quale la variabile standardizzata assume il valore **$Z_r = -1,282$** .

S₀ (deviazione standard)

S_0 è la deviazione standard che tiene conto dell'errore che si commette nelle previsioni dei volumi di traffico e delle prestazioni della pavimentazione.

Per le pavimentazioni flessibili assume un valore compreso tra 0,40 e 0,50 quando si tiene conto dell'errore che si commette sia sul traffico sia sulla prestazione prevista per una data pavimentazione.

PSI (Present Serviceability Index)

Il parametro PSI (Present Serviceability Index), definisce lo stato limite, ovvero il grado di efficienza della pavimentazione, ed esprime la misura della idoneità di questa ad assicurare la sicurezza della circolazione e le condizioni di confort per gli utenti. Il PSI assume valori numerici compresi tra 0 (strada in pessime condizioni) e 5 (strada in ottime condizioni).

Il grado di efficienza ritenuto generalmente accettabile per le strade Extraurbane Principali, prima che si rendano necessari radicali interventi sulla pavimentazione, è relativo ad un valore PSIf= 2,5.

Per il grado di efficienza iniziale viene assunto un valore PSli= 4,2 poiché si tiene conto delle inevitabili imperfezioni costruttive.

Mr (modulo resiliente del sottofondo)

Il modulo resiliente del sottofondo Mr [psi] tiene conto della portanza del sottofondo. Il modulo resiliente è un modulo dinamico che considera il comportamento viscoelastico del materiale costituente il sottofondo. In mancanza di misure dirette, per la determinazione del modulo resiliente può essere utilizzata la seguente correlazione con l'indice CBR:

$$M_r = 1500 \cdot \text{CBR}$$

L'indice CBR è correlato al modulo di deformazione Md [MPa] derivante da prove di carico su piastra attraverso la correlazione:

$$\text{CBR} = 0,2 \cdot M_d$$

È stato adottato un valore del modulo di deformazione Md = 50 MPa (pari al valore minimo prescritto dai capitolati ANAS in corrispondenza del piano di posa della fondazione della pavimentazione stradale sia in rilevato sia in trincea). Il calcolo del modulo resiliente del sottofondo Mr è riportato nella tabella seguente.

Mr (modulo resiliente del sottofondo)		
Md [Mpa]	50	Modulo di deformazione
CBR [%]	10	Indice CBR
Mr [Mpa]	103	Modulo resiliente in Mpa
Mr [psi]	15 000	Modulo resiliente in psi

SN (structural number)

Lo structural number (indice strutturale) SN [poll] tiene conto della "resistenza strutturale" della pavimentazione ed è funzione degli spessori degli strati si, della "resistenza" dei materiali impiegati rappresentata, attraverso i "coefficienti strutturali di strato" ai, e della loro sensibilità all'acqua rappresentata attraverso i "coefficienti di drenaggio" mi. L'espressione analitica dello structural number è:

$$SN = s_1 \cdot a_1 \cdot m_1 + s_2 \cdot a_2 \cdot m_2 + \dots + s_n \cdot a_n \cdot m_n$$

Nell'espressione, s_1, s_2, \dots, s_n sono gli spessori degli strati della pavimentazione, a_1, a_2, \dots, a_n sono i coefficienti strutturali degli strati, m_1, m_2, \dots, m_n sono i coefficienti di drenaggio.

Per i coefficienti strutturali ed i coefficienti di drenaggio, i cui valori di riferimento sono desumibili dai nomogrammi dell'AASHTO, sono stati adottati i seguenti valori (corrispondenti a materiali tradizionali):

- $a_{usura} = 0,42$
- $a_{binder} = 0,40$
- $a_{base} = 0,32$
- $a_{misto\ granulare} = 0,15$
- $m_{strati\ legati\ con\ bitume} = 1$
- $m_{misto\ granulare} = 1$

Il calcolo dello structural number SN è riportato nella tabella seguente.

SN (Structural Number)					
strato	materiale	s_i [cm]	a_i	m_i	$(s_i \cdot a_i \cdot m_i)$ [cm]
usura	conglomerato bituminoso	5	0.42	1	2.10
collegamento (binder)	conglomerato bituminoso	8	0.40	1	3.20
base	conglomerato bituminoso	14	0.32	1	4.48
fondazione	misto cementato	0	0.16	1	0.00
	misto granulare	15	0.15	1	2.25
		42			
SN [pollici]	4.74			SN [cm]	12.03

Il calcolo numero di assi singoli equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN) sopportabile dalla pavimentazione, determinato sulla base dei parametri di cui sopra, è riportato nella tabella seguente.

Numero di assi singoli equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN) sopportabile dalla pavimentazione		
R	90%	Affidabilità
Zr	-1.282	Valore della variabile standardizzata legata all'affidabilità R
So	0.45	Deviazione standard che tiene conto dell'errore che si commette nelle previsioni dei volumi di traffico e delle prestazioni della pavimentazione
SN [pollici]	4.74	Structural Number
PSI i	4.20	Grado di efficienza iniziale della pavimentazione
PSI f	2.50	Grado di efficienza finale della pavimentazione
Mr [psi]	15 000	Modulo resiliente del sottofondo
LogW8.2	7.56	
W8.2	36 365 910	Numero di assi singoli equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN)

7 NUMERO DI ASSI EQUIVALENTI PREVISTI NELL'ARCO DELLA VITA UTILE DELLA PAVIMENTAZIONE

7.1 Traffico commerciale in assi standard

Nota il numero di veicoli commerciali transitanti sulla corsia di calcolo al termine della vita utile, per il calcolo del numero di assi standard equivalenti (18 Kpounds = 8,2 t = 80 kN) agli assi reali (traffico commerciale previsto), sono state prese in considerazione le tipologie di veicoli che costituiscono il parco veicolare commerciale in Italia e gli spettri di traffico prevedibili sulle strade italiane (ovvero la frequenza relativa di ciascun tipo di veicolo) desunti dal Catalogo delle pavimentazioni stradali (B.U. CNR n. 178 del 15/09/1995) e riportati nelle tabelle seguenti.

Tipi di veicoli commerciali, numero di assi e distribuzione dei carichi per asse

Tipo Veicolo	N° Assi			Distribuzione dei carichi per asse o set di assi			
	S	T	Td				
1) AUTOCARRI LEGGERI	2			↓10	↓20		
2) AUTOCARRI LEGGERI	2			↓15	↓30		
3) AUTOCARRI MEDI E PESANTI	2			↓40	↓80		
4) AUTOCARRI MEDI E PESANTI	2			↓50	↓110		
5) AUTOCARRI PESANTI	1	2		↓40	↓↓80=80		
6) AUTOCARRI PESANTI	1	2		↓60	↓↓100=100		
7) AUTOTRENI AUTOARTICOLATI	E	4		↓40	↓90	↓80	↓80
8) AUTOTRENI AUTOARTICOLATI	E	4		↓60	↓100	↓100	↓100
9) AUTOTRENI AUTOARTICOLATI	E	1	2	↓40	↓↓80=80		↓↓80=80
10) AUTOTRENI AUTOARTICOLATI	E	1	2	↓60	↓↓90=90		↓↓100=100
11) AUTOTRENI AUTOARTICOLATI	E	2	1	↓40	↓100		↓↓↓80=80=80
12) AUTOTRENI AUTOARTICOLATI	E	2	1	↓60	↓110		↓↓↓90=90=90
13) MEZZI D'OPERA	2		1	↓50	↓120		↓↓↓130=130=130
14) AUTOBUS	2			↓40	↓80		
15) AUTOBUS	2			↓60	↓100		
16) AUTOBUS	2			↓50	↓80		
S = asse standard							
T = asse tandem							
Td = asse tridem							

Tipici spettri di traffico di veicoli commerciali per ciascun tipo di strada

Tipo di strada	Tipo di veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1) Autostrada extraurbana	12,2	--	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,1	--	--	12,2
2) Autostrada urbana	18,2	18,2	16,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,8	18,2	27,3	--

Tipici spettri di traffico di veicoli commerciali per ciascun tipo di strada

Tipo di strada	Tipo di veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3) Autostrada extraurbana	12,2	--	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,1	--	--	12,2
4) Autostrada urbana	18,2	18,2	16,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,8	18,2	27,3	--
5) 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
6) Strade extr. secondarie ordinarie	--	--	58,8	29,4	--	5,9	--	2,8	--	--	--	--	0,2	--	--	2,9
7) Strade extr. secondarie turistiche	24,5	--	40,8	16,3	--	4,15	--	2	--	--	--	--	0,05	--	--	12,2
8) Strade urbane di scorrimento	18,2	18,2	16,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,6	18,2	27,3	--
9) Strade urbane di quartiere e locali	80	--	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	20	--	--
10) Corsie Preferenziali	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	47	53	--

Utilizzando il criterio definito dall'AASHTO, il numero di veicoli commerciali transitanti durante la vita utile può essere convertito in assi standard attraverso la relazione:

$$N_{8,2} = T_n \cdot C_{SN}$$

dove:

- $N_{8,2}$ = numero di veicoli commerciali transitanti durante la vita utile espressi in assi standard da 8,2 t;
- T_n = numero di veicoli commerciali transitanti durante la vita utile della pavimentazione;
- C_{SN} = coefficiente di equivalenza dello spettro di traffico.

Il coefficiente di equivalenza tra il generico asse reale i-esimo, caratterizzato da un peso P_i e da una tipologia T_i è dato da:

$$C_{SNi} = C_{SN}(P_i, T_i, PSI_f) = 10^{-\left\{4,79 \cdot [\log(18+1) - \log(0,225 \cdot P_i + T_i)] + 4,33 \cdot \log T_i + \frac{G}{Bi} - \frac{G}{B^*}\right\}}$$

dove:

$$G = \log \frac{PSI_i - PSI_f}{2,7} \qquad Bi = 0,40 + \frac{0,081 \cdot (0,225 \cdot P_i + T_i)^{3,23}}{\left(\frac{SN}{2,54} + 1\right)^{5,19} \cdot T_i^{3,23}}$$

- $C_{SN}(P_i, T_i, PSI_f)$ = coefficiente di equivalenza tra l'asse i-esimo e l'asse singolo standard da 8,2 t = 80 kN;
- P_i = peso complessivo dell'asse o set di assi (singolo, tandem o tridem) [kN];
- T_i = tipologia dell'asse e assume il valore 1 per assi singoli, 2 per assi tandem e 3 per assi tridem;
- B^* = valore che assume B_i per l'asse singolo da 8,2 t = 80 kN;
- SN = indice strutturale = $\sum_i s_i \cdot a_i \cdot m_i$ [cm].

Pertanto, detta n_i la percentuale, in termini assoluti, relativa del veicolo i-esimo nello spettro considerato, il coefficiente di equivalenza C_{SN} dello spettro di traffico è dato da:

$$C_{SN} = \sum_i (C_{SNi} \cdot n_i / 100)$$

Adottando lo spettro di traffico corrispondente alle Strade extraurbane principali (tipo di strada 3), si ottiene un coefficiente di equivalenza pari a $C_{SN}=1,93$. Il dettaglio del calcolo è riportato nella tabella seguente.

Determinazione del coefficiente di equivalenza tra assi reali ed assi da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN) sulla base dello spettro di traffico relativo alle Strade Extraurbane Principali riportato nel "Catalogo delle pavimentazioni stradali - BU CNR N.78 del 15/09/1995"										
SN [cm]	PSI in	PSI fin								
12.03	4.2	2.5								
Tipo Veicolo	ni	Pi (kN)	Ti	Bi	G	B*	A	CSNi	CSNi* (ni/100)	
Autocarri leggeri	1	0	10	1	0.400	-0.201	0.497	3.576	0.000	0.000
	1	0	20	1	0.402	-0.201	0.497	2.484	0.003	0.000
	2	13.1	15	1	0.401	-0.201	0.497	2.958	0.001	0.000
	2	13.1	30	1	0.407	-0.201	0.497	1.776	0.017	0.002
Autocarri medie pesanti	3	39.5	40	1	0.416	-0.201	0.497	1.256	0.055	0.022
	3	39.5	80	1	0.526	-0.201	0.497	0.023	0.949	0.375
	4	10.5	50	1	0.431	-0.201	0.497	0.851	0.141	0.015
	4	10.5	110	1	0.737	-0.201	0.497	-0.501	3.167	0.333
Autocarri pesanti	5	7.9	40	1	0.416	-0.201	0.497	1.256	0.055	0.004
	5	7.9	160	2	0.526	-0.201	0.497	-0.116	1.306	0.103
	6	2.6	60	1	0.453	-0.201	0.497	0.523	0.300	0.008
	6	2.6	200	2	0.651	-0.201	0.497	-0.485	3.055	0.079
Autotreni e autotricoli	7	2.6	40	1	0.416	-0.201	0.497	1.256	0.055	0.001
	7	2.6	90	1	0.581	-0.201	0.497	-0.174	1.493	0.039
	7	2.6	80	1	0.526	-0.201	0.497	0.023	0.949	0.025
	7	2.6	80	1	0.526	-0.201	0.497	0.023	0.949	0.025
	8	2.5	60	1	0.453	-0.201	0.497	0.523	0.300	0.008
	8	2.5	100	1	0.651	-0.201	0.497	-0.347	2.221	0.056
	8	2.5	100	1	0.651	-0.201	0.497	-0.347	2.221	0.056
	8	2.5	100	1	0.651	-0.201	0.497	-0.347	2.221	0.056
	8	2.5	100	1	0.651	-0.201	0.497	-0.347	2.221	0.056
	8	2.5	100	1	0.651	-0.201	0.497	-0.347	2.221	0.056
	9	2.6	160	2	0.526	-0.201	0.497	-0.116	1.306	0.034
	10	2.5	60	1	0.453	-0.201	0.497	0.523	0.300	0.008
	10	2.5	180	2	0.581	-0.201	0.497	-0.313	2.054	0.051
	10	2.5	200	2	0.651	-0.201	0.497	-0.485	3.055	0.076
	11	2.6	40	1	0.416	-0.201	0.497	1.256	0.055	0.001
	11	2.6	100	1	0.651	-0.201	0.497	-0.347	2.221	0.058
11	2.6	240	3	0.526	-0.201	0.497	-0.197	1.574	0.041	
12	2.6	60	1	0.453	-0.201	0.497	0.523	0.300	0.008	
12	2.6	110	1	0.737	-0.201	0.497	-0.501	3.167	0.082	
12	2.6	270	3	0.581	-0.201	0.497	-0.394	2.475	0.064	
Mezzi d'opera	13	0.5	50	1	0.431	-0.201	0.497	0.851	0.141	0.001
	13	0.5	120	1	0.842	-0.201	0.497	-0.641	4.375	0.022
	13	0.5	390	3	0.967	-0.201	0.497	-0.990	9.780	0.049
Autobus	14	0	40	1	0.416	-0.201	0.497	1.256	0.055	0.000
	14	0	80	1	0.526	-0.201	0.497	0.023	0.949	0.000
	15	0	60	1	0.453	-0.201	0.497	0.523	0.300	0.000
	15	0	100	1	0.651	-0.201	0.497	-0.347	2.221	0.000
	16	10.5	50	1	0.431	-0.201	0.497	0.851	0.141	0.015
	16	10.5	80	1	0.526	-0.201	0.497	0.023	0.949	0.100
									CSN	1.93

Il calcolo numero di veicoli commerciali in assi standard da 8,2 t transitanti durante la vita utile ($N_{8,2} = T_n \cdot CSN$) è riportato nella tabella seguente.

Numero di assi di veicoli commerciali nell'arco della vita utile lungo la corsia più carica in assi equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN)		
CSN	1.93	Coefficiente di equivalenza tra assi reali ed assi singoli equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN)
Tn	5 081 093	Numero di assi di veicoli commerciali nell'arco della vita utile lungo la corsia più carica
N8.2	9 785 481	Numero di assi di veicoli commerciali nell'arco della vita utile lungo la corsia più carica in assi equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN)

8 VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE

La verifica della pavimentazione consiste nel verificare che il numero di assi standard transitanti durante la vita utile della pavimentazione (N8,2) risulti inferiore al numero di assi standard sopportabili dalla pavimentazione (W8,2).

Dalla tabella riportata di seguito si evince che, essendo $N_{8,2} < W_{8,2}$ la verifica della pavimentazione è soddisfatta.

Verifica della pavimentazione		
N8.2	9 785 481	Numero di assi di veicoli commerciali nell'arco della vita utile lungo la corsia più carica in assi equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN)
W8.2	36 365 910	Numero di assi singoli equivalenti da 18 Kpounds (8.2 t o 80 KN) sopportabile dalla pavimentazione
Esito	VERIFICATO	
W8.2 / N8.2	3.72	
(W8.2 - N8.2) / N8.2	272%	

8.1 Verifica delle alterazioni della pavimentazione stradale

Con riferimento all'orizzonte temporale assunto quale termine di vita utile della pavimentazione stradale si deve verificare che il danno da fatica generato dal transito dei veicoli pesanti sulla pavimentazione si verifichi solo al termine della stessa.

La verifica alle ormaie, con la stessa logica esposta sopra, prevede che la profondità della deformazione assunta come limite massimo tollerabile in funzione del confort e della sicurezza da assicurare sulla pavimentazione stradale si raggiunga solo al termine della vita utile.

Se la verifica delle alterazioni fornisce un esito negativo, cioè le fessurazioni da fatica o l'accumulo di deformazioni permanenti si riscontrano prima del termine della vita utile assunta, è necessario reiterare il procedimento del dimensionamento.

Numerose sono le ipotesi che permettono di risolvere il complesso problema della determinazione dello stato tensionale e deformativo all'interno di un pacchetto di sovrastruttura stradale. La risoluzione è affidata al modello matematico del *multistrato elastico* (più strati orizzontali tutti a comportamento elastico). La soluzione di questo modello è oggi condotta con programmi di calcolo. In questa trattazione si prende come esempio **Kenpave**.

Dati una serie di input (tipo di materiale, numero di strati, spessori, coefficienti di Poisson, carichi, etc...) il software procede con il calcolo delle deformazioni. Gli output sono i *fattori di danno* (n_i/N_i), ovvero il rapporto tra il numero di ripetizioni dell'i-esimo carico ed il numero delle ripetizioni permesse a cui il materiale può

resistere prima di raggiungere la rottura (i fattori di danno sono tanti quanti i periodi considerati durante l'anno. Di norma vengono considerati quattro periodi: Estate, Primavera, Autunno e Inverno). La sommatoria di questi rapporti prende il nome di *danno cumulato da fatica* (**CDF**: Cumulative Damage Factor, legge di Miner).

Tre sono i casi che si possono verificare:

- **CDF<1**, il sistema ha un eccesso di capacità nel resistere a fatica. Al termine della vita utile non si raggiunge la fatica ma la pavimentazione è ancora in grado di sopportare il passaggio di altri carichi.
- **CDF=1**, ed è il caso a cui si tende, la rottura per fatica si raggiunge esattamente al termine della vita utile.
- **CDF>1**, la condizione di rottura per fatica si raggiunge prima di aver raggiunto il numero di ripetizioni previsto in progetto. Il sistema fallisce prima che tutti i traffici di progetto siano stati applicati.

L'obiettivo è il calcolo del danno cumulato da fatica del pacchetto di pavimentazione costituito da tre strati:

	Spessore (cm)
Usura + Binder	13 (5+8)
Base	14
Fondazione	15
Sottofondo	15

Di seguito si riportano gli input in riferimento agli strati.

Strati/Moduli (psi)	Autunno	Inverno	Primavera	Estate
Usura+binder	905652,1739	431449,3	544057,971	154347,8
Base	1055072,464	516666,7	643188,4058	204202,9
Fondazione	28260,86957	28260,87	28260,86957	28260,87
Sottofondo	13043,47826	13043,48	13043,47826	13043,48

Modulo di deformazione

	Modulo di Poisson
Usura+binder	0,35
Base	0,35
Fondazione	0,40
Sottofondo	0,45

Modulo di Poisson

Bottom	z (cm)	Top	z (cm)
Base	26,99	Fondazione	27,01
		Sottofondo	42,01

Profondità indagine

Condizione di carico		
LOAD	0	asse singolo con un solo pneumatico
CR	10	raggio dell'area circolare di contatto dello pneumatico
CP	590	pressione dell'area circolare di contatto dello pneumatico

Condizione di carico

Traffico	
N8.2	9785481
Autunno	2446370
Inverno	2446370
Primavera	2446370
Estate	2446370

Traffico associato al singolo periodo (ipotesi di equidistribuzione su tutte e quattro le stagioni)

Infine, per il calcolo delle deformazioni si sono utilizzate le leggi di fatica di Miner. A seguire si riportano le equazioni e i coefficienti ivi applicati:

- per gli strati legati (*)
$$N = f_1 \cdot \varepsilon_t^{-f_2} \cdot E^{-f_3}$$

- per gli strati non legati (**)
$$N = f_4 \cdot \varepsilon_v^{-f_5}$$

Leggi di fatica di Miner					
	f1	f2	f3	f4	f5
Strati legati*	0,0796	3,291	0,854		
Strati non legati**				1,365E-09	4,477

Coefficienti applicati

Dopo aver inputato il traffico di progetto (numero di ESALS in riferimento all'asse standard da 80 kN) e la relativa caratterizzazione del carico (numero assi e coordinate), si è proceduto con il calcolo del danno cumulato da fatica.

Di seguito si riporta un estratto dei risultati ottenuti.

```

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 4
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 4
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 3
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL) = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9 |
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 13 14 15
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,35 0,35 0,4 0,45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 26,99 27,01 42,01
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 6,249E+06 2 7,280E+06
3 1,950E+05 4 9,000E+04
FOR PERIOD NO. 2 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 2,977E+06 2 3,565E+06
3 1,950E+05 4 9,000E+04
FOR PERIOD NO. 3 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3,754E+06 2 4,438E+06
3 1,950E+05 4 9,000E+04
FOR PERIOD NO. 4 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1,065E+06 2 1,409E+06
3 1,950E+05 4 9,000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 10
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 590
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1
RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS
(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)
0,00000 26,99000 0,01021 13,439 -350,967 -350,967 0,000
(STRAIN) 3,559E-05 -3,198E-05 -3,198E-05 ,000E+00
0,00000 27,01000 0,01020 13,425 -1,453 -1,453 0,000
(STRAIN) 7,481E-05 -3,201E-05 -3,201E-05 ,000E+00
0,00000 42,01000 0,00927 7,630 1,292 1,292 0,000
(STRAIN) 7,186E-05 -3,026E-05 -3,026E-05 ,000E+00

PERIOD NO. 2 LOAD GROUP NO. 1
RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS
(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)
0,00000 26,99000 0,01280 22,115 -290,825 -290,825 0,000
(STRAIN) 6,331E-05 -5,520E-05 -5,520E-05 ,000E+00
0,00000 27,01000 0,01280 22,089 -3,226 -3,226 0,000
(STRAIN) 1,265E-04 -5,524E-05 -5,524E-05 ,000E+00
0,00000 42,01000 0,01128 11,317 1,280 1,280 0,000
(STRAIN) 1,129E-04 -4,876E-05 -4,876E-05 ,000E+00

PERIOD NO. 3 LOAD GROUP NO. 1
RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS
(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)
0,00000 26,99000 0,01195 18,999 -309,812 -309,812 0,000
(STRAIN) 5,315E-05 -4,687E-05 -4,687E-05 ,000E+00
0,00000 27,01000 0,01194 18,978 -2,594 -2,594 0,000
(STRAIN) 1,080E-04 -4,691E-05 -4,691E-05 ,000E+00
0,00000 42,01000 0,01063 10,045 1,300 1,300 0,000
(STRAIN) 9,860E-05 -4,228E-05 -4,228E-05 ,000E+00

PERIOD NO. 4 LOAD GROUP NO. 1
RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS
(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)
0,00000 26,99000 0,01700 41,017 -203,083 -203,083 0,000
(STRAIN) 1,300E-04 -1,039E-04 -1,039E-04 ,000E+00
0,00000 27,01000 0,01700 40,962 -6,473 -6,473 0,000
(STRAIN) 2,366E-04 -1,039E-04 -1,039E-04 ,000E+00
0,00000 42,01000 0,01431 18,298 1,087 1,087 0,000
(STRAIN) 1,924E-04 -8,485E-05 -8,485E-05 ,000E+00
  
```

Strati/Periodo	1	2	3	4	N/n1	N/n2	N/n3	N/n4	Cd	VERIFICATO
Base	404681166,6	1,54E+08	177728384,8	37953502	0,006045	0,01589301	0,013765	0,064457	0,10	OK
Fondazione	4049629366	3,86E+08	782518291,5	23370535	0,000604	0,00634525	0,003126	0,104678	0,11	OK
Sottofondo	4848857257	6,42E+08	1176374775	58985676	0,000505	0,00381329	0,00208	0,041474	0,05	OK

Periodo	n.
Autunno	1
Inverno	2
Primavera	3
Estate	4