

COMUNE DI CASTELVERDE

PROVINCIA DI CREMONA



REALIZZAZIONE TANGENZIALE COSTA S.ABRAMO

STRALCIO FUNZIONALE 2

LOTTO 2

 **RELAZIONE DI CALCOLO**

A15

Committente: Amministrazione Comunale di Castelveverde

Progetto: Studio Tecnico ing. Guido Favalli

Febbraio 2023

1. PAVIMENTAZIONE

1.1 Rotatoria

La sovrastruttura stradale di tipo semi-rigido in rotatoria è costituita da:

- strato di usura in conglomerato bituminoso hard di 3 cm;
- strato di base in conglomerato bituminoso di 10 cm;
- strato di fondazione in misto cementato di 20 cm;

La sovrastruttura stradale di tipo flessibile lungo lo sviluppo della tangenziale è costituita da:

- strato di usura in conglomerato bituminoso hard di 3 cm;
- strato di base in conglomerato bituminoso di 10 cm;

1.2 calcolo della pavimentazione

L'infrastruttura in oggetto è ubicata in un'area che seppure non interessata da elevati flussi di traffico presenta comunque una percentuale alta di traffico pesante.

Il quadro di riferimento descritto suggerisce l'adozione di una soluzione progettuale caratterizzata da un'elevata vita utile di esercizio di almeno venticinque anni e che richieda una manutenzione ridotta, in grado di limitare al massimo gli interventi di ripristino quindi il disturbo alla percorribilità della rete. Si è quindi optato per una sovrastruttura flessibile che, in base ai calcoli effettuati, appare in grado di soddisfare i requisiti enunciati.

Si è tenuto conto delle seguenti considerazioni:

- Percentuale di mezzi Commerciali e Pesanti che percorre la corsia di marcia, quindi la più sollecitata dal punto di vista del calcolo della pavimentazione, pari al 20%;
- Rapporto traffico diurno / notturno = 100/ 20;
- Rapporto traffico feriale / festivo = 100 / 70;
- Coefficiente incrementale del traffico considerato = 1.5% composto annuo.

Per il tronco maggiormente caricato si assume considerato la natura tangenziale degli sforzi un traffico giornaliero medio TGM (0-24) pari a 2.500 v/gg/corsia.

Le considerazioni ed i calcoli di seguito riportati fanno riferimento alla vigente normativa del settore ed alle istruzioni tecniche nonché ai bollettini pubblicati dal CNR-UNI ed in particolare modo CNR – B.U. – Norme Tecniche – A. XXIX – N. 178, 15-9-1995 "Catalogo delle Pavimentazioni Stradali", nonché alle recanti "indicazioni progettuali" emesse dalla Direzione Centrale ANAS di Roma.

Il metodo usato per la verifica della pavimentazione è quello empirico sviluppato dall'AASHTO Interim Guide (come peraltro indicato nella nota "*indicazioni progettuali*" recentemente emessa dall'ANAS Direzione Generale).

I calcoli vengono effettuati sulla pavimentazione meno prestazionale tra quelle previste che è costituita dai seguenti strati:

- | | |
|--------------------------------|-------|
| ✓ Misto granulare stabilizzato | cm 25 |
| ✓ Strato bituminoso di base | cm 10 |
| ✓ Tappeto di usura | cm 3 |

- *A favore di sicurezza per l'anello giratorio si considera assente lo strato di misto cementato*

Il dimensionamento di una qualsiasi struttura richiede la previsione dei carichi che questa dovrà sopportare durante la sua vita utile. Nel caso stradale, questa previsione richiede la determinazione di un parametro in evoluzione quale è il traffico veicolare ed in particolare modo del traffico veicolare pesante. Poiché l'eterogeneità del traffico veicolare (vedi Tabella 0-1) è piuttosto elevata è necessario, per semplicità, equiparare i vari tipi di asse ad un unico asse di riferimento (*ESA Equivalent Standard Axle*) mediante l'utilizzo di opportuni fattori di equivalenza (*EF Equivalent Factor*) rapportando gli effetti prodotti dai vari tipi di veicoli ad una sola tipologia di carico. I fattori di equivalenza dipendono in generale dalla composizione della pavimentazione multistrato, dalla temperatura di calcolo e dalle velocità di progetto.

Tabella 0-1: Tipi di veicoli commerciali, numero di assi, distribuzione dei carichi per asse

Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in			
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	3	↓40	↓80	↓80	
6) autocarri pesanti	3	↓60	↓100	↓100	
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90		↓80
8) autotreni e autoarticolati	4	↓60	↓100		↓100
9) autotreni e autoarticolati	5	↓40	↓80	↓80	↓80
10) autotreni e autoarticolat	5	↓60	↓90	↓90	↓100
11) autotreni e autoarticolat	5	↓40	↓100		↓80 ↓80
12) autotreni e autoarticolat	5	↓70	↓110		↓90 ↓90
13) mezzi d'opera	5	↓40	↓130		↓130 ↓130
14) autobus	2	↓40	↓80		

Una volta omogeneizzati in ESA i carichi che agiscono su una determinata pavimentazione stradale, sarà possibile poi confrontare il numero totale di tali assi standard (NESA) con quelli che la pavimentazione è in grado di sopportare nell'arco dell'intera vita utile (NMAX). Di ogni asse si considera un solo gruppo di ruote e si determina in primo luogo la deformazione massima orizzontale alla base degli strati bituminosi (ϵ_s) conseguente al carico standard e quindi il numero massimo di ripetizioni ammissibili attraverso l'utilizzo della legge di fatica :

$$N_s = \left(\frac{K}{\epsilon_s} \right)^{\frac{1}{b}}$$

E' possibile compiere la stessa operazione per ogni tipo di carico, per ogni temperatura ed al limite per ogni velocità dei veicoli determinando in questo modo il numero di ripetizioni ammissibili. Il coefficiente di equivalenza per il j-esimo carico viene definito dal rapporto tra il numero di ripetizioni di questo carico ammesse dalla sovrastruttura in esame (N_j) e il numero di passaggi ammissibili dell'asse standard (N_s); poiché le costanti K e ϵ presenti nella legge di fatica non dipendono dal tipo di carico ma dalle caratteristiche del conglomerato bituminoso e degli altri componenti della sovrastruttura stradale, è possibile esprimere il coefficiente di equivalenza (EF_j) mediante la relazione:

$$EF_j = \frac{N_s}{N_j} = \left(\frac{\epsilon_j}{\epsilon_s} \right)^{\frac{1}{b}}$$

La vita utile in funzione dell'asse standard (NESA) viene quindi calcolato utilizzando la seguente sommatoria dove m corrisponde al numero di tipologie di carico considerate.

$$N_{ESA} = \sum_{j=1, m} EF_j \cdot N_j$$

A questo punto è possibile, come in questo caso, calcolare la struttura in funzione di un'unica tipologia di carico.

Per calcolare la struttura in funzione di un unico carico di riferimento è necessario la determinazione del coefficiente di equivalenza totale rispetto ad un certo carico (EFTOT), attraverso i seguenti passi:

- A) determinazione delle percentuali delle singole tipologie di veicoli p_j ;
- B) determinazione, per i soli veicoli commerciali (tara >15 kN), del coefficiente di equivalenza del singolo veicolo (EF_j) determinato come somma dei coefficienti di equivalenza dei singoli assi dello stesso (o coppia di assi nel caso di assi tandem ovvero terna di assi nel caso di tre assi);
- C) determinazione del coefficiente di equivalenza totale (EF) riferito alle m tipologie di veicoli commerciali transitanti sulla sovrastruttura dato dalla sommatoria:

$$EF_{TOT} = \sum_{j=1,m} p_j \cdot EF_j$$

da cui è possibile calcolare

$$N_{ESA} = EF_{TOT} \cdot TGM$$

A questo punto è possibile attuare la verifica a fatica della sovrastruttura che dovrà soddisfare la relazione:

$$N_{ESA} \leq N_{MAX}$$

eventualmente con un determinato coefficiente di sicurezza.

TGM di riferimento

Il TGM Traffico Giornaliero Medio considerato per il dimensionamento della pavimentazione è stimato a partire dallo studio del traffico e dalle successive elaborazioni come detto al paragrafo precedente.

Per la determinazione del traffico annuo di progetto si considera il TGM nelle 24 ore per 340 giorni / anno considerato il rapporto traffico feriale / festivo.

Calcolo degli assi standard equivalenti

Ai fini del calcolo dei carichi di progetto i veicoli presi in considerazione sono quelli cosiddetti commerciali. Il peso dell'asse standard preso inizialmente in considerazione per effettuare la trasformazione è pari a 81.6 kN.

Tabella 0-2: Fattori di equivalenza in riferimento all'asse da 81.6 KN

Peso dell'asse singolo (KN)	E.F. (fattore di equivalenza)	E.F. di assi tandem
45	0.08	
47	0.10	
51	0.15	
57	0.23	
58.5	0.25	
63	0.30	
70	0.51	
72	0.57	(72+ 72) 0.79
73	0.60	
75	0.70	
80	0.93	(80+ 80) 1.28
100	2.40	
110	3.42	
120	5.7	
130	8.2	
145	13.3	

(*) Per gli assi tandem il fattore di equivalenza corrisponde a 1.38 volte l'E.F. di un asse singolo.

Nella Tabella 0-2 sono riportati i fattori di equivalenza necessari per il calcolo degli assi standard equivalenti all'asse da 81.6 KN. In riferimento alla composizione del traffico di progetto sono state fatte alcune ipotesi semplificative: la classe costituita da veicoli leggeri non è stata considerata nel calcolo degli assi standard equivalenti, in quanto praticamente ininfluente; i veicoli commerciali leggeri (cat. 2) sono stati considerati con la percentuale totale rilevata del 12%, i veicoli pesanti (percentuale totale 6%) sono stati ipotizzati 12% con 3 assi (cat. 6) e 1% con 5 assi (cat. 10).

Per tutti i veicoli considerati è necessaria una ripartizione del peso sui vari assi di cui il veicolo è composto. Per questa ripartizione si è utilizzata la Tabella 0-1 che riporta il numero degli assi ed il peso su ciascuno di essi considerando il veicolo a pieno carico. E' quindi possibile schematizzare il peso su ciascun asse di ogni categoria di veicolo nella situazione a pieno carico

e a mezzo carico (vedi Tabella 0-3) e poi calcolare il numero di assi standard equivalenti attraverso i fattori di equivalenza della Tabella 0-4.

Infine, per quel che riguarda la percentuale dei veicoli a pieno carico e quella dei veicoli a mezzo carico, sono stati considerati a favore della sicurezza :

- ✓ il 60% del totale dei veicoli a pieno carico
- ✓ il 30 % dei veicoli a mezzo carico
- ✓ il 10% dei veicoli scarichi.

Si trascurano gli effetti legati al transito dei veicoli leggeri e di quelli pesanti scarichi.

Tabella 0-3: Distribuzione dei carichi sugli assi per categoria di veicolo

Tipo di veicolo	Carico su ciascun asse (KN)				
	1	2	3	4	5
Autocarri leggeri (categoria 2)					
a pieno carico	15	30			
a mezzo carico	8	15			
Autocarri 3 assi (categoria 6)					
a pieno carico	60	100	100		
a mezzo carico	47	63	63		
Autotreni a 5 assi (categoria 10)					
a pieno carico	60	90	90	100	100
a mezzo carico	47	57	57	63	63

Tabella 0-4: Fattori di equivalenza (E.F.)

Tipo di veicolo	Fattore di equivalenza (E.F.) di ogni asse (KN)					E.F. Totale per veicolo
	1	2	3	4	5	
Autocarri medi e pesanti (cat. 3)						
a pieno carico	0.003	0.03				0.033
a mezzo carico	0.0004	0.003				0.0034
Autocarri 3 assi (cat. 6)						

a pieno carico	0.30	2.40	2.40			5.10
a mezzo carico	0.10	0.30	0.30			0.70
Autotreni a 5 assi (cat. 10)						
a pieno carico	0.30	1.65	1.65	2.40	2.40	8.40
a mezzo carico	0.10	0.23	0.23	0.30	0.30	1.16

A partire dalla distribuzione del traffico in termini di categorie di veicoli, in seguito al calcolo di E.F. per categoria di veicoli e nelle diverse condizioni di carico, è possibile ricavare il fattore di equivalenza complessivo denominato E.F. (81.6 KN) TOT (vedi Tabella 0-5).

Tabella 0-5: Fattori di equivalenza totali per categoria di veicolo e per situazione di carico.

Tipo di veicolo	Distribuzione	Rapp. veic. pieno car. / tot. veic.	Rapp. veic. mezzo car./ totale veic.	E.F. (singolo veicolo)	E.F. (per categoria e per situazione di carico)
	b	c	d	e	$f = b \cdot c \cdot e / 100$ (pieno car.) $f = b \cdot d \cdot e / 100$ (mezzo car.)
Autocarri leggeri (cat. 2)					
- a pieno carico	0.12	0.60		0.033	0.00238
- a mezzo carico	0.12		0.30	0.0034	0.00012
Autocarri 3 assi (cat. 6)					
- a pieno carico	0.12	0.60		5.10	0.367
- a mezzo carico	0.12		0.30	0.70	0.025
Autotreni a 5 assi (cat. 10)					
- a pieno carico	0.01	0.60		8.40	0.050
- a mezzo carico	0.01		0.30	1.16	0.003
E.F. (81.6 kN) TOTALE					0.4475

Noto questo valore si ricava il numero di assi standard equivalenti da 81.6 KN (8,2 ton) che gravano sul tratto di progetto:

$$N^{\circ} \text{ E.S.A. (81.6 KN) per corsia di progetto} = 340 \cdot E.F._{81,6KN} \cdot \sum_{i=2017}^{2042} TGM_i (0-24)$$

$$340 \cdot 0.4475 \cdot 2500 \times 25 \cong 1.17 \cdot 10^7$$

Procedura di calcolo della pavimentazione - Metodo AASHO Interim Guide

Questo metodo empirico, elaborato negli USA sulla base dei risultati del l'AASHO Road test è basato su una serie di relazioni fra l'Indice di spessore e la quantità di ripetizioni di carico da parte di assi, singoli o binati, diversamente caricati.

Step 1

Si calcola l'indice di spessore ovvero il principale parametro di dimensionamento della pavimentazione, mediante la relazione

$$I_s = a_1 s_1 + a_2 s_2 + a_3 s_3 \quad (\text{cm}) \quad (1)$$

$$I_s = 0.37 \cdot 3 + 0.42 \cdot 4 + 0.40 \cdot 10 + 0.13 \cdot 25 = 10.04 \quad (\text{cm})$$

Gli a_i sono i coefficienti di equivalenza dei materiali e rappresentano l'attitudine specifica di ogni materiale a contribuire alla resistenza complessiva della pavimentazione e sono riportati in Tabella 0-6 sulla base della conoscenza del valore della stabilità Marshall o del CBR (Californian Bearing Ratio).

I valori dedotti dalla Tabella 0-6 ed usati nella relazione (1) sono quelli corrispondenti alle caratteristiche e prestazioni di C.S.A. dei materiali impiegati in progetto.

Tabella 0-6: Coefficienti di equivalenza e caratteristiche dei materiali per pavimentazioni stradali flessibili.

Strato	Materiale	Stabilità Marshall (kg)	Rottura a 7 giorni (kg/cm ²)	CBR (%)	Coefficiente di equivalenza (a _i)
Superficiale usura e binder (legato a bitume)	Cong. Bituminoso	1000			0.45
	Cong. Bituminoso	950			0.44
	Cong. bituminoso	770			0.40
	Cong. Bituminoso	650			0.37
	Cong. Bituminoso	410			0.30
	Malta bituminosa	770			0.40
	Malta bituminosa	580			0.35
	Pietrischetto bitumato	140			0.20
Base (legata e non)	Misto bitumato	770			0.33
	Misto bitumato	670			0.30
	Misto bitumato	550			0.27
	Misto bitumato	410			0.24
	Stabilizzato a bitume	270			0.20
	Stabilizzato a bitume	180			0.18
	Stabilizzato a bitume	140			0.16
	Misto cementato		46		0.23
	Misto cementato		32		0.20
	Stabilizzato a cemento		21		0.15
	Stabilizzato a calce		13		0.12
	Misto frantumato			110	0.14
	Misto frantumato			90	0.13
	Misto granulare			70	0.12
	Misto granulare			50	0.10
Fondazione	Misto frantumato			90	0.14
	Misto granulare			70	0.13
	Misto granulare			50	0.12
	Misto granulare			30	0.11
	Stabilizzato naturale			20	0.10
	Stabilizzato naturale			10	0.075
	Stabilizzato naturale			5	0.05

Step 2

Il valore dell'indice di funzionalità PSI, che durante le sperimentazioni è stato messo in correlazione (con appropriata metodologia statistica) con il numero di passaggi di determinati assi, varia da 5 (pavimentazioni in ottime condizioni) a 1,5 (pavimentazioni totalmente dissestata).

È così possibile valutare quantitativamente l'influenza della fatica, cioè il numero delle ripetizioni di carichi, sulla vita utile delle sovrastrutture stradali, mediante la relazione:

$$PSI = PSI_{iniz} - A \cdot (N/\rho)^\beta \quad (2)$$

dove A è una costante che misura la differenza fra il PSI iniziale e quello che si ha quando si ritiene che la pavimentazione sia ammalorata.

Mentre ρ e β sono due funzioni dell'indice di spessore della sovrastruttura e dei carichi:

$$\beta = 0,40 + \frac{0,1004 \cdot (L_1 + L_2)^{3,23}}{(I_s - 2,5 + 1)^{5,19} \cdot L^{3,23}} \quad (3)$$

$$\rho = 5,93 + 9,36 \cdot \lg \left(\frac{I_s + 1}{2,5} \right)^2 - 4,79 \cdot \lg(L_1 + L_2) + 4,33 \cdot \lg(L_2) \quad (4)$$

dove L1 è il carico agente sull'asse o sulla coppia di assi tandem che si considerano (espresso in migliaia di libbre), L2 è un termine che assume il valore 1 se l'asse è singolo, 2 se si tratta di una coppia di assi tandem, e Is è l'indice di spessore della pavimentazione calcolato con la (1). Ai fini progettuali si fa riferimento a due valori limite di tale parametro: all'inizio della vita utile viene assunto pari a 4,2, per tenere conto delle inevitabili imperfezioni costruttive, mentre il valore finale viene scelto in funzione delle caratteristiche dell'infrastruttura tramite la Tabella 0-7.

Tabella 0-7: Affidabilità e Grado di Efficienza.

Tipo di strada	Affidabilità R (%)	PSI
1 Autostrade extraurbane	90	3
2 Autostrade urbane	95	3
3 Strade extr. Principali e secondarie a forte traffico	90	2,5
4 Strade extr. Secondarie - ordinarie	85	2,5
5 Strade extr. Secondarie - turistiche	80	2,5
6 Strade urbane di scorrimento	95	2,5
7 Strade urbane di quartiere e locali	90	2
8 Corsie preferenziali	95	2,5

Si calcola il fattore A, che dipende dal PSI:

$$A = 4,2 - 2,5 = 1,7$$

Sostituendo i valori di A e di PSliniz nella (2), questa diviene:

$$\lg \frac{4,2 - PSI}{2,7} = \beta \cdot (\lg N - \lg \rho) \quad (5)$$

Se nella (3) e nella (4) si pone L1=18 (18.000 libbre = 8,2 t) e L2=1

$$\lg N_{8,2t} = 9,36 \cdot \lg \left(\frac{I_s}{2,5} + 1 \right) - 0,20 + \frac{\lg \frac{(4,2 - P_f)}{2,7}}{0,40 + \frac{13555}{\left(\frac{I_s}{2,5} + 1 \right)^{5,19}}}$$

Ai fini della sicurezza ipotizzando un Pf pari a 2.5 (strade extraurbane forte traffico) e inserendo il valore di Is calcolato con la (1) si ottiene:

$$\lg N_{8,2t} = 14.76$$

Step 3

Qualora il sottofondo utilizzato sia di verso da quello utilizzato dall'AASHO Road Test, si può ottenere il numero di N8,2t che provoca il raggiungimento del PSI assegnato mediante la relazione:

$$\lg \underline{N}_{8,2t} = \lg N_{8,2t} + 0,372 \cdot (S_i - S_0) \quad (7)$$

I coefficienti di supporto Si e So relativamente al sottofondo usato e quello della prova AASHO. Il valore standard So è pari a 2 al quale corrisponde una portanza del sottofondo CBR=2. Quello di Si si ricava dalla Figura 1 in funzione delle caratteristiche di portanza del sottofondo (considerato pari a 15 ai fini cautelativi dal momento che la nuova struttura presenta dei tratti in rilevato sia in trincea).

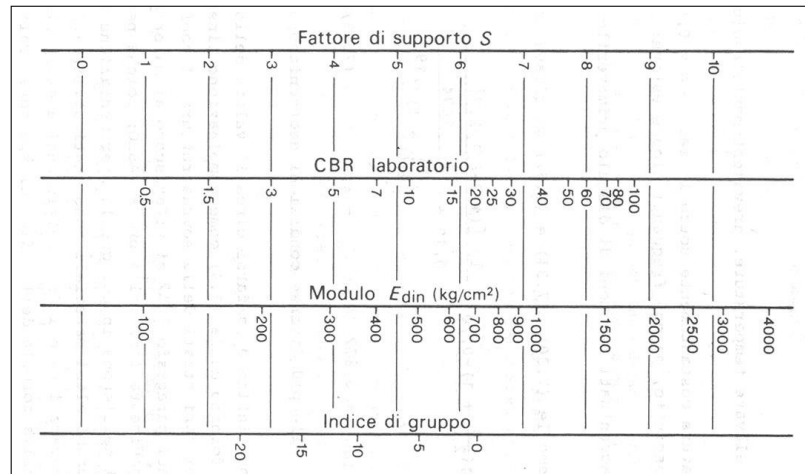


Figura 1: Correlazione fra il fattore di supporto S e altre caratteristiche di portanza.

Portanza del sottofondo utilizzato nel calcolo CBR = 15

Coefficiente di supporto corrispondente $S_i = 6.0$

Sostituendo i valori di S_i e S_0 nella (7) si ottiene:

$$\lg \underline{N}_{8,2t} = 16.25$$

Step 4

In condizioni ambientali diverse da quelle della prova AASHO il numero di passaggi $N_{8,2t}(R)$ che dà luogo al fissato valore Pf del PSI è dato da:

$$\overline{N}_{8,2t}^{(R)} = \frac{\overline{N}_{8,2t}}{R} \quad (6)$$

Dove R è un fattore climatico regionale, che per la zona in questione viene assunto pari a 1. Risulta quindi

$$N_{MAX} = N_{8,2t}^{(R)} \cong 1.14 * 10^7 \text{ (11 milioni di assi equivalenti)}$$

Step 5 finale

Si verifica che il volume di traffico di progetto è minore del numero di passaggi ricavato da:

$N_p < \underline{N}_{8,2t}$ (assi 8,2 t/anno) ovvero $N_{ESA} \leq N_{MAX}$ ovvero:

$$N_{ESA} = 0.95 * 10^7 < N_{MAX} = 1.14 * 10^7$$

La pavimentazione di è quindi verificata con un coefficiente di sicurezza (margine a fatica) pari a circa 1.2 nelle condizioni di traffico a fine vita utile anno 2047 (25 anni dall'apertura in esercizio).