

# Provincia di Brescia

## Settore delle Strade e dei Trasporti

Ufficio Progettazione e Direzione Lavori Strade e Grandi Infrastrutture

Strada:

S.P. 116 VIRLE TREPONTI - VILLANUOVA S/C.

Ubicazione:

Comune di Nuvolera

Intervento:

CIRCOLAZIONE ROTATORIA INTERSEZIONE  
CON BRETELLA DI COLLEGAMENTO ALLA  
S.S. 45 BIS, LOCALITA' SCAIOLA IN COMUNE  
DI NUVOLERA

Oggetto:

VERIFICA SOVRASTRUTTURA STRADALE

Scala:

Numero:

AMM01.01

Il Direttore del Settore delle Strade e dei Trasporti:

Dott. Arch. Pierpaola Archini

R.U.P.:

Dott. ING. Giuseppe ONGARO.

Progettista:

Dott. ING. Giuseppe ONGARO.

Direttore Lavori:

Collaboratori:

Geom. Antonio Manessi

Arch. Maria Cejudo Pelegrina

Progettista Strutture:

Coordinatore Sicurezza:

STUDIO TECNICO ASSOCIATO  
AVALLI&PEZZOTI

Nome File:

\\brusa01\\Pontoglio\\19 - SP116. Rotatoria Scaiola  
Nuvolera\\1\_PROGETTAZIONE\\11\_PROG.  
ESECUTIVO\\ELABORATI TESTO

Redatto da:

Geom. Antonio Manessi

Arch. Maria Cejudo Pelegrina

Verificato da:

Ing. Antonio Zammarchi

Data:

GENNAIO 2023

Data e Numero Revisione:

AREA  
TECNICA



PROGETTO ESECUTIVO

# PROGETTO ESECUTIVO

## VERIFICA SOVRASTRUTTURA STRADALE

S.P. 116

“VIRLE TREPONTI - VILLANUOVA S/C”.

CIRCOLAZIONE ROTATORIA  
INTERSEZIONE CON BRETELLA DI  
COLLEGAMENTO ALLA S.S. 45 BIS,  
LOCALITA' SCAIOLA IN COMUNE DI  
NUVOLERA

CUP H97H20002140002

## VERIFICA DEL DIMENSIONAMENTO DELLA SOVRASTRUTTURA STRADALE

### Metodo di verifica adottato.

La verifica del dimensionamento strutturale della pavimentazione stradale descritta nel paragrafo precedente viene eseguita applicando la metodologia proposta dal documento "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", adottata anche dal "Catalogo delle pavimentazioni stradali" - B.U. CNR n. 178 del 15 settembre 1995.

Il metodo AASHTO, di natura empirico-statistica, è basato su osservazioni sperimentali dei parametri presi in considerazione, legati da relazioni funzionali determinate mediante metodi di correlazione basati su opportune funzioni di regressione.

Il procedimento adottato consiste nel determinare il numero di assi standard (da 8,2 ton = 80 kN) che la pavimentazione di progetto può sopportare in funzione di un fissato grado di ammaloramento finale ( $PSI_f$ ). Il legame tra le due grandezze suddette è funzione di vari parametri che definiscono strutturalmente la pavimentazione: caratteristiche meccaniche dei materiali, spessori dei vari strati che la compongono, portanza del sottofondo.

Il numero di assi standard determinato con l'applicazione del metodo AASHTO deve essere confrontato con la sollecitazione effettiva gravante sulla sovrastruttura in termini di traffico commerciale che si stima transiterà durante la vita utile della pavimentazione sulla corsia più caricata. Poiché il traffico commerciale transitante si differenzia per numero di assi, carico sugli assi e tipologia, è necessario determinare il numero di assi standard equivalenti, ovvero il numero di assi standard che determina lo stesso danno alla pavimentazione degli assi dei veicoli effettivamente transitanti.

Per determinare il numero di assi standard che transiteranno è necessario stabilire preliminarmente i coefficienti di equivalenza tra ciascuna asse reale e quello standard. Anche questi coefficienti sono funzione di alcuni parametri come la portanza del sottofondo, le caratteristiche meccaniche dei materiali e gli spessori dei vari strati della pavimentazione che concorrono a determinare il parametro SN, Structural Number o Indice di spessore della pavimentazione.

Noti questi coefficienti, in funzione della composizione del traffico sulla strada in esame, si determina il coefficiente di equivalenza medio, che, moltiplicato per il numero stimato di veicoli commerciali transitanti sulla corsia più sollecitata durante la vita utile della pavimentazione, permette di determinare il numero di assi standard equivalenti da confrontare con quello che, secondo il metodo AASHTO, è associato al grado di ammaloramento prefissato.

### Tipologia pacchetto stradale

Per gli assi stradali costituenti la nuova viabilità provinciale in progetto si prevede il ricorso ad una pavimentazione di tipo flessibile. Il pacchetto costituente la sovrastruttura stradale che verrà verificato è il seguente:

- Usura (bitume tal quale) = 4 cm

- Binder (bitume tal quale) = 6 cm
- Base (bitume tal quale) = 10 cm
- Strato di fondazione in misto cementato = 20 cm

### Calcolo Structural Number "SN".

Lo "Structural Number" SN è un parametro che indica la resistenza strutturale della pavimentazione. Esso è funzione degli spessori degli strati, della resistenza dei materiali impiegati, rappresentata attraverso dei "coefficienti strutturali di strato" e della loro sensibilità all'acqua, rappresentata dai "coefficienti di drenaggio".

L'espressione analitica dello Structural Number è la seguente:

dove:

$i$  = numero degli strati differenti costituenti la sovrastruttura stradale, in questo caso 4 (usura, collegamento, base e fondazione in misto cementato)

$s_i$  = spessore dello strato  $i$ -esimo (cm)

$a_i$  = coefficiente strutturale dello strato  $i$ -esimo, dipende dai materiali, è funzione della stabilità Marshall a 50 colpi per gli strati legati (conglomerati bituminosi e misto cementato) e del CBR per gli strati non legati (misto granulare)

$m_i$  = coefficiente di drenaggio

I valori dei coefficienti strutturali di strato  $a_i$  si ricavano da nomogrammi dell'AASHTO sulla base dei parametri caratteristici (stabilità Marshall, CBR). Poiché in Italia, a differenza degli USA, si utilizza lo strato superficiale suddiviso in usura e binder, con conseguente minor rigidità a parità di altri fattori (qualità dei materiali, spessori) è consigliabile ridurre i valori dedotti da detti nomogrammi di circa il 5-10% per gli strati in conglomerato bituminoso.

Sulla base delle prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto relative alla stabilità Marshall dei conglomerati bituminosi e al CBR della fondazione, si assumono per il calcolo del SN i valori indicati nella seguente tabella:

STRATO	SPESSORE $s_i$ (cm)	COEFFICIENTE STRUTTURALE $a_i$	COEFFICIENTE DI DRENAGGIO $m_i$	$s_i \times a_i \times m_i$
usura	4	0,43	1	1,72
collegamento	6	0,40	1	2,4
base	10	0,28	1	2,80
fondazione misto cementato	20	0,1	0,95	1,9
				=
				<b>8,82</b>

### Calcolo del traffico di progetto.

Ai fini della verifica strutturale della pavimentazione stradale occorre stimare il traffico di progetto in termini di traffico commerciale che transiterà nella corsia più sollecitata durante la vita utile dell'opera. Quest'ultima è fissata

in 20 anni, orizzonte temporale suggerito dalla buona pratica della progettazione e considerata una durata realistica di una pavimentazione stradale correttamente dimensionata.

Il traffico di progetto, cumulato nell'arco della vita utile, è stimato in base alla seguente formula:

$$T^N = n_{vca} * ((1+R)^N - 1) / R * 365$$

dove:

$T^N$  = numero dei veicoli transitanti, nell'arco della vita utile di N anni, sulla pavimentazione della corsia più carica

N = vita utile della pavimentazione

R = tasso di incremento annuo del traffico commerciale

$n_{vca}$  = numero di veicoli commerciali attuali, cioè transitanti nel primo anno di vita della pavimentazione sulla corsia più carica.

Per il calcolo del parametro  $n_{vca}$  si applica la seguente formula:

$$n_{vca} = TGM_{TOT} * p_{sm} * p_c * p_{corsia}$$

dove:

$TGM_{TOT}$  = traffico giornaliero medio per entrambi i sensi di marcia

$p_{sm}$  = percentuale di traffico nel senso di marcia che stiamo calcolando

$p_c$  = percentuale di veicoli commerciali

$p_{corsia}$  = percentuale di veicoli commerciali transitanti sulla corsia di calcolo

I valori assunti nel caso in esame sono i seguenti:

	VALORI ASSUNTI
$TGM_{TOT}$	16500 veicoli/giorno
$P_{sm}$	0,50
$p_c$	0,05
$P_{corsia}$	1
$R$	2,50%
$N$	20 anni

Sulla base di tali dati il traffico commerciale di progetto risulta:

$$T^N = 3.846.067,51 \text{ veicoli commerciali}$$

#### Determinazione del numero di assi standard equivalenti ESAL.

Nella metodologia proposta dall' "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", i carichi di traffico sono rappresentati dal numero cumulato di assi standard (ESAL = Equivalent Standard Axis Load) indicato con  $W_{8,2}$  perché pari ciascuno a 18 kilopound, corrispondenti a circa 8,2 ton (80kN), essendo 1 pound = 0,4536 kg.

Per calcolare il numero di assi standard ESAL partendo dal numero di veicoli commerciali  $T^N$  transitanti nel corso della vita di progetto si procede in due fasi:

- 1) individuazione dello spettro di tipologie di veicoli commerciali che compongono il totale del traffico  $T^N$ ;
- 2) determinazione del coefficiente di equivalenza tra i diversi assi per tipologia e peso associati ai vari veicoli commerciali e l'asse standard da 80kN.

Per determinare le tipologie e la composizione del traffico commerciale si fa riferimento alle indicazioni riportate nel paragrafo 2.2 del "Catalogo delle pavimentazioni stradali" (B.U. CNR n. 178 del 15 settembre 1995), che individua 16 tipologie di veicoli commerciali, caratterizzati ciascuno da un numero di assi con i relativi carichi associati (Tab. 2 del Catalogo delle Pavimentazioni).

Tipologia veicoli commerciali - Numero assi - Distribuzione carichi per asse (dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali - B.U. CNR n. 178/1995)																
Tipologia di veicoli commerciali		N. totale assi	N u m e r o d i a s s i d i s t r i b u i t i p e r p e s o (1 = m o n o, 2 =t a n d e m , 3 =t r i d e n)	Peso assi (kN)												
				10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
1	Autocarri leggeri	2		1						0						
2	Autocarri leggeri	2		1	1											
3	Autocarri medi e pesanti	2				1			1							
4	Autocarri medi e pesanti	2					1						1			
5	Autocarri pesanti	3				1			2							
6	Autocarri pesanti	3						1				2				
7	Autotreni e autoarticolati	4				1			2	1						
8	Autotreni e autoarticolati	4						1				3				
9	Autotreni e autoarticolati	5				1			4							
10	Autotreni e autoarticolati	5						1			2	2				
11	Autotreni e autoarticolati	5				1			3			1				
12	Autotreni e autoarticolati	5						1			3		1			
13	Mezzi d'opera	5					1							1	3	
14	Autobus	2				1			1							
15	Autobus	2						1				1				
16	Autobus	2						1		1						

Tabella 2 del Catalogo delle pavimentazioni stradali

Il Catalogo definisce inoltre, per varie categorie di strade, la frequenza, in termini percentuali, delle tipologie di veicoli commerciali sul totale del traffico commerciale transitante (Tab. 3 del Catalogo delle Pavimentazioni). Il tronco stradale in progetto è assimilabile per caratteristiche funzionali e geometriche alla categoria "Strade extraurbane secondarie con traffico ordinario", per la quale è individuato il seguente spettro di distribuzione (i

numeri di colonna identificano la tipologia di veicolo commerciale secondo l'associazione della tabella che precede):

Frequenza percentuale delle tipologie di veicoli commerciali per strade extraurbane secondarie ordinarie (dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali - B.U. CNR n. 178/1995)																
Tipo di strada	Tipologia di veicolo commerciale															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4) Strade extraurbane secondarie ordinarie	-	-	58,8	29,4	-	5,9	-	2,8	-	-	-	-	0,2	-	-	2,9

Tabella 3 del Catalogo delle pavimentazioni stradali

Il coefficiente di equivalenza tra il generico asse reale, caratterizzato da un peso  $P_i$  e tipologia  $T_i$ , e l'asse standard da 80 kN è dato, secondo il modello AASHTO, dalla seguente espressione:

$$C_{Sni} = C_{SN}(P_i, T_i, PSI_f) = 10^{-A_i}$$

che esplicitata diventa:

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

in cui:

$$G = \log\left(\frac{4,2 - PSI_f}{2,7}\right) \quad \text{e} \quad B_i = 0,40 + \frac{0,081 \cdot (0,225 \cdot P_i + T_i)^{3,23}}{\left(\frac{SN}{2,54} + 1\right)^{5,19} \cdot T_i^{3,23}}$$

dove:

$C_{Sni}$  = coefficiente di equivalenza tra l'asse i-esimo e l'asse standard da 8,2 ton (80 kN)

$P_i$  = peso complessivo dell'asse o set di assi (singolo, tandem o tridem) i-esimo (kN)

$T_i$  = tipologia dell'asse i-esimo, che assume valore 1 per assi singoli, 2 per assi tandem, 3 per assi tridem

$B^*$  = valore assunto da  $B_i$  per l'asse singolo da 8,2 ton (80 kN)

$SN$  = indice strutturale (cm)

$PSI_f$  = indice di decadimento finale della sovrastruttura, assunto pari a 2,5 come indicato dalla Tab. 9 del Catalogo delle Pavimentazioni

Detta  $n_i$  la percentuale di relativa del veicolo i-esimo nello spettro di traffico considerato, il coefficiente di equivalenza complessivo sarà:

Nel caso in esame, dato lo spettro di traffico considerato, risulta:

$$C_{SN} = 2,137$$

che applicato al numero di passaggi  $T^N = 3.846.067,51$  determina un valore di passaggi di assi standard equivalenti (ESAL) a 20 anni pari a:



$$N_{8,2} = 2,137 \times 3.846.067,51 = 8.220.492$$

Il dettaglio del calcolo è riportato nella tabella seguente:

CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI EQUIVALENZA $C_{SN}$ TRA L'ASSE STANDARD DA 80 KN PER LO SPETTRO DI TRAFFICO DI PROGETTO								
Veicoli commerciali da Catalogo delle pavimentazioni CNR				G =	SN =	B* =	Categoria strada	n x $C_{Sni}$
				-0,201	8,820	0,860	C Ordinaria	
Tipo	Carico per asse kN	Numero di assi $T_i$	$P_i$ kN	$B_i$	$A_i$	$C_{Sni} = 10^{-A_i}$	Spettro di traffico n (%)	
3	40	1	40	0,458	1,130	0,074	58,80	0,044
	80	1	80	0,860	0,000	1,000	58,80	0,588
4	50	1	50	0,511	0,754	0,176	29,40	0,052
	110	1	110	1,627	-0,522	3,328	29,40	0,978
6	60	1	60	0,592	0,457	0,349	5,90	0,021
	100	2	200	1,313	-0,500	3,162	5,90	0,187
8	60	1	60	0,592	0,457	0,349	2,80	0,010
	100	1	100	1,313	-0,361	2,299	2,80	0,064
	100	1	100	1,313	-0,361	2,299	2,80	0,064
	100	1	100	1,313	-0,361	2,299	2,80	0,064
13	50	1	50	0,511	0,754	0,176	0,20	0,000
	120	1	120	2,009	-0,673	4,710	0,20	0,009
	130	3	390	2,465	-1,035	10,833	0,20	0,022
16	50	1	50	0,511	0,754	0,176	2,90	0,005
	80	1	80	0,860	0,000	1,000	2,90	0,029
							$C_{SN} =$	2,137

Calcolo del massimo numero  $W_{8,2}$  di passaggi di assi equivalenti standard ammissibile.

Secondo la metodologia proposta dall' "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", il numero massimo di assi equivalenti  $W_{8,2}$  che la pavimentazione considerata può sopportare è legata alle caratteristiche meccaniche attraverso l'indice strutturale  $SN$  della pavimentazione e il modulo resiliente  $M_r$  del sottodondo, all'indice  $PSI_f$  di decadimento della sovrastruttura accettabile al termine della vita utile e al grado di affidabilità  $R$  scelto per l'accettazione dei risultati.

La relazione che lega le grandezze citate assume la seguente formulazione:



$$\log W_{8,2} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(0,3937 \cdot SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{PSI_i - PSI_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(0,3937 \cdot SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log M_r - 3,056$$

dove:

$W_{8,2}$  = numero massimo di assi equivalenti da 80 kN transitabili sulla sovrastruttura

$Z_R$  = l'ascissa della distribuzione standard ridotta legata al grado di affidabilità prescelto

$S_0$  = deviazione standard della distribuzione di probabilità della predizione del traffico e della prestazione attribuita alla pavimentazione

$PSI$  = indice di decadimento della sovrastruttura, valutato all'inizio ( $PSI_i$ ) e alla fine ( $PSI_f$ ) della vita di progetto della pavimentazione

$SN$  = indice strutturale (cm)

$M_r$  = modulo resiliente del sottofondo (Mpa)

#### Grado di affidabilità

Il grado di affidabilità  $R$  (Reliability) rappresenta la probabilità che il numero di passaggi di assi singoli equivalenti  $N_{8,2}$  che la pavimentazione può sopportare prima di raggiungere un prefissato grado di ammaloramento finale  $PSI_f$  sia maggiore o uguale al numero di passaggi che realmente si verifica sulla corsia più carica durante la vita utile della pavimentazione. In detta probabilità è compreso sia l'errore che si può commettere nella valutazione del traffico, sia la variabilità delle prestazioni della pavimentazione rappresentate dall'indice strutturale  $SN$ . Per tali errori si assume una distribuzione di probabilità di tipo normale (gaussiana).

Nel metodo AASHTO l'incertezza statistica rappresentata dall'affidabilità viene introdotta attraverso i coefficienti  $S_0$  e  $Z_R$  che esprimono, il primo, la deviazione standard della stima della sollecitazione derivante dal traffico ipotizzato e della prestazione strutturale attribuita alla pavimentazione, e, la seconda, l'ascissa della distribuzione standard ridotta.

Il legame tra numero cumulato di assi equivalenti stimato  $N_r$ , il numero effettivo di assi transitanti  $n_r$  e i parametri della distribuzione di probabilità sopradetti è dato dalla seguente relazione:

dove  $F_R$  esprime il grado di affidabilità del progetto.

L'affidabilità rappresenta quindi la probabilità che un determinato evento accada ed è legata al valore della deviazione standard ridotta  $Z_R$ , come riportato nella tabella seguente:

Corrispondenza tra valori di affidabilità R e deviazione standard ridotta $Z_R$												
$R$	50	60	70	75	80	<b>85</b>	90	92	95	98	99	99,9
$Z_R$	0,000	-0,253	-0,524	-0,674	-0,841	<b>-1,037</b>	-1,282	-1,405	-1,645	-2,054	-2,327	-3,090

Come valore dell'affidabilità  $R$  si assume quello indicato dal "Catalogo delle Pavimentazioni Stradali" per le strade extraurbane secondarie ordinarie (Tab. 9) pari a  $R = 85\%$ , cui corrisponde un valore di  $Z_R = -1,037$

Per  $S_0$ , le indagini condotte dall'AASHTO raccomandano, per pavimentazioni di tipo flessibile, un valore compreso tra 0,40 e 0,50. Valori inferiori sottintendono il fatto che il reale comportamento del traffico e dell'efficienza della pavimentazione sia meno disperso intorno al valore medio. Nella presente verifica si è scelto il valore intermedio  $S_0 = 0,45$ .

#### Grado di decadimento della sovrastruttura

Il decadimento limite ammissibile della sovrastruttura viene espresso per mezzo del parametro  $PSI$  (Present Serviceability Index), che rappresenta una misura del grado di ammaloramento della pavimentazione in termini di sicurezza e comfort, come percepiti dall'utente stradale.

I valori del  $PSI$  variano da valori massimi, pari a 5, all'inizio della vita utile della sovrastruttura, a valori limite nulli quando l'efficienza della pavimentazione decade del tutto. Tuttavia livelli inferiori a valori di 1 - 1,5 non sono accettabili, poiché sarebbero compromessi i livelli di servizio e la sicurezza della strada. I valori limite ammissibili dipendono dall'importanza del collegamento stradale: quanto questo sarà maggiore, tanto più alto deve essere il limite ammissibile del  $PSI$ .

Per il  $PSI$  iniziale di progetto ( $PSI_i$ ) è stato scelto il valore di 4,2, che rappresenta realisticamente lo stato di una pavimentazione nuova, mentre per il  $PSI$  minimo finale ( $PSI_f$ ) si è fatto riferimento alla Tabella 9 del "Catalogo delle Pavimentazioni Stradali" del CNR in cui, per la tipologia di strada in progetto deve risultare  $PSI_f \geq 2,5$ .

#### Portanza del sottofondo

Secondo le prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto, il piano di posa della sovrastruttura stradale, costituito lungo tutto il tratto da rilevato in mistone di cava dovrà garantire un valore minimo della portanza di 80 MPa, in tutte le condizioni stagionali, espresso in termini di modulo di deformazione  $M_d$ .

Per ricavare il valore del modulo resiliente  $M_r$  del sottofondo partendo da quello del modulo di deformazione occorre fare ricorso a relazioni dedotte da dati sperimentali che correlano le due grandezze attraverso il valore del CBR, per il quale valgono le seguenti espressioni:

$$CBR = 0,2 M_d$$

$$M_r = 10 CBR$$

dove  $M_d$  e  $M_r$  sono espressi in MPa.

Sostituendo il valore prescritto dal Capitolato Speciale d'Appalto si ottiene  $M_r = 160$  MPa, valore vicino a quello indicato dalla Tabella 5 del "Catalogo delle Pavimentazioni Stradali" del CNR per terreni di sottofondi di buona portanza ( $M_r = 150$ ).

Sostituendo nell'espressione:

$$\log W_{8,2} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(0,3937 \cdot SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{PSI_i - PSI_f}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(0,3937 \cdot SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log M_r - 3,056$$

i valori assunti per i diversi parametri e grandezze coinvolti, si ottiene, come sintetizzato nella seguente tabella, il valore di  $W_{8,2}$  da confrontare con il carico di progetto in termini di passaggi di assi equivalenti standard  $N_{8,2}$

PARAMETRO	VALORE
$Z_R$	-1,037
$S_0$	0,45
$SN$	7,78
$PSI_i$	4,2
$PSI_f$	2,5
$M_r$	160
$\log W_R$	6,916
<b><math>W_{8,2} =</math></b>	<b>8.242.383</b>

### Verifica della pavimentazione.

Secondo il metodo AASHTO, affinché la pavimentazione in progetto si idonea a sopportare il traffico di progetto deve risultare:

$$N_{8,2} < W_{8,2}$$

dove i termini assumono il significato già visto.

Dal confronto dei valori si evince che:

$$N_{8,2} = 8.220.492 < 8.242.383 = W_{8,2}$$

Pertanto il pacchetto di pavimentazione di progetto risulta idoneo a sopportare i volumi di traffico previsti nel corso della vita utile prevista con un adeguato coefficiente di sicurezza rispetto alla perdita finale di efficienza.