



**PNC - PNRR: PIANO NAZIONALE COMPLEMENTARE AL PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA NEI TERRITORI COLPITI DAL SISMA 2009-2016, SUB-MISURA A4, "INVESTIMENTI SULLA RETE STRADALE STATALE"**

**S.S.4 "SALARIA"  
ADEGUAMENTO NEL TRATTO TRA RIETI E SIGILLO - 3° LOTTO 1° STRALCIO - TRATTO DI ADEGUAMENTO IN SEDE E VARIANTE**

**PROGETTO ESECUTIVO**

IMPRESA ESECUTRICE



RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

*Ing. Paolo NARDOCCI*

PROGETTAZIONE



IL PROGETTISTA

*Ing. Valerio BAJETTI*  
Ordine degli Ingegneri della  
provincia di Roma n°A26211  
(Diretto tecnico Ingegneria del Territorio)



IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA  
IN FASE DI PROGETTAZIONE

*Ing. Fabrizio Bajetti*  
Ordine degli Ingegneri della  
provincia di Roma n°10112  
(Diretto tecnico Ingegneria del Territorio)



PROTOCOLLO

DATA

N. ELABORATO:

D002

**CAPITOLO D0 - PARTE GENERALE  
RELAZIONE DI CALCOLO PAVIMENTAZIONE**

CODICE PROGETTO

PROGETTO

S1R102E2201

NOME FILE

D002-T00PSTRARE02\_A.dwg

REVISIONE

SCALA:

CODICE  
ELAB.

T00PS00TRARE02

A

D

C

B

A

PRIMA EMISSIONE

APRILE  
2024

ING. SIMONE  
ROMAGNOLI

ING. GIANCARLO  
TANZI

ING. VALERIO  
BAJETTI

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

definiSOMMARIO

1	PREMESSE.....	2
2	IL CALCOLO DEL PACCHETTO.....	3
2.1	Premessa al calcolo.....	3
2.2	La procedura di calcolo dell'AASHTO.....	3
2.3	Determinazione dell'indice di portanza del sottofondo.....	4
2.4	Il calcolo del traffico e dei passaggi equivalenti.....	5
2.5	Il calcolo dello Structural Number.....	6
2.6	L'affidabilità.....	7
2.7	I risultati del calcolo.....	8
3	CONCLUSIONI.....	8

## 1 PREMESSE

Il progetto esecutivo prevede il seguente pacchetto pavimentato:

- Sotto-fondazione in misto granulare stabilizzato → 20cm
- Fondazione in misto cementato ad alta duttilità → 20cm
- Base in Conglomerato bituminoso modificato con supermodificante SUPERLPLAST → 12cm
- Binder in conglomerato bituminoso modificato con supermodificante GIPAVE → 08cm
- Strato di usura in conglomerato bituminoso ad alte prestazioni con polverino in gomma → 04cm

## 2 IL CALCOLO DEL PACCHETTO

### 2.1 Premessa al calcolo

Il calcolo di raffronto è stato eseguito secondo la medesima procedura seguita nel progetto posto a base di gara al fine di assicurare un confronto omogeneo fra le quantità riscontrate.

Si è quindi seguita la procedura definita nelle linee guida dell'AASHTO.

### 2.2 La procedura di calcolo dell'AASHTO

La metodologia di dimensionamento proposta dall' *AASHTO* si basa sulla quantificazione della capacità strutturale di una pavimentazione attraverso il Numero di Struttura *SN* (*Structural Number*), che rappresenta un coefficiente di equivalenza tra gli strati componenti della pavimentazione atto a confrontare, dal punto di vista strutturale, pavimentazioni di diverso spessore e natura, a parità di portanza di sottofondo.

Il metodo di dimensionamento (*AASHTO Guide Design of Pavement Structures*) si fonda sul contributo di 4 fattori che considerano i seguenti aspetti:

1. traffico di progetto;
2. grado di affidabilità del procedimento di dimensionamento;
3. decadimento limite ammissibile della sovrastruttura;
4. caratteristiche degli strati che compongono la sovrastruttura (Numero di struttura *SN*);
5. portanza del sottofondo.

L'espressione analitica assunta nell'*AASHTO Guide* come relazione fondamentale di dimensionamento è la seguente

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

dove:

- il primo addendo  $Z_R S_0$  rappresenta il grado di affidabilità accettato nel dimensionamento;
- il secondo addendo rappresenta le caratteristiche strutturali della pavimentazione di progetto;
- il terzo addendo rappresenta il decadimento limite ammissibile per la pavimentazione in progetto in relazione alle sue caratteristiche strutturali;
- il quarto addendo rappresenta la "bontà" del sottofondo su cui va a posare la pavimentazione;
- $W_{18}$  è il traffico di progetto rappresentato dal numero cumulato di assi standard (ESAL) da 8,16 tonn - 80 kN, che, per la verifica della pavimentazione, deve risultare maggiore del volume di traffico equivalente  $W_T$  ottenuto dal probabile traffico equivalente transiente sulla stessa durante la sua prestabilita vita utile.
- $SN$  è il numero di struttura rappresentato dalla somma dello spessore degli strati moltiplicato per il coefficiente di struttura  $a_i$ .

Come si nota dalle formule, per esplicitare il numero di assi equivalenti che transitano durante la vita utile di una sovrastruttura stradale, è necessario calcolare il numero di struttura  $SN$ , che viene descritto dettagliatamente nel paragrafo successivo, instaurando un ciclo iterativo di calcolo.

### 2.3 Determinazione dell'indice di portanza del sottofondo

In conformità alle previsioni dell'allegato %5.1. Relazione pavimentazioni del progetto posto a base di gara e date le risultanze delle indagini geologiche il modulo resiliente del sottofondo è stato assunto pari a 50MPa.

Il modulo resiliente appena menzionato è di primaria importanza per la progettazione della pavimentazione: MR è un modulo elastico dinamico che tiene conto soltanto della componente viscosa reversibile  $\Sigma R$  della deformazione del materiale. Si può infatti porre:

$$M_R = \sigma_D / \epsilon_R$$

Dove il numeratore rappresenta lo sforzo deviatorico della prova triassiale e il denominatore è la porzione reversibile della deformazione.

Come da prassi Mr è determinato secondo le correlazioni di Heukelom e Klomp tra il modulo resiliente e il valore effettivo del CBR:

$$MR=100 \text{ CBR [kg/cm}^2\text{]}$$

Di seguito si riportano a titolo indicativo i valori del modulo resiliente utilizzati nella stesura del Catalogo delle sovrastruttura del CNR (B.U: 178/95).

MR [MPa]	CBR [%]	K [kPa/mm]
150	15	100
90	9	60
30	3	20

Il modulo di riferimento pari a 50MPa è quindi compatibile con un CBR pari a 5, il che dimostra la cautelatività del calcolo.

## 2.4 Il calcolo del traffico e dei passaggi equivalenti

Ai sensi della procedura di calcolo dell'AASHTO adottata è necessario definire il numero di passaggi di assi equivalenti. Si fa ovviamente riferimento al solo transito dei mezzi pesanti ipotizzando in modo realistico che il passaggio delle autovetture non generi deformazioni permanenti. Tale valore è stato calcolato nel progetto preliminare posto a base di gara e qui confermato ed è pari a 1.000.000 passi di assi standard equivalenti (da 8,2 ton n pari a circa 80kN).

TIPO DI VEICOLO	n	Pi [kN]	Ti	Bi	B*	G	A	CSNi	n*CSNi	
AUTOCARRI LEGGERI	1	0,00%	10	1	0,400458	0,537233	-0,200915	3,545576	0,000285	0,000000
	1	0,00%	20	1	0,402503	0,537233	-0,200915	2,453710	0,003518	0,000000
	2	0,00%	15	1	0,401195	0,537233	-0,200915	2,928135	0,001180	0,000000
	2	0,00%	30	1	0,407578	0,537233	-0,200915	1,746507	0,017926	0,000000
AUTOCARRI MEDI E PASANTI	3	58,80%	40	1	0,417262	0,537233	-0,200915	1,227703	0,059197	0,034808
	3	58,80%	80	1	0,537233	0,537233	-0,200915	0,000000	0,999999	0,588000
	4	29,40%	50	1	0,433248	0,537233	-0,200915	0,823298	0,150211	0,044162
	4	29,40%	110	1	0,766350	0,537233	-0,200915	-0,520584	3,315763	0,974834
AUTOCARRI PASANTI	5	0,00%	40	1	0,417262	0,537233	-0,200915	1,227703	0,059197	0,000000
	5	0,00%	160	2	0,537233	0,537233	-0,200915	-0,138474	1,375541	0,000000
	6	5,90%	60	1	0,457320	0,537233	-0,200915	0,496927	0,318474	0,018790
	6	5,90%	200	2	0,672668	0,537233	-0,200915	-0,505362	3,201560	0,188892
AUTOTRENI E AUTO-ARTICOLATI	7	0,00%	40	1	0,417262	0,537233	-0,200915	1,227703	0,059197	0,000000
	7	0,00%	90	1	0,596995	0,537233	-0,200915	-0,195382	1,568131	0,000000
	7	0,00%	80	1	0,537233	0,537233	-0,200915	0,000000	0,999999	0,000000
	7	0,00%	80	1	0,537233	0,537233	-0,200915	0,000000	0,999999	0,000000
	8	2,80%	60	1	0,457320	0,537233	-0,200915	0,496927	0,318474	0,008917
	8	2,80%	100	1	0,672668	0,537233	-0,200915	-0,366888	2,327490	0,065170
	8	2,80%	100	1	0,672668	0,537233	-0,200915	-0,366888	2,327490	0,065170
	8	2,80%	100	1	0,672668	0,537233	-0,200915	-0,366888	2,327490	0,065170
	9	0,00%	40	1	0,417262	0,537233	-0,200915	1,227703	0,059197	0,000000
	9	0,00%	160	2	0,537233	0,537233	-0,200915	-0,138474	1,375541	0,000000
	9	0,00%	160	2	0,537233	0,537233	-0,200915	-0,138474	1,375541	0,000000
	10	0,00%	60	1	0,457320	0,537233	-0,200915	0,496927	0,318474	0,000000
	10	0,00%	180	2	0,596995	0,537233	-0,200915	-0,333856	2,157030	0,000000
	10	0,00%	200	2	0,672668	0,537233	-0,200915	-0,505362	3,201560	0,000000
	11	0,00%	40	1	0,417262	0,537233	-0,200915	1,227703	0,059197	0,000000
	11	0,00%	100	1	0,672668	0,537233	-0,200915	-0,366888	2,327490	0,000000
	11	0,00%	240	3	0,537233	0,537233	-0,200915	-0,219476	1,657584	0,000000
	12	0,00%	60	1	0,457320	0,537233	-0,200915	0,496927	0,318474	0,000000
	12	0,00%	110	1	0,766350	0,537233	-0,200915	-0,520584	3,315763	0,000000
	12	0,00%	270	3	0,596995	0,537233	-0,200915	-0,414858	2,599310	0,000000
MEZZI D'OPERA	13	0,20%	50	1	0,433248	0,537233	-0,200915	0,823298	0,150211	0,000300
	13	0,20%	120	1	0,880182	0,537233	-0,200915	-0,660941	4,580801	0,009162
	13	0,20%	390	3	1,016352	0,537233	-0,200915	-1,010622	10,247600	0,020495
AUTOBUS	14	0,00%	40	1	0,417262	0,537233	-0,200915	1,227703	0,059197	0,000000
	14	0,00%	80	1	0,537233	0,537233	-0,200915	0,000000	0,999999	0,000000
	15	0,00%	60	1	0,457320	0,537233	-0,200915	0,496927	0,318474	0,000000
	15	0,00%	100	1	0,672668	0,537233	-0,200915	-0,366888	2,327490	0,000000
	16	2,90%	50	1	0,433248	0,537233	-0,200915	0,823298	0,150211	0,004356
	16	2,90%	80	1	0,537233	0,537233	-0,200915	0,000000	0,999999	0,029000
<b>TOTALE</b>	<b>100,00%</b>								<b>2,117226</b>	

## 2.5 Il calcolo dello Structural Number

Lo "structural number" SN è un parametro che tiene conto della "resistenza strutturale" della pavimentazione. Esso è funzione

- dello spessore di ogni singolo strato  $s_i$ ,
- della "resistenza" dei materiali impiegati rappresentata, attraverso i "coefficienti strutturali di strato"  $a_i$ , e della loro sensibilità all'acqua rappresentata attraverso i "coefficienti di drenaggio"  $m_i$

L'espressione analitica dello Structural Number è:

$$SN = \sum a_i * m_i * s_i$$

dove:

- $i$  è il numero degli strati costituenti la sovrastruttura stradale;
- $a_i$  è un coefficiente che esprime la capacità relativa dei materiali impiegati nei vari strati della pavimentazione a contribuire come componenti strutturali alla funzionalità della sovrastruttura. Tali coefficienti sono funzione del tipo e proprietà del materiale. Nello specifico i coefficienti strutturali relativi agli strati di usura ( $a_1$ ) e di base ( $a_3$ ) si ricavano direttamente dai monogrammi presenti sull'AASHTO GUIDE in funzione della stabilità Marshall scelta per i rispettivi strati (si considera per la stabilità Marshall a 75 colpi i valori prescritto dal capitolato delle Autostrade S.p.A.). Il valore del coefficiente relativo allo strato di collegamento ( $a_2$ ) si ricava per interpolazione lineare dei parametri  $a_1$  e  $a_3$ , ricavati sempre dall'ASSHTO GUIDE però con il valore della stabilità Marshall relativa allo strato di collegamento, con le rispettive quote, in quanto negli Stati Uniti non è previsto tale strato. Infine il coefficiente relativo allo strato di fondazione  $a_4$  in misto granulare si ricava sempre dall'AASHTO GUIDE in funzione del CBR della fondazione, posto pari a 50;
- $s_i$  è lo spessore dello strato
- $m_i$  è il coefficiente funzione della qualità del drenaggio e della percentuale di tempo durante il quale la pavimentazione è esposta a livelli di umidità prossimi alla saturazione. Siccome l'effetto che l'acqua ha sui materiali legati è praticamente nullo si pone  $m=1$ .

Lo Structural Number risulta così calcolato:

INDICE DI SPESSORE						
Tipologia	Usura	Binder	Base	Fondazione in misto cementato	Misto granulare stabilizzato	IS [pollici]
$a_i =$	0,44	0,42	0,33	0,15	0,11	5,42
$m_i =$	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	
$s_p$ [cm]=	4,00	8,00	12,00	20,00	20,00	
$s_{ni}$ [cm]=	1,76	3,36	3,96	2,70	1,98	
$s_{ni}$ [pollici]=	0,69	1,32	1,56	1,06	0,78	

  

STRATO	MATERIALE	Stabilità Marshall ( $S_{50}$ )	Resistenza a compressione a 7gg [Kg/cm <sup>2</sup> ]	CBR [%]	COEFFICIENTI STRUTTURALI $a_i$
Usura	Cong. Bitum.	1000-1100			0.43-0.45
Collegamento	Cong. Bitum.	900-1000			0.40-0.43
Base	Cong. Bitum.	700-800			0.30-0.35
Fondazione/base	Misto cem.		≈37		0.15-0.20
Fondazione	Misto gran.			≈60	0.11-0.13



## 2.6 L'affidabilità

Il fattore di Affidabilità considera le condizioni aleatorie che possono inficiare le previsioni di traffico e le prestazioni delle pavimentazioni. L'affidabilità R esprime la probabilità che il numero di applicazioni di carico  $N_t$  che la struttura può sopportare prima di raggiungere un prefissato grado di ammaloramento finale (PSI<sub>fin</sub>) sia maggiore o uguale al numero di applicazioni di carico Z NT che realmente sono applicati alla sovrastruttura nel periodo di progettazione T considerato (vita utile)

$$R = \Pr \left\{ \text{Log}W_{18} \geq \text{Log}N_t \right\} = \Pr \left\{ \delta \geq 0 \right\} = \Pr \left\{ Z \geq -\frac{\delta_0}{S_0} \right\}$$

I valori di Ze in funzione dell'affidabilità R sono stati calcolati per ogni probabilità a intervalli significativi e riassunti nella tabella seguente.

Valori di Zr in funzione del Livello di Affidabilità "R"												
Affidabilità "R"		Zr										
R[%]	50	60	70	75	80	85	90	92	95	98	99	99.9
Z <sub>R</sub>	0.000	-0.253	-0.524	-0.674	-0.841	-1.037	-1.282	-1.405	-1.645	-2.054	-2.327	-3.090
[%]	[admin]											
50,00%	0,000											
60,00%	-0,253											
70,00%	-0,524											
75,00%	-0,674											
80,00%	-0,841											
85,00%	-1,037											
90,00%	-1,282											
91,00%	-1,340											
92,00%	-1,405											
93,00%	-1,476											
94,00%	-1,555											
95,00%	-1,645											
96,00%	-1,751											
97,00%	-1,881											
98,00%	-2,054											
99,00%	-2,327											
99,90%	-3,090											
99,99%	-3,750											

E' stata assunta una R pari al 95% e quindi una ZR=-1,282 con S0 pari a 0,45.



## 2.7 I risultati del calcolo

Avendo assunto

- $Z_r = -1,645$  (R=90%)
- $S_0 = 0,45$
- $\Psi_i = 4,2$
- $\Psi_f = 2,5$
- $M_R = 50$  MPa
- SN come da calcolo espresso in centimetri

Si ottengono i seguenti risultati

TIPOLOGIA DI STRADA E TRAFFICO	
1) Autostrada extraurbana	
2) Autostrada Urbana	
3) Strada extraurbana principale e secondaria a forte traffico	
4) Strada extraurbana secondaria ordinaria	<b>X</b>
5) Strada extraurbana secondaria turistica	
6) Strada urbana di scorrimento	
7) Strada urbana di quartiere e locale	
8) Corsie preferenziali	
Totale passaggi veicoli (Vk) al termine della vita utile	<b>1.000.000,00</b>
n°Csi	<b>218,99%</b>

TIPOLOGIA DI STRADA E TRAFFICO	
NUMERO DI PASSAGGI DI VEICOLI EQUIVALENTI SOPPORTATI DALLA PAVIMENTAZIONE STRADALE	<b>11.909.556,90</b>
$\log W_{18} = Z_r \cdot S_0 + 9,36 \log(SN+1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \log M_R - 8,07$	
NUMERO DI PASSAGGI DI VEICOLI EQUIVALENTI PREVISTI PER LA STRADA IN PROGETTO ( $W_t \cdot n \cdot CSNi$ )	<b>2.189.939,52</b>
COEFFICIENTE DI SICUREZZA	<b>5,44</b>

## 3 CONCLUSIONI

Il pacchetto pavimentato di progetto dell'asse principale (analogo a quello di offerta tecnica) è in grado, al termine della sua vita utile, di sopportare 11.909.556 passaggi di assi equivalenti contro 4.056.020 del pacchetto posto a base di gara .