



COSTRUZIONE DI STRADE

Dimensionamento delle sovrastrutture stradali



INTRODUZIONE

Per dimensionare un pacchetto stradale in manutenzione o di nuova realizzazione è importante tener conto dei seguenti aspetti:

- **traffico**: spettro e quantità, assi standard equivalenti
- **materiali**: tradizionali ed innovativi
- **metodologie di controllo**: in laboratorio ed in sito
- **approcci progettuali**: dai teorici ai razionali

IL TRAFFICO

Il dimensionamento di una sovrastruttura stradale dipende dalla composizione e dalla entità del **traffico**, valutato tra l'entrata in esercizio e il termine della vita utile dell'infrastruttura.

L'analisi completa del traffico dovrebbe tenere conto oltre che del numero ed entità dei cicli di carico, anche delle fluttuazioni giornaliere e stagionali, della composizione degli assi dei differenti veicoli, delle variazioni di velocità.

Fondamentali le sollecitazioni dovute al passaggio degli autocarri, rispetto alle quali possono essere ritenute trascurabili quelle dovute al traffico leggero (autovetture).

I mezzi pesanti esercitano la propria azione in modo diverso a secondo del carico massimo raggiungibile ed in relazione alla distribuzione di tale carico sui differenti assi e ruote.

IL TRAFFICO


I carichi trasmessi alle sovrastrutture dai veicoli delle varie categorie sono molto diversi, sia per l'entità (carico) che per il modo di applicazione (velocità e distanza assi); infatti gli assi possono essere distanti tra loro di una lunghezza tale che non si verifichi mai la sovrapposizione delle rispettive deformate, condizione di assi singoli, oppure di assi tandem o tridem, per cui è prevista la sovrapposizione delle deformate.



IL TRAFFICO: MASSA DEI VEICOLI

- **Nuovo Codice della Strada (D.Lgs. 30 aprile 1992, n. 285)
Art. 62 Massa limite**

1. La massa limite complessiva a pieno carico di un veicolo, salvo quanto disposto nell'art. 10 e nei commi 2, 3, 4, 5 e 6 del presente articolo, costituita dalla massa del veicolo stesso in ordine di marcia e da quella del suo carico, non può eccedere 5 t per i veicoli ad un asse, 8 t per quelli a due assi e 10 t per quelli a 3 o più assi.



2. Con esclusione dei semirimorchi, per i rimorchi muniti di pneumatici tali che il carico unitario medio trasmesso all'area di impronta sulla strada non sia superiore a 8 daN/cm², la massa complessiva a pieno carico non può eccedere 6 t se ad un asse, con esclusione dell'unità posteriore dell'autosnodato, 22 t se a due assi e 26 t se a tre o più assi.

3. Salvo quanto diversamente previsto dall'art. 104, per i veicoli a motore isolati muniti di pneumatici, tali che il carico unitario medio trasmesso all'area di impronta sulla strada non sia superiore a 8 daN/cm² e quando, se trattasi di veicoli a tre o più assi, la distanza fra due assi contigui non sia inferiore ad un metro, la massa complessiva a pieno carico del veicolo isolato non può eccedere 18 t se si tratta di veicoli a 2 assi e 25 t se si tratta di veicoli a 3 o più assi; 26 t e 32 t rispettivamente se si tratta di veicoli a 3 o a 4 o più assi quando l'asse motore è munito di pneumatici accoppiati e di sospensioni pneumatiche ovvero riconosciute equivalenti dal Ministero dei trasporti. Qualora si tratti di autobus o filobus a 2 assi destinati a servizi pubblici di linea urbani e suburbani la massa complessiva a pieno carico non deve eccedere le 19 t.

IL TRAFFICO: CARICHI PER ASSE

CNR - B.U. 178/95 "Catalogo delle pavimentazioni stradali"

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

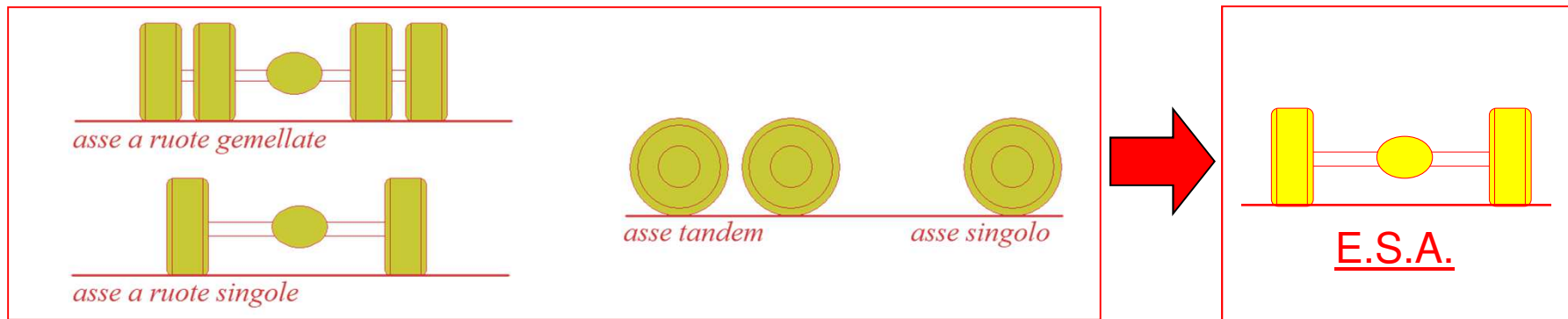
IL TRAFFICO: SPETTRI DI TRAFFICO

Tipo di strada	Tipo di veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. autostrade extraurbane	12	---	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,10	-----	-----	12,2
2. autostrade urbane	18,2	18,2	16,,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,6	18,2	27,3	---
3. strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico	---	13,1	39,5	10,5	7,9	2,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6	0,5	---	---	10,5
4. strade extraurbane secondarie ordinarie	---	---	58,8	29,4	---	5,9	---	2,8	---	---	---	---	0,2	---	---	2,9
5. strade secondarie turistiche	24,5	---	40,8	16,3	---	4,15	---	2	---	---	---	---	0,05	-----	---	12,2
6. strade urbane di scorrimento	18,2	18,2	16,,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,6	18,2	27,3	---
7. strade di quartiere e locali	80	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	20	---	---
8. corsie preferenziali	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	47	53	---

Composizione % del traffico per il Tipo di Strada considerato: la somma di ogni riga è = 100

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

Ai fini progettuali è utile rapportare gli effetti prodotti da ogni tipologia di carico $P_1, P_2 \dots P_i$ (kN) ad una sola tipologia di carico P_{ESA} (kN)



Mediante la definizione di ASSE STANDARD EQUIVALENTE (E.S.A.) è possibile omogeneizzare, rispetto ad un asse di riferimento, tutti i carichi previsti.

Per quest'operazione di "conversione" si impiegano i Fattori di Equivalenza (E.F. = Equivalency Factors).

Gli E.F. sono tabulati in funzione dell'ESA impiegato che è variabile (100 kN , 81.6 kN)

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

Per es: *TRAFFICO ESPRESSO IN ASSI DA 81.6 (kN)*

Fattori di equivalenza per ottenere assi da 81.6 kN

Peso asse singolo (kN)	E.F. (fatt. equival.)	E.F.' (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

1. Per prima cosa è necessario individuare, per tutti i veicoli previsti dallo "spettro di traffico", la corrispondente ripartizione del peso sui vari assi di cui il mezzo è composto;
2. Si individuano quindi gli E.F._i di ogni asse appartenente al veicolo
3. Sommando gli E.F._i di tutti gli assi di un veicolo si ottiene il Fattore di Equivalenza di quel mezzo nel caso in cui esso fosse composto di assi tutti uguali e di peso pari a quello dell'asse di riferimento scelto (ESA)

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

ESEMPIO 1:

Autobus a pieno carico:

40 kN 80 kN
 (E.F.₁=0.08) (E.F.₂=0.93)

Il passaggio REALE di un mezzo a 2 assi, del peso complessivo di 120 kN (40+80) può essere assimilato al transito VIRTUALE di 1.01 (0.08+0.93) E.S.A. (81.6 kN)



Peso asse singolo (kN)	E.F. (fatt. equival.)	E.F.' (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	

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

ESEMPIO 2:

Motrice con semi-rimorchio composta dai seguenti assi:

75 kN 110 kN 120 + 120 kN

(E.F.₁=0.70) (E.F.₂=3.42) (E.F.₃=5.7*1.38=7.86)



Il passaggio REALE di un mezzo a 4 assi, due dei quali in tandem, del peso complessivo di 425 kN (75+110+120+120) può essere assimilato al transito VIRTUALE di 11.98 (0.7+3.42+7.86) E.S.A. (81.6 kN)

Peso asse singolo (kN)	E.F. (fatt. equival.)	E.F.' (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	

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

ESEMPIO 3:

Stimare il numero di ESA transitanti nel periodo di vita utile della sovrastruttura (20 anni) di una autostrada extraurbana.

Tipo di strada	Tipo di veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. autostrade extraurbane	12	---	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,10	---	---	12,2
2. autostrade urbane	18,2	18,2	16,5	---	---	---	---	---	---	---	---	1,6	18,2	27,3	---	
3. strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico	---	13,1	39,5	10,5	7,9	2,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6	0,5	---	---	10,5
4. strade extraurbane secondarie ordinarie	---	---	58,8	29,4	---	5,9	---	2,8	---	---	---	---	0,2	---	---	2,9
5. strade secondarie turistiche	24,5	---	40,8	16,3	---	4,15	---	2	---	---	---	---	0,05	---	---	12,2
6. strade urbane di scorrimento	18,2	18,2	16,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,6	18,2	27,3	---
7. strade di quartiere e locali	80	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	20	---	---
8. corsie preferenziali	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	47	53	---

Noto il tipo di strada, si ricava lo spettro di traffico.

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

ESEMPIO 3:

Stimare il numero di ESA transitanti nel periodo di vita utile della sovrastruttura (20 anni) di una autostrada extraurbana.

Tipo di strada	Tipo di veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. autostrade extraurbane	12	---	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,10	---	---	12,2
2. autostrade urbane	18,2	18,2	16,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,6	18,2	27,5	---
3. strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico	---	13,1	39,5	10,5	7,9	2,6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4. strade extraurbane secondarie ordinarie	---	---	58,8	29,4	---	5,9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5. strade secondarie turistiche	24,5	---	40,8	16,3	---	4,15	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
6. strade urbane di scorrimento	18,2	18,2	16,5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
7. strade di quartiere e locali	80	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
8. corsie preferenziali	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

CNR - B.U. 178/95 "Catalogo delle pavimentazioni stradali"

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

Per lo spettro di traffico ottenuto, si ricavano i carichi per asse.

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

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

Per i tipi di veicoli ottenuti, si valuta EF.

tipo veicoli	Calcolo EF per tipo di veicolo sulla base della distribuzione BU178/95								EF tot sudd	
1	0,02				0,04					0,05
2										
3	0,07				0,93					1,00
4	0,14				3,42					3,56
5	0,07				1,28					1,35
6	0,27				3,31					3,58
7	0,07				1,67	0,93			0,93	3,60
8	0,27				2,40	2,40			2,40	7,47
9	0,07	1,28						1,28		2,64
10	0,27	2,30						3,31		5,88
11	1,48							1,28	0,93	3,70
12	2,21							1,67	2,30	6,17
13	3,50							8,20	11,32	23,02
14										
15										
16	0,14				0,93					1,07

IL TRAFFICO: ASSE STANDARD EQUIVALENTE

Si valuta l'EF totale dell'autostrada.

EF tot sudd	% (spettro)	EF tot 81.6kN
0,05	12,00	0,01
	0,00	0,00
1,00	24,40	0,24
3,56	14,60	0,52
1,35	2,40	0,03
3,58	12,20	0,44
3,60	2,40	0,09
7,47	4,90	0,37
2,64	2,40	0,06
5,88	4,90	0,29
3,70	2,40	0,09
6,17	4,90	0,30
23,02	0,10	0,02
	0,00	0,00
	0,00	0,00
1,07	12,20	0,13
	100,00	2,587

Si ottiene il valore di traffico cumulativo massimo pari a:

$$N_{ESA-81.6kN} = EF_{TOT} \cdot TGM$$

$$N_{ESA-120kN} = \frac{N_{ESA81.6kN}}{EF_{120kN}}$$

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

Occorre definire il concetto di **vita utile** intesa come periodo di tempo oltre il quale la degradazione subita dalla sovrastruttura ne rende necessario il rifacimento.

Il dimensionamento di una sovrastruttura differisce dalle strutture classiche per:

- peso proprio trascurabile
- carichi dinamici
- carichi molto diversi e piccoli in rapporto alla resistenza materiali
- influenza della temperatura
- materiali diversi
- difficoltà di definire un danno accettabile



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

Teorici: oggi in disuso, basati su leggi di diffusione dei carichi superficiali nella pavimentazione

Semiempirici: risultati sperimentali + formulazioni teoriche

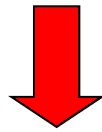
Razionali: conoscenza delle caratteristiche meccaniche dei materiali + metodi matematici o numerici (FEM)



LA FORMULA DEL MASSACHUSSETTS

Ipotesi:

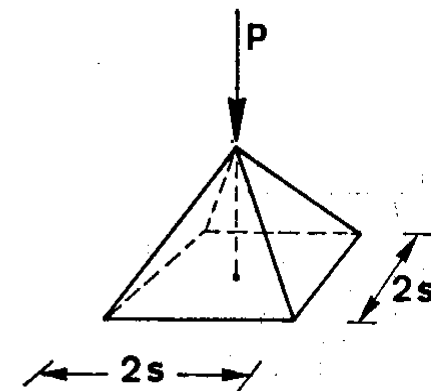
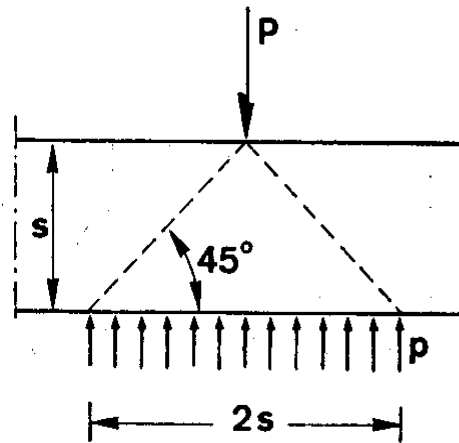
- Carico concentrato P ;
- Pressione p uniforme sul sottofondo;
- Distribuzione piramidale a 45° .



$$P = 4ps^2$$



$$s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P}{p}}$$



LA FORMULA DI DOWN

Ipotesi:

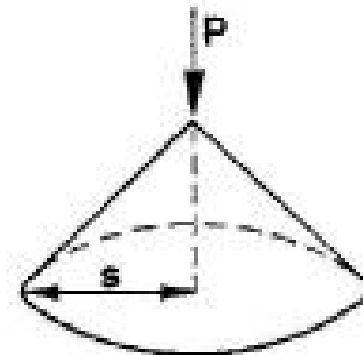
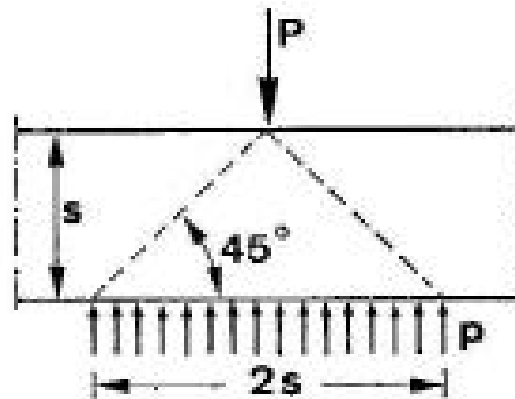
- Carico concentrato P ;
- Pressione p uniforme sul sottofondo;
- Distribuzione conica con generatrici a 45° .



$$P = \pi p s^2$$



$$s = 0.564 * \sqrt{\frac{P}{p}}$$





CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI

I metodi di calcolo semiempirici si basano su risultati sperimentali integrati da considerazioni teoriche, tenendo conto delle proprietà portanti dei terreni di sottofondo, della loro condizione e del traffico.

- CBR prima formulazione
- CBR Road Research Laboratory
- CBR Wyoming
- Indice di Gruppo
- Road Note 29
- AASHO INTERIM GUIDE, 1972



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO CBR prima formulazione

Consiste nello stabilire un indice sulla resistenza alla penetrazione che presenta un provino di terreno di sottofondo; si risale al dimensionamento della sovrastruttura in base a curve che sono state tracciate con la scorta di dati ottenuti effettuando prove su pavimentazioni e su terreni di sottofondo diversi.

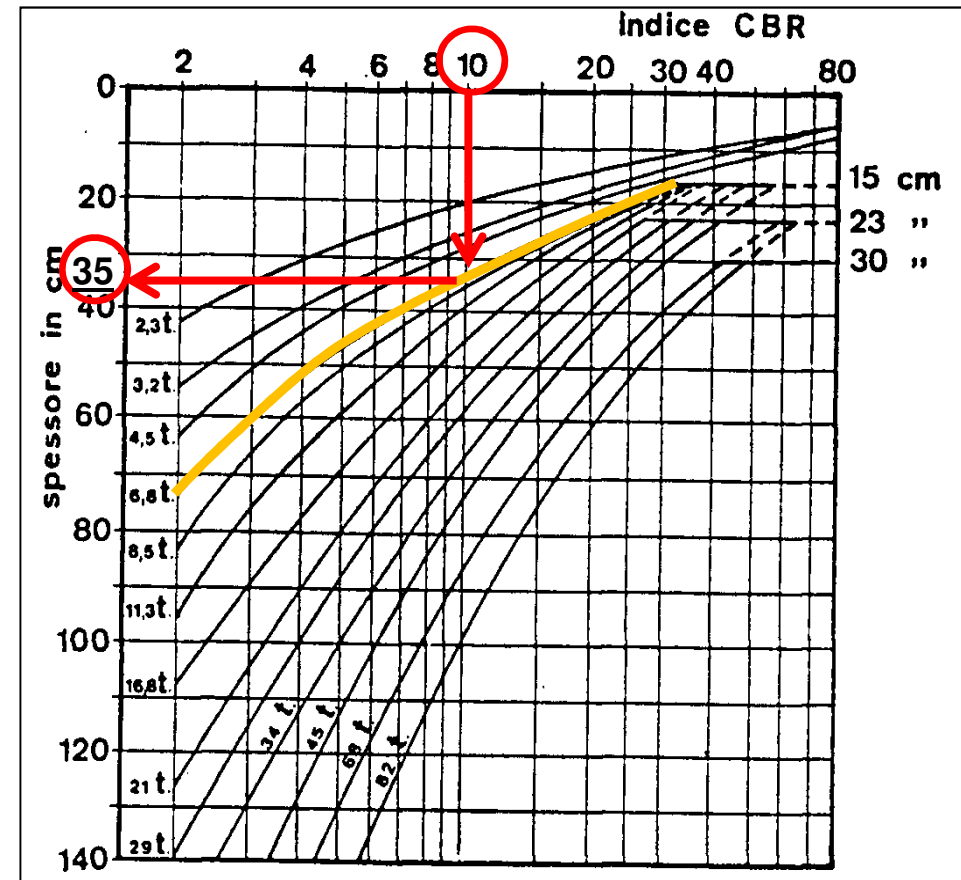
Queste prove hanno permesso di stabilire gli spessori minimi di pavimentazione per dati valori dell'indice C.B.R. dei terreni di sottofondo e per dati carichi. Dapprima si è costruita la curva per carichi di 3175 kg, poi per 5443 kg e in seguito le altre, ottenute con il calcolo e controllate con prove apposite. L'equazione di dette curve, essendo P il carico statico in tonnellate, è del tipo:

$$S = \frac{100 + 150 * \sqrt{P}}{CBR + 5}$$

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO CBR prima formulazione

Nella figura sono indicate le curve usate, valide per le seguenti ipotesi:

- pressione di gonfiaggio dei pneumatici pari a $4,2 \text{ kg/cm}^2$;
- piano di sottofondo compattato alla densità massima ed umidità ottima;
- presenza di drenaggi e mancanza di gelo;
- materiale costituente lo strato di fondazione avente indice C.B.R. >15 per carichi modesti e C.B.R. >30 per carichi elevati;
- materiale costituente lo strato di base con C.B.R. >40 o C.B.R. >80 rispettivamente per carichi per ruota minori o maggiori di 4500 kg.



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO CBR Road Research Laboratory

INTRODUCE nella formulazione C.B.R. per il calcolo dello spessore l'*INTENSITÀ DI TRAFFICO*.

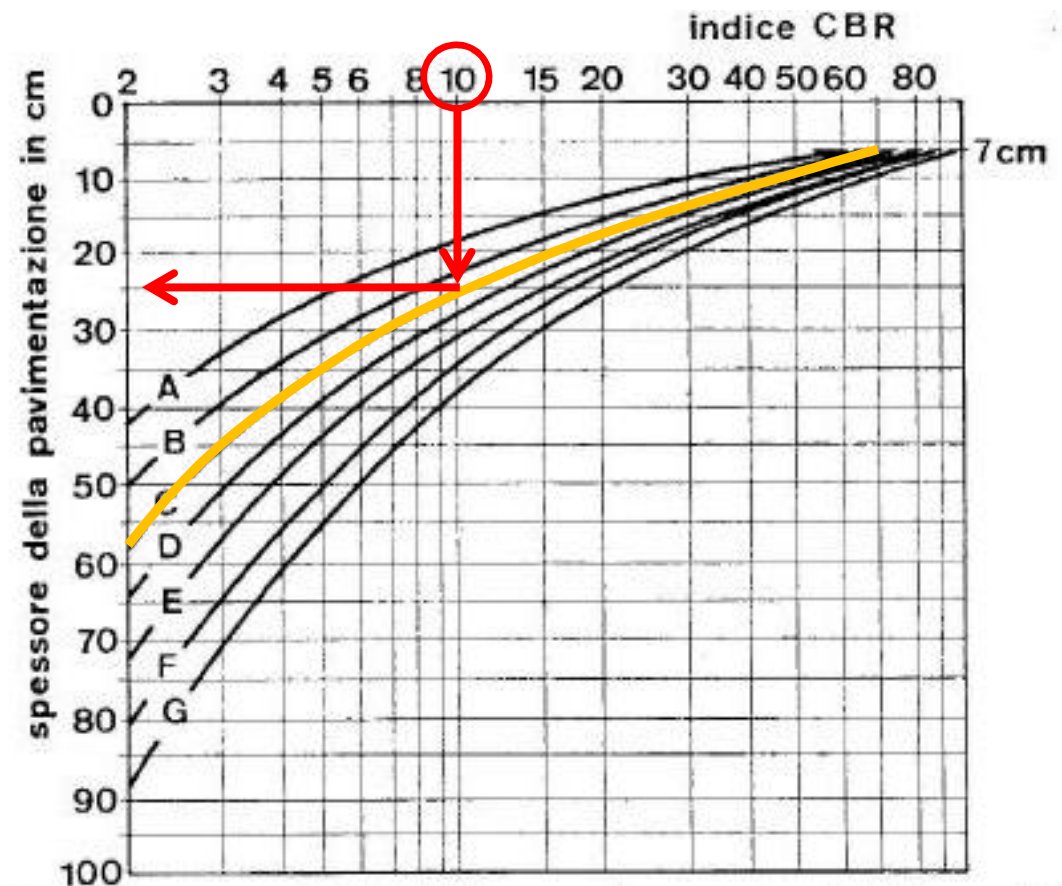
$$s = \frac{100 + (75 + 50 \cdot \log \frac{N}{10}) \cdot \sqrt{P}}{I + 5}$$

dove:

- s = spessore della pavimentazione in cm;
- N = numero medio giornaliero di autocarri con peso a vuoto superiore a 1500kg;
- P= carico massimo in t ammesso gravante su una ruota;
- I = indice C.B.R.

Traffici medi giornalieri di veicoli pesanti:

- classe A: 0-15
- classe B: 15 -45
- classe C: 45-150
- classe D: 150-450
- classe E: 450 -1500
- classe F: 1500- 4500
- classe G: oltre 4500



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO CBR

- KERKHOVEN E DORMON

lo spessore della pavimentazione viene calcolata attraverso la seguente espressione:

$$s = a \cdot \sqrt{\left[\frac{14,2 \cdot p}{I} \cdot (0,11 + 0,08 \cdot \log n) - 1 \right]}$$

dove:

a = raggio dell'area d'impronta, supposta circolare, in cm;

p = pressione del pneumatico sulla pavimentazione (kg/cm²);

n = numero di ripetizioni del carico.

- METODO CBR WYOMING

tale metodo tiene conto, mediante l'assegnazione di un punteggio, dei seguenti elementi:

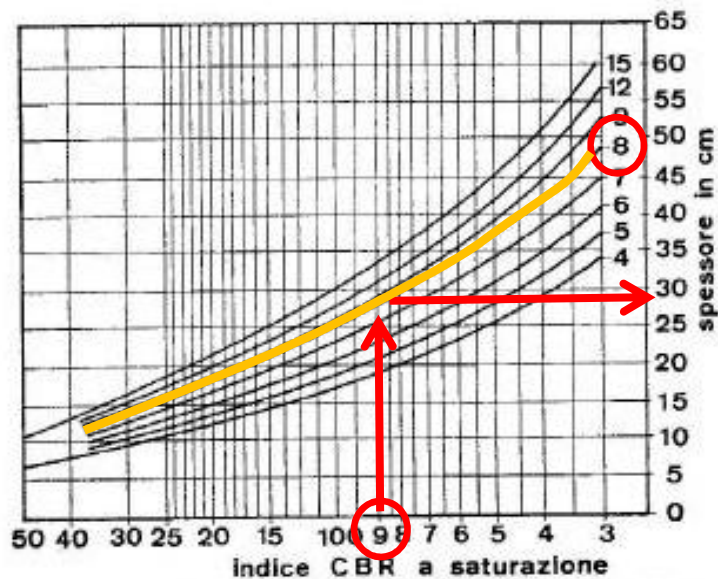
- ***precipitazione annua di pioggia***
- ***profondità della falda freatica a partire dal piano di sottofondo;***
- ***azione del gelo;***
- ***condizioni generali, come esistenza o meno di drenaggi;***
- ***traffico calcolato per un periodo di 20 anni.***

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO CBR - WYOMING

La somma dei punteggi assegnati indica la curva del diagramma da usare per la determinazione dello spessore.

Precipitazione annua (mm)	Punteggio	Profondità della falda dal piano di sottofondo (m)	Punteggio
130-250	0	Oltre 3	0
250-380	1	Da 1,80 a 3,0	1
380-510	3	Da 1,20 a 1,80	3
510-640	6	Da 0,60 a 1,20	5
640-1300	10	--	--
Azione del gelo	Punteggio	Condizioni gen. di drenaggio	Punteggio
Nessuna	0	Regolari	0
Leggera	1	Discrete	2
Media	3	Cattive	6
elevata	6	--	-

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO CBR - WYOMING



Traffico ridotto in carichi equivalenti a 5000 libbre per ruota (milioni)	Punteggio	Punteggio complessivo	Curva da usare
Da 0 a 1	0	0-2	4
1-2	2	3-6	5
2-3	4	7-11	6
3-5	6	12-17	7
5-7	9	18-24	8
7-9	12	25-32	9
9-11	15	33-41	12
11-13	18	42-53	15
13-15	21		
Oltre 15	24		

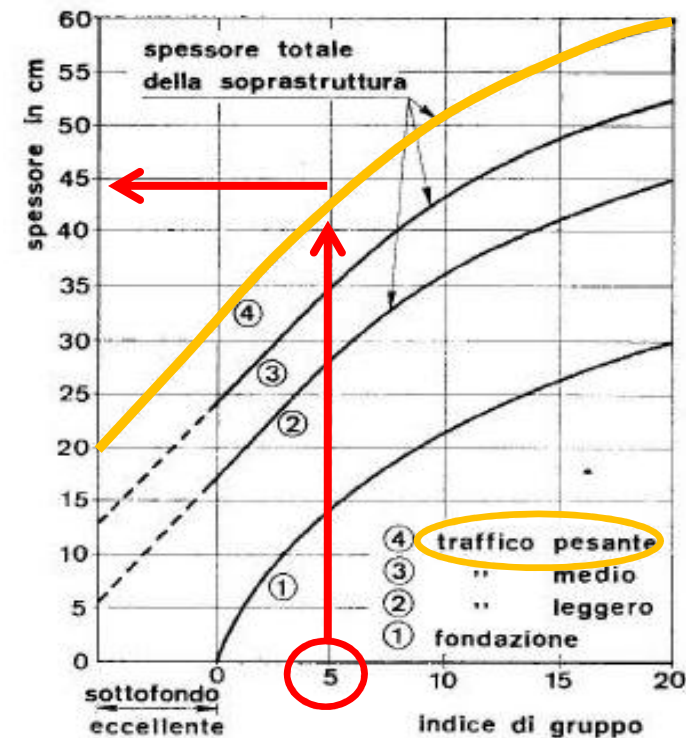
5000 LIBBRE = 22 kN circa

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO DELL'INDICE DI GRUPPO

È basato sulla determinazione dell'Indice di Gruppo (I.G.) del terreno che costituisce il sottofondo

Il calcolo dello spessore viene eseguito mediante diagrammi per traffico leggero, medio e pesante; il carico per ruota singola è di circa 4100 kg e si impongono le seguenti condizioni:

- *sottofondo compattato al 95% della densità massima A.A.S.H.T.O. standard;*
- *fondazione compattata al 100% della densità massima A.A.S.H.T.O. standard;*
- *piano di posa della pavimentazione sufficientemente sopra la falda freatica;*
- *terreno sufficientemente drenato.*



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – METODO DELL'INDICE DI GRUPPO

Lo spessore del solo strato di fondazione, si ricava dalla formula:

$$s = \frac{11}{4} \cdot IG - \frac{1}{16} \cdot IG^2$$

Lo spessore complessivo del manto stradale e dello strato di base si ricavano in base al traffico.

Quindi non si precisano le caratteristiche degli strati superiori alla fondazione.



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – ROAD NOTE 29

E' un metodo di progettazione delle pavimentazioni flessibili diretto, che, noto il numero di passaggi di assi da 8,2 t sulla corsia di progetto durante la vita utile, consente di calcolare dapprima lo spessore della fondazione in funzione dell'indice CBR del sottofondo, quindi lo spessore dello strato di base e di quelli superficiali.

1) Indice CBR del sottofondo

2) Numero di assi da 8,2 t



Spessore della Fondazione


3) Numero di assi da 8,2 t

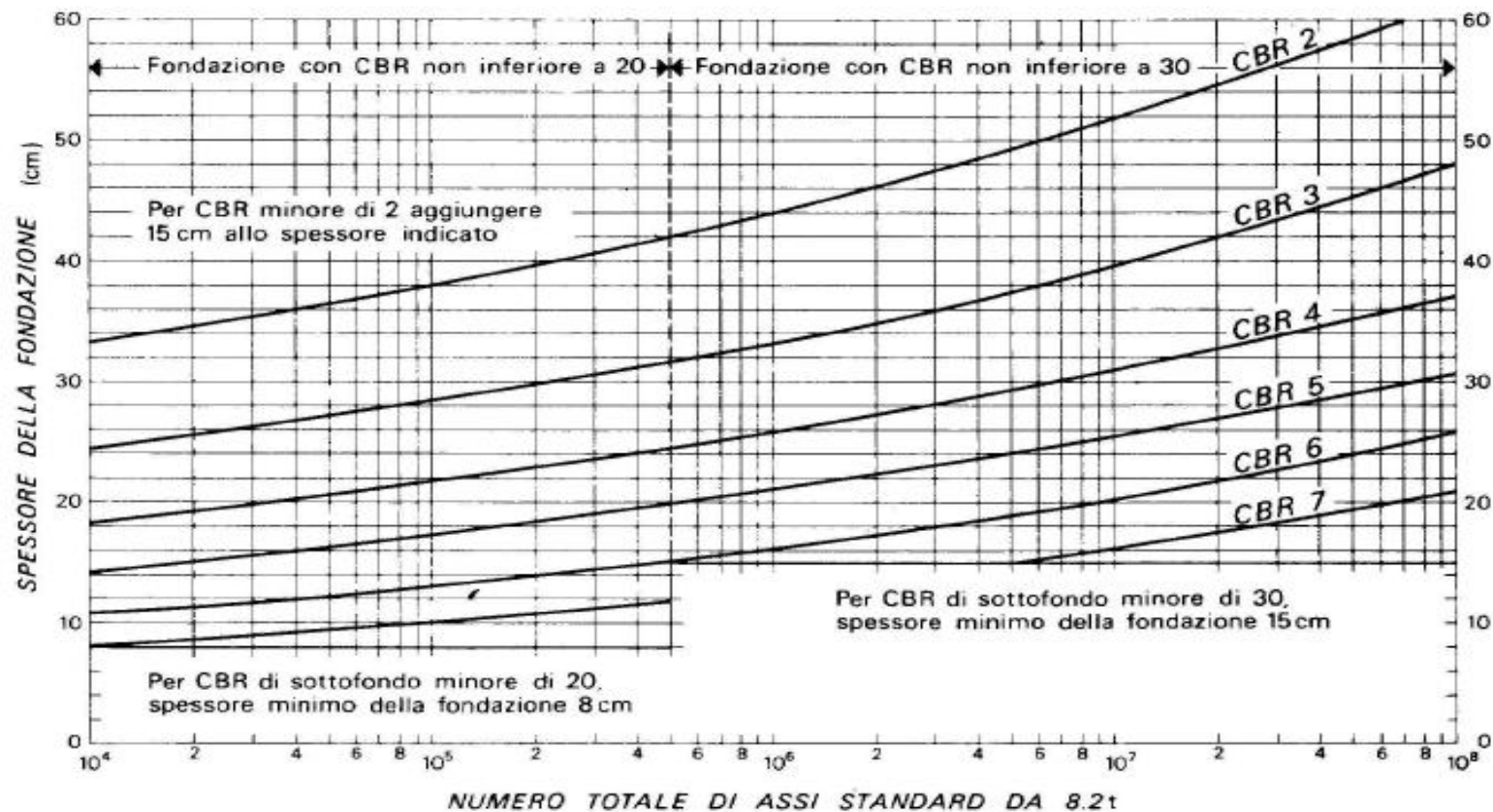


Spessore dello strato di base

Spessore dello strato di binder + usura

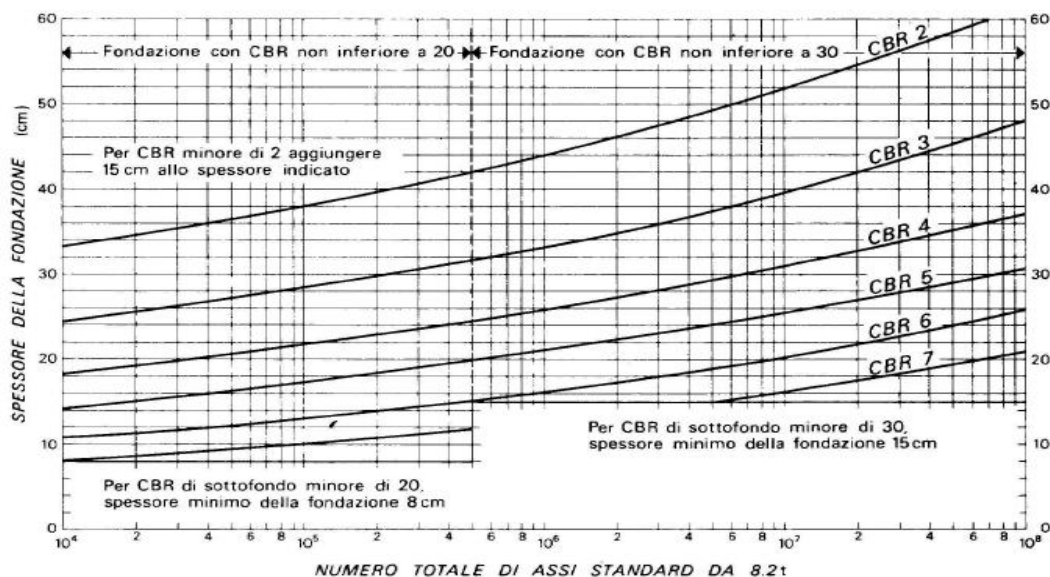
CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – ROAD NOTE 29

- 1) Indice CBR del sottofondo
 - 2) Numero di assi da 8,2 t
- 
 Spessore della Fondazione



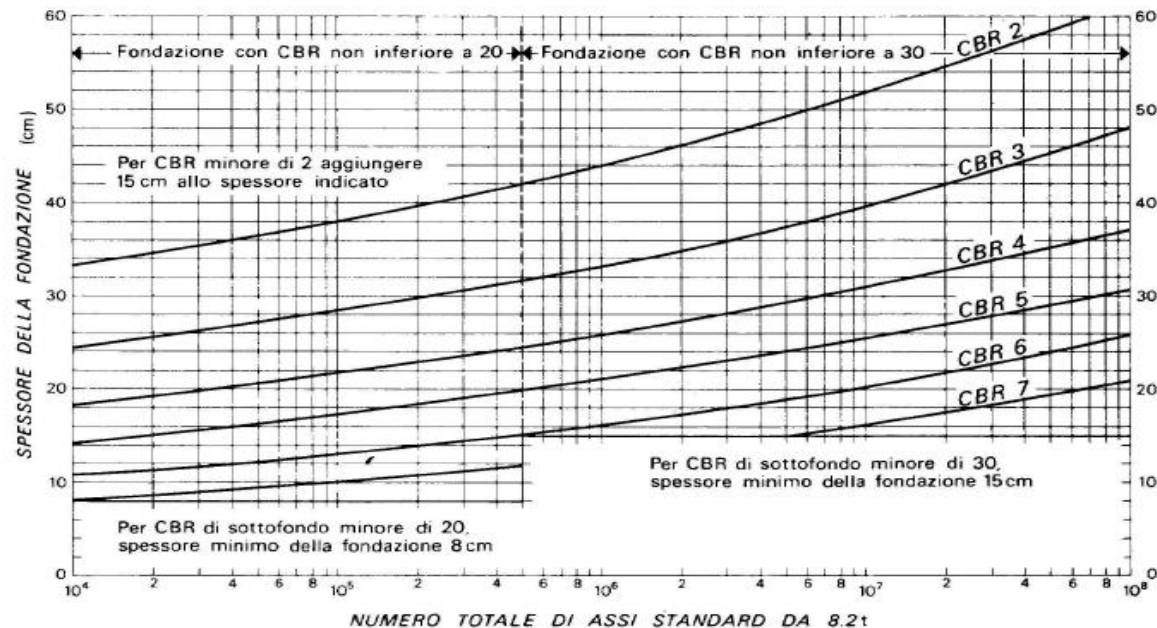
CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – ROAD NOTE 29

1. Per valori del CBR inferiori a 2 lo spessore della fondazione si ottiene aumentando di 15 cm quello ricavato dalla curva relativa al CBR = 2;
2. quando il CBR è superiore a 7 si adottano gli spessori che si ottengono dalla curva CBR = 7, con le seguenti prescrizioni:
 - se $N_{8,2} \leq 500.000$ e CBR < 20, lo spessore della fondazione non può scendere al di sotto di 8 cm;
 - e il $N_{8,2} > 500.000$ e CBR < 30 lo spessore della fondazione non può scendere al di sotto di 15 cm.



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – ROAD NOTE 29

Il metodo prescrive che il materiale costituente la fondazione deve avere indice CBR, misurato nelle condizioni di addensamento e di umidità che si realizzeranno effettivamente nello strato, non inferiore a 20 se il numero di passaggi di assi da 8,2 t previsto è inferiore a 500.000, e non inferiore a 30 se tale numero di passaggi supera 500.000.



METODO "ROAD NOTE 29"

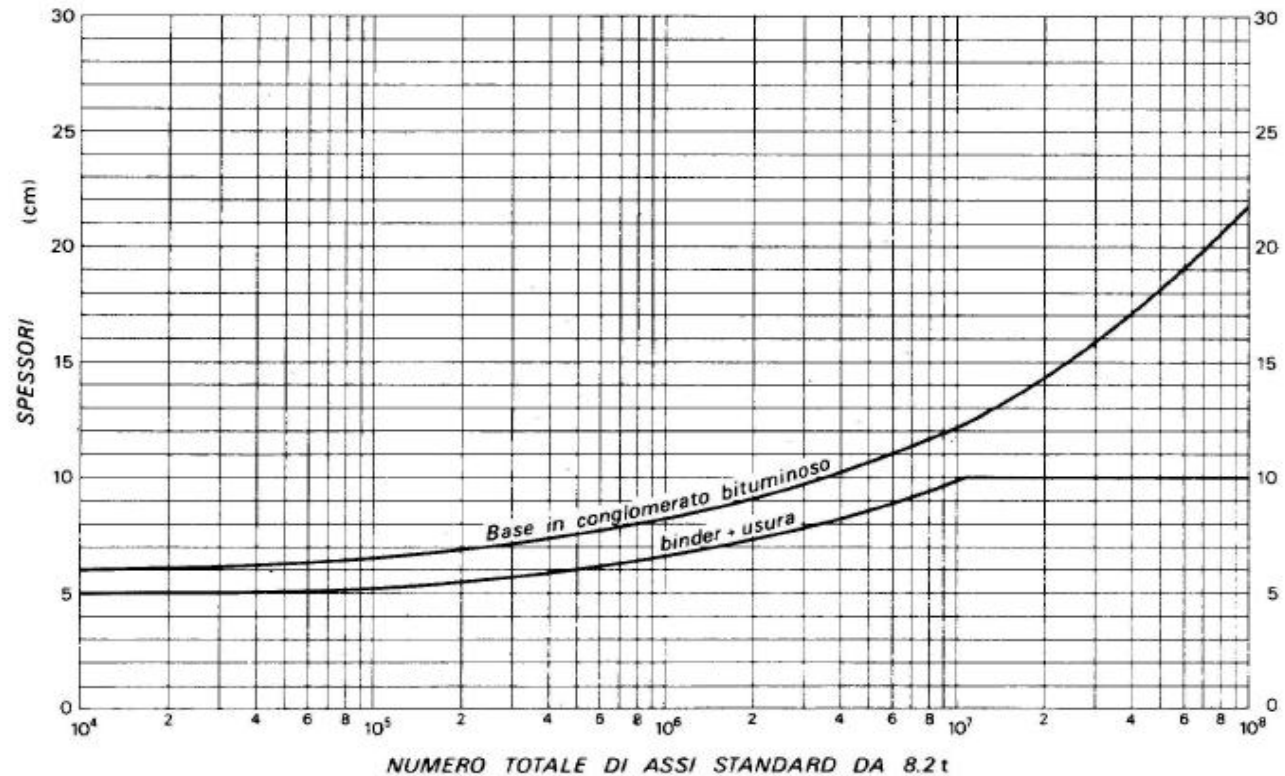
Sulla fondazione così progettata si deve prevedere uno strato di base ed uno superficiale (formato da un tappeto di usura e da uno strato di collegamento) di conglomerato bituminoso. Lo spessore di questi due strati si ricava, in funzione del numero di passaggi di assi da 8,2 t.

3) Numero di assi da 8,2 t



Spessore dello strato di base

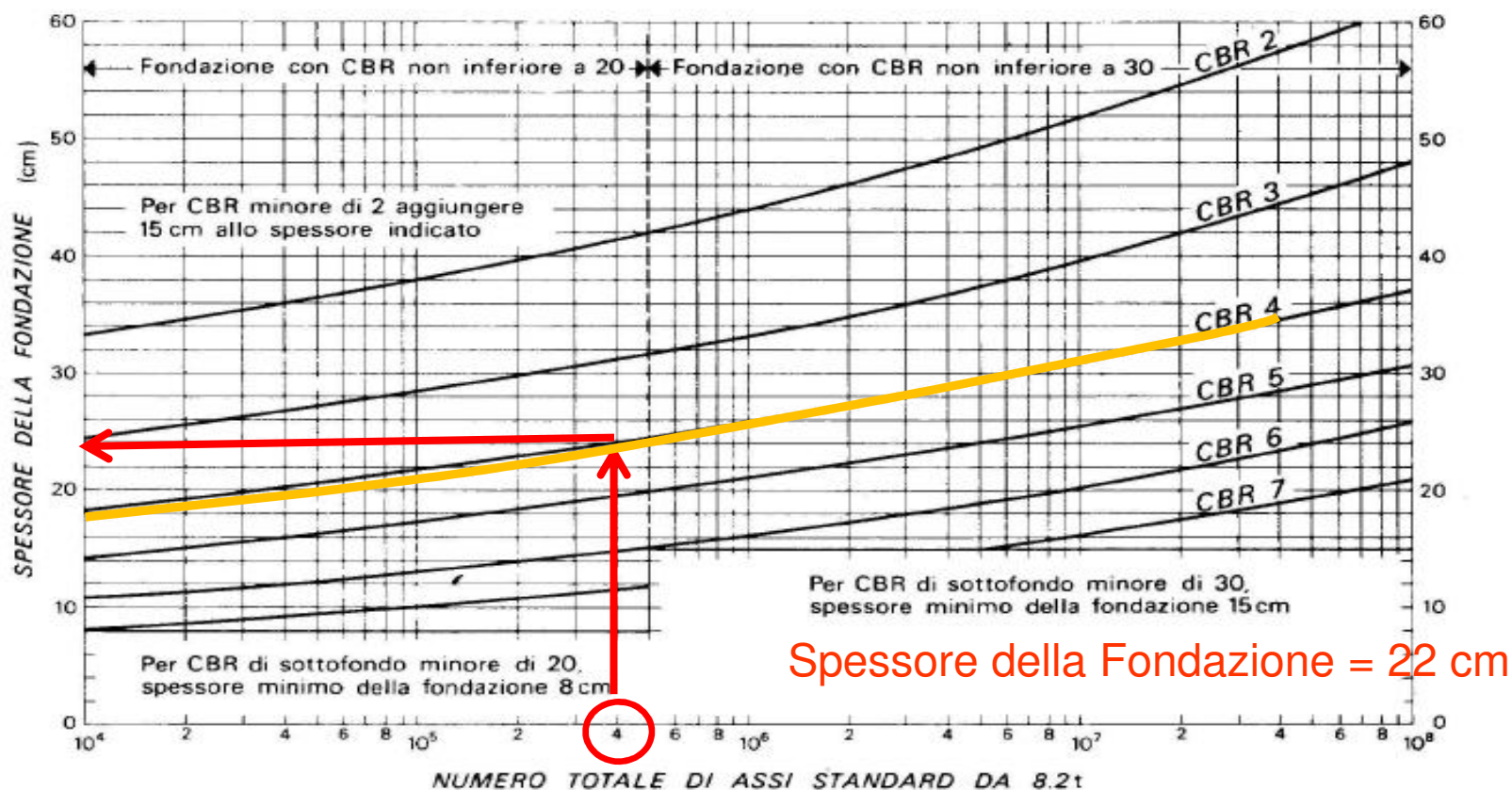
Spessore dello strato di binder + usura



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – ROAD NOTE 29

ESEMPIO

N E.S.A. $\cdot 81.6 \text{ kN}$ (vita utile = 20 anni) $\cong 4.2 \cdot 10^6$
sottofondo con C.B.R. = 4%



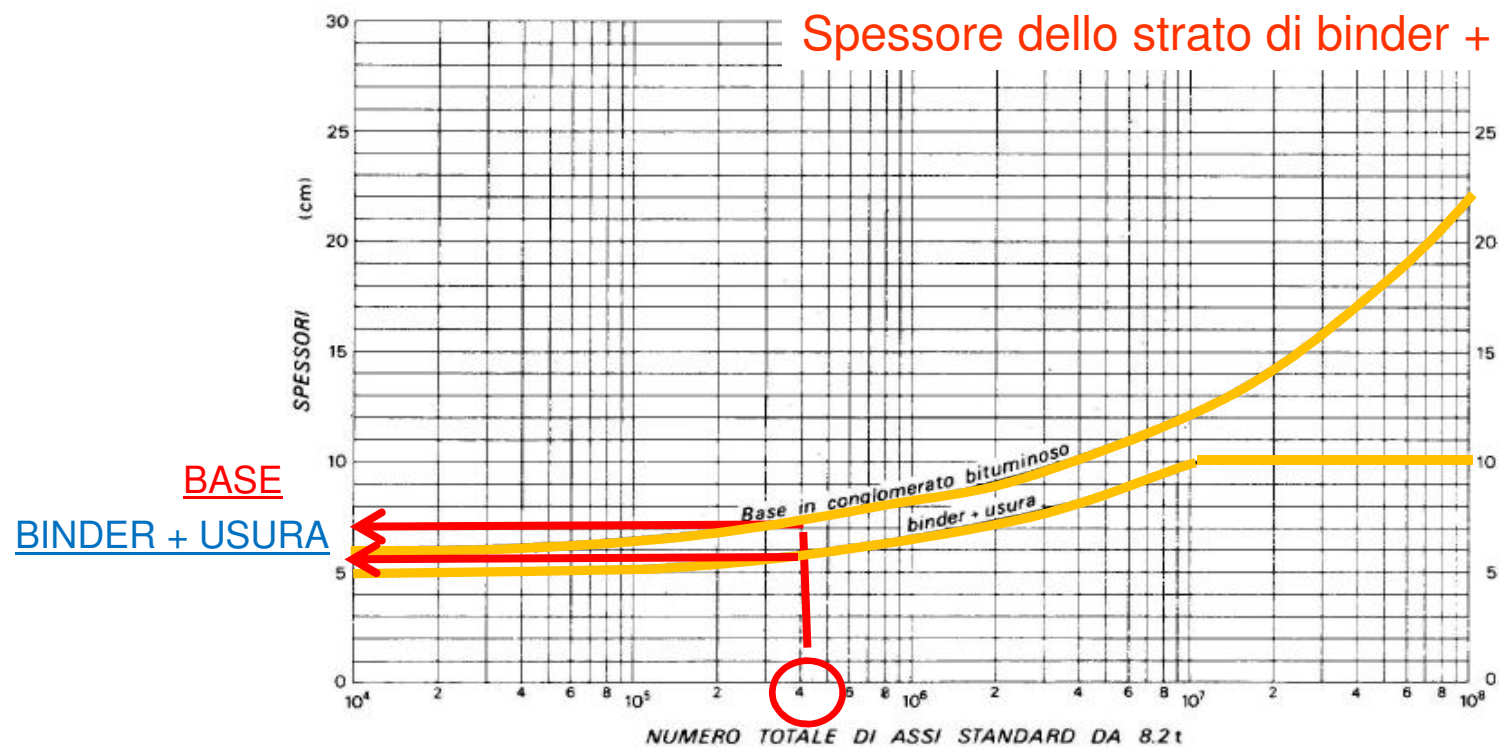
CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – ROAD NOTE 29

ESEMPIO

N E.S.A._{81.6 kN} (vita utile = 20 anni) $\cong 4.2 \cdot 10^6$
sottofondo con C.B.R. = 4%

Spessore dello strato di base = 7 cm

Spessore dello strato di binder + usura = 5 cm





CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – ROAD NOTE 29

ESEMPIO

N E.S.A._{81.6 kN} (vita utile = 20 anni) $\cong 4.2 \cdot 10^6$
sottofondo con C.B.R. = 4%

Pacchetto risultante:

Spessore dello strato di binder + usura = 5 cm

Spessore dello strato di base = 7 cm

Spessore della Fondazione = 22 cm

Spessore totale = 34 cm



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

Il metodo empirico AASHO Interim Guide permette di ricavare il numero totale di passaggi di assi standard da 8,2 t che una pavimentazione riesce a sopportare prima di raggiungere il valore del PSI (Present Serviceability Index) in corrispondenza del quale si ritengono necessari interventi di manutenzione strutturale poiché si ritiene che la pavimentazione sia al termine della sua vita utile.

$$\log N_{8.2} = 9.36 \log \left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right) - 0.20 + \frac{\log \left(\frac{4.20 - Pf}{2.70} \right)}{0.40 + \frac{1094}{\left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right)^{5.19}}} + 0.372 \cdot (S_i - S_o) - \log R$$

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

Si ipotizza un tipo di sovrastruttura definendo il numero e lo spessore degli strati, nonché i materiali impiegati, e si verifica se il numero di passaggi di assi da 8,2 t ad essa corrispondente è \geq di quello del traffico previsto sulla sovrastruttura in esame durante la sua vita utile (traffico cumulato).

$$\log N_{8.2} = 9.36 \log \left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right) - 0.20 + \frac{\log \left(\frac{4.20 - Pf}{2.70} \right)}{0.40 + \frac{1094}{\left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right)^{5.19}}} + 0.372 \cdot (S_i - S_o) - \log R \geq N_{ESA-81.6kN} = EF_{TOT} \cdot TGM$$

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

La relazione è composta da tre parti:

$$\log N_{8.2} = \underbrace{9.36 \log\left(\frac{I_s}{2.50} + 1\right) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{4.20 - Pf}{2.70}\right)}{0.40 + \frac{1094}{\left(\frac{I_s}{2.50} + 1\right)^{5.19}}}}_A \underbrace{- 0.372 \cdot (S_i - S_0)}_B \underbrace{\cdot \log R}_C$$

- A fornisce il numero di passaggi di un asse standard da 82 kN nell'arco di tempo legato alla variazione di efficienza per degrado sulla base di dati standard derivanti dalla sperimentazione AASHO - road test
- B è una correzione derivante dalle caratteristiche di portanza del sottofondo
- C è una correzione dovuta alle caratteristiche ambientali

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

La parte A dipende da:

- Present Serviceability Index (Pf o PSI);
- Indice di spessore (Is).

Il **PSI** è un indice compreso tra 0 e 5 che permette di definire il livello di ammaloramento di una pavimentazione stradale e può essere determinato con una delle seguenti relazioni:

$$\rightarrow \text{PSI} = 5,03 - 1,91 \cdot \log(1 + \text{SV}) - 0,01 \cdot (\text{C} + \text{P})^{1/2} - 1,38 \cdot \text{RD}$$

PARAMETRI DI INPUT	SCALA DI VALUTAZIONE
<p><i>Slope Variance (SV)</i>: varianza delle pendenze del profilo longitudinale; <i>Rut Depth (RD)</i>: profondità media delle ormaie; <i>(P)</i>: area buche e rappezzi; <i>(C)</i>: area fessurata.</p>	<p>0 ÷ 5</p> <p>Pessime condizioni Ottime condizioni</p>

$$\rightarrow \text{IRI} = 5.50 \ln(5 / \text{PSI})$$

$$0 < \text{PSI} < 5$$

$$\text{PSI (INIZIALE)} = 4,20$$

$$\text{PSI (FINALE)} = 1,50 \div 2,50$$

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

L'indice di spessore (I_s) si valuta noti gli spessori della pavimentazione:

$$I_s = \sum_1^n k_i \cdot h_i$$

k_i = coefficiente di
equivalenza del materiale

h_i = spessore dello strato
dei materiali (cm)

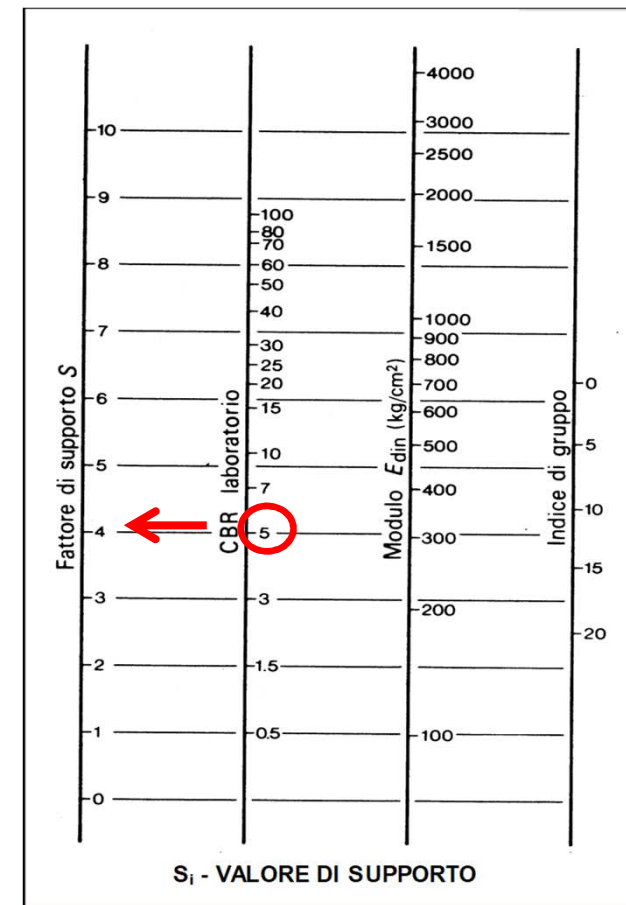
COEFFICIENTI DI EQUIVALENZA E CARATTERISTICHE DI MATERIALI PER PAVIMENTAZIONI STRADALI FLESSIBILI.					
Strato	Materiale	Stabilità Marshall kg	Rottura a 7 giorni kg/cm ²	C B R %	Coeffi- ciente di equiva- lenza
Superficiale	Conglomerato bituminoso	1000			0,45
	» »	950			0,44
	» »	770			0,40
	» »	650			0,37
	» »	410			0,30
	Malta bituminosa	770			0,40
	» »	580			0,35
	Pietrischetto bitumato	140			0,20
Base	Misto bitumato	770			0,33
	» »	670			0,30
	» »	550			0,27
	» »	410			0,24
	Stabilizzato a bitume	270			0,20
	» »	180			0,18
	» »	140			0,16
	Misto cementato		46		0,23
	» »		32		0,20
	Stabilizzato a cemento		21		0,15
	Stabilizzato a calce		13		0,12
	Misto frantumato			110	0,14
	» »			90	0,13
Misto granulare			70	0,12	
» »			50	0,10	
Fondazione	Misto frantumato			90	0,14
	Misto granulare			70	0,13
	» »			50	0,12
	» »			30	0,11
	Stabilizzato naturale			20	0,10
	» »			10	0,075
	» »			5	0,05

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

La parte B, che tiene conto delle caratteristiche di portanza del sottofondo, dipende dal valore dei due termini S_i ed S_0 .

$S_0 = 3$ definito tramite una sperimentazione AASHO ROAD TEST

S_i può essere definito attraverso correlazioni empiriche con il CBR, il modulo di resiliente e l'indice di gruppo del sottofondo



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

La parte C, che tiene conto dell'influenza dei fattori climatici, dipende dal valore di R.

R - FATTORE CLIMATICO

- R 0,50-0,80 zone aride con elevate temperature, prevalentemente asciutto.
- R 0,50-1,00 zone fredde con temperature inferiori a 0°C - condizioni di "*permafrost*"
- R 1,00-1,50 zone con clima asciutto ma con piogge frequenti.
- R 3,00-4,00 zone umide con accentuati fenomeni di disgelo primaverile.

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE



Si calcola:

$$\log N_{8.2} = 9.36 \log \left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right) - 0.20 + \frac{\log \left(\frac{4.20 - Pf}{2.70} \right)}{0.40 + \frac{1094}{\left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right)^{5.19}}} + 0.372 \cdot (S_i - S_o) - \log R$$

Si conosce: $N_{ESA \cdot 81.6kN} = EF_{TOT} \cdot TGM$

Si verifica:

$$\log N_{8.2} = 9.36 \log \left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right) - 0.20 + \frac{\log \left(\frac{4.20 - Pf}{2.70} \right)}{0.40 + \frac{1094}{\left(\frac{I_s}{2.50} + 1 \right)^{5.19}}} + 0.372 \cdot (S_i - S_o) - \log R \geq N_{ESA \cdot 81.6kN}$$

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

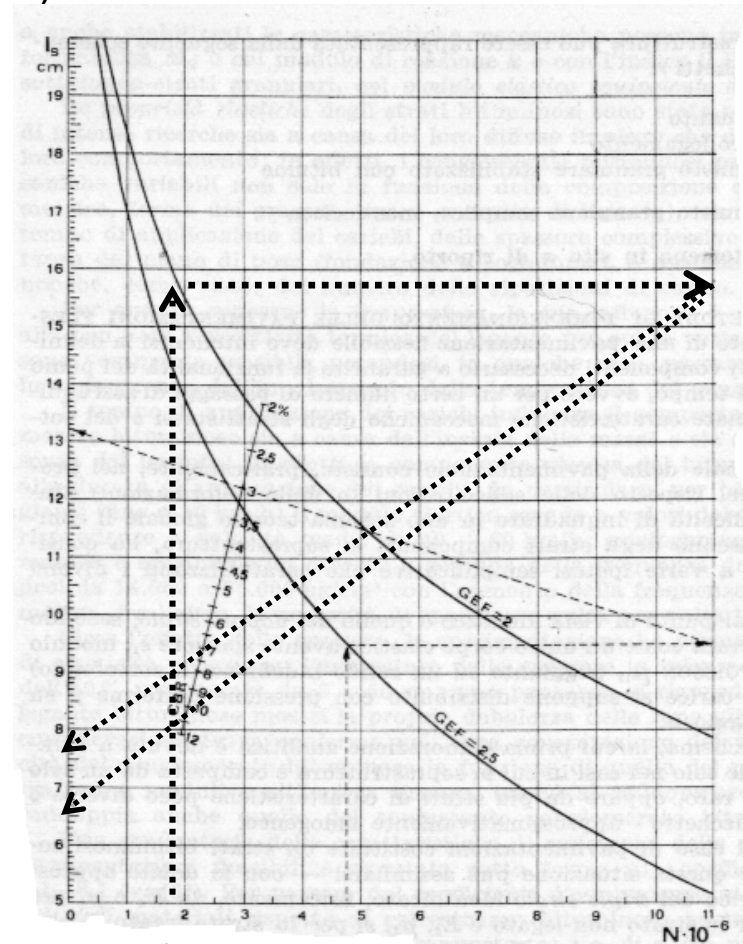
Altrimenti:

- Si ipotizza un tipo di sovrastruttura definendo il numero e lo spessore degli strati, nonché i materiali impiegati;
- Se ne valuta l'indice di spessore (I_s disponibile);
- Si determina da appositi grafici l'indice di spessore_richiesto;
- Si verifica che l'indice di spessore disponibile sia \geq di quello richiesto.

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

L'indice di spessore si valuta in funzione di:

- N E.S.A. 100 kN (vita utile = 20 anni)
- C.B.R del sottofondo
- PSI finale a 20 anni (GEF)



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

ESEMPIO

Usura in cb = 3 cm

Binder in cb = 9 cm

Fondazione in stabilizzato = 30 cm

$$IS = 0.4 \times (3 + 9) + 0.10 \times 30$$

$$= 7.80$$

COEFFICIENTI DI EQUIVALENZA E CARATTERISTICHE DI MATERIALI PER PAVIMENTAZIONI STRADALI FLESSIBILI.					
Strato	Materiale	Stabilità Marshall kg	Rottura a 7 giorni kg/cm ²	C B R %	Coeffi- ciente di equiva- lenza
Superficiale	Conglomerato bituminoso	1000			0,45
	» »	950			0,44
	» »	770			0,40
	» »	650			0,37
	» »	410			0,30
	Malta bituminosa	770			0,40
	» »	580			0,35
	Pietrischetto bitumato	140			0,20
Base	Misto bitumato	770			0,33
	» »	670			0,30
	» »	550			0,27
	» »	410			0,24
	Stabilizzato a bitume	270			0,20
	» »	180			0,18
	» »	140			0,16
	Misto cementato		46		0,23
	» »		32		0,20
	Stabilizzato a cemento		21		0,15
	Stabilizzato a calce		13		0,12
	Misto frantumato			110	0,14
	» »			90	0,13
	Misto granulare			70	0,12
» »			50	0,10	
Fondazione	Misto frantumato			90	0,14
	Misto granulare			70	0,13
	» »			50	0,12
	» »			30	0,11
	Stabilizzato naturale			20	0,10
	» »			10	0,075
» »			5	0,05	

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI SEMIEMPIRICI – AASHO INTERIM GUIDE

ESEMPIO

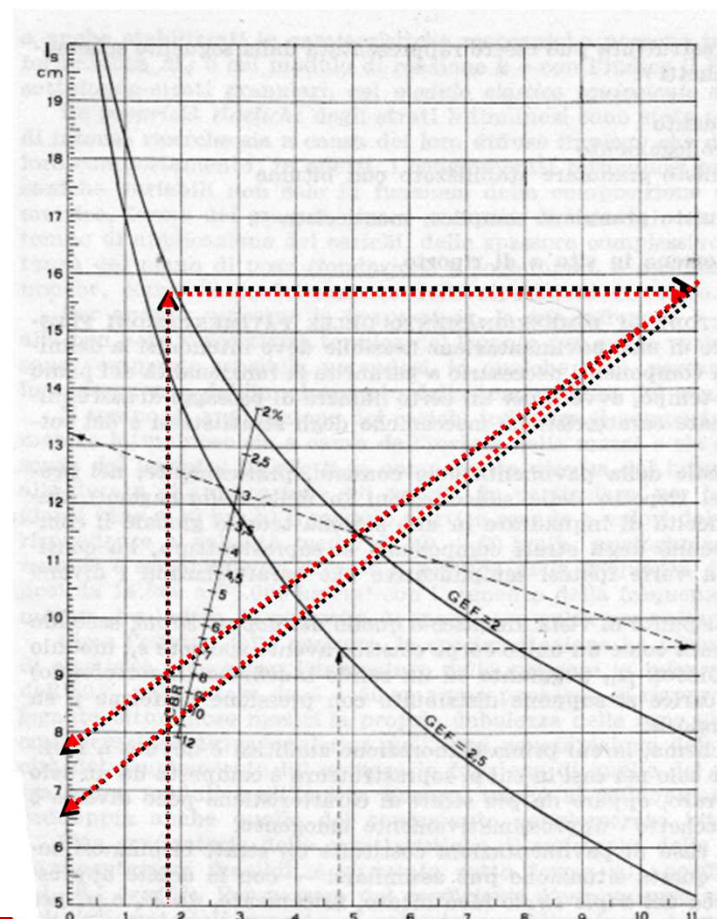
N E.S.A._{81.6 kN} (vita utile = 20 anni) $\cong 1.75 \cdot 10^6$

P.S.I. finale (t=20 anni) = 2

sottofondo con C.B.R. $\cong 7\% \div 10\%$

$$6.6 < I_s < 7.6$$

I_s disponibile pari a $7.8 > 7.6$
la verifica è soddisfatta



CATALOGO DELLE PAVIMENTAZIONI

Un ausilio alla progettazione delle nuova sovrastrutture stradali è fornito anche dai **cataloghi delle pavimentazioni** che suggeriscono un ventaglio di soluzioni progettuali in funzione di un numero limitato di parametri iniziali.

Il Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali è uno strumento d'uso immediato ed i dati di ingresso necessari alla scelta progettuale ottimale sono:

LA TIPOLOGIA DELLA STRADA in riferimento alla classificazione funzionale del codice della strada



PORTANZA DEL SOTTOFONDO definiti come Modulo Resiliente (Mr) del terreno (Mr = 10 CBR)



ENTITA' DEL TRAFFICO PESANTE numero complessivo di passaggi di veicoli pesanti (traffico cumulato)



CATALOGO DELLE PAVIMENTAZIONI

**AUTOSTRADE URBANE
CLASSE A - TIPO 2**

PAVIMENTAZIONE SEMI RIGIDA	CONGLOMERATO DI TIPO TRADIZIONALE		
	INTENSITA' DEL TRAFFICO IN NUMERO DI PASSAGGI		
modulo resiliente del sottofondo	4.000.000	10.000.000	25.000.000
150 N/mm ²			
90 N/mm ²			
30 N/mm ²	SOTTOFONDO NON ADEGUATO AL TIPO ED ENTITA' DEL TRAFFICO (prevedere bonifica)		
	strato di usura C.B.		misto cementato
	strato di collegamento in C.B.	-	-
	strato di base in C.B.	-	n.b. gli spessori sono indicati in cm

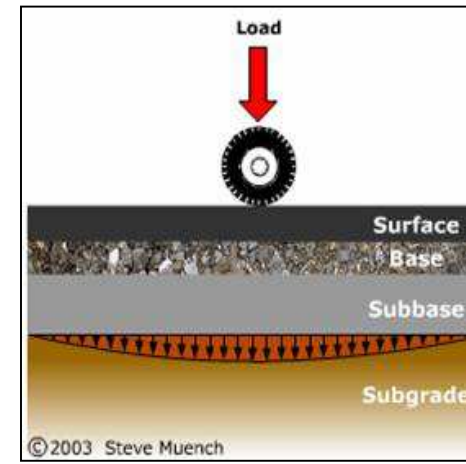
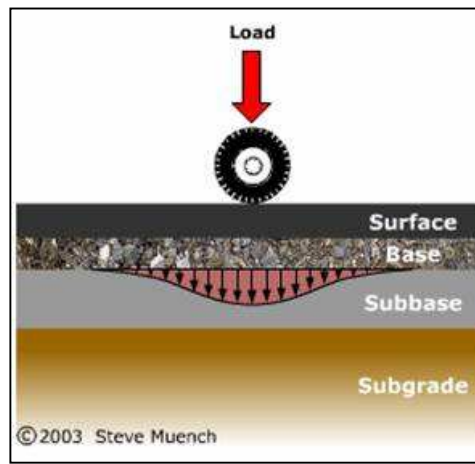
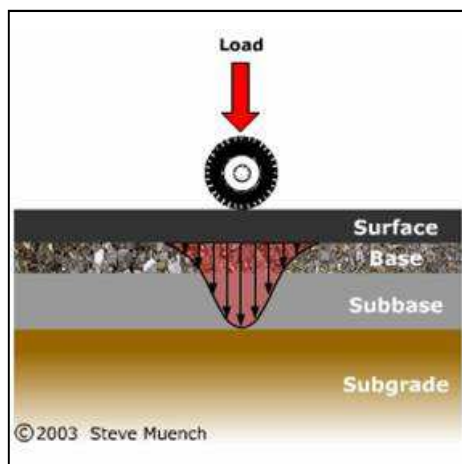
**STRADE URBANE DI QUARTIERE
LOCALI CLASSE E - TIPO 7**

PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE	CONGLOMERATO DI TIPO TRADIZIONALE CON BITUME MODIFICATO		
	INTENSITA' DEL TRAFFICO IN NUMERO DI PASSAGGI		
modulo resiliente del sottofondo	400.000	1.500.000	4.000.000
150 N/mm ²			
90 N/mm ²			
30 N/mm ²			
	strato di usura C.B. modificato		misto granulare non legato
	strato di colleg. in C.B. modificato	-	-
	strato di base in C.B. modificato	-	n.b. gli spessori sono indicati in cm.

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

METODI RAZIONALI: sono attualmente i più diffusi al mondo!

PRINCIPIO: studiano gli stati tenso-deformativi della sovrastruttura conoscendo le caratteristiche meccaniche dei materiali di ciascuno strato





CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

Modelli numerici (BISAR, WinJULEA, etc.): permettono di calcolare tensioni, deformazioni e spostamenti di un punto qualsiasi di un multistrato elastico soggetto a carichi circolari in superficie!

Sovrastruttura stradale = multistrato elastico appoggiato su un semispazio elastico (sottofondo o rilevato)

Occorre attribuire i parametri elastici agli strati: E e ν



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

IPOSTESI

- gli strati hanno spessore uniforme su tutta la larghezza;
- gli strati hanno dimensione illimitata nel piano orizzontale e spessore finito, ad eccezione del sottofondo che ha anche spessore illimitato;
- nell'ambito di ogni strato il materiale é omogeneo isotropo e perfettamente elastico ed é quindi caratterizzato dalle costanti E (modulo elastico di Young) e ν (coefficiente di Poisson);
- non vi é possibilità di scorrimento sui piani orizzontali fra i vari strati (perfetta aderenza).



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

PROCEDURA DI CALCOLO

Definita la composizione del multistrato e dimensionati gli spessori della sovrastruttura stradale, si procede al calcolo dello stato tensionale e deformativo sotto determinate condizioni di carico, per valutare le prestazioni della sovrastruttura ed eventualmente adeguarne gli spessori.

Si determina quindi il numero massimo di ripetizioni ammissibili attraverso l'utilizzo delle **leggi di fatica** caratteristiche per il sottofondo e per gli strati in conglomerato bituminoso.

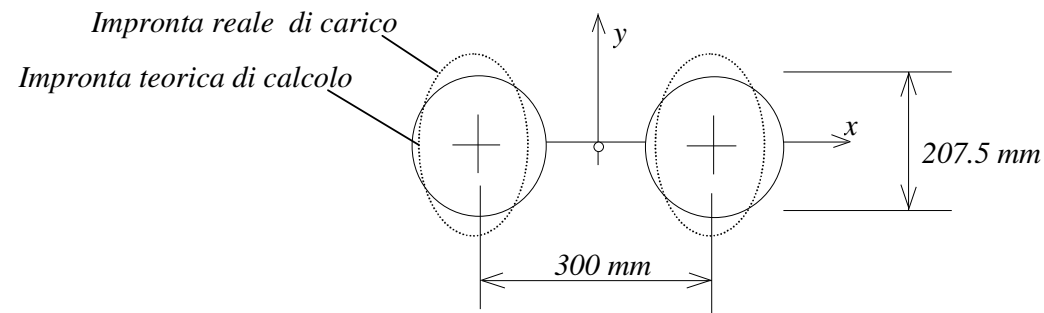
Legge di fatica: noto il livello deformativo della sovrastruttura, permette la quantificazione del numero di ripetizioni di carico che provoca il collasso della sovrastruttura.

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

INPUT DI CARICO

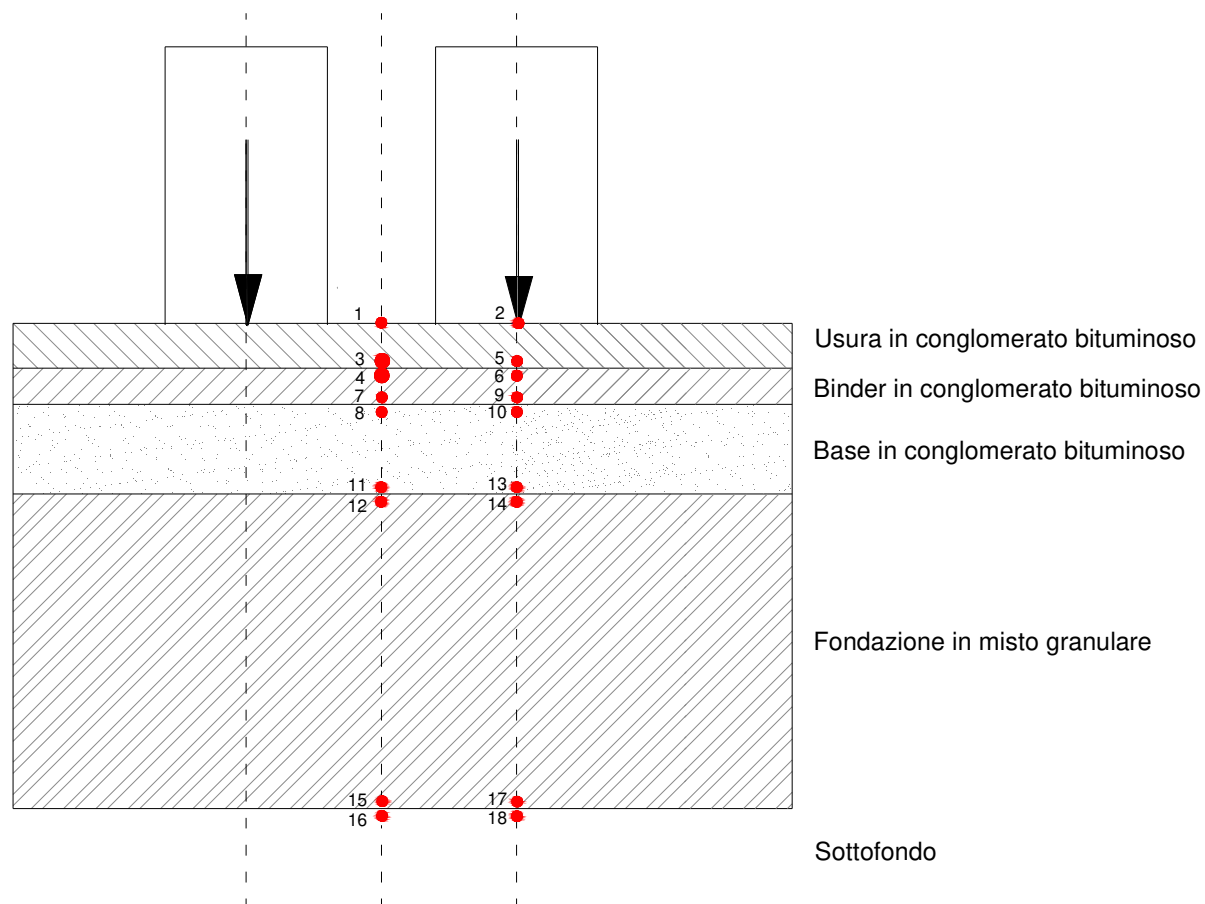
Il multistrato è sottoposto ai carichi verticali trasmessi dalle ruote dei veicoli, che si assumono uniformemente distribuiti su superfici circolari, con pressione pari a quella di gonfiaggio dei pneumatici.

- a) Carico asse = 120 kN
- b) Carico sulla singola coppia di ruote gemellate = 60 kN
- c) Carico su ogni ruota = 30 kN
- d) Pressione di gonfiaggio = 0.70-0.80 MPa



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

PUNTI DI VERIFICA



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

VERIFICA A FATICA:

La verifica a fatica prevede i seguenti passi:

1. valutazione, in asse alla coppia di ruote gemellate, delle tensioni in sommità del sottofondo e determinazione della tensione ammissibile per N_{ESA} passaggi di un asse da 120 kN mediante l'espressione di *Kerhoven* e *Dormon*, secondo la quale la massima sollecitazione verticale (σ) ammessa sul sottofondo é legata al numero di ripetizioni del carico (N) ed al modulo del sottofondo (E_0) dalla formula:

$$\sigma = \frac{0.006 \cdot E_0}{1 + 0.7 \cdot \log N}$$

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

VERIFICA A FATICA:

2. valutazione, in asse alla coppia di ruote gemellate, della deformazione specifica verticale alla sommità del sottofondo (ε_{zz}), al fine di valutare il numero di ripetizioni di carico possibili nello stesso mediante le relazioni sperimentali riportate nel manuale Shell:

$$\varepsilon_{zz}(85\%) = 0.021 \cdot N^{-0.25}$$

$$\varepsilon_{zz}(95\%) = 0.018 \cdot N^{-0.25}$$

La verifica si esegue utilizzando la seconda espressione, corrispondente al 95° percentile, e, se soddisfatta, significa che il livello tensionale presente nel sottofondo consente di escludere che durante la vita utile della sovrastruttura si manifestino delle deformazioni permanenti tali da comprometterne la funzionalità;

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

VERIFICA A FATICA:

3. calcolo delle deformazioni in direzione orizzontale alla base degli strati in conglomerato bituminoso e determinazione mediante la legge di Verstraeten del numero di passaggi di carico ammessi, utilizzando la massima deformazione ottenuta. La legge che si utilizza è del tipo:

$$\varepsilon_N = A \cdot N^{-\alpha}$$

essendo:

A la deformazione per $N = 1$ ($50 \cdot 10^{-4}$);

α un coefficiente sperimentale compreso tra 0.20 e 0.25. Si considera in seguito il valore suggerito dalla Società AUTOSTRADE: $\alpha = 0.234$;

ε_N la deformazione specifica massima in direzione radiale ammessa per N cicli di carico, espressa in forma analitica mediante la relazione:

$$\varepsilon_N = \max \left\{ \varepsilon_{xx}^A, \varepsilon_{yy}^A, \varepsilon_{xx}^B, \varepsilon_{yy}^B \right\}$$

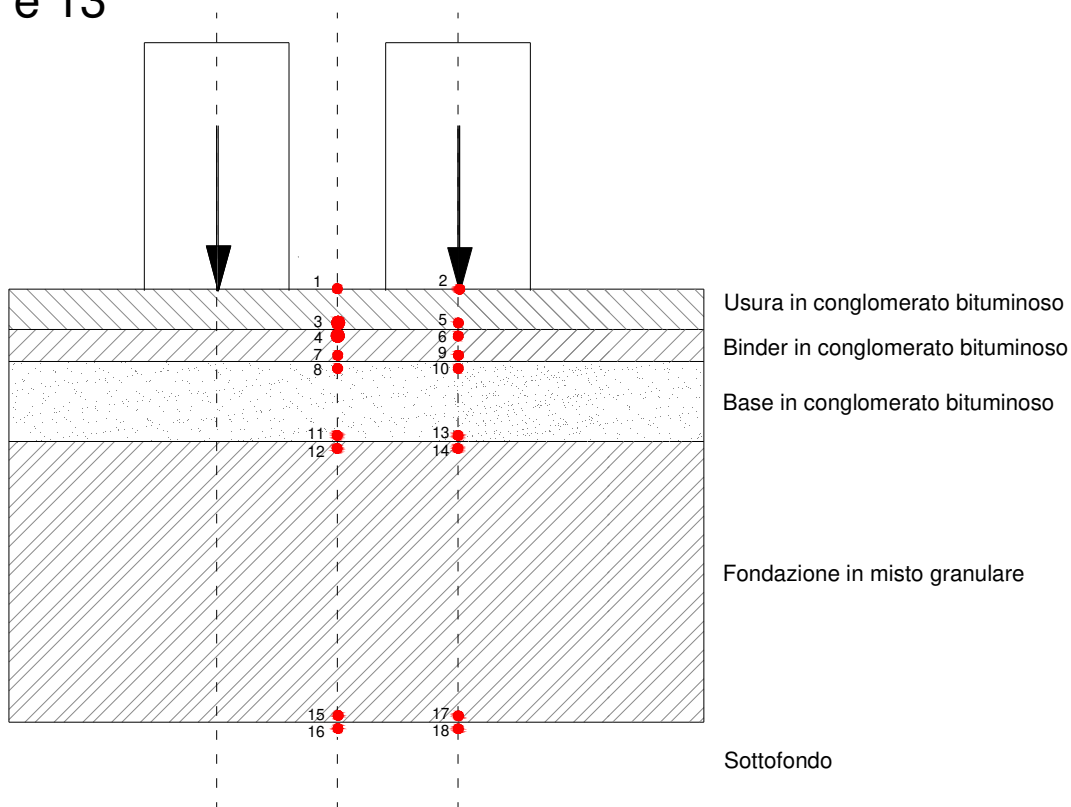
CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

VERIFICA A FATICA:

verifica n. 1: punti 15 e 16

verifica n. 2: punti 15 e 16

verifica n. 3: punti 11 e 13



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO: METODI RAZIONALI

VERIFICA A FATICA:

La verifica è soddisfatta se:

$$\text{verifica n. 1: } \sigma_{zz}^{15,16} \leq \frac{0.006 \cdot E_0}{1 + 0.7 \cdot \log N}$$

$$\text{verifica n. 2: } \varepsilon_{zz}^{15,16} \leq 0.018 \cdot N^{-0.25}$$

$$\text{verifica n. 3: } \max \left\{ \varepsilon_{xx}^{11}, \varepsilon_{yy}^{11}, \varepsilon_{xx}^{13}, \varepsilon_{yy}^{13} \right\} \leq A \cdot N^{-\alpha}$$

