

lavoro

**Prolungamento di Via Franklin
tra SP72 Parma-Mezzani
e SP62R della Cisa**

fase
progettuale

**PROGETTO DI FATTIBILITA'
TECNICO - ECONOMICA**

elaborato

**RELAZIONE VERIFICA
PACCHETTO STRADALE**

progettisti

DOTT. ING. MARCO PEDRINI
Via Pelacani 5 - Parma
mail info@pedrinistudio.it
tel. 0521 499309

DOTT. ING. MARCO PETROLINI
via Sandro Pertini 12/a - Parma
mail info@petrolinistudio.it
tel. 0521 463882

DOTT. ING. CRISTIAN BOTTI
Via Pizzolese 2 - Parma
mail cristianbotti@gmail.com
tel. 0521 1581838

**DOTT. ING. Iunior MATTEO CHIONNA
CASTELLI GADOLINI**
Strada Due Castagne 33 – Parma
mail mchionna87@gmail.com
tel. 345 9000716

Prima emissione

SETTEMBRE 2024

revisioni

data

oggetto

Giugno
2025

Aggiornamento C.d.S.

Seconda emissione

SETTEMBRE 2025

Dimensione

A4

Elaborato n°

B.13



1. PREMESSA

1.A MIGLIORAMENTO DEL PACCHETTO DI PAVIMENTAZIONE E DI FONDAZIONE STRADALE

La presente relazione ha come oggetto la verifica della pavimentazione prevista nell'ambito del Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica del tracciato stradale di prolungamento di Via Franklin tra SP 72 Parma-Mezzani ed SP62R della Cisa.

La sezione stradale del tracciato principale corrisponde ad una strada Extraurbana Locale tipo F2 (secondo il D.M N. 6792 del 5/11/2001 – “Norme funzionali e geometriche per la costruzione di Strade”), composta da singola carreggiata con una corsia per senso di marcia di larghezza pari a 325cm cadauna, banchina pavimentata di 1m di ampiezza per una larghezza complessiva di piattaforma pari a 850cm.

La caratterizzazione geologica del sito di intervento è stata ricavata dalla Relazione Geologica allegata al PFTE, a firma del Dott. Geol Luca Calzolari (Ord. Geol. RER n.899), in cui si definiscono due orizzonti stratigrafici:

- **ORIZZONTE A** considerato come litologicamente e geo meccanicamente uniforme, caratterizzato da depositi argilloso limosi e limo argillosi consistenti, con comportamento eminentemente coesivo e proprietà geomeccaniche medio-buone
- **ORIZZONTE B** considerato come litologicamente e geo meccanicamente uniforme, caratterizzato da depositi argilloso limosi e limo argillosi meno consistenti rispetto all'intervallo A, con comportamento eminentemente coesivo e proprietà geomeccaniche discrete.

Di seguito si riportano la caratterizzazione geomeccanica dei due intervalli, proposta in Relazione Geologica.

Intervallo	Z _{min} (m)	Z _{max} (m)	γ (t/m ³)	γ_{SAT} (t/m ³)	γ' (t/m ³)	Cu (kg/cm ²)	Φ'	E (kg/cm ²)
			γ (kN/m ³)	γ_{SAT} (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	Cu (kPa)		E (MPa)
A	0.00	-6.00	1.97	2.30	1.30	1.05	---	70
			19.32	22.56	12.75	102.97		6.86
B	-6.00	-15.00 / -10.00	1.95	2.30	1.30	0.93	---	60
			19.12	22.56	12.75	91.20		5.88

Figura 1– Caratterizzazione geomeccanica degli orizzonti stratigrafici del sito di intervento

In Relazione Geologica non viene dichiarata la quota del piano di soggiacenza di falda né tanto meno le sue possibili variazioni annuali. Il terreno in sito, infine, non è stato caratterizzato in termini chimico-fisici. Tali aspetti andranno indagati in sede di elaborazione del PE.

Il presente elaborato svilupperà la verifica comparativa di due soluzioni stratigrafiche di pari costo economico. La seconda soluzione, in particolare, oltre a presentare livelli prestazionali leggermente superiori alla prima (come verrà illustrato in seguito), si caratterizza per una migliore stabilità delle prestazioni stimate nel calcolo di verifica rispetto alle condizioni ambientali e progettuali di:

- Modesto scavo di imposta della struttura di fondazione stradale (65cm circa);
- Prossimità del piano di falda alla struttura di fondazione stradale;
- Sostanziale uniformità tra le quote di fondo del fossetto stradale e del cassonetto del piano di fondazione stradale

3. PACCHETTI STRATIGRAFICI OGGETTO DI VALUTAZIONE

3.1 PRIMA PROPOSTA STRATIGRAFICA

La prima proposta stratigrafica prevede la seguente sequenza (caratterizzata per tipologia di materiale, spessore, Modulo Elastico in Mpa

STRATO	SPESSORE (cm)	MODULO (MPa)	NOTE
USURA BITUMINOSA	3	3.500	Bitume tal quale
BINDER	7	5.000	Bitume tal quale
EMULSIONE	--	--	Rc 55 1kg/mq
BASE A FREDDO	8	4.000	Bitume tal quale
MISTO CEMENTATO	10	7.000	
MISTO STABILIZZATO	10	600	
GHIAIA	45	400	
SABBIA	10	20	Drenaggio
GEOTESSILE	--	--	Antirifiuto 200g/mq
TERRENO IN SITO	∞	20	Terreno limoso-argilloso



I mix design dei conglomerati bituminosi considerati nella soluzione stratigrafica non prevedono l'utilizzo di bitumi modificati ed, in particolare, lo strato di base è previsto "a freddo" con impiego di materiali riciclati. La miscela di questo ultimo strato è prevista con:

- aggregati riciclati (conglomerato bituminoso di recupero 0/10 e 10/20 mm) vagliati e certificati secondo UNI EN 13242;
- emulsione bituminosa modificata (tipo C60BP10) conforme a UNI EN 13808;
- cemento Portland composito (CEM II/B-LI 32,5 R) conforme a UNI EN 197-1;
- eventuali inerti di integrazione e/o filler;
- acqua conforme alla norma UNI EN 1008.

Le criticità indotte dall'eventuale interferenza della stratigrafia di pavimentazione con la falda e dal rifluimento del terreno limoso argilloso sono gestite mediante applicazione di strato drenante pari a 10cm di spessore e strato di base in geotessile di grammatura 200g/mq.

3.2 SECONDA PROPOSTA STRATIGRAFICA

La seconda proposta stratigrafica presenta la seguente scansione:

STRATO	SPESSORE (cm)	MODULO (MPa)	NOTE
USURA BITUMINOSA	3	3.500	Bitume tal quale
EMULSIONE	--		Ancoraggio 0.3-0.4kg/mq
BINDER	5	5.000	Bitume tal quale
EMULSIONE	--	--	Ancoraggio 0.3-0.4kg/mq
BASE A CALDO	10	7.000	Bitume tal quale
EMULSIONE	--		Rc 55 1kg/mq
MISTO CEMENTATO A.D.	25	8.000	
Ghiaia 2° STRATO	25	800	
Ghiaia 1° STRATO	30	500	
SABBIA	15	50	Sabbione anticapillare
STABILIZZAZIONE IN SITO A CALCE	30	200	Maggior portanza e durabilità
TERRENO IN SITO	∞	20	Terreno limoso-argilloso

Come per il caso precedente i conglomerati bituminosi adottati non presentano utilizzo in miscela di bitumi modificati.

La soluzione presenta i seguenti accorgimenti:

1. Utilizzo della emulsione bituminosa come ancorante di strato a migliore interazione tra gli strati di conglomerato;
2. Applicazione di strato di base "caldo" maggiorato a 10cm di spessore;
3. Inserimento di strato in misto cementato ad Alta Duttività (le cui caratteristiche sono illustrate in paragrafo seguente)
4. Eliminazione dello strato in misto stabilizzato
5. Incremento dello strato di ghiaia da 45cm a 55 cm con l'accorgimento di stesa in doppio strato in modo da migliorarne la compattazione;
6. Strato anticapillare incrementato a 15cm
7. Trattamento del terreno in sito con calce per uno strato di almeno 30cm ed eliminazione del geotessile

Strato di base "a caldo" presenterà un conglomerato bituminoso costituito da misto granulare prevalentemente di frantumazione, composto da una miscela di aggregato grosso, fine e filler avente Dmax 31,5 mm, resistenza alla frammentazione Los Angeles (UNI EN 1097-2) LA ≤ 25 (LA25), compreso l'utilizzo minimo di 20% fino ad un massimo 45% di conglomerato bituminoso di recupero opportunamente rigenerato con attivanti chimici funzionali (rigeneranti), con percentuale dei vuoti fra il 3 ed il 6%, compresa la stesa mediante vibrofinitrice meccanica e la costipazione a mezzo di rulli di idoneo peso, in sede stradale. La miscela sarà impastata a caldo con bitume tal quale Classe 50/70 o 70/100, dosaggio minimo di bitume totale del 3,80%.

La seconda soluzione presenta alcuni vantaggi operativi:

- Maggiore spessore dello strato di base "a caldo" che, di fatto, costituisce la fondazione della pavimentazione stradale;
- Minore spessore dello strato di collegamento soggetto a manutenzione insieme con lo strato di usura;
- Maggiore interazione tra gli strati in conglomerato bituminoso e misto cementato A.D. ottenuta dalla stesa di strati di emulsione;
- Migliore efficacia dello strato anticapillare
- Minore suscettibilità della portanza di strato alle caratteristiche del terreno di fondazione mediante preliminare stabilizzazione di quest'ultimo.

Entrambe le soluzioni presentano medesimo spessore complessivo del pacchetto stratigrafico e, quindi, medesima profondità di scavo.

3.2.1 MISTO CEMENTATO AD ALTA DUTTILITA'

I materiali impiegati nel mix dei misti cementati ad Alta duttilità contribuiscono alla riduzione del consumo di roccia da cave di prestito e, al contempo, avendo gli inerti bitume adsorbito sulla superficie, a seguito della compattazione in sito e del fenomeno di self healing del bitume, si attiva l'adesione tra i granuli dovuta al bitume, e pertanto lo strato oltre alla resistenza per attrito è in grado di fornire anche una certa resistenza alla trazione, riducendo sensibilmente il fenomeno del "reflective cracking".

Il misto cementato è un materiale ottenuto dalla miscelazione di misto granulare con cemento, utilizzabile come strato di fondazione nelle pavimentazioni stradali di tipo semirigido ed in tutte le condizioni strutturali in cui si vuole incrementare notevolmente la capacità portante dello strato di fondazione su cui poggeranno i conglomerati bituminosi.

Il misto cementato AD è costituito da una miscela di misto granulare stabilizzato con RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), impastato con cemento, emulsione bituminosa e acqua. Alla resistenza meccanica del misto cementato classico, aggiunge la capacità di deformarsi plasticamente sotto carico prima di giungere a rottura.

Al comportamento elasto-fragile del misto cementato il RAP e l'emulsione conferiscono un comportamento elasto-plastico grazie alle performances del bitume.

La miscela sarà costituita da inerti lapidei al 70% e di RAP al 30% aventi perdita in peso Los Angeles (LA) < 30 % e diametro max 40 mm impastata con cemento, emulsione bituminosa e acqua in impianto centralizzato a produzione continua con dosaggio volumetrico dei componenti. La composizione granulometrica da adottare, la percentuale di cemento, di emulsione e di acqua, saranno stabilite mediante apposito mix-design in applicazione delle "NORME TECNICHE E AMBIENTALI per la produzione dei materiali riciclati e posa nella costruzione e manutenzione di opere edili, stradali e recuperi ambientali."

La proposta ha l'ulteriore vantaggio di rispondere al CAM "Servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione e manutenzione di strade" relativo all'impiego nelle costruzioni di prodotti ecocompatibili, così da applicare i principi dell'Economia Circolare con il metodo del "Life Cycle Cost".

La stesa dello strato verrà eseguita con vibrofinitrice a guida laser e le operazioni di addensamento saranno effettuate con rullo a due ruote vibranti da 10 Ton per ruota.

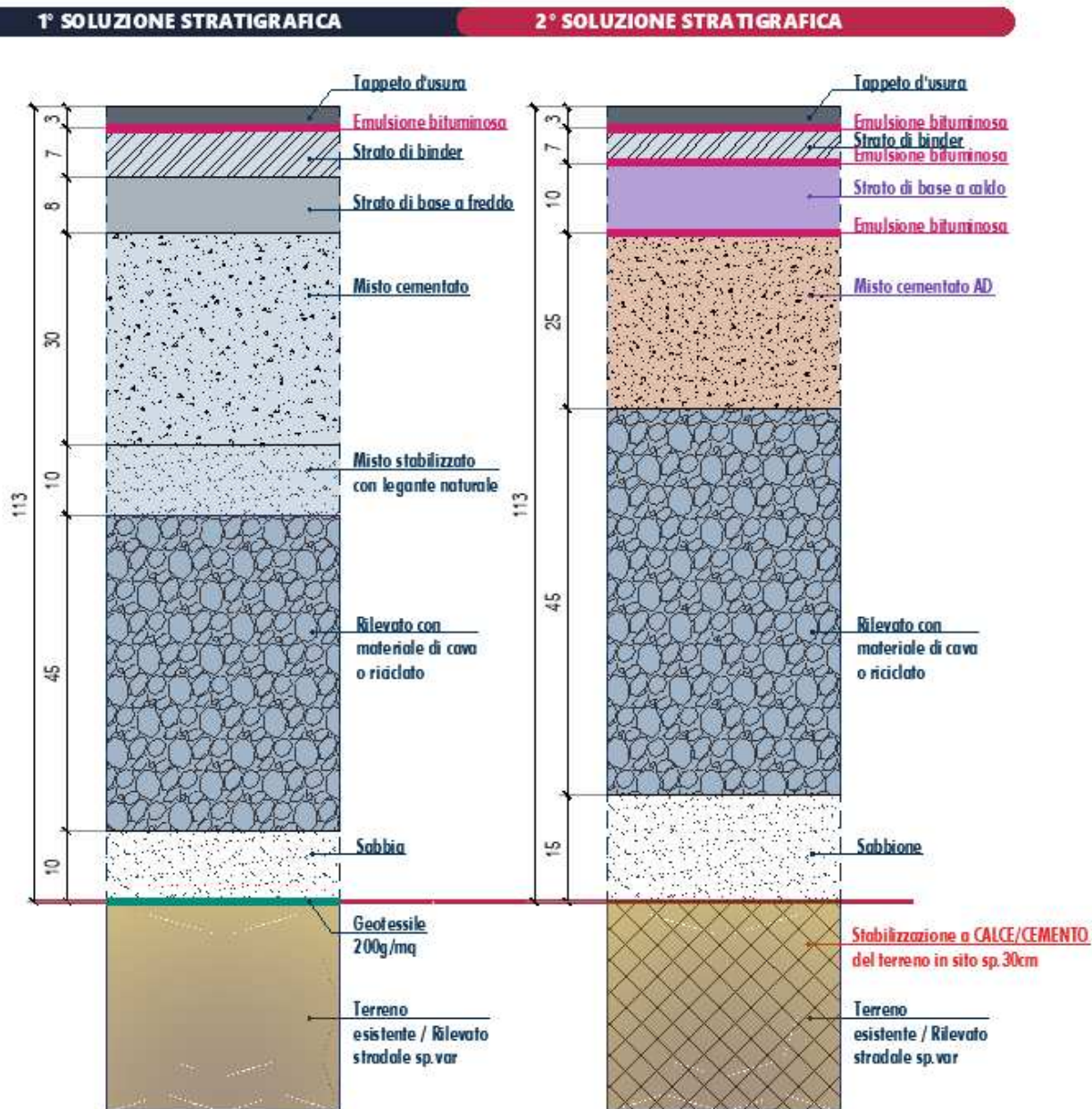


Figura 2– Vista comparativa delle due soluzioni stratigrafiche



2. MODALITA' DI VERIFICA -METODI DI ANALISI

Le due soluzioni stratigrafiche verranno verificate sia con metodo razionale che con metodo parametrico AASHTO.

L'applicazione del metodo razionale, infatti, permette di valutare lo stato deformativo e tensionale tra gli strati individuando le specifiche criticità nella composizione della soluzione stratigrafica. Il metodo AASHTO offre invece una valutazione d'insieme del pacchetto.

2.1 METODO RAZIONALE

La modellazione della pavimentazione, secondo l'approccio di progettazione razionale, si basa su una rappresentazione della struttura mediante una struttura multistrato avente un comportamento elastico lineare isotropo.

I vari strati di materiale che costituiscono la struttura hanno spessore costante; inoltre, la loro espansione nel piano orizzontale Xoy è infinita. L'espansione lungo la direzione verticale ZZ dello strato inferiore della fondazione multistrato, che generalmente rappresenta il substrato o del terreno di supporto, si assume anch'essa infinita.

Ogni singolo strato viene quindi caratterizzato dai seguenti parametri :

- ⇒ Spessore H ;
- ⇒ modulo di Young E del materiale;
- ⇒ rapporto di Poisson del materiale (indicato "Nu" in Alize-LCPC);

condizioni di interfaccia agli estremi superiore e inferiore del livello con gli strati adiacenti.

Tre tipi di interfaccia sono a disposizione per caratterizzare la modalità di trasmissione delle tensioni/deformazioni nella interfaccia tra strati adiacenti:

- legati,
- scorrevole,
- semi-legati.

La condizione interfaccia semi-legato è specificata dalla guida tecnica francese per design delle pavimentazioni LCPC SETRA per modellare il contatto tra alcuni materiali. In caso di interfaccia semi legata, due calcoli successivi sono eseguiti automaticamente, il primo considerando interfaccia legata e il secondo considerando interfaccia scorrevole. La condizione di semi-legato viene quindi considerata come il valore medio delle tensioni e deformazioni derivanti da questi due calcoli. Il calcolo proposto in relazione ha preso in considerazione solo le condizioni "legate" (applicato al pacchetto dei conglomerati bituminosi, assicurandosi la presenza di tale interazione mediante l'applicazione di emulsione bituminosa tra i vari strati , compreso tra strato di base e misto cementato).

Il programma di analisi adottato (Alize-LCPC) permette di riscontrare i livelli deformativi e tensionali nelle superfici di interfaccia di strato ed effettua la verifica mediante rapporto tra i valori ammissibili tenso-deformativi dei materiali negli spessori di strato di progetto con le tensioni ricavate dalle sollecitazioni indotte dal traffico valutato mediante calcolo del tra traffico di camion cumulativo (NPL), sulla base del tipico insieme di dati:

- ✓ traffico giornaliero medio annuo (MJA)
- ✓ tasso % di incremento annuo (tg - geometrico) o (a - aritmetico)
- ✓ il periodo di servizio (p);

I profili di calcolo verticali, associati ai vari livelli di calcolo sono utilizzati per stabilire quei punti in cui il calcolo meccanico di tensioni interne è effettuato dal programma. I profili verticali di calcolo predefiniti per il carico di riferimento sono i seguenti :

- caso del carico di riferimento costituito da una ruota isolata: un profilo verticale di un singolo calcolo, corrispondente con l'asse del cerchio che definisce il carico;
- caso del carico di riferimento composto da doppie ruote: due profili verticali di calcolo, uno corrispondente all'asse del cerchio che definisce uno dei due carichi, e l'altro corrispondente all'asse centrale di simmetria della doppia ruota.

La elaborazione analitica del modello consente di acquisire:

- ad ogni livello di calcolo, la valore di tensione minimo (EPST) e il valore minore dello stress primario (σ_T) con il piano orizzontale Xoy , con i valori massimi di deformazione (ϵ_Z) e stress (σ_Z) nella direzione ZZ .
- I valori di deflessione calcolati nei punti di calcolo della superficie pavimentazione

Il calcolo delle tensioni nei vari materiali che compongono la struttura della pavimentazione è sviluppato sulla base di da due modelli di danno su cui si basa il metodo razionale:

Per i conglomerati (conglomerati bituminosi, strati trattati con leganti idraulici e calcestruzzi) il modello adottato è quello del danneggiamento a fatica indotta (il modello Wöhler). Per i materiali inerti (ghiaie non trattati e suolo) il modello adottato valuta la compatibilità della deformazione indotta dall'accumulo di deformazioni plastiche irreversibili, come generato dalle sollecitazioni di compressione verticale esercitata dal traffico durante la vita utile della pavimentazione.

2.2 METODO A.A.S.H.T.O.

Il metodo AASHTO consiste nel determinare il **numero di assi standard** (l'asse standard è l'asse singolo con ruote gemelle da 18 kips = 80 kN = 8,2 t) che la pavimentazione può sopportare raggiungendo un fissato grado di ammaloramento finale (**PSI**).

Tale valore è funzione di vari parametri, quali caratteristiche meccaniche dei materiali, spessori degli strati, portanza del sottofondo, grado di ammaloramento finale che, per questioni di comfort e sicurezza, la pavimentazione può raggiungere, coefficiente di sicurezza (fissato attraverso l'affidabilità, ovvero la probabilità che la pavimentazione resista al traffico che transita durante la sua vita utile).

PROGETTISTI :



Tali assi devono essere confrontati con il **traffico commerciale** (veicoli con carico per asse o set di assi superiore a 10 kN) che si stima passerà durante la **vita utile** della pavimentazione sulla corsia più carica (si dimensiona la corsia più carica, non essendo il traffico pesante equi ripartito tra le corsie). Poiché il traffico commerciale che transita su strada è costituito da veicoli che si differenziano per numero di assi, carico per asse e tipologia di asse (singolo, tandem e tridem) è necessario determinare il **numero di assi standard equivalenti**, ovvero il numero di assi standard che determinano lo stesso danno alla pavimentazione provocato dai veicoli reali, o meglio dagli assi dei veicoli reali. Per determinare il numero di assi standard che transiteranno, nel metodo AASHTO, è necessario stabilire preliminarmente i **coefficienti di equivalenza** tra ciascun asse reale e quello standard.

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

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

Per ottenere il numero di veicoli commerciali che transiteranno sulla corsia più carica della pavimentazione durante la vita utile, serve conoscere:

- **TGM** (Traffico Medio Giornaliero),
- **Percentuale di veicoli pesanti** (%),
- **Suddivisione del traffico pesante tra le corsie** (%),
- **Tasso di incremento annuo del traffico** (%).

Nella metodologia proposta dall' "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures" i carichi di traffico sono rappresentati dal numero cumulato (W_{18}) di assi standard equivalenti (ESAL ovvero Equivalent Standard Axle Load che rappresenta l'asse standard assunto dall'AASHTO pari a 18 kponds ovvero 8,2 ton). L'espressione analitica assunta nel metodo AASHTO per la determinazione del traffico sopportabile in termini di assi standard equivalenti per le pavimentazioni flessibili è la seguente:

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

NOTA: formulazione in cui si prevede l'introduzione delle grandezze in unità di misura anglosassoni dove:

W_{18}	è il numero di passaggi di assi singoli equivalenti da 18 Kponds (8.2 ton o 80 KN) sopportabile;
Z_R	è il valore della variabile standardizzata legata all'affidabilità R;
S_0	è la deviazione standard che tiene conto dell'errore che si commette nelle previsioni dei volumi di traffico e delle prestazioni della pavimentazione;
$\Delta PSI = PSI_{FIN} - PSI_{INIZ}$	rappresentano il grado di efficienza della pavimentazione rispettivamente nelle condizioni iniziale e finali, che esprimono la misura della idoneità di questa ad assicurare la sicurezza della circolazione e le condizioni di confort per gli utenti;
M_R	è il modulo resiliente del sottofondo espresso in psi;
SN	è lo structural number.

Il dato di partenza per il dimensionamento è il traffico giornaliero medio **TGM**, che transita o si presume transiterà nell'infrastruttura nel primo anno di vita utile. Questo dovrà essere corretto considerando i seguenti fattori:

- L'evoluzione del traffico nel corso degli anni (**r**). È alquanto difficile poter prevederne l'esatta evoluzione, in genere si assiste a tassi di crescita maggiori nei primi anni di vita tassi che poi si riducono nel tempo. In mancanza di dati più precisi si può assumere un tasso compreso tra il 2%-3% nel primo periodo di vita utile, 1 – 2% nel medio periodo di vita utile e 1% nell'ultima parte;
- La distribuzione del traffico per senso di marcia (**p_a**). In genere si può assumere che il TGM si suddivida equamente nelle due direzioni;
- La percentuale di veicoli commerciali (**p**);
- La percentuale di traffico commerciale che transita nella corsia lenta (**p_i**);
- La dispersione delle traiettorie (**d**). La traiettoria seguita dalle ruote, come già accennato, non è sempre la stessa, ma si disperde nell'intorno di un valore medio. Si tiene conto di ciò riducendo (in genere) del 20%, il TGM;
- La distribuzione dei carichi del traffico commerciale. I veicoli che lo compongono non hanno gli stessi carichi per asse determinando livelli di sollecitazione differenti. Per omogeneizzare i risultati si ricorre al concetto di asse equivalente considerando che la progressione del danno prodotto varia in modo esponenziale con il carico stesso. Nella fattispecie e prassi assumere come coefficiente di equivalenza l'espressione $C_{eq} = (x/y)^4$ dove x è il peso dell'asse in esame ed y il peso dell'asse equivalente standard (8,2 ton);

- Il numero medio degli assi di un generico veicolo commerciale (n_a). Questo è compreso tra 2 e 5. Se si tiene conto della distribuzione delle differenti classi di veicoli commerciali, si può assumere un valore compreso tra 2.25 e 2.7.

Il numero N_{18} di assi cumulati equivalenti alla fine della vita utile della pavimentazione potrà determinarsi moltiplicando il TGM per i parametri suddetti

$$N = 365 \cdot TGM \cdot p_d \cdot p \cdot p_l \cdot d \cdot C_{eq} \cdot n_a \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

La valutazione del traffico cumulato N_{18} in ESAL può essere condotta noto lo spettro di traffico.

In assenza di determinazioni sperimentali specifiche si può fare riferimento allo spettro di traffico suggerito dal Bollettino CNR n.178 "Catalogo delle pavimentazioni stradali":

Tab. 3 - Tipici spettri di traffico di veicoli commerciali per ciascun tipo di strada.

Tipo di strada	T i p o d i v e i c o l o															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1) autostrade extraurbane	12.2	----	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) " urbane	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
3) strade extr. principali e secondarie a forte traffico	----	13.1	39.5	10.5	7.9	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.6	0.5	----	----	10.5
4) strade extraurb. second. ordin.	----	----	58.8	29.4	----	5.9	----	2.8	----	----	----	----	0.2	----	----	2.9
5) " extr. second.-turistiche	24.5	----	40.8	16.3	----	4.15	----	2	----	----	----	----	0.05	----	----	12.2
6) " urbane di scorrimento	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
7) " " di quartiere e locali	80	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	20	----	----
8) corsie preferenziali	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	47	53	----

Figura 3– Tipici spettri di traffico di veicoli commerciali per ciascun tipo di strada

Nel metodo dell'AASHTO l'affidabilità R (reliability) viene introdotta attraverso i coefficienti S_0 e Z_R .

S_0 è la deviazione standard che tiene conto dell'errore che si commette nelle previsioni dei volumi di traffico e delle prestazioni della pavimentazione; per le pavimentazioni flessibili, ed assume un valore compreso tra 0,40 e 0,50 quando si tiene conto dell'errore che si commette sia sul traffico sia sulla prestazione prevista per una data pavimentazione.

Z_R invece è il valore della variabile standardizzata legata all'affidabilità R (che è la probabilità che il numero di ripetizioni di carico $N_T(\max)$ che portano il valore $PSI = PSI_{FIN}$ sia maggiore o uguale al numero di ripetizioni N_T realmente applicati alla sovrastruttura).
Affermare che $R=95\%$ significa che in 95 casi su cento le previsioni di progetto (traffico, prestazione pavimentazione) consentono di raggiungere la prefissata vita utile. Viceversa nel 5% dei casi ciò non si verifica. Per ciascun valore di R esiste un ben determinato valore di deviazione standard ridotta Z_R .

L'indice assunto dall'AASHTO per valutare il decadimento nelle delle sovrastrutture è il **PSI Present Serviceability Index**.

Esso viene definito in funzione della media delle variazioni di pendenza del profilo, della profondità delle ormaie, della superficie delle buche e dei rattoppi, o di lesioni di determinate caratteristiche riferite all'unità di superficie dalla seguente espressione:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 0.01 \sqrt{C + P} - 1.38 RD$$

con:

SV = media delle variazioni di pendenza del profilo longitudinale;

C = area delle buche e dei rappezzi, per unità di superficie;

P = area fessurata o lesionata con particolari caratteristiche, per unità di superficie;

RD = media delle misure di profondità delle ormaie.

I valori di variano da valori ottimi pari a 5 all'inizio della vita utile a valori limite di 0 quando l'efficienza della pavimentazione è nulla.

Tuttavia livelli inferiori a 1-1.5 non sono in genere 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 di PSI.

Nel metodo AASHTO lo "structural number" SN è un parametro che tiene conto della "resistenza strutturale" della pavimentazione.

Esso è funzione degli spessori degli strati H_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" d_i .

L'espressione analitica dello structural number è:

$$SN = \sum_{i=1}^{n_{strato}} a_i H_i d_i$$



dove ad ogni strato della pavimentazione di progetto, di spessore H_i ed espresso in pollici [inch], viene assegnato un coefficiente di struttura (a_i) espresso in [inch⁻¹], che rappresenta il contributo dello strato alla prestazione complessiva della pavimentazione ed fattore per considerare gli effetti del drenaggio (d_i) adimensionale.

I coefficienti di drenaggio d_i sono usati per modificare il valore del coefficiente di spessore a_i di ogni strato non stabilizzato al di sopra del sottofondo in una pavimentazione flessibile.

Gli strati in conglomerato bituminoso non sono influenzati da un eventuale cattivo drenaggio dello strato o dal tempo in cui si trova in condizioni di saturazione. In questi casi il coefficiente di drenaggio vale comunque 1.

Per gli altri strati i coefficienti di drenaggio sono determinati considerando la qualità del drenaggio e il tempo, in percentuale, che la pavimentazione è esposta a livelli di umidità vicino alla saturazione.

L'effetto di un efficiente drenaggio è quello di fornire valori più elevati di SN e, pertanto, si traduce in una riduzione delle fessurazioni, delle ormaie e delle irregolarità della superficie stradale.

I coefficienti di spessore a_i esprimono 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 prescritti 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'AASHTO 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. La valutazione di SN può essere condotta indirettamente attraverso le correlazioni con altri parametri che descrivono le caratteristiche strutturali delle sovrastrutture. Tra questi un legame particolarmente utile risulta quello tra **CBR** e il modulo resiliente del sottofondo **MR**.

$$CBR = \frac{M_R}{10}$$

dove:

MR = modulo resiliente del sottofondo in MPa

CBR = indice di portanza CBR (California Bearing Ratio) [%].

Il metodo empirico di AASHTO si conclude verificando che il numero di passaggi di assi standard (**N**), risulti inferiore al numero massimo di passaggi di assi standard sopportabili dalla pavimentazione (**W₁₈**).

I limiti di tale metodo empirico risiedono:

- nella impossibilità di valutare puntualmente le eventuali criticità di interazione tra gli strati;
- nella adattabilità dei valori parametrici di strato (nella definizione di SN) al caso specifico oggetto di analisi

4. VOLUMI DI TRAFFICO E CARATTERISTICHE DEL TRAFFICO ATTESO

Il dimensionamento di una struttura stradale, con particolare riferimento alla sua fondazione e pavimentazione, richiedono la previsione dei carichi attesi nella sua vita utile.

Per rendere omogenee le molteplici categorie di veicoli, il metodo proposto dall' "AASHTO Interim guide" equipara i carichi di differente entità dei vari assi ad un unico asse di riferimento (ESA, Equivalent Standard Axle) mediante l'utilizzo di opportuni fattori di equivalenza (EF Equivalent Factor) e rapportando gli effetti prodotti dai vari veicoli ad un'unica tipologia di carico.

Ricavato il numero di totale di assi standard (NESAL), tale valore deve essere confrontato con il numero massimo di assi che la pavimentazione di progetto è in grado di sopportare nell'arco dell'intera vita utile (NMAX).

Nel caso in esame, in assenza di una valutazione di traffico, è stato considerato un TGM (traffico giornaliero medio) di 18.000 veicoli/giorno con percentuale di traffico pesante pari circa il 20% (3.000 passaggi giornalieri medi) e tasso di crescita del flusso veicolare pari a 1.8%. La vita utile della pavimentazione è valutata in 15 anni.

Le stime di traffico trovano conforto nel Report RER dei flussi di traffico, con riferimento alla Provincia di Parma nei mesi del 2024-2025.



5 RISULTATI DI ANALISI

Di seguito verranno presentati i risultati di analisi condotte sulle due proposte stratigrafiche secondo i due metodi di verifica.

5.1 METODO RAZIONALE

5.1.1 PRIMA PROPOSTA STRATIGRAFICA

Alize-Lcpc - Design of pavement structures
according to the French Lcpc-Setra rational method

Description of the calculation

- data Structure : direct input, no name
- title of the study no title
- load data :
 - standard 65 kN dual-wheel axle
 - vertical pressure : 0,6620 MPa
 - contact radius : 0,1250 m
 - dual-wheel spacing: 0,3750 m

units: m, MN and MPa; strains in μ strain; deflection in mm/100

Table 1 (synthesis):
major main traction stresses in the horizontal plane XoY and
major main compression stresses along the vertical ZZ axis; maximal deflection

level comput.	EpsilonT horizontal	SigmaT horizontal	EpsilonZ vertical	SigmaZ vertical
surface (z=0,000)				
th= 0,030 m 0,000m Yg= 3500,0 MPa nu= 0,350 0,030m	11,0	0,123	46,6	0,659
bonded (z=0,030m)				
th= 0,070 m 0,030m Yg= 5000,0 MPa nu= 0,350 0,100m	33,2	0,234	77,7	0,652
bonded (z=0,100m)				
th= 0,080 m 0,100m Yg= 4000,0 MPa nu= 0,350 0,180m	-6,2	0,209	68,7	0,506
bonded (z=0,180m)				
th= 0,300 m 0,180m Yg= 7000,0 MPa nu= 0,350 0,480m	-1,1	0,125	47,8	0,307
unbond. (z=0,480m)				
th= 0,100 m 0,480m Yg= 600,0 MPa nu= 0,350 0,580m	-1,1	0,154	27,3	0,012
unbond. (z=0,580m)				
th= 0,450 m 0,580m Yg= 400,0 MPa nu= 0,350 1,030m	-49,3	-0,502	49,8	0,012
unbond. (z=1,030m)				
th= 0,100 m 1,030m Yg= 20,0 MPa nu= 0,350 1,130m	6,8	0,013	3,5	0,011
unbond. (z=1,130m)				
th. infinite 1,130m Yg= 20,0 MPa nu= 0,350	-18,8	-0,010	29,7	0,004
	31,3	0,025	-19,6	0,011
	-42,1	-0,024	49,5	0,004
	-33,1	0,001	147,7	0,004
	-52,7	0,000	167,8	0,004
	34,9	0,003	72,8	0,004

Maximum deflection = 64,4 mm/100 (dual-wheel center)
Curvature radius = 1138,9 m (dual-wheel center)

VALUTAZIONE DELLA MASSIMA DEFORMAZIONE SOSTENIBILE ALLA BASE DEL PACCHETTO STRATIGRAFICO

Alize-Lcpc - Design of pavement structures
according to the French Lcpc-Setra rational method

Computation of Allowable value - material: untreated graded aggregates and soil (soil, mean and heavy traffic)

traffic data :

MJA = 3000 lorries/direction/lane
arithmetic growth= 1,80%
service duration= 15,0 years
cumulated traffic NPL = 18.495.000 heavy lorries

other equivalent traffic data (inferred) :

geometric growth= 1,67%

equivalent cumulated traffic NE:

coefficient CAM= 1,00
cumul. traffic NE= 18.495.000 reference axes

material characteristics:

coefficient A= 12000
exponent= -0,2220

Allowable EpsilonZ= 292,3 μ strain

**VALUTAZIONE DELLA MASSIMA DEFORMAZIONE SOSTENIBILE ALLA BASE DEGLI STRATI IN CONGLOMERATO BITUMINOSO**

Alize-Lcpc - Design of pavement structures
according to the French Lcpc-Setra rational method

Computation of Allowable value - material: bituminous - gb1
traffic data :

MJA = 3000 lorries/direction/lane
arithmetic growth= 1,80%
service duration= 15,0 years
cumulated traffic NPL = 18.495.000 heavy lorries

other equivalent traffic data (inferred) :

geometric growth= 1,67%

equivalent cumulated traffic NE:

coefficient CAM= 1,00

cumul. traffic NE= 18.495.000 reference axes

material characteristics:

Epsilon6= 70,00 µstrain

inverse slope 1/b= -5,00

TetaEq= 20 °C

modulus E(10°C) = 9000 MPa

modulus E(TetaEq)= 5000 MPa

struct. bituminous th.= 0,180 m

standard deviation Sh= 0,025 m

standard deviation SN= 0,400

risk= 10,0%

coefficient Kr= 0,7570

coefficient Ks= 1/1,2

coefficient Kc= 1,3

Allowable EpsilonT= 43,0 µstrain

5.1.2 SECONDA PROPOSTA STRATIGRAFICA

Alize-Lcpc - Design of pavement structures
according to the French Lcpc-Setra rational method

Description of the calculation

- data Structure : direct input, no name

- title of the study no title

- load data :

- standard 65 kN dual-wheel axle

- vertical pressure : 0,6620 MPa

- contact radius : 0,1250 m

- dual-wheel spacing: 0,3750 m

units: m, MN and MPa; strains in µstrain; deflection in mm/100

Table 1 (synthesis):

major main traction stresses in the horizontal plane XoY and
major main compression stresses along the vertical ZZ axis; maximal deflection

level comput.	EpsilonT horizontal	SigmaT horizontal	EpsilonZ vertical	SigmaZ vertical
<i>surface (z=0,000)</i>				
th= 0,030 m 0,000m	30,9	0,224	54,5	0,660
Yg= 3500,0 MPa				
nu= 0,350 0,030m	32,0	0,247	79,5	0,658
<i>bonded (z=0,030m)</i>				
th= 0,050 m 0,030m	32,0	0,350	44,4	0,658
Yg= 5000,0 MPa				
nu= 0,350 0,080m	12,0	0,266	57,7	0,575
<i>bonded (z=0,080m)</i>				
th= 0,100 m 0,080m	12,0	0,352	37,2	0,575
Yg= 7000,0 MPa				
nu= 0,350 0,180m	-3,3	0,114	28,4	0,293
<i>bonded (z=0,180m)</i>				
th= 0,250 m 0,180m	-3,3	0,119	25,1	0,293
Yg= 8000,0 MPa				
nu= 0,350 0,430m	-52,4	-0,606	52,5	0,015
<i>unbond. (z=0,430m)</i>				
th= 0,250 m 0,430m	23,4	0,038	-16,1	0,015
Yg= 800,0 MPa				
nu= 0,350 0,680m	-35,5	-0,037	42,9	0,009
<i>unbond. (z=0,680m)</i>				
th= 0,300 m 0,680m	25,8	0,025	-19,1	0,009
Yg= 500,0 MPa				
nu= 0,350 0,980m	-36,5	-0,025	43,9	0,005
<i>unbond. (z=0,980m)</i>				
th= 0,150 m 0,980m	-7,0	0,002	69,3	0,005
Yg= 50,0 MPa				
nu= 0,350 1,130m	-40,2	0,000	103,2	0,005
<i>unbond. (z=1,130m)</i>				
th= 0,300 m 1,130m	20,0	0,009	-7,9	0,005
Yg= 200,0 MPa				
nu= 0,350 1,430m	-32,7	-0,008	46,7	0,004
<i>unbond. (z=1,430m)</i>				
th. infinite 1,430m	38,5	0,003	79,9	0,004
Yg= 20,0 MPa				
nu= 0,350				

Maximum deflection = 68,0 mm/100 (dual-wheel center)
Curvature radius = 1504,0 m (dual-wheel center)



La valutazione comparativa delle prestazioni di strato evidenzia:

- Una sostanziale conformità di entrambi i pacchetti stratigrafici
- Migliori prestazioni del secondo pacchetto stratigrafico con particolare riferimento a:
 - Deformabilità al di sotto degli strati in conglomerato bituminoso (superficie contatto tra base e misto cementato ad)
 - Deformabilità dello strato di fondazione (superficie di contatto tra sabbia e terreno in sito)

Emerge infine un lieve miglioramento della deflessione massima della 2° soluzione rispetto alla 1°.

In generale, come esposto in precedenza, la seconda soluzione offre migliori garanzie nei confronti della deformazione di strati e degli ammaloramenti indotti da fenomeni di risalita capillare oltre che dalla variabilità delle caratteristiche di portanza del sottofondo.

5.2 METODO A.A.S.H.T.O.

5.1.1 PRIMA PROPOSTA STRATIGRAFICA

TRAFFICO AMMISSIBILE			
Indice di servizio iniziale	PSI _i	4,2	-
Indice di servizio finale	PSI _f	2,5	-
AFFIDABILITA'			
Affidabilità	R	90	%
Variabile standardizzata	Z _r	-1,282	-
Deviazione standard	S ₀	0,45	-
PORTANZA DEL SOTTOFONDO			
Modulo di deformazione sottofondo	M _d	20	MPa
Indice di capacità portante	CBR	4	-
Modulo resiliente	M _r	40	MPa
STRUCTURAL NUMBER			
	s _i [cm]	a _i [-]	m _i [-]
Strato di usura	3	0,43	1
Binder	7	0,40	1
Strato di base	8	0,28	1
Strato in misto cementato	30	0,25	0,98
Strato di fondazione	10	0,11	0,95
Rilevato in ghiaia + sabbia	0	0,13	0,95
Indice strutturale	SN	14,725	-
NUMERO DI PASSAGGI DI ASSI STANDARD SOPPORTABILI			
Funzione di regressione	logW _{8,2}	7,23	-
Numero di passaggi di assi equivalenti	W_{8,2}	16.997.754,96	
NUMERO DI PASSAGGI DI ASSI EQUIVALENTI PREVISTI NELL'ARCO DELLA VITA UTILE			
Parametro	G	-0,201	-
-AUTOCARRI LEGGERI			
Peso complessivo del set di assi	P _i	20	kN
Tipologia dell'asse	T _i	1	-
Parametro	B _i	0,4010	-
Parametro	B*	0,4524	-
Coefficiente di equivalenza	C _{SNi}	0,0030	-
Percentuale relativa del veicolo nello spettro	n _i	0,80	-
-AUTOBUS			
Peso complessivo del set di assi	P _i	80	kN
Tipologia dell'asse	T _i	1	-
Parametro	B _i	0,4524	-
Parametro	B*	0,4524	-
Coefficiente di equivalenza	C _{SNi}	1,0000	-
Percentuale relativa del veicolo nello spettro	n _i	0,20	-
Coefficiente di equivalenza medio	C _{SN}	0,2024	-
DETERMINAZIONE ASSI EQUIVALENTI SUL TRATTO			
Percentuale veicoli commerciali sulla corsia	p _{corsia}	1	-
Percentuale di veicoli commerciali	p _c	0,2	-
Percentuale di traffico nel senso di marcia	p _{sm}	1	-
Traffico giornaliero medio per entrambi i sensi	TGM _{TOT}	18000	-
Numero di veicoli commerciali attuali	n _{lca}	3600	-
Tasso di incremento annuo del traffico commerciale	R	0,0375	%
Vita utile della pavimentazione	N	20	anni
Numero di veicoli commerciali transitanti	T ^N	38128845,94	
Assi equivalenti	N_{8,2}	7.717.475,63	
VERIFICA	N_{8,2} / W_{8,2}	0,4540	



5.1.2 SECONDA PROPOSTA STRATIGRAFICA

TRAFFICO AMMISSIBILE			
Indice di servizio iniziale	PSI_i	4,2	-
Indice di servizio finale	PSI_f	2,5	-
AFFIDABILITA'			
Affidabilità	R	90	%
Variabile standardizzata	Z_r	-1,282	-
Deviazione standard	S_0	0,45	-
PORTANZA DEL SOTTOFONDO			
Modulo di deformazione sottofondo	M_d	20	MPa
Indice di capacità portante	CBR	4	-
Modulo resiliente	M_r	40	MPa
STRUCTURAL NUMBER			
	s_i [cm]	a_i [-]	m_i [-]
Strato di usura	3	0,43	1
Binder	5	0,40	1
Strato di base	10	0,32	1
Strato in misto cementato ad	25	0,26	0,98
Strato di fondazione	20	0,12	0,95
Rilevato in ghiaia + sabbia	0	0,13	0,95
Indice strutturale	SN	15,14	-
NUMERO DI PASSAGGI DI ASSI STANDARD SOPPORTABILI			
Funzione di regressione	$\log W_{8,2}$	7,32	-
Numero di passaggi di assi equivalenti	W8.2	20.936.321,25	
NUMERO DI PASSAGGI DI ASSI EQUIVALENTI PREVISTI NELL'ARCO DELLA VITA UTILE			
Parametro	G	-0,201	-
-AUTOCARRI LEGGERI			
Peso complessivo del set di assi	P_i	20	kN
Tipologia dell'asse	T_i	1	-
Parametro	B_i	0,4008	-
Parametro	B^*	0,4463	-
Coefficiente di equivalenza	C_{SNI}	0,0030	-
Percentuale relativa del veicolo nello spettro	n_i	0,80	-
-AUTOBUS			
Peso complessivo del set di assi	P_i	80	kN
Tipologia dell'asse	T_i	1	-
Parametro	B_i	0,4463	-
Parametro	B^*	0,4463	-
Coefficiente di equivalenza	C_{SNI}	1,0000	-
Percentuale relativa del veicolo nello spettro	n_i	0,20	-
Coefficiente di equivalenza medio	C_{SN}	0,2024	-
DETERMINAZIONE ASSI EQUIVALENTI			
Percentuale veicoli commerciali sulla corsia	p_{corsia}	1	-
Percentuale di veicoli commerciali	p_c	0,2	-
Percentuale di traffico nel senso di marcia	p_{sm}	1	-
Traffico giornaliero medio per entrambi i sensi	TGM_{TOT}	18000	-
Numero di veicoli commerciali attuali	n_{vca}	3600	-
Tasso di incremento annuo del traffico commerciale	R	0,0375	%
Vita utile della pavimentazione	N	20	anni
Numero di veicoli commerciali transitanti	T^N	38128845,94	
Assi equivalenti	N8.2	7.716.237,00	
VERIFICA	$N_{8,2} / W_{8,2}$	0,3686	

Anche il metodo parametrico conferma la adeguatezza di entrambe le soluzioni stratigrafiche evidenziando migliori prestazioni nel caso della seconda soluzione.



6 CONCLUSIONI

Alla luce delle elaborazioni effettuate, entrambi i progetti risultano idonei a sostenere un traffico veicolare previsto pari a 3.000 passaggi/giorno di mezzi pesanti.

Al di là di valutazioni puramente numeriche basate sui moduli dinamici dei vari strati previsti, come inseriti in analisi (valori di che dovranno essere valutati in sede di PE), si sottolineano tuttavia alcune criticità della soluzione iniziale che potrebbero nel tempo abbassare la vita utile della infrastruttura viaria.

In particolare:

- ✓ **Strato anticapillare:** per le aree ricche di acqua, si raccomanda di aumentare lo spessore dell'anticapillare a 15 cm per prevenire meglio le infiltrazioni.
- ✓ **Fondazione in ghiaia:** preso atto della natura litologica del terreno in sito (argilla organica), è consigliabile aumentare lo strato di ghiaia a 55 cm, suddiviso in due strati per una migliore compattazione.
- ✓ **Misto cementato AD:** lo strato di stabilizzato da 10 cm sotto il misto cementato non è necessario. Si propone considerare lo strato di misto cementato AD di spessore 25cm
- ✓ **EMULSIONE :** per una maggiore interazione tra gli strati in conglomerato bituminoso ed in misto cementato AD (che contiene una percentuale RAP non inferiore al 30%) si consiglia l'applicazione di emulsione bituminosa tra questi strati per un totale di 3 applicazioni.
- ✓ **Base:** I dati numerici circa la deformabilità di strato raccomandano la posa di 10cm di base a caldo
- ✓ **Binder:** Per le motivazioni di cui sopra è possibile ottimizzare lo strato collegamento a 5cm

Nel complesso la nuova proposta garantisce miglior tenuta della struttura profonda, minor infiltrazioni acqua e un aumento del modulo più graduale che permette al pacchetto di lavorare in modo più armonico.

Il requisito CAM è inoltre soddisfatto in considerazione della percentuale in peso di RAP presente nel misto cementato A.D. e del maggiore spessore di questo ultimo strato (25cm) rispetto allo spessore dello strato di base (10cm) previsto nella tipologia "a caldo" nella seconda soluzione stratigrafica.

I valori dei moduli elastici e dinamici dei materiali di strato sono stati ricavati da letteratura e da mix design utilizzati in applicazioni analoghe. Tale aspetto andrà approfondito in sede di PE.

Analogamente in sede di PE si dovrà procedere alla caratterizzazione chimico-fisica del terreno in sito per valutarne la sua suscettibilità al trattamento a calce o in miscela binaria calce-cemento.

Parma, 29 settembre 2025