



MINISTERO DELLE
INFRASTRUTTURE E DELLA
MOBILITÀ SOSTENIBILI



PROVINCIA DI RAVENNA
SETTORE VIABILITA'
SERVIZIO MANUTENZIONE STRADE
Manutenzione e Gestione Rete Stradale - Area Pianura

INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA E RIQUALIFICAZIONE DELLA
PIATTAFORMA STRADALE SP 610R NEL COMUNE DI CONSELICE
CUP J97H21001030003

PROGETTO ESECUTIVO

IMPORTO € 1.100.000,00

Presidente: Sig. Michele De Pascale	Consigliere delegato Strade - Trasporti - Pianificazione Territoriale: Arch. Nicola Pasi
Dirigente responsabile del Settore: Ing. Paolo Nobile	Resp. dell'Area Pianura: Geom. Alessandra Alteri

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:

Ing. Paolo Nobile

Documento firmato digitalmente

PROGETTISTA E COORDINATORE SICUREZZA
IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Ing. Fabio Picariello

Documento firmato digitalmente

TEAM DI PROGETTAZIONE:

Ing. Fabio Picariello
Ing. Giorgia Lanfranchi

COLLABORATORI:

Geom. Alessandra Alteri

Documento firmato digitalmente

0	EMISSIONE	Lanfranchi	Picariello	Alteri	12/2022
Rev.	Descrizione	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data:

TITOLO ELABORATO:

CODICE ELABORATO:

RELAZIONE SPECIALISTICA

PE IF R 01 00

Elaborato num:	Revisione:	Data:	Scala:	Nome file:
13	0	12/2022	-	Cartiglio_Prov.RA - elaborati tecnici.dwg

SOMMARIO

1	PREMESSA.....	2
2	PAVIMENTAZIONE STRADALE.....	3
2.1	Portanza del terreno di sottofondo	3
2.2	Caratteristiche dei materiali della pavimentazione	4
2.2.1	INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO.....	4
2.2.2	INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE	5
3	Dati di traffico.....	6
4	VERIFICA DELLE PRESTAZIONI DELLE PAVIMENTAZIONI: METODO RAZIONALE	8
4.1	Il metodo razionale	8
4.2	Configurazione di calcolo della pavimentazione	9
4.3	Carichi esterni di progetto	9
4.4	Caratteristiche meccaniche delle sezioni di calcolo	10
4.4.1	INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO.....	11
4.4.2	INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE	11
4.5	Punti di controllo	11
4.6	Risultati del calcolo	12
5	CALCOLO DELLA DURABILITÀ DEI PACCHETTI – VERIFICA DINAMICA.....	16
5.1	LEGGE DI FATICA PER I CONGLOMERATI BITUMINOSI	16
5.2	LEGGE DI FATICA PER IL MISTO CEMENTATO.....	16
5.3	LEGGE DI FATICA PER IL SOTTOFONDO	17
5.4	ANALISI DEI RISULTATI	18
5.4.1	INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO.....	18
5.4.2	INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE	18
6	CONCLUSIONI	19

1 PREMESSA

La presente relazione ha lo scopo di illustrare il calcolo della pavimentazione da prevedersi nell'ambito del progetto esecutivo affidato allo scrivente dalla Provincia di Ravenna, Settore Lavori Pubblici U.O. Manutenzione e Gestione Rete Stradale Area Pianura, per "Interventi di manutenzione straordinaria e riqualificazione della piattaforma stradale SP 610R nel Comune di Conselice". L'area oggetto di intervento riguarda la via Selice, che collega i comuni di Lavezzola e Conselice, ed è illustrata nella figura seguente:



Figura 1 - Inquadramento area di intervento

Viste le criticità dello stato di fatto e vista la composizione stratigrafica della sovrastruttura, si sono ipotizzati due interventi volti a ripristinare la funzionalità del corpo stradale, descritti nel seguito come:

1. Intervento 1: risanamento profondo, consiste in un rifacimento dell'intero corpo stradale, dal sottofondo al piano superficiale, con un adeguamento della quota del piano stradale;
2. Intervento 2: risanamento superficiale, consiste in un rifacimento pacchetto stradale in conglomerato bituminoso, con mantenimento della quota del piano stradale.

Gli interventi sono così dislocati sull'area oggetto di intervento:

Intervento 1 Risanamento profondo	Intervento 2 Risanamento superficiale
dal km 7+925 al km 8+225	dal km 6+600 al km 6+800
-	dal km 5+975 al km 6+600

2 PAVIMENTAZIONE STRADALE

Considerando le caratteristiche del tracciato in progetto, si assume per il tracciato in ambito extraurbano una sezione di carreggiata di tipo F2 – Locale Extraurbana nella configurazione base proposta dal D.M. 5 Novembre 2001 ($V_p = 60/100$ Km/h); tale tipologia presenta una carreggiata unica larga 6,5 m, formata da due corsie di 3,25 m e fiancheggiata da due banchine transitabili di 1,0 m ciascuna.

2.1 PORTANZA DEL TERRENO DI SOTTOFONDO

Le indagini eseguite in sito, riportate nel dettaglio nell'elaborato PF.IG.R01.00 Relazione di interpretazione prove, hanno previsto l'esecuzione di prove DCP sul fondo dei 3 pozzetti esplorativi, al fine di dare una stima della portanza del sottofondo.

Il CBR stimato del sottofondo risulta essere mediamente pari ai valori riportati nella seguente tabella.

Pozzetto	Valore medio CBR	Valore CBR nei primi 50 cm
1	8	5
2	10	8
3	9	7

Dal calcolo del CBR è possibile derivare anche i valori dei moduli elastici del sottofondo mediante la formula

$E = 3 * CBR$, applicabile a terreni coesivi come quelli argillosi trovati al di sotto della fondazione all'interno dei pozzetti eseguiti.

Come si evince dai grafici, il materiale di sottofondo esibisce valori di CBR bassi fino alla profondità di 50 cm da fondo scavo, che poi aumentano negli ultimi 20 cm di prova (per i pozzetti 2 e 3).

Il materiale di sottofondo così testato ha fornito risultati traducibili orientativamente in argille a mediamente plastiche ($CBR=4-8$), con valori tipici di argille sabbiose poco plastiche ($CBR=6-10$) a profondità maggiore di 50 cm da fondo scavo.

I moduli elastici stimati del sottofondo risultano essere mediamente pari ai valori riportati nella seguente tabella.

Pozzetto	Valore medio modulo elastico
1	24
2	29
3	28

2.2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI DELLA PAVIMENTAZIONE

2.2.1 INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO

Vista l'area di intervento interessata dal risanamento profondo (dal km 7+925 al km 8+225), la stratigrafia iniziale a cui fare riferimento è quella del pozzetto 1, ubicato al km 8+000.

STRATO	SPESSORE
Usura 0/12,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	3 cm
Binder 0/20 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	7 cm
Base 0/31,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume modificato HD	10 cm
Misto cementato in sito (tramite stabilizzazione a cemento del materiale proveniente dalle fresature)	Sp. min. 20 cm (29 cm sul colmo)
Materiale proveniente dalle fresature rivestito con geotessile	20 cm
Misto granulare proveniente dagli scavi	35 cm
Stabilizzato a calce in sito	40 cm
Terreno esistente (semispazio infinito)	-

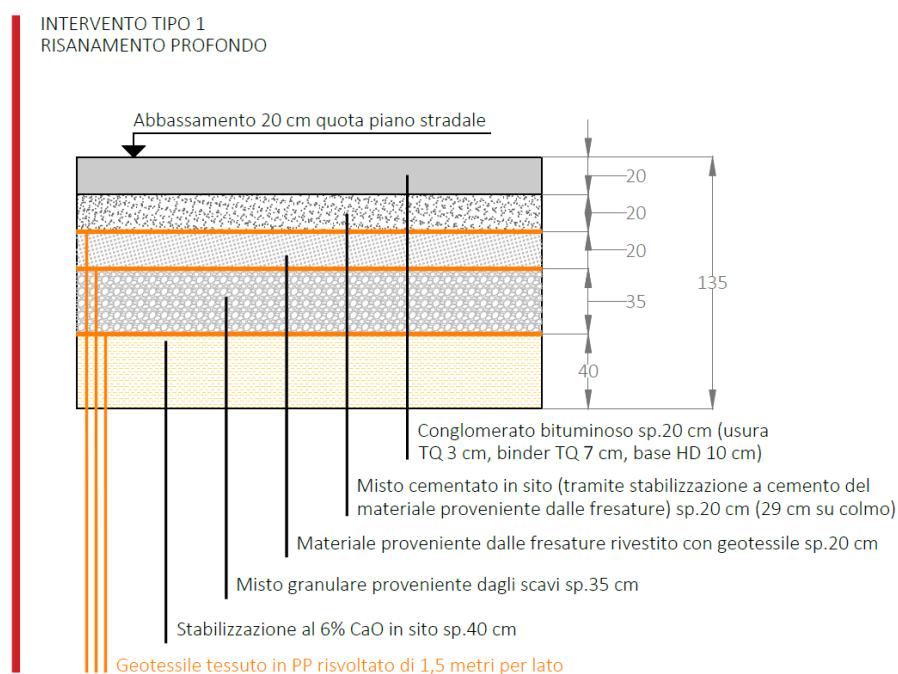


Figura 2 - Intervento 1

2.2.2 INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE

Vista l'area di intervento interessata dal risanamento superficiale (dal km 6+000 al km 6+800), la stratigrafia iniziale a cui fare riferimento è quella del pozzetto 2, ubicato al km 6+000.

STRATO	SPESSORE
Usura 0/12,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	3 cm
Binder 0/20 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	7 cm
Base 0/31,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard	10 cm
Misto cementato in sito (tramite stabilizzazione a cemento del materiale proveniente dalle fresature)	Sp. min. 20 cm (29 cm sul colmo)
Materiale proveniente dalle fresature rivestito con geotessile	17 cm
Misto granulare esistente	27 cm
Terreno esistente (semispazio infinito)	-

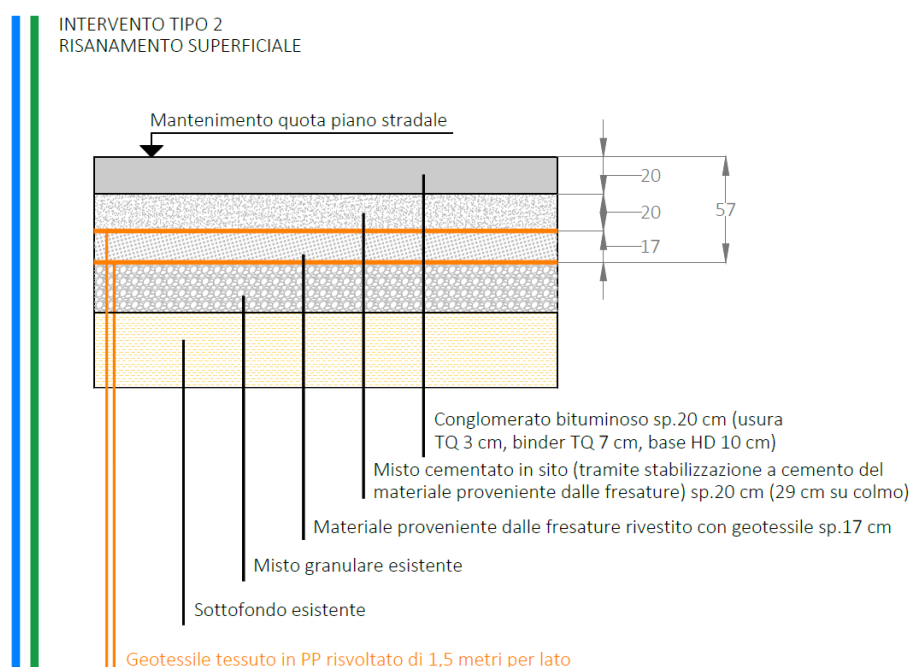


Figura 3 - Intervento 2

3 DATI DI TRAFFICO

I flussi di traffico sono espressi tramite il Traffico Giornaliero Medio TGM annuo e la percentuale dei veicoli pesanti transitanti. I volumi di traffico sono cumulativi di entrambe le direzioni di marcia.

Per i rilievi del traffico si fa riferimento ai rapporti annuali forniti dal portale Flussi online del Sistema di Monitoraggio regionale dei flussi di Traffico Stradali (MTS) dell'Emilia-Romagna.

La postazione di rilievo più vicina alle aree oggetto di intervento è la n.445 Strada: SP 610R tra Fruges/Massalombarda e Conselice:

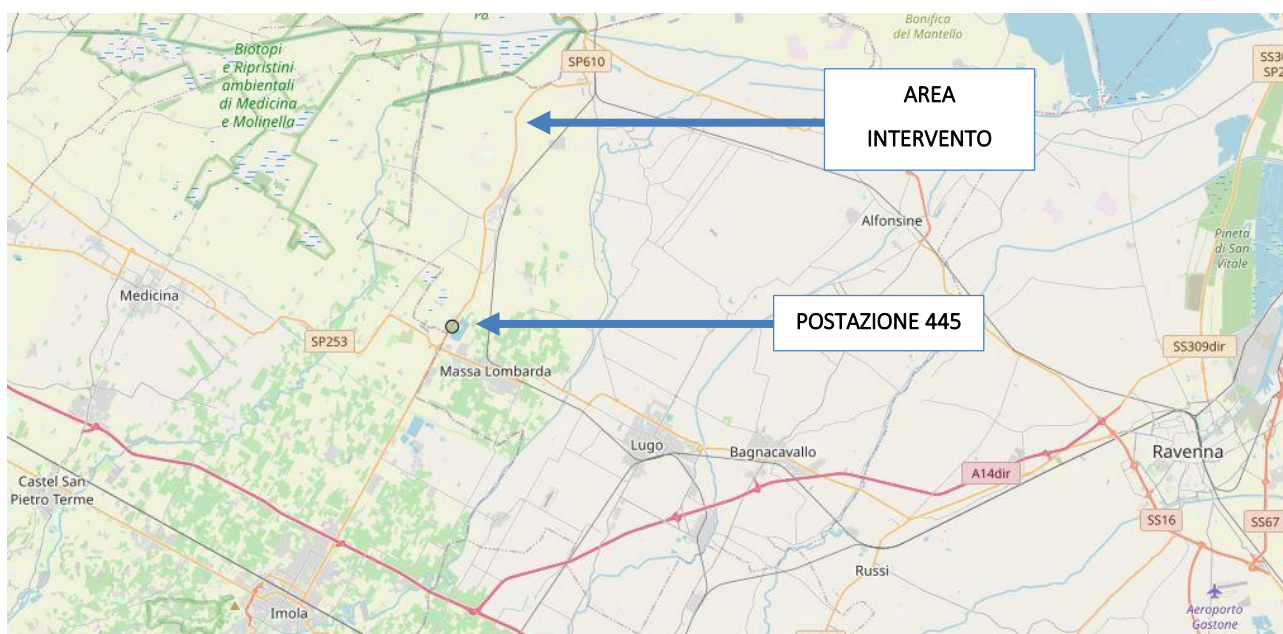


Figura 4 - Postazione rilievo traffico

I dati di traffico considerati fanno riferimento all'intervallo temporale 2017 – 2021 e sono da intendersi come dati di rilievo per postazione, e non per corsia.

I dati forniti per l'anno 2017 sono relativi a 10 mesi di rilievo (gennaio – ottobre); per l'anno 2018 sono relativi a 3 mesi di rilievo (ottobre – dicembre); tutti gli altri sono relativi a 12 mesi di rilievo. Il dato del 2020 è da considerarsi non significativo rispetto alle medie degli anni precedenti per la forte limitazione degli spostamenti causata dal lockdown dalla pandemia di Covid-19 di marzo 2020.

	2017	2018	2019	2020	2021
TGM leggero	4519	4782	4745	3712	4207
TGM pesante	536	594	632	563	623
TGM totale	5056	5376	5377	4276	4830
% pesanti	10,59%	11,04%	11,75%	13,17%	12,89%

Si osserva in generale un graduale incremento della percentuale di traffico pesante negli anni: e si è pertanto ipotizzato di considerare per gli scenari futuri un aumento cautelativo del numero di veicoli pari all'1% annuo.

Il TGM di progetto sull'unica corsia di marcia, riferito ai mezzi pesanti rilevati durante il 2021, è preso pari al 12,89% del TGM.

Traffico giornaliero medio, rilevato su entrambi i sensi di marcia

Evoluzione del traffico negli anni [%]

Distribuzione del traffico per senso di marcia [%]

Percentuale di veicoli commerciali

Percentuale di traffico commerciale che transita nella corsia lenta

Dispersione delle traiettorie [%]

Numero di anni di vita utile

	24h
TGM	4830
r	0,01
p _d	0,5
p	0,1289
p _l	1
d _t	0,9
n	20

Per il calcolo degli assi equivalenti totali accumulati si impiegano le seguenti formule di calcolo:

Assi cumulati al termine della vita utile N_c:

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

Assi transitati in un giorno all'inizio della vita utile:

$$N_g = TGM \cdot p_d \cdot p \cdot p_l \cdot d \cdot C_{eq} \cdot n_a$$

Assi transitati in un giorno dell'ultimo anno di vita utile:

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

Numero di veicoli commerciali cumulato durante la vita utile:

$$VC_c = 365 \cdot TGM \cdot p_d \cdot p \cdot p_l \cdot d_t \cdot \left(\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right)$$

Considerando un asse equivalente ESAL di 80 kN si ottiene:

N esal 80kN = 4 993 684 = 4,99 E+06 assi equivalenti in transito.

4 VERIFICA DELLE PRESTAZIONI DELLE PAVIMENTAZIONI: METODO RAZIONALE

4.1 IL METODO RAZIONALE

Il metodo di calcolo razionale delle pavimentazioni permette di verificare le ipotesi di calcolo, basate sulla scelta del pacchetto stradale di progetto, validando la qualità della scelta progettuale dal punto di vista della risposta meccanica, in termini di tensioni e deformazioni che si sviluppano nel pacchetto stradale analizzato.

Le prestazioni della pavimentazione scelta sono valutate calcolando lo stato tensionale e le deformazioni indotte nella pavimentazione dai carichi di progetto. L'analisi delle tensioni e delle deformazioni indotte nella pavimentazione dal passaggio dei veicoli è basata sulle seguenti ipotesi:

- Materiale omogeneo e isotropo con legge costitutiva elastica lineare;
- Carico applicato staticamente sulla superficie stradale e area d'impronta circolare con pressione uniformemente distribuita.

Lo scopo dell'analisi è la valutazione delle deformazioni, e dunque delle tensioni, in un punto del pacchetto stradale in conseguenza dell'applicazione di un carico statico.

Poiché l'entità del carico applicato è inferiore rispetto al carico di rottura dei materiali, la singola deformazione risulta essere, con ragionevole approssimazione, reversibile, dunque tale deformazione può essere considerata elastica. La scelta di un modello costitutivo elastico trova quindi giustificazione nell'entità delle deformazioni.

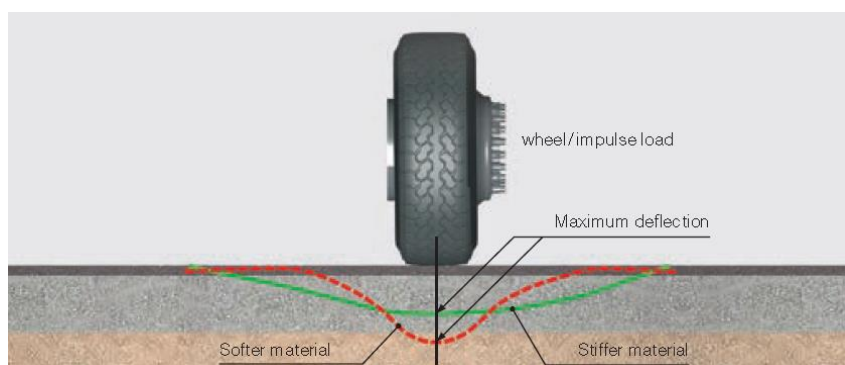


Figura 5 – Deflessioni sotto ruota

Il software di calcolo Alize, sviluppato dal LCPC (Istituto Pubblico Francese di Ricerca in Materia di Infrastrutture), utilizzato per l'analisi in oggetto, si basa sulla teoria del multistrato elastico. Nell'Alize si considera una sovrastuttura composta da più strati semi-illimitati di materiale, omogeneo, isotropo e con legge costitutiva elastica lineare.

I parametri meccanici affidati agli strati della sovrastuttura per la definizione del modello matematico di calcolo sono quelli standard proposti dal software di calcolo, basati sul manuale di progettazione delle pavimentazioni del SETRA, Servizi Tecnici Nazionali Francesi di Ricerca sulle Infrastrutture e i Trasporti sotto il Controllo dalla Direzione Generale delle Infrastrutture, dei Trasporti e del Mare. Tali parametri sono quindi verificati presso i laboratori dello scrivente e confrontati nell'ampia bibliografia di settore.

4.2 CONFIGURAZIONE DI CALCOLO DELLA PAVIMENTAZIONE

Nel calcolo, la pavimentazione è schematizzata come un sistema multi-strato elastico lineare, omogeneo e isotropo, in cui vengono definiti gli spessori, corrispondenti ai valori stratigrafici o di progetto, i moduli elastici e i coefficienti di Poisson, parametri meccanici indicativi della risposta del pacchetto stradale ai carichi esterni.

I dati di input per il calcolo di tensioni e deformazioni sono i seguenti:

- Carico di progetto: intensità (kN o pressione), posizione, tipologia;
- Caratteristiche meccaniche e geometriche della pavimentazione (modulo elastico, coefficiente di Poisson, spessore degli strati);
- Tipo di connessione alle interfacce degli strati: totale interconnessione tra i conglomerati bituminosi per la presenza di emulsione d'attacco; semi-collegamento all'interfaccia tra l'intradosso dei conglomerati bituminosi e l'estradosso dello strato di misto cementato; assenza di collegamento tra il misto cementato e gli strati sottostanti fino al sottofondo.

4.3 CARICHI ESTERNI DI PROGETTO

Una sovrastruttura stradale è percorsa da carichi di diverse tipologie e entità che applicano tensioni dipendenti dalla forma e quantità di pneumatici di cui il veicolo è composto. Per uniformare le molteplicità di casi di carico si adotta il concetto di Asse Equivalente (Standard Equivalent Axle) ovvero una semplificazione fatta attraverso i fattori di equivalenza che correlano gli assi effettivamente transitanti su una sezione stradale e un asse di riferimento che usualmente è l'asse singolo da 80 kN (circa 8 tonnellate). Gli ESA sono assi di riferimento con carichi standard che vengono convenzionalmente utilizzati nelle valutazioni della vita utile di una pavimentazione e servono a ricondurre le diverse configurazioni di assi di carico dei veicoli commerciali costituenti lo spettro di traffico in un unico asse di riferimento, tramite opportuni coefficienti correttivi.

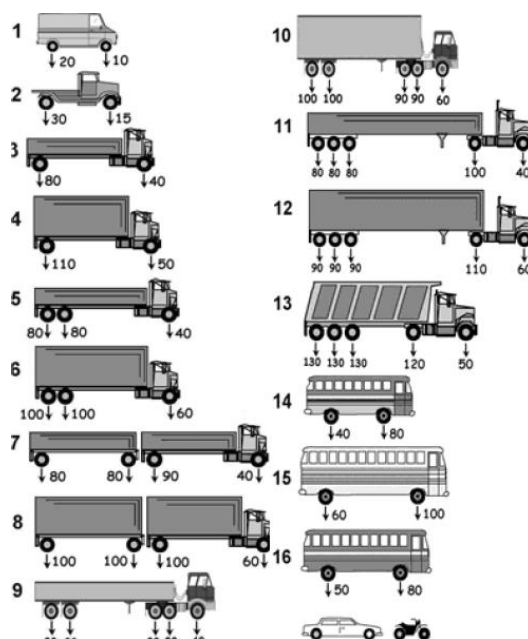


Figura 6 – Carichi di progetto

Come carico di progetto è stato quindi assunto l'asse da 80 kN con ruote gemelle. Le ruote costituenti l'asse del carico di progetto scaricano sulla superficie della pavimentazione una pressione pari a 650 kPa, distribuita su ciascuna ruota secondo un'area di impronta circolare di raggio 10 cm.

CARICHI DI PROGETTO	
Asse di progetto	Asse singolo con ruote gemellate
Carico sull'asse	80 kN
Carico su singola area di carico	20 kN
Pressione di contatto pneumatico-piano viabile	650 kPa
Raggio area impronta pneumatici (area circolare)	10,0 cm

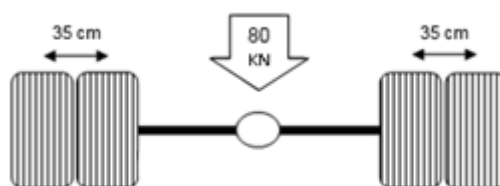


Figura 7 – Asse da 80 kN

4.4 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

Nel calcolo, la pavimentazione è schematizzata come un sistema multi-strato elastico lineare, omogeneo e isotropo, in cui vengono definiti gli spessori, corrispondenti ai valori stratigrafici o di progetto, i moduli elastici e i coefficienti di Poisson, parametri meccanici indicativi della risposta del pacchetto stradale ai carichi esterni. Si precisa che i moduli elastici dei conglomerati bituminosi sono definiti alla temperatura di riferimento di 20°C, che risulta essere la media delle temperature annuali nelle zone di intervento, e sono ricavati da esperienze dirette del laboratorio dello Scrivente e consolidata bibliografia internazionale. Il comportamento del misto cementato è stato parzializzato in 2 fasi che rappresentano rispettivamente il materiale integro e il materiale in condizioni fessurate. Per il sottofondo esistente, che costituisce il semispazio omogeneo-isotropo, è stato assunto con un modulo elastico pari a quello ottenuto tramite correlazione dalle prove DCP eseguite sui pozzetti 1 e 2.

Le caratteristiche meccaniche delle sezioni di calcolo sono riportate schematicamente nelle seguenti tabelle.

4.4.1 INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO

STRATO	SPESSORE	MODULO ELASTICO	COEFFICIENTE DI POSSION
Usura 0/12,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	3 cm	3200 MPa	0,35
Binder 0/20 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	7 cm	3000 MPa	0,35
Base 0/31,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard	10 cm	5000 MPa	0,35
Misto cementato in sito (tramite stabilizzazione a cemento del materiale proveniente dalle fresature)	20 cm	10000 MPa I fase 2000 MPa II fase	0,20
Materiale proveniente dalle fresature rivestito con geotessile	20 cm	500 MPa	0,35
Misto granulare proveniente dagli scavi	35 cm	300 MPa	0,35
Stabilizzato a calce in sito	40 cm	100 MPa	0,25
Terreno esistente (semispazio infinito)	-	24 MPa	0,40

4.4.2 INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE

STRATO	SPESSORE	MODULO ELASTICO	COEFFICIENTE DI POSSION
Usura 0/12,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	3 cm	3200 MPa	0,35
Binder 0/20 mm in conglomerato bituminoso con bitume tradizionale	7 cm	3000 MPa	0,35
Base 0/31,5 mm in conglomerato bituminoso con bitume modificato hard	10 cm	5000 MPa	0,35
Misto cementato in sito (tramite stabilizzazione a cemento del materiale proveniente dalle fresature)	20 cm	10000 MPa I fase 2000 MPa II fase	0,20
Materiale proveniente dalle fresature rivestito con geotessile	17 cm	500 MPa	0,35
Misto granulare esistente	27 cm	250 MPa	0,35
Terreno esistente (semispazio infinito)	-	29 MPa	0,40

4.5 PUNTI DI CONTROLLO

Nel calcolo di progetto vengono calcolate tensioni e deformazioni in corrispondenza di punti di controllo rappresentanti punti significativi della sovrastruttura. Nello specifico si calcolano:

- Deflessione della superficie stradale al di sotto dell'area di carico;
- Deformazioni di trazione alla base degli strati in conglomerato bituminoso;
- Deformazioni verticali in sommità dello strato di sottofondo.

4.6 RISULTATI DEL CALCOLO

Di seguito, si riportano i risultati del calcolo statico della pavimentazione per i seguenti parametri principali.

I FASE:

RISULTATI DEL CALCOLO	SIMBOLO	INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO	INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE
Deflessione superficiale verticale massima sotto area di carico	U_z	510 μm	456 μm
Deformazione di trazione intradosso base in conglomerato bituminoso	ϵ_{t-cb}	38,7 $\mu strain$	39,1 $\mu strain$
Deformazione verticale in sommità dello strato di sottofondo	$\epsilon_{v-sottof}$	56,8 $\mu strain$	62,9 $\mu strain$

II FASE:

RISULTATI DEL CALCOLO	SIMBOLO	INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO	INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE
Deflessione superficiale verticale massima sotto area di carico	U_z	640 μm	58,2 μm
Deformazione di trazione intradosso base in conglomerato bituminoso	ϵ_{t-cb}	79,2 $\mu strain$	81,4 $\mu strain$
Deformazione verticale in sommità dello strato di sottofondo	$\epsilon_{v-sottof}$	84,1 $\mu strain$	99,4 $\mu strain$

Deflessione massima sotto il carico della ruota

Questo parametro rappresenta la deflessione massima che può subire la pavimentazione nel suo complesso sotto il carico applicato nella modellazione e fornisce indicazioni sullo sviluppo dell'ormaiamento.

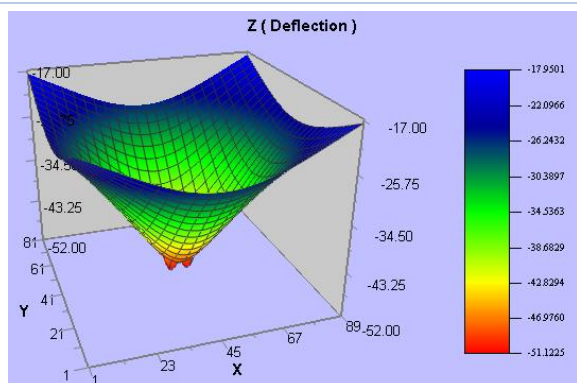
Il valore calcolato nell'intervento 1 – risanamento profondo è pari a 0,510 mm (51,0 mm/100 nell'unità di riferimento del grafico sottostante) in I fase e a 0,640 mm in II fase.

Il valore calcolato nell'intervento 2 – risanamento superficiale è pari a 0,456 mm (45,6 mm/100 nell'unità di riferimento del grafico sottostante) in I fase e a 0,582 mm in II fase.

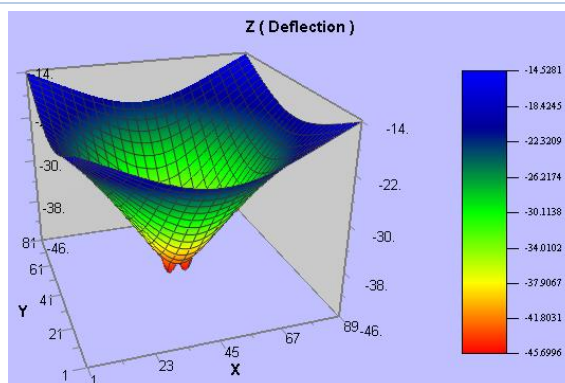
I valori ottenuti in entrambe le configurazioni di calcolo rappresentano una deflessione ammissibile.

I FASE

INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO

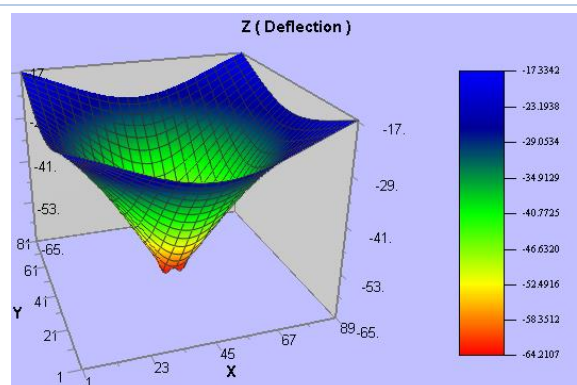


INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE

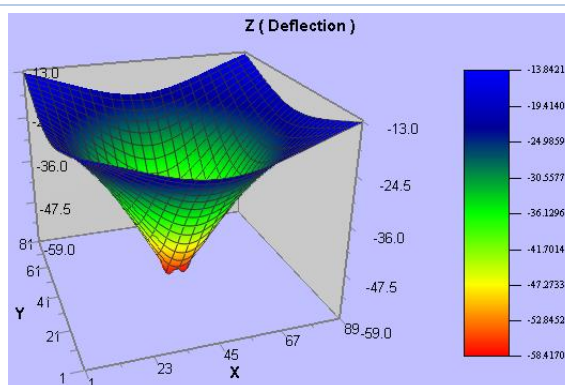


II FASE

INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO



INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE



Deformazione di trazione alla base dei conglomerati bituminosi

La deformazione di trazione è stata calcolata alla base dello strato di base, in quanto rappresenta il punto della pavimentazione maggiormente sollecitato a trazione che sarà pertanto soggetto a rottura per fatica.

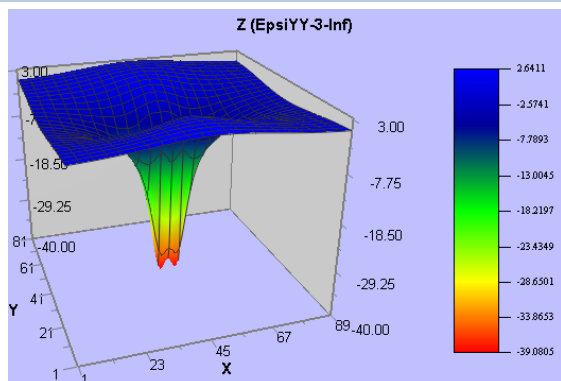
Il valore calcolato nell'intervento 1 – risanamento profondo è pari a 38,7 μ strain in I fase e a 79,2 μ strain in II fase.

Il valore calcolato nell'intervento 2 – risanamento superficiale è pari a 39,1 μ strain in I fase e a 81,4 μ strain in II fase.

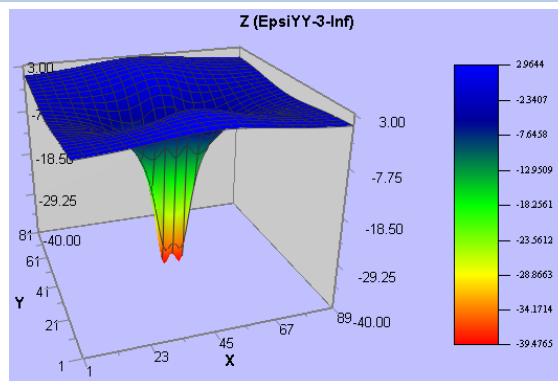
Entrambi i valori ottenuti sono da considerarsi accettabili per la progettazione in esame: i due pacchetti di progetto offrono una buona capacità portante e sono in grado di ridurre significativamente gli effetti deformativi all'intradosso dello strato di base.

I FASE

INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO

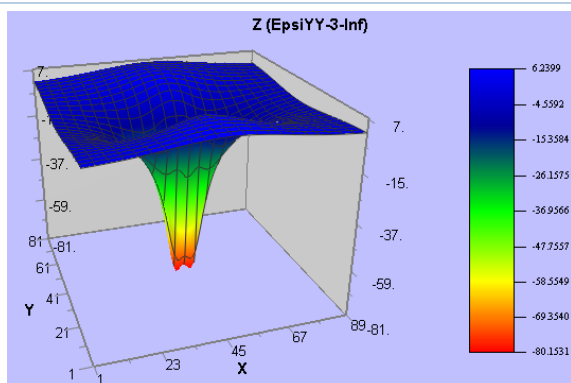


INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE

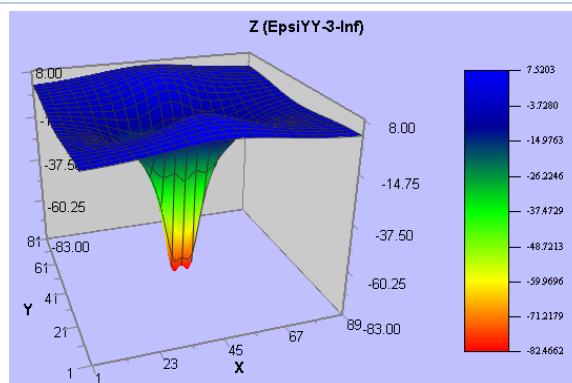


II FASE

INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO



INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE



Deformazione di compressione del sottofondo

La deformazione di compressione è stata calcolata all'intradosso dello strato di sottofondo limitato superiormente ed inferiormente e rappresenta la sollecitazione massima verticale di compressione a cui è sottoposta la base di appoggio del pacchetto stradale.

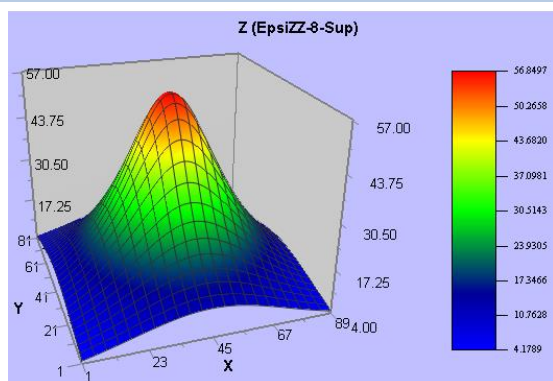
Il valore calcolato nell'intervento 1 – risanamento profondo è pari a 56,8 μ strain in I fase e a 84,1 μ strain in II fase.

Il valore calcolato nell'intervento 2 – risanamento superficiale è pari a 62,9 μ strain in I fase e a 99,4 μ strain in II fase.

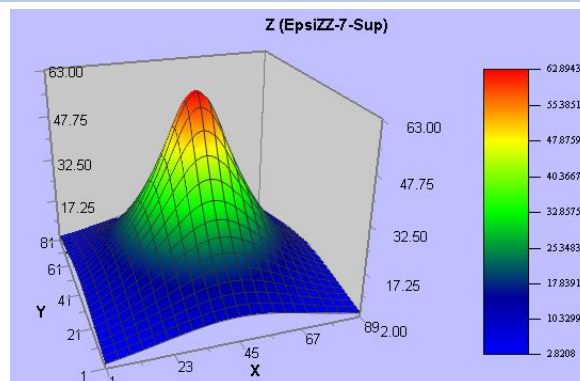
Entrambi i valori ottenuti assicurano un'adeguata portanza del sottofondo, mostrando di fatto una ragionevole e limitata deformazione della base di appoggio tenendo conto del fatto che al sottofondo è stato associato un modulo elastico cautelativo a favore di sicurezza.

I FASE

INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO

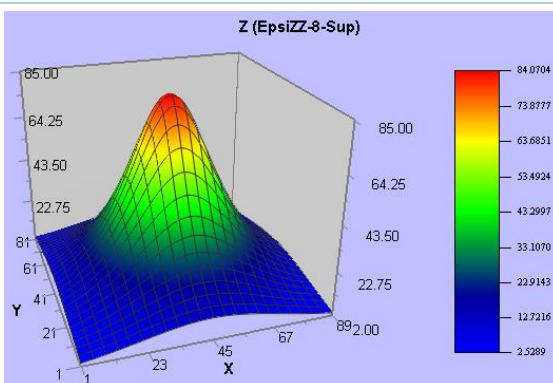


INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE

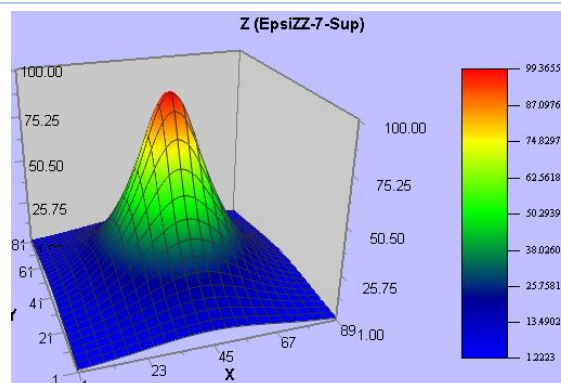


II FASE

INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO



INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE



5 CALCOLO DELLA DURABILITÀ DEI PACCHETTI – VERIFICA DINAMICA

Per un esauriente studio del comportamento della pavimentazione, e allo stesso tempo per dimostrare la validità delle scelte progettuali, è necessario valutare il comportamento delle pavimentazioni quando sottoposte alle sollecitazioni dinamiche che caratterizzano il passaggio ciclico del traffico veicolare.

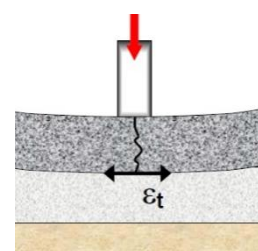
Per valutare la durabilità è stata condotta una verifica a fatica della pavimentazione stradale di entrambi gli interventi previsti, al fine di determinare i numeri di cicli che portano a rottura la pavimentazione, a causa di fenomeni di fatica che hanno origine all'intradosso degli strati bituminosi e del sottofondo.

5.1 LEGGE DI FATICA PER I CONGLOMERATI BITUMINOSI

Le fessurazioni per fatica sono una delle principali cause di ammaloramento delle pavimentazioni flessibili. Il fenomeno si manifesta in un primo momento nella degradazione degli strati legati a bitume e successivamente nel danneggiamento dell'intera sovrastruttura.

Queste fratture si formano sul fondo degli strati bituminosi e si propagano verso la superficie, sotto l'azione dei carichi ripetuti, portando quindi ad infiltrazioni d'acqua negli strati granulari.

Per la valutazione della durabilità a fatica della pavimentazione è stata utilizzata la legge di fatica proposta dall'*Asphalt Institute* la quale, in funzione del modulo elastico E dello strato in conglomerato bituminoso e della deformazione di trazione ϵ_t alla base dello stesso, determina il numero di cicli di carico ammissibile N_f che portano alla rottura della pavimentazione per fatica.



$$N_f = 0,0796 \epsilon^{-3,291} E^{-0,854}$$

Nello specifico, il modello dell'*Asphalt Institute* fissa la soglia di "rottura" della pavimentazione al raggiungimento del 20% di area fessurata in corrispondenza del passaggio dei veicoli.

Applicando la formula della legge di fatica, è stato calcolato il numero di passaggi di assi standard equivalenti (ESA) di 80 kN. Gli ESA sono assi di riferimento con carichi standard che vengono utilizzati nelle valutazioni della vita utile di una pavimentazione e servono a ricondurre le diverse configurazioni di assi di carico dei diversi veicoli commerciali costituenti lo spettro di traffico in un unico asse di riferimento, tramite opportuni coefficienti correttivi.

5.2 LEGGE DI FATICA PER IL MISTO CEMENTATO

Gli strati in misto cementato presentano un comportamento meccanico diverso a seconda della fase di esercizio che si considera. Nella prima fase si presentano come uno strato rigido, coeso non caratterizzato da fessure, successivamente tende progressivamente a fessurarsi fino ad assumere un comportamento simile a quello dei misti granulari. Quindi la modellazione del comportamento meccanico del misto cementato avviene differenziando la vita utile dello strato in due fasi temporali distinte: la prima fase caratterizzata da un valore di modulo elevato in cui la vita a fatica viene definita sulla base della massima deformazione di trazione subita dallo strato e dalla massima deformazione di trazione ammissibile. Nella seconda fase il comportamento del misto cementato fessurato può essere assimilato ad un misto granulare caratterizzato da un modulo elastico ridotto. Per la determinazione del numero di cicli ammissibili in questa seconda fase si utilizza una legge di trasferimento che considera la massima tensione di compressione subita dallo strato e il relativo valore ammissibile.

Nella prima fase, materiale non fessurato, il numero di cicli di carico sopportati sono:

$$N_f = 10^{6,84(1 - \frac{\epsilon_t}{7,63 \cdot \epsilon_b})}$$

Dove:

ϵ_t è la massima deformazione di trazione alla base dello strato

ϵ_b è la massima deformazione di trazione ammissibile

N_f è il numero di cicli di carico durante il periodo di vita effettivo

Nella seconda fase, materiale fessurato, il numero di cicli di carico sopportati sono:

$$N_{ci} = 10^{7,506(1 - \frac{\sigma_v}{1,10 \cdot UCS})}$$

dove:

σ_v è la tensione di compressione massima in sommità dello strato

UCS è la tensione a compressione ammissibile

N_{ci} è il numero di cicli di carico nel secondo periodo.

Il valore totale dei cicli di carico sopportati dallo strato in misto cementato risulta essere la somma dei cicli accumulati durante le due fasi:

$$N_{tot} = N_f + N_{ci}$$

Per dare un'esauriente lettura dei risultati, è opportuno correlare i numeri dei cicli degli strati sovrastanti quello in esame nelle due diverse fasi. Se durante la prima fase gli strati in conglomerato bituminoso hanno vita utile superiore a N_f , tale eccesso ($N_{cb-1 \text{ fase}} - N_f$) va moltiplicato per il rapporto ($N_{cb-2 \text{ fase}} / N_{cb-1 \text{ fase}}$) dove $N_{cb-2 \text{ fase}}$ è il numero di cicli dello stesso strato calcolato nelle condizioni di seconda fase. In tal caso la vita utile dello strato risulterebbe:

$$N_{pavimentazione} = N_f + (N_{cb-1 \text{ fase}} - N_f) \cdot (N_{cb-2 \text{ fase}} / N_{cb-1 \text{ fase}})$$

In caso contrario, se uno strato della pavimentazione va in crisi per un numero di cicli inferiore a N_f , è evidente che questo determina la vita utile dell'intera pavimentazione senza l'instaurarsi della seconda fase.

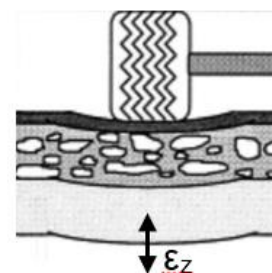
5.3 LEGGE DI FATICA PER IL SOTTOFONDO

Analogamente al comportamento esibito dai conglomerati riciclati a freddo in fase 2, anche gli strati costituiti da materiale non legato (fondazione e sottofondo) sono soggetti a tensioni verticali che possono creare avvallamenti sul piano viabile per effetto dell'accumulo di deformazioni plastiche indotte dal passaggio ciclico dei carichi veicolari. Tale accumulo sarà tanto più evidente quanto maggiore risulta il livello tenso-deformativo trasferito dalla sovrastruttura.

Per ciò che concerne lo strato di sottofondo si è adottato il criterio considerato maggiormente conservativo (i.e. 95% di affidabilità) proposto dalla Shell International Petroleum nell'ambito dello Shell Pavement Design Method:

$$N_z = 1.0498 \cdot 10^{-7} \cdot \epsilon_t^{-4}$$

Dove N_z è il numero di cicli di carico riferiti all'asse standard che causa l'accumulo critico di deformazione permanenti; ϵ_t è la deformazione verticale in sommità dello strato di sottofondo.



Per determinare il numero di cicli ammissibili a fatica che il sottofondo è in grado di sopportare si utilizza la formulazione proposta da *Shell*.

Il numero di cicli di carico ammissibili è:

$$N_z = 1,0498 * 10^{-7} * \varepsilon_z^{-4}$$

In cui:

- N_z è il numero di cicli di carico durante il periodo di vita effettivo
- ε_z è la massima deformazione verticale in sommità dello strato.

5.4 ANALISI DEI RISULTATI

La valutazione della vita a fatica ha fornito i seguenti risultati. Per il misto cementato è stato considerato cautelativamente uno stadio 1 in cui il materiale è completamente integro e uno stadio successivo con materiale fessurato. Di conseguenza anche tutto il pacchetto stradale flessibile è stato rimodulato secondo le 2 fasi del misto cementato.

5.4.1 INTERVENTO 1 - RISANAMENTO PROFONDO

Materiale	Verifica a fatica stadio 1	Verifica a fatica stadio 2	Esito verifica
Strato in c.b.	$N_{ESA80}=1,32 \cdot 10^9$	$N_{ESA80}=1,25 \cdot 10^8$	$N_{ESA80}=1,32 \cdot 10^9 + 1,25 \cdot 10^8 = 1,45 \cdot 10^9$
Strato in misto cementato	$N_{ESA80}=3,01 \cdot 10^6$	$N_{ESA80}=1,19 \cdot 10^7$	$N_{ESA80}=3,01 \cdot 10^6 + 1,19 \cdot 10^7 = 1,49 \cdot 10^7$
Pavimentazione	-	-	$N_{pavimentazione} = 1,28 \cdot 10^8$ Verificato ($N_{ESA80-prog} < N_{ESA80-amm}$) ✓
Sottofondo	-	$N_{ESA80}=2,10 \cdot 10^9$	Verificato ($N_{ESA80-prog} < N_{ESA80-amm}$) ✓

5.4.2 INTERVENTO 2 - RISANAMENTO SUPERFICIALE

Materiale	Verifica a fatica stadio 1	Verifica a fatica stadio 2	Esito verifica
Strato in c.b.	$N_{ESA80}=1,28 \cdot 10^9$	$N_{ESA80}=1,14 \cdot 10^8$	$N_{ESA80}=1,28 \cdot 10^9 + 1,14 \cdot 10^8 = 1,39 \cdot 10^9$
Strato in misto cementato	$N_{ESA80}=2,99 \cdot 10^6$	$N_{ESA80}=1,22 \cdot 10^7$	$N_{ESA80}=2,99 \cdot 10^6 + 1,22 \cdot 10^7 = 1,52 \cdot 10^7$
Pavimentazione	-	-	$N_{pavimentazione} = 1,17 \cdot 10^8$ Verificato ($N_{ESA80-prog} < N_{ESA80-amm}$) ✓
Sottofondo	-	$N_{ESA80}=1,08 \cdot 10^9$	Verificato ($N_{ESA80-prog} < N_{ESA80-amm}$) ✓

Le verifica a fatica per gli strati di conglomerato bituminoso, per il misto cementato e per il sottofondo risultano verificate in quanto il numero di passaggi di asse equivalente standard nei 20 anni, con lo spettro di traffico ipotizzato, è inferiore al numero di passaggi ammissibili.

6 CONCLUSIONI

Nel presente studio sono state analizzate, da un punto di vista meccanico e di durabilità, le pavimentazioni stradali da impiegarsi nell'ambito del progetto esecutivo affidato allo scrivente dalla Provincia di Ravenna, Settore Lavori Pubblici U.O. Manutenzione e Gestione Rete Stradale Area Pianura, per "Interventi di manutenzione straordinaria e riqualificazione della piattaforma stradale SP 610R nel Comune di Conselice".

Il progetto prevede due interventi di risanamento, profondo e superficiale, in funzione dello stato di ammaloramento della sovrastruttura stradale. In sintesi, le due soluzioni prevedono quanto segue:

- Intervento 1: risanamento profondo. Rifacimento del corpo stradale, con rimozione degli strati esistenti, stabilizzazione a calce del sottofondo, rifacimento della fondazione con materiale proveniente dal sito, stesa di nuovo conglomerato bituminoso.
- Intervento 2: risanamento superficiale. Rifacimento del pacchetto stradale, con rimozione degli strati esistenti, rifacimento di parte della fondazione con materiale proveniente dal sito, stesa di nuovo conglomerato bituminoso.

Per entrambe le pavimentazioni di progetto, la valutazione della risposta meccanica dei materiali utilizzati è stata condotta attraverso l'analisi dello stato tensionale e deformativo indotto negli strati del pacchetto stradale dal carico di progetto, sulla base dei dati di traffico forniti dalla Regione Emilia Romagna.

È seguita poi anche una valutazione della durabilità nei confronti del più gravoso ammaloramento che agisce sulle pavimentazioni stradali fortemente trafficate, ossia i fenomeni di fatica per ripetizione ciclica dei carichi.

Dall'analisi a fatica condotta sui conglomerati bituminosi si evince che la pavimentazione di progetto presenta una resistenza a fatica consistente in un numero di cicli di assi standard superiore a quella derivante dai carichi del traffico di progetto.

Allo stesso modo la verifica a fatica per lo strato di fondazione e del terreno di sottofondo ha dimostrato che il numero di cicli di assi standard che portano a rottura per fatica è superiore al numero di passaggi di assi standard offerti dalla vita utile dell'infrastruttura.

In conclusione, le pavimentazioni proposte risultano idonee all'impiego previsto e resistono alle azioni dei carichi di progetto.