



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

OFFERTA TECNICA



06 - PROGETTO STRADALE

Descrizione elaborato

Relazione sulla pavimentazione

Data
Giugno 2023

Codice interno	Livello	Ambito	Tipo	Numero	Rev.
23007	PD	STD	R	03	00

Raggruppamento Temporaneo di Imprese:

Mandataria:



**CONSORZIO STABILE
ON SITE SCARL**
Via delle Porcellane, 5 - 50019 Sesto
Fiorentino (FI)
P. I.V.A.: 07226860489
E-Mail: info@consorziostabileonsite.com

Mandante:



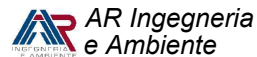
GIUGLIANO COSTRUZIONI METALLICHE S.r.l.
Zona INDUSTRIALE ASI Marcanise Sud
81025 MARCANISE (CE)
P. I.V.A.: 04312731211
E-Mail: info@giuglianocostruzionimetalliche.com

Redazione Offerta Tecnica e Progetto Definitivo:



DP INGEENERIA S.R.L.
Società di Ingegneria Civile

DP INGEENERIA info@dpingegneria.com - www.dpingegneria.com
ASSOCIATO
oice efca European Engineering Consultancies
   



Prof. Ing. Stefano **Pagliara**
Prof. Ing. Alessandro **Marradi**

Ing. Massimo **Ascoli**
Dott. Paolo **Turin**

Consulenza:

Prof. Ing. Walter **Salvatore**

Prof. Ing. Nunziante **Squeglia**



Sommario

1. Premessa.....	6
2. Pavimentazione da progetto di fattibilità	6
3. Catalogo pavimentazioni ANAS	8
4. Dimensionamento pavimentazione	11
5. Criterio di verifica delle pavimentazioni	12
5.1. Metodo di progetto razionale	12
6. Caratteristiche dei materiali.....	13
6.1. Conglomerato bituminoso per usura tipo sma.....	13
6.2. Conglomerato bituminoso modificato per stato di binder	14
6.3. Riciclato a freddo con emulsione bituminosa modificata e cemento	15
6.4. Misto cementato	15
6.5. Sottofondo	17
7. Condizioni climatiche di progetto	18
7.1. Caratteristiche meccaniche	21
8. Definizione traffico di progetto.....	22
9. Leggi di fatica.....	28
9.1. Strati in conglomerato bituminoso	28
9.2. Base riciclata a freddo	28
9.3. Misti cementati	28
9.4. Sottofondo	29
10. Risultati dell'analisi	30
11. Considerazioni Conclusive	32
12. Premessa	34
13. Pavimentazione da progetto di fattibilità	35
14. Dimensionamento pavimentazione.....	36
15. Criterio di verifica delle pavimentazioni	37
15.1. Metodo di progetto razionale.....	37
16. Caratteristiche dei materiali	38
16.1. Conglomerato bituminoso gap graded con polimeri sbr/nr secondo processo wet	38
16.2. Conglomerato bituminoso modificato per stato di binder	40
16.3. Membrana impermeabilizzante "cappa asfaltica"	41



16.4.	Soletta in calcestruzzo armato	41
17.	Condizioni climatiche di progetto	42
17.1.	Caratteristiche meccaniche	45
18.	Leggi di fatica	46
18.1.	Strati in conglomerato bituminoso	46
19.	Risultati dell'analisi	47
20.	Considerazioni Conclusive	49
21.	Premessa	51
22.	Pavimentazione da progetto di fattibilità	52
23.	Dimensionamento pavimentazione	53
24.	Criterio di verifica delle pavimentazioni	54
24.1.	Metodo di progetto razionale	54
25.	Caratteristiche dei materiali	55
25.1.	Conglomerato bituminoso per manti di usura ad alto contenuto di fresato	55
25.2.	Conglomerato bituminoso per stato di binder	56
25.3.	Misto cementato	57
25.4.	Fondazione in misto granulare	58
25.5.	Sottofondo	59
26.	Condizioni climatiche di progetto	60
26.1.	Caratteristiche meccaniche	63
27.	Definizione traffico di progetto	64
28.	Risultati dell'analisi	66
29.	Considerazioni Conclusive	68

Indice delle Figure

Figura 1 – Tracciato stradale da progetto di fattibilità tecnico-economica	6
Figura 2 – Pacchetto pavimentazione da progetto di fattibilità strada tipo C1	8
Figura 3 – Scheda di catalogo N.3SR	8
Figura 4 – Sovrastrutture stradali tipo da CSA ANAS	11
Figura 5 – Dimensioni pavimentazione di progetto	12
Figura 6 – Diagramma di flusso del metodo di dimensionamento razionale delle pavimentazioni stradali	13
Figura 7 – Effective Long Term Stiffness (ELTS)	16
Figura 8 – Variazione ELTS in funzione del supporto	17
Figura 9 – Temperatura media mensile dell'aria 2019-2022	19
Figura 10 - Caratteristiche dei mezzi commerciali circolanti sul territorio italiano (B.U. C.N.R. n.178/95)	25
Figura 11 - Caratteristiche dei mezzi commerciali circolanti sul territorio italiano (B.U. C.N.R. n.178/95)	27



Figura 12 – Confronto approccio razionale e meccanicistico-empirico delle Perpetual Pavements	31
Figura 1 – Tracciato stradale da progetto di fattibilità tecnico-economica	34
Figura 2 – Pacchetto pavimentazione in viadotto da progetto di fattibilità	36
Figura 3 – Dimensioni pavimentazione di progetto.....	36
Figura 4 – Diagramma di flusso del metodo di dimensionamento razionale delle pavimentazioni stradali.....	37
Figura 5 – Matrice litica del CB gap graded	41
Figura 6 – Temperatura media mensile dell'aria 2019-2022	43
Figura 7 – Confronto approccio razionale e meccanicistico-empirico delle Perpetual Pavements	48
Figura 8 – Tracciato stradale da progetto di fattibilità tecnico-economica	51
Figura 9 – Tracciato pista ciclabile	52
Figura 10 – Pacchetto pavimentazione pista ciclabile da progetto di fattibilità	53
Figura 11 – Dimensioni pavimentazione di progetto.....	53
Figura 12 – Diagramma di flusso del metodo di dimensionamento razionale delle pavimentazioni stradali.....	54
Figura 13 – Effective Long Term Stiffness (ELTS)	58
Figura 14 – Variazione ELTS in funzione del supporto	58
Figura 15 – Temperatura media mensile dell'aria 2019-2022	61
Figura 16 – Effetti del carico da traffico	64
Figura 17 – Veicolo critico di progetto	65

Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Parametri di progetto conglomerato bituminoso tipo SMA.....	14
Tabella 2 – Prescrizioni per miscele con bitume modificato per strati di binder.....	14
Tabella 3 – Parametri di progetto per miscele con bitume modificato per strati di binder.....	15
Tabella 4 – Requisiti meccanici dei riciclati a freddo	15
Tabella 5 – Parametri elastici dei riciclati a freddo	15
Tabella 6 – Requisiti meccanici dei misti cementati	15
Tabella 7 – Parametri elastici dei misti cementati.....	17
Tabella 8 – Parametri elastici del sottofondo.....	18
Tabella 9 – Temperatura stagionale dell'aria.....	19
Tabella 10 – Temperatura stagionale della pavimentazione	20
Tabella 11 – Prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi alle diverse temperature	21
Tabella 12 – Numero complessivo di veicoli pesanti su 20 anni.....	22
Tabella 13 – Spettro di traffico BU CNR n°178	23
Tabella 14 – Numero totale di passaggi per tipologia di asse e per stagione.....	27
Tabella 15 – Caratteristiche degli assi e delle ruote	27
Tabella 16 – Sintesi dei risultati della pavimentazione di progetto	30
Tabella 1 – Parametri di progetto conglomerato bituminoso Asphalt Rubber.....	39
Tabella 2 – Prescrizioni per miscele con bitume modificato per strati di binder.....	40
Tabella 3 – Parametri di progetto per miscele con bitume modificato per strati di binder.....	40
Tabella 4 – Temperatura stagionale dell'aria.....	42
Tabella 5 – Temperatura stagionale della pavimentazione	44
Tabella 6 – Prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi alle diverse temperature	45
Tabella 7 – Sintesi dei risultati della pavimentazione di progetto	47
Tabella 8 – Caratteristiche meccaniche strato di usura	56
Tabella 9 – Parametri di progetto strato di usura.....	56



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

Tabella 10 – Prescrizioni per miscele per strati di binder	56
Tabella 11 – Parametri di progetto per miscele per strati di binder	57
Tabella 12 – Requisiti meccanici dei misti cementati	57
Tabella 13 – Parametri elastici dei misti cementati.....	58
Tabella 14 – Parametri elastici della fondazione	59
Tabella 15 – Parametri elastici del sottofondo.....	59
Tabella 16 – Temperatura stagionale dell'aria.....	60
Tabella 17 – Temperatura stagionale della pavimentazione	62
Tabella 18 – Prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi alle diverse temperature	63
Tabella 19 – Caratteristiche dello pneumatico.....	65
Tabella 20 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: inverno	66
Tabella 21 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: inverno	66
Tabella 22 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: primavera	66
Tabella 23 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: primavera	66
Tabella 24 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: estate	66
Tabella 25 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: estate	66
Tabella 26 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: autunno	67
Tabella 27 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: autunno	67

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



OP INGEENRIA SRL
Società di Ingegneria Civile
info@opingenria.com - www.opingenria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. **Marradi** | Prof. Ing S. **Pagliara** | Ing. M. **Ascoli** | Dott. P. **Turin**

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W.
Salvatore

Prof. Ing. N.
Squeglia

4



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA PAVIMENTAZIONE

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



DP INGEENNERIA SRL
Società di Ingegneria Civile
info@dpingegneria.com - www.dpingegneria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. **Marradi** | Prof. Ing S. **Pagliara** | Ing. M. **Ascoli** | Dott. P. **Turin**

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W.
Salvatore

Prof. Ing. N.
Squeglia

5



1. Premessa

L'oggetto del presente documento riguarda la progettazione definitiva delle pavimentazioni stradali appartenenti ad un più ampio progetto che prevede la realizzazione del nuovo collegamento fra lo svincolo della SGC FI-PI-LI e il centro abitato di Signa.

Con riferimento al progetto di fattibilità tecnica ed economica, il nuovo collegamento, tra lo svincolo della SGC FI-PI-LI e il centro abitato di Signa, si configura come un nuovo asse di penetrazione extraurbana tra la rete stradale principale e l'area urbana del Comune di Signa.

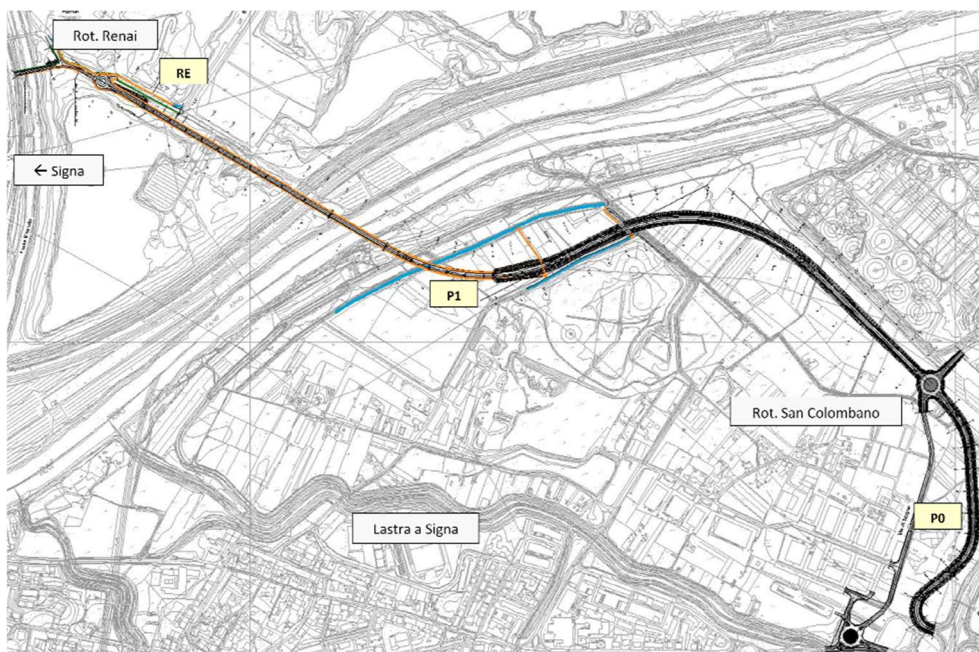


Figura 1 – Tracciato stradale da progetto di fattibilità tecnico-economica

La viabilità relativa al nuovo asse stradale è classificata come “Tipo C – Strada Extraurbana Secondaria”, ai sensi degli Articoli n°2 e n°3 – commi 8 e 50 del D.lg 285/1992 (Nuovo Codice della Strada). Nello specifico tale classificazione è riferita al tratto che si sviluppa dallo svincolo della SGC FI-PI-LI alla nuova rotatoria “Renai” (come riportato in figura), mentre il collegamento fra la stessa rotatoria ed il nuovo ponte sul Bisenzio è classificabile come “Tipo E – Strada Urbana di Quartiere”.

I dati necessari per il progetto di una pavimentazione stradale possono essere distinti in quattro categorie:

- volume e spettro di traffico;
- condizioni ambientali;
- materiale e loro caratteristiche fisico-meccaniche;
- modelli di degrado per la valutazione delle condizioni limite.

Le caratteristiche dei dati sono fortemente legate al tipo di progettazione richiesta e alla metodologia adottata; nel presente caso è stato scelto di condurre un'analisi razionale della pavimentazione ai fini delle verifiche di durabilità.

2. Pavimentazione da progetto di fattibilità

La progettazione della pavimentazione si inserisce in un più ampio progetto che prevede la realizzazione di un nuovo tronco stradale di collegamento dello svincolo della SGC FI-PI-LI con i centri abitati di Lastra a Signa e di Signa.



Questo nuovo collegamento, tra lo svincolo di Lastra a Signa della SGC FI-PI-LI ed il nuovo ponte sul Bisenzio nel comune di Signa, si configura come un nuovo asse stradale di penetrazione extraurbana tra la rete principale, rappresentata dalla SGC FI-PI-LI e l'area urbana del Comune di Signa. Il progetto stradale comprende, in sintesi, la realizzazione delle seguenti nuove opere:

- Nuovo asse stradale, di collegamento tra lo svincolo esistente di Lastra a Signa della FI-PI-LI ed il nuovo ponte in costruzione sul Bisenzio in località Signa, di classe funzionale "C" (strada extraurbana secondaria) ai sensi dell'art. 2 del Nuovo Codice della Strada;
- Due nuove rotatorie (San Colombano e Renai).

In uscita dallo svincolo di Lastra a Signa il traffico verrà indirizzato, verso la rotatoria di S. Colombano, la quale smisterà il traffico:

- verso il Comune di Signa imboccando il nuovo asse di penetrazione extraurbano;
- verso il centro della città di Lastra a Signa, collegandosi mediante Via di Stagno alla rete di penetrazione urbana, costituita da rampe e rotatorie la cui realizzazione non è inclusa nel presente progetto;
- verso la nuova area di espansione del Comune di Lastra a Signa ed il Parco Fluviale di Lastra a Signa, sempre attraverso la percorrenza di Via di Stagno,
- verso Est, con la viabilità che lambisce il depuratore e collega con via Vittorio Masiani.

Verso Nord la nuova strada in progetto terminerà con la rotatoria Renai che costituisce la transizione tra la viabilità extraurbana, rappresentata dal nuovo asse, e la rete stradale urbana del Comune di Signa. Infatti, attraverso la nuova rotatoria Renai si accede direttamente al nuovo ponte in costruzione sul fiume Bisenzio il cui calibro è quello di una strada urbana di quartiere (tipo E).

Il nuovo ponte sul Bisenzio, attraverso una intersezione a raso (che dovrà essere necessariamente potenziata per sopportare i nuovi flussi di traffico convogliati dal nuovo asse) consente di smistare il traffico sul Viale dell'Arte della Paglia che costeggia in riva destra il Bisenzio. Tramite quest'ultimo asse (la cui capacità di deflusso dovrà essere opportunamente verificata in relazione al nuovo traffico che la impegnerà) il traffico verrà distribuito verso Est, in direzione del nodo dell'Indicatore, e verso Ovest, in direzione centro città.

In fase di studio di fattibilità la scelta del tipo di sovrastruttura è stata fatta con riferimento a quanto previsto nel catalogo delle pavimentazioni CNR BU n°178.

La definizione degli strati della pavimentazione è stata condotta sulla base di considerazioni e ipotesi circa la tipologia di veicoli circolanti, le caratteristiche dei volumi di traffico, la vita utile attesa per la pavimentazione e la portanza del sottofondo. In particolare, tenuto conto della stimata forte presenza di veicoli pesanti, nonché dell'impegno complessivo della strada in termini di traffico, si è ritenuto opportuno adottare una sovrastruttura di tipo "semirigida" così da minimizzare sia le deformazioni degli strati bituminosi sia le tensioni verticali sul sottofondo.

Per il calcolo della stratigrafia della pavimentazione sono state effettuate le seguenti considerazioni ed ipotesi:

- Elevata presenza di veicoli pesanti,
- Modulo resiliente del sottofondo pari a circa 90 N/mm²;
- Vita utile della pavimentazione pari a 20 anni;
- Incremento medio annuo stimato del traffico di veicoli commerciali pari al 2%;
- Suddivisione equa del traffico lungo le due corsie, con riferimento ad un valore del 55% per tenere in considerazione di una certa direzionalità dello stesso nelle ore di punta.

Il progetto di fattibilità tecnico-economica prevede una struttura semirigida, con sezione tipo come risulta dalla seguente figura.

A.T.I.



23007_PD_STD_R_03_00*Relazione sulla pavimentazione_02

REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



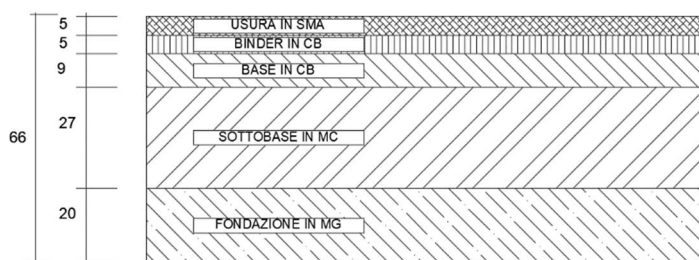
Prof. Ing. A. Marradi | Prof. Ing. S. Pagliara | Ing. M. Ascoli | Dott. P. Turin

CONSULENZA:

Prof. Ing. W. Salvatore
Prof. Ing. N. Squeglia

PAGINA

7



Strato	Sp. (cm)
Usura in SMA	5
Binder in CB trad.	5
Base in CB trad.	9
Sottobase in MC	27
Fondazione in Tout-Venant	20
Terreno di sottofondo $M_r = 90 \text{ N/mm}^2$	

Figura 2 – Pacchetto pavimentazione da progetto di fattibilità strada tipo C1

La pavimentazione del progetto di fattibilità è caratterizzata da uno strato di sottobase in misto cementato di elevato spessore posto al di sopra di una fondazione in misto granulare di spessore di 20 cm. Una pavimentazione semirigida, rispetto ad una flessibile, riesce a sopportare volumi di traffico nettamente più elevati, grazie alla maggior rigidezza dello strato di fondazione (o sottobase). Lo strato in misto cementato offre una maggior rigidezza che, col progredire della fessurazione, decresce fino a raggiungere valori simili ad un misto granulare non legato di ottime caratteristiche meccaniche. Una pavimentazione semirigida limita le sollecitazioni indotte dal traffico sul sottofondo, così da ridurre l'accumulo di deformazioni permanenti e quindi l'ormaiamento in superficie e, allo stesso tempo, preserva gli strati legati superficiali da eccessive sollecitazioni di trazione, garantendone una durabilità molto migliore.

In riferimento al "Catalogo delle Pavimentazioni stradali" CNR 178/95, la pavimentazione definita in fase di fattibilità può essere assimilata alle pavimentazioni presenti nella scheda di Catalogo N. 3SR per un valore del modulo di sottofondo di 90 N/mm^2 . In particolare, si osserva che risulta essere una soluzione intermedia fra quelle previste per i volumi di traffico di 10.000.000 e 25.000.000 di veicoli commerciali.

N. 3SR	STRADE EXTRAURBANE PRINCIPALI E SECONDARIE A FORTE TRAFFICO					
	Numero di passaggi di veicoli commerciali					
Modulo resiliente del sottofondo	400.000	1.500.000	4.000.000	10.000.000	25.000.000	45.000.000
150 N/mm^2	NON PREVISTO PER IL TIPO DI STRADA	PAVIMENTAZIONE SEMIRIGIDA NON ADATTA AL TIPO ED ENTITÀ DEL TRAFFICO				NON PREVISTO PER IL TIPO DI STRADA
90 N/mm^2		PAVIMENTAZIONE SEMIRIGIDA NON ADATTA AL TIPO ED ENTITÀ DEL TRAFFICO				

Figura 3 – Scheda di catalogo N.3SR

3. Catalogo pavimentazioni ANAS

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



OP INGEGNERIA S.R.L.
Società di Ingegneria Civile
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel.: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. Marradi | Prof. Ing. S. Pagliara | Ing. M. Ascoli | Dott. P. Turin

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W. Salvatore

Prof. Ing. N. Squeglia



Nel Capitolato Speciale di Appalto – Norme tecniche per l'esecuzione del contratto – Parte 2 – Appendice, sono riportate soluzioni di progetto delle pavimentazioni suddivise per tipologia di intervento (risanamento superficiale, risanamento profondo o nuova costruzione).

I risanamenti profondi assicurano la riclassificazione in alta durata delle pavimentazioni esistenti e comportano una completa demolizione delle pavimentazioni esistenti con parziale o totale riutilizzo dei materiali rimossi. Le realizzazioni di nuove pavimentazioni possono prevedere o meno l'utilizzo di materiale riciclato e sono state definite al fine di garantire elevata durabilità dell'opera. Anas, con lo sviluppo di queste soluzioni tipo si pone come obiettivo quello di garantire durate elevate della pavimentazione in funzione del traffico effettivamente circolante.

Il Capitolato fornisce diverse soluzioni progettuali suddivise in funzione del traffico e del tipo di materiali usati, progettate al fine di garantire una vita utile equivalente.

Di seguito si riportano le soluzioni tipologiche, fornite dal Capitolato Speciale di Appalto di ANAS, di caratteristiche simili alla sovrastruttura stradale definita in fase di progetto di fattibilità tecnico-economica, che sono state prese a riferimento per l'ottimizzazione della soluzione prevista nel progetto di fattibilità, anche tenendo conto dei criteri di sostenibilità ambientale definiti nei nuovi "CAM Strade" (sebbene non ancora entrati in vigore alla data di sviluppo del presente progetto).

Queste soluzioni fornite da ANAS costituiscono interventi tipo definiti in riferimento a specifici volumi di traffico al fine di garantire una durabilità di 20-25 anni, pertanto, potranno essere adottate soluzioni differenti rispetto ad esse, sia per gli spessori che per le tipologie di materiale impiegati; tuttavia, viene precisato che dovranno essere adottati comunque i materiali e le tipologie di lavorazioni contemplati nelle Norme Tecniche. Ovviamente queste modifiche e ottimizzazioni delle soluzioni progettuali previste da ANAS saranno tanto più accurate quanto migliori saranno le stime relative ai dati del traffico giornaliero medio e della distribuzione e percentuale dei veicoli commerciali.

Si evidenzia come le Norme Tecniche ANAS evidenziano come gli interventi proposti sono tutti caratterizzati dalla presenza di uno strato di sottobase realizzato in riciclato a freddo con bitume schiumato o, in alternativa, in misto cementato, al fine di conferire migliore supporto agli strati sovrastanti, garantendo al contempo sollecitazioni minori sul sottofondo, così da migliorare la durabilità dell'opera.

Sempre con riferimento all'aspetto di ottimizzazione dell'impatto ambientale delle nuove pavimentazioni ed alla massimizzazione dell'impiego di materiali riciclati, gli strati in conglomerato bituminoso sovrastanti prevedono sempre l'impiego a caldo di bitumi modificati con polimeri ed un parziale utilizzo di conglomerato bituminoso riciclato, oppure l'impiego in strati di base di emulsioni bituminose con materiale riciclato a freddo che può raggiungere il 100% del totale degli aggregati.

È necessario precisare che le soluzioni progettuali indicate da ANAS, e le rispettive durate previste, risultano valide nel rispetto delle ipotesi assunte e, pertanto, potranno essere garantite solamente attraverso il rispetto delle prescrizioni sui materiali previsti nelle stesse Norme Tecniche, come d'altra parte avviene anche per il Catalogo CNR utilizzato per il dimensionamento dello studio di fattibilità.

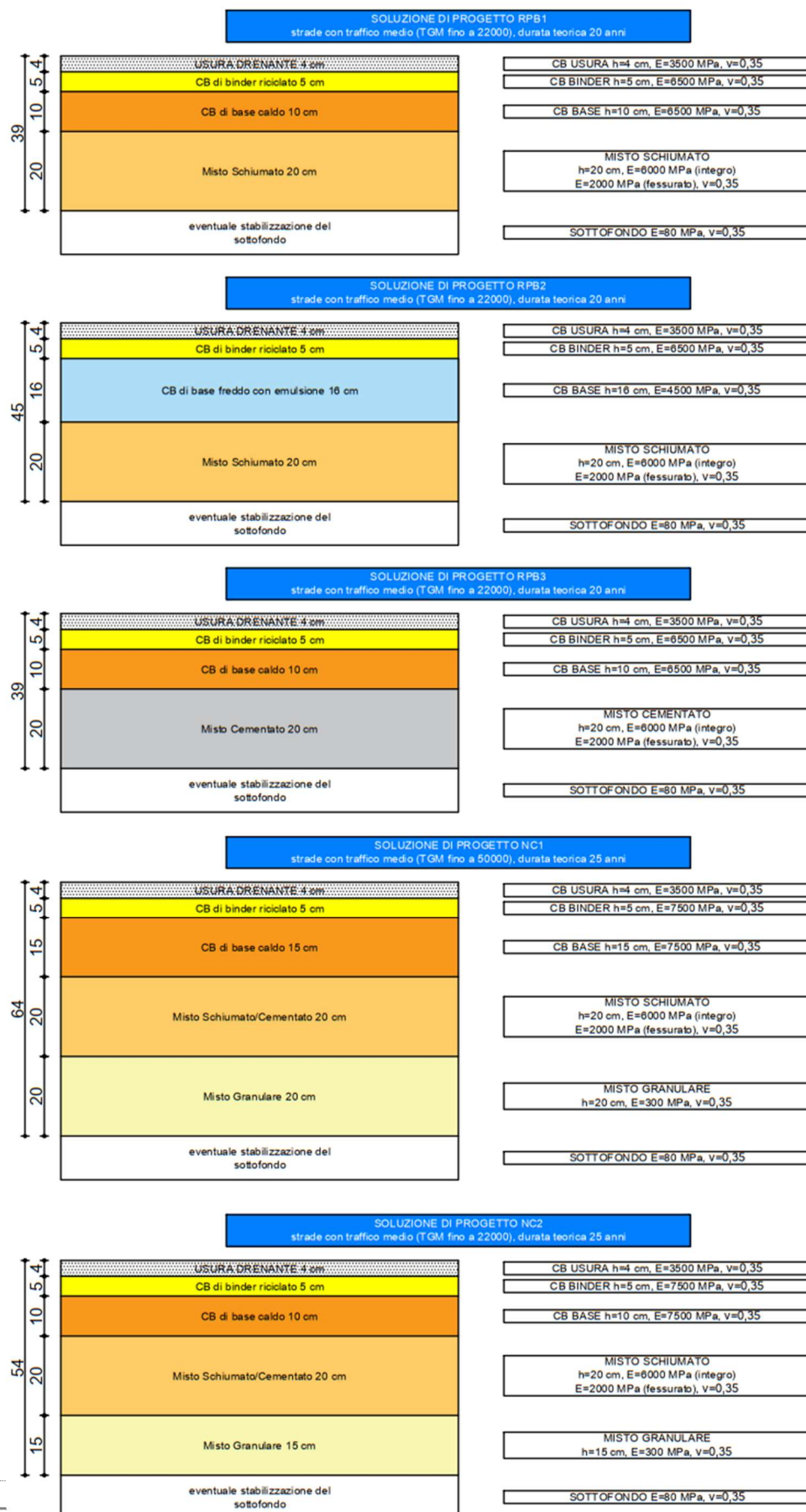
Si riportano di seguito le soluzioni estratte da ANAS che sono state analizzate per l'ottimizzazione del predimensionamento della sovrastruttura stradale in esame nel presente progetto.



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001



A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



OP INGEGNERIA S.R.L.
Società di Ingegneria Civile
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel.: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



AUSILIO



EMAGY

Prof. Ing. A. Marradi | Prof. Ing. S. Pagliara | Ing. M. Ascoli | Dott. P. Turin

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W.
Salvatore

Prof. Ing. N.
Squeglia

10



Figura 4 – Sovrastrutture stradali tipo da CSA ANAS

4. Dimensionamento pavimentazione

Il dimensionamento della pavimentazione è stato condotto con riferimento a quello definito in fase di progetto di fattibilità, al Catalogo CNR ed alle soluzioni progettuali previste da ANAS.

Uno degli obiettivi dell'ottimizzazione è stato quello di risolvere le problematiche associate alla pavimentazione di partenza (ad esempio lo spessore eccessivamente elevato dello strato di sottofondazione in misto cementato, 27 cm) migliorandone la composizione, la gradualità nella variazione delle rigidità e la sostenibilità ambientale. Sono state pertanto apportate le seguenti modifiche alla sovrastruttura prevista nel progetto di fattibilità:

- tipologia di conglomerato bituminoso utilizzato per lo strato di binder;
- spessori e tipologia di materiale utilizzato per lo strato di base;
- spessori dello strato di sottobase in misto cementato;
- eliminazione dello strato in misto granulare.

In fase di studio di fattibilità tecnico-economica è stato previsto di realizzare lo strato di base della pavimentazione, della viabilità principale (strada tipo C) in conglomerato bituminoso tradizionale di spessore complessivo di 9 cm. Al fine di ottimizzare le prestazioni della sovrastruttura si prevede di sostituire il conglomerato bituminoso tradizionale con una base riciclata a freddo modificando opportunamente gli spessori.

È noto che questa tipologia di materiale, oltre a comportare un miglioramento delle caratteristiche di ecocompatibilità dell'opera, risulta caratterizzata da una suscettività termica molto minore rispetto a quella che compete ad un conglomerato bituminoso a caldo, con conseguente maggiore resistenza alla formazione di ormaie (fenomeno particolarmente preoccupante anche in considerazione di periodi estivi sempre più prolungati e con temperature massime sempre più elevate).

Come riportato nel Capitolato Speciale di Appalto ANAS – Norme tecniche per l'esecuzione del contratto – Parte 2, Edizione 2022, al capitolo 9, lo spessore compattato del singolo strato di base riciclato a freddo potrà variare da 14 a 20 cm. In base a queste indicazioni è stato previsto di sostituire i 9 cm di conglomerato bituminoso con 18 cm di base riciclata a freddo.

Si sottolinea che la sostituzione di 9 cm di base in conglomerato bituminoso tradizionale a caldo con 18 cm di riciclato a freddo rappresenta un significativo incremento di prestazione strutturale in quanto, come riportato nell'AIPCR – Guidelines for Pavement Recycling (*using the catalogue of pavement strengthening solutions from the Ministry of Public Works in Spain*), esiste un fattore di equivalenza cautelativo di 0,75 fra le miscele riciclate a freddo con emulsione bituminosa e i conglomerati bituminosi a caldo, ovvero che ad ogni centimetro di strato in riciclato a freddo equivalgono 0,75 cm di conglomerato bituminoso a caldo.

Pertanto, secondo tale correlazione cautelativa, i previsti 18 cm di riciclato a freddo corrispondono ad oltre 13 cm di conglomerato bituminoso a caldo.

La pavimentazione di progetto di fattibilità prevede la realizzazione di 27 cm di sottobase in misto cementato. Tuttavia, tale spessore risulta costruttivamente eccessivo per essere realizzato in singolo strato e troppo esiguo per essere realizzato con due distinti strati; infatti, sempre in riferimento al Capitolato Speciale di Appalto – Norme tecniche per l'esecuzione del contratto – Parte 2 (capitolo 2), *“il misto cementato per fondazione sarà costituito da una miscela di aggregati lapidei, impastata con cemento ed acqua in impianto centralizzato con dosatori a peso o a volume, da stendersi in un unico strato dello spessore finito di norma di 20 cm e comunque variabile secondo le indicazioni della DL”*.

Sulla base di tali indicazioni e tenuto conto dell'incremento prestazionale fornito dallo strato di base in riciclato a freddo, si è prevista una riduzione dello spessore del misto cementato a 20 cm.



La pavimentazione di progetto sottoposta a verifica presenta pertanto le seguenti caratteristiche:

- | | |
|---|-----------|
| • Strato di usura in SMA | sp. 5 cm |
| • Strato di binder in conglomerato bituminoso modificato | sp. 5 cm |
| • Strato di base in riciclato a freddo con emulsione modificata | sp. 18 cm |
| • Strato di fondazione in misto cementato | sp. 20 cm |
| • Strato di sottofondo (rilevato) | |

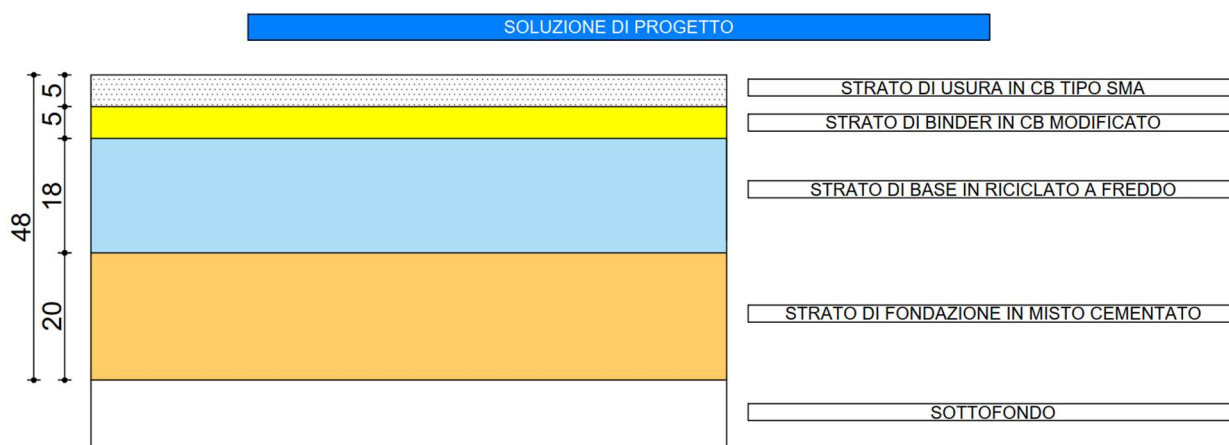


Figura 5 – Dimensioni pavimentazione di progetto

Si osserva come la soluzione individuata sia assimilabile alla tipologia ANAS RPB2, pertanto, al fine di condurre le verifiche in termini di durabilità della pavimentazione sotto le azioni dei carichi da traffico, è stato fatto riferimento ad un valore certamente cautelativo del traffico giornaliero medio pari a 22000 veic/giorno, con vita utile di progetto pari a 20 anni.

5. Criterio di verifica delle pavimentazioni

Nel presente capitolo vengono descritti in dettaglio i seguenti aspetti:

- il criterio adottato per la verifica della pavimentazione oggetto della presente attività progettuale;
- l'entità e la tipologia di traffico di progetto;
- le condizioni climatiche per la zona di intervento;
- le ipotesi assunte in merito alle caratteristiche prestazionali dei materiali;
- i criteri prestazionali (leggi di fatica) assunte per le verifiche di durabilità della sovrastruttura.

5.1. Metodo di progetto razionale

Il dimensionamento delle pavimentazioni stradali è rivolto a garantire adeguati livelli di durabilità alla sovrastruttura e al relativo sottofondo durante la sua "vita utile", ovvero per un periodo di tempo oltre il quale la degradazione da essa progressivamente subita per effetto del traffico e degli agenti atmosferici ne rende necessario il rifacimento totale o parziale. A tale scopo sono state proposte negli anni molteplici metodologie di progetto, sia di tipo empirico che basate su un'analisi razionale dello stato tenso-deformativo indotto nella pavimentazione per effetto delle sollecitazioni prodotte dai carichi di progetto.

Ai fini della presente verifica sono stati applicati i criteri del metodo di progetto razionale, di cui se ne riporta nella figura seguente il diagramma di flusso.



Tale metodologia di calcolo prevede la preliminare schematizzazione dell'insieme degli strati componenti la sovrastruttura in un multistrato elastico e la successiva determinazione dei valori delle tensioni e delle deformazioni indotte dai carichi nei vari strati. Tali valori di tensione e deformazione vengono successivamente confrontati con quelli che caratterizzano le resistenze dei materiali rispetto ai carichi ripetuti, consentendo di stimare il numero di ripetizioni di carico ammissibili attraverso l'utilizzo di opportune leggi di fatica.

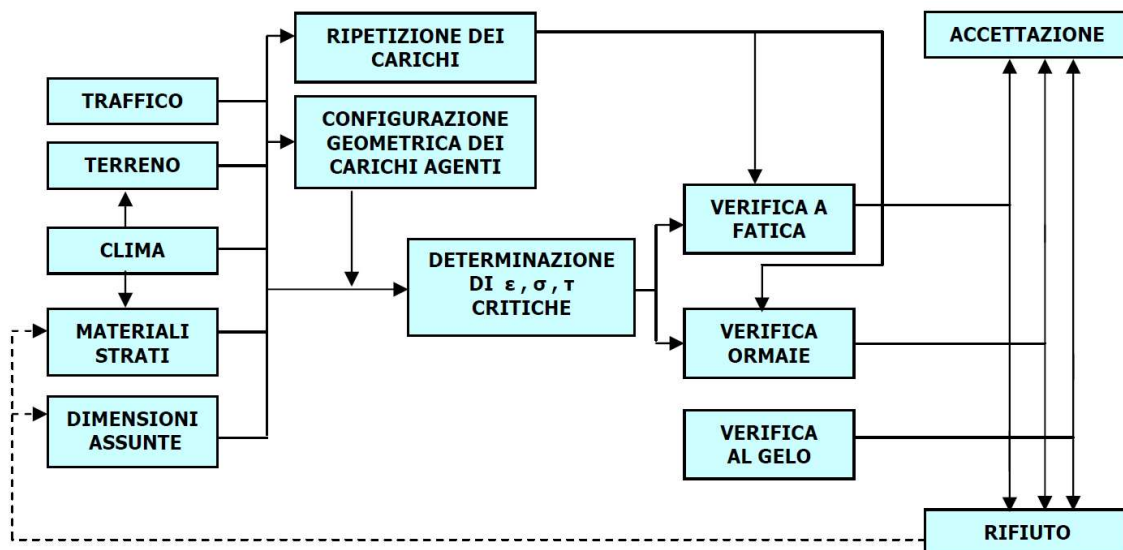


Figura 6 – Diagramma di flusso del metodo di dimensionamento razionale delle pavimentazioni stradali

La verifica della soluzione progettuale viene di norma eseguita sulla base della legge di accumulo lineare del danno proposta da Palmgren-Miner. Tale legge stabilisce quanto segue: siano $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$, k diversi livelli di tensione applicati rispettivamente per n_1, n_2, \dots, n_k cicli di carico senza nessun ordine particolare di applicazione, si verifica la rottura per fatica quando:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

dove:

- N_i è il numero di cicli di applicazione del carico che porterebbe a rottura il materiale qualora la tensione fosse sempre mantenuta uguale a σ_i (ripetizioni di carico massime ammissibili);
- n_i è il numero di ripetizioni di carico previste sulla base delle ipotesi di traffico assunte.

Nel caso delle pavimentazioni stradali si assumono come carichi di progetto l'insieme degli assi che competono allo spettro di traffico scelto per l'infrastruttura in esame, pertanto, il danno cumulativo viene determinato come somma del contributo fornito da ogni singolo asse, per ognuno dei periodi stagionali in cui viene suddiviso l'anno solare.

Nel caso in esame il calcolo dello stato tenso-deformativo è stato eseguito per mezzo di un software di modellazione della pavimentazione come multistrato elastico lineare. Lo schema della pavimentazione è da intendersi verificato qualora il danno cumulato per fatica risulti inferiore a 1.

6. Caratteristiche dei materiali

6.1. Conglomerato bituminoso per usura tipo sma



Questo conglomerato bituminoso è costituito da una miscela di inerti nuovi (ghiaie, pietrischi, graniglie, sabbie ed additivi) impastata a caldo con bitume semisolido, in impianti di tipo fisso automatizzati. Il conglomerato per i vari strati è posto in opera mediante vibrofinitrice e costipato. Ai fini del loro impiego i conglomerati bituminosi dovranno avere marcatura CE relativamente alle seguenti grandezze:

- Temperatura della miscela alla produzione e alla consegna (valori di soglia);
- Contenuto minimo di legante (categoria e valore reale);
- Composizione granulometrica (valore %);
- Contenuto dei vuoti a tre livelli di rotazione (categoria e valore reale).

I conglomerati bituminosi, per essere ritenuti idonei e quindi impiegabili, dovranno soddisfare i requisiti stabiliti dalla Norma armonizzata UNI EN 13108-5, Miscele bituminose - Specifiche del materiale – Conglomerato bituminoso antisdrucchiolo chiuso.

Il materiale deve presentare adeguata resistenza meccanica, cioè capacità di sopportare le sollecitazioni trasmesse dalle ruote dei veicoli senza deformazioni permanente, e sufficiente flessibilità per poter seguire sotto gli stessi carichi qualunque eventuale assestamento del sottofondo anche sul lungo periodo. Al fine di garantire tali prestazioni si prevede la modifica del legante bituminoso.

Ai fini dell'analisi dello stato tenso-deformativo risulta necessario schematizzare il materiale come un mezzo elastico lineare i cui parametri caratterizzanti le prestazioni meccaniche sono il modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Sulla base delle precedenti indicazioni sono stati fissati i seguenti parametri di progetto caratterizzanti il materiale ad una temperatura di 20 °C.

Valori di progetto	E @20°C [MPa]	v
Usura Tipo SMA	5000	0,35

Tabella 1 – Parametri di progetto conglomerato bituminoso tipo SMA

6.2. Conglomerato bituminoso modificato per stato di binder

Per la realizzazione dello strato di binder è previsto l'utilizzo di un conglomerato bituminoso modificato, ovvero un conglomerato per il cui legante bituminoso è prevista una modifica con specifici additivi necessaria a garantire elevata resistenza meccanica cioè capacità di sopportare senza deformazioni permanenti le sollecitazioni trasmesse dalle ruote dei veicoli.

Come riportato precedentemente, al fine di garantire adeguate prestazioni, i parametri da controllare risultano essere: la resistenza a trazione indiretta R_t , e il coefficiente di trazione indiretta CTI. In particolare, le miscele studiate in laboratorio, quelle prodotte in impianto e quelle prelevate alla stesa, compattate dovranno rispettare i seguenti limiti.

	T=25°C
R_t (GPa x 10 ⁻³)	0,95 – 1,70*
CTI (GPa x 10 ⁻³)	≥ 70

Tabella 2 – Prescrizioni per miscele con bitume modificato per strati di binder

*nei casi in cui la prova di trazione indiretta viene eseguita su miscele sfuse di conglomerato bituminoso prelevate in cantiere e successivamente riscaldate in laboratorio. Il valore massimo di R_t è aumentato di 0,25.

Ai fini dell'analisi dello stato tenso-deformativo risulta necessario schematizzare il materiale come un mezzo elastico lineare i cui parametri caratterizzanti le prestazioni meccaniche sono il modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Ai fini dell'analisi sono stati fissati i seguenti parametri di progetto caratterizzanti il materiale ad una temperatura di 20 °C.



Valori di progetto	E @20°C [MPa]	v
Binder	7000	0,35

Tabella 3 – Parametri di progetto per miscele con bitume modificato per strati di binder

6.3. Riciclato a freddo con emulsione bituminosa modificata e cemento

La miscela costituita da misto riciclato a freddo con emulsione bituminosa e cemento viene realizzata mediante attrezzature idonee che consentono di impastare, stendere e compattare la miscela ottenuta da materiali riciclati quali, ad esempio, conglomerati bituminosi fresati, emulsione bituminosa, cemento, acqua ed eventuali additivi.

A livello di caratterizzazione prestazionale si ha che il materiale deve presentare adeguata resistenza a trazione; nella seguente tabella sono riportati i valori di resistenza considerati nel caso specifico.

Parametro	Valore
Resistenza a trazione indiretta a 72 ore	$R_t \geq 0.35 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente di trazione indiretta CTI a 72 ore	$CTI \geq 70 \text{ N/mm}^2$

Tabella 4 – Requisiti meccanici dei riciclati a freddo

Al fine di eseguire un'analisi razionale, sono stati fissati un modulo elastico, e un coefficiente di Poisson, per la fase non fessurata di comportamento del materiale (fase 1), alla temperatura di 20°C, pari a:

Riciclato a freddo	
E @20°C [MPa]	2500
v	0.25

Tabella 5 – Parametri elastici dei riciclati a freddo

6.4. Misto cementato

L'utilizzo del misto cementato negli strati di sottobase o di fondazione della pavimentazione, con valori di rigidità notevolmente più elevati rispetto ai materiali non legati, garantisce una vita utile maggiore della sovrastruttura stradale, anche per volumi di traffico elevati.

Questo materiale, per effetto della ripetizione delle azioni dei carichi da traffico nel tempo si degrada, fessurandosi, riducendo la sua rigidità da un valore iniziale massimo a quello finale, prossimo a quello di un materiale non legato. Il valore iniziale a sua volta dipende dalle azioni prodotte dai mezzi di cantiere in fase di stesa e dal ritiro termo-igrometrico.

Tale strato, nel suo complesso è costituito da una miscela di aggregati lapidei, impastata con cemento ed acqua in impianto centralizzato con dosatori a peso o a volume, da stendersi in un unico strato dello spessore finito di norma di 20 cm. La miscela, dopo adeguato tempo di stagionatura, deve raggiungere una resistenza meccanica durevole anche in presenza di acqua e gelo.

A livello di caratterizzazione prestazionali i parametri da controllare risultano essere la resistenza a trazione R_t e la resistenza a compressione R_c . Nello specifico i parametri devono rispettare i valori seguenti.

	Valutate a 3 gg	Valutate a 7 gg
R_t 25°C (GPa x 10-3)	0,30-0,5	0,32-0,60
R_c 25°C (GPa x 10-3)	1,4-3,6	2,5-5,5

Tabella 6 – Requisiti meccanici dei misti cementati



Il ricorso ad una fondazione in misto cementato fornisce un maggiore supporto agli strati superficiali in conglomerato bituminoso e garantisce una migliore diffusione delle tensioni indotte dai carichi statici sul sottofondo.

Il comportamento di questo materiale viene generalmente schematizzato secondo due successive fasi distinte: inizialmente, il materiale è caratterizzato da un modulo elastico corrispondente ad una condizione di iniziale fessurazione, dovuta esclusivamente ai fenomeni di ritiro termo-igrometrico ed alle prime applicazioni di carico. In seguito, il ripetuto passaggio dei veicoli comporta l'insorgere di fessurazioni progressive a cui si accompagna una riduzione di rigidità, fino al raggiungimento di uno strato granulare equivalente in cui il materiale è assimilabile ad un misto granulare ad elevate prestazioni.

È noto che si dalla fase di stesa e indurimento, senza necessariamente tenere in conto del degrado per fessurazione prodotta dalle azioni dei carichi, il misto cementato subisce lesioni per effetto dei fenomeni di ritiro e di variazione termica; pertanto, i valori di riferimento del modulo elastico riportati in letteratura considerano questi aspetti e consigliano di fare riferimento a valori compresi fra i 1500 e i 3000 MPa.

Ai fini delle verifiche, il valore del modulo elastico attribuibile a tale materiale risulta essere rappresentato dall'Effective Long Term Stiffness (ELTS), il quale è un indicatore relativo alla rigidità dello strato nel lungo periodo che tiene conto degli effetti dovuti al traffico, nonché, delle variazioni stagionali. Di seguito è riportata una figura, estratta dal "Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials – TG2 – Third Edition – June 2020", che mostra come varia il modulo in funzione del numero di ripetizione di carico.

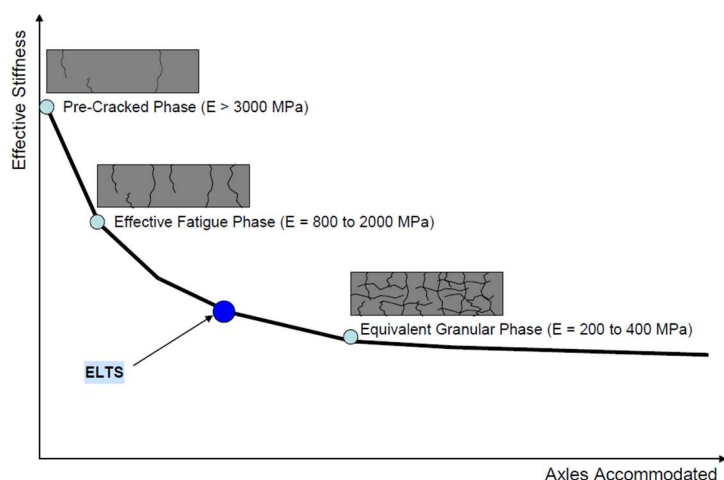


Figura 7 – Effective Long Term Stiffness (ELTS)

Va inoltre osservato che a parità di materiale e di numero di ripetizioni di carico il valore di ELTS varia in funzione della rigidità del materiale sottostante.

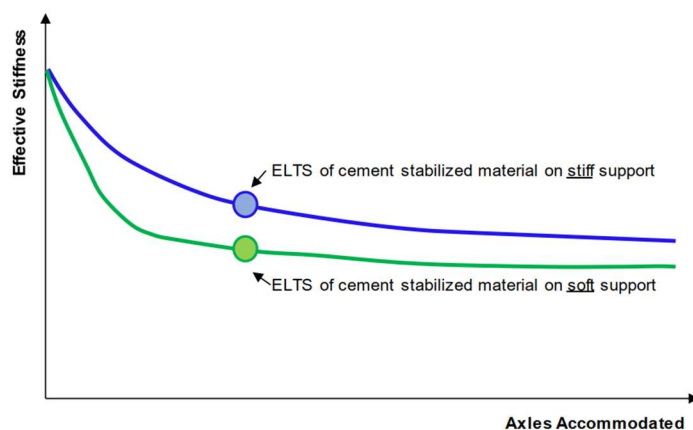


Figura 8 – Variazione ELTS in funzione del supporto

Nella tabella sottostante sono indicati i valori del modulo elastico e del coefficiente di Poisson definiti, sulla base delle precedenti osservazioni, ai fini dell'analisi.

	E [MPa]	v
Misto cementato	2000	0,25

Tabella 7 – Parametri elastici dei misti cementati

6.5. Sottofondo

Il sottofondo è il volume di terreno nel quale risultano ancora sensibili le sollecitazioni indotte dal traffico stradale e trasmesse dalla pavimentazione; rappresenta la zona di transizione fra il terreno in sito e la pavimentazione (nelle sezioni in trincea o a raso campagna) ovvero tra il rilevato e la pavimentazione.

Per assicurare i requisiti richiesti ai sottofondi delle pavimentazioni stradali è necessario prevedere la realizzazione di uno strato di caratteristiche idonee a coniugare le imperfezioni e le eterogeneità dei movimenti di terra con l'omogeneità richiesta per la posa in opera della pavimentazione.

Pertanto, questo strato deve consentire, per mezzo delle sue proprietà fisiche e meccaniche e tenuto conto dello spessore, di conferire adeguato supporto alla pavimentazione, in ogni suo punto, mediante una portanza sufficiente a garantire i livelli di stabilità e funzionalità ammessi nel progetto.

Nel caso in esame il tronco stradale in progettazione, per il collegamento dello svincolo della SGC FI-PI-LI al centro abitato di Signa, nei tratti in cui non è presente il ponte sul fiume Arno si sviluppa sempre in rilevato. Pertanto, il sottofondo è costituito dall'ultimo strato dei rilevati stradali.

Il sottofondo dovrà pertanto presentare caratteristiche in termini di portanza adeguate a fornire adeguato supporto alla pavimentazione, resistendo adeguatamente alle sollecitazioni indotte dai carichi da traffico. indicativamente il modulo di deformabilità per tali strati, misurato tramite prova di carico con piastra nell'intervallo di carico tra 0,15 – 0,25 N/mm², non dovrà risultare minore di 50 MPa. Questo valore di portanza minimo del modulo di deformazione del sottofondo corrisponde ad un valore di portanza espresso tramite l'indice CBR del 10 %.

$$CBR = 0,20 \cdot Md = 0,20 \cdot 50 = 10\%$$



Nei modelli razionali di dimensionamento delle pavimentazioni che utilizzano il multistrato elastico per il calcolo dello stato tenso-deformativo, il terreno di sottofondo viene caratterizzato mediante il modulo resiliente M_r . Tale parametro può essere determinato attraverso prove triassiali dinamiche a carichi ripetuti e caratterizza il comportamento visco-elastico del terreno. Data la complessità della prova, e il suo costo, impongono spesso la stima del modulo M_r attraverso correlazioni empiriche con i valori di portanza espressi attraverso l'indice CBR. Le correlazioni più utilizzate sono quelle di seguito riportate.

$$\begin{array}{lll} E_{sott} = 10 \cdot CBR & (CBR \leq 10) & [Heukelom \text{ e } Klomp] \\ E_{sott} = 5 \cdot CBR & (CBR > 10) & [Jeuffroy] \\ E_{sott} = 17,5 \cdot (CBR)^{0,64} & (-) & [MEPDG] \end{array}$$

Sulla base delle indicazioni riportate, ai fini dell'analisi, viene fissato un valore di CBR pari al 9% (prossimo al valore del 10% precedentemente indicato) coerentemente a quanto riportato nel progetto di fattibilità, corrispondente ad un modulo elastico dinamico di 90 MPa (circa il doppio del valore statico di 50 MPa sopra riportato).

Sottofondo naturale	
E [MPa]	90
v	0.40

Tabella 8 – Parametri elastici del sottofondo

7. Condizioni climatiche di progetto

Tra le condizioni ambientali, la temperatura influenza in modo determinante le caratteristiche di durabilità delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso in quanto caratterizza i valori del modulo di rigidità e il comportamento delle miscele a fatica, oltre ad avere notevole influenza nel meccanismo di formazione delle ormaie. Pertanto, influenzano fortemente il regime di sollecitazione indotto nella pavimentazione e ne condizionano il degrado e quindi la vita utile. Gli aspetti che devono essere attentamente valutati sono la modifica della portanza del sottofondo per effetto della presenza d'acqua e degli eventuali cicli di gelo e disgelo, e le caratteristiche meccaniche degli strati superficiali, in conglomerato bituminoso, per effetto delle temperature caratterizzanti gli strati che si instaurano nelle diverse stagioni.

La portanza del sottofondo non dovrebbe variare nel tempo in quanto essendo l'ultimo strato del rilevato risulta protetto dalla presenza delle acque di risalita capillare, nonché dalle acque meteoriche.

La temperatura caratterizzante gli stati della pavimentazione dipende dalle caratteristiche termiche dei materiali, dagli spessori, dalla profondità e dalle caratteristiche climatiche dell'ambiente in cui la pavimentazione si inserisce.

Al fine di condurre una analisi accurata delle temperature caratterizzanti gli strati in conglomerato bituminoso l'anno solare è stato suddiviso in quattro periodi stagionali, e in ognuno dei quali è stata determinata la temperatura media caratteristica dell'aria nella zona in cui l'infrastruttura in esame si inserisce.

Mesi	TMMA (°C)	Stagione	TMA Stagionale (°C)
Dicembre	8,9	Inverno	9,0
Gennaio	7,5		
Febbraio	9,8		
Marzo	10,4	Primavera	16,0
Aprile	13,6		



Maggio	19,1	Estate	25,0
Giugno	23,8		
Luglio	26,5		
Agosto	26,4		
Settembre	21,9	Autunno	17,0
Ottobre	16,8		
Novembre	12,5		

Tabella 9 – Temperatura stagionale dell'aria

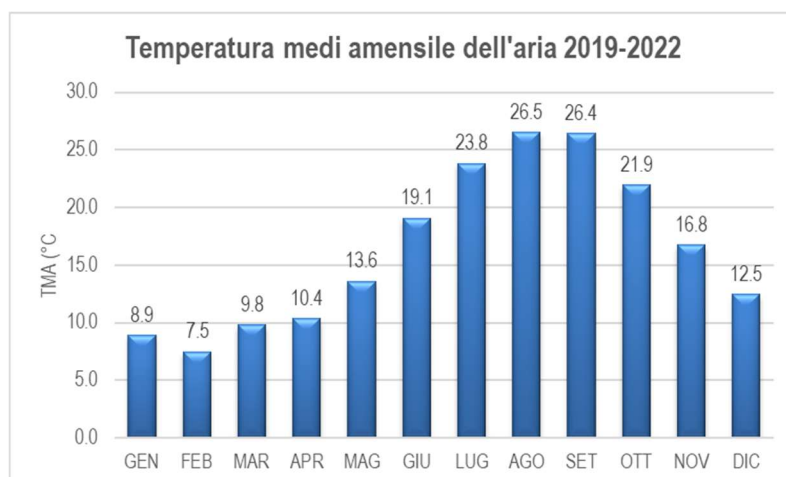


Figura 9 – Temperatura media mensile dell'aria 2019-2022

Sulla base dei valori di temperatura media mensile dell'aria, è stata ricavata la corrispondente temperatura media per gli strati in conglomerato bituminoso. Generalmente si ipotizza una temperatura dello strato costante, valutata alla profondità media. In Italia sono largamente utilizzati due leggi di variazione della temperatura: quella di Marchionna e quella di Barber.

Legge proposta di Witchaz e successivamente ripresa del Prof. Marchionna in "Modello di degrado strutturale delle pavimentazioni – fatica degli strati legati", di seguito riportata, correla la temperatura di uno strato bituminoso alla sola profondità "z" e alla temperatura media giornaliera stagionale dell'aria "TMA".

$$TMP(Z) = (1.467 + 0.043 * Z) + (1.362 - 0.005 * Z) * TMA$$

dove:

- TMA è la temperatura media stagionale dell'aria (°C);
- Z è la profondità, a partire dalla superficie, a cui si vuole calcolare la temperatura media (cm);
- TMP(Z) è la temperatura media stagionale della pavimentazione alla profondità Z (°C).

La legge di Barber offre una maggiore precisione nella determinazione della temperatura, considerandola non solo funzione della profondità ma anche del tempo.

$$TMP(z, t) = T_A + R + \left(3R + \frac{A_g}{2} \right) \cdot F \cdot e^{-C \cdot z} \cdot \sin(0,262 \cdot t - C \cdot z - \arctg(\frac{C}{H + C}))$$



Dove:

- $TMP(Z)$ è la temperatura media stagionale della pavimentazione alla profondità z e al tempo t ;
- T_A è la temperatura media giornaliera dell'aria ($^{\circ}C$);
- A_g è l'escursione media giornaliera della temperatura dell'aria;
- $R = (2/3)((b \cdot I)/(24h_c))$ è il contributo della radiazione solare ($^{\circ}C$);
- $H = h_c/K$;
- $h_c = 4,882 \cdot (1,3 + 0,4332 \cdot v^{3/4})$;
- $C = \sqrt{(0,131 \cdot w \cdot s)/k}$;
- $F = H/\sqrt{(H + C)^2 + C^2}$ (ora^{0,5}/m);
- I è la radiazione media giornaliera (kcal/m²gg);
- v è la velocità del vento (km/h);
- b è il grado di assorbimento della superficie (0,6-0,95);
- K è la conduttività termica (1,04-1,96) (kcal/m ora $^{\circ}C$);
- s è il calore specifico (0,193-0,22) (kcal/kg $^{\circ}C$);
- w è la massa volumica apparente (2400-2500) (kg/m³).

In entrambe le formule i dati climatici da utilizzare sono quelli relativi alla località interessata dall'infrastruttura.

I corrispondenti valori delle temperature della pavimentazione, sono riportati nella tabella seguente per ciascun periodo stagionale.

Stagione	Temperatura dello strato ($^{\circ}C$)		
	Tappeto di usura	Strato di binder	Strato di base
Inverno	13,4	13,4	13,4
Primavera	20,9	20,8	20,5
Estate	36,1	35,7	34,7
Autunno	24,6	24,4	23,9

Tabella 10 – Temperatura stagionale della pavimentazione

Nota la temperatura nei diversi strati della pavimentazione nei quattro periodi stagionali, si è proceduto alla correzione dei moduli di progetto degli strati bituminosi, assumendo come riferimento la temperatura di $20^{\circ}C$. In particolare, sulla base delle informazioni reperibili nella letteratura di riferimento e della pratica corrente, è stata applicata la legge proposta dall'Asphalt Institute, di cui si riporta di seguito l'espressione analitica:

$$E_{ref} = 10^{\alpha \cdot (T^2 - T_{ref}^2)} \cdot E$$

dove:

- T è la temperatura media stagionale dello strato (in $^{\circ}F$);
- T_{ref} è la temperatura di riferimento pari a $20^{\circ}C$ ($68^{\circ}F$);
- E è il modulo dello strato bituminoso alla temperatura media stagionale (MPa);
- E_{ref} è il modulo dello strato bituminoso alla temperatura di riferimento pari a $20^{\circ}C$ (MPa);
- α è il coefficiente che indica la suscettività termica del materiale.



L'influenza della temperatura sulle variazioni di rigidità dei materiali riguarda esclusivamente gli strati in conglomerato bituminoso e lo strato riciclato a freddo con emulsione bituminosa.

Nello specifico è stato fatto riferimento ad un valore del coefficiente di suscettività termica pari a:

- 0,00014 per gli strati in conglomerato bituminoso tradizionale, come suggerito dall'Asphalt Institute;
- 0,00012 per gli strati in conglomerato bituminoso modificato;
- 0,00003 per gli strati in conglomerato bituminoso riciclato a freddo.

Per lo strato di base riciclato a freddo le variazioni di rigidità con la temperatura sono decisamente basse, pertanto, sulla base di quanto riportato nell'articolo "Active Filler's Effect on In-Situ Performances of Bitumen Emulsion Recycled Mixtures - G. Betti, G. Airey, K. Jenkins, A. Marradi, G. Tebaldi", è stato fissato un coefficiente di suscettività termica di 0,00003.

7.1. Caratteristiche meccaniche

Il comportamento meccanico degli strati bituminosi, a causa della componente viscosa che caratterizza tali materiali, dipende dalla temperatura di esercizio. È necessario, pertanto, tenere conto di questo aspetto nella determinazione del modulo elastico "E" da assumere per il calcolo dello stato tenso-deformativo secondo il metodo razionale. I moduli caratterizzanti i materiali nelle diverse stagioni sono pertanto riassunti nella seguente tabella:

Stagione	Moduli (MPa)		
	Tappeto di usura	Strato di binder	Strato di base
T _{ref}	5000	7000	2500
Inverno	7800	10800	2800
Primavera	4800	6800	2500
Estate	1400	2000	1900
Autunno	3700	5200	2300

Tabella 11 – Prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi alle diverse temperature



8. Definizione traffico di progetto

La definizione dei carichi da traffico che impegnano la sovrastruttura nel periodo di analisi (vita utile prevista) è un aspetto complesso, soprattutto quando si utilizzano i metodi razionali per l'analisi e la progettazione. Questi dati, così come gli altri elementi a base dell'analisi, possono essere assunti secondo vari livelli di accuratezza. Il livello più accurato risulta essere quello che prevede una ricerca dettagliata dei dati di traffico con misure e conteggi in sito (evidentemente non applicabili nel caso di un ramo di nuova costruzione, come quello in esame), mentre gli altri livelli si basano su dati stimati sulla base di modellazioni e informazioni ricavate dalla letteratura.

Per una corretta previsione del comportamento della sovrastruttura, nei modelli di calcolo tensionale, dovrebbero essere utilizzati i carichi che effettivamente corrispondano alle azioni degli assi dei veicoli commerciali in movimento sulla superficie stradale per quanto concerne le masse, la configurazione geometrica, il numero di ripetizioni e il tempo di applicazione.

Il dato di partenza per la definizione del traffico di progetto è il traffico giornaliero medio (TGM) di progetto della pavimentazione. Partendo da tale dato, e in funzione della percentuale di veicoli commerciali, della ripartizione direzionale, della distribuzione per corsia, della vita utile e del tasso di crescita dei veicoli commerciali, potrà essere valutato il numero complessivo di veicoli circolanti sulla pavimentazione durante la vita utile prevista, nella corsia più sollecitata attraverso la seguente espressione:

$$N = 365 \cdot TGM \cdot v_p \cdot F \cdot \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Dove:

- TGM traffico giornaliero medio;
- v_p percentuale di veicoli commerciali (peso maggiore di 3 tonnellate);
- F coefficiente di ripartizione direzionale;
- r tasso di incremento annuo del traffico pesante;
- n vita utile di progetto della pavimentazione.

Per la pavimentazione in esame è stata caratterizzata prevista una vita utile di 20 anni e un traffico giornaliero medio di 22000 veic/giorno. Inoltre, coerentemente con il progetto di fattibilità tecnico-economica, anche per il progetto definitivo in oggetto, è stato fissato un tasso di incremento annuo stimato dei veicoli pesanti del 2% ed un coefficiente di ripartizione direzionale del 55% per tenere conto di un effetto di direzionalità del traffico nelle ore di punta.

Per quanto riguarda la percentuale di veicoli pesanti è stato fatto riferimento alle indicazioni riportate nel Capitolato Speciale di Appalto di ANAS per gli interventi di nuova costruzione. Nello specifico viene indicato che, per le soluzioni idonee in contesto di tipo strade extraurbane, la percentuale di veicoli commerciali può raggiungere valori fino al 10% del totale; pertanto, in via cautelativa è stata fissata una percentuale pari al 10%.

Di conseguenza il numero complessivo di veicoli pesanti circolanti sulla pavimentazione in oggetto nell'arco dei 20 anni di vita utile risulta pari a:

Volume di traffico complessivo di veicoli pesanti	
N (veicoli)	10.600.000

Tabella 12 – Numero complessivo di veicoli pesanti su 20 anni

Il secondo elemento fondamentale per la definizione del traffico di progetto è legato alla definizione dello spettro di traffico. Il Catalogo delle Pavimentazioni Stradali, CNR BU 178/95, definisce veicolo commerciale, ai fini della progettazione di una



pavimentazione, quello con massa superiore a 3 tonnellate. Per ogni tipologia di strada individua uno spettro di traffico di veicoli commerciali suddivisi in 16 categorie riportate nelle figure 10 e 11 seguenti.

Come riportato il nuovo tronco stradale, ad eccezione dell'ultimo tratto, risulta classificabile ai sensi del Nuovo Codice della Strada come una strada "Tipo C – Strada Extraurbana Secondaria". Tuttavia, essendo il tronco stradale in oggetto di collegamento fra la SGC FI-PI-LI e il centro abitato di Signa è stato deciso, in via cautelativa, di fare riferimento allo spettro di traffico definito per le strade "extraurbane principali e secondarie a forte traffico" caratterizzato dalla presenza di più componenti di traffico pesante, e quindi più gravoso ai fini della presente analisi.

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	12,2	-	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,1	-	-	12,2
2. autostrade urbane	18,2	18,2	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	18,2	27,3	-
3. strade extr. 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 extr. secondarie ordinarie	-	-	58,8	29,4	-	5,9	-	2,8	-	-	-	-	0,2	-	-	2,9
5. strade extr. sec. turistiche	24,5	-	40,8	16,3	-	4,15	-	2	-	-	-	-	0,05	-	-	12,2
6. strade urb. di scorrimento	18,2	18,2	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	18,2	27,3	-
7. strade urb. di quartiere e locali	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-
8. corsie preferenziali	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	53	-

Tabella 13 – Spettro di traffico BU CNR n°178

Le tipologie di mezzi presenti all'interno di tale spettro sono state successivamente caratterizzate in termini di numero e tipologia di assi, secondo la schematizzazione del B.U. CNR n.178/95.

Sulla base dello spettro previsto, è stato possibile determinare il numero e la tipologia di assi che transiteranno sulla pavimentazione, nell'arco dell'intera vita utile, per ogni stagione climatica (Tabella 14).

In particolare, in via cautelativa, è stato ipotizzato che non vi sia sovrapposizione del carico prodotto dagli assi multipli (tandem o tridem), andandoli a considerare come assi singoli. Tale ipotesi risulta cautelativa in quanto nella realtà il danno prodotto alla pavimentazione da tale tipo di asse è sempre inferiore a quello dovuto al passaggio di un numero eguale di assi singoli di egual peso.

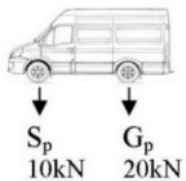
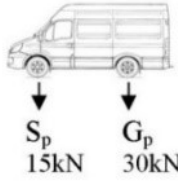
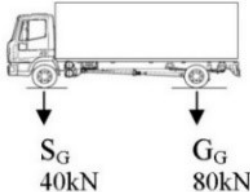
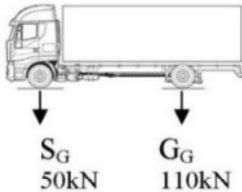
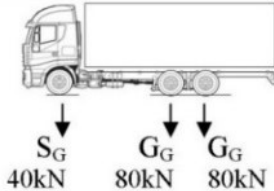
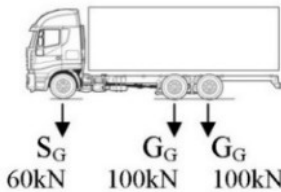
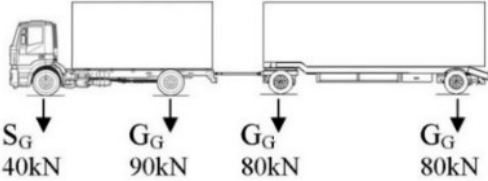
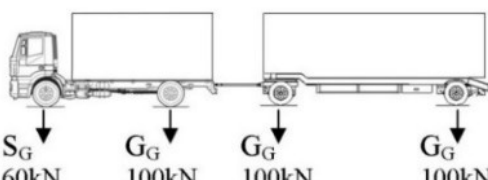
Si riportano di seguito le caratteristiche, in termini di tipologia di assi presenti, dei veicoli commerciali circolanti sul territorio italiano. Inoltre, sono riportate le tabelle con il numero effettivo di passaggi per tipologia di asse per ogni stagione climatica e le caratteristiche geometriche di ogni asse componente lo spettro di traffico.



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

ID	Tipo di veicolo	Configurazione ruote e assi
1	Autocarri leggeri	
2	Autocarri leggeri	
3	Autocarri medi e pesanti	
4	Autocarri medi e pesanti	
5	Autocarri pesanti	
6	Autocarri pesanti	
7	Autotreni e autoarticolati	
8	Autotreni e autoarticolati	

A.T.

MANDATARIA



MANDANTE



DP INGENIERIA SRL
Società di Ingegneria Civile
info@dpingegneria.com - www.dpingegneria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



AUSILIO



EMAGY

Prof. Ing. A. Marradi | Prof. Ing S. Pagliara | Ing. M. Ascoli | Dott. P. Turin

Prof. Ing. W. Salvatore

Prof. Ing. N. Squeglia



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

Figura 10 - Caratteristiche dei mezzi commerciali circolanti sul territorio italiano (B.U. C.N.R. n. 178/95)

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



OP INGEENNERIA SRL
Società di Ingegneria Civile
info@opingegneria.com - www.opingegneria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. **Marradi** | Prof. Ing S. **Pagliara** | Ing. M. **Ascoli** | Dott. P. **Turin**

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W.
Salvatore

Prof. Ing. N.
Squeglia

25



ID	Tipo di veicolo	Configurazione ruote e assi
9	Autotreni e autoarticolati	 S _G 40kN G _G 80kN G _G 80kN G _G 80kN G _G 80kN
10	Autotreni e autoarticolati	 S _G 60kN G _G 90kN G _G 90kN G _G 100kN G _G 100kN
11	Autotreni e autoarticolati	 S _G 40kN G _G 100kN S _M 80kN S _M 80kN S _M 80kN
12	Autotreni e autoarticolati	 S _G 60kN G _G 110kN S _M 90kN S _M 90kN S _M 90kN
13	Mezzi d'opera	 S _G 50kN G _G 120kN S _M 130kN S _M 130kN S _M 130kN
14	Autobus urbani	 S _G 40kN G _G 80kN
15	Autobus extraurbani	 S _G 60kN G _G 100kN
16	Autobus turistici	 S _G 50kN G _G 80kN

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



DP INGENGERIA S.R.L.
Società di Ingegneria Civile
info@dpingegneria.com - www.dpingegneria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. Marradi | Prof. Ing S. Pagliara | Ing. M. Ascoli | Dott. P. Turin

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W. Salvatore

Prof. Ing. N. Squeglia



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

Figura 11 - Caratteristiche dei mezzi commerciali circolanti sul territorio italiano (B.U. C.N.R. n.178/95)

ID asse	Carico sull'asse (kN)	Totale Vita Utile	Totale Stagioni			
		N° passaggi dell'asse	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Sp_15	15	1,386,635	341,910	345,709	349,508	349,508
Gp_30	30	1,386,635	341,910	345,709	349,508	349,508
Sg_40	40	5,842,920	1,440,720	1,456,728	1,472,736	1,472,736
Sg_50	50	2,275,775	561,150	567,385	573,620	573,620
Sg_60	60	1,079,670	266,220	269,178	272,136	272,136
Gg_80	80	8,616,190	2,124,540	2,148,146	2,171,752	2,171,752
Gg_90	90	804,460	198,360	200,564	202,768	202,768
Gg_100	100	2,148,755	529,830	535,717	541,604	541,604
Gg_110	110	1,386,635	341,910	345,709	349,508	349,508
Gg_120	120	52,925	13,050	13,195	13,340	13,340
Gg_130	130	158,775	39,150	39,585	40,020	40,020
Sm_80	80	825,630	203,580	205,842	208,104	208,104
Sm_90	90	825,630	203,580	205,842	208,104	208,104

Tabella 14 – Numero totale di passaggi per tipologia di asse e per stagione

Carico sull'asse (kN)	Carico sulla ruota (kN)	Tipo di asse	Raggio d'impronta (cm)	Superficie d'impronta di un singolo pneumatico (cm²)	Distanza (d) e/o carreggiata (c) (cm)	Pressione di gonfiaggio (kPa)
10	5	Sp	7,98	200	150	250
15	7,5		8,26	214		350
20	5	Gp	7,28	166	30/180	300
30	7,5		8,26	214		350
40	20	Sg	9,9	308	210	650
50	25		10,13	322		775
60	30		10,93	375		800
80	20	Gg	9,9	308	40/216	650
90	22,5		9,94	310		725
100	25		10,13	322		775
110	27,5		10,46	343		800
120	30		10,93	375		800
130	65		11,37	406		800
80	40	Sm	14	615	196	650
90	45		14,05	620		725

Tabella 15 – Caratteristiche degli assi e delle ruote

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



23007_PD_STD_R_03_00*Relazione sulla pavimentazione_02

REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



OP INGENGERIA S.R.L.
Società di Ingegneria Civile
info@opingenzeria.com - www.opingenzeria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel.: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



AUSILIO



EMAGY

Prof. Ing. A. Marradi | Prof. Ing. S. Pagliara | Ing. M. Ascoli | Dott. P. Turin

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W. Salvatore
Prof. Ing. N. Squeglia

27



9. Leggi di fatica

Le leggi di fatica utilizzate per le verifiche di durabilità sono state ricavate dalla letteratura internazionale con riferimento alle caratteristiche specifiche dei materiali impiegati nella pavimentazione in progetto.

9.1. Strati in conglomerato bituminoso

Per gli strati in conglomerato bituminoso il valore massimo della deformazione per trazione indotta dal passaggio dei veicoli risulta massima, e quindi più critica, alla base dello strato stesso. Il ripetersi nel tempo di tali stati tenso-deformativi connessi ai diversi carichi di progetto produce l'innescio di fessurazioni alla base dello strato, che successivamente migrano fino ad affiorare in superficie.

Nel caso in esame la durabilità dei conglomerati bituminosi è stata stimata mediante la legge di fatica proposta dell'Asphalt Institute, di cui se ne riporta di seguito l'espressione analitica:

$$N = 0.0796 \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$$

dove:

- E modulo elastico (psi);
- ε_t deformazione orizzontale di trazione alla base del conglomerato bituminoso (strain).

9.2. Base riciclata a freddo

Nel caso in esame, per il materiale costituente lo strato di base delle pavimentazioni, la durabilità è stata stimata mediante la legge di fatica proposta da Santucci per i riciclati a freddo con emulsione bituminosa, la quale risulta:

$$N = 10^{\left[4.84 \cdot \left(\frac{V_B}{V_V + V_B} - 0.69\right)\right]} \cdot \left(\frac{1}{10^6 \cdot \varepsilon_t} \cdot 7612 \cdot E^{-0.1407}\right)^{\frac{1}{0.1814}}$$

dove:

- E modulo elastico espresso in MPa;
- ε_t deformazione orizzontale di trazione alla base del riciclato a freddo espressa in $\mu\epsilon$;
- V_B contenuto volumetrico di bitume;
- V_V contenuto di vuoti.

9.3. Misti cementati

Questi materiali sono caratterizzati da un comportamento evolutivo. La vita utile viene pertanto suddivisa in due fasi:

- Fase 1: il materiale si comporta come un materiale legato; pertanto, la prestazione strutturale richiesta è in termini di resistenza a fatica rispetto agli stati tenso-deformativi di trazione. In particolare, il modulo elastico associato è caratterizzante il materiale non fessurato.
- Fase 2: il materiale si comporta come un misto granulare equivalente in quanto lo strato è completamente fessurato in elementi di piccole dimensioni; pertanto, non vi è più continuità strutturale. La prestazione richiesta è in questo caso relativa alla resistenza all'ormaiamento, cioè accumulo di deformazioni verticali permanenti.

In letteratura sono presenti molti modelli che rappresentano il comportamento a fatica dei materiali legati idraulicamente anche se conducono a risultati spesso molto diversi. I modelli si basano su relazioni empiriche che forniscono il numero di ripetizioni di carico che portano a rottura per fatica lo strato in funzione del rapporto tra la tensione massima di trazione, indotta dai carichi alla base dello strato legato, e la massima tensione ammissibile del materiale. Nel caso in esame, la durabilità dei misti cementati in fase 1 è stata stimata mediante la legge di fatica proposta da Ferrari - Giannini, di cui se ne riporta di seguito l'espressione analitica:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{t-R}} = 1 - 0.045 \cdot \log(N)$$



dove:

- σ_t tensione di trazione;
- σ_{t-R} resistenza a trazione del materiale posta cautelativamente pari a 0.40 MPa.

Il valore di danno ricavato tramite questa legge di degrado risulta pertanto essere funzione dello stato tensionale di trazione che si genera alla base dello strato di fondazione e della resistenza a trazione del materiale. Le tensioni di trazione indotte dai carichi sono determinate alla base della fondazione mediante l'analisi tenso-deformativa condotta attraverso specifici software, mentre per quanto riguarda la resistenza a trazione caratterizzante il materiale è stato preso come riferimento un valore ricadente nell'intervallo di resistenza riportato in tabella 6. Il risultato della valutazione del danno a fatica è pertanto fortemente dipendente da quanto previsto in termini di resistenza. Si sottolinea che è stato previsto per questo parametro un valore superiore al valore minimo ammissibile, dopo tre giorni di maturazione (quindi a breve termine), in quanto, come noto, il processo di maturazione prosegue nel tempo con conseguente incremento delle resistenze (a trazione e compressione). Pertanto, il parametro minimo di capitolato risulta caratterizzare il materiale in fase di controllo della realizzazione dell'opera mentre durante la fase d'uso, ovvero, quando effettivamente la pavimentazione è soggetta alle azioni dei carichi da traffico, le resistenze in gioco risulteranno notevolmente maggiori. Sulla base di questo, in riferimento all'intervallo riportato in tabella 6, è stato fissato un valore medio di resistenza cautelativamente pari a 0,40 MPa.

9.4. Sottofondo

Per gli strati non legati, le ripetizioni di carico causano l'accumulo di deformazioni permanenti qualora le deformazioni verticali indotte superino determinati valori. Anche in questo caso sono reperibili in letteratura relazioni che legano il numero di cicli di carico alle deformazioni verticali. Nel caso in analisi è stata utilizzata la legge di accumulo delle deformazioni permanenti proposta dalla Shell relativa ad un livello di affidabilità pari a 95%:

$$N = 1.05 \cdot 10^{-7} \cdot \varepsilon_c^{-4}$$

dove:

- ε_c deformazione di compressione massima sullo strato non legato.



10. Risultati dell'analisi

Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche in termini di fattore di danno cumulato (CDF cumulative damage factor) per ciascuno strato componente la sovrastruttura e per ciascuna stagione dell'anno solare considerata nell'analisi; il contributo dei diversi assi che compongono lo spettro di traffico sono stati cumulati a comporre ciascun risultato parziale.

Nella seguente tabella sono riportati i risultati per la pavimentazione di progetto.

Pavimentazione di progetto			CDF				CDF TOT
Stratigrafica			I	P	E	A	
Materiale	H (cm)	MODULO (MPa)					
CB mod. HD	5	5000	0,02	0,02	0,01	0,02	<<1
CB mod. HD	5	7000					
Riciclato a freddo	18	2500	<<1	<<1	<<1	<<1	<<1
Fondazione in misto cementato	20	2000	<<1	<<1	<<1	<<1	<<1
Sottofondo naturale		90	0,01	0,01	0,03	0,02	<<1

Tabella 16 – Sintesi dei risultati della pavimentazione di progetto

Dalle verifiche in termini di danno cumulativo si evince come tutti gli strati siano caratterizzati da un danno prodotto dai carichi da traffico trascurabile. Questo significa che alla fine della vita utile di progetto (20 anni) la pavimentazione risulta non presentare alcun significativo degrado strutturale indotto dai carichi e, pertanto presenta una vita utile residua di estensione indefinita.

In tal senso si evidenzia che la pavimentazione proposta, sotto le condizioni cautelative ipotizzate, si orienta verso la categoria delle "perpetual pavements". Per questa tipologia di pavimentazioni si precisa che nella progettazione l'approccio è quello di limitare i livelli deformativi nei materiali che costituiscono i diversi strati in modo tale che non si abbiano fenomeni di accumulo del danno per fatica.

L'assunto alla base di questa impostazione di progettazione è quello di determinare la risposta della pavimentazione in termini di tensioni, deformazioni e deflessioni in modo che queste siano mantenute al disotto di specifici valori di soglia, che dipendono dalle caratteristiche dei materiali utilizzati, piuttosto che quantificare il danno prodotto dallo stato tenso-deformativo prodotto dai carichi. I diagrammi di flusso, riportati di seguito, schematizzano l'approccio progettuale caratterizzante il metodo razionale e l'approccio meccanicistico-empirico per le "Perpetual Pavements".

In questo approccio alla progettazione l'aspetto chiave è quello di stabilire valori di soglia per i fenomeni di fatica che vengono schematizzati nei modelli di verifica delle pavimentazioni. Di seguito si riportano le soglie limite definite dalla letteratura di settore che stabiliscono:

- valori al disotto di 100 micro strain per la tensione di trazione dei conglomerati bituminosi e dei riciclati a freddo non siano suscettibili di sviluppare fenomeni di fessurazioni per fatica;
- valori al disotto di 200 micro strain per la tensione di compressione sul sottofondo non siano suscettibili di sviluppare fenomeni di accumulo di deformazioni permanenti.

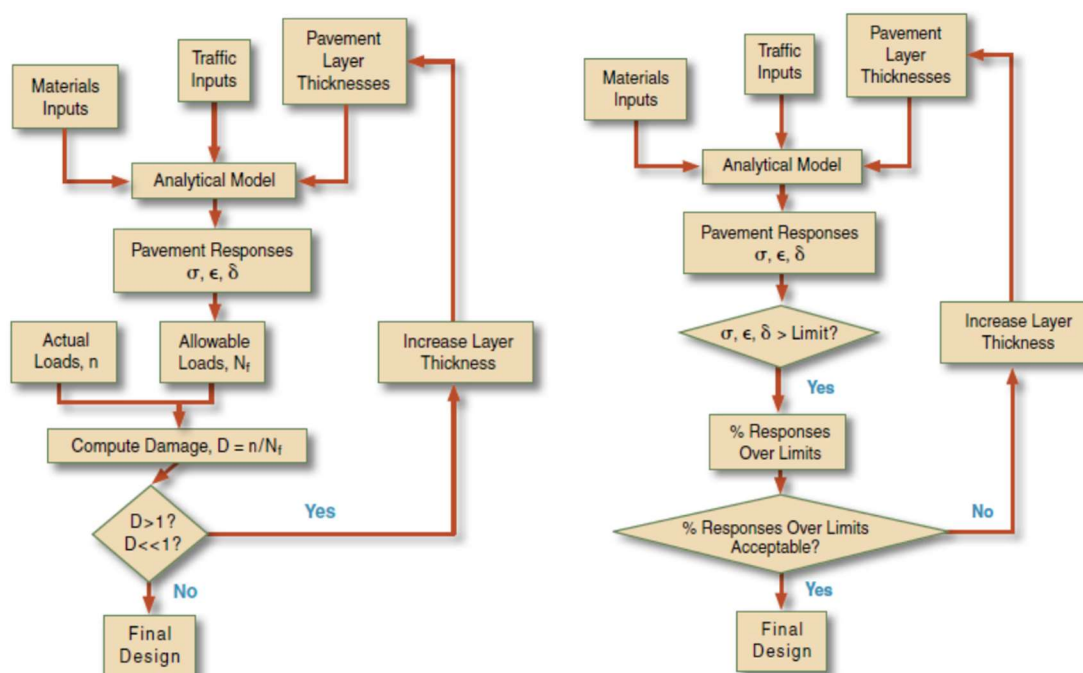


Figura 12 – Confronto approccio razionale e meccanicistico-empirico delle Perpetual Pavements

Nel caso della pavimentazione proposta, anche trascurando che siamo in presenza di materiali a prestazioni di eccellenza rispetto a quelli tradizionali per i quali sono stati verificati i limiti di letteratura (e quindi materiale anche in grado di fornire una migliorata resistenza a fatica ed ai carichi), si rileva che:

- lo strato superficiale in conglomerato bituminoso è caratterizzato da una deformazione di trazione massima, alla base dello strato, pari a 50 microstrain, quindi pienamente conforme all'ipotesi di pavimentazione fuori fatica nei confronti della fessurazione;
- lo strato di base in riciclato a freddo è caratterizzato da una deformazione massima di trazione, valutata alla base dello strato, pari a 41 microstrain. Anche per questo strato risulta valida l'ipotesi di comportamento fuori fatica nei confronti della fessurazione;
- livelli tensionali di trazione alla base dello strato di fondazione in misto cementato molto minore delle resistenza caratteristica del materiale;
- sul sottofondo la deformazione massima di compressione risulta pari a 234 microstrain superiore al limite di ammissibilità precedentemente indicato. Va tuttavia osservato che il valore massimo è indotto dall'asse da 13 kN al quale sono associati un numero di passaggi limitati rispetto alla totalità, mentre per tutte le altre tipologie di assi considerati producono tensioni di compressione inferiori al limite di ammissibilità. Pertanto, in pratica, il sottofondo può essere considerato non suscettibile ai fenomeni di accumulo di deformazioni permanenti (produzione di ormaie).

Questi risultati risultano coerenti ai valori di danno trascurabili sopra riportati, i quali già evidenziano come questi strati non risentano dei fenomeni di fessurazione per fatica e ormaimento in quanto ammettono un numero di passaggi per raggiungere una condizione di danno estremamente superiore rispetto a quelli previsti.

Pertanto, essendo tutti gli strati in una condizione di lavoro fuori fatica la pavimentazione ricade a tutti gli effetti nella categoria delle *Perpetual Pavements*, ovvero pavimentazioni con una vita utile strutturale verosimilmente indefinita.



11. Considerazioni Conclusive

La pavimentazione stradale semirigida di progetto costituita da uno strato superficiale (usura e binder) in conglomerato bituminoso, uno strato di base riciclato a freddo con emulsione bituminosa modificata e cemento, e uno strato di fondazione in misto cementato sopra analizzata risulta adeguata alla tipologia di strada oggetto della progettazione.

Nello specifico è stata condotta una analisi di tipo razionale basata sulla determinazione del danno cumulativo prodotto, sotto specifiche ipotesi, dalle azioni dei carichi da traffico nell'arco della vita utile prevista. Tale analisi ha evidenziato come la pavimentazione risulta idonea a garantire una durabilità ben superiore rispetto alla vita utile di progetto ipotizzata. In particolare, tale analisi ha evidenziato come tutti gli strati componenti la pavimentazione sono caratterizzati da valori di danno del tutto trascurabili evidenziando come i volumi di traffico non determinino nessuna perdita significativa di prestazioni strutturali nel tempo.

In base a questi risultati è stata fatta una valutazione della pavimentazione nei termini che caratterizzano le *Perpetual Pavements*, ovvero pavimentazioni caratterizzate da stati tenso-deformativi indotti dai carichi molto inferiori ai valori limite sotto i quali gli strati possono essere considerati fuori fatica. Da questo punto di vista risulta esserci coerenza con i risultati dell'analisi razionale in termini di danno in quanto, per gli strati in conglomerato bituminoso, in riciclato a freddo, e per il sottofondo caratterizzati da un danno trascurabile, le deformazioni indotte dai carichi risultano molto minori dei limiti stabiliti. Per lo strato in misto cementato è stato osservato come le tensioni di trazione massime indotte dai carichi risultino molto inferiori alla resistenza a trazione del materiale stesso, pertanto, anche questo strato si trova a lavorare fuori fatica.

Si può quindi concludere che la pavimentazione risulta presentare caratteristiche tale da garantire una durabilità molto superiore alla vita utile prevista in fase di progetto in quanto ricadente nella categoria delle *Perpetual Pavements*.

D'altra parte deve comunque essere considerato che, a causa degli effetti naturali di invecchiamento dei materiali, dovranno essere egualmente previsti nel corso della vita utile interventi manutentivi che saranno prevedibilmente solo di tipo ordinario e limitati allo strato più superficiale (usura) e che tali previsioni sono condizionate da come si modificherà nel periodo considerato l'intensità (peso e frequenza) del traffico rispetto a quanto ipotizzato nel presente progetto di dimensionamento.



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA PAVIMENTAZIONE IN VIADOTTO

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



OP INGEENERIA SRL
Società di Ingegneria Civile
info@opingegneria.com - www.opingegneria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. **Marradi** | Prof. Ing S. **Pagliara** | Ing. M. **Ascoli** | Dott. P. **Turin**

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W.
Salvatore

Prof. Ing. N.
Squeglia

33



12. Premessa

L'oggetto della presente relazione tecnica specialistica riguarda la descrizione tipologica e la verifica funzionale delle pavimentazioni della viabilità, che si sviluppa in viadotto, appartenente ad un più ampio progetto che prevede la realizzazione del nuovo collegamento fra lo svincolo della SGC FI-PI-LI e il centro abitato di Signa.

Con riferimento al progetto di fattibilità tecnica ed economica, il nuovo collegamento, tra lo svincolo della SGC FI-PI-LI e il centro abitato di Signa, si configura come un nuovo asse di penetrazione extraurbana tra la rete stradale principale e l'area urbana del Comune di Signa.

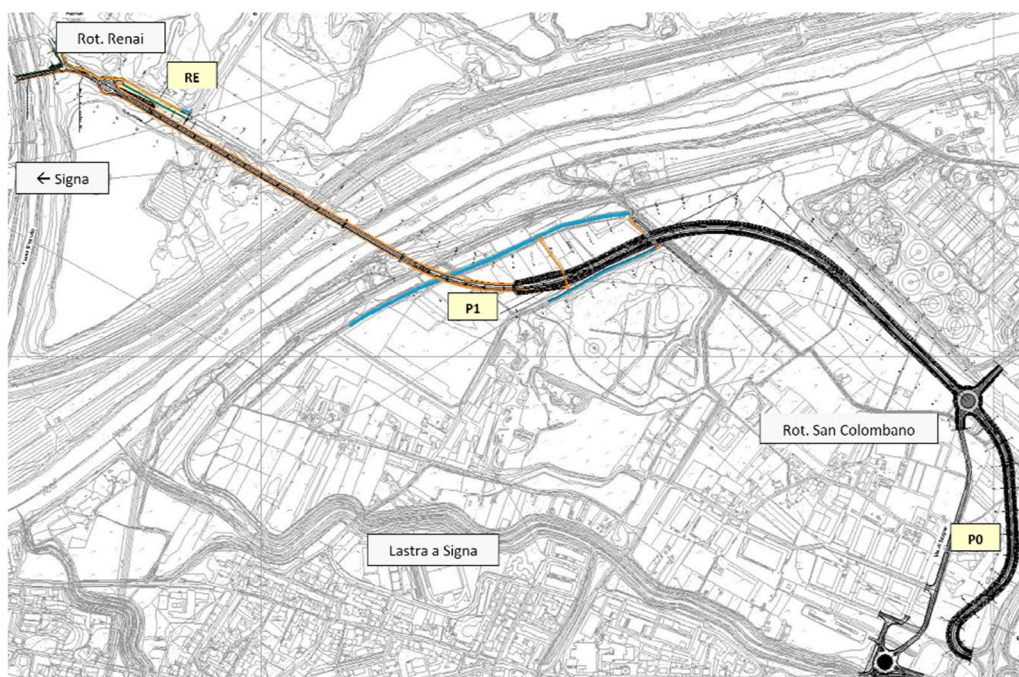


Figura 13 – Tracciato stradale da progetto di fattibilità tecnico-economica

La viabilità in oggetto e relativa al nuovo asse stradale è classificata come “Tipo C – Strada Extraurbana Secondaria”, ai sensi degli Articoli n°2 e n°3 – commi 8 e 50 del D.lg 285/1992 (Nuovo Codice della Strada). Nello specifico tale classificazione è riferita al tratto che si sviluppa dallo svincolo della SGC FI-PI-LI alla nuova rotatoria “Renai” (come riportato in figura), mentre il collegamento fra la stessa rotatoria ed il nuovo ponte sul Bisenzio è classificabile come “Tipo E – Strada Urbana di Quartiere”.

Per la pavimentazione di seguito definita verranno valutate le prestazioni che la sovrastruttura potrà offrire nel tempo quando soggetta ai carichi da traffico e alle condizioni climatiche della zona. Pertanto, i dati necessari per il progetto e la verifica di una pavimentazione stradale possono essere distinti in quattro categorie:

- volume e spettro di traffico;
- condizioni ambientali;
- materiale e loro caratteristiche fisico-meccaniche;
- modelli di degrado per la valutazione delle condizioni limite.

Le caratteristiche dei dati sono fortemente legate al tipo di progettazione richiesta e alla metodologia adottata; nel presente caso è stato scelto di condurre un'analisi razionale della pavimentazione ai fini delle verifiche di durabilità. I criteri di verifica adottati



hanno mirato a garantire ottimi livelli di sicurezza per la circolazione stradale, elevate caratteristiche di durabilità della sovrastruttura e limitati interventi di manutenzione nel tempo.

13. Pavimentazione da progetto di fattibilità

La progettazione della pavimentazione si inserisce in un più ampio progetto che prevede la realizzazione di un nuovo tronco stradale di collegamento dello svincolo della SGC FI-PI-LI con i centri abitati di Lasta a Signa e di Signa.

Questo nuovo collegamento, tra lo svincolo di Lastra a Signa della SGC FI-PI-LI ed il nuovo ponte sul Bisenzio nel comune di Signa, si configura come un nuovo asse stradale di penetrazione extraurbana tra la rete principale, rappresentata dalla SGC FI-PI-LI e l'area urbana del Comune di Signa. Il progetto stradale comprende, in sintesi, la realizzazione delle seguenti nuove opere:

- Nuovo asse stradale, di collegamento tra lo svincolo esistente di Lastra a Signa della FI-PI-LI ed il nuovo ponte in costruzione sul Bisenzio in località Signa, di classe funzionale "C" (strada extraurbana secondaria) ai sensi dell'art. 2 del Nuovo Codice della Strada;
- Due nuove rotatorie (San Colombano e Renai).

In uscita dallo svincolo di Lastra a Signa il traffico verrà indirizzato, verso la rotatoria di S. Colombano, la quale smisterà il traffico:

- verso il Comune di Signa imboccando il nuovo asse di penetrazione extraurbana;
- verso il centro della città di Lastra a Signa, collegandosi mediante Via di Stagno alla rete di penetrazione urbana, costituita da rampe e rotatorie la cui realizzazione non è inclusa nel presente progetto;
- verso la nuova area di espansione del Comune di Lastra a Signa ed il Parco Fluviale di Lastra a Signa, sempre attraverso la percorrenza di Via di Stagno,
- verso Est, con la viabilità che lambisce il depuratore e collega con via Vittorio Masiani.

Verso Nord la nuova strada in progetto terminerà con la rotatoria Renai che costituisce la transizione tra la viabilità extraurbana, rappresentata dal nuovo asse, e la rete stradale urbana del Comune di Signa. Infatti, attraverso la nuova rotatoria Renai si accede direttamente al nuovo ponte in costruzione sul fiume Bisenzio il cui calibro è quello di una strada urbana di quartiere (tipo E).

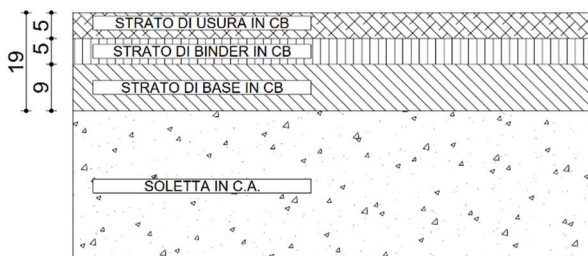
Il nuovo ponte sul Bisenzio, attraverso una intersezione a raso (che dovrà essere necessariamente potenziata per supportare i nuovi flussi di traffico convogliati dal nuovo asse) consente di smistare il traffico sul Viale dell'Arte della Paglia che costeggia in riva destra il Bisenzio. Tramite quest'ultimo asse (la cui capacità di deflusso dovrà essere opportunamente verificata in relazione al nuovo traffico che la impegnerà) il traffico verrà distribuito verso Est, in direzione del nodo dell'Indicatore, e verso Ovest, in direzione centro città.

Lungo lo sviluppo del nuovo asse si alternano diverse tipologie di pavimentazione in relazione alle diverse condizioni al contorno ed alle prestazioni richieste nei diversi tratti. In particolare, per la sovrastruttura in esame, le prestazioni richieste sono:

- una elevata durabilità;
- una elevata capacità di protezione delle superficie di supporto (soletta in c.a. del viadotto);
- buone prestazioni ambientali in termini di emissioni sonore e consumo di materiale prime non rinnovabili;
- ridotto spessore del velo idrico sul piano viabile in caso di piogge intense, per ridurre il fenomeno di acquaplaning ed il fenomeno di nebulizzazione dell'acqua, prodotto dal passaggio dei veicoli, che riduce la visibilità longitudinale.



Il progetto di fattibilità tecnico-economica prevede una struttura costituita da tre strati in conglomerato bituminoso sovrapposti alla soletta in calcestruzzo di caratteristiche di seguito riportate.



Strato	Sp. (cm)
Usura in CB	5
Binder in CB	5
Base in CB	9
Soletta in C.A.	-

Figura 14 – Pacchetto pavimentazione in viadotto da progetto di fattibilità

14. Dimensionamento pavimentazione

Sulla base del progetto di fattibilità della pavimentazione in impalcato è stato condotto un nuovo dimensionamento al fine di ottimizzare la sovrastruttura stradale. In particolare, essendo la funzione strutturale demandata alla soletta in calcestruzzo armato risulta possibile ridurre lo spessore complessivo degli strati in conglomerato bituminoso eliminando dallo schema strutturale lo strato di base.

In pratica la pavimentazione così semplificata risulta in grado di garantire:

- sufficienti caratteristiche funzionali di aderenza e regolarità del piano stradale;
- corretto collegamento fra lo strato di usura e l'impalcato del viadotto;
- adeguate caratteristiche strutturali.

Inoltre, rispetto allo studio di fattibilità tecnico-economica, si prevede l'utilizzo di conglomerati bituminosi additivati con polverino di gomma da pneumatici fuori uso per la realizzazione degli strati di usura e binder. Questa tipologia di conglomerati risultano prevede l'impiego di leganti modificati con polimeri di gomma riciclata di pneumatici fuori uso, incorporata nel bitume, garantendo notevoli benefici in termini di incremento della resistenza al fenomeno di fatica degli strati sotto le azioni cicliche dei carichi da traffico, nonché di sostenibilità ambientale.

La pavimentazione di progetto sottoposta a verifica presenta pertanto le seguenti caratteristiche:

- Strato di usura in Asphalt Rubber sp. 5 cm
- Strato di binder in Asphalt Rubber sp. 5 cm
- Cappa asfaltica sp. 1 cm
- Soletta in calcestruzzo armato sp. 25 cm

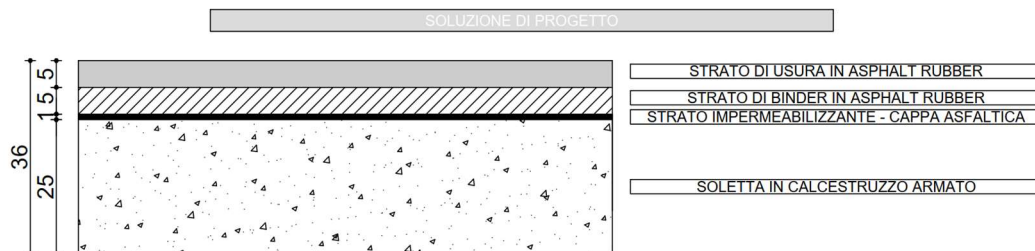


Figura 15 – Dimensioni pavimentazione di progetto



15. Criterio di verifica delle pavimentazioni

Nel presente capitolo vengono descritti in dettaglio i seguenti aspetti:

- il criterio adottato per la verifica della pavimentazione oggetto della presente attività progettuale;
- l'entità e la tipologia di traffico di progetto;
- le condizioni climatiche per la zona di intervento;
- le ipotesi assunte in merito alle caratteristiche prestazionali dei materiali;
- i criteri prestazionali (leggi di fatica) assunte per le verifiche di durabilità della sovrastruttura.

15.1. Metodo di progetto razionale

Il dimensionamento delle pavimentazioni stradali è rivolto a garantire adeguati livelli di durabilità alla sovrastruttura e al relativo sottofondo durante la sua "vita utile", ovvero per un periodo di tempo oltre il quale la degradazione da essa progressivamente subita per effetto del traffico e degli agenti atmosferici ne rende necessario il rifacimento totale o parziale. A tale scopo sono state proposte negli anni molteplici metodologie di progetto, sia di tipo empirico che basate su un'analisi razionale dello stato tenso-deformativo indotto nella pavimentazione per effetto delle sollecitazioni prodotte dai carichi di progetto.

L'esperienza ha dimostrato che l'uso di procedure di progettazione di tipo empirico - meccanicistiche fornisce le stime più accurate delle prestazioni delle pavimentazioni. Il metodo di progettazione empirico - meccanicistico è stato sviluppato in diversi anni di pratica ed è stato calibrato e convalidato sia mediante prove di carico accelerato che sulla base delle prestazioni riscontrate sulle pavimentazioni in esercizio. Ai fini della presente verifica sono stati applicati i criteri del metodo di progetto razionale, di cui si riporta nella figura seguente il diagramma di flusso.

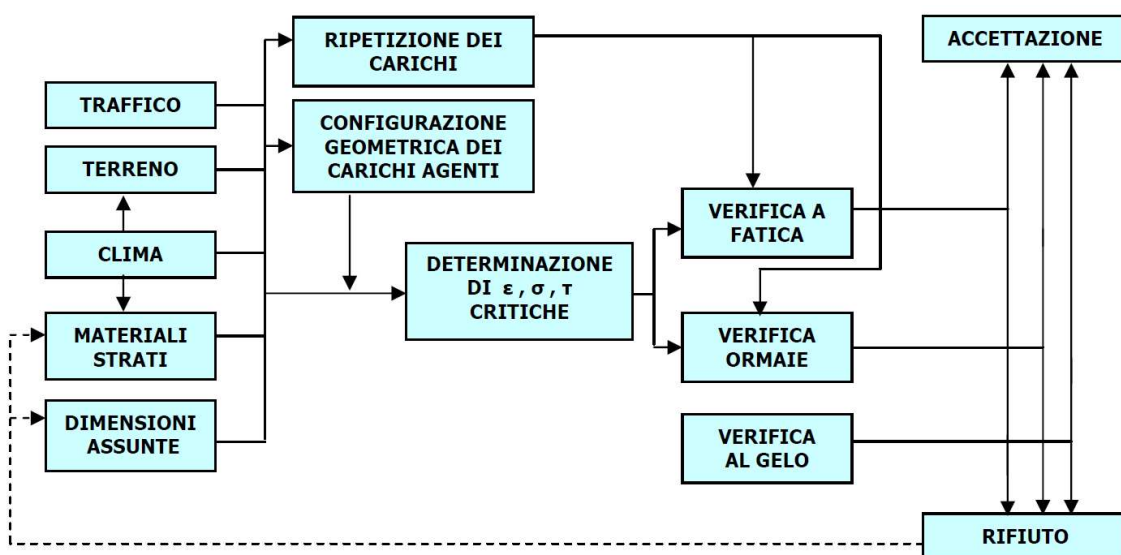


Figura 16 – Diagramma di flusso del metodo di dimensionamento razionale delle pavimentazioni stradali

Tale metodologia di calcolo prevede la preliminare schematizzazione dell'insieme degli strati componenti la sovrastruttura in un multistrato elastico e la successiva determinazione dei valori delle tensioni e delle deformazioni indotte dai carichi nei vari strati. Tali valori di tensione e deformazione vengono successivamente confrontati con quelli che caratterizzano le resistenze dei materiali rispetto ai carichi ripetuti, consentendo di stimare il numero di ripetizioni di carico ammissibili attraverso l'utilizzo di opportune leggi di fatica.



La verifica della soluzione progettuale viene di norma eseguita sulla base della legge di accumulo lineare del danno proposta da Palmgren-Miner. Tale legge stabilisce quanto segue: siano $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$, k diversi livelli di tensione applicati rispettivamente per n_1, n_2, \dots, n_k cicli di carico senza nessun ordine particolare di applicazione, si verifica la rottura per fatica quando:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

dove:

- N_i è il numero di cicli di applicazione del carico che porterebbe a rottura il materiale qualora la tensione fosse sempre mantenuta uguale a σ_i (ripetizioni di carico massime ammissibili);
- n_i è il numero di ripetizioni di carico previste sulla base delle ipotesi di traffico assunte.

Nel caso delle pavimentazioni stradali si assumono come carichi di progetto l'insieme degli assi che competono allo spettro di traffico scelto per l'infrastruttura in esame, pertanto, il danno cumulativo viene determinato come somma del contributo fornito da ogni singolo asse, per ognuno dei periodi stagionali in cui viene suddiviso l'anno solare.

Nel caso in esame il calcolo dello stato tenso-deformativo è stato eseguito per mezzo di un software di modellazione della pavimentazione come multistrato elastico lineare. Lo schema della pavimentazione è da intendersi verificato qualora il danno cumulato per fatica risulti inferiore a 1.

In termini di prestazioni strutturali, per il caso in esame, la procedura di progettazione si basa sui seguenti aspetti principali:

- verifica dei conglomerati bituminosi, determinata in base all'entità della tensione a trazione nella parte inferiore del complesso degli strati bituminosi;

Nel caso specifico si tiene a sottolineare le verifiche richieste sono solamente quelle relative alla fatica degli strati in conglomerato bituminoso e la valutazione delle condizioni di esercizio fuori fatica della soletta in calcestruzzo.

16. Caratteristiche dei materiali

16.1. *Conglomerato bituminoso gap graded con polimeri sbr/nr secondo processo wet*

Il manto di usura rappresenta lo strato più superficiale della pavimentazione, sul quale agiscono direttamente la maggior parte delle azioni esterne, rappresentando un punto di elevatissima valenza per il funzionamento complessivo di tutta la struttura e per la sicurezza della circolazione che vi insiste.

Per tale motivo nel caso in esame si prevede l'utilizzo di un conglomerato bituminoso caratterizzato da uno scheletro litico a granulometria discontinua legato da un mastice ad alta viscosità composto da bitume modificato con polimeri SBR/NR, secondo processo wet, e filler. La norma ASTM D6114 definisce questa tipologia di conglomerati bituminosi (Asphalt Rubber) come un bitume modificato con una percentuale minima di polverino di gomma di pneumatico riciclata pari al 15% sul peso totale del legante, incorporata tramite processo wet, che abbia reagito per un periodo di tempo sufficientemente lungo da permettere il rigonfiamento della gomma. In questo processo il polverino di gomma viene aggiunto infatti come vera e propria modifica al legante bituminoso al fine di migliorarne le prestazioni. Dal punto di vista chimico-fisico, il polverino di pneumatico miscelato con un bitume naturale è in grado di assorbire e fissare la frazione maltenica dei costituenti volatili aromatici del bitume (digestione). L'introduzione del polverino di gomma nel bitume ad alte temperature (circa 185 °C) provoca una reazione fisica dalla quale si



forma un sistema di tre componenti: bitume, gel e polverino. Questo conglomerato è particolarmente adatto per ridurre tutti i fenomeni di fessurazione di riflesso, fessurazione a fatica e fessurazione termica, con l'ottenimento di superfici prive di fenomeni d'ormaiamento (rutting), con un'alta aderenza (skid resistance) e una ridotta necessità di manutenzione.

I manti di usura tipo gap graded fanno parte di quella tipologia di conglomerati bituminosi detti di nuova generazione, impiegati per la realizzazione di manti di usura speciali, sono delle miscele che grazie alle particolari caratteristiche granulometriche e alla elevata qualità dei materiali costituenti, consentono di ottenere buone prestazioni in termini di durabilità, prestazioni meccaniche e sicurezza stradale.

I conglomerati gap graded additivati con polimeri SBR/NR sono tappeti di usura antisdrucciolo, aventi spessori in opera di almeno 30 mm, costituiti da una miscela di pietrischetti, graniglie, frantumati, sabbie di sola frantumazione e additivo (filler), impastata a caldo in appositi impianti con bitume modificato con polimeri SBR/NR. Il legante impiegato per il confezionamento della miscela consiste in un bitume modificato con polimero di gomma riciclata di pneumatici fuori uso, incorporata nel bitume tramite processo wet. Questo conglomerato, chiuso e totalmente impermeabile agli strati sottostanti, è stato studiato per migliorare l'aderenza e impermeabilizzare la struttura sottostante.

Il materiale deve presentare adeguata resistenza meccanica, cioè capacità di sopportare le sollecitazioni trasmesse dalle ruote dei veicoli senza deformazioni permanente, e sufficiente flessibilità per poter seguire sotto gli stessi carichi qualunque eventuale assestamento del sottofondo anche sul lungo periodo. Al fine di garantire tali prestazioni si prevede la modifica del legante bituminoso.

Ai fini dell'analisi dello stato tenso-deformativo risulta necessario schematizzare il materiale come un mezzo elastico lineare i cui parametri caratterizzanti le prestazioni meccaniche sono il modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Sulla base delle precedenti indicazioni sono stati fissati i seguenti parametri di progetto caratterizzanti il materiale ad una temperatura di 20 °C.

Valori di progetto	E @20°C [MPa]	ν
Usura Asphalt Rubber	5000	0,35

Tabella 17 – Parametri di progetto conglomerato bituminoso Asphalt Rubber

Inoltre, questa tipologia di materiale, rispetto alle soluzioni tradizionali, mantiene la particolare configurazione della macrotestitura (testitura negativa) che consente di abbattere l'emissione acustica riducendo i fenomeni di compressione e laminazione dell'aria tra le scolpiture del pneumatico e il piano viabile grazie al sistema di asperità e micro-avvallamenti che lo caratterizza. Il beneficio acustico che si ottiene ottimizzando le caratteristiche di testitura superficiale non viene in alcun modo modificato se non per quanto attiene ad una maggiore durabilità dello strato, che quindi garantisce un più prolungato mantenimento nel tempo delle proprietà acustiche del manto.

Come supportato anche dal progetto SILVIA - Silenda Via, "Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control", che ha prodotto le linee guida "Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces" per la realizzazione di manti stradali innovativi allo scopo di mettere a punto uno strumento utile ai fini della pianificazione razionale delle misure per il controllo del rumore prodotto dal traffico veicolare, la scelta progettuale di adottare il tappeto di usura tipo gap graded garantisce la migliore combinazione possibile tra resistenza alle deformazioni permanenti e a fatica e, grazie alla particolare testitura "negativa", riduce l'emissione acustica rispetto ai manti tradizionali.

**16.2. Conglomerato bituminoso modificato per stato di binder**

Anche per lo stato di binder si prevede l'uso di conglomerati bituminosi tipo gap graded, confezionati con bitume modificato mediante l'aggiunta di polimeri SBR/NR, sono delle miscele che grazie alle particolari caratteristiche granulometriche e alla elevata qualità dei materiali costituenti, consentono di ottenere buone prestazioni in termini di durabilità e prestazioni meccaniche.

Tali conglomerati, aventi spessori in opera di almeno 50 mm, sono costituiti da una miscela di pietrischetti, graniglie, frantumati, sabbie di sola frantumazione e additivo (filler), impastata a caldo in appositi impianti con bitume modificato con polimeri SBR/NR. Il legante impiegato per il confezionamento della miscela consiste in un bitume modificato con polimero di gomma riciclata di pneumatici fuori uso, incorporata nel bitume tramite processo wet.

Al fine di garantire adeguate prestazioni, i parametri da controllare risultano essere: la resistenza a trazione indiretta R_t , e il coefficiente di trazione indiretta CTI. In particolare, le miscele studiate in laboratorio, quelle prodotte in impianto e quelle prelevate alla stesa, compattate dovranno rispettare i seguenti limiti.

	T=25°C
R_t (GPa x 10 ⁻³)	≥ 0,6
CTI (GPa x 10 ⁻³)	≥ 50

Tabella 18 – Prescrizioni per miscele con bitume modificato per strati di binder

Ai fini dell'analisi dello stato tenso-deformativo risulta necessario schematizzare il materiale come un mezzo elastico lineare i cui parametri caratterizzanti le prestazioni meccaniche sono il modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Ai fini dell'analisi sono stati fissati i seguenti parametri di progetto caratterizzanti il materiale ad una temperatura di 20 °C.

Valori di progetto	E @20°C [MPa]	v
Binder	7000	0,35

Tabella 19 – Parametri di progetto per miscele con bitume modificato per strati di binder

La scelta di utilizzare di tale tipologia di materiali, sia per lo strato di binder che per quello di usura, è dettata dalla necessità di garantire adeguata resistenza all'ormaiamento. Tale aspetto è garantito dalla struttura della miscela di aggregati, in quanto caratterizzata da una curva granulometrica discontinua ad alto contenuto di graniglie e pietrischi, che intrinsecamente permette il conseguimento di prestazioni superiori rispetto a quelle dei tradizionali manti di usura chiusi. Nello specifico la granulometria discontinua della miscela di aggregati consente una massimizzazione dei punti di contatto fra gli aggregati grossi (graniglie e pietrischi) nella configurazione della miscela post compattazione, garantendo elevata stabilità del conglomerato rispetto agli effetti di generazione e accumulo di deformazioni permanenti (ormaiamento) prodotti dalle azioni dei carichi da traffico.

Sotto tale aspetto anche l'EAPA "European Asphalt Pavement Association" in "Asphalt pavement on bridge decks" riporta come gli strati di usura tipo gap graded siano i manti maggiormente indicati per essere impiegati sugli impalcati delle opere d'arte grazie alla loro elevata resistenza ai fenomeni di ormaiamento.

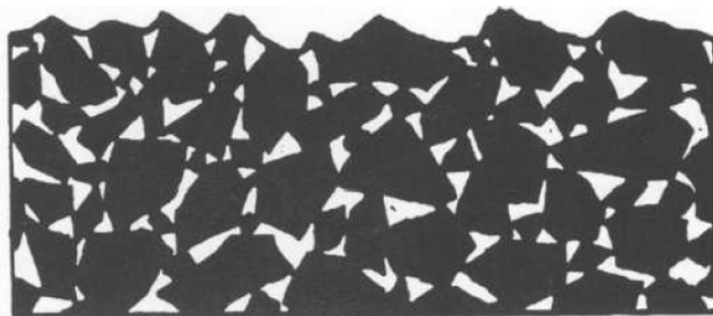


Figura 17 – Matrice litica del CB gap graded

Inoltre, questa tipologia di miscele consente il raggiungimento di caratteristiche meccaniche in grado di rispondere ampiamente alle prestazioni minime richieste; in particolare le sperimentazioni condotte hanno messo in luce resistenze alla fatica ed alla deformazione permanente superiori rispetto a quello mostrate dai tradizionali mati di usura in conglomerato bituminoso chiuso. Le sperimentazioni e gli studi di letteratura e dalle sperimentazioni di laboratorio si evince che i manti di usura di questa tipologia si caratterizzano con prestazioni ottime in termini di aderenza superficiale, stabilità e resistenza all'invecchiamento specialmente per miscele con limitato contenuto di vuoti.

16.3. Membrana impermeabilizzante “cappa asfaltica”

L'impermeabilizzazione degli impalcati, in genere, riveste un'importanza fondamentale in termini di funzionalità, sicurezza e durabilità nel tempo; in quanto ha il compito di andare a proteggere i ponti e viadotto dai fenomeni di aggressione fisico-chimica dovuto all'azione delle acque meteoriche, dei cicli gelo-disgelo, nonché al passaggio degli automezzi in termini di carichi, vibrazioni e sollecitazioni di tipo meccanico.

In tal senso si prevede la realizzazione di una membrana impermeabilizzante, di spessore di 1 cm, interposta fra la struttura di supporto e la pavimentazione stradale realizzata con conglomerato bituminoso. Si tiene a sottolineare che date le criticità caratterizzanti questi tipi di infrastrutture, nonché le particolarità degli interventi, le membrane dovranno possedere specifiche caratteristiche; in particolare dovranno presentare:

- Elevata resistenza meccanica, per resistere senza rottura o fessurazioni alle levate sollecitazioni meccaniche, sia durante la fase di costruzione che in quella di esercizio;
- Elevato valore di adesione sia al sottostrato di supporto (impalcato) che alla pavimentazione soprastante (binder e usura), per evitare rischi di scorrimenti relativi durante la fase di esercizio;
- Resistenza a elevate sollecitazioni termiche per consentire l'applicazione a caldo dei conglomerati bituminosi;
- Elevata resistenza meccanica e al punzonamento per consentire le operazioni di transito e posa dei mezzi operativi di cantiere, per la stesura e la compattazione della pavimentazione stradale;
- Buone caratteristiche di resistenza meccanica, così da adattarsi e assecondare i movimenti e le deformazioni dell'impalcato;
- Resistenza alle possibili acque e soluzioni di percolamento e ai cicli gelo-disgelo.

16.4. Soletta in calcestruzzo armato

Nel caso specifico la sovrastruttura è caratterizzata dalla presenza di una soletta in calcestruzzo armato costituente lo strato di “sottofondo” da cui parte la pavimentazione stradale. Ai fini della valutazione dello stato tenso-deformativo è stato assunto un



modulo di rigidezza caratterizzante il materiale di 35000 MPa, tale da poter considerare lo strato incompressibile; quindi, non soggetto ad accumulo di deformazioni permanenti.

17. Condizioni climatiche di progetto

Tra le condizioni ambientali, la temperatura influenza in modo determinante le caratteristiche di durabilità delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso in quanto caratterizza i valori del modulo di rigidezza e il comportamento delle miscele a fatica, oltre ad avere notevole influenza nel meccanismo di formazione delle ormaie. Pertanto, influenzano fortemente il regime di sollecitazione indotto nella pavimentazione e ne condizionano il degrado e quindi la vita utile. Gli aspetti che devono essere attentamente valutati sono la modifica della portanza del sottofondo per effetto della presenza d'acqua e degli eventuali cicli di gelo e disgelo, e le caratteristiche meccaniche degli strati superficiali, in conglomerato bituminoso, per effetto delle temperature caratterizzanti gli strati che si instaurano nelle diverse stagioni.

La portanza del sottofondo non dovrebbe variare nel tempo in quanto essendo l'ultimo strato del rilevato risulta protetto dalla presenza delle acque di risalita capillare, nonché dalle acque meteoriche.

La temperatura caratterizzante gli stati della pavimentazione dipende dalle caratteristiche termiche dei materiali, dagli spessori, dalla profondità e dalle caratteristiche climatiche dell'ambiente in cui la pavimentazione si inserisce.

Al fine di condurre una analisi accurata delle temperature caratterizzanti gli strati in conglomerato bituminoso l'anno solare è stato suddiviso in quattro periodi stagionali, e in ognuno dei quali è stata determinata la temperatura media caratteristica dell'aria nella zona in cui l'infrastruttura in esame si inserisce.

Mesi	TMMA (°C)	Stagione	TMA Stagionale (°C)
Dicembre	8,9	Inverno	9,0
Gennaio	7,5		
Febbraio	9,8		
Marzo	10,4	Primavera	16,0
Aprile	13,6		
Maggio	19,1		
Giugno	23,8	Estate	25,0
Luglio	26,5		
Agosto	26,4		
Settembre	21,9	Autunno	17,0
Ottobre	16,8		
Novembre	12,5		

Tabella 20 – Temperatura stagionale dell'aria

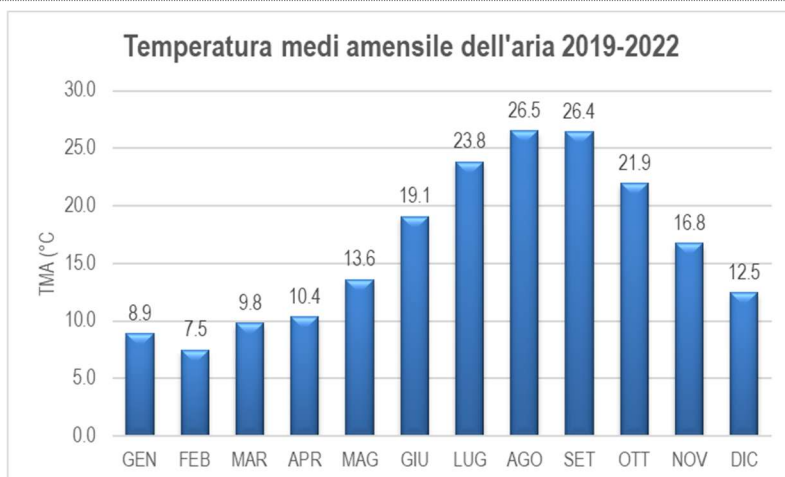


Figura 18 – Temperatura media mensile dell'aria 2019-2022

Sulla base dei valori di temperatura media mensile dell'aria, è stata ricavata la corrispondente temperatura media per gli strati in conglomerato bituminoso. Generalmente si ipotizza una temperatura dello strato costante, valutata alla profondità media. In Italia sono largamente utilizzati due leggi di variazione della temperatura: quella di Marchionna e quella di Barber.

Legge proposta di Witchaz e successivamente ripresa del Prof. Marchionna in "Modello di degrado strutturale delle pavimentazioni – fatica degli strati legati", di seguito riportata, correla la temperatura di uno strato bituminoso alla sola profondità "Z" e alla temperatura media giornaliera stagionale dell'aria "TMA".

$$TMP(Z) = (1.467 + 0.043 \cdot Z) + (1.362 - 0.005 \cdot Z) \cdot TMA$$

dove:

- TMA è la temperatura media stagionale dell'aria (°C);
- Z è la profondità, a partire dalla superficie, a cui si vuole calcolare la temperatura media (cm);
- TMP(Z) è la temperatura media stagionale della pavimentazione alla profondità Z (°C).

La legge di Barber offre una maggiore precisione nella determinazione della temperatura, considerandola non solo funzione della profondità ma anche del tempo.

$$TMP(z, t) = T_A + R + \left(3R + \frac{A_g}{2}\right) \cdot F \cdot e^{-C \cdot z} \cdot \sin(0,262 \cdot t - C \cdot z - \arctg\left(\frac{C}{H + C}\right))$$

Dove:

- TMP(Z) è la temperatura media stagionale della pavimentazione alla profondità z e al tempo t;
- T_A è la temperatura media giornaliera dell'aria (°C);
- A_g è l'escursione media giornaliera della temperatura dell'aria;
- $R = (2/3)((b \cdot l)/(24h_c))$ è il contributo della radiazione solare (°C);
- $H = h_c/K$;
- $h_c = 4,882 \cdot (1,3 + 0,4332 \cdot v^{3/4})$;
- $C = \sqrt{(0,131 \cdot w \cdot s)/k}$;



- $F = H / \sqrt{(H + C)^2 + C^2}$ (ora^{0,5}/m);
- I è la radiazione media giornaliera (kcal/m²gg);
- v è la velocità del vento (km/h);
- b è il grado di assorbimento della superficie (0,6-0,95);
- K è la conduttività termica (1,04-1,96) (kcal/m ora °C);
- s è il calore specifico (0,193-0,22) (kcal/kg °C);
- w è la massa volumica apparente (2400-2500) (kg/m³).

In entrambe le formule i dati climatici da utilizzare sono quelli relativi alla località interessata dall'infrastruttura.

I corrispondenti valori delle temperature della pavimentazione, sono riportati nella tabella seguente per ciascun periodo stagionale.

Stagione	Temperatura dello strato (°C)		
	Tappeto di usura	Strato di binder	Strato di base
Inverno	13,4	13,4	13,4
Primavera	20,9	20,8	20,5
Estate	36,1	35,7	34,7
Autunno	24,6	24,4	23,9

Tabella 21 – Temperatura stagionale della pavimentazione

Nota la temperatura nei diversi strati della pavimentazione nei quattro periodi stagionali, si è proceduto alla correzione dei moduli di progetto degli strati bituminosi, assumendo come riferimento la temperatura di 20°C. In particolare, sulla base delle informazioni reperibili nella letteratura di riferimento e della pratica corrente, è stata applicata la legge proposta dall'Asphalt Institute, di cui si riporta di seguito l'espressione analitica:

$$E_{ref} = 10^{\alpha \cdot (T^2 - T_{ref}^2)} \cdot E$$

dove:

- T è la temperatura media stagionale dello strato (in °F);
- T_{ref} è la temperatura di riferimento pari a 20 C (68°F);
- E è il modulo dello strato bituminoso alla temperatura media stagionale (MPa);
- E_{ref} è il modulo dello strato bituminoso alla temperatura di riferimento pari a 20 C (MPa);
- α è il coefficiente che indica la suscettività termica del materiale.

L'influenza della temperatura sulle variazioni di rigidità dei materiali riguarda esclusivamente gli strati in conglomerato bituminoso e lo strato riciclato a freddo con emulsione bituminosa.

Nello specifico è stato fatto riferimento ad un valore del coefficiente di suscettività termica pari a:

- 0,00012 per gli strati in conglomerato bituminoso modificato.

**17.1. Caratteristiche meccaniche**

Il comportamento meccanico degli strati bituminosi, a causa della componente viscosa che caratterizza tali materiali, dipende dalla temperatura di esercizio. È necessario, pertanto, tenere conto di questo aspetto nella determinazione del modulo elastico “E” da assumere per il calcolo dello stato tenso-deformativo secondo il metodo razionale. I moduli caratterizzanti i materiali nelle diverse stagioni sono pertanto riassunti nella seguente tabella:

Stagione	Moduli (MPa)	
	Tappeto di usura	Strato di binder
T _{ref}	5000	7000
Inverno	7800	10800
Primavera	4800	6800
Estate	1400	2000
Autunno	3700	5200

Tabella 22 – Prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi alle diverse temperature



18. Leggi di fatica

Le leggi di fatica utilizzate per le verifiche di durabilità sono state ricavate dalla letteratura internazionale con riferimento alle caratteristiche specifiche dei materiali impiegati nella pavimentazione in progetto.

18.1. *Strati in conglomerato bituminoso*

Per gli strati in conglomerato bituminoso il valore massimo della deformazione per trazione indotta dal passaggio dei veicoli risulta massima, e quindi più critica, alla base dello strato stesso. Il ripetersi nel tempo di tali stati tenso-deformativi connessi ai diversi carichi di progetto produce l'innescò di fessurazioni alla base dello strato, che successivamente migrano fino ad affiorare in superficie.

Nel caso in esame la durabilità dei conglomerati bituminosi è stata cautelativamente stimata mediante la legge di fatica proposta dell'Asphalt Institute, di cui se ne riporta di seguito l'espressione analitica:

$$N = 0.0796 \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$$

dove:

- E modulo elastico (psi);
- ε_t deformazione orizzontale di trazione alla base del conglomerato bituminoso (strain).



19. Risultati dell'analisi

Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche in termini di fattore di danno cumulato (CDF cumulative damage factor) per gli strati componenti la sovrastruttura e per ciascuna stagione dell'anno solare considerata nell'analisi; il contributo dei diversi assi che compongono lo spettro di traffico sono stati cumulati a comporre ciascun risultato parziale.

Nella seguente tabella sono riportati i risultati per la pavimentazione di progetto.

Pavimentazione di progetto			CDF				CDF TOT
Stratigrafica			I	P	E	A	
Materiale	H (cm)	MODULO (MPa)					
Usura – Asphalt Rubber	5	5000	<<1	<<1	<<1	<<1	<<1
Binder – Asphalt Rubber	5	7000					

Tabella 23 – Sintesi dei risultati della pavimentazione di progetto

Dalle verifiche in termini di danno cumulativo si evince, coerentemente a quanto emerso per la pavimentazione in rilevato, come tutti gli strati in conglomerato bituminoso siano caratterizzati da un danno prodotto dai carichi da traffico trascurabile. Inoltre, lo stato tensionale indotto dai carichi da traffico nella soletta in calcestruzzo è tale da garantire condizioni di esercizio fuori fatica per questo elemento strutturale.

Questo significa che alla fine della vita utile di progetto (20 anni) la pavimentazione risulta non presentare alcun significativo degrado strutturale indotto dai carichi e, pertanto presenta una vita utile residua di estensione indefinita.

Si tiene anche ad evidenziare che la pavimentazione proposta, sotto le condizioni cautelative ipotizzate, si orienta verso la categoria delle “*perpetual pavements*”. Per questa tipologia di pavimentazioni si precisa che nella progettazione l'approccio è quello di limitare i livelli deformativi nei materiali che costituiscono i diversi strati in modo tale che non si abbiano fenomeni di accumulo del danno per fatica.

L'assunto alla base di questa impostazione di progettazione è quello di determinare la risposta della pavimentazione in termini di tensioni, deformazioni e deflessioni in modo che queste siano mantenute al di sotto di specifici valori di soglia, che dipendono dalle caratteristiche dei materiali utilizzati, piuttosto che quantificare il danno prodotto dallo stato tenso-deformativo prodotto dai carichi. I diagrammi di flusso, riportati di seguito, schematizzano l'approccio progettuale caratterizzante il metodo razionale e l'approccio meccanicistico-empirico per le “*Perpetual Pavements*”.

In questo approccio alla progettazione l'aspetto chiave è quello di stabilire valori di soglia per i fenomeni di fatica che vengono schematizzati nei modelli di verifica delle pavimentazioni.

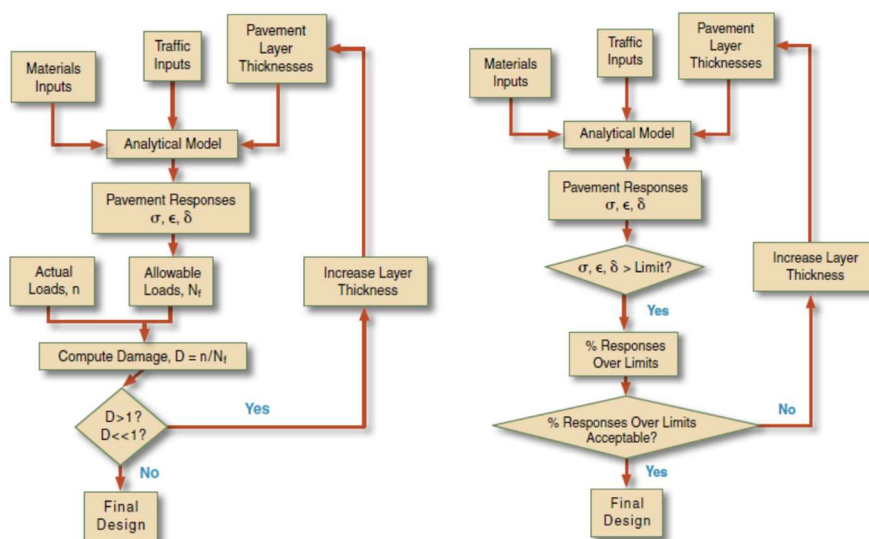


Figura 19 – Confronto approccio razionale e meccanicistico-empirico delle Perpetual Pavements

Nel caso della pavimentazione proposta, anche trascurando che siamo in presenza di materiali a prestazioni di eccellenza rispetto a quelli tradizionali per i quali sono stati verificati i limiti di letteratura (e quindi materiale anche in grado di fornire una migliorata resistenza a fatica ed ai carichi), si rileva che:

- lo strato superficiale in conglomerato bituminoso è caratterizzato da una deformazione di trazione massima, alla base dello strato, pari a 3 microstrain, quindi pienamente conforme all'ipotesi di pavimentazione fuori fatica nei confronti della fessurazione;
- livelli tensionali di trazione alla base della soletta in calcestruzzo risultano trascurabili rispetto alla resistenza caratteristica del materiale;
- date le caratteristiche in termini di resistenza alla compressione offerte dai calcestruzzi non sussistono condizioni tali per cui si possano generare deformazioni verticali nella soletta di impalcato tali da produrre variazioni di regolarità del piano viario. Pertanto, l'impalcato può essere considerato non suscettibile ai fenomeni di accumulo di deformazioni permanenti (produzione di ormaie).

Questi risultati risultano coerenti ai valori di danno trascurabili sopra riportati, i quali già evidenziano come questi strati non risentano dei fenomeni di fessurazione per fatica e ormaimento in quanto ammettono un numero di passaggi per raggiungere una condizione di danno estremamente superiore rispetto a quelli previsti.

Si osserva infine che, essendo le pavimentazioni in conglomerato bituminoso fortemente sensibili a fenomeni di ormaimento degli strati quando realizzate sopra gli impalcati dei ponti, la gestione del fenomeno di accumulazione delle deformazioni permanenti verrà gestito e limitato andando a calibrare adeguatamente la curva granulometrica discontinua costituente i materiali bituminosi, come precedentemente riportato, così da garantire elevata resistenza all'ormaiamento. Nello specifico la calibrazione della miscela di aggregati, ovvero della curva granulometrica, si porrà come obiettivo quello di permettere la formazione di strati in conglomerato bituminoso caratterizzati da uno scheletro litico nel quale i punti di contatto fra gli aggregati risulta massimizzato così da garantire elevata stabilità alla miscela impedendo fenomeni deformativi tali da produrre, nel tempo, accumulo di deformazioni permanenti.

Pertanto, essendo tutti gli strati in una condizione di lavoro fuori fatica la pavimentazione ricade a tutti gli effetti nella categoria delle *Perpetual Pavements*, ovvero pavimentazioni con una vita utile strutturale verosimilmente indefinita.



20. Considerazioni Conclusive

La pavimentazione stradale di progetto costituita da uno strato superficiale (usura e binder) in conglomerato bituminoso, realizzato con bitume modificato con polimeri SBR/NR, secondo processo wet, sovrapposto ad una soletta di impalcato in calcestruzzo armato.

È stata condotta una analisi di tipo razionale basata sulla determinazione del danno cumulativo prodotto, sotto specifiche ipotesi, dalle azioni dei carichi da traffico nell'arco della vita utile prevista. Tale analisi ha evidenziato come la pavimentazione risulta idonea a garantire una durabilità ben superiore rispetto alla vita utile di progetto ipotizzata. In particolare, tale analisi ha evidenziato come tutti gli strati componenti la pavimentazione sono caratterizzati da valori di danno del tutto trascurabili evidenziando come i volumi di traffico non determinino nessuna perdita significativa di prestazioni strutturali nel tempo.

In base a questi risultati è stata fatta una valutazione della pavimentazione nei termini che caratterizzano le *Perpetual Pavements*, ovvero pavimentazioni caratterizzate da stati tenso-deformativi indotti dai carichi molto inferiori ai valori limite sotto i quali gli strati possono essere considerati fuori fatica. Da questo punto di vista risulta esserci coerenza con i risultati dell'analisi razionale in termini di danno in quanto le deformazioni indotte dai carichi risultano molto minori dei limiti stabiliti caratteristici dei materiali.

Si può quindi concludere che la pavimentazione risulta presentare caratteristiche tali da garantire una durabilità molto superiore alla vita utile prevista in fase di progetto in quanto ricadente nella categoria delle *Perpetual Pavements*.

D'altra parte deve comunque essere considerato che, a causa degli effetti naturali di invecchiamento dei materiali, dovranno essere egualmente previsti nel corso della vita utile interventi manutentivi che saranno prevedibilmente solo di tipo ordinario e limitati allo strato più superficiale (usura) e che tali previsioni sono condizionate da come si modificherà nel periodo considerato l'intensità (peso e frequenza) del traffico rispetto a quanto ipotizzato nel presente progetto di dimensionamento.



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA PAVIMENTAZIONE PISTA CICLABILE

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



OP INGEENERIA SRL
Società di Ingegneria Civile
info@opingegneria.com - www.opingegneria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. **Marradi** | Prof. Ing S. **Pagliara** | Ing. M. **Ascoli** | Dott. P. **Turin**

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W.
Salvatore

Prof. Ing. N.
Squeglia

50



21. Premessa

L'oggetto della presente relazione tecnica specialistica riguarda la descrizione tipologica e la verifica funzionale delle pavimentazioni della pista ciclabile, appartenente ad un più ampio progetto che prevede la realizzazione del nuovo collegamento fra lo svincolo della SGC FI-PI-LI e il centro abitato di Signa.

Con riferimento al progetto di fattibilità tecnica ed economica, il nuovo collegamento, tra lo svincolo della SGC FI-PI-LI e il centro abitato di Signa, si configura come un nuovo asse di penetrazione extraurbana tra la rete stradale principale e l'area urbana del Comune di Signa.

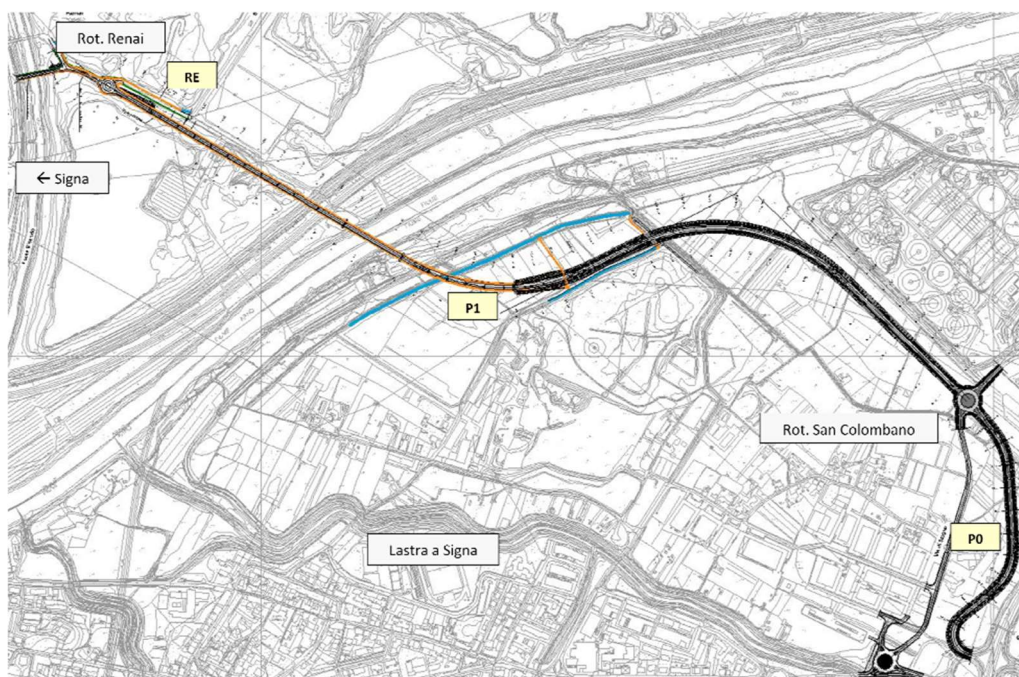


Figura 20 – Tracciato stradale da progetto di fattibilità tecnico-economica

Il progetto prevede la realizzazione di una pista ciclabile, a collegamento delle due rive del fiume Arno, in corrispondenza della parte di tracciato che si sviluppa in prossimità della rotatoria Renai e del viadotto.

Per la pavimentazione di seguito definita verranno valutate le prestazioni che la sovrastruttura potrà offrire nel tempo quando soggetta ai carichi da traffico e alle condizioni climatiche della zona. Pertanto, i dati necessari per il progetto e la verifica di una pavimentazione stradale possono essere distinti in quattro categorie:

- volume e spettro di traffico;
- condizioni ambientali;
- materiale e loro caratteristiche fisico-meccaniche;
- modelli di degrado per la valutazione delle condizioni limite.

Le caratteristiche dei dati sono fortemente legate al tipo di progettazione richiesta e alla metodologia adottata; nel presente caso è stato scelto di condurre un'analisi razionale della pavimentazione ai fini delle verifiche di durabilità. I criteri di verifica adottati hanno mirato a garantire elevate caratteristiche di durabilità della sovrastruttura e limitati interventi di manutenzione nel tempo.



22. Pavimentazione da progetto di fattibilità

La progettazione della pavimentazione si inserisce in un più ampio progetto che prevede la realizzazione di un nuovo tronco stradale di collegamento dello svincolo della SGC FI-PI-LI con i centri abitati di Lasta a Signa e di Signa.

Questo nuovo collegamento, tra lo svincolo di Lastra a Signa della SGC FI-PI-LI ed il nuovo ponte sul Bisenzio nel comune di Signa, si configura come un nuovo asse stradale di penetrazione extraurbana tra la rete principale, rappresentata dalla SGC FI-PI-LI e l'area urbana del Comune di Signa. Il progetto stradale comprende, in sintesi, la realizzazione delle seguenti nuove opere:

- Nuovo asse stradale, di collegamento tra lo svincolo esistente di Lastra a Signa della FI-PI-LI ed il nuovo ponte in costruzione sul Bisenzio in località Signa, di classe funzionale "C" (strada extraurbana secondaria) ai sensi dell'art. 2 del Nuovo Codice della Strada;
- Due nuove rotatorie (San Colombano e Renai).

In uscita dallo svincolo di Lastra a Signa il traffico verrà indirizzato, verso la rotatoria di S. Colombano, la quale smisterà il traffico:

- verso il Comune di Signa imboccando il nuovo asse di penetrazione extraurbana;
- verso il centro della città di Lastra a Signa, collegandosi mediante Via di Stagno alla rete di penetrazione urbana, costituita da rampe e rotatorie la cui realizzazione non è inclusa nel presente progetto;
- verso la nuova area di espansione del Comune di Lastra a Signa ed il Parco Fluviale di Lastra a Signa, sempre attraverso la percorrenza di Via di Stagno,
- verso Est, con la viabilità che lambisce il depuratore e collega con via Vittorio Masiani.

Verso Nord la nuova strada in progetto terminerà con la rotatoria Renai che costituisce la transizione tra la viabilità extraurbana, rappresentata dal nuovo asse, e la rete stradale urbana del Comune di Signa. Infatti, attraverso la nuova rotatoria Renai si accede direttamente al nuovo ponte in costruzione sul fiume Bisenzio il cui calibro è quello di una strada urbana di quartiere (tipo E).

Il nuovo ponte sul Bisenzio, attraverso una intersezione a raso (che dovrà essere necessariamente potenziata per sopportare i nuovi flussi di traffico convogliati dal nuovo asse) consente di smistare il traffico sul Viale dell'Arte della Paglia che costeggia in riva destra il Bisenzio. Tramite quest'ultimo asse (la cui capacità di deflusso dovrà essere opportunamente verificata in relazione al nuovo traffico che la impegnerà) il traffico verrà distribuito verso Est, in direzione del nodo dell'Indicatore, e verso Ovest, in direzione centro città.

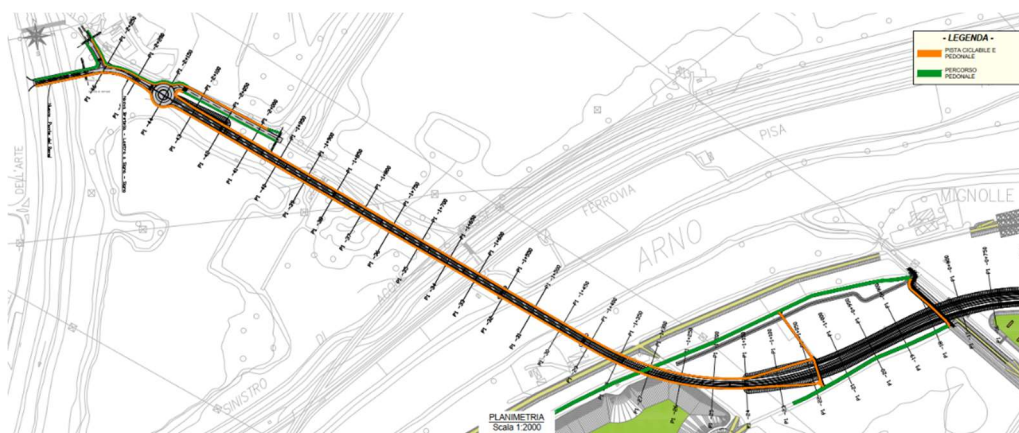
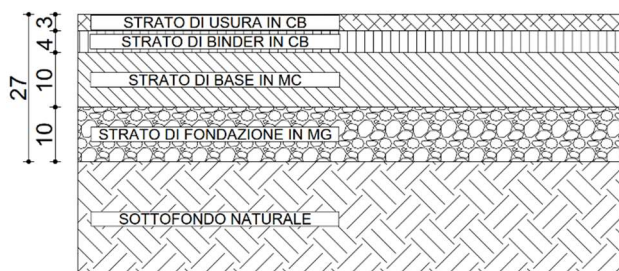


Figura 21 – Tracciato pista ciclabile



Il progetto, al fine di consentire una elevata accessibilità fra le due sponde del fiume Arno, nonché dei centri abitati di Signa e Lastra a Signa, prevede la realizzazione di una nuova pista ciclabile lungo il tratto stradale che si sviluppa in viadotto nonché lungo i rilevati necessari per la realizzazione della rotatoria Renai.

Il progetto di fattibilità tecnico-economica prevede una struttura con le caratteristiche di seguito riportate.



Strato	Sp. (cm)
Usura in CB	3
Binder in CB	4
Base in MC	10
Fondazione in MG	10
Sottofondo naturale	-

Figura 22 – Pacchetto pavimentazione pista ciclabile da progetto di fattibilità

23. Dimensionamento pavimentazione

Sulla base del progetto di fattibilità della pavimentazione della pista ciclabile sono state apportate delle variazioni al fine di ottimizzare la durabilità e l'ecocompatibilità della stessa. In particolare, rispetto allo studio di fattibilità tecnico-economica, si prevede l'utilizzo di conglomerati bituminosi ad alto tenore di materiali riciclati, conformemente a quanto previsto nei CAM strade di prossima emanazione. Per lo strato di usura è previsto conglomerato bituminoso tradizionale ad alto contenuto di fresato (30%) mentre per lo strato di binder è previsto conglomerato bituminoso con fibre tessili di riciclo (Asphaltex).

La pavimentazione di progetto sottoposta a verifica presenta pertanto le seguenti caratteristiche:

- Strato di usura ad alto contenuto di granulato di conglomerato bituminoso sp. 3 cm
- Strato di binder tipo Asphaltex sp. 4 cm
- Strato di base in Misto Cementato sp. 10 cm
- Strato di fondazione in Misto Granulare sp. 10 cm
- Sottofondo naturale



Figura 23 – Dimensioni pavimentazione di progetto



24. Criterio di verifica delle pavimentazioni

Nel presente capitolo vengono descritti in dettaglio i seguenti aspetti:

- il criterio adottato per la verifica della pavimentazione oggetto della presente attività progettuale;
- l'entità e la tipologia di traffico di progetto;
- le condizioni climatiche per la zona di intervento;
- le ipotesi assunte in merito alle caratteristiche prestazionali dei materiali;
- i criteri prestazionali (leggi di fatica) assunte per le verifiche di durabilità della sovrastruttura.

24.1. Metodo di progetto razionale

Il dimensionamento delle pavimentazioni stradali è rivolto a garantire adeguati livelli di durabilità alla sovrastruttura e al relativo sottofondo durante la sua "vita utile", ovvero per un periodo di tempo oltre il quale la degradazione da essa progressivamente subita per effetto del traffico e degli agenti atmosferici ne rende necessario il rifacimento totale o parziale. A tale scopo sono state proposte negli anni molteplici metodologie di progetto, sia di tipo empirico che basate su un'analisi razionale dello stato tenso-deformativo indotto nella pavimentazione per effetto delle sollecitazioni prodotte dai carichi di progetto.

L'esperienza ha dimostrato che l'uso di procedure di progettazione di tipo empirico - meccanicistiche fornisce le stime più accurate delle prestazioni di pavimentazione di terminal portuali. Il metodo di progettazione empirico - meccanicistico è stato sviluppato in diversi anni di pratica ed è stato calibrato e convalidato sia mediante prove di carico accelerato che sulla base delle prestazioni riscontrate sulle pavimentazioni in esercizio. Ai fini della presente verifica sono stati applicati i criteri del metodo di progetto razionale, di cui se ne riporta nella figura seguente il diagramma di flusso.

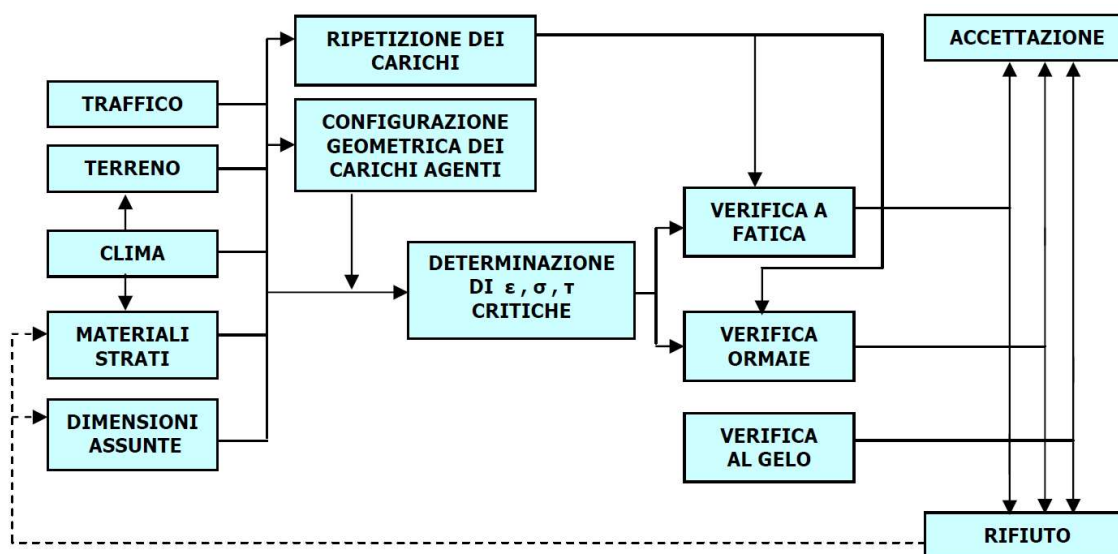


Figura 24 – Diagramma di flusso del metodo di dimensionamento razionale delle pavimentazioni stradali

Tale metodologia di calcolo prevede la preliminare schematizzazione dell'insieme degli strati componenti la sovrastruttura in un multistrato elastico e la successiva determinazione dei valori delle tensioni e delle deformazioni indotte dai carichi nei vari strati. Tali valori di tensione e deformazione vengono successivamente confrontati con quelli che caratterizzano le resistenze dei materiali rispetto ai carichi ripetuti, consentendo di stimare il numero di ripetizioni di carico ammissibili attraverso l'utilizzo di opportune leggi di fatica.



La verifica della soluzione progettuale viene di norma eseguita sulla base della legge di accumulo lineare del danno proposta da Palmgren-Miner. Tale legge stabilisce quanto segue: siano $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$, k diversi livelli di tensione applicati rispettivamente per n_1, n_2, \dots, n_k cicli di carico senza nessun ordine particolare di applicazione, si verifica la rottura per fatica quando:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

dove:

- N_i è il numero di cicli di applicazione del carico che porterebbe a rottura il materiale qualora la tensione fosse sempre mantenuta uguale a σ_i (ripetizioni di carico massime ammissibili);
- n_i è il numero di ripetizioni di carico previste sulla base delle ipotesi di traffico assunte.

Nel caso delle pavimentazioni stradali si assumono come carichi di progetto l'insieme degli assi che competono allo spettro di traffico scelto per l'infrastruttura in esame, pertanto, il danno cumulativo viene determinato come somma del contributo fornito da ogni singolo asse, per ognuno dei periodi stagionali in cui viene suddiviso l'anno solare.

Nel caso in esame il calcolo dello stato tenso-deformativo è stato eseguito per mezzo di un software di modellazione della pavimentazione come multistrato elastico lineare. Lo schema della pavimentazione è da intendersi verificato qualora il danno cumulato per fatica risulti inferiore a 1.

In termini di prestazioni strutturali, la procedura di progettazione si basa sui seguenti aspetti principali:

- la verifica dei conglomerati bituminosi, determinata in base all'entità della tensione a trazione nella parte inferiore del complesso degli strati bituminosi;
- la verifica della fessurazione negli strati stabilizzati a cemento, determinata in base al rapporto tra la tensione massima e la resistenza prevista;
- il controllo dell'accumulo di deformazioni permanenti negli strati granulari e nel sottofondo, effettuato in base all'entità della sollecitazione verticale massima trasmessa dai carichi attraverso gli strati superficiali della pavimentazione.

Data la particolare tipologia di infrastruttura (pista ciclabile) in condizioni normali di esercizio risulta soggetta ad azioni del tutto trascurabili. Tuttavia, a favore di sicurezza, tale analisi risulta condotta rispetto alla possibile presenza di veicoli pesanti (mezzi di soccorso, mezzi di manutenzione del verde). Dato il particolare contesto è ragionevole pensare che le velocità di circolazione siano basse, se non nulle; pertanto, è stata condotta una analisi statica della sovrastruttura allo scopo di verificare il rispetto delle tensioni ammissibili.

25. Caratteristiche dei materiali

25.1. **Conglomerato bituminoso per manti di usura ad alto contenuto di fresato**

Il manto di usura rappresenta lo strato più superficiale della pavimentazione, sul quale agiscono direttamente la maggior parte delle azioni esterne, rappresentando un punto di elevatissima valenza per il funzionamento complessivo di tutta la struttura e per la sicurezza della circolazione che vi insiste.

Il conglomerato è costituito da una miscela di aggregati lapidei naturali (ghiaie, pietrischi, graniglie, sabbie ed additivi), e/o in parte artificiali (argilla espansa, granella di fonderia, etc...), e/o in parte riciclati (provenienti da conglomerato bituminoso di recupero) impastata a caldo con bitume semisolido in impianti di tipo fisso automatizzati. Il conglomerato viene posto in opera mediante macchina vibrofinitrice e costipato. Ai fini del loro impiego i conglomerati bituminosi dovranno avere marcatura CE relativamente alle grandezze indicate in premessa. Nel caso specifico, al fine di un miglioramento delle caratteristiche di sostenibilità, si prevede l'utilizzo di un elevato contenuto (30%) di fresato proveniente da attività di demolizione stradale. Questo consente un notevole



miglioramento degli aspetti di sostenibilità in quanto consente il recupero e il riutilizzo di materiali di scarto, che altrimenti genererebbero rifiuto e dovrebbero essere conferiti a discarica, oltre che una riduzione della produzione di aggregati vergini frantumati da cava con conseguente consumo di risorse non rinnovabili. Inoltre, l'utilizzo di una elevata percentuale di materiale fresato consente di recuperare anche parte del bitume costituente i conglomerati bituminosi fresati con possibile riduzione del quantitativo di bitume vergine necessario per la produzione della miscela.

Il materiale deve presentare adeguata resistenza meccanica, cioè capacità di sopportare le sollecitazioni trasmesse dalle ruote dei veicoli senza deformazioni permanenti, e sufficiente flessibilità per poter seguire sotto gli stessi carichi qualunque eventuale assestamento del sottofondo anche sul lungo periodo. Al fine di garantire tali prestazioni si prevede la modifica del legante bituminoso. In tal senso la valutazione delle prestazioni meccaniche del materiale avviene mediante la determinazione dei parametri di riferimento che sono R_t (resistenza a trazione indiretta) e CTI (coefficiente da trazione indiretta).

	Usura a 25°C
R_t (MPa)	0,72 – 1,40
CTI (MPa)	≥ 60

Tabella 24 – Caratteristiche meccaniche strato di usura

Ai fini dell'analisi dello stato tenso-deformativo risulta necessario schematizzare il materiale come un mezzo elastico lineare i cui parametri caratterizzanti le prestazioni meccaniche sono il modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Sulla base delle precedenti indicazioni sono stati fissati i seguenti parametri di progetto caratterizzanti il materiale ad una temperatura di 20 °C.

Valori di progetto	E @20°C [MPa]	ν
Usura	3500	0,35

Tabella 25 – Parametri di progetto strato di usura

25.2. Conglomerato bituminoso per strato di binder

Per la realizzazione dello strato di collegamento fra strato di usura e strato di base si prevede l'utilizzo di conglomerati bituminosi modificati all'interno dei quali è previsto il reimpiego di fibre da scarti tessili. La scelta di tale tipologia di materiale è dettata dalla necessità di garantire adeguate prestazioni e durabilità della pavimentazione associate ad un miglioramento della sostenibilità ambientale di tutto il processo produttivo. Nello specifico il recupero di materiali tessili all'interno di questa tipologia di miscele consente di dare un notevole contributo al problema dello smaltimento degli scarti dell'industria tessile sviluppando e migliorando materiali innovativi da impiegare nelle costruzioni stradali.

La valutazione delle caratteristiche meccaniche del conglomerato viene condotta determinando i parametri di resistenza a trazione indiretta R_t e il coefficiente di trazione indiretta CTI . In particolare, le miscele studiate in laboratorio, quelle prodotte in impianto e quelle prelevate alla stesa, compattate dovranno rispettare i seguenti limiti.

	Binder Asphaltex a 25°C
R_t (MPa)	0,72 – 1,40
CTI (MPa)	≥ 60

Tabella 26 – Prescrizioni per miscele per strati di binder



Ai fini dell'analisi dello stato tenso-deformativo risulta necessario schematizzare il materiale come un mezzo elastico lineare i cui parametri caratterizzanti le prestazioni meccaniche sono il modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Ai fini dell'analisi sono stati fissati i seguenti parametri di progetto caratterizzanti il materiale ad una temperatura di 20 °C.

Valori di progetto	E @20°C [MPa]	ν
Binder Asphaltex	4000	0,35

Tabella 27 – Parametri di progetto per miscele per strati di binder

25.3. Misto cementato

L'utilizzo del misto cementato negli strati di sottobase o di fondazione della pavimentazione, con valori di rigidità notevolmente più elevati rispetto ai materiali non legati, garantisce una vita utile maggiore della sovrastruttura stradale, anche per volumi di traffico elevati.

Questo materiale, per effetto della ripetizione delle azioni dei carichi da traffico nel tempo si degrada, fessurandosi, riducendo la sua rigidità da un valore iniziale massimo a quello finale, prossimo a quello di un materiale non legato. Il valore iniziale a sua volta dipende dalle azioni prodotte dai mezzi di cantiere in fase di stesa e dal ritiro termo-igrometrico.

Tale strato, nel suo complesso è costituito da una miscela di aggregati lapidei, impastata con cemento ed acqua in impianto centralizzato con dosatori a peso o a volume, da stendersi in un unico strato dello spessore finito di norma di 20 cm. La miscela, dopo adeguato tempo di stagionatura, deve raggiungere una resistenza meccanica durevole anche in presenza di acqua e gelo.

A livello di caratterizzazione prestazionali i parametri da controllare risultano essere la resistenza a trazione R_t e la resistenza a compressione R_c . Nello specifico i parametri devono rispettare i valori seguenti.

	Valutate a 3 gg	Valutate a 7 gg
R_t 25°C (GPa x 10-3)	0,30-0,5	0,32-0,60
R_c 25°C (GPa x 10-3)	1,4-3,6	2,5-5,5

Tabella 28 – Requisiti meccanici dei misti cementati

Il ricorso ad una fondazione in misto cementato fornisce un maggiore supporto agli strati superficiali in conglomerato bituminoso e garantisce una migliore diffusione delle tensioni indotte dai carichi statici sul sottofondo.

Il comportamento di questo materiale viene generalmente schematizzato secondo due successive fasi distinte: inizialmente, il materiale è caratterizzato da un modulo elastico corrispondente ad una condizione di iniziale fessurazione, dovuta esclusivamente ai fenomeni di ritiro termo-igrometrico ed alle prime applicazioni di carico. In seguito, il ripetuto passaggio dei veicoli comporta l'insorgere di fessurazioni progressive a cui si accompagna una riduzione di rigidità, fino al raggiungimento di uno strato granulare equivalente in cui il materiale è assimilabile ad un misto granulare ad elevate prestazioni.

È noto che si dalla fase di stesa e indurimento, senza necessariamente tenere in conto del degrado per fessurazione prodotta dalle azioni dei carichi, il misto cementato subisce lesioni per effetto dei fenomeni di ritiro e di variazione termica; pertanto, i valori di riferimento del modulo elastico riportati in letteratura considerano questi aspetti e consigliano di fare riferimento a valori compresi fra i 1500 e i 3000 MPa.

Ai fini delle verifiche, il valore del modulo elastico attribuibile a tale materiale risulta essere rappresentato dell'Effective Long Term Stiffness (ELTS), il quale è un indicatore relativo alla rigidità dello strato nel lungo periodo che tiene conto degli effetti dovuti al



traffico, nonché, delle variazioni stagionali. Di seguito è riportata una figura, estratta dal “*Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials – TG2 – Third Edition – June 2020*”, che mostra come varia il modulo in funzione del numero di ripetizione di carico.

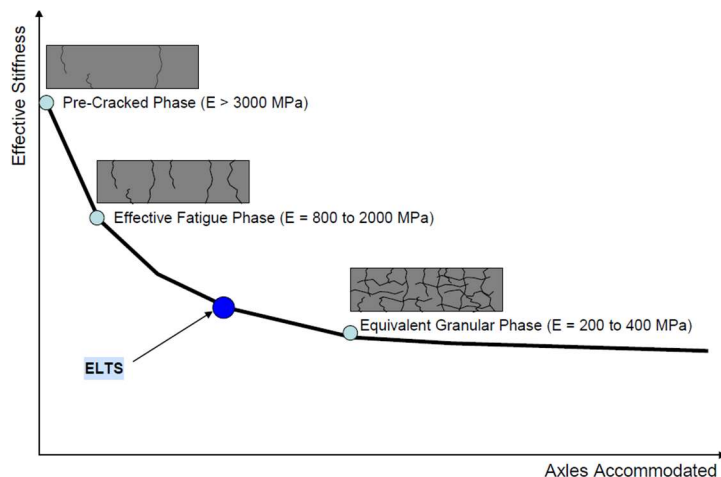


Figura 25 – Effective Long Term Stiffness (ELTS)

Va inoltre osservato che a parità di materiale e di numero di ripetizioni di carico il valore di ELTS varia in funzione della rigidità del materiale sottostante.

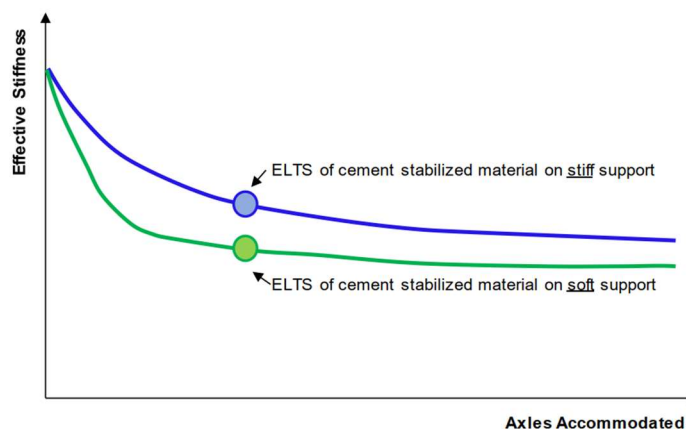


Figura 26 – Variazione ELTS in funzione del supporto

Nella tabella sottostante sono indicati i valori del modulo elastico e del coefficiente di Poisson definiti, sulla base delle precedenti osservazioni, ai fini dell'analisi.

	E [MPa]	ν
Misto cementato	1500	0,25

Tabella 29 – Parametri elastici dei misti cementati

25.4. Fondazione in misto granulare

La pavimentazione di progetto prevede la realizzazione di uno strato di fondazione in misto granulare di spessore complessivo di 10 cm. Per la definizione dei moduli di progetto da utilizzare in fase di analisi è stato fatto riferimento alla seguente relazione:

A.T.I.



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



Prof. Ing. A. Marradi | Prof. Ing. S. Pagliara | Ing. M. Ascoli | Dott. P. Turin

CONSULENZA:

Prof. Ing. W. Salvatore
Prof. Ing. N. Squeglia

PAGINA



$$E_2 = 0,206 \cdot h^{0,45} \cdot E_1$$

dove:

- E_2 è il modulo dello strato di fondazione;
- E_1 è il modulo dello strato sottostante alla fondazione;
- h è lo spessore della fondazione.

Sulla base di questo, del modulo caratterizzante il sottofondo, e tenuto conto della presenza di leganti; sono stati definiti i seguenti parametri.

Sottofondo stabilizzata	
E [MPa]	80
v	0.40

Tabella 30 – Parametri elastici della fondazione

25.5. Sottofondo

Il sottofondo è il volume di terreno nel quale risultano ancora sensibili le sollecitazioni indotte dal traffico stradale e trasmesse dalla pavimentazione; rappresenta la zona di transizione fra il terreno in sito e la pavimentazione (nelle sezioni in trincea o a raso campagna) ovvero tra il rilevato e la pavimentazione.

Per assicurare i requisiti richiesti ai sottofondi delle pavimentazioni stradali è necessario prevedere la realizzazione di uno strato di caratteristiche idonee a coniugare le imperfezioni e le eterogeneità dei movimenti di terra con l'omogeneità richiesta per la posa in opera della pavimentazione.

Pertanto, questo strato deve consentire, per mezzo delle sue proprietà fisiche e meccaniche e tenuto conto dello spessore, di conferire adeguato supporto alla pavimentazione, in ogni suo punto, mediante una portanza sufficiente a garantire i livelli di stabilità e funzionalità ammessi nel progetto.

Nel caso in esame il tronco stradale in progettazione, per il collegamento dello svincolo della SGC FI-PI-LI al centro abitato di Signa, nei tratti in cui non è presente il ponte sul fiume Arno si sviluppa sempre in rilevato. Pertanto, la condizione più critica per il sottofondo è quella costituita dall'ultimo strato dei rilevati stradali.

Il sottofondo dovrà pertanto presentare caratteristiche in termini di portanza adeguate a fornire adeguato supporto alla pavimentazione, resistendo adeguatamente alle sollecitazioni indotte dai carichi da traffico. indicativamente il modulo di deformabilità per tali strati, misurato tramite prova di carico con piastra nell'intervallo di carico tra 0,15 – 0,25 N/mm², non dovrà risultare minore di 50 MPa.

Tale valore del modulo di deformazione viene assimilato al Modulo elastico statico del sottofondo che, pertanto, risulta caratterizzato come segue:

Sottofondo	
E [MPa]	50
v	0.40

Tabella 31 – Parametri elastici del sottofondo



26. Condizioni climatiche di progetto

Tra le condizioni ambientali, la temperatura influenza in modo determinante le caratteristiche di durabilità delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso in quanto caratterizza i valori del modulo di rigidità e il comportamento delle miscele a fatica, oltre ad avere notevole influenza nel meccanismo di formazione delle ormaie. Pertanto, influenzano fortemente il regime di sollecitazione indotto nella pavimentazione e ne condizionano il degrado e quindi la vita utile. Gli aspetti che devono essere attentamente valutati sono la modifica della portanza del sottofondo per effetto della presenza d'acqua e degli eventuali cicli di gelo e disgelo, e le caratteristiche meccaniche degli strati superficiali, in conglomerato bituminoso, per effetto delle temperature caratterizzanti gli strati che si instaurano nelle diverse stagioni.

La portanza del sottofondo non dovrebbe variare nel tempo in quanto essendo l'ultimo strato del rilevato risulta protetto dalla presenza delle acque di risalita capillare, nonché dalle acque meteoriche.

La temperatura caratterizzante gli strati della pavimentazione dipende dalle caratteristiche termiche dei materiali, dagli spessori, dalla profondità e dalle caratteristiche climatiche dell'ambiente in cui la pavimentazione si inserisce.

Al fine di condurre una analisi accurata delle temperature caratterizzanti gli strati in conglomerato bituminoso l'anno solare è stato suddiviso in quattro periodi stagionali, e in ognuno dei quali è stata determinata la temperatura media caratteristica dell'aria nella zona in cui l'infrastruttura in esame si inserisce.

Mesi	TMMA (°C)	Stagione	TMA Stagionale (°C)
Dicembre	8,9	Inverno	9,0
Gennaio	7,5		
Febbraio	9,8		
Marzo	10,4	Primavera	16,0
Aprile	13,6		
Maggio	19,1		
Giugno	23,8	Estate	25,0
Luglio	26,5		
Agosto	26,4		
Settembre	21,9	Autunno	17,0
Ottobre	16,8		
Novembre	12,5		

Tabella 32 – Temperatura stagionale dell'aria

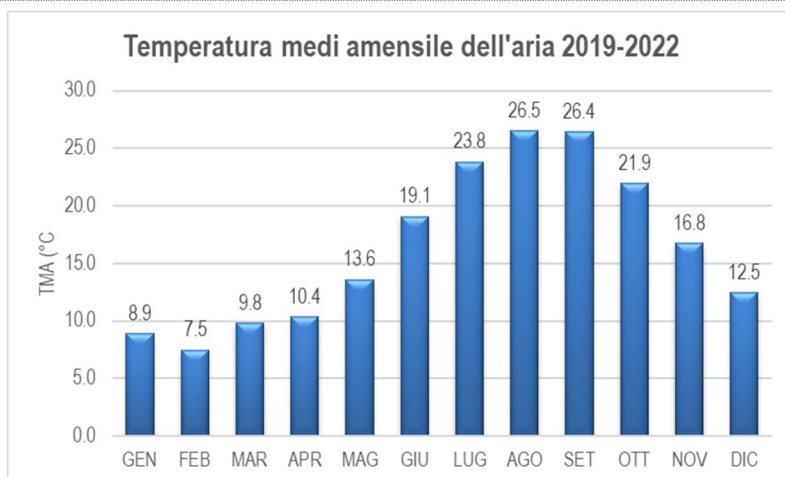


Figura 27 – Temperatura media mensile dell'aria 2019-2022

Sulla base dei valori di temperatura media mensile dell'aria, è stata ricavata la corrispondente temperatura media per gli strati in conglomerato bituminoso. Generalmente si ipotizza una temperatura dello strato costante, valutata alla profondità media. In Italia sono largamente utilizzati due leggi di variazione della temperatura: quella di Marchionna e quella di Barber.

Legge proposta di Witchaz e successivamente ripresa del Prof. Marchionna in "Modello di degrado strutturale delle pavimentazioni – fatica degli strati legati", di seguito riportata, correla la temperatura di uno strato bituminoso alla sola profondità "Z" e alla temperatura media giornaliera stagionale dell'aria "TMA".

$$TMP(Z) = (1.467 + 0.043 \cdot Z) + (1.362 - 0.005 \cdot Z) \cdot TMA$$

dove:

- TMA è la temperatura media stagionale dell'aria (°C);
- Z è la profondità, a partire dalla superficie, a cui si vuole calcolare la temperatura media (cm);
- TMP(Z) è la temperatura media stagionale della pavimentazione alla profondità Z (°C).

La legge di Barber offre una maggiore precisione nella determinazione della temperatura, considerandola non solo funzione della profondità ma anche del tempo.

$$TMP(z, t) = T_A + R + \left(3R + \frac{A_g}{2}\right) \cdot F \cdot e^{-C \cdot z} \cdot \sin(0,262 \cdot t - C \cdot z - \arctg\left(\frac{C}{H + C}\right))$$

Dove:

- TMP(Z) è la temperatura media stagionale della pavimentazione alla profondità z e al tempo t;
- T_A è la temperatura media giornaliera dell'aria (°C);
- A_g è l'escursione media giornaliera della temperatura dell'aria;
- $R = (2/3)((b \cdot l)/(24h_c))$ è il contributo della radiazione solare (°C);
- $H = h_c/K$;
- $h_c = 4,882 \cdot (1,3 + 0,4332 \cdot v^{3/4})$;
- $C = \sqrt{(0,131 \cdot w \cdot s)/k}$;



- $F = H / \sqrt{(H + C)^2 + C^2}$ (ora^{0,5}/m);
- I è la radiazione media giornaliera (kcal/m²gg);
- v è la velocità del vento (km/h);
- b è il grado di assorbimento della superficie (0,6-0,95);
- K è la conduttività termica (1,04-1,96) (kcal/m ora °C);
- s è il calore specifico (0,193-0,22) (kcal/kg °C);
- w è la massa volumica apparente (2400-2500) (kg/m³).

In entrambe le formule i dati climatici da utilizzare sono quelli relativi alla località interessata dall'infrastruttura.

I corrispondenti valori delle temperature della pavimentazione, sono riportati nella tabella seguente per ciascun periodo stagionale.

Stagione	Temperatura dello strato (°C)	
	Tappeto di usura	Strato di binder
Inverno	13,7	13,7
Primavera	23,2	23,1
Estate	35,1	35,1
Autunno	24,4	24,4

Tabella 33 – Temperatura stagionale della pavimentazione

Nota la temperatura nei diversi strati della pavimentazione nei quattro periodi stagionali, si è proceduto alla correzione dei moduli di progetto degli strati bituminosi, assumendo come riferimento la temperatura di 20°C. In particolare, sulla base delle informazioni reperibili nella letteratura di riferimento e della pratica corrente, è stata applicata la legge proposta dall'Asphalt Institute, di cui si riporta di seguito l'espressione analitica:

$$E_{ref} = 10^{\alpha \cdot (T^2 - T_{ref}^2)} \cdot E$$

dove:

- T è la temperatura media stagionale dello strato (in °F);
- T_{ref} è la temperatura di riferimento pari a 20 C (68°F);
- E è il modulo dello strato bituminoso alla temperatura media stagionale (MPa);
- E_{ref} è il modulo dello strato bituminoso alla temperatura di riferimento pari a 20 C (MPa);
- α è il coefficiente che indica la suscettività termica del materiale.

L'influenza della temperatura sulle variazioni di rigidità dei materiali riguarda esclusivamente gli strati in conglomerato bituminoso e lo strato riciclato a freddo con emulsione bituminosa.

Nello specifico è stato fatto riferimento ad un valore del coefficiente di suscettività termica pari a:

- 0,00014 per gli strati in conglomerato bituminoso tradizionale, come suggerito dall'Asphalt Institute.

**26.1. Caratteristiche meccaniche**

Il comportamento meccanico degli strati bituminosi, a causa della componente viscosa che caratterizza tali materiali, dipende dalla temperatura di esercizio. È necessario, pertanto, tenere conto di questo aspetto nella determinazione del modulo elastico “E” da assumere per il calcolo dello stato tenso-deformativo secondo il metodo razionale. I moduli caratterizzanti i materiali nelle diverse stagioni sono pertanto riassunti nella seguente tabella:

Stagione	Moduli (MPa)	
	Tappeto di usura	Strato di binder
T _{ref}	3500	4000
Inverno	5700	6500
Primavera	2800	3200
Estate	800	1000
Autunno	2400	2800

Tabella 34 – Prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi alle diverse temperature



27. Definizione traffico di progetto

La pavimentazione oggetto del presente documento si riferisce ad una tipologia di infrastrutture, quali le piste ciclabili, soggetta a una tipologia di traffico che prevalentemente è quello dovuto a cicli e pedoni. Queste categorie di utenti non trasferiscono alla pavimentazione sollecitazioni significative, cioè in grado di essere poste alla base di un dimensionamento strutturale di tipo tradizionale; pertanto, risultano del tutto trascurabili rispetto alle usuali verifiche a fatica e ormaiamento a cui sono sottoposte le sovrastrutture stradali.



Figura 28 – Effetti del carico da traffico

La pavimentazione deve pertanto possedere e mantenere nel tempo elevate caratteristiche funzionali (aderenza, regolarità, drenabilità delle acque meteoriche, ecc) della superficie viabile, al fine di soddisfare prevalentemente esigenze di confort e sicurezza degli utenti (nel caso in esame, ciclisti).

Le verifiche, di seguito riportate, sono riferite a condizioni eccezionali nelle quali questa tipologia di pavimentazione può risultare sottoposta ad azioni prodotte da veicoli pesanti. Le condizioni a cui può essere fatto riferimento sono quelle in cui, per eventi occasionali, possono essere presenti sulla pavimentazione veicoli pesanti; in tal senso, gli unici carichi significativi sono quelli prevedibili per interventi di manutenzione ordinaria (sistemazione stagionale delle opere a verde, raccolta rifiuti, ecc.), i quali, anche considerando le ridotte dimensioni della carreggiata, saranno necessariamente trattori e autocarri di tipo leggero. Inoltre, anche i carichi accidentali dei mezzi di soccorso e antiincendio devono essere adeguatamente considerati. I soli carichi di entità significativa che dovrà sopportare la pavimentazione, oltre a quelli occasionali ed accidentali, saranno quelli connessi alla fase costruttiva.

In riferimento a queste condizioni di esercizio può essere ipotizzato, ragionevolmente, delle condizioni di circolazione quasi statiche pertanto la verifica, come detto, non risulta essere condotta rispetto a fenomeni di rottura per fatica o di accumulo di deformazioni permanenti ma piuttosto nei confronti di rotture per superamento delle resistenze caratteristiche dei materiali.

In funzione delle osservazioni precedentemente riportate la definizione del traffico di progetto, pertanto, non si riferisce alla quantificazione dei volumi di traffico e dello spettro ma, piuttosto, alla definizione di una tipologia di veicolo critico che possa interessare la pavimentazione. Da questo punto di vista, nelle verifiche di dimensionamento della pavimentazione e nel confronto fra le resistenze caratterizzanti la pavimentazione con le sollecitazioni prodotte, è stato preso come riferimento il carico trasmesso dai mezzi di manutenzione per le operazioni di decespugliamento, così come riportato di seguito.



Figura 29 – Veicolo critico di progetto

Questi carichi possono essere cautelativamente ricondotti, ai fini progettuali, ad uno schema di carico massimo su ruota singola di 60KN ed impronta circolare di diametro pari a 0.5m, che corrisponde ad una pressione contatto pari a 300Kpa (in linea con un valore massimo di pressione di gonfiaggio pari a 3bar).



P (kN)	60
A (mm ²)	196250
p (kPa)	300

Tabella 35 – Caratteristiche dello pneumatico



28. Risultati dell'analisi

Negli schemi che seguono sono riportati i valori massimi delle tensioni per le verifiche di resistenza e indotti dall'asse del veicolo critico considerato.

I simboli riportati nelle tabelle che seguono, hanno il seguente significato:

- $\sigma_{h\max}$ è la tensione orizzontale massima alla base dello strato, alla profondità stabilita;
- $\sigma_{v\max}$ è la tensione verticale massima in sommità allo strato, alla profondità stabilita.

Relativamente alle tensioni, il segno positivo (+) e negativo (-) indicano, rispettivamente, la sollecitazione di compressione e di trazione.

Strato	h (mm)	E (MPa)	$\sigma_{h\max}$ (MPa)	σ_{hlim} (MPa)
Strato di usura	30	9300	-0,44	-0,72
Strato di binder	40			
Fondazione in misto cementato	100	1500	-0,44	-0,50

Tabella 36 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: inverno

Strato	h (mm)	E (MPa)	$\sigma_{v\max}$ (MPa)	σ_{vlim} (MPa)
Fondazione in misto granulare	100	140	+0,12	+0,54
Sottofondo	-	90	+0,09	+0,54

Tabella 37 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: inverno

Strato	h (mm)	E (MPa)	$\sigma_{h\max}$ (MPa)	σ_{hlim} (MPa)
Strato di usura	30	5050	+0,07	-0,72
Strato di binder	40			
Fondazione in misto cementato	100	1500	-0,46	-0,50

Tabella 38 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: primavera

Strato	h (mm)	E (MPa)	$\sigma_{v\max}$ (MPa)	σ_{vlim} (MPa)
Fondazione in misto granulare	100	140	+0,13	+0,54
Sottofondo	-	90	+0,10	+0,54

Tabella 39 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: primavera

Strato	h (mm)	E (MPa)	$\sigma_{h\max}$ (MPa)	σ_{hlim} (MPa)
Strato di usura	30	1800	+0,26	-0,72
Strato di binder	40			
Fondazione in misto cementato	100	1500	-0,47	-0,50

Tabella 40 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: estate

Strato	h (mm)	E (MPa)	$\sigma_{v\max}$ (MPa)	σ_{vlim} (MPa)
Fondazione in misto granulare	100	140	+0,16	+0,54
Sottofondo	-	90	+0,12	+0,54

Tabella 41 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: estate



Strato	h (mm)	E (MPa)	σ_{hmax} (MPa)	σ_{hlim} (MPa)
Strato di usura	30	4550	+0,11	-0,72
Strato di binder	40			
Fondazione in misto cementato	100	1500	-0,46	-0,50

Tabella 42 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati superficiali: autunno

Strato	h (mm)	E (MPa)	σ_{vmax} (MPa)	σ_{vlim} (MPa)
Fondazione in misto granulare	100	140	+0,13	+0.54
Sottofondo	-	90	+0,10	+0.54

Tabella 43 – Risultati del calcolo tenso-deformativo strati profondi: autunno

Il confronto delle tensioni sollecitanti la pavimentazione rispetto ai valori limite caratteristici dei diversi materiali evidenzia come, sotto condizioni di carico statiche, la pavimentazione riesca a sopportare adeguatamente le azioni dei carichi da traffico senza incorrere in fenomeni fessurativi per superamento della resistenza a trazione o di produzione di deformazioni permanenti, garantendo una adeguata durabilità e vita utile.

Si sottolinea che per gli strati in conglomerato bituminoso sono stati presi a riferimento delle tensioni limite pari al valore minimo dell'intervallo di accettabilità della resistenza a trazione del materiale. Per gli strati in misto cementato, invece, è stato fatto riferimento ad un valore di tensione limite che tiene conto delle prestazioni a completa maturazione dello strato (lungo termine).



29. Considerazioni Conclusive

La pavimentazione oggetto della presente analisi, definita per una pista ciclabile, risulta costituita da uno strato superficiale di 7 cm in conglomerato bituminoso ad elevata sostenibilità, con alto contenuto di materiali riciclati, uno strato di base in misto cementato di 10 cm, uno strato di fondazione in misto granulare di 10 cm sovrapposti al sottofondo.

Questa tipologia di infrastruttura, nelle normali condizioni di esercizio, risulta soggetta a una tipologia di traffico che prevalentemente è quello dovuto a cicli e pedoni. Ai fini di una corretta valutazione della durabilità e delle sollecitazioni determinanti i principali fenomeni di degrado caratterizzanti le pavimentazioni è stato necessario fare riferimento a condizioni di carico eccezionali o accidentali dovute alle operazioni di manutenzione stagionale, a interventi di soccorso o alle operazioni in fase realizzativa. In tal senso è stata condotta una verifica statica della pavimentazione rispetto alle azioni prodotte, a basse velocità, da un trattore per le operazioni di sfalcio del verde pubblico, assunto come veicolo critico.

Questa tipologia di analisi ha evidenziato come, durante le diverse stagioni dell'anno, le sollecitazioni di trazione e compressione sollecitanti i diversi strati della pavimentazione, risultano sempre inferiori rispetto alle resistenze caratteristiche dei materiali. Pertanto, la pavimentazione risulta presentare adeguate caratteristiche di resistenza e durabilità rispetto a queste condizioni eccezionali di esercizio e in grado di assicurare una adeguata vita utile.



REGIONE TOSCANA

Direzione mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale
Settore viabilità regionale ambiti Firenze-Prato e Pistoia

NUOVO PONTE SUL FIUME ARNO E RELATIVI COLLEGAMENTI VIARI TRA LO SVINCOLO DELLA SGC FI-PI-LI DI LASTRA A SIGNA E DI SIGNA
CIG: 95482064DA - CUP: D91B21005300001

ALLEGATI

A.T.I.

MANDATARIA



MANDANTE



REDAZIONE DI GARA E PROGETTO DEFINITIVO:



OP INGEENNERIA S.R.L.
Società di Ingegneria Civile
info@opingenneria.com - www.opingenneria.com
Viale San Concordio, 1180 - 55100 LUCCA
Tel: 0583 391194 - P.IVA: 02486940469



Prof. Ing. A. **Marradi** | Prof. Ing S. **Pagliara** | Ing. M. **Ascoli** | Dott. P. **Turin**

CONSULENZA:

PAGINA

Prof. Ing. W.
Salvatore

Prof. Ing. N.
Squeglia

1



DICHIARAZIONE DI PRESTAZIONE

(art. 4 CPR 305/2011)

n. 197/01

1. codice di identificazione unico del prodotto – tipo: **AC 16 BIN 50\70**
2. numero di tipo: **197\01**
3. Uso previsto del prodotto: conglomerato bituminoso per uso stradale, su piste aeroportuali e altre aree soggette a traffico conformemente alla norma UNI EN 13108-1:2008
4. Nome e indirizzo del fabbricante: **ENDIASFALTI SPA**
Stabilimento di Agliana (PT)
Via Ferrucci, 61 – 51031 Agliana
5. Mandatario: n.a.
6. Sistema di valutazione e verifica della costanza delle prestazioni del prodotto da costruzione: **2+**
7. L'organismo notificato **Q-AID n. 2716**
ha rilasciato il certificato di conformità del controllo della produzione in fabbrica **2716/CPR/0009** fondato sui seguenti elementi
 - i. ispezione iniziale dello stabilimento di produzione e del controllo della produzione in fabbrica
 - ii. sorveglianza, valutazione e verifica continua del controllo produzione in fabbrica
8. valutazione tecnica europea: n.a.
9. prestazione dichiarata

<i>Caratteristiche essenziali</i>	<i>Prestazione</i>	<i>Specifica armonizzata</i>
<i>Contenuto di vuoti</i>		UNI EN 13108-1:2006 AC 2008
<i>massimo</i>	<i>NPD</i>	
<i>minimo</i>	<i>NPD</i>	
<i>Minimo di vuoti riempiti da bitume</i>	<i>NPD</i>	
<i>Massimo di vuoti riempiti da bitume</i>	<i>NPD</i>	
<i>Vuoti aggregato minerale</i>	<i>NPD</i>	
<i>Contenuto vuoti dopo 10 rotazioni</i>	<i>NPD</i>	
<i>Sensibilità all'acqua</i>	<i>ITSR_{NR}</i>	
<i>Resistenza all'abrasione da pneumatici chiodati</i>	<i>ABR_{NR}</i>	
<i>Reazione al fuoco</i>	<i>Euroclasse CFI</i>	
<i>Temperatura della miscela</i>	<i>140°C – 180° C</i>	
<i>Composizione granulometrica</i>		
20 mm	100 %	
16 mm	95 %	
12,5 mm	85 %	
10 mm	78 %	
8 mm	67 %	
6,3 mm	64 %	
4 mm	52 %	
2 mm	41 %	
1 mm	32 %	
0,50 mm	24 %	
0,25 mm	14 %	
0,125 mm	7 %	
0,063 mm	5,5 %	
<i>Contenuto di legante</i>	<i>Bmin 3,80% (3,80%)</i>	
<i>Resistenza alla deformazione permanente</i>		
<i>Dispositivo largo: profondità di rottura</i>	<i>PNR</i>	
<i>Dispositivo piccolo ormaimento</i>	<i>WTS_{AIRNR}</i>	
<i>Dispositivo piccolo: profondità di rottura</i>	<i>PRD_{AIRNR}</i>	
<i>Sostanze pericolose</i>	<i>Sostanza x <y ppm</i>	

10. La prestazione del prodotto di cui sopra è conforme all'insieme delle prestazioni dichiarate. La presente dichiarazione di responsabilità viene emessa in conformità al regolamento (UE) n. 305/2011, sotto la responsabilità del fabbricante sopra identificato

Agliana, li 15/04/21



Rappresentante Controllo Produzione

RAPPORTO PROVE DI TIPO

Produttore: *Endiasfalti s.p.a.*
Via F. Ferrucci n. 61 - 51031 Agliana (PT)

Data di emissione: **15.04.21**

Impianto di produzione: **Impianto in** *Via F. Ferrucci, 61 - 51031 Agliana (PT)*

Tipo di miscela: **AC 16 BIN 50/70**

Denominazione commerciale: *BINDER 0/16 "ASFALTEX"*

Metodi per la validazione: **Validazione in produzione**

MATERIALI COSTITUENTI

AGGREGATO	
ORIGINE	TIPO
CAVA BORGOGNONI	Pietrisco 12/22
CAVA BORGOGNONI	Pietrisco 6/12
CAVA PEDOGNA	Pietrisco 4/8
CAVA BORGOGNONI	Polverone
PROGETTO RENAI	Sabbia 0/4
GARNETTATURA FUTURA	Fibra tessile da recupero

LEGANTE: Bitume 50/70

FILLER: -

FRESATO: -

FORMULAZIONE MISCELA espressa come Composizione Obiettivo in uscita

GRANULOMETRIA		
Setacci	Apertura [mm]	Passante % (valore medio)
D	16	95,0
Caratteristico grosso	8	67,0
Extra grosso	-	-
2 mm	2	41,0
Caratteristico fine	0,500	24,0
Extra fine	-	-
0,063	0,063	5,5

CONTENUTO DI LEGANTE (valore medio): 3,80% sulla miscela.

TEMPERATURA DELLA MISCELA: da 140 a 180 °C.

ALLEGATI

Rapporti di prova:

Poliedro – RDP N. ITT 148321



Poliedro Srl Servizi tecnici costruzioni stradali
Via Maestri del Lavoro, 91/93
25014 Castenedolo (BS)
Tel: +39 030 2319144
Fax: +39 030 2319145
eMail: poliedro.srl@libero.it
pec: poliedro@pec-mynet.it
P.I. e C.F. 02277380982

Rapporto di Prova
n° ITT 148321

Data emissione RdP: **15/04/21**

Committente: **Endi Asfalti SpA**
Via Ferrucci, 61
51031 Agliana (PT)

Impianto di produzione: **Marini MAP 260E**

Ubicazione: Via Ferrucci, 61 - 51031 Agliana (PT)

Tipo di Validazione: **Uscita** (Validazione su materiale prodotto all'impianto)

Designazione della Miscela:

CB	16	Bin		50/70
-----------	-----------	------------	--	--------------

Dimensione "D": ≥ 16 mm

Designazione della Categoria: UNI EN 13108-1

Codice ricetta interna: **AsfalTex Fibrorinforzato 3**

Temperatura della miscela al
momento del prelievo °C : 150

Prelievo effettuato da: Committente

Metodo di campionamento: UNI EN 12697-27 - Art. 4.1

Data prelievo: 07/04/21

Data accettazione: 08/04/21

Data di inizio analisi: 08/04/21

Verbale di prelievo n° : 148321

Materiali:

- 1) Pietrisco 01 - Antica Cava Borgognoni Srl
- 2) Pietrisco 4/6 - Cava Pedogna SpA
- 3) Sabbia Polverone - Antica Cava Borgognoni Srl
- 4) Sabbia - Progetto Renai Srl
- 5) Pietrisco 02 - Antica Cava Borgognoni Srl
- 6) Filler
- 7) Bitume 50/70
- 8) Fibre da tessuti di recupero

Osservazioni: *I risultati si riferiscono esclusivamente al campione sottoposto ad analisi*

cod. RdP rev.03 del 01/01/14

Lo Sperimentatore

Firmato digitalmente da
Claus Dolci
(Il Responsabile del laboratorio)



Poliedro Srl Servizi tecnici costruzioni stradali
Via Maestri del Lavoro, 91/93
25014 Castenedolo (BS)
Tel: +39 030 2319144
Fax: +39 030 2319145
eMail: poliedro.srl@libero.it
pec: poliedro@pec-mynet.it
P.I. e C.F. 02277380982

Rapporto di Prova
n° ITT 148321

Data emissione RdP: 15/04/21

IL PRESENTE RAPPORTO DI PROVA E' COMPOSTO DAI SEGUENTI RISULTATI DI PROVA

Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 1: Contenuto di legante solubile - B.1.5 Centrifuge extractor method	UNI EN 12697-1
Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 2: Determinazione della granulometria	UNI EN 12697-2
Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 1: Conglomerato bituminoso prodotto a caldo	UNI EN 13108-1
Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 20: Prove di tipo	UNI EN 13108-20
Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Parte 6: Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua	UNI EN 1097-6

cod. RdP rev.03 del 01/01/14

Lo Sperimentatore

pagina
2 di 6

Firmato digitalmente da
Claus Dolci
(Il Responsabile de laboratorio)



Poliedro Srl Servizi tecnici costruzioni stradali
Via Maestri del Lavoro, 91/93
25014 Castenedolo (BS)
Tel: +39 030 2319144
Fax: +39 030 2319145
eMail: poliedro.srl@libero.it
pec: poliedro@pec-mynet.it
P.I. e C.F. 02277380982

Rapporto di Prova
n° ITT 148321

Data emissione RdP: 15/04/21

**DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI LEGANTE SOLUBILE
(Pb) E DELLA DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DELLA
MISCELA DI AGGREGATI**

cod. RdP rev.03 del 01/01/14

Lo Sperimentatore

pagina
3 di 6

Firmato digitalmente da
Claus Dolci

(Il Responsabile de laboratorio)



Poliedro Srl Servizi tecnici costruzioni stradali
Via Maestri del Lavoro, 91/93
25014 Castenedolo (BS)
Tel: +39 030 2319144
Fax: +39 030 2319145
eMail: poliedro.srl@libero.it
pec: poliedro@pec-mynet.it
P.I. e C.F. 02277380982

Rapporto di Prova
n° ITT 148321

Data emissione RdP: 15/04/21

Data esecuzione: 12/04/21

Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 1: Contenuto di legante solubile - B.1.2 Hot extractor (wire mesh filter) method	
UNI EN 12697-1	
Bitume sul peso degli aggregati	4,56%
Bitume sul peso della miscela	4,36%
Valore "corretto" sul peso della miscela	4,33%

Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Parte 6: Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua	
UNI EN 1097-6	
Massa volumica dei granuli (Mg/m ³)	2,666

cod. RdP rev.03 del 01/01/14

Lo Sperimentatore

pagina
4 di 6

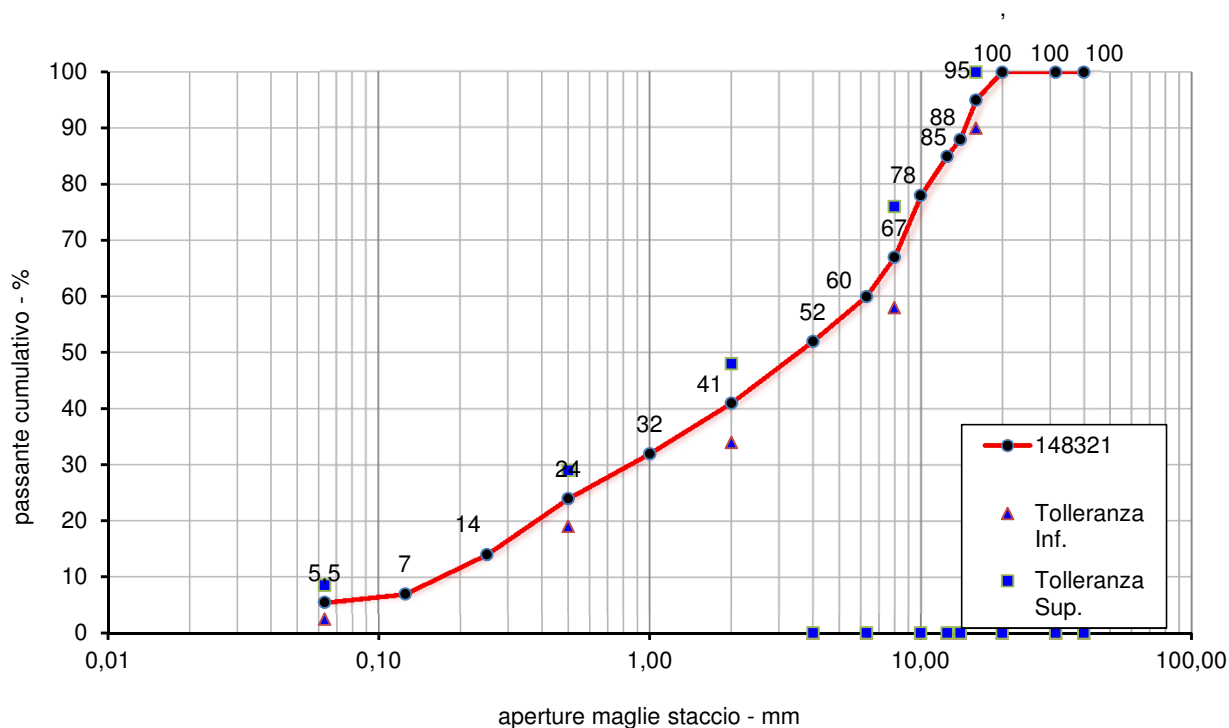
Firmato digitalmente da
Claus Dolci
(Il Responsabile de laboratorio)



Data emissione RdP: 15/04/21

Data esecuzione: 13/04/21

Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 2: Determinazione della granulometria								
UNI EN 12697-2								
		serie	aperture mm	148321				
Passante al setaccio %	aggregato grosso	ISO 3310-2	40,0	100		Tolleranza Inf.	ITT	Tolleranza Sup.
			31,5	100			100	
			20,0	100			100	
			16,0	95			100	
			14,0	88		90	95	100
			12,5	85			88	
			10,0	78			85	
			8,0	67			78	
			6,3	60		58	67	76
			4,0	52			60	
	aggregato fine	ISO 3310-1	2,000	41			52	
			1,000	32		34	41	48
			0,500	24			32	
			0,250	14		19	24	29
			0,125	7			14	
	filler		0,063	5,5			7	
						2,5	5,5	8,5



cod. RdP rev.03 del 01/01/14

Prova sperimentale
[Signature]

Firmato digitalmente da
Claus Dolci
(Il Responsabile del laboratorio)



Data emissione RdP: 15/04/21

Data esecuzione: 13/04/21

Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 20: Prove di tipo	
UNI EN 13108-20	
Tolleranza superiore	4,93%
Valore dichiarato nell'ITT	4,33%
Tolleranza inferiore	3,73%
Etichetta CE	B_{min} 3,80

Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 20: Prove di tipo							
UNI EN 13108-20							
\	apertura mm	Limite Inf.	Tolleranza Inf.	ITT	Tolleranza Sup.	Limite Sup.	Tolleranze
1,4D	20,0	100,0	100	100	100	100,0	\
D	16,0	90,0	86	95	100	100,0	-9 ; +5
D/2 o caratteristico grosso	8,0		58	67	76		±9
2,0 mm	2,0	10,0	34	41	48	50,0	±7
Caratteristico fine	0,500		19	24	29		±5
0,063 mm	0,063	0,0	2,5	5,5	8,5	12,0	±3

Lo Sperimentatore

Firmato digitalmente da
Claus Dolci
(Il Responsabile de laboratorio)



SCHEMA MARCATURA



Numero certificato		2716/CPR/0009		Anno	
Numero organismo di certificazione		2716			
ENDIASFALTI SPA					
Unità operativa: Agliana (PT) - IMPIANTO DISCONTINUO MARINI MAP 260 E					
Impianto di produzione: Via F. Ferrucci, 61 - 51031 Agliana (PT)					
di Applicazione della marcatura 08					
21					
Codice della miscela					
Prove secondo prospetto ZA.1 della norma di riferimento				REQUISITI GENERALI + EMPIRICI	
197				(UNI EN 12697-2)	
Denominazione del produttore:		miscela binder 0/16 ASFALTEX		Impiego previsto	
Denominazione secondo norma:		AC 16 BIN 50/70			
REQUISITI GENERALI					
CONTENUTO DI VUOTI (UNI EN 12697-8)		CONTENUTO DI VUOTI MAX (tramite compattatore a impatto a 75 colpi per faccia UNI EN 12697-30)		NDP	
		CONTENUTO DI VUOTI MIN (tramite compattatore a impatto a 75 colpi per faccia UNI EN 12697-30)		NDP	
GRANULOMETRIA (UNI EN 12697-2)				vedi a lato	
REQUISITI EMPIRICI					
GRANULOMETRIA (UNI EN 12697-2)				D= 10	
CONTENUTO DI LEGANTE (UNI EN 12697-1)		MINIMO		Bmin 3,80% (3,80%)	
VALORI MARSHALL (UNI EN 12697-34)		STABILITA' MARSHALL MAX		NDP	
(tramite compattatore a impatto a 75 colpi per faccia UNI EN 12697-30)		STABILITA' MARSHALL MIN		NDP	
		SCORRIMENTO MARSHALL		NDP	
		QUOZIENTE MARSHALL		NDP	
CONTENUTI DI VUOTI A 10 ROTAZIONE (UNI 12697-31)		MINIMO		NDP	
Temperatura (UNI EN 12697-13)				140-180	
VUOTI RIEMPITI CON BITUME (UNI EN 13108-20)		MINIMO		NDP	
		MASSIMO		NDP	
VUOTI PRESENTI NELL'AGGREGATO MINERALE (UNI EN 13108-20)		MINIMO		NDP	
SENSIBILITA' ALL'ACQUA (UNI EN 13108-20)		RAPPORTO DI RESISTENZA ALLA TRAZIONE INDIRETTA		ITSRNR	
RESISTENZA ALL'BRASIONE DA PNEUMATICI CHIODATI (UNI EN 13108-20)		VALORE MASSIMO DI ABRASIONE		AbrNR	
RESISITENZA ALLA DEFORMAZIONE PERMANENTE (UNI EN 13108-20)		DISPOSITIVO DI GRANDI DIMENSIONI: PROFONDITA' DI ORMAIAMENTO PROPORZIONALE		PNR	
		DISPOSITIVO DI PICCOLE DIMENSIONI: INCLINAZIONE DELLA TRACCIA DELLE RUOTE		WTSAIRNR	
		DISPOSITIVO DI PICCOLE DIMENSIONI: PROFONDITA' DI ORMAIAMENTO PROPORZIONALE		PRDAIRNR	

