

COMUNE DI TERRE DEL RENO - PROVINCIA DI FERRARA - 44047 LOC. SANT'AGOSTINO - V. D.
ALIGHIERI N° 2
Codice Fiscale / Partita Iva: 01988940381
PEC : comune.terredelreno@pec.it
Tel. 0532/844411

SETTORE V° LAVORI PUBBLICI - RETI - PATRIMONIO



COMUNE DI TERRE DEL RENO
MANUTENZIONE STRAORDINARIA DEL
PATRIMONIO STRADALE COMUNALE
- ANNO 2025 -
RdO nr. 5326193

OGGETTO

PROGETTO ESECUTIVO

PROGETTO

PE-GEN-RE-01-00
RELAZIONE TECNICA GENERALE

ELABORATO



Ing. Fabio Picariello

PAVENCO PAVEMENT ENGINEERING CONSULTING SRL
Sede legale e operativa:
Via F.L. Ferrari 31/D - 44122 Ferrara



PROGETTISTA

RESPONSABILE DEL V° SETTORE
Lavori pubblici, reti e patrimonio

Ing. Agnese Malagoli

R.U.P.

0	Sett. 2025	Prima emissione	Barin	Picariello	Malagoli
N° Rev.	Data Rev.	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato

REV./DATA

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
1.1	AREE DI INTERVENTO	3
2	DESCRIZIONE DELLO STATO DI FATTO	5
2.1	STATO DI FATTO VIA VERDI – DOSSO	5
2.2	STATO DI FATTO VIA PRAMPOLINI – DOSSO	7
2.3	STATO DI FATTO VIA GIOVECCA – MIRABELLO	8
3	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI	10
3.1	INTERVENTI VIA VERDI – DOSSO	10
3.1.1	DESCRIZIONE DELLE FASI LAVORATIVE	10
3.2	INTERVENTI VIA PRAMPOLINI – DOSSO	11
3.2.1	DESCRIZIONE DELLE FASI LAVORATIVE	11
3.3	INTERVENTI VIA GIOVECCA – MIRABELLO	11
3.3.1	DESCRIZIONE DELLE FASI LAVORATIVE	12
3.4	COSTI DI REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI	12
4	PERCENTUALI MINIME DI CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO O MATERIA RECUPERATA, RICICLATA O DI SOTTOPRODOTTI DA IMPIEGARSI NELLE MISCELE	13
5	GESTIONE DELLE MATERIE	14
5.1	CONFERIMENTO DEI MATERIALI DI RISULTA	14
6	PRESTAZIONI AMBIENTALI DEL CANTIERE	14
7	CALCOLO E VERIFICA DEL PACCHETTO STRADALE	17

7.1	ANALISI DEL TRAFFICO	17
7.2	CALCOLO ESA.....	18
7.3	IL METODO RAZIONALE	19
7.4	CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI AL VARIARE DELLA TEMPERATURA	19
7.5	CONFIGURAZIONE DI CALCOLO DELLA PAVIMENTAZIONE.....	22
7.6	CARICHI DI PROGETTO	23
7.7	CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE SEZIONI DI CALCOLO	24
7.8	PUNTI DI CONTROLLO	25
7.9	RISULTATI DI CALCOLO	25
8	CALCOLO DELLA DURABILITA' DEL PACCHETTO – VERIFICA DINAMICA.....	26
8.1	LEGGE DI FATICA PER I CONGLOMERATI BITUMINOSI	26
8.2	DURABILITA' DEI PACCHETTI	27
9	INTERFERENZE CON I SOTTOSERVIZI	28
10	CONCLUSIONI	29

1 PREMESSA

La presente relazione ha lo scopo di illustrare il progetto esecutivo affidato allo scrivente dal Comune di Terre del Reno, relativo ai lavori di manutenzione straordinaria del patrimonio stradale comunale. Gli interventi sono finalizzati a migliorare le condizioni di sicurezza, la durabilità della pavimentazione stradale e la funzionalità della rete viaria. L'attività di manutenzione interesserà specifici tratti della rete stradale comunale, individuati a seguito di un'analisi preliminare, che ha evidenziato criticità sia di natura strutturale che funzionale.

1.1 AREE DI INTERVENTO

In accordo con la Committenza si prevede di intervenire sui seguenti tratti stradali:

Dosso

- Via Verdi, nel tratto di circa 210 m compreso tra Via Statale e Piazza G. Garibaldi (Fig. 1.1)
- Via Prampolini, su due tratti di lunghezza rispettivamente pari a 115 m e a 200 m in corrispondenza dei civici 26-28 e 19 (Fig. 1.2)



Figura 1.1 - Inquadramento area di intervento Via G. Verdi, Dosso, Terre del Reno (FE)



Figura 2.2 - Inquadramento area di intervento Via Prampolini, Dosso, Terre del Reno (FE)

Mirabello

- Via Giovecca, nel tratto di circa 350 m compreso tra il civico 46 ed il civico 56.



Figura 3.3 - Inquadramento area di intervento Via Giovecca, Mirabello, Terre del Reno (FE)

Si è manifestata la necessità di incrementare la durabilità, la funzionalità e la sicurezza della rete stradale attraverso:

- Ripristino e/o rifacimento della pavimentazione;
- Sistemazione di dissesti;
- Adeguamento e integrazione della segnaletica orizzontale e verticale ove necessario;

2 DESCRIZIONE DELLO STATO DI FATTO

L'esame visivo delle sovrastrutture, condotto in occasione dei rilievi topografici effettuati e dei sopralluoghi congiunti con la Committenza, ha permesso di acquisire importanti informazioni in merito all'attuale stato di conservazione delle pavimentazioni delle infrastrutture in esame.

Si riporta nei paragrafi successivi la documentazione fotografica a supporto di quanto osservato nelle varie vie oggetto di intervento.

2.1 STATO DI FATTO VIA VERDI – DOSSO

Si sono riscontrati ammaloramenti diffusi quali fessurazioni longitudinali e trasversali, deformazioni con fessurazioni a “pelle di coccodrillo” della pavimentazione stradale e dissesti nei marciapiedi.

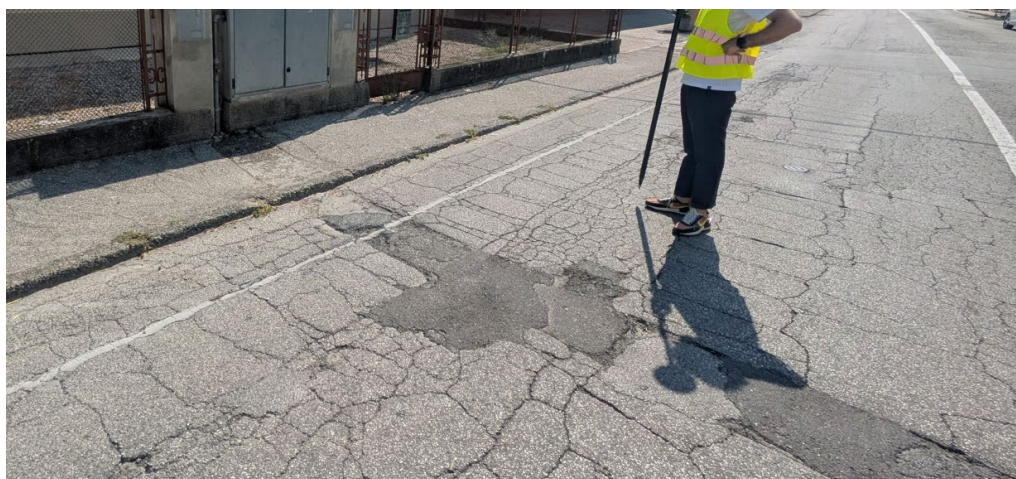


Figura 2.1 – Documentazione fotografica stato di fatto Via Verdi, Dosso, Terre del Reno (FE)



Figura 2.2 – Documentazione fotografica stato di fatto Via Verdi, Dosso, Terre del Reno (FE)



Figura 2.3 – Documentazione fotografica stato di fatto Via Verdi, Dosso, Terre del Reno (FE)

2.2 STATO DI FATTO VIA PRAMPOLINI – DOSSO

Si è riscontrato un generale stato di degrado della pavimentazione con presenza di buche, dissesti diffusi e avvallamenti.



Figura 2.4 – Documentazione fotografica stato di fatto primo tratto Via Prampolini, Dosso, Terre del Reno (FE)



Figura 2.5 – Documentazione fotografica stato di fatto secondo tratto Via Prampolini, Dosso, Terre del Reno (FE)

2.3 STATO DI FATTO VIA GIOVECCA – MIRABELLO

Si sono riscontrati ammaloramenti diffusi della pavimentazione stradale quali fessurazioni longitudinali e trasversali, deformazioni con fessurazioni a “pelle di coccodrillo”, buche, dissesti e avvallamenti in corrispondenza della mezzzeria della carreggiata.



Figura 2.6 – Documentazione fotografica stato di fatto Via Giovecca, Mirabello, Terre del Reno (FE)



Figura 2.7 – Documentazione fotografica stato di fatto Via Giovecca, Mirabello, Terre del Reno (FE)



Figura 2.8 – Documentazione fotografica stato di fatto Via Giovecca, Mirabello, Terre del Reno (FE)



Figura 2.9 – Documentazione fotografica stato di fatto Via Giovecca, Mirabello, Terre del Reno (FE)

3 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI

3.1 INTERVENTI VIA VERDI – DOSSO

Al fine di ripristinare la planarità della piattaforma stradale e di conferire alla pavimentazione un'adeguata portanza e stabilità vengono progettati i seguenti interventi:

INTERVENTO INTERMEDIO	
Strato	Spessore (cm)
Usura TQ	3
Binder TQ	7

Si prevede inoltre la demolizione dei marciapiedi esistenti ed il loro rifacimento, con adeguamento della larghezza ad 1.5 m come prescritto dal D.M. 5/11/2001, solo sul lato in direzione Via Statale, per permettere la realizzazione di N.27 stalli per la sosta (dim.: 5.00x2.20m) in direzione P.zza G. Garibaldi.

La modifica della sezione trasversale della sede stradale implica alcuni rimaneggiamenti non significativi al sistema di smaltimento delle acque meteoriche, quali lo spostamento di circa 20-30 cm delle caditoie lato marciapiede e la messa in quota dei pozzetti di raccordo esistenti, con eventuale loro sostituzione qualora venissero danneggiati durante la fase di demolizione del marciapiede.

3.1.1 DESCRIZIONE DELLE FASI LAVORATIVE

Nel dettaglio, le fasi lavorative previste saranno le seguenti:

Intervento Intermedio

1. Fresatura della pavimentazione esistente in conglomerato bituminoso per uno spessore di 10 cm;
2. Rimozione dei cordoli e demolizione dei marciapiedi esistenti;
3. Posizionamento caditoie e pozzetti di raccordo;
4. Posizionamento del nuovo cordolo prefabbricato in cls su letto di malta cementizia;
5. Stesa dello strato di Binder con bitume tal quale per uno spessore di 7 cm; previa stesa della mano d'attacco in emulsione bituminosa in caso di presenza di uno strato esistente in conglomerato bituminoso o in materiale legato;
6. Stesa dello strato di Usura con bitume tal quale per uno spessore di 3 cm, previa stesa della mano d'attacco in emulsione bituminosa;
7. Realizzazione del nuovo marciapiede prevedendo uno strato di livellamento in materiale granulare compattato su cui viene gettata una soletta in c.a. dello spessore di 12.5 cm, con strato finale di usura di 2.5 cm;
8. Rifacimento della segnaletica orizzontale e verticale;

Per quanto sopra non espressamente riportato, ed in particolar modo per l'area di intervento e le sezioni tipologiche di progetto, si rimanda all'elaborato grafico *PE-INF-PL04-00*.

3.2 INTERVENTI VIA PRAMPOLINI – DOSSO

Al fine di ripristinare la planarità della piattaforma stradale e di conferire alla pavimentazione un'adeguata portanza e stabilità vengono progettati i seguenti interventi:

INTERVENTO SUPERFICIALE	
Strato	Spessore (cm)
Binder TQ	5
Livellamento in materiale granulare compattato	-

3.2.1 DESCRIZIONE DELLE FASI LAVORATIVE

Nel dettaglio, le fasi lavorative previste saranno le seguenti:

Intervento Intermedio

1. Fresatura della pavimentazione esistente in conglomerato bituminoso per uno spessore di 5 cm;
2. Posa di uno strato di livellamento in materiale granulare compattato per eliminare buche ed avvallamenti;
3. Stesa dello strato di Binder con bitume tal quale per uno spessore di 7 cm;

Per quanto sopra non espressamente riportato, ed in particolar modo per l'area di intervento e le sezioni tipologiche di progetto, si rimanda all'elaborato grafico *PE-INF-PL05-00*.

3.3 INTERVENTI VIA GIOVECCA – MIRABELLO

Al fine di ripristinare la planarità della piattaforma stradale e di conferire alla pavimentazione un'adeguata portanza e stabilità vengono progettati i seguenti interventi:

INTERVENTO INTERMEDIO	
Strato	Spessore (cm)
Usura TQ	3
Binder TQ	7

Si prevede inoltre la realizzazione di una pista ciclabile su corsia riservata ad unico senso di marcia di larghezza pari ad un 1m.

L'inserimento della pista, con la pavimentazione di alcune zone verdi in cui attualmente si disperdono le acque meteoriche, comporta la necessità di prevedere il posizionamento di caditoie aggiuntive poste ad interasse di 50 m sul bordo della carreggiata adiacente, collegate a pozzetti ciechi di raccordo al sistema fognario esistente.

3.3.1 DESCRIZIONE DELLE FASI LAVORATIVE

Nel dettaglio, le fasi lavorative previste saranno le seguenti:

1. Scavo del terreno a lato della carreggiata per una profondità di 30 cm;
2. Posa nuove caditoie e pozzetti ed adeguamento dei pozzetti esistenti;
3. Rinterro con materiale granulare compattato per uno spessore di 30 cm in corrispondenza dell'allargamento della carreggiata per la realizzazione della pista ciclabile;
4. Posa membrana bituminosa termoadesiva su tutta la larghezza della carreggiata, previa stesa mano di attacco in emulsione bituminosa;
5. Stesa dello strato di Binder con bitume tal quale per uno spessore di 7 cm;
6. Stesa dello strato di Usura con bitume tal quale per uno spessore di 3 cm, previa stesa della mano d'attacco in emulsione bituminosa;
7. Rifacimento dell'arginello e dei tratti di raccordo con le intersezioni stradali;
8. Rifacimento della segnaletica orizzontale e verticale;

Per quanto sopra non espressamente riportato, ed in particolar modo per l'area di intervento e le sezioni tipologiche di progetto, si rimanda all'elaborato grafico *PE-INF-PL06-00*.

3.4 COSTI DI REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI

L'importo dei lavori, al netto dei costi della sicurezza, è dettagliato nel Computo Metrico Estimativo redatto per ogni intervento sulla base dei seguenti prezzi, in ordine di priorità:

- *Elenco Regionale dei Prezzi delle Opere Pubbliche della Regione Emilia-Romagna – Anno 2025*
- *Elenco Regionale dei Prezzi dei Lavori Pubblici della Regione Veneto – Anno 2025*
- *Listino Prezzi ANAS – Anno 2025 rev.1 “Nuove costruzioni”*
- *Analisi prezzi*

4 PERCENTUALI MINIME DI CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO O MATERIA RECUPERATA, RICICLATA O DI SOTTOPRODOTTI DA IMPIEGARSI NELLE MISCELE

Si prescrive un contenuto minimo in % di materia recuperata, riciclata o di sottoprodotti da impiegarsi nelle miscele come da tabelle sottostanti:

- VIA VERDI (CARREGGIATA) - DOSSO**

STRATO	sp. [m]	% min
Usura TQ	0,03	≥15%
Binder TQ	0,07	≥30%

- VIA VERDI (MARCIPIEDE) - DOSSO**

STRATO	sp. [m]	% min
Usura TQ	0,025	≥15%
Lastra in calcestruzzo	0,125	≥5%
Fondazione in misto granulare	0,10	≥50%

- VIA PRAMPOLINI - DOSSO**

STRATO	sp. [m]	% min
Binder TQ	0,07	≥30%

- VIA GIOVECCA (CARREGGIATA) - MIRABELLO**

STRATO	sp. [m]	% min
Usura TQ	0,03	≥15%
Binder TQ	0,07	≥30%

- VIA GIOVECCA (PISTA CICLABILE) - MIRABELLO**

STRATO	sp. [m]	% min
Usura TQ	0,03	≥15%
Binder TQ	0,07	≥30%
Fondazione in misto granulare	0,30	≥90%

5 GESTIONE DELLE MATERIE

La gestione delle materie richiede un'attenta pianificazione e monitoraggio delle quantità di materiali coinvolti provenienti dalle lavorazioni.

È essenziale monitorare la gestione dei rifiuti, garantendo una gestione adeguata che favorisca il riciclo e riduca l'impatto ambientale complessivo del progetto. Una gestione efficiente delle materie non solo contribuisce alla sostenibilità, ma ottimizza anche i costi operativi e migliora la compliance normativa.

In particolare:

- Per Via Verdi si stimano circa 230 mc di fresato destinati a recupero e circa 105 mc di calcestruzzo provenienti dalla demolizione dei marciapiedi e pozzetti esistenti destinati al riciclo; si prevede inoltre la sostituzione dei chiusini in ghisa non idonei al traffico veicolare, per un totale di circa 1000 kg da destinare al riciclo;
- Per Via Prampolini si stimano circa 52 mc di fresato destinati a recupero;
- Per Via Giovecca non si prevede fresatura, ma solo scavi e rimozioni di pozzetti e chiusini non idonei.

5.1 CONFERIMENTO DEI MATERIALI DI RISULTA

I rifiuti non pericolosi generati dal cantiere riguardano, escludendo gli scavi, le seguenti categorie:

- *Codice CER 17 03 02 – Miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce “17 03 01”*
 - Fresatura della pavimentazione esistente;
- *Codice CER 17 01 01 – Cemento*
 - Demolizione di pozzetti e caditoie esistenti;
 - Demolizione cordolo prefabbricato in cls (marciapiede);
- *Codice CER 17 04 05 – Ferro e acciaio*
 - Sostituzione chiusini in ghisa;

6 PRESTAZIONI AMBIENTALI DEL CANTIERE

Per aumentare l'efficienza nell'uso dell'energia nel cantiere e per minimizzare le emissioni di inquinanti e gas climalteranti, si utilizzeranno tecnologie a basso impatto ambientale, come ad esempio lampade a led; inoltre, per la realizzazione dei lavori l'impresa esecutrice garantirà l'impiego di macchinari di ultima generazione, in conformità con gli standard europei sulle emissioni, periodicamente controllati e mantenuti e che garantiscano i minori consumi e la minore emissione di sostanze inquinanti.

Per l'abbattimento del rumore e delle vibrazioni dovute alle varie lavorazioni previste, tutti i mezzi ed attrezzature saranno rigorosamente adeguati alla normativa vigente per le rispettive materie di cui trattasi. In particolare, per quanto attiene le emissioni acustiche si farà riferimento ai documenti sulla “valutazione dell'esposizione al rumore” e analogamente per i fenomeni vibrazionali a quelli sulla “valutazione dell'esposizione al rischio vibrazioni” (rif. Testo Unico sulla Sicurezza D. Lgs.

81/2008).

Le lavorazioni più rumorose verranno programmate tenendo conto dell'esigenza di minimizzare il disturbo di abitazioni, quindi evitando, per esempio, le ore di maggior quiete o destinate al riposo; per le operazioni più rumorose si prevede anche una comunicazione preventiva sulle modalità e sulle tempistiche di lavoro, in modo che risultino più tollerabile dai cittadini. I ricettori più sensibili dal punto di vista dell'impatto acustico, inoltre, verranno schermati con specifiche barriere acustiche mobili da cantiere durante le attività di cantiere particolarmente rumorose e vibratorie.

Durante le lavorazioni verranno osservate le seguenti procedure ed accorgimenti di mitigazione del rumore e delle vibrazioni:

- *Scelta delle macchine, attrezzature e miglioramenti sulle loro prestazioni*
 - scelta di macchinari d'opera e vicoli moderni, di ultima generazione, in buone condizioni e dotati di dispositivi silenziatori sugli scarichi rispondenti alle vigenti normative;
 - spegnimento dei motori: sarà imposto lo spegnimento dei motori delle macchine ed impianti in pausa lavorativa;
 - privilegiare, ove possibile, macchine movimento terra ed operatrici gommate piuttosto che cingolate;
 - utilizzo di impianti fissi, gruppo elettrogeni e compressori insonorizzati.
- *Manutenzione dei mezzi e delle attrezzature*
 - uso di mezzi d'opera e di trasporto dei materiali costantemente mantenuti in ottime condizioni manutentive in modo da evitare l'emissione di rumore dovuto a vibrazioni di componenti meccaniche;
 - procedure di lubrificazione per evitare attriti che inducono fastidiose frizioni;
 - verifica costante della bilanciatura delle parti rotanti per evitare vibrazioni eccessive;
 - verifica della tenuta dei pannelli di chiusura dei motori.
- *Modalità operazionali e predisposizione del cantiere*
 - dislocazione dei mezzi all'interno delle aree di cantiere che producono rumore con emissione direzionale opportunamente orientati in modo da ottenere, lungo l'ipotetica linea congiungente la sorgente con il recettore esterno, il livello minimo di pressione sonora;
 - ottimizzazione della movimentazione di cantiere in entrata ed uscita (sempre a pieno carico), con l'obiettivo di minimizzare l'impiego della viabilità pubblica.

Al fine di garantire il risparmio idrico e la gestione delle acque reflue nel cantiere si prevederanno opportune reti di drenaggio e scarico delle acque. Inoltre, a protezione del terreno al di sotto del campo base sarà posato un telo in HDPE (high-density polyethylene) resistente alle sostanze chimiche per impedire l'inquinamento del suolo e delle falde acquifere ed efficace in una vasta gamma di condizioni ambientali.

Oltre, all'utilizzo di avanzati sistemi tecnologici, durante le lavorazioni verranno adottate le seguenti procedure atte a contenere la dispersione di polveri e fumi:

- Pulizia delle ruote dei veicoli in uscita dal cantiere e dalle aree di approvvigionamento e conferimento dei materiali

prima che i mezzi impegnino la viabilità ordinaria;

- Copertura dei materiali polverulenti trasportati con teli impermeabili;
- Limitazione della velocità dei mezzi sulle strade di cantiere (15 km/h);
- Bagnatura periodica o copertura con teli (nei periodi di inattività e durante le giornate con vento intenso) dei cumuli di materiale di risulta se non allontanati immediatamente dal cantiere;
- Protezione della recinzione di cantiere con telo antipolvere ad alta visibilità ai fini di limitare la dispersione delle polveri al di fuori delle aree di lavoro;
- Minimizzazione delle demolizioni, fresature e movimentazioni di materiali polverulenti durante le giornate con vento intenso;
- Bagnatura delle eventuali porzioni di pavimentazioni non asfaltate su cui transiteranno i mezzi d'opera per evitare la formazione di nubi di polvere;
- Pulizia periodica con motospazzatrice della viabilità esterna al cantiere per rimuovere i materiali sciolti in grado di determinare polveri.

Qualora dovessero verificarsi sversamenti accidentali di inquinanti, si praticheranno degli interventi di bonifica in situ: si valuterà se procedere alla rimozione della matrice inquinata, oppure ad un intervento di bonifica, non andando a modificare ulteriormente il profilo orografico della zona di cantiere.

Nel caso in cui si verifichi una fuoriuscita di liquidi contaminanti, affinché questo non abbia un impatto sull'ambiente e per salvaguardare le acque dei torrenti e canali, nelle zone prossime alle aree di lavoro saranno installati kit anti-sversamento di pronto intervento. In particolare le zone di lavorazione, movimentazione e deposito di materiali inquinanti saranno dotati di tamponi, salsicciotti, cuscini e sacchi con chiusura per lo smaltimento.

I rifiuti prodotti dal cantiere saranno gestiti in maniera differenziata grazie alla disposizione di cassoni separati e opportunamente etichettati sull'area di cantiere. In questo modo le diverse tipologie di materiali potranno essere rapidamente destinate al riciclo presso centri di raccolta o discariche autorizzate. Inoltre sarà possibile programmare e organizzare l'invio dei materiali ai centri di smaltimento o riciclo convenzionati. Oltre alla gestione degli scarti derivanti dalle lavorazioni sarà previsto un adeguato riciclaggio e smaltimento anche degli imballaggi che contengono le forniture per il cantiere.

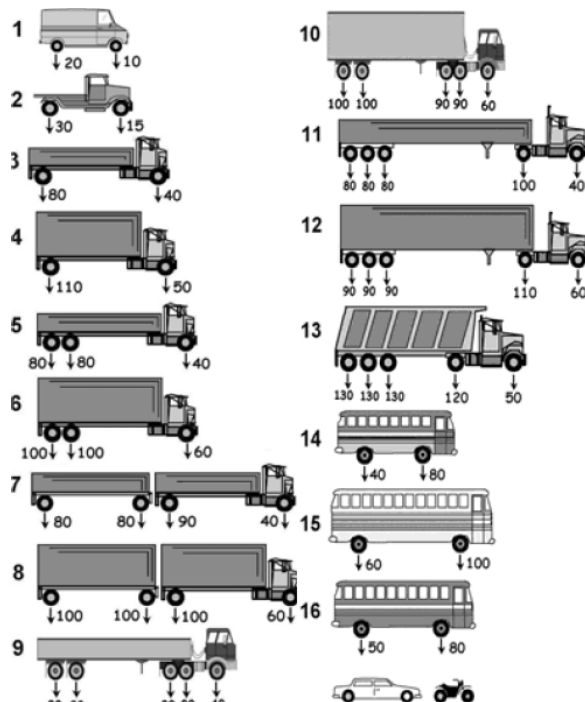
7 CALCOLO E VERIFICA DEL PACCHETTO STRADALE

7.1 ANALISI DEL TRAFFICO

Non avendo a disposizione dati di traffico precisi relativi alle strade oggetto d'intervento, si assume a favore di sicurezza un valore di TGM tipico delle strade provinciali del territorio circostante, pari a 5000 veicoli giornalieri, di cui il 5% veicoli pesanti. Le strade oggetto di verifica possono essere classificate come: CAT. F – STRADE LOCALI.

A partire dai dati di traffico soprariportati e in base alla categoria di strada, viene determinato lo spettro di veicoli commerciali transitanti mediante quelli definiti nella norma CNR 178, "Catalogo delle pavimentazioni stradali", con le rispettive configurazioni di assi:

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	0.10	—	—	12.2
2) " urbane	18.2	18.2	16.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.6	18.2	27.3	—
3) strade extr. principali e secondarie a forte traffico	—	13.1	39.5	10.5	7.9	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.6	0.5	—	—	10.5
4) strade extraurb. second. ordin.	—	—	58.8	29.4	—	5.9	—	2.8	—	—	—	—	0.2	—	—	2.9
5) " extr. second. -turistiche	24.5	—	40.8	16.3	—	4.15	—	2	—	—	—	—	0.05	—	—	12.2
6) " urbane di scorrimento	18.2	18.2	16.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.6	18.2	27.3	—
7) " " di quartiere e locali	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	—	—
8) corsie preferenziali	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	47	53	—



Veicoli commerciali da CNR 178

7.2 CALCOLO ESA

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

Per il calcolo degli assi equivalenti N_c da 120 kN, ai quali la sovrastruttura è sottoposta nell'arco della vita utile di progetto, è stata utilizzata la seguente formula:

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

dove:

- N_c è il numero di passaggi dell'asse equivalente ESA 120 kN;
- TGM è il traffico medio giornaliero;
- p_d è la distribuzione del traffico per senso di marcia;
- p è la percentuale di veicoli pesanti;
- $C_{eq} \cdot f$ è la sommatoria di equivalenza degli assi costituenti lo spettro di traffico per la loro percentuale di frequenza;
- r è il tasso di crescita del traffico;
- n è il numero di anni di vita utile di progetto;

Il calcolo ha restituito i seguenti numeri di assi standard da 120 kN nell'arco di 5 anni per gli interventi di tipo intermedio e superficiale:

- **VIA VERDI – DOSSO**

Intervento intermedio: $NC_{120kN - 5 \text{ anni}} = 4,74 \cdot 10^2$

- **VIA PRAMPOLINI – DOSSO**

Intervento superficiale: $NC_{120kN - 5 \text{ anni}} = 4,74 \cdot 10^2$

- **VIA GIOVECCA – MIRABELLO**

Intervento intermedio: $NC_{120kN - 5 \text{ anni}} = 4,74 \cdot 10^2$

Questo dato verrà utilizzato ai fini della verifica di ammissibilità del pacchetto di progetto mettendo a confronto il traffico ammissibile dello stesso ed il traffico transitante sull'infrastruttura nell'arco della vita utile.

7.3 IL METODO RAZIONALE

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

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

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

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

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

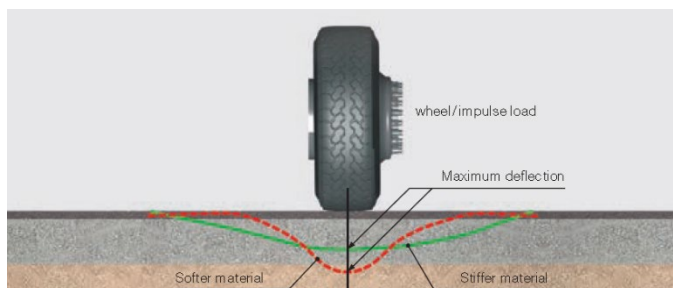


Figura 7.1 - Deflessioni sotto la ruota

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

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

7.4 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

Le condizioni meteo-climatiche del contesto in cui si inserisce la sovrastruttura influenzano lo stato tensionale, inducendo distorsioni termiche e modificando le caratteristiche meccaniche dei materiali, soprattutto per i conglomerati bituminosi. Al

fine di verificare correttamente il comportamento della pavimentazione, è quindi necessario considerare le condizioni climatiche che meglio rappresentano la situazione di esercizio.

Analizzando i dati climatici della stazione di Bologna (stazione di riferimento per la provincia di Ferrara), sono state ricavate le temperature medie nelle quattro stagioni.

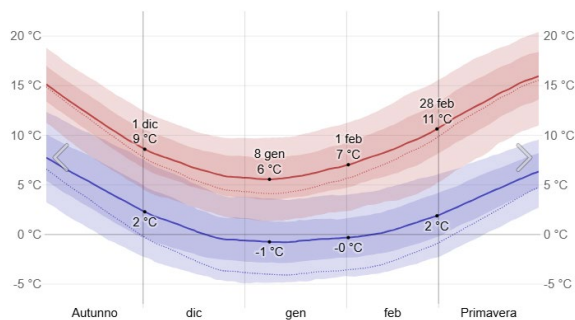


Figura 7.2 - Temperatura inverno

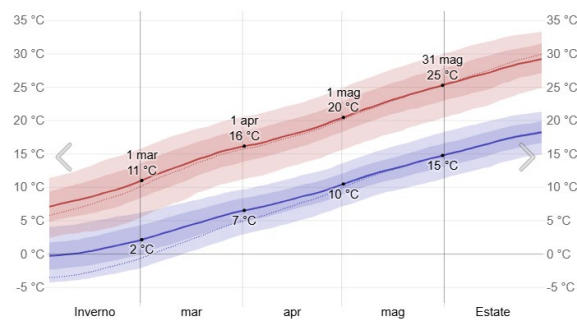


Figura 7.3 - Temperatura primavera

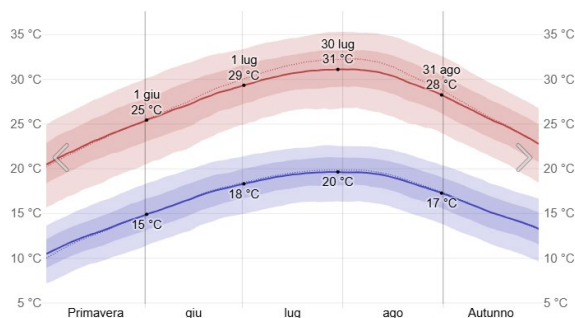


Figura 7.4 - Temperatura estate

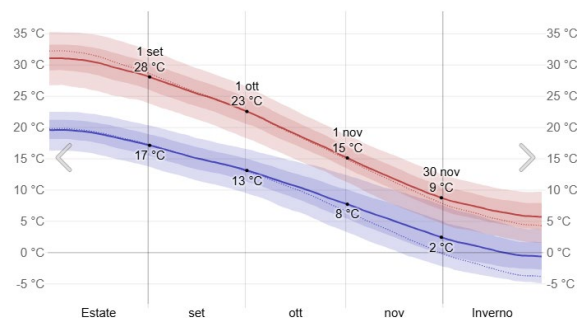


Figura 7.5 - Temperatura autunno

Le temperature medie dell'aria nelle quattro stagioni sono risultate le seguenti:

Stagione	Tmedia aria (Ta)
Inverno	4,5°C
Primavera	18,3°C
Estate	21,6°C
Autunno	14,4°C

Tabella 7.6 - Temperature medie stagionali dell'aria

Tramite la legge sperimentale di Marchionna sono state definite le temperature medie stagionali che si instaurano all'interno degli strati in conglomerato bituminoso della pavimentazione in funzione della temperatura media dell'aria T_a e della profondità media z dello strato dal piano viabile:

$$T_p = (1,467 + 0,043 \cdot z) + (1,362 - 0,005 \cdot z) \cdot T_a$$

VIA VERDI - DOSSO Intervento intermedio						
Strato	spessore strato (cm)	z (cm)	Tp (°)			
			inverno	primavera	estate	autunno
Usura TQ	3	1,5	7,6	26,3	30,8	21,0
Binder TQ	7	7,7	7,7	26,1	30,5	20,9

VIA PRAMPOLINI - DOSSO Intervento superficiale						
Strato	spessore strato (cm)	z (cm)	Tp (°)			
			inverno	primavera	estate	autunno
Binder TQ	5	2,5	7,6	26,3	30,7	21,0

VIA GIOVECCA - MIRABELLO Intervento intermedio						
Strato	spessore strato (cm)	z (cm)	Tp (°)			
			inverno	primavera	estate	autunno
Usura TQ	3	1,5	7,6	26,3	30,8	21,0
Binder TQ	7	7,7	7,7	26,1	30,5	20,9

Per valutare la risposta meccanica della pavimentazione nelle diverse condizioni climatiche sono stati calcolati i moduli degli strati in conglomerato bituminoso tramite la seguente espressione sperimentale di *Elmod*:

$$E_T = e^{0,064(T-T_s)} \cdot E_{T_s}$$

In cui:

E_T è il modulo alla temperatura di riferimento (20°C), ricavati da consolidata bibliografia internazionale;

E_{T_s} è il modulo dello strato in conglomerato bituminoso alla temperatura della pavimentazione T_p ;

I moduli elastici alla temperatura di riferimento di 20 °C sono stati assunti pari a:

Strato	Modulo elastico E_t (MPa)
Usura TQ	2800
Binder TQ	3200

Applicando la formula succitata per i materiali in oggetto, si ottengono i seguenti moduli elastici alle temperature a cui si troveranno, in funzione della loro profondità, nelle quattro stagioni.

VIA VERDI – DOSSO Intervento intermedio			
Strato	Stagione	Tp (°C)	Ets (MPa)
Usura TQ	inverno	7,6	6181
	primavera	26,3	1869
	estate	30,8	1404
	autunno	21,0	2620
Binder TQ	inverno	7,7	7018
	primavera	26,1	2169
	estate	30,5	1638
	autunno	20,9	3023

VIA PRAMPOLINI – DOSSO Intervento superficiale			
Strato	Stagione	Tp (°C)	Ets (MPa)
Binder TQ	inverno	7,6	7055
	primavera	26,3	2142
	estate	30,7	1611
	autunno	21,0	3000

VIA GIOVECCA – MIRABELLO Intervento intermedio			
Strato	Stagione	Tp (°C)	Ets (MPa)
Usura TQ	inverno	7,6	6181
	primavera	26,3	1869
	estate	30,8	1404
	autunno	21,0	2620
Binder TQ	inverno	7,7	7018
	primavera	26,1	2169
	estate	30,5	1638
	autunno	20,9	3023

7.5 CONFIGURAZIONE DI CALCOLO DELLA PAVIMENTAZIONE

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

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

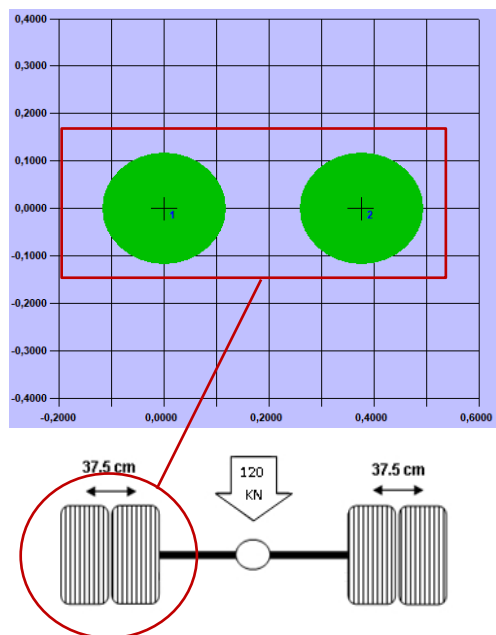
- Carico di progetto: intensità (kN o pressione), posizione, tipologia;
- Caratteristiche meccaniche e geometriche della pavimentazione (modulo elastico, coefficiente di Poisson, spessore degli strati);
- Tipo di connessione alle interfacce degli strati: totale connessione tra i conglomerati bituminosi per la presenza di emulsione d'attacco, semi-collegamento tra lo stato di stabilizzato a cemento ed i conglomerati bituminosi per la presenza di emulsione d'attacco, assenza di collegamento gli strati di sottofondo.

7.6 CARICHI DI PROGETTO

Una sovrastruttura stradale è percorsa da carichi di diverse tipologie e entità che applicano tensioni dipendenti dalla forma e quantità di pneumatici di cui il veicolo è composto. Per uniformare le molteplicità di casi di carico si adotta il concetto di Asse Equivalente (Standard Equivalent Axle) ovvero una semplificazione fatta attraverso i fattori di equivalenza che correlano gli assi effettivamente transitanti su una sezione stradale e un asse di riferimento. È stato assunto come asse di riferimento per il calcolo l'asse singolo da 120 kN (circa 12 tonnellate). Gli ESA sono assi di riferimento con carichi standard che vengono convenzionalmente utilizzati nelle valutazioni della vita utile di una pavimentazione e servono a ricondurre le diverse configurazioni di assi di carico dei veicoli commerciali costituenti lo spettro di traffico in un unico asse di riferimento, tramite opportuni coefficienti correttivi.

Come carico di progetto è stato quindi assunto l'asse da 120 kN con ruote gemelle. Le ruote costituenti l'asse del carico di progetto scaricano sulla superficie della pavimentazione una pressione pari a 700 kPa, distribuita su ciascuna ruota secondo un'area di impronta circolare di raggio 11,7 cm.

CARICHI DI PROGETTO	
Asse di progetto	Asse singolo con ruote gemellate
Carico sull'asse	120 kN
Carico su singola area di carico	30 kN
Pressione di contatto pneumatico-piano viabile	700 kPa
Raggio area impronta pneumatici (area circolare)	11,7 cm



7.7 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

Nel calcolo la pavimentazione è schematizzata come un sistema multi-strato elastico lineare, omogeneo e isotropo, in cui vengono definiti gli spessori, corrispondenti ai valori stratigrafici o di progetto, i moduli elastici ed i coefficienti di Poisson, parametri meccanici indicativi della risposta del pacchetto stradale ai carichi esterni. Si precisa che i moduli elastici dei conglomerati bituminosi sono stati definiti in funzione della temperatura (vedi § 7.4) a partire dai valori di riferimento a 20°C ricavati da esperienze.

Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche delle sezioni di calcolo:

VIA VERDI (DOSSO) – VIA GIOVECCA (MIRABELLO) Intervento intermedio						
STRATO	SPESSORE (cm)	MODULO ELASTICO (MPa)				COEFF. POISSON
		inverno	primavera	estate	autunno	
Usura TQ	3	6181	1869	1404	2620	0,35
Binder TQ	7	7018	2169	2376	3023	0,35
Fondazione Esistente "Equiv."	30	300	300	300	300	0,25
Sottofondo esistente	-	30	30	30	30	0,40

VIA PRAMPOLINI – DOSSO Intervento superficiale						
STRATO	SPESSORE (cm)	MODULO ELASTICO (MPa)				COEFF. POISSON
		inverno	primavera	estate	autunno	
Binder TQ	5	7055	2142	1611	3000	0,35
Fondazione Esistente "Equiv."	30	300	300	300	300	0,25
Sottofondo esistente	-	30	30	30	30	0,40

Non essendo nota la stratigrafia esistente, per gli strati sottostanti i conglomerati bituminosi è stato considerato uno strato "equivalente" dello spessore di 30 cm, al quale è stato assegnato, ai fini del dimensionamento e con un approccio cautelativo, un modulo elastico pari 300 MPa, ed un sottofondo di spessore infinito con modulo pari a 30 Mpa.

Per Via Giovecca, in assenza di informazioni dettagliate sugli spessori dei conglomerati esistenti, a favore di sicurezza si è assunta la medesima stratigrafia di Via Verdi in cui al di sotto dei nuovi strati di usura e binder è stato modellato direttamente lo strato "equivalente" di fondazione.

7.8 PUNTI DI CONTROLLO

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

- Deflessione della superficie stradale al di sotto dell'area di carico;
- Deformazioni di trazione alla base degli strati in conglomerato bituminoso;

7.9 RISULTATI DI CALCOLO

Di seguito, si riportano i risultati del calcolo statico delle pavimentazioni per i seguenti parametri principali:

VIA VERDI (DOSSO) – VIA GIOVECCA (MIRABELLO) Intervento intermedio				
Parametro stato tenso-deformativo	Risultato			
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Deflessione superficiale verticale massima sotto area di carico U_z [μm]	148,3	171,5	175,4	166,2
Deformazione di trazione intradosso c.b., ϵ_{t-cb} [με]	330,1	632,5	729,6	531,5

VIA PRAMPOLINI - DOSSO Intervento superficiale				
Parametro stato tenso-deformativo	Risultato			
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Deflessione superficiale verticale massima sotto area di carico U_z [μm]	139,0	151,8	155,3	147,9
Deformazione di trazione intradosso c.b., ϵ_{t-cb} [$\mu\epsilon$]	270,3	265,6	235,9	284,3

8 CALCOLO DELLA DURABILITA' DEL PACCHETTO – VERIFICA DINAMICA

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

Per valutare la durabilità è stata condotta una verifica a fatica della pavimentazione stradale che comporta la determinazione dei numeri di cicli che portano a rottura i vari strati della pavimentazione stessa secondo le leggi descritte ai paragrafi successivi.

8.1 LEGGE DI FATICA PER I CONGLOMERATI BITUMINOSI

Le fessurazioni per fatica sono una delle principali cause di ammaloramento delle pavimentazioni flessibili. Il fenomeno si manifesta in un primo momento nella degradazione degli strati legati a bitume e successivamente nel danneggiamento dell'intera sovrastruttura. Queste fratture si formano sul fondo degli strati bituminosi e si propagano verso la superficie, sotto l'azione dei carichi ripetuti, portando quindi ad infiltrazioni d'acqua negli strati granulari.

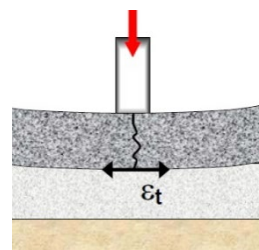
Per la valutazione della durabilità a fatica della pavimentazione è stata utilizzata la legge di fatica proposta da *Asphalt Institute* la quale, in funzione del modulo elastico E dello strato in conglomerato bituminoso e della deformazione di trazione ϵ_t alla base dello stesso, determina il numero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

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

Nello specifico, il modello fissa la soglia di "rottura" della pavimentazione al raggiungimento del 45% di area fessurata in corrispondenza del passaggio dei veicoli.

Applicando la formula della legge di fatica, è stato calcolato il numero di passaggi di assi standard equivalenti (ESA) di 120 kN.

Il calcolo ha restituito i seguenti cicli a rottura:



VIA VERDI (DOSSO) – VIA GIOVECCA (MIRABELLO) Intervento intermedio				
Materiale	Cicli di rottura			
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Strato di Binder TQ	1,69x10 ⁵	5,41x10 ⁴	4,30x10 ⁴	7,23x10 ⁴

VIA PRAMPOLINI - DOSSO Intervento superficiale				
Materiale	Cicli di rottura			
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Strato di Binder TQ	3,24x10 ⁵	9,51x10 ⁵	1,79x10 ⁶	5,70x10 ⁵

8.2 DURABILITA' DEI PACCHETTI

Il numero di cicli che portano a rottura per fatica i materiali costituenti i pacchetti di progetto sono stati confrontati con il numero di cicli a cui è sottoposta la sezione stradale nell'arco della vita utile di 5 anni per interventi di tipo superficiale. Considerando che l'analisi a fatica è stata condotta per le quattro stagioni, è essenziale procedere con la verifica a fatica utilizzando la legge di Miner per calcolare il danno cumulato DC, di seguito riportata:

$$DC = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

dove:

- N_i è il numero di cicli di carico che porta a rottura il materiale in un determinato periodo;
- n_i è il numero di cicli di carico a cui è sottoposta la pavimentazione del periodo di progetto

l'uso della regola di Miner presuppone l'esecuzione delle seguenti fasi:

1. si suddivide l'anno solare secondo in due o più periodi, durante i quali la temperatura media dell'aria è ricavata dalla più vicina stazione meteorologica, per poter calcolare le variazioni dei parametri elastici;
2. si determina lo stato tensionale provocato dall'asse di progetto;
3. si calcola il numero di cicli che porta alla rottura per fatica il materiale nei diversi periodi in cui è stato suddiviso l'anno;
4. mediante i dati di traffico si determina la ripartizione dello stesso sulle corsie ed il numero di applicazioni annuali;
5. si calcolano i rapporti di Miner e si esegue la sommatoria, se questa è minore o uguale ad 1 la pavimentazione è progettata correttamente, altrimenti si deve rieseguire il calcolo modificando gli strati.

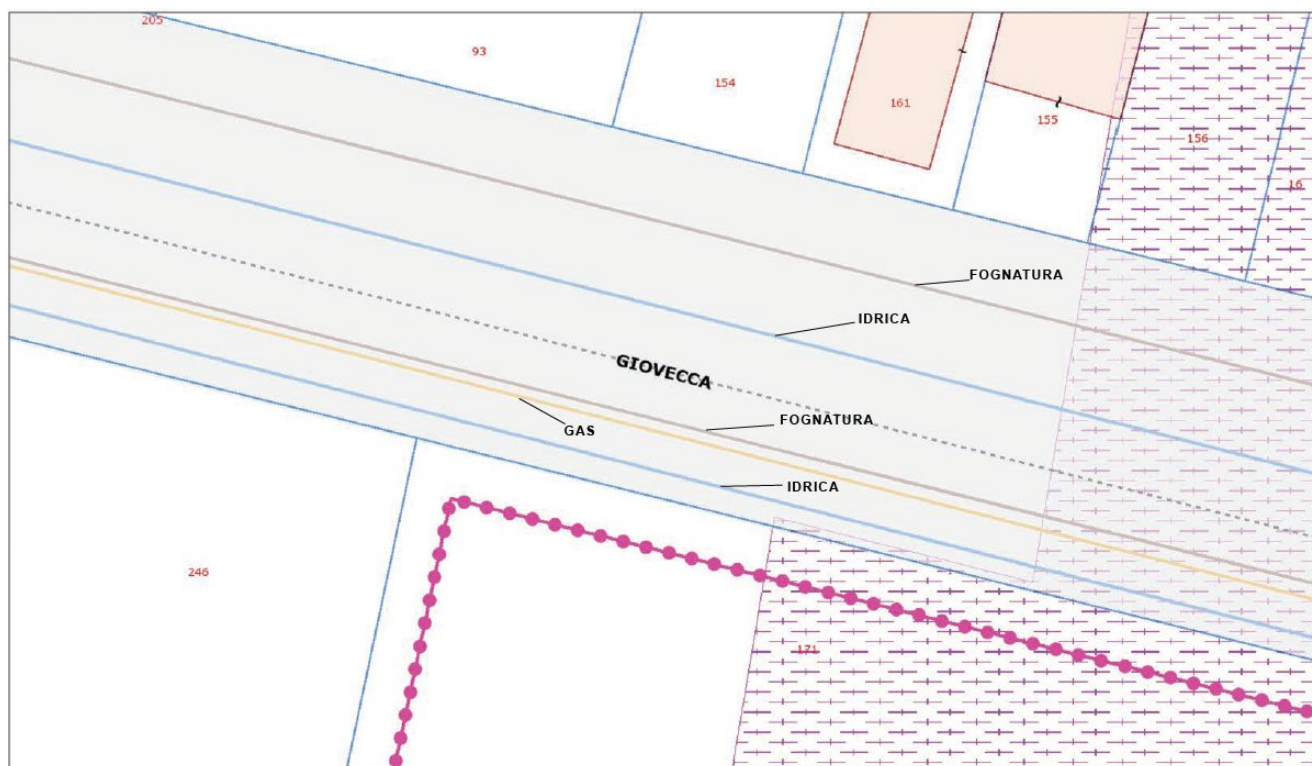
Nelle tabelle seguenti vengono riportati i risultati dell'applicazione della legge di Miner nella quattro stagioni.

VIA VERDI (DOSSO) – VIA GIOVECCA (MIRABELLO) Intervento intermedio						
STRATO	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO	$\sum DC$	VERIFICA ($\sum DC < 1$)
Conglomerati bituminosi	0,003	0,009	0,011	0,007	0,03	OK

VIA PRAMPOLINI - DOSSO Intervento superficiale						
STRATO	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO	$\sum DC$	VERIFICA ($\sum DC < 1$)
Conglomerati bituminosi	0,00146	0,0005	0,00026	0,00083	0,0031	OK

9 INTERFERENZE CON I SOTTOSERVIZI

La Committenza ha condiviso con lo scrivente la planimetria con il posizionamento dei sottoservizi di Via Giovecca che ha confermato la presenza della rete fognaria a cui allacciarsi con i nuovi pozzetti ciechi in corrispondenza della nuova pista ciclabile.



Per le altre due vie oggetto d'intervento non si possiedono informazioni di dettaglio in merito all'ubicazione dei sottoservizi, tuttavia la limitata profondità degli interventi porta ad escludere possibili interferenze.

Si raccomanda all'impresa esecutrice la massima prudenza durante tutte le operazioni di fresatura ed escavazione, procedendo anche a sondaggi ispettivi qualora sussista il minimo dubbio, al fine di tutelare la salute dei lavoratori e l'efficienza dei servizi.

10 CONCLUSIONI

Le soluzioni verificate risultano idonee in termini di risposta meccanica e deformativa in riferimento alla tipologia di strada e all'entità e frequenza del traffico a cui saranno sottoposte le sovrastrutture.

Dai risultati riportati al Cap. 8 si evince infatti che le pavimentazioni di progetto presentino una durata, espressa come numero di cicli di assi standard, significativa ed adeguata per i carichi di progetto.

La vita utile dei pacchetti nel caso di intervento intermedio e superficiale risulta essere maggiore di 5 anni secondo i modelli matematici utilizzati.

La durabilità degli interventi è subordinata alla messa in opera nel tempo di un piano manutentivo atto al mantenimento dell'integrità dello strato di usura in conglomerato bituminoso, il quale deve rimanere esente da fessurazioni e distacchi per evitare l'infiltrazione di acqua negli strati profondi, che può portare al degrado della pavimentazione più rapidamente rispetto a quanto stimato con il modello di calcolo. Infatti, lo strato di usura, la cui funzione principale è quella di impermeabilizzare gli strati inferiori del pacchetto stradale, è quello direttamente sottoposto alle sollecitazioni del traffico, alla frizione e alla levigazione, e di conseguenza è il primo a manifestare i degradi.

Il progettista

Dott. Ing. Fabio Picariello

