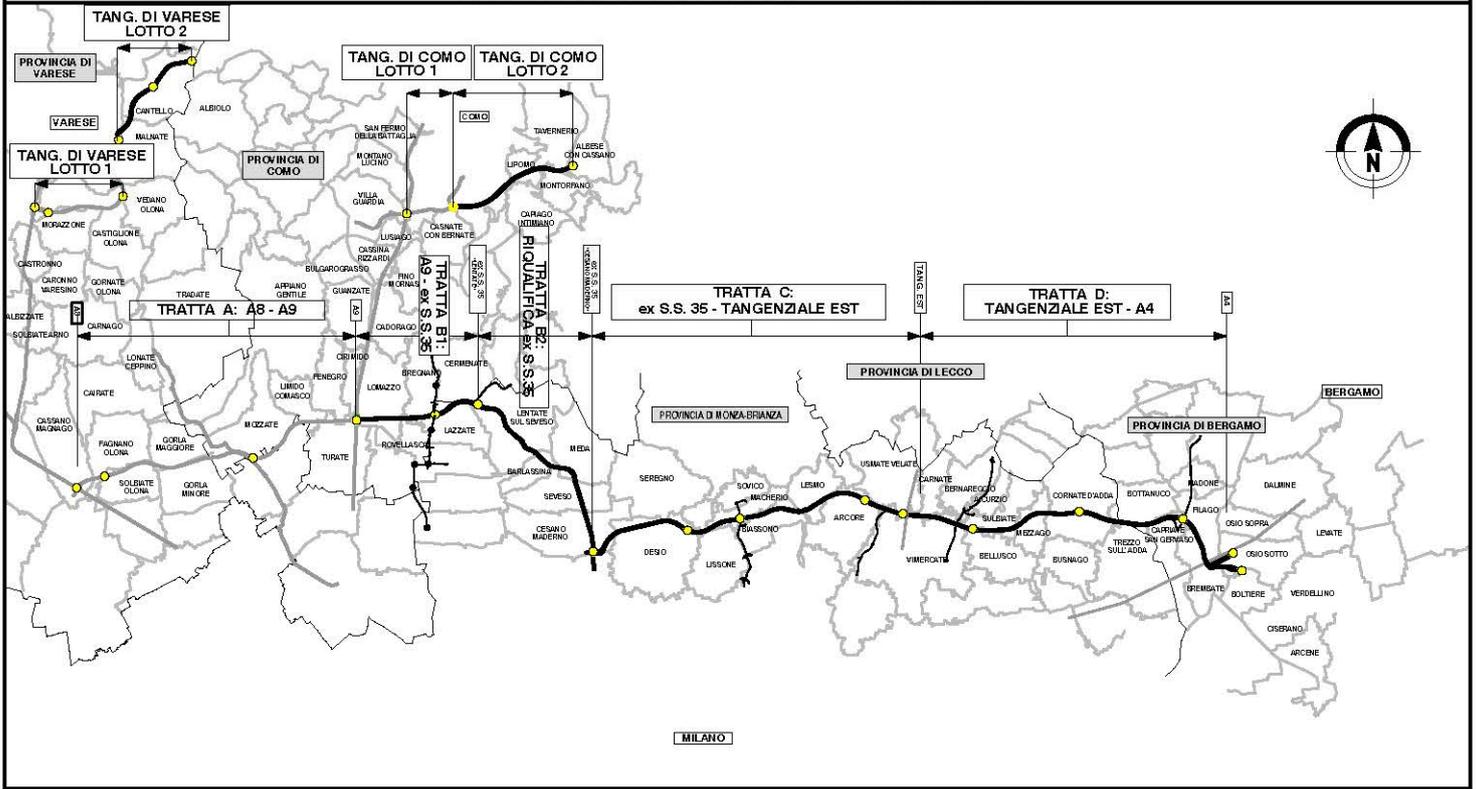


QUADRO DI UNIONE GENERALE



COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE

DALMINE-COMO-VARESE-VALICO DEL GAGGIOLO E OPERE AD ESSO CONNESSE

CODICE C.U.P. F11B06000270007

PROGETTO ESECUTIVO TRATTA B2

PROGETTO STRADALE PARTE GENERALE

RELAZIONE DI CALCOLO PAVIMENTAZIONI STRADALI ASSE PRINCIPALE E SVINCOLI

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

| FASE PROGETTUALE | AMBITO | TRATTA | CATEGORIA | OPERA | PARTE DI OPERA | TIPO ELABORATO | PROGRESSIVA | REVISIONE ESTERNA |
|------------------|--------|--------|-----------|-------|----------------|----------------|-------------|-------------------|
| E | SD | B2 | A00 | GE00 | 000 | RC | 001 | A |

DATA 31 Agosto 2023

SCALA -

CONTRAENTE GENERALE

PEDELOMBARDA NUOVA S.c.p.A.

DATA

REVISIONE

| | | |
|----------------|------------------------|-----|
| 6 Aprile 2023 | Bozza | A01 |
| 30 Giugno 2023 | Emissione per commenti | A02 |
| 31 Agosto 2023 | Emissione per commenti | A03 |

ELABORAZIONE PROGETTUALE

| | |
|--|--|
| PROGETTISTI MCI - Infrastructures Engineering S.r.l. | RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Carlo Listorti |
| Redatto Ing. Orlando - Ing. Ravizzoni | Viso Ing. Mendicino |
| Approvato Ing. Crispino | |

CONCEDENTE



CONCESSIONARIO



PROGETTISTA



COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE
DALMINE – COMO – VARESE – VALICO DEL GAGGIOLO
E OPERE CONNESSE

PROGETTO ESECUTIVO

TRATTE B2, C, TRMI10/TRMI17/TRCO06

TRATTA B2

PROGETTO STRADALE

PARTE GENERALE

RELAZIONE DI CALCOLO PAVIMENTAZIONI
STRADALI ASSE PRINCIPALE E SVINCOLI

Sommario

| | |
|---|----|
| PREMESSA | 5 |
| 1. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO | 6 |
| 2. PRESENTAZIONE DEI PACCHETTI DA PROGETTO DEFINITIVO E PROGETTO ESECUTIVO | 7 |
| 2.1. PACCHETTI PREVISTI DA PROGETTO DEFINITIVO | 7 |
| 2.1.1. Asse autostradale (trincea e rilevato) | 7 |
| 2.1.2. Gallerie artificiali | 8 |
| 2.1.3. Ponti e viadotti..... | 8 |
| 2.1.4. Svincoli..... | 8 |
| 2.2. PACCHETTI PREVISTI DA PROGETTO ESECUTIVO | 9 |
| 2.2.1. Asse autostradale (trincea e rilevato) | 9 |
| 2.2.2. Gallerie artificiali | 12 |
| 2.2.3. Ponti e viadotti..... | 12 |
| 2.2.4. Svincoli..... | 12 |
| 3. DATI DI PROGETTO | 15 |
| 3.1. DATI DI TRAFFICO | 15 |
| 3.1.1. Dati forniti nello studio di traffico | 15 |
| 3.1.2. Stima del traffico di progetto | 16 |
| 3.1.2.1. Stima del traffico di progetto dell'Autostrada..... | 16 |
| 3.1.2.2. Stima del traffico di progetto degli svincoli | 18 |
| 3.1.3. Definizione del numero di ESAL di progetto | 20 |
| 3.1.3.1. Stima del coefficiente di equivalenza EALF | 20 |
| 3.1.3.2. Calcolo del numero di ESAL di progetto | 23 |
| 3.1.4. Confronto tra ESAL da Progetto Definitivo ed ESAL da Progetto Esecutivo.... | 24 |
| 3.2. PORTANZA DEL TERRENO DI SOTTOFONDO | 24 |
| 3.3. CONDIZIONI CLIMATICHE | 27 |
| 3.4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI | 29 |
| 3.4.1. Materiali impiegati nella pavimentazione da Progetto Definitivo..... | 30 |
| 3.4.2. Materiali impiegati nella pavimentazione da Progetto Esecutivo | 32 |
| 4. METODOLOGIA DI CALCOLO | 36 |
| 4.1. MODELLO DI CALCOLO | 36 |
| 4.2. LEGGE DI FATICA | 37 |
| 4.3. CRITERIO DI VERIFICA DELLE PAVIMENTAZIONI..... | 38 |
| 5. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE PREVISTA DA PROGETTO DEFINITIVO | 40 |
| 5.1. VERIFICA ROTTURA A FATICA | 40 |
| 5.2. VERIFICA ROTTURA ISTANTANEA | 41 |
| 6. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE PREVISTA DA PROGETTO ESECUTIVO | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1. ASSE AUTOSTRADALE | 43 |
| 6.1.1. Rilevato e Trincea con buona portanza | 43 |
| 6.1.1.1. Verifica rottura a fatica..... | 44 |
| 6.1.1.2. Verifica rottura istantanea | 45 |
| 6.1.2. Trincea con scarsa portanza..... | 46 |
| 6.1.2.1. Verifica rottura a fatica..... | 46 |
| 6.1.2.2. Verifica rottura istantanea | 47 |
| 6.2. SVINCOLI..... | 48 |
| 6.2.1. Verifica rottura a fatica | 48 |
| 6.2.2. Verifica rottura istantanea | 50 |
| 6.3. RIEPILOGO PAVIMENTAZIONI DA PROGETTO ESECUTIVO..... | 50 |
| 7. PAVIMENTAZIONE PER DEVIAZIONI PROVVISORIE..... | 53 |
| 7.1. DATI DI PROGETTO | 53 |
| 7.1.1. Dati di traffico | 53 |
| 7.1.2. Portanza del terreno di sottofondo..... | 54 |
| 7.1.3. Caratteristiche dei materiali impiegati | 54 |
| 7.2. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE PER DEVIAZIONI PROVVISORIE..... | 55 |
| 7.2.1. Verifica rottura a fatica | 55 |
| 7.2.2. Verifica rottura istantanea | 56 |
| 8. CONCLUSIONI..... | 57 |

PREMESSA

La presente relazione tecnica riguarda il dimensionamento e la verifica delle pavimentazioni previste per l'asse autostradale e per gli svincoli della tratta B2 della nuova Autostrada Pedemontana Lombarda.

La tratta B2 si estende per una lunghezza di circa 9,6 km, dall'interconnessione con la S.P. ex S.S. 35 in località Lentate sul Seveso all'interconnessione con la S.P. ex S.S. 35 in località Cesano Maderno. Lungo la tratta in questione è prevista la realizzazione di quattro svincoli:

- Interconnessione Ex S.S. 35;
- Svincolo di Lentate sul Seveso;
- Svincolo di Barrucana;
- Svincolo di Meda.

La tratta B2 è un tratto in adeguamento della viabilità esistente. La sezione autostradale presenta due corsie per senso di marcia (più corsia di emergenza) nel tratto compreso tra i Comuni di Lentate sul Seveso e di Meda; nel tratto, invece, tra Meda e Cesano Maderno sono previste tre corsie per senso di marcia.

Per quanto concerne le pavimentazioni stradali, il Progetto Definitivo prevedeva un unico pacchetto per l'asse autostradale e per gli svincoli. Nel Progetto Esecutivo, invece, come illustrato nel seguito della presente relazione, si prevede di differenziare le soluzioni progettuali tra asse autostradale e svincoli. Questa scelta è dettata sia dai differenti volumi di traffico previsti sulle opere in progetto sia per garantire un transito in condizioni di sicurezza e comfort per gli utenti della strada. Infatti, sull'asse autostradale sarà realizzato uno strato di usura in doppio strato drenante al fine di favorire l'aderenza in caso di pioggia, eliminando così, il più possibile, il velo d'acqua in superficie. Sulle rampe degli svincoli, invece, si prevede di adottare uno strato d'usura di tipo Splitt Mastix Asphalt – SMA – con lo scopo di incrementare la sicurezza in tutte le condizioni meteorologiche a cui è soggetta la superficie viabile, in virtù dell'aumento di rugosità superficiale e di aderenza tra gli pneumatici dei veicoli e la superficie stradale.

Nella presente relazione tecnica del Progetto Esecutivo, saranno dimensionate e verificate le differenti soluzioni progettuali adottate per le pavimentazioni dell'asse autostradale e degli svincoli. Inoltre, si dimostrerà che le pavimentazioni proposte nel PE, rispetto a quanto previsto nel PD, presentano vantaggi in termini di maggiore vita a fatica, riduzione dello spessore complessivo e adozione di materiali più performanti e di nuova generazione.

1. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

Di seguito si elenca la documentazione di riferimento per la progettazione delle pavimentazioni:

- D.M. 5/11/2001 - “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”;
- ANAS, QUADERNO TECNICO N° 17– “Le pavimentazioni stradali: prontuario per la progettazione, esecuzione e collaudo dei lavori sul piano viabile”;
- ANAS, “Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente”;
- Catalogo Italiano delle Pavimentazioni;
- Highway Capacity Manual, Sixth Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis (HCM);
- AASHTO, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – a manual of practice (M-EPDG);

La documentazione fornita dal Committente comprende:

- Progetto Definitivo;
- Comunicazione riguardante il traffico registrato sulle tratte attualmente in esercizio dell'Autostrada A36, febbraio 2023.

2. PRESENTAZIONE DEI PACCHETTI DA PROGETTO DEFINITIVO E PROGETTO ESECUTIVO

Nel presente capitolo sono illustrati i pacchetti di pavimentazione previsti da Progetto Definitivo e da Progetto Esecutivo. In dettaglio, sono presentati i seguenti pacchetti:

- asse autostradale (trincea e rilevato);
- galleria artificiale;
- ponti e viadotti;
- svincoli.

2.1. PACCHETTI PREVISTI DA PROGETTO DEFINITIVO

Le caratteristiche dei pacchetti previsti da Progetto Definitivo sono desunte dalla relazione tecnica delle pavimentazioni, allegata al PD, e dall'elaborato D_SD_GE000_GE00_043_SD_001_C.

2.1.1. Asse autostradale (trincea e rilevato)

Nel Progetto Definitivo, è previsto un unico pacchetto di pavimentazione semi-rigida per l'intero asse autostradale. Questo, di spessore totale pari a 76 cm, comprende:

- usura drenante, spessore 5 cm;
- binder ordinario, spessore 7 cm;
- base in conglomerato bituminoso ad alto modulo, spessore 19 cm;
- fondazione in misto cementato, spessore 20 cm;
- fondazione in misto granulare stabilizzato, spessore 25 cm.

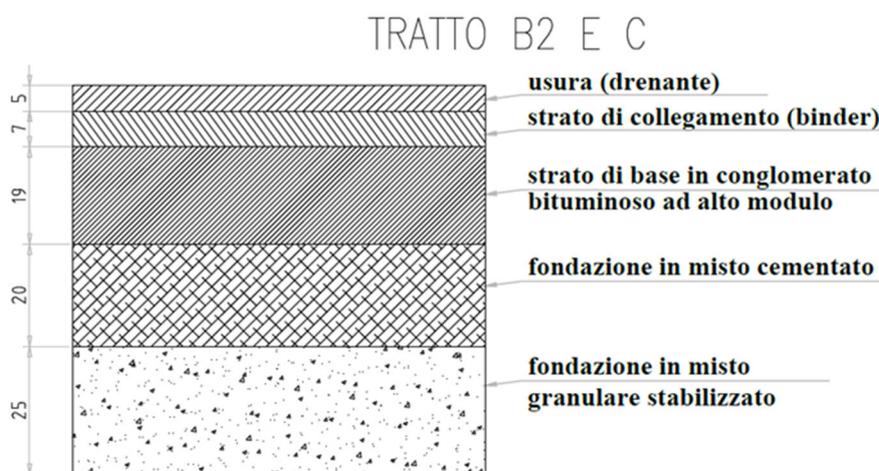


Figura 1 – Pavimentazione asse autostradale da Progetto Definitivo

La pavimentazione illustrata in Figura 1 è prevista in progetto per l'intero asse autostradale, ad eccezione della curva di Meda (tratta B2 – da prog. km 5+400 a prog. km 6+075). In questo tratto stradale, nelle due carreggiate è previsto un trattamento superficiale ad alta aderenza di nuova generazione tipo "Grip Road" e la sostituzione dell'usura drenante con uno strato di usura chiuso. Oltre ad incrementare l'aderenza, il trattamento ha la particolarità di avere un colore chiaro che risalta rispetto al colore scuro del manto tradizionale. Pertanto, l'adozione di tale intervento sulle sole carreggiate (banchine mantenute in conglomerato bituminoso non trattato) consente di avere anche un effetto visivo di delineazione della curva.

TRATTO B2- CURVA DI MEDA
DA Pk 5+400 A Pk 6+075

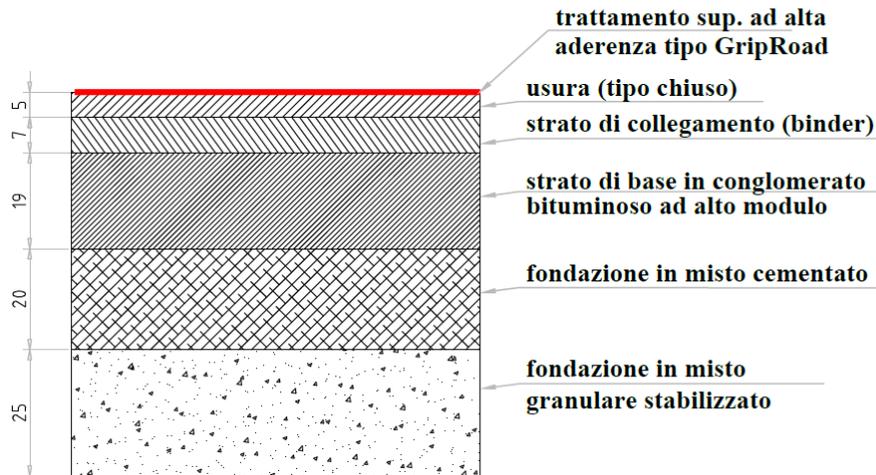


Figura 2 – Pavimentazione asse autostradale da Progetto Definitivo – curva di Meda

Nel PD si prevede di realizzare una stabilizzazione in sito a cemento del terreno di sottofondo (sp. 30 cm) laddove le caratteristiche meccaniche risultino scadenti.

2.1.2. Gallerie artificiali

Lungo l'Autostrada sono in progetto gallerie artificiali di lunghezze variabili tra loro. Per i tratti in galleria con sviluppo dell'opera superiore a 200 m, il PD prevede di adottare una pavimentazione semi-rigida analoga a quella dell'asse autostradale, sostituendo però l'usura drenante con uno strato d'usura di tipo chiuso, al fine di ridurre il fattore di rischio nell'eventualità di sversamenti accidentali di liquidi infiammabili. Il punto di passaggio tra l'usura drenante e l'usura di tipo chiuso è collocato a 50 m dagli imbocchi delle gallerie.

2.1.3. Ponti e viadotti

Nel Progetto Definitivo la sovrastruttura stradale prevista per ponti e viadotti comprende i seguenti strati:

- usura drenante, spessore 5 cm;
- binder ordinario, spessore 5 cm;
- impermeabilizzazione dell'impalcato sottostante, spessore finito 10 mm.

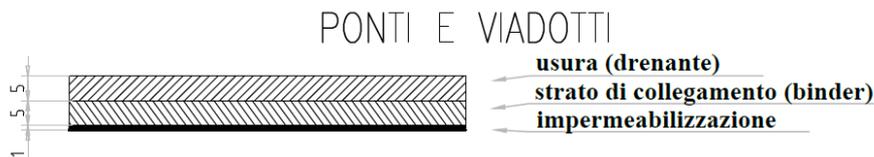


Figura 3 - Pavimentazione asse autostradale da Progetto Definitivo – ponti e viadotti

2.1.4. Svincoli

Per le rampe degli svincoli e delle interconnessioni in progetto, nel PD è prevista una sola variazione rispetto alla pavimentazione semi-rigida dell'asse autostradale. Infatti, mantenendo invariati gli spessori di tutti gli strati, lo strato d'usura drenante è sostituito con un tappeto di usura antiskid o di tipo Splitt Mastix Asphalt – SMA. Questo, per le particolari caratteristiche granulometriche (e litologiche) degli inerti impiegati, unitamente ad un alto contenuto di legante modificato, consente di

fornire elevate prestazioni in termini non solo di durabilità, stabilità e resistenza alle deformazioni, ma anche di rugosità superficiale e di resistenza all'ormaiamento.

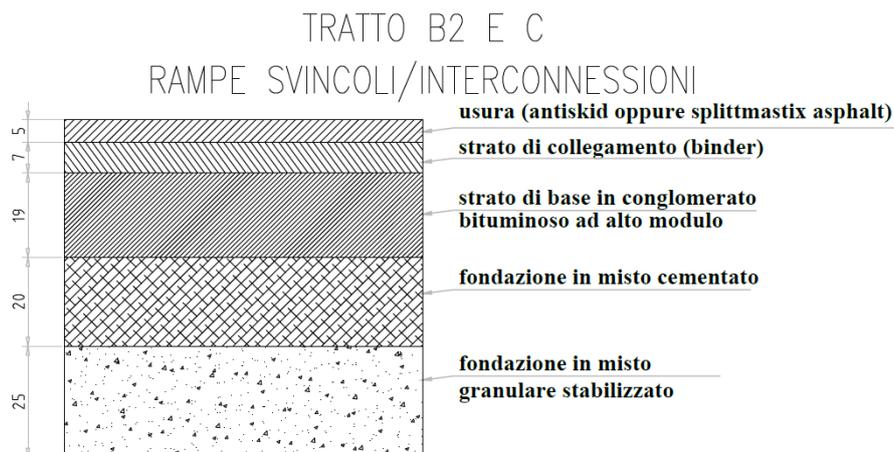


Figura 4 - Pavimentazione svincoli autostradali da Progetto Definitivo

2.2. PACCHETTI PREVISTI DA PROGETTO ESECUTIVO

Il presente paragrafo illustra i pacchetti previsti da Progetto Esecutivo (elaborato ESDB2A00GE00000SK004A) ed evidenzia le migliori proposte, in termini di materiali impiegati e spessori degli strati, rispetto al Progetto Definitivo.

2.2.1. Asse autostradale (trincea e rilevato)

Nel Progetto Esecutivo, per l'asse autostradale si prevede di realizzare due differenti pacchetti di pavimentazione semi-rigida a seconda delle condizioni di portanza del sottofondo presente in sito. Anticipando quanto dettagliato nel paragrafo 3.2, ai fini del dimensionamento dei pacchetti autostradali, è preferibile distinguere le tratte tra:

- tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza;
- tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza.

I pacchetti previsti in PE per ciascuna tratta così individuata si differenziano per il solo spessore della stabilizzazione in sito a cemento. Le due pavimentazioni in progetto prevedono i seguenti strati:

- usura doppio strato drenante, spessore complessivo 5 cm;
- binder modificato SOFT, spessore 5 cm;
- base CB HD – High Durability, spessore 12 cm;
- misto cementato fibrorinforzato, spessore 20 cm;
- stabilizzazione in sito a cemento, spessore pari a
 - 20 cm per le tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza;
 - 30 cm per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza.

La Figura 5 e la Figura 6 presentano la stratigrafia delle due pavimentazioni in progetto per l'asse autostradale. Tale soluzione progettuale sarà adottata anche per lo spartitraffico centrale dell'autostrada ove necessario per motivi realizzativi ed in corrispondenza dei varchi.

Rilevati, sottopassi, gallerie artificiali (sviluppo < 200m) e trincee con buone caratteristiche di portanza

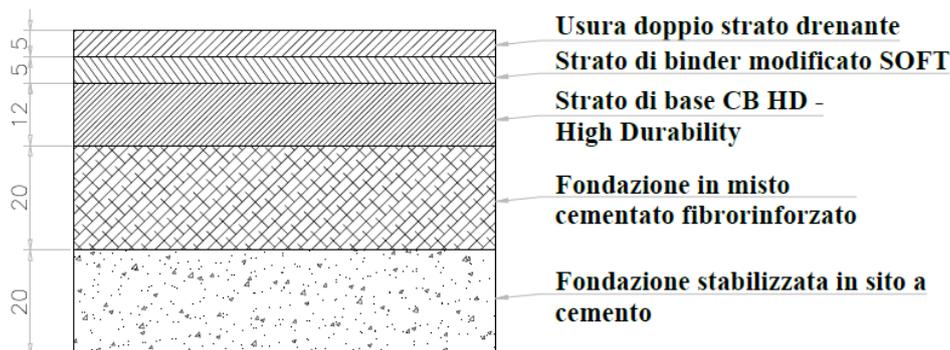


Figura 5 – Pavimentazione asse autostradale da Progetto Esecutivo – tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza

Trincee con scarse caratteristiche di portanza (da pk 0+325 a pk 0+725 m)

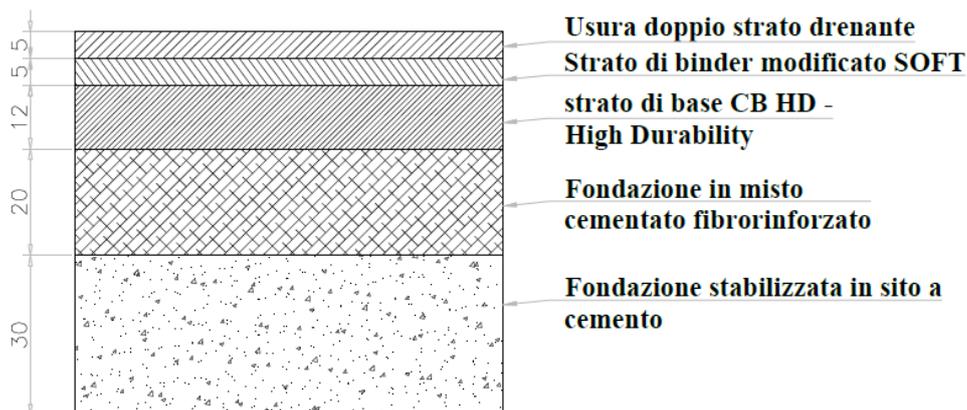


Figura 6 – Pavimentazione asse autostradale da Progetto Esecutivo – tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza

Le due pavimentazioni in progetto hanno uno spessore complessivo minore, pari a 62 cm e 72 cm rispettivamente, rispetto a quanto previsto in Progetto Definitivo (spessore totale 76 cm). Questa riduzione di spessore è correlata all'impiego di materiali più performanti per gli strati di binder, di base, per la fondazione in misto cementato e per la stabilizzazione in sito a cemento.

In particolare, si prevede di adottare un binder modificato SOFT in sostituzione di quello ordinario da PD, al fine di incrementare significativamente le prestazioni fisico-meccaniche e, quindi, la durabilità delle miscele. Queste miscele, infatti, hanno una minore probabilità di formazione di fessure e maggiore durata rispetto alla propagazione delle stesse.

Per lo strato di base, è previsto l'impiego di uno strato CB HD – High Durability, ottenuto tramite l'additivazione con fibre e con un modificante fisico strutturale. Quest'ultimo è costituito da polimeri plastomerici di nuova generazione ad alta sostenibilità ambientale. Essi conferiscono al bitume un maggiore intervallo di elastoplasticità, minore suscettibilità termica, maggiore resistenza alle deformazioni permanenti, alla fatica e all'invecchiamento, oltre ad una maggiore adesione agli aggregati. Invece, le fibre, formando un legame reticolare stabile che rinforza la struttura del mastice,

incrementano significativamente le prestazioni del legante, garantendo una maggiore durabilità delle pavimentazioni in esercizio anche attraverso la riduzione della deformabilità.

Per la fondazione in misto cementato, invece, si prevede di impiegare un misto cementato fibrorinforzato. L'utilizzo di fibre fibrillate in polipropilene determina un incremento della rigidità dello strato e della sua resistenza a trazione.

Per un approfondimento sulla composizione delle miscele e sui materiali costituenti, si rimanda al Capitolato Speciale di Appalto del Progetto Esecutivo.

Per lo strato più superficiale, si prevede di realizzare un'usura in doppio strato drenante (Double Draining Layer – DDL), costituito da:

- strato superiore di spessore pari a 2 cm, composto da una miscela confezionata con bitume modificato e con additivo antigelo;
- strato inferiore di spessore pari a 3 cm, composto da una miscela confezionata con bitume modificato HARD con aggiunta di additivo antigelo;
- interposizione di una mano di attacco impermeabile S.A.M.I. (Stress Absorbing Membrane Interlayer) tra lo strato inferiore ed il binder sottostante.

Questo strato di usura, tramite le sue proprietà drenanti, consente di ottenere un'elevata aderenza in caso di pioggia e una maggiore sicurezza e comfort per gli utenti. Infatti, la realizzazione di uno strato superiore a tessitura più fine permette di ovviare alla problematica dell'aderenza ridotta, caratterizzante uno strato drenante "aperto", poiché questo accorgimento garantisce un incremento dell'area di contatto pneumatico – pavimentazione e di conseguenza un aumento notevole dell'aderenza e della sicurezza degli utenti; la durabilità di aderenza nel tempo è garantita dalle caratteristiche meccaniche previste per gli aggregati dello strato superiore. Inoltre, le diverse frequenze di assorbimento fornite dal diverso assortimento granulometrico tra i due strati determina una riduzione del rumore generato dal rotolamento dello pneumatico sulla superficie della pavimentazione.

Per quanto concerne la curva di Meda (tratta B2 – da prog. km 5+400 a prog. km 6+075), nel Progetto Esecutivo si prevede di sostituire il trattamento superficiale tipo "Grip Road", applicato su uno strato d'usura di tipo chiuso (ordinario), con un tappeto d'usura di tipo SMA - Splitt Mastix Asphalt. Questo tipo di materiale, per le particolari caratteristiche granulometriche (e litologiche) degli inerti impiegati, unitamente ad un alto contenuto di legante modificato, consente di fornire elevate prestazioni in termini non solo di durabilità, stabilità e resistenza alle deformazioni, ma anche di rugosità superficiale e di resistenza all'ormaiamento. Inoltre, poiché le manovre compiute dai veicoli in tale tratto sono caratterizzate da elevata forza centrifuga, lo strato di usura di tipo SMA assicura prestazioni massime anche in termini di resistenza allo sgranamento superficiale e di aderenza assicurando il più elevato grado di sicurezza agli utenti.

ASSE PRINCIPALE - CURVA DI MEDA (da pk 5+400 a pk 6+075 m)

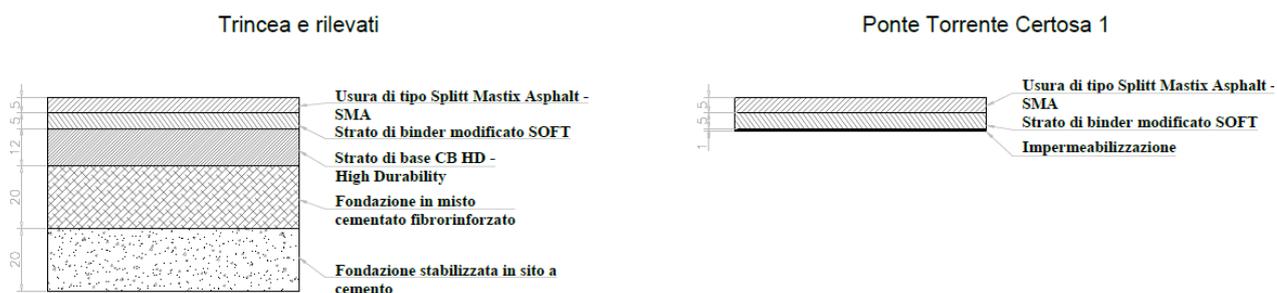


Figura 7 – Pavimentazione asse autostradale da Progetto Esecutivo – tratta "curva di Meda" da (pk 5+400 a pk 6+075)

Si rimanda all'elaborato ESDB2A00GE00000SK004A del Progetto Esecutivo per lo stralcio planimetrico riportante la tratta e le corsie autostradali in cui l'usura in doppio strato drenante è sostituita con un tappeto d'usura di tipo SMA al fine di incrementare l'aderenza e la sicurezza per gli utenti.

2.2.2. Gallerie artificiali

Nelle gallerie in progetto sulla tratta B2 si prevede di realizzare il pacchetto autostradale con spessore complessivo pari a 62 cm (stabilizzazione in sito a cemento con spessore di 20 cm). In particolare, per le gallerie con sviluppo superiore a 200 m, l'usura in doppio strato drenante è sostituita da uno strato d'usura di tipo Splitt Mastix Asphalt – SMA, al fine di ridurre il fattore di rischio nell'eventualità di sversamenti accidentali di liquidi infiammabili. Il punto di passaggio tra l'usura in doppio strato drenante e l'usura di tipo SMA è collocato a 50 m dagli imbocchi delle gallerie.

Gallerie artificiali con sviluppo superiore a 200 m

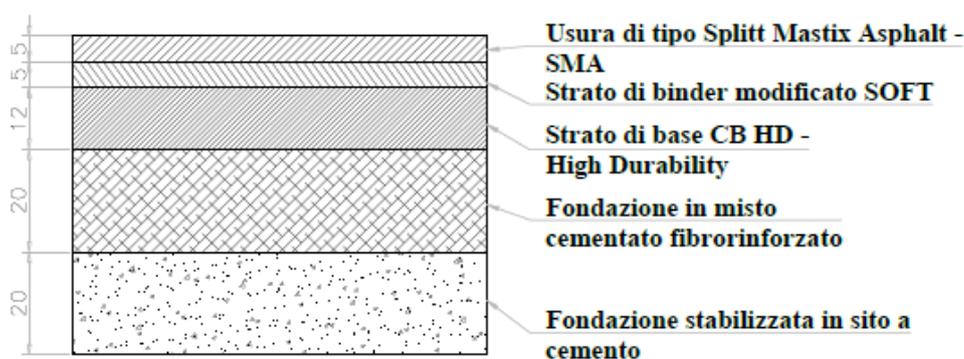


Figura 8 – Pavimentazione asse autostradale da Progetto Esecutivo – gallerie artificiali con sviluppo superiore a 200 m

2.2.3. Ponti e viadotti

Nel Progetto Esecutivo, per ponti e viadotti si prevede di realizzare la seguente pavimentazione:

- strato di usura in doppio strato drenante, spessore 5 cm;
- strato di binder modificato SOFT, spessore 5 cm;

Prima della realizzazione degli strati di pavimentazione in CB è necessario impermeabilizzare l'impalcato sottostante (spessore finito impermeabilizzazione pari a 10 mm).

Ponti e viadotti

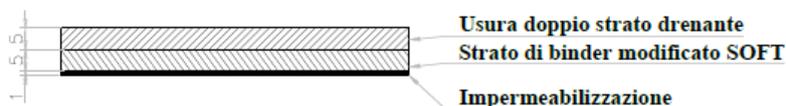


Figura 9 – Pavimentazione asse autostradale da Progetto Esecutivo – ponti e viadotti

2.2.4. Svincoli

Per le rampe degli svincoli in progetto sulla tratta B2 si prevede di realizzare una differente pavimentazione rispetto all'asse autostradale in quanto gli svincoli saranno soggetti ad un traffico minore. In analogia con quanto fatto per l'asse autostradale, ai fini del dimensionamento dei pacchetti degli svincoli, è preferibile distinguere due condizioni:

- tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza;
- tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza.

La pavimentazione da Progetto Esecutivo per le tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza degli svincoli della tratta B2 è composta dai seguenti strati:

- usura di tipo SMA, spessore 5 cm;
- binder modificato SOFT, spessore 5 cm;
- base CB HD – High Durability, spessore 11 cm;
- misto cementato fibrorinforzato, spessore 23 cm.

La Figura 10 presenta la stratigrafia della pavimentazione in progetto per gli svincoli della tratta B2 nella condizione di rilevati, sottopassi, gallerie artificiali e trincee con buone caratteristiche di portanza.

Rilevati, sottopassi, gallerie artificiali e trincee con buone caratteristiche di portanza

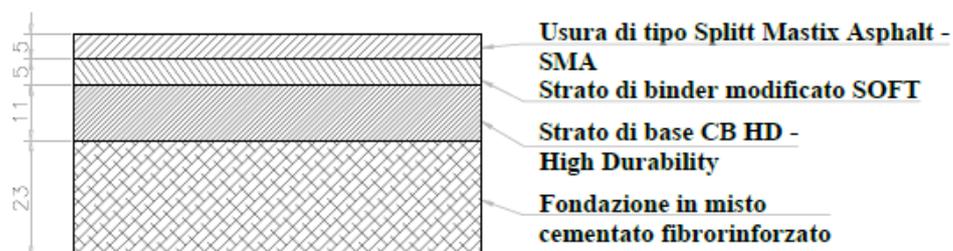


Figura 10 – Pavimentazione svincoli tratta B2 da Progetto Esecutivo

Anticipando, inoltre, quanto illustrato nel paragrafo 3.2, lo svincolo denominato “*Interconnessione Ex S.S. 35*” è l’unico che ricade in un tratto con scarse caratteristiche di portanza; pertanto, prima di realizzare il pacchetto stradale previsto da Progetto Esecutivo, è necessario procedere, soltanto nelle tratte in trincea, alla stabilizzazione a cemento del terreno di sottofondo, presente in sito, per uno spessore di 30 cm. La Figura seguente riporta la successione degli strati previsti nel corrente Progetto Esecutivo per le tratte in trincea dello svincolo “*Interconnessione Ex S.S. 35*”. Nelle tratte, invece, in rilevato dello svincolo “*Interconnessione Ex S.S. 35*” rimane valida la pavimentazione illustrata in Figura 10.

Trincee con scarse caratteristiche di portanza (Interconnessione Ex SS35)

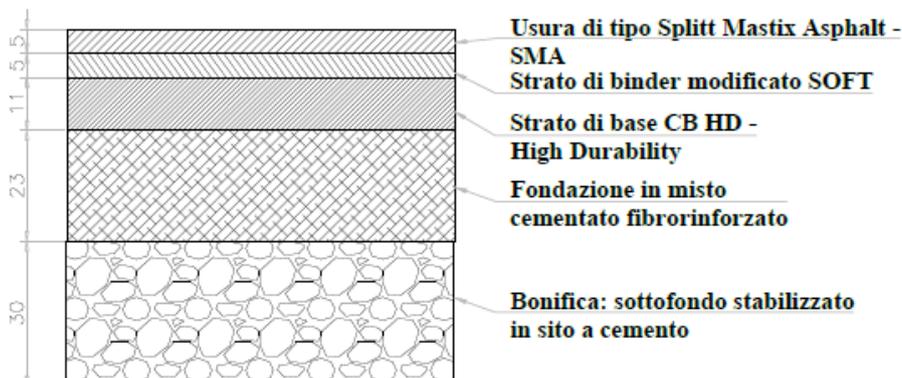


Figura 11 - Pavimentazione tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza - Svincolo Interconnessione Ex SS35

Negli svincoli, l'usura in doppio strato drenante, prevista sull'asse autostradale da PE, è sostituita con un tappeto di usura di tipo Splitt Mastix Asphalt – SMA. Questo, per le particolari caratteristiche granulometriche (e litologiche) degli inerti impiegati, unitamente ad un alto contenuto di legante modificato, consente di fornire elevate prestazioni in termini non solo di durabilità, stabilità e resistenza alle deformazioni, ma anche di rugosità superficiale e di resistenza all'ormaiamento.

Inoltre, poiché le manovre compiute dai veicoli in tali aree sono caratterizzate da elevata forza centrifuga e notevoli accelerazioni/decelerazioni che generano elevate sollecitazioni tangenziali nella pavimentazione, lo SMA assicura prestazioni massime anche in termini di resistenza allo sgranamento superficiale e di aderenza assicurando il più elevato grado di sicurezza agli utenti.

Nella Figura 12 è rappresentata la zona di transizione tra la pavimentazione in progetto sull'asse autostradale e quella prevista per gli svincoli della tratta B2.

STRALCIO PLANIMETRICO DELLA ZONA DI TRANSIZIONE FRA PAVIMENTAZIONE ASSE PRINCIPALE E PAVIMENTAZIONE SVINCOLO

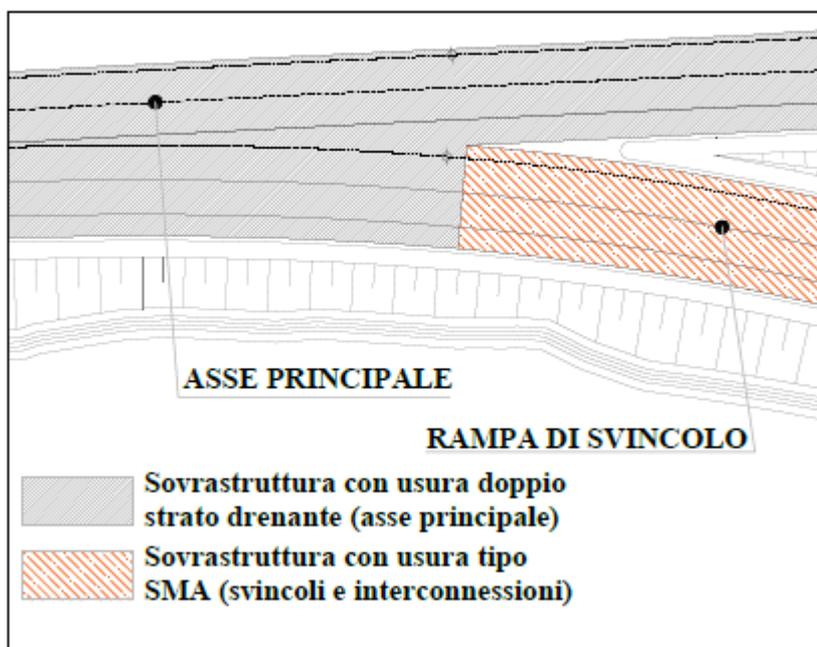


Figura 12 – Transizione tra pavimentazione asse autostradale e pavimentazione degli svincoli

3. DATI DI PROGETTO

3.1. DATI DI TRAFFICO

Ai fini del dimensionamento e della verifica delle pavimentazioni stradali, è necessario determinare sia il traffico transitante sull'infrastruttura in progetto sia il periodo temporale di riferimento per stimare tale quantità. In accordo con APL, nel Progetto Esecutivo, il periodo temporale considerato per la determinazione del traffico di progetto è pari a 20 anni.

3.1.1. Dati forniti nello studio di traffico

I dati di input per la determinazione del traffico di progetto per l'asse autostradale e gli svincoli sono desunti dal documento "Studio di traffico – analisi trasportistica generale ed approfondimenti sui nodi di connessione con la viabilità esterna", allegato al Progetto Definitivo (elaborato 09DTRGE0000000000RG001B).

Nel documento di cui sopra, per l'intero sviluppo dell'Autostrada sono stati determinati 3 differenti scenari di traffico: 2015, 2025 e 2035. Per ciascuno di questi e per tutte le tratte elementari in cui è stata suddivisa l'Autostrada (tra uno svincolo ed il successivo), sono state calcolate le seguenti grandezze:

- flusso di traffico nell'ora di punta della mattina in direzione Est, distinto tra mezzi leggeri e mezzi pesanti;
- flusso di traffico nell'ora di punta della mattina in direzione Ovest, distinto tra mezzi leggeri e mezzi pesanti;
- Traffico Giornaliero Medio – TGM, distinto tra mezzi leggeri e mezzi pesanti;
- percentuale di mezzi pesanti sul flusso di traffico totale.

Per la stima del traffico di progetto, sono stati considerati soltanto gli scenari progettuali al 2025 e al 2035. La Figura 13 e la Figura 14 riportano quanto presente nello studio di traffico allegato al Progetto Definitivo.

Tabella 4.5: Flussi di traffico sul Sistema Viabilistico Pedemontano - Scenario progettuale al 2025 - Ora di punta della mattina (8:00 - 9:00) e TGM

| TRATTA FUNZIONALE | PEDEMONTANA TRACCIATO PRINCIPALE Tratta Elementare | Ora Punta - Est | | | Ora Punta - Ovest | | | Bidirezionali | | | % pesanti |
|-------------------|---|-----------------|---------|--------|-------------------|---------|--------|---------------|-------------|------------|-----------|
| | | leggeri | pesanti | totali | leggeri | pesanti | totali | TGM leggeri | TGM pesanti | TGM totali | |
| A | A8 - Olona | 1'111 | 198 | 1'309 | 1'447 | 271 | 1'718 | 39'354 | 9'380 | 48'734 | 19.25% |
| | Olona - Mozzate | 971 | 171 | 1'142 | 1'038 | 202 | 1'240 | 30'908 | 7'460 | 38'368 | 19.44% |
| | Mozzate - Cislago | 460 | 70 | 530 | 468 | 82 | 550 | 14'277 | 3'040 | 17'317 | 17.56% |
| | Cislago - A9 | 789 | 128 | 917 | 669 | 115 | 784 | 22'431 | 4'860 | 27'291 | 17.81% |
| B | A9 - Lazzate | 1'549 | 307 | 1'856 | 2'035 | 341 | 2'376 | 55'138 | 12'960 | 68'098 | 19.03% |
| | Lazzate - Cermenate | 1'520 | 296 | 1'816 | 1'607 | 270 | 1'877 | 48'108 | 11'320 | 59'428 | 19.05% |
| | Cermenate - Barlassina | 1'726 | 335 | 2'061 | 1'551 | 258 | 1'809 | 50'415 | 11'860 | 62'275 | 19.04% |
| | Barlassina - Meda | 2'338 | 430 | 2'768 | 2'086 | 326 | 2'412 | 68'062 | 15'120 | 83'182 | 18.18% |
| | Meda - Seveso | 2'333 | 434 | 2'767 | 2'183 | 345 | 2'528 | 69'477 | 15'580 | 85'057 | 18.32% |
| | Seveso - Cesano Maderno | 2'696 | 485 | 3'181 | 2'481 | 375 | 2'856 | 79'646 | 17'200 | 96'846 | 17.76% |
| C | Cesano Maderno - SS 36 | 3'175 | 534 | 3'709 | 2'306 | 348 | 2'654 | 84'323 | 17'640 | 101'963 | 17.30% |
| | SS 36 - Macherio | 3'188 | 514 | 3'702 | 2'638 | 427 | 3'065 | 89'631 | 18'820 | 108'451 | 17.35% |
| | Macherio - Arcore/ Usmate/Tg Est | 3'648 | 601 | 4'249 | 2'778 | 495 | 3'273 | 98'862 | 21'920 | 120'782 | 18.15% |
| D | Arcore/Usmate/Tg Est - Aicurzio | 1'932 | 367 | 2'299 | 1'944 | 370 | 2'314 | 59'631 | 14'740 | 74'371 | 19.82% |
| | Aicurzio - Cornate | 1'935 | 385 | 2'320 | 1'640 | 354 | 1'994 | 55'000 | 14'780 | 69'780 | 21.18% |
| | Cornate - Filago | 2'076 | 424 | 2'500 | 1'613 | 348 | 1'961 | 56'754 | 15'440 | 72'194 | 21.39% |
| | Filago - A4 | 2'320 | 529 | 2'849 | 1'670 | 374 | 2'044 | 61'385 | 18'060 | 79'445 | 22.73% |
| | A4 - Raccordo IPB | 1'500 | 338 | 1'838 | 1'360 | 290 | 1'650 | 44'000 | 12'560 | 56'560 | 22.21% |

Figura 13 – Dati da studio di traffico – scenario progettuale al 2025

Tabella 4.6: Flussi di traffico sul Sistema Viabilistico Pedemontano - Scenario progettuale al 2035 - Ora di punta della mattina (8:00 - 9:00) e TGM

| TRATTA FUNZIONALE | PEDEMONTANA TRACCIATO PRINCIPALE Tratta Elementare | Ora Punta - Est | | | Ora Punta - Ovest | | | Bidirezionali | | | % pesanti |
|-------------------|---|-----------------|---------|--------|-------------------|---------|--------|---------------|-------------|------------|-----------|
| | | leggeri | pesanti | totali | leggeri | pesanti | totali | TGM leggeri | TGM pesanti | TGM totali | |
| A | A8 - Olona | 1'269 | 236 | 1'505 | 1'618 | 314 | 1'932 | 44'415 | 11'000 | 55'415 | 19.85% |
| | Olona - Mozzate | 1'090 | 200 | 1'290 | 1'198 | 245 | 1'443 | 35'200 | 8'900 | 44'100 | 20.18% |
| | Mozzate - Cislago | 550 | 87 | 637 | 568 | 105 | 673 | 17'200 | 3'840 | 21'040 | 18.25% |
| | Cislago - A9 | 921 | 150 | 1'071 | 805 | 146 | 951 | 26'554 | 5'920 | 32'474 | 18.23% |
| B | A9 - Lazzate | 1'849 | 402 | 2'251 | 2'350 | 408 | 2'758 | 64'600 | 16'200 | 80'800 | 20.05% |
| | Lazzate - Cermenate | 1'805 | 385 | 2'190 | 1'901 | 328 | 2'229 | 57'015 | 14'260 | 71'275 | 20.01% |
| | Cermenate - Barlassina | 2'029 | 433 | 2'462 | 1'880 | 320 | 2'200 | 60'138 | 15'060 | 75'198 | 20.03% |
| | Barlassina - Meda | 2'688 | 539 | 3'227 | 2'419 | 391 | 2'810 | 78'569 | 18'600 | 97'169 | 19.14% |
| | Meda - Seveso | 2'672 | 547 | 3'219 | 2'570 | 415 | 2'985 | 80'646 | 19'240 | 99'886 | 19.26% |
| | Seveso - Cesano Maderno | 3'049 | 601 | 3'650 | 2'838 | 443 | 3'281 | 90'569 | 20'880 | 111'449 | 18.73% |
| C | Cesano Maderno - SS 36 | 3'476 | 649 | 4'125 | 2'672 | 424 | 3'096 | 94'585 | 21'460 | 116'045 | 18.49% |
| | SS 36 - Macherio | 3'516 | 611 | 4'127 | 2'882 | 491 | 3'373 | 98'431 | 22'040 | 120'471 | 18.29% |
| | Macherio - Arcore/ Usmate/Tg Est | 4'043 | 708 | 4'751 | 3'122 | 577 | 3'699 | 110'231 | 25'700 | 135'931 | 18.91% |
| D | Arcore/Usmate/Tg Est - Aicurzio | 2'162 | 435 | 2'597 | 2'135 | 427 | 2'562 | 66'108 | 17'240 | 83'348 | 20.68% |
| | Aicurzio - Cornate | 2'090 | 439 | 2'529 | 1'790 | 397 | 2'187 | 59'692 | 16'720 | 76'412 | 21.88% |
| | Cornate - Filago | 2'283 | 494 | 2'777 | 1'786 | 408 | 2'194 | 62'600 | 18'040 | 80'640 | 22.37% |
| | Filago - A4 | 2'591 | 553 | 3'144 | 1'885 | 437 | 2'322 | 68'862 | 19'800 | 88'662 | 22.33% |
| | A4 - Raccordo IPB | 1'893 | 353 | 2'046 | 1'582 | 348 | 1'930 | 50'385 | 14'020 | 64'405 | 21.77% |

Figura 14 – Dati da studio di traffico – scenario progettuale al 2035

Per quanto riguarda, invece, gli svincoli, i dati deducibili dallo studio di traffico riguardano soltanto lo scenario progettuale al 2015. In particolare, con riferimento all'ora di punta della mattina, sopra gli archi dei grafi presenti nel documento in questione sono riportati i volumi di traffico, distinti tra mezzi leggeri e mezzi pesanti, per ciascuna direzione di marcia. Per gli svincoli maggiormente trafficati, i dati di traffico, suddivisi per ciascuna rampa, sono presenti anche in alcune tabelle dello studio di traffico.

3.1.2. Stima del traffico di progetto

Per la stima del traffico di progetto delle varie tratte dell'Autostrada e degli svincoli, si è fatto riferimento soltanto ai mezzi pesanti (denominati anche "veicoli commerciali" o "VC" nella presente relazione), in quanto le vetture inducono effetti trascurabili sulla durata strutturale della pavimentazione.

Lo scopo delle considerazioni e dei calcoli, presentati nei seguenti paragrafi, è la determinazione del numero cumulato di passaggi di veicoli commerciali transitanti sulla corsia più caricata nell'arco temporale 2025 - 2045. Per completezza di trattazione, saranno analizzati i dati di traffico sia della tratta B2 sia della tratta C.

3.1.2.1. Stima del traffico di progetto dell'Autostrada

I dati di input, desunti dallo studio di traffico, sono illustrati nella seguente tabella.

| Tratta funzionale | Tratta elementare | Anno | TGM Mezzi Pesanti |
|-------------------|----------------------------|------|-------------------|
| B2 | Cermenate – Barlassina | 2025 | 11.860 |
| | | 2035 | 15.060 |
| B2 | Barlassina – Meda | 2025 | 15.120 |
| | | 2035 | 18.600 |
| B2 | Meda – Seveso | 2025 | 15.580 |
| | | 2035 | 19.240 |
| B2 | Seveso – Cesano Maderno | 2025 | 17.200 |
| | | 2035 | 20.880 |
| C | Cesano Maderno – SS36 | 2025 | 17.640 |
| | | 2035 | 21.460 |
| C | SS36 – Macherio | 2025 | 18.820 |
| | | 2035 | 22.040 |
| C | Macherio – Tangenziale Est | 2025 | 21.920 |
| | | 2035 | 25.700 |

Tabella 1 – TGM Mezzi Pesanti per ciascuna tratta elementare

I dati di partenza si riferiscono al flusso bidirezionale di mezzi pesanti. Pertanto, ipotizzando una distribuzione del traffico sulle due direzioni di marcia pari a 50%, si determina il TGM di mezzi pesanti per ciascuna direzione nell'anno 2025. A partire da tale quantità, si calcola il numero di veicoli commerciali/giorno transitanti sulla corsia più caricata tramite un coefficiente pari:

- 90% per le tratte autostradali caratterizzate da 2 corsie per senso di marcia (da Cermenate a Meda);
- 80% per le tratte autostradali caratterizzate da 3 corsie per senso di marcia (da Meda a Tangenziale Est).

Per convertire il flusso giornaliero di VC sulla corsia più caricata in un valore annuale, si è considerato un numero di giorni in un anno pari a 285. Si è preferito adottare tale valore, al posto di 365 giorni, per evitare di sovrastimare il traffico dei soli mezzi pesanti, transitanti prevalentemente nei soli giorni feriali sull'infrastruttura in progetto (in accordo con APL).

Al fine di stimare il numero cumulato di VC nel periodo 2025 – 2045, si è determinato, per ciascuna tratta elementare, il tasso annuo di incremento $a_{2025-2035}$ dei VC tramite l'Equazione 1:

$$a_{2025-2035} = \sqrt[10]{\frac{TGM_{2035}}{TGM_{2025}}} - 1$$

Equazione 1

Il valore del tasso annuo, riferito all'arco temporale 2025 – 2035, è stato esteso, in assenza di dati per l'anno 2045, anche al decennio successivo, 2035 – 2045. Il calcolo, a partire dai dati dello studio di traffico del PD, è stato eseguito per ciascuna tratta elementare in cui è stata suddivisa l'Autostrada in progetto. I valori del coefficiente in questione sono compresi tra 1,60% e 2,42%.

Note tutte le grandezze, è possibile stimare il numero cumulato di passaggi di VC sulla corsia più caricata nel ventennio 2025 – 2045 tramite l'Equazione 2.

$$VC_{2025-2045} = \frac{VC_{2025}((1 + a_{2025-2035})^{20} - 1)}{a_{2025-2035}}$$

Equazione 2

La Tabella 2 presenta i risultati ottenuti per ciascuna tratta elementare dell'Autostrada. L'ultima colonna riporta il numero di passaggi di VC sulla corsia più caricata nel periodo temporale 2025 – 2045 da impiegare per il progetto della pavimentazione autostradale.

| TRATTA | Tratta elementare | Progressiva Km | | TGM MEZZI PESANTI monodirezione 2025 | Tasso annuo incremento 2025-35 | VC 2025-45 corsia più caricata |
|-----------|------------------------|----------------|--------|---|---|--------------------------------------|
| | | Da | A | | | |
| B2 | Cermenate - Barlassina | 0+000 | 3+600 | 5.930 | 2,42% | 38.533.394 |
| B2 | Barlassina - Meda | 3+600 | 6+150 | 7.560 | 2,09% | 47.554.965 |
| B2 | Meda - Seveso | 6+150 | 8+400 | 7.790 | 2,13% | 43.728.829 |
| B2 | Meda - Cesano Maderno | 8+400 | 9+640 | 8.600 | 1,96% | 47.442.320 |
| C | Cesano Maderno - SS 36 | 0+000 | 5+350 | 8.820 | 1,98% | 48.761.691 |
| C | SS 36 - Macherio | 5+350 | 7+650 | 9.410 | 1,59% | 50.062.944 |
| C | Macherio - Tg Est | 7+650 | 16+600 | 10.960 | 1,60% | 58.376.658 |

Tabella 2 – Veicoli Commerciali 2025-2045 sulla corsia più caricata

Sulla base dei risultati di cui sopra, è possibile raggruppare le tratte elementari in tratte con valori omogenei di VC sulla corsia più caricata. La Tabella 3 mostra che:

- tratta Cermenate – Barlassina risulta essere la meno trafficata (38.600.000 VC);
- tratte Barlassina – Macherio sono interessate da un traffico di circa 50.100.000 VC;
- tratta Macherio – Tangenziale Est è la più trafficata, con 59.000.000 VC.

| TRATTA | Tratta elementare | Progressiva Km | | VC 2025-2045 di PROGETTO |
|-----------|------------------------|----------------|--------|--------------------------|
| | | Da | A | |
| B2 | Cermenate - Barlassina | 0+000 | 3+600 | 38.600.000 |
| B2 | Barlassina - Meda | 3+600 | 6+150 | 47.600.000 |
| B2 | Meda - Seveso | 6+150 | 8+400 | |
| B2 | Meda - Cesano Maderno | 8+400 | 9+640 | |
| C | Cesano Maderno - SS 36 | 0+000 | 5+350 | 50.100.000 |
| C | SS 36 - Macherio | 5+350 | 7+650 | |
| C | Macherio - Tg Est | 7+650 | 16+600 | 59.000.000 |

Tabella 3 – Raggruppamento tratte secondo VC 2025-2045 sulla corsia più caricata

3.1.2.2. Stima del traffico di progetto degli svincoli

I dati di input per gli svincoli, desunti dallo studio di traffico, sono riferiti al solo scenario progettuale del 2015. Inoltre, in assenza del dato di TGM dei mezzi pesanti, si è fatto riferimento al numero di mezzi pesanti transitanti sulle rampe degli svincoli nell'ora di punta della mattina. Per ciascuno svincolo, il dato di partenza è il valore massimo tra quelli delle rampe costituenti lo svincolo in questione. La Tabella 4 presenta quanto dedotto dai grafi presenti nello studio di traffico allegato al PD. I dati di partenza, a differenza del caso autostradale, si riferiscono al flusso monodirezionale di mezzi pesanti.

| Tratta funzionale | Svincolo | Anno | Mezzi Pesanti ora di punta |
|-------------------|-----------------|------|----------------------------|
| B2 | Cermenate | 2015 | 82 |
| B2 | Lentate | 2015 | 75 |
| B2 | Meda | 2015 | 87 |
| B2 | Barrucana | 2015 | 43 |
| C | Cesano Maderno | 2015 | 116 |
| C | Desio | 2015 | 209 |
| C | Macherio | 2015 | 94 |
| C | Tangenziale Est | 2015 | 154 |

Tabella 4 – Mezzi Pesanti nell'ora di punta per ciascuno svincolo

Per convertire il flusso orario di VC in un valore giornaliero (TGM mezzi pesanti), si è considerato un fattore orario, pari a 0,05. Questo è stato determinato tramite i dati dell'asse autostradale presenti nello studio di traffico. Nel dettaglio, questo parametro è pari al rapporto tra la somma dei flussi dei soli mezzi pesanti nell'ora di punta del mattino nella direzione Est ed Ovest ed il TGM bidirezionale dei mezzi pesanti. Ripetendo tale calcolo per tutte le tratte elementari, si ricava un fattore orario pari a 0,05. Dividendo il numero di mezzi pesanti nell'ora di punta di ciascuno svincolo per tale valore, si determina il TGM dei mezzi pesanti sulle rampe degli svincoli.

Il numero di VC nell'anno 2015 per ciascuno svincolo è pari al prodotto tra TGM dei mezzi pesanti e il numero di giorni in un anno, pari a 285 per le ragioni di cui sopra. Poiché l'arco temporale di riferimento per il Progetto Esecutivo è 2025 – 2045, è necessario proiettare il valore di VC del 2015 all'anno 2025, tramite un tasso di incremento annuo. Quest'ultimo è calcolabile a partire dal TGM dei mezzi pesanti dell'anno 2015 e 2025 per ciascuna tratta elementare.

$$a_{2015-2025} = \sqrt[10]{\frac{TGM_{2025}}{TGM_{2015}}} - 1$$

Equazione 3

Di conseguenza, tramite l'Equazione 4, si ricava il numero di VC transitanti sulle rampe degli svincoli nell'anno 2025.

$$VC_{2025} = VC_{2015}(1 + a_{2015-2025})^{10}$$

Equazione 4

Al fine di stimare il numero cumulato di VC nel periodo 2025 – 2045, si è determinato, per ciascuna tratta elementare, il tasso di incremento $a_{2025-2035}$ annuo dei VC tramite l'Equazione 5:

$$a_{2025-2035} = \sqrt[10]{\frac{TGM_{2035}}{TGM_{2025}}} - 1$$

Equazione 5

Come per l'asse autostradale, il valore del tasso annuo, riferito all'arco temporale 2025 – 2035, è stato esteso, in assenza di dati per l'anno 2045, anche al decennio successivo, 2035 – 2045.

Note tutte le grandezze, è possibile stimare, tramite l'Equazione 2, il numero cumulato di passaggi di VC sulle rampe di ciascuno svincolo nel ventennio 2025 – 2045. La seguente tabella illustra i risultati ottenuti per ciascuno svincolo.

| TRATTA | Svincolo | Estensione Rampe Svincolo | <u>TGM MEZZI PESANTI</u> monodirezione 2025 | Tasso annuo incremento 2025-35 | <u>VC 2025-45</u> |
|--------|-----------------|---------------------------|---|-----------------------------------|-------------------|
| B2 | Cermenate | in parte già realizzate | 1.640 | 2,34% | 14.609.163 |
| B2 | Lentate | 1.373 m | 1.500 | 2,42% | 14.145.886 |
| B2 | Meda | 4.209 m | 1.740 | 2,09% | 15.530.338 |
| B2 | Barrucana | 1.198 m | 860 | 2,13% | 7.545.504 |
| C | Cesano Maderno | 9.836 m | 2.320 | 1,96% | 19.796.076 |
| C | Desio | 9.431 m | 4.180 | 1,98% | 36.036.752 |
| C | Macherio | 1.569 m | 1.880 | 1,59% | 16.317.326 |
| C | Tangenziale Est | 10.885 m | 3.080 | 1,60% | 26.724.154 |

Tabella 5 – Veicoli Commerciali 2025-2045 sulle rampe di svincolo

Sulla base dei risultati di cui sopra, è possibile raggruppare gli svincoli secondo valori simili di VC 2025 – 2045. La Tabella 6 mostra che:

- svincoli di Cermenate, Lentate, Meda, Cesano Maderno e Macherio presentano un traffico tra loro confrontabile (19.800.000 VC);
- svincolo di Barrucana è interessato da un numero di VC pari 7.600.000;
- svincolo della Tangenziale Est presenta un traffico pari a 26.800.000 VC nel ventennio 2025 – 2045;
- svincolo di Desio è il più trafficato, con 36.100.000 di VC nel periodo 2025 – 2045.

| TRATTA | Svincolo | Estensione Rampe Svincolo | VC 2025-45 di PROGETTO |
|-----------|--------------------|------------------------------|---------------------------|
| B2 | Cermentate | in parte già realizzate | 15.600.000 |
| B2 | Lentate | 1.373 m | |
| B2 | Meda | 4.209 m | |
| B2 | Barrucana | 1.198 m | 7.600.000 |
| C | Cesano Maderno | 9.836 m | 19.800.000 |
| C | Desio | 9.431 m | 36.100.000 |
| C | Macherio | 1.569 m | 16.400.000 |
| C | Tangenziale Est | 10.885 m | 26.800.000 |

Tabella 6 – Suddivisione svincoli secondo VC 2025-2045

3.1.3. Definizione del numero di ESAL di progetto

Il traffico fin ora calcolato considera soltanto il numero di veicoli commerciali che si prevede transitare sull'asse autostradale e sugli svincoli nel periodo temporale 2025 – 2045. Tuttavia, tale quantità comprende differenti tipologie di mezzi pesanti che determinano un diverso danno strutturale alla pavimentazione, in funzione della configurazione geometrica degli assi e dei carichi gravanti su di essi. Per il dimensionamento e la verifica della sovrastruttura stradale, è solito convertire tutti gli assi transitanti sulla pavimentazione di progetto in un asse standard di riferimento - *ESAL*. Per il presente Progetto Esecutivo, in comune con il PD, si fa riferimento ad un asse singolo da 120 kN con ruote gemelle.

Pertanto, un passaggio di un qualsiasi asse viene trasformato in un numero di passaggi equivalenti dell'asse di riferimento. Per tale conversione, è necessario stimare un coefficiente di equivalenza: *EALF – Equivalent Axle Load Factor*.

3.1.3.1. Stima del coefficiente di equivalenza EALF

Per determinare il coefficiente di equivalenza *EALF*, serve conoscere lo spettro di traffico e le tipologie di veicoli commerciali transitanti sull'infrastruttura in progetto. Per quest'ultimo dato, si è fatto riferimento al Catalogo Italiano delle Pavimentazioni che, per ciascuna tipologia di veicoli commerciali, definisce il numero di assi e la distribuzione dei carichi per ciascuno di essi.

Tab. 2 - Tipi di veicoli commerciali, numero di assi, distribuzione dei carichi per asse.

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

Figura 15 – Tipi di VC, numero di assi e distribuzione dei carichi per asse secondo Catalogo

Per quanto riguarda, invece, lo spettro di traffico, all'interno del Progetto Definitivo non è presente alcuna informazione a riguardo. Di conseguenza, in accordo con APL, è possibile adottare gli spettri di traffico, definiti nel Catalogo Italiano delle Pavimentazioni, per le Autostrade urbane ed extraurbane come base di partenza dell'analisi.

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

| 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 | ---- |

Figura 16 – Spettro di traffico di VC secondo Catalogo

Al fine di determinare lo spettro di traffico con caratteristiche più prossime a quelle del traffico che interesserà l'infrastruttura di progetto, Autostrada Pedemontana Lombarda ha fornito i dati delle percentuali di passaggi sulle tratte A e B1, attualmente in esercizio, dell'Autostrada A36, suddivisi per classi di pedaggio. La Figura 17 illustra la classificazione degli autoveicoli secondo il sistema di esazione *free flow* utilizzato da Autostrada Pedemontana Lombarda. Invece, in Figura 18 sono riportate le percentuali di passaggi per ciascuna classe di autoveicoli e per ogni anno di esercizio dell'infrastruttura.

 Autostrada Pedemontana Lombarda

Classi autoveicoli sistema di esazione free flow utilizzato da Autostrada Pedemontana Lombarda SpA:

| Classe | Leggeri/Pesanti | Descrizione | Tipologia veicoli |
|--------|-----------------|---|---|
| 1 | Leggeri | Motoveicoli e autoveicoli |  |
| 2 | Pesanti | Autoveicoli con rimorchio, furgoncini |  |
| 3 | Pesanti | Furgoni, Camion e Pullman |  |
| 4 | Pesanti | TIR e veicoli di classe 3 con rimorchio |  |

Figura 17 – Classificazione autoveicoli da sistema esazione APL

| ANNO* | TRATTA | % CLASSE 1 | % CLASSE 2 | % CLASSE 3 | % CLASSE 4 |
|-------|--------|------------|------------|------------|------------|
| 2022 | A36-A | 79,51% | 11,03% | 4,24% | 5,22% |
| | A36-B1 | 78,76% | 11,14% | 4,19% | 5,92% |
| | A36 | 79,22% | 11,07% | 4,22% | 5,49% |
| 2021 | A36-A | 77,51% | 11,36% | 4,91% | 6,22% |
| | A36-B1 | 76,96% | 11,43% | 4,75% | 6,86% |
| | A36 | 77,29% | 11,39% | 4,85% | 6,48% |
| 2020 | A36-A | 76,49% | 11,16% | 5,40% | 6,94% |
| | A36-B1 | 75,71% | 11,39% | 5,29% | 7,62% |
| | A36 | 76,19% | 11,25% | 5,36% | 7,20% |
| 2019 | A36-A | 81,02% | 9,72% | 4,35% | 4,91% |
| | A36-B1 | 79,79% | 9,92% | 4,42% | 5,88% |
| | A36 | 80,58% | 9,79% | 4,38% | 5,26% |
| 2018 | A36-A | 80,84% | 9,47% | 4,54% | 5,15% |
| | A36-B1 | 79,44% | 9,64% | 4,71% | 6,21% |
| | A36 | 80,34% | 9,53% | 4,60% | 5,53% |
| 2017 | A36-A | 80,92% | 13,36% | 0,47% | 5,25% |
| | A36-B1 | 79,87% | 9,12% | 4,77% | 6,24% |
| | A36 | 80,57% | 11,92% | 1,93% | 5,59% |
| 2016 | A36-A | 81,24% | 8,97% | 4,71% | 5,08% |
| | A36-B1 | 80,68% | 8,87% | 4,66% | 5,79% |
| | A36 | 81,07% | 8,94% | 4,69% | 5,30% |

Figura 18 – Percentuali di passaggi per ogni classe di autoveicoli

Omettendo i dati degli anni 2020 e 2021, poiché influenzati dalla situazione sanitaria, è possibile calcolare la percentuale media dei passaggi per ogni classe di mezzi pesanti. Inoltre, confrontando quanto fornito da APL con gli spettri di traffico da Catalogo Italiano delle Pavimentazioni, è riscontrabile una maggiore somiglianza con lo spettro delle Autostrade extraurbane in quanto la classe 4 di APL (tir e veicoli con rimorchio) è del tutto assente nello spettro delle Autostrade urbane.

| | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 | SOMMA CLASSI 2 – 3 – 4 |
|-------------------|----------|----------|----------|---------------------------|
| Percentuale media | 10,25 % | 3,97 % | 5,43 % | 19,65 % |

Tabella 7 – Percentuale media dei passaggi per ogni classe di mezzi pesanti da dati APL

Sulla base delle percentuali medie, mostrate in Tabella 7, è possibile aggiornare lo spettro di traffico definito nel Catalogo Italiano delle Pavimentazioni affinché questo sia più rappresentativo dell'infrastruttura di progetto. Innanzitutto, le tipologie di veicoli commerciali da Catalogo sono state raggruppate a seconda delle classi individuate da APL. A partire da questo raggruppamento e dai dati dello spettro da Catalogo, si è calcolata l'incidenza percentuale di ogni singola tipologia di VC per la classe di APL a cui appartiene (colonna "incidenza%"). Moltiplicando l'incidenza di ogni singolo VC per la percentuale media di ciascuna classe (Tabella 7), si è determinata la percentuale di tutte le tipologie di VC rispetto al traffico totale (%mezzi pesanti sul totale pari a 19,65%), mezzi leggeri inclusi (Classe 1 di APL). È da notare che:

- la somma delle percentuali dei VC appartenenti a una singola classe coincide con la percentuale media illustrata in Tabella 7;
- la somma di tutte le percentuali dei VC, rispetto al traffico totale, è pari alla percentuale di mezzi pesanti (19,65%) rispetto al traffico totale.

Infine, considerando 100% dei mezzi pesanti (percentuale 19,65% sul traffico totale), è stato calcolato lo **spettro di traffico aggiornato** dei soli mezzi pesanti.

| Tipo veicolo da Catalogo | Spettro da Catalogo Pavimentazioni | CLASSE APL | Incidenza% | %VC sul traffico totale | somma %VC per singola classe APL | Spettro di traffico aggiornato |
|--------------------------|------------------------------------|---|------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 12,2% |  | 23,83% | 2,45% | 10,25% | 12,4% |
| 2 | 0,0% | | 0,00% | 0,00% | | 0,0% |
| 3 | 24,4% | | 47,66% | 4,88% | | 24,9% |
| 4 | 14,6% | | 28,52% | 2,92% | | 14,9% |
| 5 | 2,4% |  | 8,96% | 0,37% | 2,17% | 1,8% |
| 6 | 12,2% | | 45,52% | 1,80% | | 9,2% |
| 7 | 2,4% |  | 10,91% | 0,59% | 5,43% | 3,0% |
| 8 | 4,9% | | 22,27% | 1,21% | | 6,2% |
| 9 | 2,4% | | 10,91% | 0,59% | | 3,0% |
| 10 | 4,9% | | 22,27% | 1,21% | | 6,2% |
| 11 | 2,4% | | 10,91% | 0,59% | | 3,0% |
| 12 | 4,9% | | 22,27% | 1,21% | | 6,2% |
| 13 | 0,1% | | 0,45% | 0,03% | | 0,1% |
| 14 | 0,0% |  | 0,00% | 0,00% | 1,80% | 0,0% |
| 15 | 0,0% | | 0,00% | 0,00% | | 0,0% |
| 16 | 12,2% | | 45,52% | 1,80% | | 9,2% |
| 100,0% | | % mezzi pesanti rispetto al traffico totale | | 19,65% | | 100,0% |

Tabella 8 – Aggiornamento dello spettro di traffico per Autostrada Pedemontana Lombarda

Sulla base dello spettro di traffico aggiornato e delle tipologie di VC transitanti sull'infrastruttura di progetto, è possibile determinare il coefficiente di equivalenza *EALF* tramite la legge della quarta potenza. Questo parametro risulta pari a 0,67.

Pertanto, il numero di passaggi dell'asse di riferimento da 120 kN (*ESAL*) equivale a 0,67 volte la somma dei passaggi di tutti gli assi di VC.

L'analisi condotta per determinare *EALF* è valida sia per l'asse autostradale sia per gli svincoli.

3.1.3.2. Calcolo del numero di *ESAL* di progetto

Per la verifica delle pavimentazioni stradali, il traffico da progetto (Paragrafo 3.1.2) è convertito, tramite il coefficiente di equivalenza *EALF*, nel numero di *ESAL* di progetto. Tale grandezza stima la quantità di passaggi di assi standard da 120 kN sull'asse autostradale e sugli svincoli nell'arco temporale 2025 – 2045. La Tabella 9 presenta gli *ESAL* di progetto per le tratte elementari dell'asse autostradale, mentre la Tabella 10 illustra quanto ottenuto per ciascuno svincolo.

| TRATTA | Tratta elementare | Progressiva Km | | VC 2025-2045 di PROGETTO | Coeff di equivalenza | ESAL da 120 kN di PROGETTO | |
|-----------|------------------------|----------------|--------|--------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|
| | | Da | A | | | | |
| B2 | Cermetate - Barlassina | 0+000 | 3+600 | <u>38.600.000</u> | 0,67 | 25.862.000 | |
| B2 | Barlassina - Meda | 3+600 | 6+150 | 47.600.000 | | 31.892.000 | |
| B2 | Meda - Seveso | 6+150 | 8+400 | | | | |
| B2 | Meda - Cesano Maderno | 8+400 | 9+640 | | | | |
| C | Cesano Maderno - SS 36 | 0+000 | 5+350 | <u>50.100.000</u> | | | 33.567.000 |
| C | SS 36 - Macherio | 5+350 | 7+650 | 59.000.000 | | | 39.530.000 |
| C | Macherio - Tg Est | 7+650 | 16+600 | | | | |

Tabella 9 – Calcolo *ESAL* da 120 kN di progetto per l'asse autostradale

| TRATTA | Svincolo | Estensione Rampe Svincolo | VC 2025-45 di PROGETTO | Coeff di equivalenza | ESAL da 120 kN di PROGETTO |
|-----------|-----------------|---------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|
| B2 | Cermentate | in parte già realizzate | 15.600.000 | 0,67 | 10.452.000 |
| B2 | Lentate | 1.373 m | | | |
| B2 | Meda | 4.209 m | | | |
| B2 | Barrucana | 1.198 m | 7.600.000 | | 5.092.000 |
| C | Cesano Maderno | 9.836 m | 19.800.000 | | 13.266.000 |
| C | Desio | 9.431 m | <u>36.100.000</u> | | <u>24.187.000</u> |
| C | Macherio | 1.569 m | 16.400.000 | | 10.988.000 |
| C | Tangenziale Est | 10.885 m | <u>26.800.000</u> | | <u>17.956.000</u> |

Tabella 10 – Calcolo ESAL da 120 kN di progetto per gli svincoli

Per quanto concerne l'asse autostradale, si è definito un raggruppamento delle tratte elementari a seconda del numero di *ESAL* di progetto:

- da Cermentate a Barlassina;
- da Barlassina a Macherio;
- da Macherio all'interconnessione con la Tangenziale Est (fine tratta C dell'Autostrada).

L'ultima tratta dell'asse autostradale risulta essere la più caricata; pertanto, il corrispettivo valore di ESAL da 120 kN (39.530.000) è il parametro di riferimento per il dimensionamento e la verifica della pavimentazione autostradale.

Invece, gli svincoli, in accordo con i calcoli di cui sopra, presentano valori di *ESAL* da 120 kN tra loro confrontabili, eccezion fatta per lo svincolo di Desio. Di conseguenza, al fine di evitare un sovradimensionamento del pacchetto da Progetto Esecutivo per gli svincoli, si è preferito distinguere lo svincolo di Desio da tutti i rimanenti. Il numero di ESAL di progetto per la verifica dei relativi pacchetti proposti è:

- 24.187.000 per lo svincolo di Desio;
- 17.956.000 per tutti gli altri svincoli in progetto.

3.1.4. Confronto tra ESAL da Progetto Definitivo ed ESAL da Progetto Esecutivo

Il dato di traffico impiegato per la verifica delle pavimentazioni del Progetto Definitivo è unico sia per l'asse autostradale sia per gli svincoli. Nella relazione di calcolo delle pavimentazioni, allegata al PD, non sono esplicitati tutti i calcoli che hanno portato alla definizione del traffico di progetto, pari a 17.700.000 *ESAL* da 120 kN.

Nel Progetto Esecutivo, invece, a partire dai dati presenti nello studio di traffico del PD, si è determinato un traffico di progetto per ciascuna tratta elementare dell'Autostrada e per tutti gli svincoli di progetto. Inoltre, come dimostrato dai dati di cui sopra, nessuna tratta e/o svincolo sarà progettato con un traffico, espresso in termini di *ESAL* da 120 kN, inferiore a quanto dichiarato nel Progetto Definitivo.

3.2. PORTANZA DEL TERRENO DI SOTTOFONDO

La portanza del terreno di sottofondo è uno dei dati di partenza per il dimensionamento delle pavimentazioni stradali. Infatti, fino ad una profondità di circa 1,50 m dal piano di posa della pavimentazione, il terreno partecipa alla ripartizione dei carichi da traffico. Per considerare tale

contribuito nel progetto di una sovrastruttura stradale, è necessario determinare il valore del Modulo Resiliente M_r del sottofondo. Questo valore, da formule presenti in letteratura, è pari a circa 2 volte il modulo di deformazione M_d , determinabile in sito tramite prove di carico su piastra.

Nel Progetto Definitivo, il modulo resiliente del sottofondo è stato fissato pari a 100 MPa (per le tratte con scarse caratteristiche meccaniche è prevista una bonifica mediante stabilizzazione in sito a cemento per uno spessore pari a 30 cm). Nel Progetto Esecutivo, invece, viste le differenti tipologie di materiale presenti lungo l'asse autostradale, sono stati determinati due differenti valori di tale parametro, distinguendo così le tratte tra:

- tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza;
- tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza.

Per quanto riguarda le prime, il modulo resiliente del sottofondo assunto nel Progetto Esecutivo è pari a 100 MPa; per le seconde tratte, invece, tale valore, a favore di sicurezza, viene ridotto a 40 MPa in modo da considerare le scarse caratteristiche del terreno presente in sito.

Per quanto riguarda, invece, gli svincoli del Progetto Esecutivo, è stata sviluppata la medesima suddivisione dell'asse autostradale. In particolare, il solo svincolo denominato "*Interconnessione Ex S.S. 35*", come mostrato nella Tabella 11, ricade in un tratto con portanza scarsa. Per tale ragione, sarà previsto un intervento di stabilizzazione a cemento del terreno di sottofondo, presente in sito, per uno spessore di 30 cm. Tale lavorazione non è, invece, prevista per gli altri tre svincoli in progetto sulla tratta B2: le caratteristiche di portanza del terreno di sottofondo, secondo le analisi geotecniche condotte, sono risultate buone.

Le analisi geotecniche condotte lungo l'intero sviluppo dell'asse autostradale (tratta B2) hanno permesso di determinare un coefficiente, $E_{op,f.d.}$, rappresentante la portanza del sottofondo, il quale valore varia a seconda della tipologia di materiale presente in sito. Il modulo di deformazione M_d , ottenibile da prove di carico su piastra condotte in sito, è pari a $1,2 \div 1,3$ volte $E_{op,f.d.}$. Pertanto, sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi geotecniche è possibile distinguere le tratte in trincea con buone caratteristiche di portanza da quelle con scarse caratteristiche.

| PROGRESSIVA ASSE EST - AUTOSTRADA TRATTA B2 | | PORTANZA DEL TERRENO DI SOTTOFONDO | | | |
|--|----------|------------------------------------|----------|----------|------------|
| Da | A | $E_{op,f.d.}$ [MPa] | Md [MPa] | Mr [MPa] | Portanza |
| 0+000.00 | 0+500.00 | 30 | 37,50 | 75,00 | Scarsa |
| 0+500.00 | 0+725.00 | 35 | 43,75 | 87,50 | Scarsa |
| 0+725.00 | 1+000.00 | 40 | 50,00 | 100,00 | Buona |
| 1+000.00 | 1+200.00 | 10 | 12,50 | 25,00 | Scarsa (*) |
| 1+200.00 | 1+525.00 | 50 | 62,50 | 125,00 | Buona |
| 1+525.00 | 1+625.00 | 80 | 100,00 | 200,00 | Buona |
| 1+625.00 | 2+150.00 | 80 | 100,00 | 200,00 | Buona |
| 2+150.00 | 2+375.00 | 50 | 62,50 | 125,00 | Buona |
| 2+375.00 | 2+650.00 | 50 | 62,50 | 125,00 | Buona |
| 2+650.00 | 3+060.00 | 60 | 75,00 | 150,00 | Buona |
| 3+060.00 | 3+197.00 | 70 | 87,50 | 175,00 | Buona |
| 3+197.00 | 3+350.00 | 40 | 50,00 | 100,00 | Buona |
| 3+350.00 | 3+550.00 | 50 | 62,50 | 125,00 | Buona |
| 3+550.00 | 4+150.00 | 60 | 75,00 | 150,00 | Buona |
| 4+150.00 | 4+475.00 | Rilevato | | | |
| 4+475.00 | 4+825.00 | Rilevato | | | |
| 4+825.00 | 4+975.00 | Rilevato | | | |
| 4+975.00 | 5+200.00 | Rilevato | | | |
| 5+200.00 | 5+475.00 | Rilevato | | | |
| 5+475.00 | 5+800.00 | Rilevato | | | |
| 5+800.00 | 6+125.00 | 60 | 75,00 | 150,00 | Buona |
| 6+125.00 | 6+525.00 | 60 | 75,00 | 150,00 | Buona |
| 6+525.00 | 7+138.00 | 60 | 75,00 | 150,00 | Buona |
| 7+138.00 | 7+713.00 | Rilevato | | | |
| 7+713.00 | 8+155.58 | Rilevato | | | |
| 8+155.58 | 8+228.64 | Rilevato | | | |
| 8+228.64 | 8+538.64 | Rilevato | | | |
| 8+538.64 | 8+688.64 | Rilevato | | | |
| 8+688.64 | 8+936.64 | Rilevato | | | |
| 8+936.64 | 9+638.64 | 60 | 75,00 | 150,00 | Buona |

Tabella 11 – Portanza del sottofondo autostradale tratta B2 da risultati analisi geotecniche

Come mostrato in Tabella 11, gran parte del terreno lungo la tratta B2 presenta buone caratteristiche di portanza ($Mr \geq 100$ MPa), ad eccezione delle tratte da Pk 0+000.00 a Pk 0+500.00 e da Pk 0+500.00 a Pk 0+725.00. In quest'ultime due tratte, come mostrato in Figura 6, si prevede, pertanto, di realizzare una fondazione stabilizzata in sito a cemento di spessore pari a 30 cm (lo spessore è, invece, 20 cm per le tratte con buone caratteristiche di portanza).

Per la sola tratta da Pk 1+000.00 a Pk 1+200.00, poiché il modulo resiliente Mr ottenuto risulta inferiore a 40 MPa (dato di progetto per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza), si provvederà a bonificare il terreno di sottofondo e a realizzare il pacchetto di pavimentazione previsto in Progetto Esecutivo per le tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza. L'intervento di bonifica prevederà l'asportazione del terreno presente attualmente in sito, la sostituzione con materiale idoneo e la conseguente stabilizzazione in sito a cemento. La Figura 19 riporta la pavimentazione da realizzare sull'asse autostradale della tratta B2 da Pk 1+000.00 a Pk 1+200.00. Lo scopo di tale bonifica è il raggiungimento di un modulo resiliente Mr del sottofondo pari a 100 MPa (come per le tratte con buona portanza). Pertanto, nel prosieguo della relazione, per il dimensionamento e la verifica di tale particolare pavimentazione, essa è assimilata a quella autostradale per le tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza in quanto le due soluzioni progettuali presentano lo stesso modulo resiliente del sottofondo e la medesima stratigrafia degli strati legati a bitume ed a cemento.

Trincee con pessime caratteristiche di portanza (da pk 1+000 a pk 1+200 m)

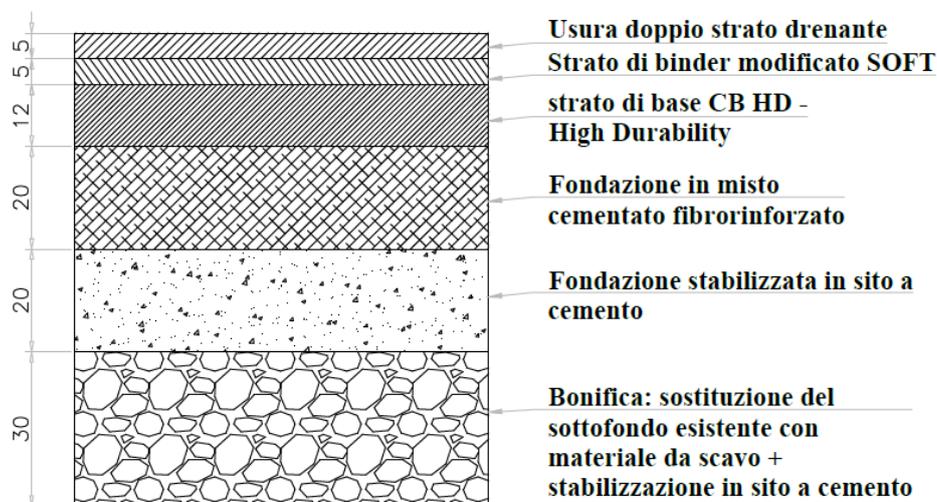


Figura 19 -Pavimentazione asse autostradale tratta B2 per il solo tratto da Pk 1+000.00 a Pk 1+200.00

Durante la realizzazione dell'infrastruttura di progetto, al fine di verificare la validità delle ipotesi adottate per il dimensionamento delle pavimentazioni stradali, sarà necessario eseguire delle campagne di prove di carico su piastra per determinare l'effettivo modulo resiliente, come previsto da Capitolato.

3.3. CONDIZIONI CLIMATICHE

Al fine di caratterizzare propriamente il comportamento fisico-meccanico delle miscele in conglomerato bituminoso è opportuno considerare le temperature in cui esse si troveranno nelle condizioni di esercizio. Il bitume, infatti, è un materiale il cui comportamento è fortemente influenzato dalla temperatura e, oltre ad incidere sulle rigidità e sullo stato tenso-deformativo complessivo, condiziona anche i meccanismi di degrado strutturale e le leggi a rottura dei materiali. Pertanto, considerare la variazione della temperatura di esercizio è imprescindibile per il corretto dimensionamento della sovrastruttura.

A tal fine si sono considerate le temperature medie mensili dell'aria desunte dall'archivio di dati climatici del sito *climate-data.org* per il comune di Meda, come mostrato nella figura seguente.

| | January | February | March | April | May | June | July | August | September | October | November | December |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Avg. Temperature °C (°F) | 2.2 °C (35.9) °F | 3.5 °C (38.3) °F | 7.9 °C (46.2) °F | 12 °C (53.6) °F | 16.3 °C (61.4) °F | 20.8 °C (69.5) °F | 22.9 °C (73.2) °F | 22.3 °C (72.1) °F | 17.8 °C (64.1) °F | 13.1 °C (55.6) °F | 7.7 °C (45.8) °F | 3 °C (37.3) °F |
| Min. Temperature °C (°F) | -1.4 °C (29.5) °F | -0.8 °C (30.5) °F | 2.5 °C (36.6) °F | 6.6 °C (43.9) °F | 10.9 °C (51.6) °F | 15.3 °C (59.6) °F | 17.6 °C (63.7) °F | 17.5 °C (63.5) °F | 13.6 °C (56.5) °F | 9.6 °C (49.3) °F | 4.5 °C (40.1) °F | -0.4 °C (31.2) °F |
| Max. Temperature °C (°F) | 6.7 °C (44.1) °F | 8.3 °C (46.9) °F | 12.8 °C (55.1) °F | 16.5 °C (61.7) °F | 20.8 °C (69.4) °F | 25.4 °C (77.8) °F | 27.5 °C (81.5) °F | 26.6 °C (79.9) °F | 21.9 °C (71.4) °F | 16.7 °C (62.1) °F | 11.3 °C (52.3) °F | 7.3 °C (45.1) °F |
| Precipitation / Rainfall mm (in) | 65 (2) | 67 (2) | 83 (3) | 129 (5) | 142 (5) | 148 (5) | 120 (4) | 141 (5) | 151 (5) | 160 (6) | 167 (6) | 77 (3) |
| Humidity(%) | 76% | 72% | 68% | 68% | 68% | 65% | 62% | 67% | 71% | 78% | 80% | 78% |
| Rainy days (d) | 5 | 6 | 7 | 10 | 11 | 10 | 10 | 10 | 8 | 9 | 8 | 6 |
| avg. Sun hours (hours) | 5.9 | 6.4 | 7.6 | 8.7 | 10.5 | 11.8 | 11.9 | 10.5 | 8.5 | 5.7 | 5.2 | 5.5 |

Data: 1991 - 2021 Min. Temperature °C (°F), Max. Temperature °C (°F), Precipitation / Rainfall mm (in), Humidity, Rainy days. Data: 1999 - 2019: avg. Sun hours

Figura 20 – Temperature medie mensili dell'aria per il comune di Meda

Partendo dai dati di temperatura, i mesi dell'anno caratterizzati da temperature paragonabili sono stati raggruppati nelle quattro stagioni, come indicato qui di seguito:

- **Inverno:** gennaio, febbraio e dicembre
- **Primavera:** marzo, aprile e maggio
- **Estate:** giugno, luglio e agosto
- **Autunno:** settembre, ottobre e novembre.

Per ciascuna stagione si è definita una temperatura dell'aria pari alla media delle temperature dell'aria dei mesi inclusi nella stagione considerata. Nella tabella seguente si riportano le temperature così ottenute

| | Inverno | | | Primavera | | | Estate | | | Autunno | | |
|---------------------------------|------------|-----|-----|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|-----|
| [°C] | Dic | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Sett | Ott | Nov |
| T. aria medie mensili | 3,0 | 2,2 | 3,5 | 7,9 | 12,0 | 16,3 | 20,8 | 22,9 | 22,3 | 17,8 | 13,1 | 7,7 |
| T. aria medie stagionali | 2,9 | | | 12,0 | | | 22,0 | | | 12,8 | | |

Tabella 12 – Temperature medie stagionali dell'aria per il comune di Meda

Nota la temperatura dell'aria è possibile determinare la temperatura della pavimentazione in conglomerato bituminoso al variare della profondità mediante la formula di A. Marchionna:

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

Equazione 6

Dove:

$T(z)$: temperatura della pavimentazione in conglomerato bituminoso al variare della profondità z ;

T_a : temperatura media dell'aria.

Considerando dapprima il pacchetto di pavimentazione previsto da PD, si riporta qui di seguito la tabella con i valori di temperatura della pavimentazione al variare della profondità.

| | Tz Temperatura pavimentazione a varie profondità (pacchetto da PD) [°C] | | | | |
|--------------------|--|--------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| | z [cm] | Tz- inverno | Tz - Primavera | Tz- Estate | Tz-Autunno |
| superficie | 0 | 5,42 | 17,90 | 31,43 | 18,99 |
| metà usura | 2,5 | 5,49 | 17,86 | 31,26 | 18,94 |
| tra usura e binder | 5 | 5,56 | 17,82 | 31,10 | 18,88 |
| metà binder | 8,5 | 5,66 | 17,75 | 30,86 | 18,81 |
| tra binder e base | 12 | 5,76 | 17,69 | 30,63 | 18,74 |
| metà base | 21,5 | 6,03 | 17,53 | 29,99 | 18,53 |
| sotto alla base | 31 | 6,30 | 17,36 | 29,35 | 18,33 |

Tabella 13 – Temperatura pavimentazione a varie profondità – Pacchetto da PD

I valori di temperatura sono stati determinati, per ciascuno strato, come media dei valori di temperatura ottenuti in corrispondenza dell'interfaccia superiore, inferiore e in mezzera dello strato stesso. Nella tabella seguente sono riportati i valori di temperatura di progetto di ciascuno strato per il pacchetto di pavimentazione previsto da PD:

| | <i>Temperatura di progetto dello strato (pacchetto da PD)</i> | | | |
|------------------|---|-----------------------|-------------------|-------------------|
| | <i>Tz- inverno</i> | <i>Tz - Primavera</i> | <i>Tz- Estate</i> | <i>Tz-Autunno</i> |
| Usura drenante | 5,49 | 17,86 | 31,26 | 18,94 |
| Binder ordinario | 5,66 | 17,75 | 30,86 | 18,81 |
| Base Alto Modulo | 6,03 | 17,53 | 29,99 | 18,53 |

Tabella 14 – Temperatura di progetto – Pacchetto da PD

Allo stesso modo si riportano i valori di temperatura ottenuti per il pacchetto di pavimentazione previsto da Progetto Esecutivo. Si evidenzia che tali temperature sono state considerate sia per il pacchetto previsto per l'asse principale sia per quello previsto negli svincoli, in quanto si è ritenuta trascurabile la variazione che si avrebbe considerando il differente spessore dello strato di base.

| | <i>Tz Temperatura pavimentazione a varie profondità (pacchetto da PE) [°C]</i> | | | | |
|---------------------------|--|--------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| | <i>z [cm]</i> | <i>Tz- inverno</i> | <i>Tz - Primavera</i> | <i>Tz- Estate</i> | <i>Tz-Autunno</i> |
| <i>superficie</i> | 0 | 5,42 | 17,90 | 31,43 | 18,99 |
| <i>metà usura</i> | 2,5 | 5,49 | 17,86 | 31,26 | 18,94 |
| <i>tra usura e binder</i> | 5 | 5,56 | 17,82 | 31,10 | 18,88 |
| <i>metà binder</i> | 7,5 | 5,64 | 17,76 | 30,90 | 18,82 |
| <i>tra binder e base</i> | 10 | 5,73 | 17,71 | 30,69 | 18,76 |
| <i>metà base</i> | 16 | 5,90 | 17,61 | 30,29 | 18,63 |
| <i>sotto alla base</i> | 22 | 6,07 | 17,50 | 29,89 | 18,50 |

Tabella 15 – Temperatura pavimentazione a varie profondità – Pacchetto da PE

| | <i>Temperatura di progetto dello strato (pacchetto da PE)</i> | | | |
|------------------------------|---|-----------------------|-------------------|-------------------|
| | <i>Tz- inverno</i> | <i>Tz - Primavera</i> | <i>Tz- Estate</i> | <i>Tz-Autunno</i> |
| Usura doppio strato drenante | 5,49 | 17,86 | 31,26 | 18,94 |
| Binder modificato SOFT | 5,64 | 17,76 | 30,90 | 18,82 |
| Base CB HD – High Durability | 5,90 | 17,61 | 30,29 | 18,63 |

Tabella 16 – Temperatura di progetto – Pacchetto da PE

3.4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

Nel presente paragrafo sono illustrate tutte le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali impiegati nelle pavimentazioni di progetto. Questi dati, insieme alla portanza del sottofondo e al traffico di progetto, sono necessari per la verifica delle sovrastrutture stradali.

In particolare, per lo strato di fondazione in misto granulare stabilizzato granulometricamente si definisce, per tutte e quattro le stagioni considerate, un unico valore di modulo resiliente Mr; allo stesso modo per il misto cementato fibrinforzato e per la stabilizzazione in sito legata a cemento, si definisce un modulo elastico comune a tutte le stagioni analizzate. Per gli strati in conglomerato bituminoso, invece, data la presenza del bitume che è, per sua natura, un materiale termosensibile, le caratteristiche fisico-meccaniche sono suscettibili alle variazioni di temperatura. Pertanto, è preferibile definire differenti caratteristiche per ciascuna stagione considerata. All'interno della presente relazione tecnica delle pavimentazioni, questa differenziazione stagionale è valutata tramite la stima di diversi moduli di rigidezza alle diverse condizioni climatiche. Le curve riportate di

seguito presentano l'andamento del modulo di rigidezza al variare della temperatura all'interno di ciascuno strato in conglomerato bituminoso. Ai fini del calcolo e della verifica delle pavimentazioni, per ciascuno strato è anche necessario definire un altro parametro: il coefficiente di Poisson; esso descrive la contrazione o l'espansione di un materiale in direzione perpendicolare alla sollecitazione applicata.

3.4.1. Materiali impiegati nella pavimentazione da Progetto Definitivo

Le caratteristiche fisico meccaniche dei materiali impiegati nella pavimentazione dell'asse autostradale e degli svincoli da Progetto Definitivo sono desunte dalla relazione tecnica delle pavimentazioni allegata al PD. La tabella seguente riporta quanto affermato.

| Strato | Modulo adottato per il calcolo [MPa] | Coefficiente di Poisson [-] |
|--|--------------------------------------|-----------------------------|
| Usura drenante | 4.600 (Modulo di rigidezza) | 0,35 |
| Binder ordinario | 4.600 (Modulo di rigidezza) | 0,35 |
| Base Alto Modulo | 10.000 (Modulo di rigidezza) | 0,35 |
| Misto cementato | 1.200 (Modulo elastico) | 0,25 |
| Fondazione in misto granulare stabilizzato | 800 (Modulo resiliente) | 0,40 |

Tabella 17 – Caratteristiche dei materiali secondo Progetto Definitivo

Come anticipato in precedenza, la relazione tecnica delle pavimentazioni allegata al PD non riporta alcuna informazione circa la temperatura a cui sono stati calcolati i moduli di rigidezza adottati per gli strati in conglomerato bituminoso. Pertanto, si è assunto che i valori presenti in Tabella 17 sono ricavati ad una temperatura di 20°C in accordo con APL.

Nella relazione tecnica delle pavimentazioni del Progetto Definitivo, per lo strato d'usura drenante viene indicato un modulo di rigidezza pari a 4.600 MPa. Tuttavia, per strati d'usura drenanti, caratterizzati da un elevato contenuto di vuoti, come dimostrato sia da prove condotte dalla Scrivente sia dagli studi presenti in letteratura tecnica, è ragionevole adottare moduli di rigidezza ben inferiori. Di conseguenza, per lo strato d'usura drenante previsto in Progetto Definitivo si è adottato un modulo di rigidezza a 20°C pari a 1.700 MPa.

Inoltre, per determinare l'andamento del modulo di rigidezza di ciascuno strato alle diverse temperature, sono stati definiti i valori di tale parametro a 5°C ed a 40°C. Questi sono stati ricavati da un ampio campione di prove raccolto nel corso degli incarichi di Direzione Lavori portati a termine dalla Scrivente e sono confermati da dati di letteratura. La Tabella 18 presenta i moduli di rigidezza alle tre diverse temperature per ciascuno strato in conglomerato bituminoso. Si noti che i valori a 20°C per binder e base coincidono con quanto dichiarato nel Progetto Definitivo.

| Strato | Modulo di rigidezza alle diverse temperature [MPa] | | |
|------------------|--|--------|-------|
| | 5°C | 20°C | 40°C |
| Usura drenante | 6.000 | 1.700 | 350 |
| Binder ordinario | 10.000 | 4.600 | 1.200 |
| Base Alto Modulo | 19.000 | 10.000 | 2.200 |

Tabella 18 – Modulo di rigidezza degli strati in CB alle diverse temperature

Interpolando i moduli di rigidezza sopracitati, è possibile determinare l'andamento di tale parametro al variare della temperatura. La Figura 21 presenta le curve ottenute che meglio approssimano i dati presenti in Tabella 18 e le relative equazioni.

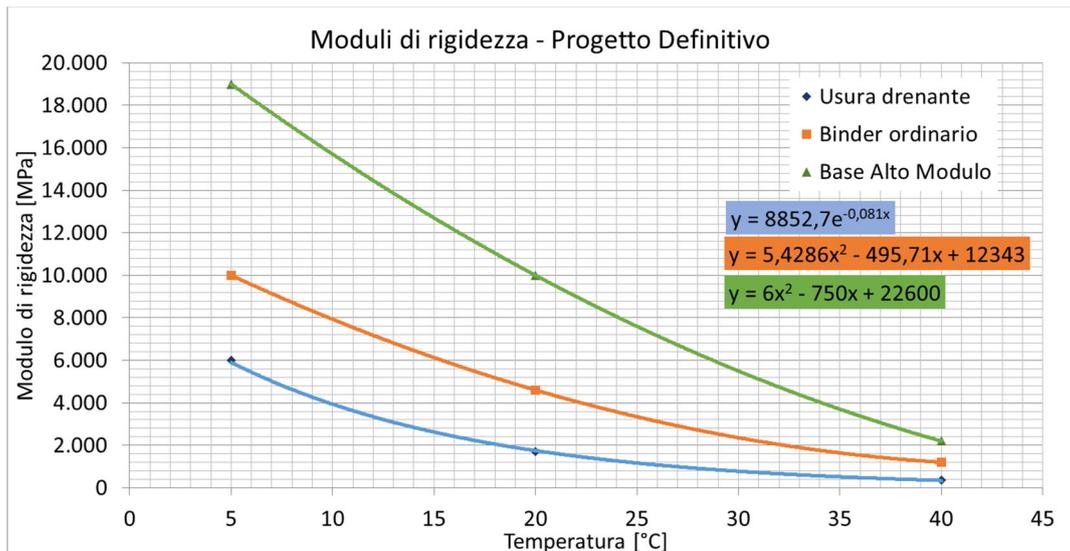


Figura 21 – Andamento dei moduli di rigidezza degli strati in CB - Progetto Definitivo

Sulla base delle temperature medie di ciascuno strato, calcolate nelle quattro stagioni, è possibile determinare i moduli di rigidezza per il dimensionamento e la verifica della pavimentazione da Progetto Definitivo:

| Moduli di rigidezza pacchetto Progetto Definitivo | | | | |
|---|-------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| Strato | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno |
| Usura drenante | 5.676 | 2.084 | 704 | 1.909 |
| Binder ordinario | 9.712 | 5.253 | 2.215 | 4.939 |
| Base Alto Modulo | 18.296 | 11.297 | 5.504 | 10.761 |

Tabella 19 – Moduli di rigidezza degli strati in CB per il Progetto Definitivo

Nei capitoli seguenti, i moduli di rigidezza, presentati nella Tabella 19, saranno impiegati per il calcolo delle pavimentazioni dell’asse autostradale e degli svincoli da PD. Per quanto riguarda, invece, il coefficiente di Poisson, i valori adottati sono i medesimi di quanto definito nella relazione tecnica delle pavimentazioni del PD (0,35 per tutti e tre gli strati in conglomerato bituminoso).

Nel Progetto Definitivo, la pavimentazione dell’asse autostradale e degli svincoli, al di sotto degli strati in conglomerato bituminoso, prevede uno strato in misto cementato, caratterizzato da un modulo elastico pari a 1.200 MPa e da un coefficiente di Poisson di 0,25. I medesimi valori saranno adottati per i successivi calcoli.

Inoltre, nel PD è prevista una fondazione in misto granulare stabilizzato granulometricamente. Questo strato, sottostante al misto cementato, è caratterizzato da un modulo resiliente, pari a 800 MPa, e da un coefficiente di Poisson, pari a 0,40, secondo quanto dichiarato nella relazione del PD. Poiché si tratta di un materiale non legato (la cui resistenza a taglio è affidata all’attrito tra i singoli aggregati), è preferibile correlare il valore del modulo resiliente dello strato allo spessore dello stesso ed al modulo resiliente del sottofondo. Per tale scopo, le caratteristiche meccaniche della fondazione in misto granulare sono state stimate tramite la formulazione proposta da Ferrari – Giannini:

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

Equazione 7

dove:

- E_2 è il modulo del misto granulare;
- h è lo spessore dello strato in misto granulare, espresso in mm (250 mm);
- E_1 è il modulo del sottofondo (100 MPa).

Applicando l'Equazione 7, il modulo resiliente della fondazione in misto granulare è risultato pari a 248 MPa. I successivi calcoli della pavimentazione saranno condotti con quanto appena ricavato (248 MPa).

La Tabella 20 riporta le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati nella verifica della pavimentazione dell'asse autostradale e degli svincoli prevista da Progetto Definitivo.

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali da Progetto Definitivo | | | | |
|-------------------------------|---|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Usura drenante | 5.676 | 2.084 | 704 | 1.909 | 0,35 |
| Binder ordinario | 9.712 | 5.253 | 2.215 | 4.939 | 0,35 |
| Base Alto Modulo | 18.296 | 11.297 | 5.504 | 10.761 | 0,35 |
| Misto cementato | 1.200 | | | | 0,25 |
| Fondazione in misto granulare | 248 | | | | 0,40 |
| Sottofondo | 100 | | | | 0,40 |

Tabella 20 – Caratteristiche meccaniche dei materiali da Progetto Definitivo

3.4.2. Materiali impiegati nella pavimentazione da Progetto Esecutivo

Analogamente a quanto illustrato per il Progetto Definitivo, nel presente paragrafo saranno definite le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati nelle pavimentazioni dell'asse autostradale e degli svincoli per il Progetto Esecutivo.

Come anticipato al Capitolo 2, la pavimentazione di progetto per l'asse autostradale comprende:

- strato di usura in doppio strato drenante;
- strato di binder modificato SOFT;
- strato di base in CB HD – High Durability;
- strato di misto cementato fibrorinforzato;
- stabilizzazione in sito legata a cemento.

Gli svincoli presentano la medesima successione di strati dell'asse autostradale, ad eccezione dello strato di usura e della stabilizzazione in sito a cemento, la quale è assente sulle rampe. Sugli svincoli è previsto in progetto uno strato superficiale tipo Splitt Mastix Asphalt – SMA. Questo, a parità di condizioni di esercizio, determina un incremento della sicurezza in tutte le condizioni meteorologiche a cui è soggetta la superficie viabile, in virtù dell'aumento di rugosità superficiale e di aderenza tra pneumatici dei veicoli e superficie stradale. Per queste ragioni, si è deciso di adottare tale strato su tutte le rampe degli svincoli in progetto.

Per determinare l'andamento del modulo di rigidezza di ciascuno strato in conglomerato bituminoso alle diverse temperature, si sono determinati i valori di tale parametro a 5°C, 20°C e 40°C. Questi derivano da un ampio campione di prove raccolto nel corso degli incarichi di Direzione Lavori portati a termine dalla Scrivente. Ai fini del dimensionamento strutturale, a favore di sicurezza, si considera che l'usura in doppio strato drenante abbia le stesse caratteristiche meccaniche dello strato di usura drenante previsto da PD. La Tabella 21 presenta i moduli di rigidezza alle tre diverse temperature per ciascuno strato in conglomerato bituminoso adottato per l'asse autostradale. Si noti che i valori dello strato di usura coincidono con quanto illustrato nella Tabella 18.

| Strato | Modulo di rigidezza alle diverse temperature [MPa] - asse autostradale | | |
|------------------------------|--|--------|-------|
| | 5°C | 20°C | 40°C |
| Usura doppio strato drenante | 6.000 | 1.700 | 350 |
| Binder modificato SOFT | 16.000 | 7.500 | 2.000 |
| Base CB HD – High Durability | 22.000 | 11.500 | 2.500 |

Tabella 21 – Modulo di rigidezza degli strati in CB alle diverse temperature per asse autostradale

Interpolando i moduli di rigidezza sopracitati, è possibile determinare l'andamento di tale parametro al variare della temperatura. La Figura 22 presenta le curve ottenute che meglio approssimano i dati presenti in Tabella 21 e le relative equazioni.

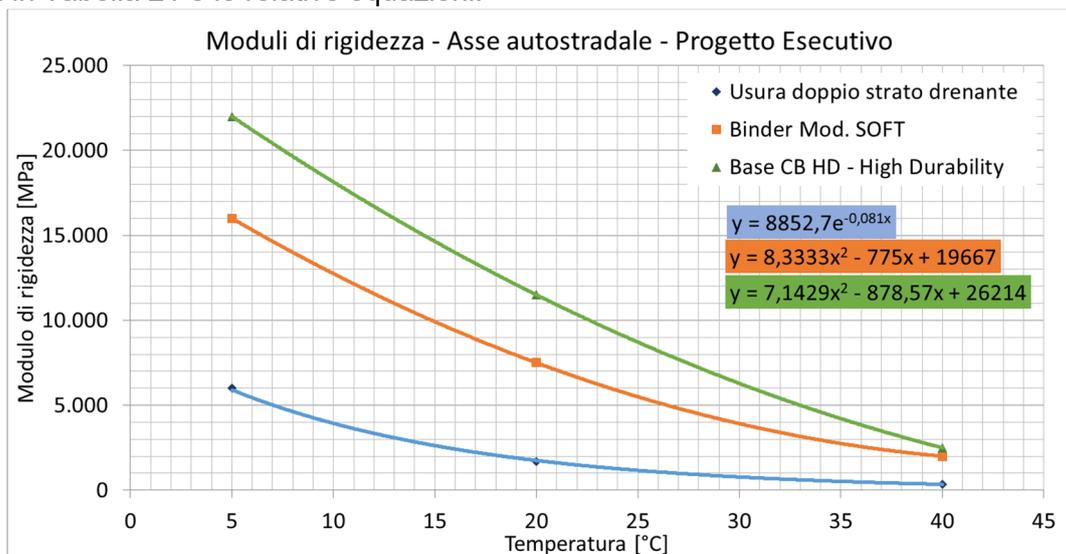


Figura 22 – Andamento dei moduli di rigidezza degli strati in CB per l'asse autostradale – Progetto Esecutivo

Sulla base delle temperature medie di ciascuno strato, calcolate nelle quattro stagioni, è possibile determinare i moduli di rigidezza per il dimensionamento della pavimentazione dell'asse autostradale da Progetto Esecutivo:

| Moduli di rigidezza pacchetto asse autostradale - Progetto Esecutivo | | | | |
|---|-------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| Strato | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno |
| Usura doppio strato drenante | 5.676 | 2.084 | 704 | 1.909 |
| Binder modificato SOFT | 15.558 | 8.530 | 3.678 | 8.033 |
| Base CB HD – High Durability | 21.278 | 12.959 | 6.155 | 12.326 |

Tabella 22 – Moduli di rigidezza degli strati in CB per asse autostradale – Progetto Esecutivo

Quanto presentato fin ora vale per l'asse autostradale in progetto. Per quanto riguarda gli svincoli, si è adottato il medesimo approccio dell'asse autostradale, cambiando però la tipologia di strato d'usura. Infatti, sulle rampe si prevede di impiegare uno strato d'usura tipo SMA per le ragioni di cui sopra.

La Tabella 23 illustra i moduli di rigidezza alle tre temperature per gli strati in conglomerato bituminoso adottati negli svincoli. Si noti che i valori del binder e della base coincidono con quanto illustrato nella Tabella 21.

| Strato | Modulo di rigidezza alle diverse temperature [MPa] – svincoli | | |
|------------------------------|--|--------|-------|
| | 5°C | 20°C | 40°C |
| Usura SMA | 16.000 | 6.900 | 1.400 |
| Binder modificato SOFT | 16.000 | 7.500 | 2.000 |
| Base CB HD – High Durability | 22.000 | 11.500 | 2.500 |

Tabella 23 – Modulo di rigidezza degli strati in CB alle diverse temperature per svincoli

La Figura 23 presenta le curve ottenute dall'interpolazione dei moduli di rigidezza sopracitati e le relative equazioni.

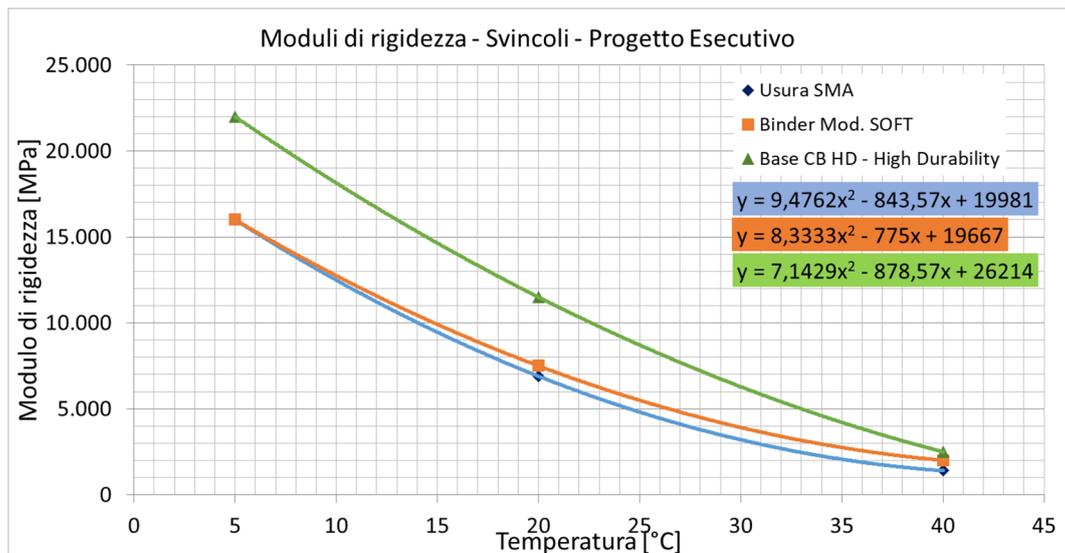


Figura 23 – Andamento dei moduli di rigidezza degli strati in CB per gli svincoli – Progetto Esecutivo

I moduli di rigidezza adottati per il dimensionamento delle pavimentazioni degli svincoli da Progetto Esecutivo sono i seguenti:

| Moduli di rigidezza pacchetto svincoli - Progetto Esecutivo | | | | |
|--|-------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| Strato | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno |
| Usura SMA | 15.637 | 7.938 | 2.870 | 7.404 |
| Binder modificato SOFT | 15.558 | 8.530 | 3.678 | 8.033 |
| Base CB HD – High Durability | 21.278 | 12.959 | 6.155 | 12.326 |

Tabella 24 – Moduli di rigidezza degli strati in CB per svincoli – Progetto Esecutivo

Il coefficiente di Poisson impiegato per ciascuno strato in conglomerato bituminoso è pari a:

- 0,35 per l'usura in doppio strato drenante, usura tipo SMA e per il binder modificato SOFT;
- 0,30 per lo stato di base CB HD.

Al di sotto degli strati in conglomerato bituminoso, nel Progetto Esecutivo è previsto uno strato di misto cementato fibrorinforzato, caratterizzato da un modulo elastico, costante in tutte le stagioni, pari a 1.700 MPa e da un coefficiente di Poisson pari a 0,20. Tali caratteristiche meccaniche saranno impiegate per i successivi calcoli sia dell'asse autostradale sia degli svincoli di progetto.

In sostituzione della fondazione in misto granulare definita da PD, nel Progetto Esecutivo si prevede la stabilizzazione del terreno presente in sito a cemento. Questo strato è presente soltanto lungo

l'asse autostradale, non negli svincoli. Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, data la variabilità del terreno presente in sito, si è preferito definire due differenti moduli elastici:

- 1.600 MPa per le tratte in rilevato, in galleria artificiale e in trincea con buone caratteristiche di portanza;
- 1.200 MPa per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza.

Il coefficiente di Poisson, invece, rimane costante qualsiasi tratta si consideri (0,25).

Per completezza di trattazione, si riportano in Tabella 25 le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati per la pavimentazione dell'asse autostradale da Progetto Esecutivo; in Tabella 26, invece, sono riassunti i parametri di progetto per gli svincoli.

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali per asse autostradale – Progetto Esecutivo | | | | |
|-----------------------------------|--|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Usura doppio strato drenante | 5.676 | 2.084 | 704 | 1.909 | 0,35 |
| Binder modificato SOFT | 15.558 | 8.530 | 3.678 | 8.033 | 0,35 |
| Base CB HD – High Durability | 21.278 | 12.959 | 6.155 | 12.326 | 0,30 |
| Misto cementato fibrorinforzato | 1.700 | | | | 0,20 |
| Stabilizzazione in sito a cemento | 1.200 – 1.600 | | | | 0,25 |
| Sottofondo | 40 - 100 | | | | 0,40 |

Tabella 25 – Caratteristiche meccaniche dei materiali per l'asse autostradale – Progetto Esecutivo

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali per svincoli – Progetto Esecutivo | | | | |
|---------------------------------|---|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Usura SMA | 15.637 | 7.938 | 2.870 | 7.404 | 0,35 |
| Binder modificato SOFT | 15.558 | 8.530 | 3.678 | 8.033 | 0,35 |
| Base CB HD – High Durability | 21.278 | 12.959 | 6.155 | 12.326 | 0,30 |
| Misto cementato fibrorinforzato | 1.700 | | | | 0,20 |
| Sottofondo | 100 | | | | 0,40 |

Tabella 26 – Caratteristiche meccaniche dei materiali per gli svincoli – Progetto Esecutivo

4. METODOLOGIA DI CALCOLO

Nel presente Capitolo si illustrano sia il modello di calcolo sia il criterio adottato per il dimensionamento e la verifica delle pavimentazioni in progetto.

4.1. MODELLO DI CALCOLO

La metodologia di analisi prevede la determinazione dello stato tensionale e deformativo della pavimentazione stradale mediante l'impiego di un software di analisi per multistrato elastico. Il software utilizzato per la verifica è BISAR.

Oltre alle caratteristiche meccaniche ed agli spessori dei singoli strati, i dati di input necessari per il calcolo della risposta tenso-deformativa della pavimentazione sono:

- carico applicato;
- adesione tra gli strati.

Per quanto concerne il carico, si è considerato l'asse standard da 120 kN, caratterizzato da ruote gemellate con interasse pari a 35 cm. La configurazione geometrica utilizzata prevede un'impronta circolare di raggio 11 cm a cui corrisponde una pressione di gonfiaggio di 750 kPa.

All'interfaccia tra gli strati della pavimentazione, a differenza del PD che considerava adesione completa tra tutti gli strati, si è definita una differente condizione di adesione, maggiormente realistica. Questa condizione è esprimibile tramite il parametro di adesione α , compreso tra 0 (perfetta adesione) e 1 (adesione nulla). La seguente tabella presenta il valore assunto per ciascuna interfaccia.

| Interfaccia strato-strato | Parametro di adesione α [-] |
|---|------------------------------------|
| CB – CB | 0,10 |
| CB – Misto Cementato | 0,25 |
| Misto cementato – Stabilizzazione in sito a cemento | 0,45 |
| Stabilizzazione in sito a cemento – Sottofondo | 0,80 |
| Misto cementato – Misto granulare | 0,90 |
| Misto granulare – Sottofondo | 0,99 |

Tabella 27 – Parametri di adesione α per l'interfaccia tra strati

Sulla base dei dati di progetto, tramite il software BISAR si determinano le massime deformazioni e le sollecitazioni agenti alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso per ciascuna stagione considerata, valutate al di sotto della singola ruota e nella mezzeria dell'interasse tra le ruote gemellate, come mostrato nella figura seguente.

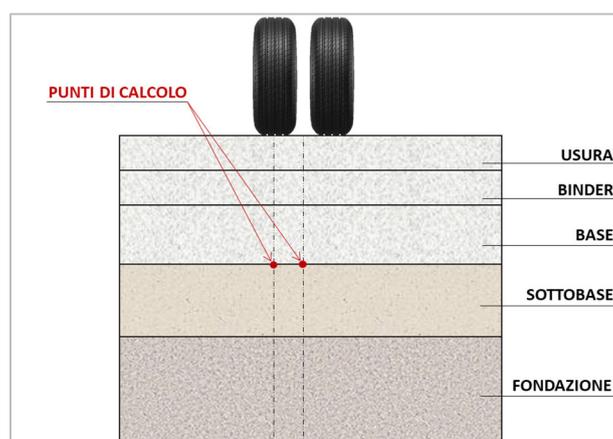


Figura 24: Punti di calcolo per la verifica a fatica degli strati in conglomerato bituminoso

Queste grandezze permettono di stimare, tramite la legge di fatica presentata nel Paragrafo 4.2, il numero di passaggi dell'asse standard da 120 kN sopportabili dalla pavimentazione in progetto.

4.2. LEGGE DI FATICA

Nel Progetto Definitivo, la legge di fatica impiegata considera soltanto la deformazione nel conglomerato bituminoso. Poiché il fenomeno della fatica è influenzato anche da altri parametri, è preferibile valutare la vita utile tramite una legge che considera anche sforzi e rigidità dei vari strati.

Nel presente Progetto Esecutivo la legge utilizzata per la verifica del fenomeno di fatica è quella di Verstraeten-Marchionna, impiegata anche per la definizione del Catalogo Italiano delle sovrastrutture stradali [CNR]. Questa formulazione non considera soltanto la deformazione di uno strato legato a bitume, ma anche differenti parametri rappresentativi dei materiali adottati (moduli di rigidità, spessore degli strati, percentuali di bitume e di vuoti). La legge di Verstraeten-Marchionna distingue due fasi: l'innescamento e la propagazione delle fessure in superficie. Dunque, il numero complessivo di ripetizioni dello stato tensionale e deformativo prodotto dall'asse standard (ESAL) da 120 kN, nella stagione *j-esima*, che causa un'estensione della superficie fessurata pari a 10% sarà dato da:

$$N_j^{FT} = N_j^I + N_j^{F10}$$

Equazione 8

dove:

- N_j^{FT} è il numero di cicli della sollecitazione, nella *j-esima* condizione climatica, che produce un'area superficiale fessurata pari al 10% rispetto all'area interessata dalle traiettorie degli pneumatici;
- N_j^I è il numero di cicli della sollecitazione, nella *j-esima* condizione climatica, che determina l'innescamento della fessura;
- N_j^{F10} è il numero di cicli della sollecitazione, nella *j-esima* condizione climatica, che determina la propagazione delle fessure in superficie fino ad ottenere un'area fessurata del 10% rispetto all'area interessata dalle traiettorie degli pneumatici.

con:

$$\text{Log} N^I = 6 + 4.7619 * \left[\text{Log} \left(\frac{\Gamma * V_b}{V_b + V_v} \right) - \text{Log} \varepsilon_x \right]$$

Equazione 9

$$N^{F10} = 1.373 * e^{-1.098n} * h^{-0.152+0.476n} * [E_q^{\alpha'} * \sigma^{\beta'} * 10^{\mu'}]$$

Equazione 10

dove:

- ε_x è la deformazione di trazione massima che si verifica alla base degli strati in conglomerato bituminoso;
- V_b è la percentuale di bitume;
- V_v è la percentuale di vuoti;
- Γ è un coefficiente che dipende dal tipo di bitume usato (pari a $1,25 \cdot 10^{-4}$ per i bitumi di più largo impiego in Italia);
- E_q è la media pesata dei moduli di rigidità dei conglomerati bituminosi;
- σ è la tensione di trazione alla base dello strato più profondo in conglomerato bituminoso;
- h è lo spessore complessivo degli strati in conglomerato bituminoso;
- n è un parametro dipendente dalle caratteristiche del conglomerato (tra 4,5 e 5, assunto pari a 4,5);
- $\alpha' = 2.436827 * (n/5)$;
- $\beta' = -3.283538 * (n/5)$;

- $\mu' = -2.241807 \cdot (n/5) + 0.847 \cdot (1 - n/5)$.

Applicando la legge di Verstraeten-Marchionna si determina il numero totale di cicli “ammissibili” della sollecitazione indotta da un asse standard da 120 kN, nella *j*-esima condizione climatica analizzata, che produce un’area superficiale fessurata pari al 10% rispetto all’area interessata dalle traiettorie degli pneumatici.

4.3. CRITERIO DI VERIFICA DELLE PAVIMENTAZIONI

Il criterio di verifica delle pavimentazioni è basato sul controllo del numero di passaggi di assi standard ammissibili – in termini di ESAL da 12t sopportabili nell’arco della vita utile – che dovranno risultare superiori al numero di passaggi previsti come ottenuti nel Paragrafo 3.1.3.2.

Tale verifica è solitamente realizzata mediante il Numero di Miner, indicatore del danno a fine vita utile della pavimentazione, definito come rapporto tra il numero di passaggi previsti e il numero di passaggi sopportabili. Ne consegue che se il numero di Miner è inferiore (o al più uguale) all’unità, la pavimentazione sarà in grado di sopportare un numero di passaggi superiore (o al più uguale) al traffico transitante previsto, risultando verificata. Il danno prodotto dalla ripetizione dei passaggi è inoltre dipendente dal comportamento termosensibile del conglomerato bituminoso. Quest’ultimo, infatti, subisce un diverso degrado strutturale in funzione della temperatura in cui opera, raggiungendo diversi livelli di danno a seconda del periodo climatico considerato. Per valutare l’effetto complessivo prodotto dai vari stati tenso-deformativi generati dai passaggi ripetuti del carico, nella stagione *j*-esima, si utilizza la legge di accumulo del danno a fatica definita come segue:

$$DC = \sum \frac{n_j}{N_j^{FT}}$$

Equazione 11

Dove:

- *DC* è il danno cumulato (anche detto numero di Miner);
- n_j è il numero di passaggi di assi standard previsti nella stagione *j*-esima, ottenuti suddividendo equamente il numero di ESAL di progetto transitante nell’arco della vita utile della pavimentazione (come individuato al Paragrafo 3.1.2) nelle quattro stagioni considerate;
- N_j^{FT} è il numero di cicli della sollecitazione, nella *j*-esima condizione climatica, che produce un’area superficiale fessurata pari al 10% rispetto all’area interessata dalle traiettorie degli pneumatici;

Il numero di Miner così ottenuto fornisce un’indicazione del danno cumulato totale della pavimentazione a fine vita utile (nel PE vita utile di 20 anni – orizzonte 2045). Di conseguenza, nel confronto tra due soluzioni di pavimentazioni, quella con un numero di Miner inferiore risulta avere una maggiore durabilità, in quanto resiste ad un maggior numero di passaggi transitanti. È tuttavia da evidenziare che ridurre al minimo il numero di Miner per massimizzare il numero di passaggi sopportabili dalla pavimentazione non è corretto da un punto di vista progettuale, in quanto si andrebbe a sovradimensionare il pacchetto e, dunque, a utilizzare in maniera ingiustificata materiali e risorse.

Pertanto, i pacchetti adottati nel presente Progetto Esecutivo sono stati dimensionati tenendo conto di tre aspetti principali:

1. sopportare un numero di passaggi di ESAL superiore al traffico previsto in progetto (numero di Miner inferiore all’unità);

2. miglioramento progettuale: ottenere una maggiore durabilità rispetto a quella che si avrebbe con i pacchetti previsti da PD (numero di Miner del pacchetto da PE inferiore rispetto a quello del pacchetto da PD);
3. evitare di sovradimensionare i pacchetti rispetto alle previsioni di traffico al fine di minimizzare l'utilizzo di materiale vergine (numero di Miner inferiore rispetto a quello del pacchetto da PD ma non tendente a zero).

Considerando i suddetti aspetti, di seguito si illustra il nuovo studio progettuale condotto per la verifica e il dimensionamento dei pacchetti previsti nel presente Progetto Esecutivo, tale studio è stato inoltre applicato per i pacchetti previsti da PD, in modo tale da consentire il confronto tra le due soluzioni in termini di durabilità.

5. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE PREVISTA DA PROGETTO DEFINITIVO

Nel presente capitolo si propone un nuovo studio progettuale del pacchetto di pavimentazione previsto da Progetto Definitivo. Tale studio ha lo scopo di rendere confrontabili questi risultati con quelli derivanti dal dimensionamento delle soluzioni previste nel presente Progetto Esecutivo, affrontate nel successivo Capitolo, in modo tale da dimostrarne l'incremento in termini di durabilità. Partendo dalle informazioni contenute nella relazione di calcolo della pavimentazione da PD, di seguito si riassumono i dati utilizzati per il dimensionamento del pacchetto di pavimentazione dell'asse autostradale della tratta B2. In particolare, il pacchetto è composto dai seguenti strati:

- Usura Drenante: 5 cm
- Binder: 7 cm
- Base ad Alto Modulo: 19 cm
- Misto Cementato: 20 cm
- Fondazione in Misto Stabilizzato: 25 cm

Il nuovo studio progettuale del pacchetto previsto da PD è stato condotto secondo quanto definito nei precedenti paragrafi. Qui di seguito si riportano le caratteristiche adottate per ciascuno strato e utilizzate all'interno del programma BISAR al fine di determinare lo stato tenso-deformativo.

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali da Progetto Definitivo | | | | |
|-------------------------------|---|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Usura drenante | 5.676 | 2.084 | 704 | 1.909 | 0,35 |
| Binder ordinario | 9.712 | 5.253 | 2.215 | 4.939 | 0,35 |
| Base Alto Modulo | 18.296 | 11.297 | 5.504 | 10.761 | 0,35 |
| Misto cementato | 1.200 | | | | 0,25 |
| Fondazione in misto granulare | 248 | | | | 0,40 |
| Sottofondo | 100 | | | | 0,40 |

Tabella 28 – Caratteristiche meccaniche dei materiali da Progetto Definitivo

5.1. VERIFICA ROTTURA A FATICA

Per la verifica secondo il criterio a fatica di Verstraeten-Marchionna si è determinato un modulo equivalente per le miscele in conglomerato bituminoso, definito come la media pesata sugli spessori dei moduli dei singoli strati. Per ciascuno strato sono state inoltre utilizzate ulteriori caratteristiche relative alla composizione delle miscele e di seguito riassunte.

| Strato | Caratteristiche dei materiali da Progetto Definitivo | | | | | |
|------------------|--|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Bitume [%] (minimo da CSA PD) | Vuoti [%] (massimo da CSA PD) | E _q [MPa] - inverno | E _q [MPa] - primavera | E _q [MPa] - estate | E _q [MPa] - autunno |
| Usura drenante | 5 | 18 | 14.322 | 8.446 | 3.987 | 8.019 |
| Binder ordinario | 4,5 | 7 | | | | |
| Base Alto Modulo | 4 | 7 | | | | |

Tabella 29 – Caratteristiche dei materiali da Progetto Definitivo

Nella tabella seguente si riportano i risultati in termini di sforzi e deformazioni massimi, ottenuti mediante analisi del multistrato elastico, alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso e il numero di Miner (danno) ottenuto.

| | Verifica a fatica del conglomerato bituminoso – asse autostradale PD | | | |
|--|---|-----------|----------|----------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Deformazione orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [-] | 2,75E-05 | 3,73E-05 | 5,11E-05 | 3,82E-05 |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [MPa] | 0,69 | 0,56 | 0,34 | 0,54 |
| Traffico previsto [ESAL da 12t] | 39.530.000 | | | |
| Numero di Miner stagionale | 0,12 | 0,20 | 0,25 | 0,21 |
| Numero di Miner | 0,78 | | | |

Tabella 30 - Verifica a fatica del conglomerato bituminoso - asse autostradale PD

Il pacchetto di pavimentazione previsto da Progetto Definitivo presenta un numero di Miner pari a 0,78, corrispondente al danno a fine vita utile. Quest'ultimo risulta inferiore all'unità; pertanto, la sovrastruttura è in grado di sopportare il traffico previsto. Il traffico previsto (ESAL da 12t) si riferisce alla tratta maggiormente trafficata (Macherio – Tg. Est). La verifica per rottura a fatica è soddisfatta.

Il valore di Miner così ottenuto per l'asse autostradale è preso come riferimento (soglia massima) per i successivi confronti con le soluzioni previste da Progetto Esecutivo per l'asse autostradale. Inoltre, non essendo nel PD differenziato il dimensionamento relativo ai pacchetti di svincolo, il valore ottenuto per l'asse autostradale sarà utilizzato anche per il confronto con tali tratti.

Pertanto, al fine di realizzare dei pacchetti che siano prestazionalmente migliori rispetto a quanto previsto da PD, le soluzioni progettuali proposte nel Progetto Esecutivo dovranno avere un numero di Miner inferiore a 0,78.

5.2. VERIFICA ROTTURA ISTANTANEA

Nel presente paragrafo si affronta la verifica per rottura istantanea della pavimentazione, fenomeno che può determinare l'insorgere di fessure a causa del passaggio di un singolo mezzo pesante di elevato carico. Per prevenire ciò, è necessario garantire che le tensioni agenti alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso siano sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale impiegato.

La Tabella 31 presenta gli sforzi indotti alla base degli strati legati a bitume nelle quattro stagioni considerate per effetto del passaggio di un asse singolo di carico da 120 kN (stato tenso-deformativo ottenuto dal programma BISAR). Inoltre, si riporta anche la resistenza a trazione del materiale impiegato per lo strato di base.

| | Verifica per rottura istantanea del conglomerato bituminoso – asse autostradale – PD | | | |
|--|---|-----------|--------|---------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di base in CB [MPa] | 0,69 | 0,56 | 0,34 | 0,54 |
| Resistenza a trazione del CB per strato di base [MPa] | 2,09 | 1,82 | 1,47 | 1,79 |

Tabella 31 – Verifica per rottura istantanea del conglomerato bituminoso – asse autostradale - PD

I risultati indicano che nel periodo invernale, per effetto dell'incremento dei moduli di rigidezza, si registrano maggiori sforzi di trazione alla base degli strati di conglomerato bituminoso, pari a 0,69 MPa. I valori di resistenza a trazione adottati per il confronto sono stati ricavati a partire da una resistenza di 1,60 MPa alla temperatura di 25°C (valore tratto da dati di letteratura per conglomerati bituminosi ad alto modulo) e interpolati alle diverse temperature sfruttando la relazione di Molenaar

e Li (2014), che lega la resistenza a trazione della miscela dello strato di base al suo modulo di rigidezza.

Le tensioni agenti nella pavimentazione sono sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale; pertanto, è possibile concludere che la verifica per rottura istantanea è soddisfatta.

6. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE PREVISTA DA PROGETTO ESECUTIVO

Nel presente capitolo si illustra la verifica dei pacchetti di pavimentazione previsti nel Progetto Esecutivo.

6.1. ASSE AUTOSTRADALE

Per quanto concerne l'asse autostradale i pacchetti individuati sono stati distinti in funzione delle condizioni di portanza del sottofondo su cui poggerà la sovrastruttura. In particolare, sono state individuate due condizioni:

- Buone caratteristiche di portanza del sottofondo;
- Scarse caratteristiche di portanza del sottofondo.

Nella prima condizione il modulo resiliente del sottofondo è assunto pari a 100 MPa. Tale condizione si verifica pertanto nelle tratte in trincea, in cui il terreno ha buone caratteristiche, nelle gallerie artificiali e nelle tratte in rilevato. La seconda condizione si verifica nelle tratte in trincea in cui si rilevano scarse caratteristiche del terreno presente in sito. Per tale condizione il modulo resiliente viene ridotto, a favore di sicurezza, a 40 MPa.

6.1.1. Rilevato e Trincea con buona portanza

Di seguito si riassumono i dati utilizzati per il dimensionamento del pacchetto di pavimentazione dell'asse autostradale della tratta B2, previsto per le tratte in rilevato, in trincea con buone caratteristiche di portanza e per le gallerie artificiali (a favore di sicurezza, anche per le gallerie con sviluppo superiore a 200 m si considera tale dimensionamento). In particolare, il pacchetto è composto dai seguenti spessori:

- Usura doppio strato drenante: 5 cm
- Binder modificato SOFT: 5 cm
- Base CB HD – High Durability: 12 cm
- Misto cementato fibrorinforzato: 20 cm
- Stabilizzazione in sito a cemento: 20 cm

La verifica del suddetto pacchetto è stata realizzata secondo il medesimo procedimento applicato per il pacchetto previsto da PD. Qui di seguito si riportano le caratteristiche adottate per ciascuno strato e utilizzate all'interno del programma BISAR al fine di determinare lo stato tenso-deformativo.

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali per asse autostradale - Rilevato e Trincea con buona portanza - PE | | | | |
|---|---|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Usura doppio strato drenante ¹ | 5.676 | 2.084 | 704 | 1.909 | 0,35 |
| Binder modificato SOFT | 15.558 | 8.530 | 3.678 | 8.033 | 0,35 |
| Base CB HD – High Durability | 21.278 | 12.959 | 6.155 | 12.326 | 0,30 |
| Misto cementato fibrorinforzato | 1.700 | | | | 0,20 |
| Stabilizzazione in sito a cemento | 1.600 | | | | 0,25 |
| Sottofondo | 100 | | | | 0,40 |

Tabella 32 - Caratteristiche meccaniche dei materiali per asse autostradale - Rilevato e Trincea con buona portanza - PE

¹ Si sottolinea che per l'usura in doppio strato drenante, a favore di sicurezza, si assumono nel calcolo le medesime caratteristiche meccaniche e volumetriche dello strato di usura assunto nel PD.

6.1.1.1. Verifica rottura a fatica

Per la verifica secondo il criterio a fatica di Verstraeten-Marchionna si è determinato un modulo equivalente per le miscele in conglomerato bituminoso, definito come media pesata sugli spessori dei moduli dei singoli strati. Per gli strati di binder e di base, sono state utilizzate le caratteristiche relative alla composizione delle miscele (%vuoti e %bitume), di seguito riassunte, tratte dal Capitolato Speciale d'Appalto – Norme Tecniche del Progetto Esecutivo.

| Strato | Caratteristiche dei materiali da PE | | | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | Bitume [%] (minimo da CSA PE) | Vuoti [%] (massimo da CSA PE) | E _q [MPa] - inverno | E _q [MPa] - primavera | E _q [MPa] - estate | E _q [MPa] - autunno |
| Usura doppio strato drenante ² | 5 | 18 | 16.432 | 9.481 | 4.353 | 8.983 |
| Binder modificato SOFT | 4,1 | 6,5 | | | | |
| Base CB HD – High Durability | 4 | 6 | | | | |

Tabella 33 - Caratteristiche dei materiali in CB da Progetto Esecutivo

Nella tabella seguente si riportano i risultati in termini di sforzi e deformazioni massimi, ottenuti mediante analisi del multistrato elastico, alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso e il numero di Miner (danno) ottenuto.

| | Verifica a fatica del conglomerato bituminoso per asse autostradale – Rilevato e Trincea con buona portanza - PE | | | |
|---|---|-----------|----------|----------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Deformazione orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [-] | 2,66E-05 | 3,25E-05 | 3,92E-05 | 3,31E-05 |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [MPa] | 0,70 | 0,50 | 0,24 | 0,48 |
| Traffico previsto [ESAL da 12t] | 39.530.000 | | | |
| Numero di Miner stagionale | 0,17 | 0,22 | 0,14 | 0,22 |
| Numero di Miner | 0,75 | | | |

Tabella 34 - Verifica a fatica del conglomerato bituminoso per asse autostradale – Rilevato e Trincea con buona portanza - PE

Il pacchetto di pavimentazione previsto per le tratte in rilevato e in trincea con buone caratteristiche di portanza e per le gallerie artificiali presenta un numero di Miner pari a 0,75. Quest'ultimo risulta inferiore all'unità; pertanto, la sovrastruttura è in grado di sopportare il traffico previsto. La verifica per rottura a fatica è soddisfatta.

Inoltre, il numero di Miner ottenuto risulta essere inferiore rispetto a quello ottenuto per il pacchetto previsto nel PD (0,78); pertanto, **il pacchetto del Progetto Esecutivo per le tratte in rilevato e in trincea con buone caratteristiche di portanza e per le gallerie artificiali risulta avere una maggiore durabilità rispetto alla pavimentazione del PD.**

Si ricorda che tale verifica è stata realizzata con riferimento al traffico della tratta Macherio - Tangenziale Est (afferente alla tratta C) che risulta essere la tratta più trafficata dell'Autostrada in progetto. Ad ogni modo, il pacchetto in questione risulta automaticamente verificato (Miner inferiore all'unità) anche per i traffici delle altre tratte elementari, con traffico minore, individuate nel Paragrafo

² Si sottolinea che per l'usura in doppio strato drenante, a favore di sicurezza, si assumono nel calcolo le medesime caratteristiche meccaniche e volumetriche dello strato di usura assunto nel PD.

3.1.3.2. Nella tabella seguente si riportano i risultati in termini di numero di Miner per tutte le tratte dell'Autostrada.

| TRATTA | Tratta elementare | Progressiva Km | | ESAL da 120 kN di PPROGETTO | Numero di Miner |
|-----------|------------------------|----------------|--------|-----------------------------|-----------------|
| | | Da | A | | |
| B2 | Ceremate - Barlassina | 0+000 | 3+600 | 25.862.000 | 0,49 |
| B2 | Barlassina - Meda | 3+600 | 6+150 | 31.892.000 | 0,64 |
| B2 | Meda - Seveso | 6+150 | 8+400 | | |
| B2 | Meda - Cesano Maderno | 8+400 | 9+640 | | |
| C | Cesano Maderno - SS 36 | 0+000 | 5+350 | 33.567.000 | |
| C | SS 36 - Macherio | 5+350 | 7+650 | | |
| C | Macherio - Tg Est | 7+650 | 16+600 | 39.530.000 | 0,75 |

Tabella 35 - Numero di Miner per le tratte in progetto nella condizione di Rilevato e Trincea con buona portanza – PE

In accordo con APL, si è definito di adottare un unico pacchetto per l'intero sviluppo autostradale.

6.1.1.2. Verifica rottura istantanea

Nel presente paragrafo si affronta la verifica per rottura istantanea della pavimentazione, fenomeno che può determinare l'innescio di fessure a causa del passaggio di un singolo mezzo pesante di elevato carico. Per prevenire ciò, è necessario garantire che le tensioni agenti alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso siano sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale impiegato.

La Tabella 36 presenta gli sforzi indotti alla base degli strati legati a bitume nelle quattro stagioni considerate per effetto del passaggio di un asse singolo di carico da 120 kN (stato tenso-deformativo ottenuto dal programma BISAR). Inoltre, si riporta anche la resistenza a trazione del materiale impiegato per lo strato di base.

| | Verifica per rottura istantanea del CB - asse autostradale - Rilevato e Trincea con buona portanza - PE | | | |
|---|--|-----------|--------|---------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di base in CB [MPa] | 0,70 | 0,50 | 0,24 | 0,48 |
| Resistenza a trazione del CB per strato di base [MPa] | 2,12 | 1,82 | 1,44 | 1,80 |

Tabella 36 – Verifica per rottura istantanea del conglomerato bituminoso – Rilevato e Trincea con buona portanza - PE

I risultati indicano che nel periodo invernale, per effetto dell'incremento dei moduli di rigidezza, si registrano maggiori sforzi di trazione alla base degli strati di conglomerato bituminoso, pari a 0,70 MPa. I valori di resistenza a trazione adottati per il confronto sono stati ricavati a partire da una resistenza di 1,60 MPa alla temperatura di 25°C (valore tratto da dati di letteratura per conglomerati bituminosi HD – High Durability) e interpolati alle diverse temperature sfruttando la relazione di Molenaar e Li (2014), che lega la resistenza a trazione della miscela dello strato di base al suo modulo di rigidezza.

Le tensioni agenti nella pavimentazione sono sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale; pertanto, è possibile concludere che la verifica per rottura istantanea è soddisfatta.

6.1.2. Trincea con scarsa portanza

Di seguito si riassumono i dati utilizzati per il dimensionamento del pacchetto di pavimentazione dell'asse autostradale della tratta B2, previsto per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza. In particolare, il pacchetto è composto dai seguenti strati:

- Usura doppio strato drenante: 5 cm
- Binder modificato SOFT: 5 cm
- Base CB HD – High Durability: 12 cm
- Misto cementato fibrorinforzato: 20 cm
- Stabilizzazione in sito a cemento: 30 cm

Tale soluzione differisce dal pacchetto previsto per le “tratte con buone condizioni di portanza del terreno” per lo spessore dello strato di terreno che sarà stabilizzato in sito a cemento: si passa quindi da 20 cm a 30 cm date le scarse caratteristiche del terreno presente in sito. Anche per questa soluzione si riportano le caratteristiche adottate per ciascuno strato.

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali per asse autostradale - Trincea con scarsa portanza - PE | | | | |
|---|--|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Usura doppio strato drenante ³ | 5.676 | 2.084 | 704 | 1.909 | 0,35 |
| Binder modificato SOFT | 15.558 | 8.530 | 3.678 | 8.033 | 0,35 |
| Base CB HD – High Durability | 21.278 | 12.959 | 6.155 | 12.326 | 0,30 |
| Misto cementato fibrorinforzato | 1.700 | | | | 0,20 |
| Stabilizzazione in sito a cemento | 1.200 | | | | 0,25 |
| Sottofondo | 40 | | | | 0,40 |

Tabella 37 - Caratteristiche meccaniche dei materiali per asse autostradale - Trincea con scarsa portanza – PE

6.1.2.1. Verifica rottura a fatica

Per la verifica secondo il criterio a fatica di Verstraeten-Marchionna, le ulteriori caratteristiche necessarie per la verifica sono rimaste invariate rispetto al caso visto in precedenza e riportate nella Tabella 33. Nella tabella seguente si riportano i risultati in termini di sforzi e deformazioni massimi, ottenuti mediante analisi del multistrato elastico, alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso e il numero di Miner (danno) ottenuto.

| | Verifica a fatica del conglomerato bituminoso per asse autostradale – Trincea con scarsa portanza - PE | | | |
|---|---|-----------|----------|----------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Deformazione orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [-] | 2,69E-05 | 3,25E-05 | 3,82E-05 | 3,30E-05 |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [MPa] | 0,71 | 0,50 | 0,23 | 0,48 |
| Traffico previsto [ESAL da 12t] | 39.530.000 | | | |
| Numero di Miner stagionale | 0,17 | 0,22 | 0,13 | 0,22 |
| Numero di Miner | 0,74 | | | |

Tabella 38 - Verifica a fatica del conglomerato bituminoso per asse autostradale – Trincea con scarsa portanza – PE

³ Si sottolinea che per l'usura in doppio strato drenante, a favore di sicurezza, si assumono nel calcolo le medesime caratteristiche meccaniche e volumetriche dello strato di usura assunto nel PD.

Il pacchetto di pavimentazione previsto per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza presenta un numero di Miner pari a 0,74. Quest'ultimo risulta inferiore all'unità; pertanto, la sovrastruttura è in grado di sopportare il traffico previsto. Di conseguenza, la verifica per rottura a fatica è soddisfatta.

Anche in questo caso il numero di Miner ottenuto risulta essere inferiore rispetto a quello del pacchetto da PD (0,78), pertanto **il pacchetto del presente Progetto Esecutivo per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza risulta avere una maggiore durabilità rispetto alla pavimentazione del PD.** Dai risultati della verifica a fatica per tutte le altre tratte, riassunte nella tabella seguente, si evince che la sovrastruttura risulta correttamente verificata e migliorativa rispetto a quella da PD.

| TRATTA | Tratta elementare | Progressiva Km | | ESAL da 120 kN di PPROGETTO | Numero di Miner |
|-----------|------------------------|----------------|--------|-----------------------------|-----------------|
| | | Da | A | | |
| B2 | Cermenate - Barlassina | 0+000 | 3+600 | 25.862.000 | 0,49 |
| B2 | Barlassina - Meda | 3+600 | 6+150 | 31.892.000 | 0,63 |
| B2 | Meda - Seveso | 6+150 | 8+400 | | |
| B2 | Meda - Cesano Maderno | 8+400 | 9+640 | | |
| C | Cesano Maderno - SS 36 | 0+000 | 5+350 | 33.567.000 | |
| C | SS 36 - Macherio | 5+350 | 7+650 | | |
| C | Macherio - Tg Est | 7+650 | 16+600 | 39.530.000 | 0,74 |

Tabella 39 - Numero di Miner per le tratte in progetto nella condizione di Trincea con scarsa portanza – PE

In accordo con APL, si è definito di adottare un unico pacchetto per l'intero sviluppo autostradale nelle tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza.

6.1.2.2. Verifica rottura istantanea

Nel presente paragrafo si affronta la verifica per rottura istantanea della pavimentazione per le ragioni e con le modalità approfondite nel Paragrafo 6.1.1.2.

Per prevenire fessurazioni dovute al transito di un singolo mezzo pesante di elevato carico, è necessario garantire che le tensioni agenti alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso siano sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale impiegato.

La Tabella 40 presenta gli sforzi indotti alla base degli strati legati a bitume nelle quattro stagioni considerate per effetto del passaggio di un asse singolo di carico da 120 kN (stato tenso-deformativo ottenuto dal programma BISAR). Inoltre, si riporta anche la resistenza a trazione del materiale impiegato per lo strato di base.

| | Verifica per rottura istantanea del CB - asse autostradale - Trincea con scarsa portanza - PE | | | |
|---|---|-----------|--------|---------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di base in CB [MPa] | 0,71 | 0,50 | 0,23 | 0,48 |
| Resistenza a trazione del CB per strato di base [MPa] | 2,12 | 1,82 | 1,44 | 1,80 |

Tabella 40 – Verifica per rottura istantanea del conglomerato bituminoso –Trincea con scarsa portanza – PE

Le tensioni agenti nella pavimentazione sono sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale; pertanto, è possibile concludere che la verifica per rottura istantanea è soddisfatta.

6.2. SVINCOLI

Per quanto concerne gli svincoli è stato previsto un unico pacchetto per tutti gli svincoli della tratta B2 (svincoli di Cermenate, Lentate, Meda e di Barrucana). In particolare, per lo svincolo di Cermenate, denominato anche “*Interconnessione Ex S.S. 35*”, nei relativi tratti di trincea dell’opera in questione, dalle indagini geotecniche è emersa la presenza di un terreno scadente che necessita di un intervento di stabilizzazione in sito a cemento del materiale. Tale intervento ha lo scopo di disporre in sito di uno strato di sottofondo con un Modulo Resiliente pari a 100 MPa, valore medesimo alle caratteristiche meccaniche richieste per le tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza degli altri svincoli. Pertanto, il pacchetto di pavimentazione, noto come “trincea con scarse caratteristiche di portanza”, dello svincolo “*Interconnessione Ex S.S. 35*” presenta le medesime caratteristiche e prestazioni della pavimentazione impiegata per tutte le altre tratte degli svincoli in progetto. Dunque, di seguito sarà illustrato un’unica verifica per il pacchetto di pavimentazione da Progetto Esecutivo, in quanto il calcolo è valido per tutte le soluzioni progettuali adottate per tutti gli svincoli.

Per il numero di ESAL transitanti, a favore di sicurezza, si è assunto il dato stimato per l’interconnessione con la Tangenziale Est anche se questo è parte della tratta C (numero di ESAL pari a 17.956.000). Gli spessori e la stratigrafia del pacchetto individuato sono i seguenti:

- Usura di tipo SMA: 5 cm
- Binder modificato SOFT: 5 cm
- Base CB HD – High Durability: 11 cm
- Misto cementato fibrorinforzato: 23 cm

Le caratteristiche meccaniche adottate per ciascuno strato sono state riassunte nella seguente tabella.

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali per svincoli – Progetto Esecutivo | | | | |
|------------------------------------|---|------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Usura SMA | 15.637 | 7.938 | 2.870 | 7.404 | 0,35 |
| Binder modificato SOFT | 15.558 | 8.530 | 3.678 | 8.033 | 0,35 |
| Base CB HD – High Durability | 21.278 | 12.959 | 6.155 | 12.326 | 0,30 |
| Misto cementato fibrorinforzato | 1.700 | | | | 0,20 |
| Sottofondo | 100 | | | | 0,40 |

Tabella 41 - Caratteristiche meccaniche dei materiali per il pacchetto degli svincoli

6.2.1. Verifica rottura a fatica

Le ulteriori caratteristiche necessarie per la valutazione del criterio a fatica mediante metodo Verstraeten-Marchionna sono riepilogate qui di seguito. Le caratteristiche relative alla composizione delle miscele (%vuoti e %bitume) sono tratte dal Capitolato Speciale d’Appalto – Norme Tecniche del Progetto Esecutivo.

| Strato | Caratteristiche dei materiali da PE | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | Bitume [%] (minimo da CSA PE) | Vuoti [%] (massimo da CSA PE) | E _q [MPa] - inverno | E _q [MPa] - primavera | E _q [MPa] - estate | E _q [MPa] - autunno |
| Usura SMA | 6 | 6 | 18.573 | 10.709 | 4.783 | 10.132 |
| Binder modificato SOFT | 4,1 | 6,5 | | | | |
| Base CB HD – High Durability | 4 | 6 | | | | |

Tabella 42 - Caratteristiche dei materiali in CB per la pavimentazione degli svincoli- PE

Nella tabella seguente si riportano i risultati in termini di sforzi e deformazioni massimi, ottenuti mediante analisi del multistrato elastico, alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso e il numero di Miner (danno) ottenuto.

| | Verifica a fatica del conglomerato bituminoso per svincoli - PE | | | |
|--|--|-----------|----------|----------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Deformazione orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [-] | 3,18E-05 | 3,97E-05 | 4,90E-05 | 4,06E-05 |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [MPa] | 0,87 | 0,64 | 0,33 | 0,62 |
| Traffico previsto [ESAL da 12t] | 17.956.000 | | | |
| Numero di Miner stagionale | 0,10 | 0,16 | 0,15 | 0,16 |
| Numero di Miner | 0,57 | | | |

Tabella 43 - Verifica a fatica del conglomerato bituminoso per gli svincoli - PE

Il pacchetto di pavimentazione previsto per gli svincoli presenta un numero di Miner pari a 0,57. Quest'ultimo risulta inferiore all'unità; pertanto, la sovrastruttura è in grado di sopportare il traffico previsto. Di conseguenza, la verifica per rottura a fatica è soddisfatta.

Anche in questo caso il numero di Miner ottenuto risulta essere inferiore rispetto a quello del pacchetto da PD (0,78), pertanto **il pacchetto del presente Progetto Esecutivo per gli svincoli della tratta B2 risulta avere una maggiore durabilità rispetto alla pavimentazione del PD.** Dai risultati della verifica a fatica per tutti gli svincoli della tratta B2, riassunte nella tabella seguente, si evince che la sovrastruttura risulta correttamente verificata e migliorativa rispetto a quella da PD.

| TRATTA | Svincolo | Estensione Rampe Svincolo | ESAL da 120 kN di PPROGETTO | Numero di Miner |
|-----------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| B2 | Cermenate | in parte già realizzate | 10.452.000 | 0,33 |
| B2 | Lentate | 1.373 m | | |
| B2 | Meda | 4.209 m | | |
| B2 | Barrucana | 1.198 m | 5.092.000 | 0,16 |

Tabella 44 - Numero di Miner degli svincoli tratta B2 - PE

In accordo con APL, si è adottato un unico pacchetto per tutti gli svincoli in progetto lungo la tratta B2.

6.2.2. Verifica rottura istantanea

Nel presente paragrafo si affronta la verifica per rottura istantanea della pavimentazione per le ragioni e con le modalità approfondite nel Paragrafo 6.1.1.2.

Per prevenire fessurazioni dovute al transito di un singolo mezzo pesante di elevato carico, è necessario garantire che le tensioni agenti alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso siano sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale impiegato.

La Tabella 45 presenta gli sforzi indotti alla base degli strati legati a bitume nelle quattro stagioni considerate per effetto del passaggio di un asse singolo di carico da 120 kN (stato tenso-deformativo ottenuto dal programma BISAR). Inoltre, si riporta anche la resistenza a trazione del materiale impiegato per lo strato di base.

| | Verifica per rottura istantanea del CB - svincoli - PE | | | |
|---|--|-----------|--------|---------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di base in CB [MPa] | 0,87 | 0,64 | 0,33 | 0,62 |
| Resistenza a trazione del CB per strato di base [MPa] | 2,12 | 1,82 | 1,44 | 1,80 |

Tabella 45 – Verifica per rottura istantanea del conglomerato bituminoso – svincoli - PE

Le tensioni agenti nella pavimentazione sono sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale; pertanto, è possibile concludere che, anche per gli svincoli, la verifica per rottura istantanea è soddisfatta.

6.3. RIEPILOGO PAVIMENTAZIONI DA PROGETTO ESECUTIVO

Nel presente paragrafo saranno riepilogate le soluzioni migliorative proposte nel Progetto Esecutivo. In particolare, per l'asse autostradale saranno illustrati i pacchetti di pavimentazione adottati per ciascuna progressiva chilometrica a seconda delle condizioni di portanza presenti in sito. Si rammenta, inoltre, che:

- per gallerie artificiali con sviluppo almeno pari a 200 m si prevede di sostituire lo strato d'usura DDL con un tappeto d'usura di tipo SMA (punto di passaggio tra i due strati è collocato a 50 m dagli imbocchi delle gallerie);
- per la curva di Meda (tratta B2 – da prog. km 5+400 a prog. km 6+075) si prevede la presenza del tappeto d'usura di tipo SMA per incrementare la sicurezza degli utenti.

| Progressiva Asse Est | | Spessori pavimentazione <u>autostrada tratta B2</u> [cm] - Progetto Esecutivo | | | | | | |
|----------------------|----------|--|---------------------|---------------|-------------|------------|----------|--------------|
| Da | A | Tratta | Portanza sottofondo | Usura DDL/SMA | Binder SOFT | Base CB HD | MC fibr. | Stab in sito |
| 0+000.00 | 0+500.00 | Trincea | Scarsa | 5 | 5 | 12 | 20 | 30 |
| 0+500.00 | 0+725.00 | Trincea | Scarsa | 5 | 5 | 12 | 20 | 30 |
| 0+725.00 | 1+000.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 1+000.00 | 1+200.00 | Trincea | Scarsa (*) | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 1+200.00 | 1+525.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 1+525.00 | 1+625.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 1+625.00 | 2+150.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 2+150.00 | 2+375.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 2+375.00 | 2+650.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |

| Progressiva Asse Est | | Spessori pavimentazione <u>autostrada tratta B2</u> [cm] - Progetto Esecutivo | | | | | | |
|----------------------|----------|--|---------------------|---------------|-------------|------------|----------|--------------|
| Da | A | Tratta | Portanza sottofondo | Usura DDL/SMA | Binder SOFT | Base CB HD | MC fibr. | Stab in sito |
| 2+650.00 | 3+060.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 3+060.00 | 3+197.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 3+197.00 | 3+350.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 3+350.00 | 3+550.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 3+550.00 | 4+150.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 4+150.00 | 4+475.00 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 4+475.00 | 4+825.00 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 4+825.00 | 4+975.00 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 4+975.00 | 5+200.00 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 5+200.00 | 5+475.00 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 5+475.00 | 5+800.00 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 5+800.00 | 6+125.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 6+125.00 | 6+525.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 6+525.00 | 7+138.00 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 7+138.00 | 7+713.00 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 7+713.00 | 8+155.58 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 8+155.58 | 8+228.64 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 8+228.64 | 8+538.64 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 8+538.64 | 8+688.64 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 8+688.64 | 8+936.64 | Rilevato | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |
| 8+936.64 | 9+638.64 | Trincea | Buona | 5 | 5 | 12 | 20 | 20 |

Tabella 46 – Riepilogo spessori pavimentazione per asse autostradale tratta B2 – Progetto Esecutivo

Come anticipato in precedenza, per la tratta da Pk 1+000.00 a Pk 1+200.00, poiché il modulo resiliente M_r ottenuto risulta inferiore a 40 MPa (dato di progetto per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza), si provvederà a bonificare il terreno di sottofondo e a realizzare il pacchetto di pavimentazione previsto in Progetto Esecutivo per le tratte in rilevato, sottopasso, galleria artificiale e trincee con buone caratteristiche di portanza. L'intervento di bonifica prevederà l'asportazione del terreno presente attualmente in sito, la sostituzione con materiale idoneo e la relativa stabilizzazione in sito a cemento.

Trincee con pessime caratteristiche di portanza (da pk 1+000 a pk 1+200 m)

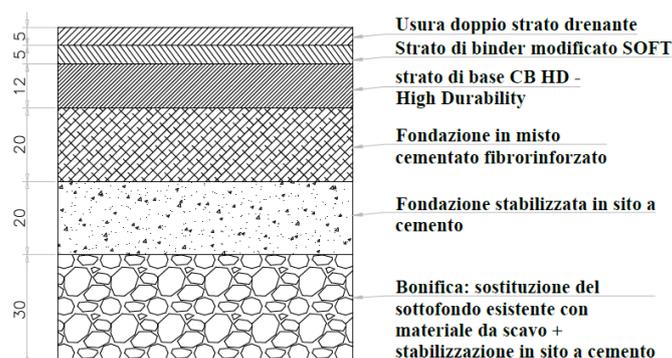


Figura 25 - Pavimentazione asse autostradale tratta B2 per il solo tratto da Pk 1+000.00 a Pk 1+200.00

Per quanto riguarda, invece, gli svincoli, il pacchetto di pavimentazione previsto da Progetto Esecutivo è unico. Infatti, gli spessori degli strati legati a bitume e della fondazione in misto cementato fibrorinforzato sono i medesimi per i quattro svincoli in progetto. Tuttavia, le condizioni di portanza del sottofondo presente in sito (quindi, solo nelle tratte in trincea) presentano due differenti condizioni:

- buona per gli svincoli di Lentate, Meda e Barrucana;
- scarsa per lo svincolo di Cermenate o “*Interconnessione Ex S.S. 35*”.

Nel secondo caso, il materiale presente in sito è soggetto ad un intervento di stabilizzazione in sito a cemento.

Per tutti gli svincoli in progetto, qualora le prove di carico su piastra condotte in sito non soddisfino i requisiti di Capitolato, si prevede di bonificare il terreno di sottofondo così da garantire adeguate caratteristiche di portanza per la pavimentazione di nuova realizzazione.

| Spessori pavimentazione <u>svincoli tratta B2</u> [cm] - Progetto Esecutivo | | | | | |
|--|---------------------|-----------|-------------|------------|----------|
| Svincolo | Portanza sottofondo | Usura SMA | Binder SOFT | Base CB HD | MC fibr. |
| Cermenate | Scarsa | 5 | 5 | 11 | 23 |
| Lentate | Buona | 5 | 5 | 11 | 23 |
| Meda | Buona | 5 | 5 | 11 | 23 |
| Barrucana | Buona | 5 | 5 | 11 | 23 |

Tabella 47 - Riepilogo spessori pavimentazione per svincoli autostradali tratta B2 – Progetto Esecutivo

7. PAVIMENTAZIONE PER DEVIAZIONI PROVVISORIE

Nel presente Capitolo è illustrato il dimensionamento e la conseguente verifica del pacchetto di pavimentazione previsto da Progetto Esecutivo per le deviazioni provvisorie dell'asse autostradale durante le fasi di cantierizzazione dell'intera tratta B2.

Così come eseguito per la pavimentazione dell'asse autostradale e degli svincoli, anche la soluzione progettuale adottata per le deviazioni provvisorie sarà verificata nei confronti del fenomeno della fatica (si rimanda al Capitolo 4 per il metodo di calcolo impiegato) e della rottura istantanea.

La pavimentazione in progetto è composta dai seguenti strati:

- Strato di binder ordinario, spessore 5 cm;
- Strato di base ordinario, spessore 10 cm;
- Stabilizzazione in sito a cemento, spessore 20 cm.

La pavimentazione prevista in Progetto Esecutivo per le deviazioni provvisorie autostradali non prevede la presenza di un tappeto d'usura in quanto la funzione principale di tale strato, ossia garantire adeguata aderenza tra pneumatico e pavimentazione, è assolta, per il caso in esame, dallo strato di binder. Infatti, lo strato di binder in progetto, seppur di tipo ordinario, è caratterizzato da una miscela di aggregati con richieste capitolari particolarmente stringenti al fine di poter garantire un'adeguata aderenza e sicurezza per gli utenti che vi transiteranno. Queste prescrizioni presenti nel Capitolato Speciale d'Appalto – Norme Tecniche, inoltre, sono estese anche allo stato di binder modificato SOFT, adottato sia sull'asse autostradale sia sugli svincoli. In tal modo, le stringenti richieste per la miscela di aggregati dello strato di binder permettono di garantire la temporanea transitabilità in condizioni di sicurezza dello strato stesso, anche in assenza del tappeto d'usura sull'asse autostradale.

7.1. DATI DI PROGETTO

Di seguito sono riportati i dati di input necessari al dimensionamento ed alla conseguente verifica del pacchetto di pavimentazione previsto per le deviazioni provvisorie autostradali.

7.1.1. Dati di traffico

Partendo dai dati forniti nello studio di traffico allegato al Progetto Definitivo e ripercorrendo i medesimi passaggi algebrici presentati nel Paragrafo 3.1, è stato stimato il flusso monodirezionale annuale (anno 2025) di Veicoli Commerciali sulla corsia più caricata per ciascuna tratta elementare della tratta B2.

| TRATTA | Tratta elementare | Progressiva Km | | TGM MEZZI PESANTI monodirezione 2025 | VC 2025 corsia più caricata |
|-----------|------------------------|----------------|-------|--|--------------------------------|
| | | Da | A | | |
| B2 | Cermenate - Barlassina | 0+000 | 3+600 | 5.930 | 1.521.045 |
| B2 | Barlassina - Meda | 3+600 | 6+150 | 7.560 | 1.939.140 |
| B2 | Meda - Seveso | 6+150 | 8+400 | 7.790 | 1.776.120 |
| B2 | Meda - Cesano Maderno | 8+400 | 9+640 | 8.600 | 1.960.800 |

Tabella 48 – Veicoli Commerciali 2025 sulla corsia più caricata

Per il dimensionamento e la verifica della pavimentazione delle deviazioni autostradali provvisorie, è stato preso come riferimento il valore massimo di Veicoli Commerciali nell'anno 2025 sulla corsia autostradale più caricata (1.960.800 – Tratta elementare Meda – Cesano Maderno). Tale quantità è stata poi convertita, tramite il coefficiente di equivalenza *EALF* (pari a 0,67, come mostrato nel

Paragrafo 3.1.3), in numero di *ESAL* di progetto. Pertanto, il numero di passaggi di assi standard da 120 kN sull'asse autostradale nell'anno 2025 è pari 1.313.736.

In accordo con le fasi di cantierizzazione stimate, a favore di sicurezza è stata considerata una durata massima dell'intervento di 2 anni; pertanto, il traffico di progetto, in termini di *ESAL* da 120 kN, per le deviazioni autostradali provvisorie della tratta B2 è pari a **2.627.472**.

7.1.2. Portanza del terreno di sottofondo

Dato il notevole sviluppo dell'opera in questione e la possibile variabilità del terreno presente in sito, a favore di sicurezza si considera un Modulo Resiliente M_r del sottofondo pari a 40 MPa.

7.1.3. Caratteristiche dei materiali impiegati

Nel presente paragrafo sono illustrate le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali impiegati nella pavimentazione di progetto. Questi dati, insieme alla portanza del sottofondo e al traffico di progetto, sono necessari per la verifica delle sovrastrutture stradali.

Per determinare l'andamento del modulo di rigidezza di ciascuno strato in conglomerato bituminoso alle diverse temperature, si sono determinati i valori di tale parametro a 5°C, 20°C e 40°C. Questi derivano da un ampio campione di prove raccolto nel corso degli incarichi di Direzione Lavori portati a termine dalla Scrivente. La Tabella 49 presenta i moduli di rigidezza alle tre diverse temperature per i due strati in conglomerato bituminoso.

| Strato | Modulo di rigidezza alle diverse temperature [MPa] - deviazioni autostradali provvisorie | | |
|------------------|---|-------|-------|
| | 5°C | 20°C | 40°C |
| Binder ordinario | 10.000 | 4.600 | 1.200 |
| Base ordinaria | 9.000 | 5.500 | 1.500 |

Tabella 49 – Modulo di rigidezza degli strati in CB alle diverse temperature per deviazioni autostradali provvisorie

Interpolando i moduli di rigidezza sopracitati, è possibile determinare l'andamento di tale parametro al variare della temperatura. La Figura 26 presenta le curve ottenute che meglio approssimano i dati presenti in Tabella 49 e le relative equazioni.

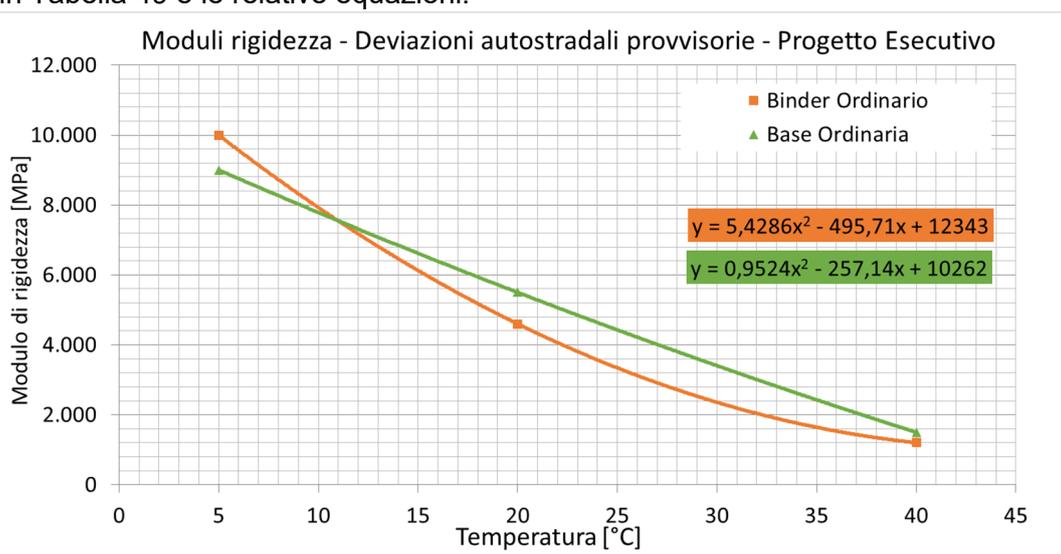


Figura 26 - Andamento dei moduli di rigidezza degli strati in CB per deviazioni provvisorie - Progetto Esecutivo

Tramite le temperature medie di ciascuno strato, calcolate nelle quattro stagioni, è possibile determinare i moduli di rigidezza per il dimensionamento della pavimentazione delle deviazioni provvisorie autostradali.

| Moduli di rigidezza pacchetto deviazioni autostradali provvisorie - Progetto Esecutivo | | | | |
|---|-------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| Strato | E [MPa] - inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno |
| Binder ordinario | 9.786 | 5.222 | 2.151 | 4.902 |
| Base ordinaria | 8.827 | 6.003 | 3.253 | 5.769 |

Tabella 50 – Moduli di rigidezza degli strati in CB per deviazioni autostradali provvisorie – Progetto Esecutivo

Il coefficiente di Poisson impiegato per entrambi gli strati in conglomerato bituminoso è pari a 0,35.

Al di sotto degli strati in conglomerato bituminoso, nel Progetto Esecutivo si prevede la stabilizzazione del terreno presente in sito a cemento. Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, data la variabilità del terreno presente in sito, a favore di sicurezza si è definito un modulo elastico pari a 1.200 MPa, valore analogo a quanto adottato per le tratte in trincea con scarse caratteristiche di portanza sull'asse autostradale. Il coefficiente di Poisson assunto è pari a 0,25.

Per completezza di trattazione, si riportano in Tabella 51 le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati per la pavimentazione delle deviazioni autostradali provvisorie.

| Strato | Caratteristiche meccaniche dei materiali per deviazioni autostradali provvisorie – Progetto Esecutivo | | | | |
|-----------------------------------|--|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | E [MPa] – inverno | E [MPa] - primavera | E [MPa] - estate | E [MPa] - autunno | Coeff Poisson [-] |
| Binder ordinario | 9.786 | 5.222 | 2.151 | 4.902 | 0,35 |
| Base ordinaria | 8.827 | 6.003 | 3.253 | 5.769 | 0,35 |
| Stabilizzazione in sito a cemento | 1.200 | | | | 0,25 |
| Sottofondo | 40 | | | | 0,40 |

Tabella 51 – Caratteristiche meccaniche dei materiali per le deviazioni autostradali provvisorie – Progetto Esecutivo

7.2. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE PER DEVIAZIONI PROVVISORIE

Nel presente paragrafo si illustra il dimensionamento e la verifica del pacchetto di pavimentazione previsto da Progetto Esecutivo per le deviazioni provvisorie autostradali. Il pacchetto è composto dai seguenti strati:

- Binder ordinario: 5 cm
- Base ordinaria: 10 cm
- Stabilizzazione in sito a cemento: 20 cm

Lo studio progettuale del pacchetto in esame è stato condotto secondo quanto definito nei precedenti Capitoli (verifica rottura a fatica e verifica nei confronti della rottura istantanea). Le caratteristiche adottate per ciascuno strato e utilizzate all'interno del programma BISAR al fine di determinare lo stato tenso-deformativo sono riportate nella Tabella 51.

7.2.1. Verifica rottura a fatica

La verifica secondo il criterio a fatica di Verstraeten-Marchionna è stata condotta in analogia con quanto già presentato per l'asse autostradale e per gli svincoli in progetto.

Nella tabella seguente si riportano i risultati in termini di sforzi e deformazioni massimi, ottenuti mediante analisi del multistrato elastico, alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso e il numero di Miner (danno) ottenuto.

| | Verifica a fatica del conglomerato bituminoso – deviazioni autostradali provvisorie - PE | | | |
|---|--|-----------|-----------|-----------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Deformazione orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [-] | 8,319E-05 | 9,292E-05 | 1,000E-04 | 9,371E-05 |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di CB [MPa] | 0,97 | 0,70 | 0,33 | 0,67 |
| Traffico previsto [ESAL da 12t] | 2.627.472 | | | |
| Numero di Miner stagionale | 0,25 | 0,27 | 0,13 | 0,26 |
| Numero di Miner | 0,91 | | | |

Tabella 52 - Verifica a fatica del conglomerato bituminoso - Deviazioni autostradali provvisorie

Il pacchetto di pavimentazione previsto da Progetto Esecutivo presenta un numero di Miner pari a 0,91, corrispondente al danno a fine vita utile. Quest'ultimo risulta inferiore all'unità; pertanto, la sovrastruttura è correttamente dimensionata per sopportare il traffico previsto (valore derivante dalla tratta B2 più trafficata e considerato un arco temporale di 2 anni).

7.2.2. Verifica rottura istantanea

Per prevenire l'innesco di fessure a causa del passaggio di un singolo mezzo pesante di elevato carico, è necessario garantire che le tensioni agenti alla base dello strato di base in conglomerato bituminoso siano sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale impiegato (verifica per rottura istantanea della pavimentazione).

La Tabella 53 presenta gli sforzi agenti alla base degli strati legati a bitume nelle quattro stagioni considerate per effetto del passaggio di un asse singolo di carico da 120 kN (stato tenso-deformativo ottenuto dal programma BISAR). Inoltre, si riporta anche la resistenza a trazione del materiale impiegato per lo strato di base.

| | Verifica per rottura istantanea del conglomerato bituminoso - deviazioni autostradali provvisorie - PE | | | |
|---|---|-----------|--------|---------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Sforzo orizzontale di trazione alla base dello strato di base in CB [MPa] | 0,97 | 0,70 | 0,33 | 0,67 |
| Resistenza a trazione del CB per strato di base [MPa] | 1,31 | 1,17 | 0,97 | 1,16 |

Tabella 53 – Verifica per rottura istantanea del conglomerato bituminoso – Deviazioni autostradali provvisorie

I valori di resistenza a trazione adottati per il confronto sono stati ricavati a partire da una resistenza di 1,06 MPa alla temperatura di 25°C (valore tratto da dati di letteratura per conglomerati bituminosi ordinari) e interpolati alle diverse temperature sfruttando la relazione di Molenaar e Li (2014), che lega la resistenza a trazione della miscela dello strato di base al suo modulo di rigidezza.

Le tensioni agenti nella pavimentazione sono sempre inferiori alla resistenza a trazione del materiale; pertanto, è possibile concludere che la verifica per rottura istantanea è soddisfatta.

8. CONCLUSIONI

Nel presente documento sono stati individuati i pacchetti di pavimentazione dell'Autostrada Pedemontana Lombarda, relativamente alla tratta in progetto B2, che collega i comuni di Lentate sul Seveso e Cesano Maderno.

Partendo dallo studio di traffico presente nel Progetto Definitivo, e integrandolo con le informazioni fornite dalla Committente, è stato dapprima individuato il traffico previsto, in termini di veicoli pesanti, che interesserà le singole tratte elementari; è stato poi definito un nuovo studio progettuale mediante cui è stato condotto il dimensionamento e la verifica dei pacchetti di pavimentazione. Tale verifica è stata realizzata sia per i pacchetti individuati nel Progetto Esecutivo sia per quelli previsti nel PD, in modo tale da rendere confrontabili le soluzioni.

Pertanto, i pacchetti adottati nel presente Progetto Esecutivo sono stati dimensionati tenendo conto di tre aspetti principali:

1. sopportare un numero di passaggi superiore al traffico previsto in progetto;
2. ottenere una maggiore durabilità rispetto a quella che si avrebbe con i pacchetti previsti da PD;
3. evitare di sovradimensionare i pacchetti rispetto alle previsioni di traffico al fine di minimizzare l'utilizzo di materiale vergine.

I pacchetti individuati nel presente PE sono costituiti da miscele con elevate prestazioni che hanno consentito di apportare una ottimizzazione degli spessori rispetto ai pacchetti previsti nel PD e, dunque, un minor utilizzo di materiale vergine, incrementando così la sostenibilità ambientale delle soluzioni ma garantendo al contempo un incremento di durabilità della pavimentazione.

In particolare, per l'asse principale è stata prevista l'introduzione di strati in conglomerato bituminoso altamente performanti, tra cui un doppio strato drenante che garantisce elevata aderenza e capacità drenante nel tempo, uno strato di binder modificato Soft in sostituzione di quello ordinario da PD e uno strato di base CB HD – High Durability in grado di raggiungere moduli elevatissimi che incrementano notevolmente la resistenza a fatica dell'intero pacchetto. Al di sotto degli strati in conglomerato bituminoso è stato inoltre previsto uno strato in misto cementato fibrorinforzato, ottenuto tramite l'aggiunta di fibre atte ad incrementare la portanza dell'intera sovrastruttura. Si è inoltre prevista una stabilizzazione a cemento del terreno presente in sito, con spessore differente in funzione delle caratteristiche di portanza del terreno.

Negli svincoli, invece, l'usura in doppio strato drenante è sostituita con un tappeto di usura di tipo Splitt Mastix Asphalt – SMA. Questo, per le particolari caratteristiche degli inerti impiegati, unitamente ad un alto contenuto di legante modificato, consente di fornire elevate prestazioni in termini non solo di durabilità, stabilità e resistenza alle deformazioni, ma anche di rugosità superficiale e di resistenza all'ormaiamento. In aggiunta, lo SMA assicura prestazioni massime anche in termini di resistenza allo sgranamento superficiale e di aderenza assicurando il più elevato grado di sicurezza agli utenti.

La verifica prestazionale di tutti i pacchetti individuati nel PE ha mostrato il raggiungimento di un numero di Miner inferiore rispetto a quello della pavimentazione prevista nel PD per l'asse autostradale; ciò esprime un minor danno a fine vita utile e, quindi, un incremento della durabilità in termini di numero di passaggi sopportabili dalle sovrastrutture in progetto.