



MINISTERO  
DELLE INFRASTRUTTURE  
E DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILI



E.N.A.C  
ENTE NAZIONALE per  
L'AVIAZIONE CIVILE

Committente Principale



AEROPORTO INTERNAZIONALE DI FIRENZE AMERIGO VESPUCCI

Opera

MASTERPLAN AEROPORTUALE 2035

Titolo Documento Completo

OPERE DI VIABILITÀ  
Relazione tecnica stradale

Livello di Progetto

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA

| LIV  | REV | DATA EMISSIONE | SCALA | CODICE FILE COMPLETO                      |
|------|-----|----------------|-------|-------------------------------------------|
| PFTE | 00  | Ottobre 2022   | -     | FLR-MPL-PFTE-VBT2-001-OC-RT_Rel Tec Strad |
|      |     |                |       | TITOLO RIDOTTO                            |
|      |     |                |       | Rel Tec Strad                             |

| 00  | 09/2022 | Prima Emissione | TAE, SITECO | D. Vestrini | L. Tenerani |
|-----|---------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| REV | DATA    | DESCRIZIONE     | REDATTO     | VERIFICATO  | APPROVATO   |

| COMMITTENTE PRINCIPALE                                              | GRUPPO DI PROGETTAZIONE                                                                                                    | SUPPORTI SPECIALISTICI                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br><b>ACCOUNTABLE MANAGER</b><br>Dott. Vittorio Fanti              | <br><b>DIRETTORE TECNICO</b><br>Ing. Lorenzo Tenerani<br>Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631                     | <b>PROGETTAZIONE SPECIALISTICA</b><br><br>Donata Vestrini<br>Ordine degli ingegneri di Firenze N°6703                       |
| <b>POST HOLDER PROGETTAZIONE AD INTERIM</b><br>Dott. Vittorio Fanti | <b>RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE</b><br>Donata Vestrini<br>Ordine degli ingegneri di Firenze N°6703 | <b>SUPPORTO SPECIALISTICO</b><br><b>SUPPORTO ALLA PROGETTAZIONE PER ADEGUAMENTO E SVILUPPO DELLE OPERE INFRASTRUTTURALI</b> |
| <b>POST HOLDER MANUTENZIONE</b><br>Ing. Nicola D'ippolito           |                                                                                                                            | <br><b>PROGETTISTA SPECIALISTICO</b><br>Ing. Andrea Burchi                                                                  |
| <b>POST HOLDER AREA DI MOVIMENTO</b><br>Geom. Luca Ermini           |                                                                                                                            |                                                                                                                             |

## Sommario

|       |                                                                              |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | GENERALITÀ.....                                                              | 3  |
| 2     | INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....                                                | 4  |
| 2.1   | Modello geologico del sottosuolo .....                                       | 4  |
| 3     | INQUADRAMENTO NORMATIVO.....                                                 | 5  |
| 4     | CARATTERISTICHE FUNZIONALI E GEOMETRICHE DELLA STRADA .....                  | 7  |
| 4.1   | Classificazione funzionale e criteri compositivi della piattaforma .....     | 7  |
| 4.2   | Allargamento delle corsie in curva .....                                     | 10 |
| 4.3   | Organizzazione della sede stradale .....                                     | 10 |
| 4.3.1 | Sezione stradale in sede artificiale .....                                   | 10 |
| 4.3.2 | Elementi marginali e di arredo della sede stradale .....                     | 10 |
| 4.3.3 | Dispositivi di ritenuta.....                                                 | 11 |
| 5     | DESCRIZIONE DEL TRACCIATO .....                                              | 12 |
| 6     | INTERSEZIONI.....                                                            | 15 |
| 6.1   | Nodo A – nuova rotatoria in Via dell’Osmannoro .....                         | 15 |
| 6.2   | Nodo B – nuovo svincolo autostradale.....                                    | 17 |
| 6.3   | Nodo D nuova rotatoria in corrispondenza del futuro Parco Fotovoltaico ..... | 19 |
| 6.4   | Nodo E- nuova rotatoria in corrispondenza della Stazione di castello.....    | 20 |
| 6.5   | Verifiche sulle rotatorie di progetto .....                                  | 21 |
| 7     | CORPO STRADALE .....                                                         | 23 |
| 7.1   | Rilevati .....                                                               | 23 |
| 8     | SOVRASTRUTTURA STRADALE .....                                                | 24 |
| 8.1   | Traffico di progetto.....                                                    | 24 |
| 8.2   | Dimensionamento della pavimentazione.....                                    | 25 |
| 8.3   | Il progetto delle sovrastrutture stradali flessibili .....                   | 25 |

|        |                                                                            |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.4    | Dimensionamento sovrastrutturale con metodo razionale .....                | 27 |
| 8.4.1  | Verifica dei materiali legati.....                                         | 29 |
| 8.4.2  | Verifica dei materiali non legati.....                                     | 29 |
| 8.5    | Predimensionamento della pavimentazione.....                               | 30 |
| 8.5.1  | Il software BISAR.....                                                     | 35 |
| 8.5.2  | Parametri di calcolo assunti .....                                         | 35 |
| 8.5.3  | Analisi dei risultati .....                                                | 38 |
| 9      | OPERE D'ARTE.....                                                          | 41 |
| 10     | BARRIERE DI SICUREZZA .....                                                | 45 |
| 10.1   | Premessa .....                                                             | 45 |
| 10.2   | Finalità dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali .....      | 45 |
| 10.3   | Indici caratteristici dei dispositivi di ritenuta .....                    | 45 |
| 10.4   | Caratteristiche prestazionali.....                                         | 47 |
| 10.5   | Individuazione delle zone da proteggere e della tipologia di barriere..... | 48 |
| 10.6   | Scelta delle classi di barriere .....                                      | 49 |
| 10.7   | Progetto delle barriere .....                                              | 50 |
| 10.7.1 | Estensione delle protezioni .....                                          | 50 |
| 10.7.2 | Modalità d'installazione della barriera.....                               | 50 |
| 10.7.3 | Terminali e raccordi tra barriere di classe differenti .....               | 51 |
| 11     | BILANCIO TERRE .....                                                       | 51 |
| 12     | ALLEGATO 1 – TABULATI DI CALCOLO – VERIFICHE STRADALI TRATTO A-B .....     | 52 |

## 1 GENERALITÀ

La presente relazione, redatta su incarico di Toscana Aeroporti Engineering S.r.l., riguarda il Progetto Di fattibilità tecnico economica della variante alla viabilità locale, che collega Sesto Fiorentino con Osmannoro, interessata dalla realizzazione della nuova pista dell'Aeroporto Internazionale "Amerigo Vespucci" di Firenze, delle sue opere accessorie e di quelle di compensazione. La realizzazione di tale viabilità ricade fra le opere previste nel Master Plan 2035 del nuovo aeroporto.

La nuova pista aeroportuale interrompe la Via dell'Osmannoro e il Fosso Reale, che attualmente corre parallelo a Via dell'Osmannoro, per il tratto a Nord dell'Autostrada A11 Firenze-Mare, per poi deviare verso Ovest a sud di essa. La risoluzione di tale interferenza richiede la realizzazione di una nuova viabilità ed una serie di opere d'arte per gli attraversamenti idraulici e per i sottoattraversamento della nuova pista stessa

L'intervento in progetto ricade per la maggior parte nel territorio del Comune di Sesto Fiorentino e, per una piccola porzione, nel territorio del Comune di Firenze, come è mostrato in Figura 1.

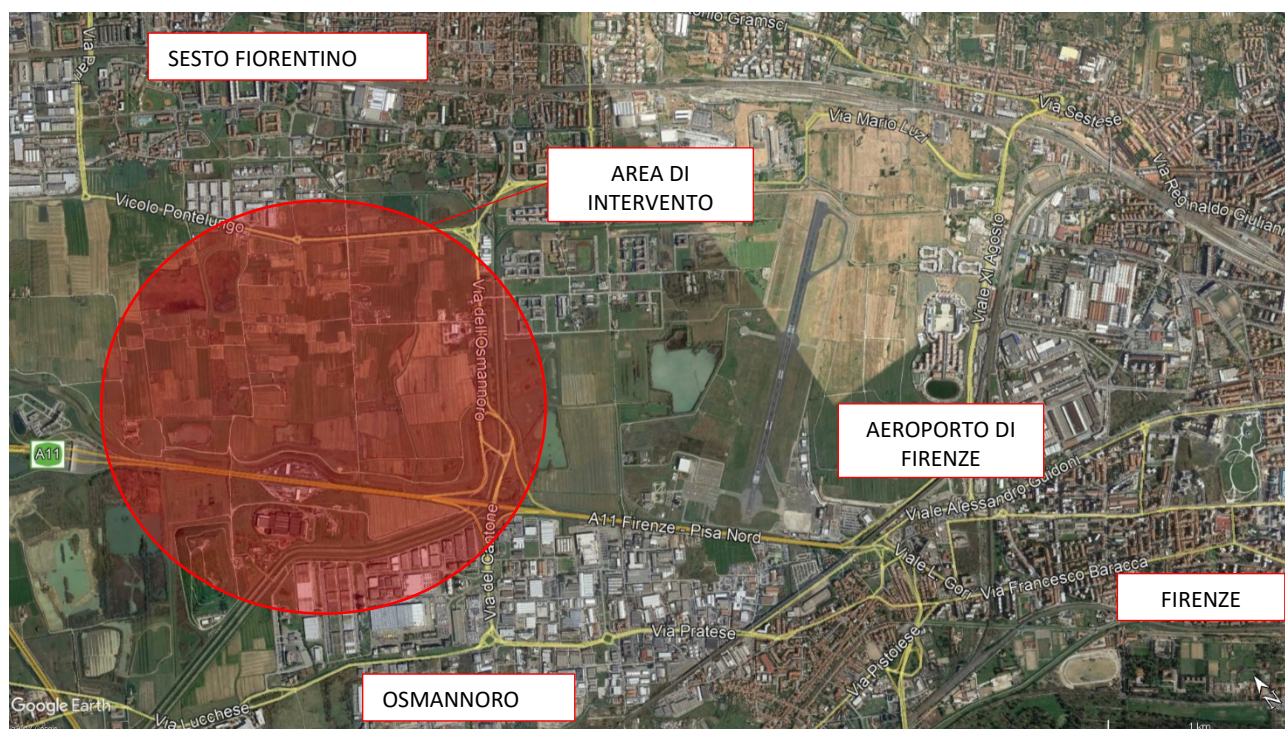


Figura 1 – Vista satellitare dell'area di progetto

Nel tracciato oggetto del presente progetto è possibile individuare 3 tratti principali:

- Tratto 1: Nuova viabilità locale di collegamento tra Sesto Fiorentino e Osmannoro (Tratto A-B) di lunghezza pari a 1355,11 m
- Tratto 2: Nuova viabilità di Servizio Aeroporto di lunghezza 940,39 m
- Tratto 3 : Nuovo tratto di riconnessione a Via del Pantano di lunghezza 565,82 m

Esso comprende inoltre la realizzazione di due nodi fondamentali:

- Nuova intersezione a rotatoria nei pressi del Polo Scientifico dell'Università di Firenze, in Comune di Sesto Fiorentino (Nodo A)
- Nuova intersezione a rotatoria a Sud della futura pista aeroportuale, connessa all'adeguamento dello svincolo autostradale di Sesto Fiorentino (Nodo B)

Verranno inoltre realizzate due rotatorie che consentiranno la circolazione dei mezzi pesanti per il trasporto merci dalla Stazione di Castello all'area logistica all'interno del sedime aeroportuale nei pressi del Parco Fotovoltaico. Si tratta del NODO E presso la Stazione Ferroviaria di Castello e NODO D esterno al sedime aeroportuale in corrispondenza del futuro Parco Fotovoltaico.

## 2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nella zona in studio affiorano i Depositi Olocenici, in particolare i Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna1 e bna2), i Depositi alluvionali attuali (b), i Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5) e i Depositi antropici, discariche per inerti e rifiuti solidi (h1), come riportato nella relazione geologica del progetto in esame e, in particolare, nella carta geologica ripresa dalla Carta Geologica della Regione Toscana – Servizio Geologico Regionale (Progetto Carg).

### 2.1 Modello geologico del sottosuolo

Come è possibile desumere dalla relazione geologica, il modello geologico del sottosuolo è stato definito distintamente per i diversi interventi. In particolar modo è opportuno, in questa relazione, riassumere la stratificazione geologica per la viabilità principale (Tratto A-B).

Seppure nello spessore di terreno limitato ai primi 2÷3 m esistono frequenti eteropie/variazioni litologiche sia verticali che orizzontali, il sottosuolo dell'area in oggetto può essere suddiviso, ai fini della modellazione geologica, in tre strati individuati mediante l'analisi litologica e stratigrafica, integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche (in particolare sulla base delle caratteristiche geomeccaniche evidenziate dalle CPT). Dall'alto verso il basso è possibile schematizzare la seguente successione:

- Da 0,00 a 0,30÷1,00 m dal p.c.: terreno di riporto (limo e sabbia o limo sabbioso con ghiaia e ciottoli/ghiaia e ciottoli in matrice sabbiosa) o argilla con limo (limo con argilla) debolmente sabbiosa;
- Da 0,30÷1,00 m a 1,40÷3,40 dal p.c.: limo con argilla in prevalenza debolmente sabbioso, a tratti ghiaioso, subordinatamente argilla con limo e talvolta debolmente sabbiosa;
- Da 1,40÷3,40 m (almeno) a 10,00 m da p.c.: argilla con limo, talora debolmente sabbiosa, subordinatamente limo con argilla debolmente sabbioso.

### 3 INQUADRAMENTO NORMATIVO

Per quanto riguarda gli aspetti contrattuali, si è fatto riferimento ai seguenti riferimenti legislativi:

- D.Lgs. n. 50/2016, "Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture"
- Linee guida attuative ANAC del Nuovo Codice degli Appalti e delle Concessioni
- D.Lgs. N°163 del 12 Aprile 2006 "Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi, forniture in attuazione delle Direttive 2004/17/CE e 2004/19/CE"
- D.P.R. n° 207 del 5 Ottobre 2010 "Regolamento di esecuzione ed attuazione del D.Lgs. 12 aprile 2006, n. 163"

Per ciò che concerne la progettazione stradale, si è fatto riferimento ai seguenti riferimenti legislativi:

- DM 05/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade"
- DM 19.04.2006 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali"

E' stato inoltre fatto riferimento alle seguenti normative sulla sicurezza stradale:

- Nuovo Codice della Strada - D.L. 30 Aprile 1992, n.285
- Regolamento di esecuzione e di attuazione del Nuovo Codice della Strada - D.P.R. 16 Dicembre 1992, n.495 -
- Modifica del decreto 5 novembre 2001, n. 6792, recante «Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade» - D.M. Infr. e Trasp. 22 Aprile 2004;
- Aggiornamento delle istruzioni tecniche per la progettazione, l'omologazione e l'impiego delle barriere stradali di sicurezza e le prescrizioni tecniche per le prove delle barriere di sicurezza stradale - D.M. Infr. e Trasp. 21 Giugno 2004



- Direttiva sui criteri di progettazione, installazione, verifica e manutenzione dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali - D.M. Infr. e Trasp. 25 Agosto 2004 -
- Regolamento recante norme per la definizione delle caratteristiche tecniche delle piste ciclabili - D.M. LL.PP. 30 Novembre 1999, n.5579
- Circolare n. 62032 del 21/07/2010 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Per quanto concerne le strutture, quali opere d'arte maggiori e minori, è stato fatto riferimento a:

- D. M. 14 gennaio 2008 (NTC 2008), "Norme Tecniche per le Costruzioni"
- Circolare 617 del 2 febbraio 2009, "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008"

Per quanto concerne gli aspetti ambientali, si è fatto riferimento alle seguenti normative:

- D.M. n. 161 del 10 agosto 2012 "Regolamento recante la disciplina dell'utilizzazione delle terre e rocce da scavo"
- D.P.R. n. 120 del 13 giugno 2017 "Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo"
- D. Lgs. n. 152 del 3 aprile 2006 "Norme in materia ambientale"
- D. Lgs. n. 4 del 16 gennaio 2008 "Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale"
- D.M. del 3 agosto 2005 "Definizione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica"
- D.M. 264/2016 e circolare esplicativa del Ministero dell'Ambiente del 30 maggio 2017

## 4 CARATTERISTICHE FUNZIONALI E GEOMETRICHE DELLA STRADA

### 4.1 Classificazione funzionale e criteri compositivi della piattaforma

La nuova pista aeroportuale RWY 11-29 interferisce a pieno con l'attuale rete viaria locale in ambito extraurbano che collega Sesto con l'Osmannoro. Il tracciato planimetrico della nuova viabilità ripristina il collegamento di cui sopra mediante l'attraversamento della nuova pista con un sottopasso. Nell'ambito dello sviluppo progettuale del tratto A-B si è prevista la realizzazione di una strada appartenente alla rete secondaria in ambito extraurbano del sistema globale delle infrastrutture stradali.

Tale scelta, incrementando il livello di rete, rispetto al livello della viabilità attuale, consente un aumento della velocità media di percorrenza e un miglioramento del servizio offerto all'aumentare del flusso di traffico.

Per quanto detto, la strada in progetto è stata correttamente classificata nell'ambito delle strade extraurbane -secondarie di categoria C1, caratterizzate, secondo Il Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 5/11/2001, dai seguenti aspetti funzionali:

- Movimento servito: penetrazione verso la rete locale
- Entità dello spostamento: distanza ridotta;
- Funzione nel territorio: interlocale in ambito extraurbano;
- Componenti di traffico: tutte le componenti.

Le categorie di traffico ammesse sulla strada, la loro localizzazione esterna o interna alla carreggiata e gli spazi assegnati in piattaforma sono riassunti nella Tabella 1.

Il progetto della sezione stradale, con l'organizzazione della piattaforma stradale e dei suoi margini, è stato effettuato tenendo conto dell'analisi della domanda di trasporto, in relazione all'ambito territoriale e all'utenza prevista, secondo le indicazioni del D.M. 5/11/2001. La composizione della carreggiata, i limiti dell'intervallo della velocità di progetto e le dimensioni da assegnare ai singoli elementi modulari sono riassunti nella Tabella 2 e nella Figura 2.



Tabella 1: Categorie di traffico ammesse in piattaforma

| Categorie di traffico                                                  | Localizzazione in piattaforma                                                          | Spazi assegnati in piattaforma       |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Pedoni<br>Animali                                                      | Esterno alla carreggiata (in piattaforma)<br>Esterno alla carreggiata (in piattaforma) | Banchina<br>Banchina/corsia          |
| Veicoli a braccia e a trazione animale                                 | In carreggiata                                                                         | Corsia                               |
| Velocipedi                                                             | Esterno alla carreggiata                                                               | Corsia/Pista ciclabile               |
| Ciclomotori<br>Autovetture                                             | In carreggiata<br>In carreggiata                                                       | Corsia<br>Corsia                     |
| Autobus                                                                | In carreggiata                                                                         | Corsia                               |
| Autocarri                                                              | In carreggiata                                                                         | Corsia                               |
| Autotreni e Autoarticolati<br>Macchine operatrici<br>Veicoli su rotaia | In carreggiata<br>In carreggiata<br>Non ammessa in piattaforma                         | Corsia<br>Corsia<br>-                |
| Sosta di emergenza                                                     | Parzialmente in carreggiata                                                            | Corsia/Banchina                      |
| Sosta<br>Accessi privati diretti                                       | Esterno alla carreggiata (in piattaforma)<br>Sì                                        | In appositi spazi<br>Passi carrabili |

Tabella 2: Principali caratteristiche ammesse in piattaforma

| Strada secondaria Extraurbana – Categoria C1                                   |                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Limite di velocità (km/h)                                                      | 90 km/h con 1 limitazione a 70 km/h                                                       |
| Numero delle corsie per senso di marcia                                        | 1                                                                                         |
| Limite inferiore velocità di progetto (km/h)                                   | 60 km/h                                                                                   |
| Limite superiore velocità di progetto (km/h)                                   | 100 km/h                                                                                  |
| Larghezza della corsia di marcia (m)                                           | 3,75 m                                                                                    |
| Larghezza minima dello spartitraffico (m)                                      | -                                                                                         |
| Larghezza minima della banchina in sinistra (m)                                | -                                                                                         |
| Larghezza minima della banchina in destra (m)                                  | 1,50 m                                                                                    |
| Larghezza della corsia di emergenza (m)                                        | -                                                                                         |
| Larghezza minima del margine interno (m)                                       | -                                                                                         |
| Larghezza minima del margine laterale (m)                                      | -                                                                                         |
| Livello di Servizio                                                            | C (1 corsia)                                                                              |
| Larghezza minima dei marciapiedi (m)                                           | -                                                                                         |
| Regolazione della sosta                                                        | -ammessa in piazzole di sosta                                                             |
| Regolazione dei mezzi pubblici<br>Regolazione del traffico pedonale<br>Accessi | Fermate organizzate in apposite aree a fianco della carreggiata<br>In banchina<br>Ammessi |

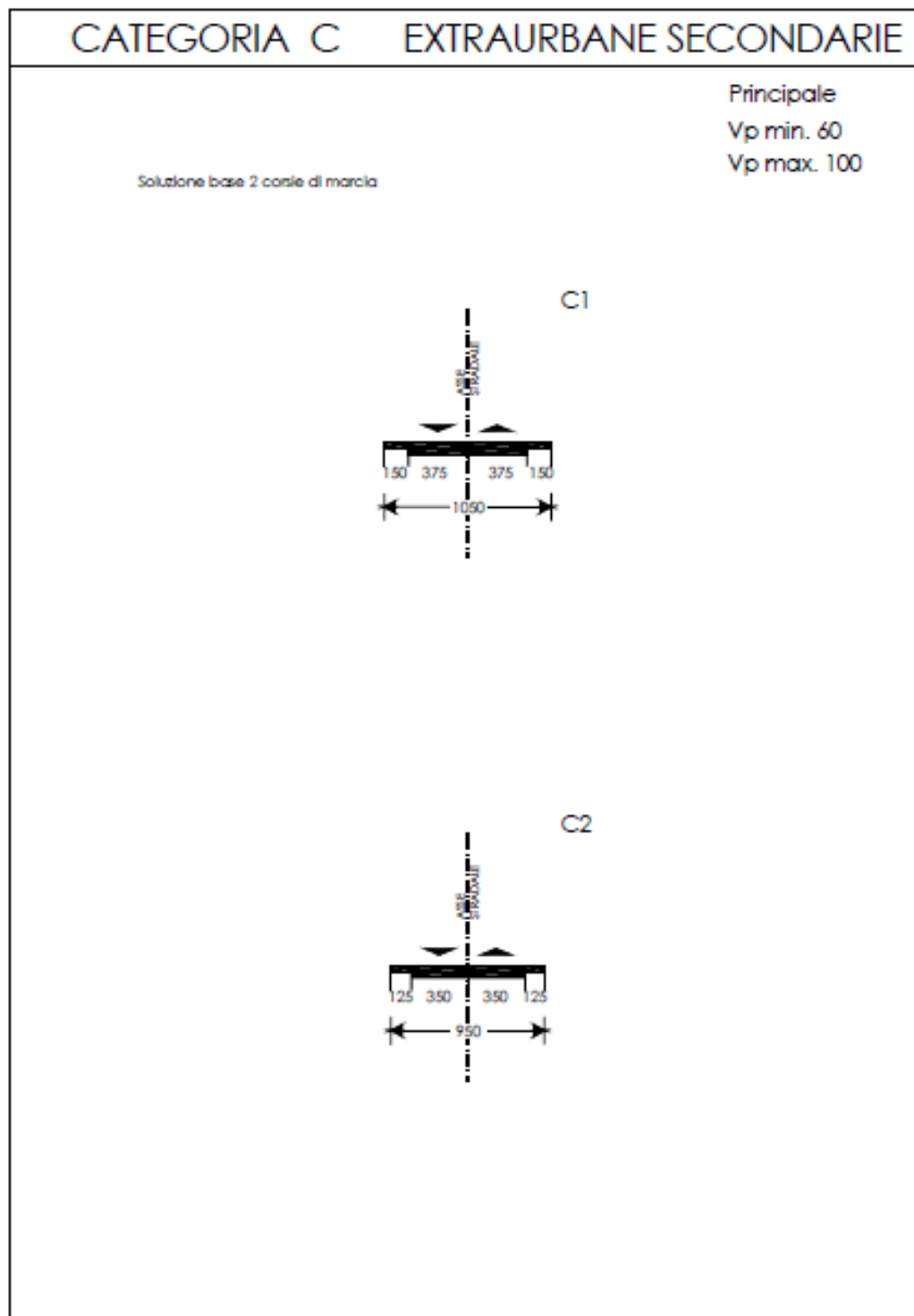


Figura 2: Organizzazione della piattaforma stradale per categoria C1 (estratto da D.M. 05/11/2001)

## 4.2 Allargamento delle corsie in curva

Lungo il tracciato di progetto è risultato necessario effettuare allargamenti in curva per quanto richiesto dalle norme al punto 5.2.7 (franchi sagoma limite).

Gli allargamenti sono stati calcolati secondo le modalità previste nel già citato D.M. 5/11/2001 e sono riportati all'interno della carreggiata. La maggiore larghezza, come si desume dalle sezioni stradali, viene successivamente ripartita equamente tra le due corsie individuate dalla segnaletica orizzontale. La banchina conserva invece la larghezza che ha nella sezione in rettilineo.

La verifica di visibilità è stata ovviamente condotta tenendo conto della traiettoria del veicolo sull'asse della corsia allargata.

## 4.3 Organizzazione della sede stradale

### 4.3.1 Sezione stradale in sede artificiale

Sulle opere di scavalco (ponti, viadotti e tombini) saranno mantenute invariate le dimensioni degli elementi componenti la piattaforma stradale definiti nel paragrafo precedente. Su entrambi i lati della piattaforma, oltre la banchina, sarà disposto un cordolo di larghezza variabile in cui alloggiare i dispositivi di ritenuta, mantenendo in qualsiasi caso una superficie calpestabile di larghezza pari ad almeno m 0.75 (passaggio tecnico). Il cordolo avrà diversa configurazione in funzione della categoria di strada.

Nello specifico per la strada di Categoria F "Strada locale Urbana" e per la strada di Categoria E "Urbana di quartiere" il cordolo sarà delimitato sul lato esterno da dispositivo di ritenuta invalicabile; per la strada di Categoria F1 "Strada Extraurbana locale" il cordolo è delimitato, lato banchina, da un ciglio sagomato e protetto da dispositivo di ritenuta invalicabile, mentre, sul lato esterno, è delimitato da un parapetto di altezza non inferiore a m 1,00, secondo le indicazioni del D.M. 05/11/2001 e del D.M. 4/5/90 "Aggiornamento delle norme tecniche per la progettazione, la esecuzione e il collaudo dei ponti stradali", par. 3.11.

La presenza del marciapiede di larghezza minima pari a m 0,75 è richiesta dalla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 25/02/1991 - *Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali*.

Nel paragrafi successivi vengono riportate le sezioni tipo delle opere di scavalco presenti nel tracciato in progetto.

### 4.3.2 Elementi marginali e di arredo della sede stradale

Le banchine saranno raccordate con gli elementi marginali contigui dello spazio stradale (scarpate, cunette, marciapiedi) mediante elementi di raccordo che possono essere costituiti, a seconda delle situazioni, da

arginelli o fasce di raccordo (cigli), destinati ad accogliere gli eventuali dispositivi di ritenuta. Le dimensioni minime di tali elementi di raccordo sono precisate nella Tabella 3.

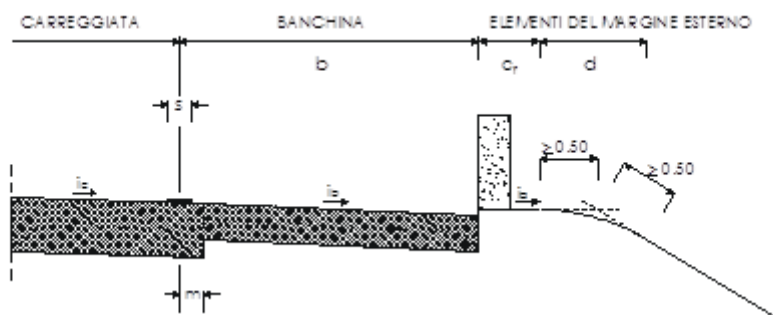


Figura 3: Elementi marginali della sede stradale

Tabella 3: Dimensioni degli elementi della sede stradale

| Elemento | Denominazione                                                  | Dimensione                       |
|----------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| S        | Striscia di delimitazione                                      | 0,12 m                           |
| M        | Bordo carreggiata                                              | ≥ 0,30 m                         |
| ic       | Pendenza trasversale carreggiata:<br>in rettilineo<br>in curva | 2,5%<br>$2,5\% \leq ic \leq 7\%$ |
| lb       | Pendenza trasversale banchina                                  | = ic                             |
| Cr       | Ciglio o arginello in rilevato                                 | 0,50 m                           |
| D        | Raccordo                                                       | 1,00 m                           |
| la       | Pendenza trasversale cr                                        | 4%                               |
| B        | Banchina                                                       | 1,50 m                           |

L'arginello, dimensionato in funzione della larghezza di lavoro del dispositivo di ritenuta, ha larghezza pari a 1.30 m e altezza rispetto alla banchina di 10 cm; tale elemento sarà raccordato alla scarpata mediante un arco le cui tangenti hanno lunghezza non inferiore a 0.50 m.

#### 4.3.3 Dispositivi di ritenuta

Il progetto prevede l'adozione di barriere bordo laterale di classe H1 e larghezza di lavoro W4 nei tratti in rilevato del tratto A-B; sulle rampe dello svincolo autostradale e nelle sezioni bordo ponte, è stata prevista l'installazione di barriere di classe H2 e larghezza di lavoro W4. Il progetto dei dispositivi di ritenuta è riportato più avanti nella presente relazione.

## 5 DESCRIZIONE DEL TRACCIATO

Il territorio su cui si sviluppa il tracciato di progetto è prevalentemente pianeggiante; per agevolare lo smaltimento delle acque meteoriche che interesseranno la piattaforma stradale, l'andamento altimetrico è stato definito mediante livellette successive, in salita e in discesa, raccordate con curve paraboliche di ampio raggio.

La geometria piano altimetrica del tracciato stradale è stata sviluppata nel rispetto delle norme sulle costruzioni stradali (DM 05/11/2001); le verifiche dei parametri geometrici relativi agli elementi planimetrici (rettifili, curve circolari e clotoidi) e ai raccordi altimetrici sono riportati nei tabulati di calcolo allegati alla presente relazione. Dall'esame delle suddette verifiche risulta che in linea generale tutti i parametri geometrici rispettano le norme sulle costruzioni stradali del DM 05/11/2001.

### Tratto 1 - Nuova viabilità extraurbana secondaria (Tratto A-B)

Il tratto in esame ha origine in corrispondenza della nuova intersezione a rotatoria (Nodo A), posta in prossimità del Polo Scientifico e Tecnologico dell'Università di Firenze nel Comune di Sesto Fiorentino (di seguito richiamato Polo Universitario), laddove attualmente è presente l'intersezione a raso tra Via dell'Osmannoro e Via delle Idee. Dopo un primo rettilineo di lunghezza 73,34 m il tracciato si avvicina alla pista aeroportuale con una curva di raggio 280m e si sviluppa in adiacenza all'area di laminazione del Tratto deviato di Fosso Reale fino al punto in cui scendendo con una livelletta di pendenza 3,8 % sotto attraversa la pista percorrendo un tratto in rettilineo di lunghezza 146,53 m fino a raggiungere una curva di raggio 200 m. Prima del termine della curva il tracciato si alza con una livelletta di pendenza 6,4 % lasciandosi alle spalle la pista per poi raggiungere e terminare, costeggiando la Nuova Inalveazione del Fosso Reale, mediante un rettifilo di lunghezza 27 m seguito da una curva di raggio 120 m, sulla nuova intersezione a rotatoria NODO B.

Il tracciato, come detto sopra, presenta una lunghezza di 1355,11 m di cui 412 m percorsi nel sottoattraversamento dove è stato imposto limite di velocità pari a 70 km/h.

Di seguito si riporta una sezione tipo con indicazione delle dimensioni di tutti gli elementi che costituiscono la sede stradale.

SEZIONE TIPO IN RILEVATO ASSE PRINCIPALE TRATTO AB IN RILEVATO Categoria "C"  
extraurbano secondaria (D.M. 5.11.2001)

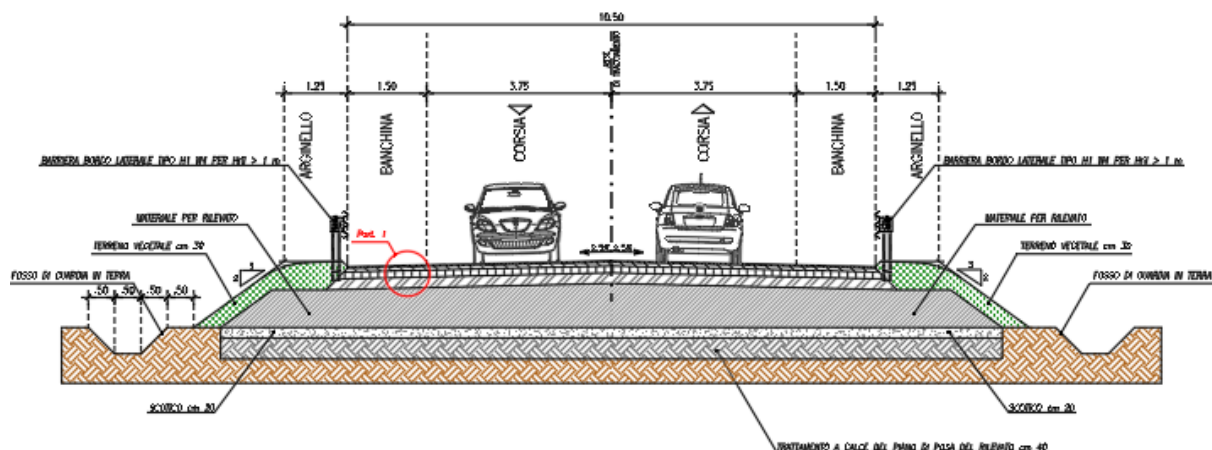


Figura 4 – Sezione tipo Viabilità Tratto A-B

## Tratto 2 – Nuova viabilità a servizio dell'area aeroportuale

La nuova viabilità a servizio dell'area aeroportuale si stacca dalla rotatoria del Nodo B e corre dapprima attorno all'area di compenso idraulico "C" e, concludendosi mediante una rotatoria C in prossimità dell'ingresso al sedime aeroportuale nei pressi del Ponte Che scavalca l'autostrada A11 nominato Ponte dei Giunchi. Tale viabilità sarà quindi fruibile dagli utenti per raggiungere l'aeroporto in aggiunta all'ingresso attualmente raggiungibile da Via Giovanni Luder. La sezione trasversale del tracciato è quella delle strade extraurbane locali di categoria F1.

Di seguito si riporta una sezione tipo con indicazione delle dimensioni di tutti gli elementi che costituiscono la sede stradale.



SEZIONE TIPO VIABILITÀ DI SERVIZIO AEROPORTO IN RILEVATO  
Categoria "F1" Locale ambito extraurbano(D.M. 5.11.2001)

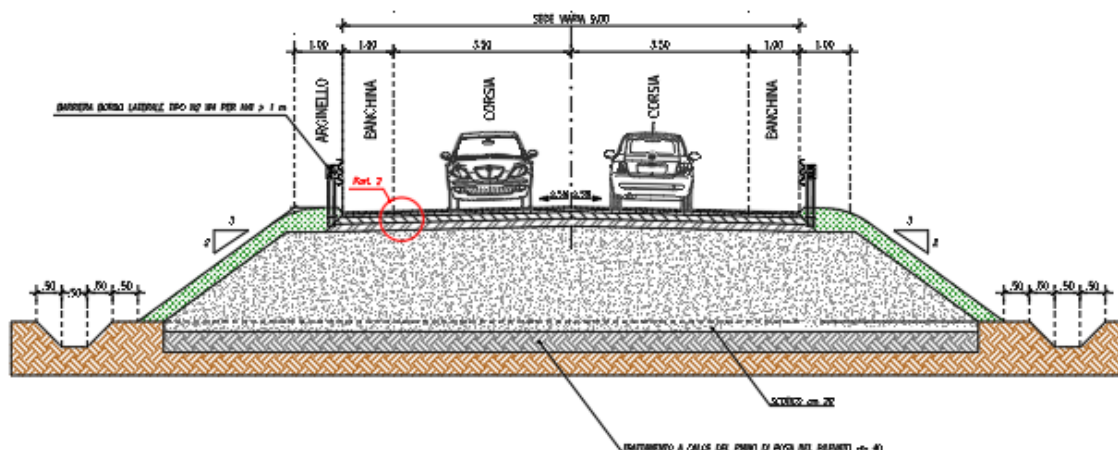


Figura 5 – Sezione tipo Viabilità interna aeroporto

### Tratto 3 – Nuovo tratto di riconnessione a Via del Pantano

La nuova area di laminazione “A” del Fosso Reale interferisce con la viabilità che attualmente collega Via Perfetti Ricasoli con Casa Passerini attraverso Via del Pantano. Per non interrompere tale collegamento si è reso necessario sviluppare un tratto di viabilità che consenta di “ricucire” la rete viaria locale. Il tracciato planimetrico del nuovo tratto ha origine in corrispondenza del ponte che attualmente oltrepassa l’autostrada A11 dirigendosi verso Nord costeggia, mediante un rettilo di lunghezza 383,38 m ad Est la nuova vasca di laminazione A mentre ad Ovest il nuovo tracciato del Nuovo canale di gronda fino ad oltrepassarlo con uno scatolare in corrispondenza dell’inizio della curva di raggio 75ml. Il nuovo tratto termina con un rettilo lungo 32 ml immettendosi nell’attuale Via del Pantano. La sezione trasversale del tracciato è quella delle strade extraurbane locali di categoria F2.

Di seguito si riporta una sezione tipo con indicazione delle dimensioni di tutti gli elementi che costituiscono la sede stradale

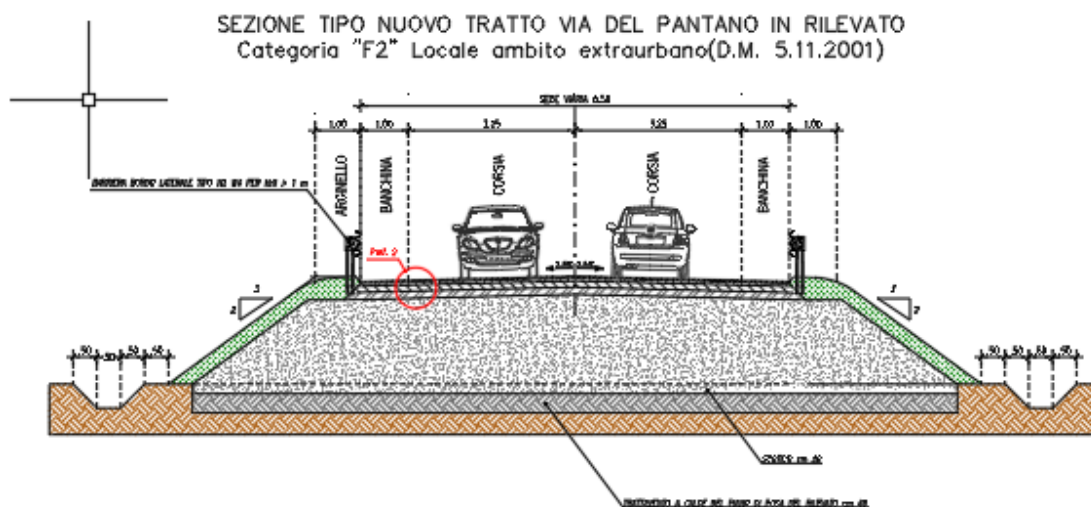


Figure 7: SAEzione tipo Via del Pantano

## 6 INTERSEZIONI

Le intersezioni sono state progettate nel rispetto delle norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali (decreto ministeriale del 19/04/2006), con particolare riferimento alle verifiche relative ai campi di visibilità, condotte secondo le modalità previste al punto 4.6-figura 12 del sopracitato D.M. e riportate nello specifico elaborato progettuale relativo a ciascuna intersezione.

### 6.1 Nodo A – nuova rotatoria in Via dell'Osmannoro

Il Nodo A si risolve mediante la realizzazione di un'intersezione a rotatoria posta su Via dell'Osmannoro, come già accennato nei paragrafi precedenti. La rotatoria presenta 4 bracci:

- Ramo Nord, proveniente da Sesto Fiorentino (Via dell'Osmannoro);
- Ramo Est, proveniente dal Polo Universitario (Via delle Idee);
- Ramo Sud, proveniente dalla località La Buca (Via dell'Osmannoro);
- Ramo Ovest, proveniente dall'area industriale di Osmannoro e dall'Autostrada A11 (Nuova viabilità tratto A-B).

Le caratteristiche geometriche dell'intersezione a rotatoria sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 4: Caratteristiche geometriche rotatoria Nodo A

| Elemento geometrico              | Dimensione [m] |
|----------------------------------|----------------|
| Diametro esterno $D_e$           | 50,0           |
| Larghezza corona giratoria $L_c$ | 6,0            |
| Diametro anello centrale $D_a$   | 33,0           |

|                                                        |      |
|--------------------------------------------------------|------|
| Larghezza bracci d'ingresso <i>Li</i> - Ramo Nord      | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita <i>Lu</i> - Ramo Nord        | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria <i>Ri</i> - Ramo Nord   | 15,5 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Nord  | 30,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso <i>Li</i> - Ramo Est       | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita <i>Lu</i> - Ramo Est         | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria <i>Ri</i> - Ramo Est    | 15,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Est   | 30,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso <i>Li</i> - Ramo Ovest     | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita <i>Lu</i> - Ramo Ovest       | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria <i>Ri</i> - Ramo Ovest  | 15,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Ovest | 27,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso <i>Li</i> - Ramo Sud       | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita <i>Lu</i> - Ramo Sud         | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria <i>Ri</i> - Ramo Sud    | 15,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Sud   | 30,0 |

Di seguito si riporta invece una vista planimetrica della rotatoria di progetto.

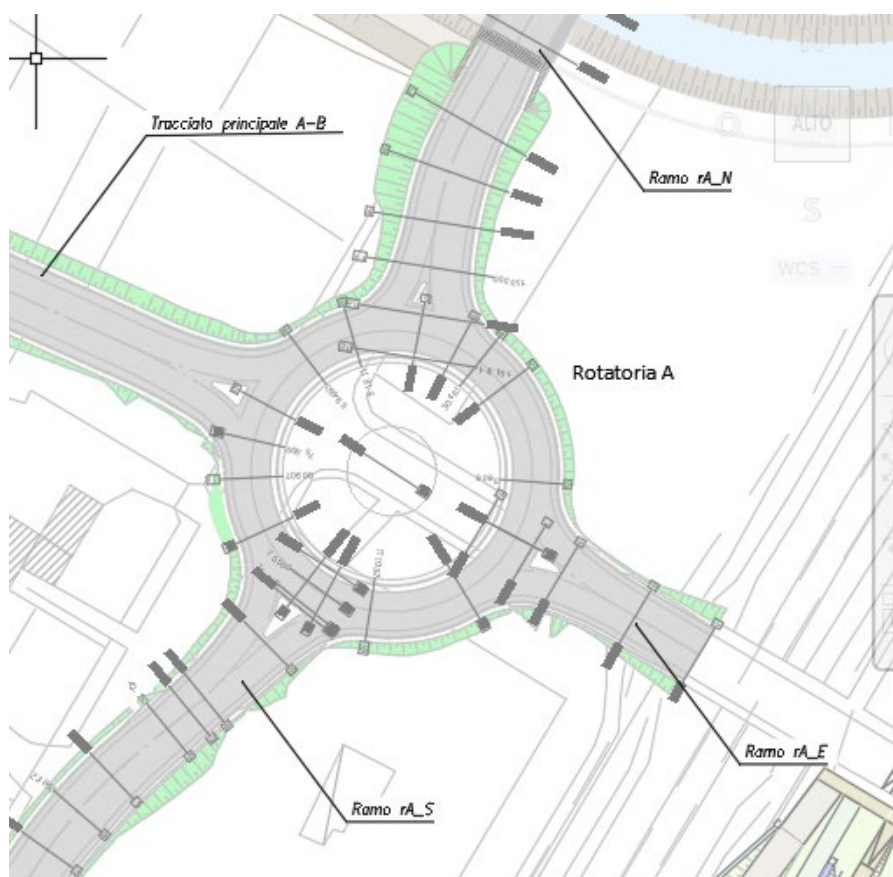


Figura 6 – Planimetria rotatoria Nodo A

## 6.2 Nodo B – nuovo svincolo autostradale

Il nodo autostradale si compone di due nuove rampe sulla carreggiata Nord, in sostituzione di quelle esistenti: una di uscita dall'Autostrada Firenze-Mare, per chi proviene da Firenze, e una di immissione in direzione A1.

Le caratteristiche geometriche delle rampe quali raggio planimetrico minimo, pendenza longitudinale massima, raggi minimi verticali, pendenza trasversale minima e massima, e distanza di visuale minima, sono conformi a quanto previsto dal D.M. 19.04.2006 per velocità di progetto al massimo pari a 50 e 60 km/h, rispettivamente per la rampa di ingresso e di uscita.

La sezione trasversale delle rampe, così come indicato nel suddetto decreto ministeriale per rampe monodirezionali, è composta da una corsia di larghezza 4,00 m e di banchine in destra e in sinistra di larghezza pari a 1,00 m.

Le suddette rampe confluiscono in una rotatoria convenzionale, avente diametro pari a 50 m. Nell'intersezione a rotatoria, a 4 bracci, convergono:

- Ramo Sud-Ovest, su cui si innestano la rampa di immissione all'Autostrada A11(direzione Pisa Nord) e la viabilità di accesso alla discarica "Case Passerini";
- Ramo Ovest in direzione del centro urbano di Sesto Fiorentino (Nuova viabilità tratto A-B);
- Ramo Est in direzione dell'Aeroporto di Firenze (viabilità interna aeroportuale);
- Ramo Sud-Est, su cui si innestano il collegamento con l'area industriale dell'Osmannoro (Via del Cantone) e la rampa autostradale dell'uscita di Sesto Fiorentino.

Le caratteristiche geometriche dell'intersezione a rotatoria sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 5: Caratteristiche geometriche rotatoria Nodo B

| Elemento geometrico                                | Dimensione [m] |
|----------------------------------------------------|----------------|
| Diametro esterno $D_e$                             | 50,0           |
| Larghezza corona giratoria $L_c$                   | 6,0            |
| Diametro anello centrale $D_a$                     | 34,0           |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Ovest     | 3,5            |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Ovest       | 4,5            |
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Ovest  | 13,0           |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Ovest | 15,0           |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Est       | 3,5            |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Est         | 4,5            |
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Est    | 13,0           |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Est   | 15,0           |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Sud-Ovest | 3,5            |

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| Larghezza bracci d'uscita <i>Lu</i> - Ramo Sud-Ovest       | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria <i>Ri</i> - Ramo Sud-Ovest  | 12,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Sud-Ovest | 15,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso <i>Li</i> - Ramo Sud-Est       | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita <i>Lu</i> - Ramo Sud-Est         | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria <i>Ri</i> - Ramo Sud-Est    | 13,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Sud-Est   | 15,0 |

Gli ingressi in rotatoria della nuova viabilità locale (ramo 2 e 4 dell'elenco sopra) sono a doppia attestazione, con larghezza pari a 6 m; in particolare, per garantire la priorità di ingresso in rotatoria ai veicoli che percorrono la rampa di uscita dall'Autostrada, sul ramo 4 è prevista una separazione fisica delle correnti fino a 20 m dalla zona di innesto. Le uscite sono tutte organizzate su unica corsia avente larghezza pari 4.5 m, come specificatamente richiesto dal D.M. 19.04.2006.

Di seguito si riporta invece una vista planimetrica della rotatoria di progetto.

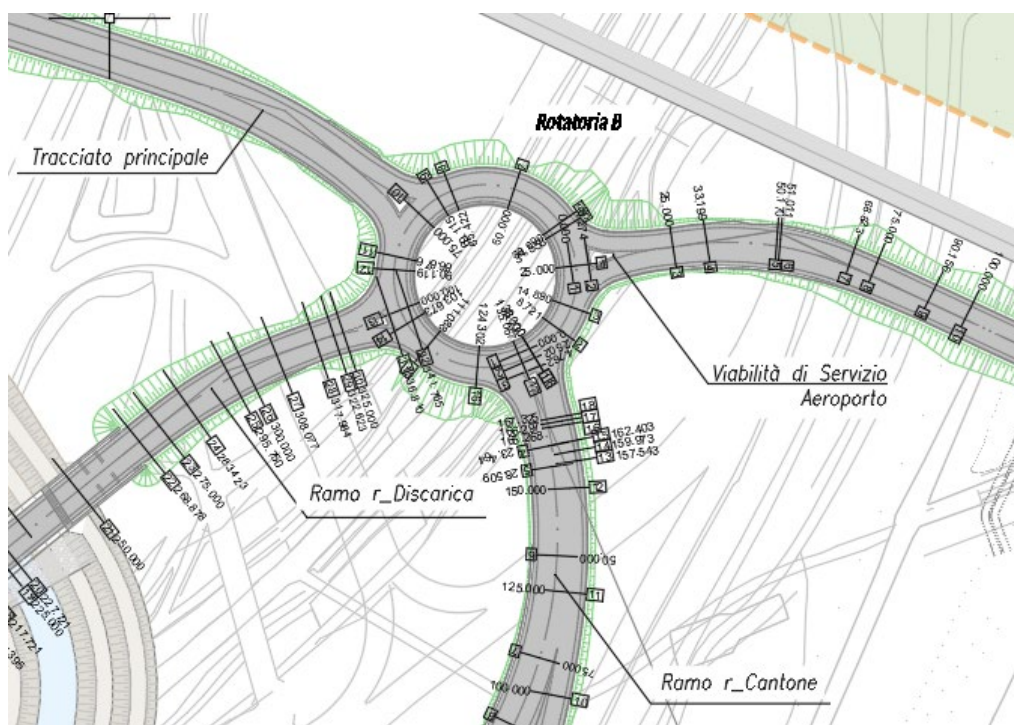


Figura 7 – Planimetria rotatoria Nodo B

Si fa presente che per limitare al minimo il disagio sulla viabilità, in fase di cantiere verranno previste alcune viabilità provvisorie che consentiranno il mantenimento di tutte le manovre attuali; con particolare riferimento ai flussi autostradali si prevede la realizzazione di una rampa di immissione provvisoria.



### 6.3 Nodo D nuova rotatoria in corrispondenza del futuro Parco Fotovoltaico

Il nodo D si risolve mediante una intersezione a rotatoria di diametro esterno 40 m a tre rami che consenta la circolazione dei mezzi pesanti per il trasporto merci provenienti dalla Stazione di Castello nella futura area logistica prevista all'interno del sedime aeroportuale:

- Ramo Sud su cui si innesta Via dei Cipressi strada di ingresso al sedime aeroportuale
- Ramo Nord Ovest su cui si innesta Via delle due Case in direzione area Logistica dalla Stazione di Castello
- Ramo Est in uscita dal Sedime Aeroportuale

Di seguito si riporta una vista planimetrica della rotatoria di progetto:

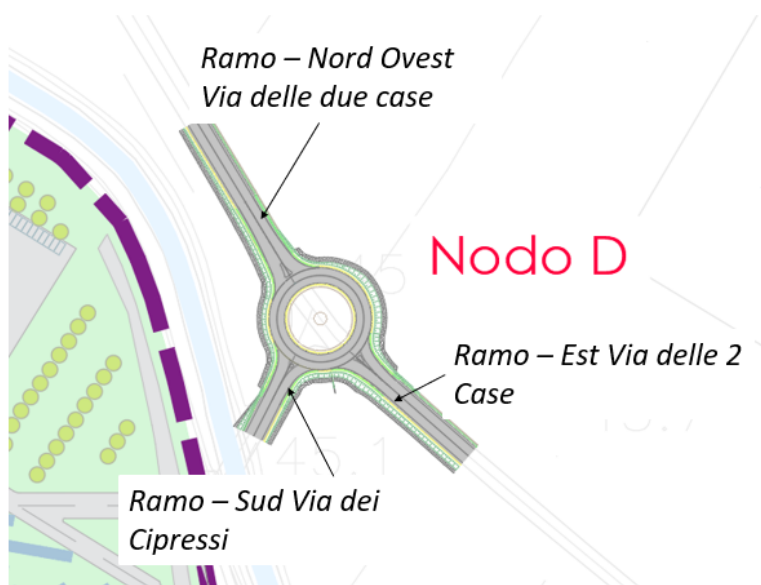


Figure 8:- planimetria rotatoria Nodo D

| Elemento geometrico                                     | Dimensione [m] |
|---------------------------------------------------------|----------------|
| Diametro esterno $D_e$                                  | 40,0           |
| Larghezza corona giratoria $L_c$                        | 6,0            |
| Diametro anello centrale $D_a$                          | 27,0           |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Nord-Ovest     | 3,5            |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Nord-Ovest       | 4,5            |
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Nord-Ovest  | 13,0           |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Nord-Ovest | 13,0           |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Est            | 3,5            |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Est              | 4,5            |

|                                                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Est  | 12,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Est | 15,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Sud     | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Sud       | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Sud  | 13,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Sud | 15,0 |

#### 6.4 Nodo E- nuova rotatoria in corrispondenza della Stazione di castello

Il nodo E si risolve mediante una intersezione a rotatoria di diametro esterno 48 m a 4 rami che permette il passaggio dei mezzi pesanti dalla Stazione di Castello verso l'Aeroporto e rappresenta un'ulteriore alternativa per la buona gestione dei flussi veicolari della viabilità locale:

- Ramo Nord su cui si innesta Via Pietro Fanfani che corre parallela alla stazione ferroviaria
- Ramo Est su cui si innesta Via Mario Luzi
- Ramo Ovest Su cui si innesta la nuova viabilità che proviene dalla stazione di Castello
- Ramo Sud su cui si innesta Via del Termine

Di seguito si riporta una vista planimetrica della rotatoria di progetto:



Figure 9:- Planimetria rotatoria NODO E

| Elemento geometrico                            | Dimensione [m] |
|------------------------------------------------|----------------|
| Diametro esterno $D_e$                         | 48,0           |
| Larghezza corona giratoria $L_c$               | 6,0            |
| Diametro anello centrale $D_a$                 | 33,0           |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Ovest | 3,5            |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Ovest   | 4,5            |



|                                                    |      |
|----------------------------------------------------|------|
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Ovest  | 25,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Ovest | 14,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Est       | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Est         | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Est    | 15,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Est   | 25,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Sud       | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Sud         | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Sud    | 13,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Sud   | 15,0 |
| Larghezza bracci d'ingresso $L_i$ - Ramo Nord      | 3,5  |
| Larghezza bracci d'uscita $L_u$ - Ramo Nord        | 4,5  |
| Raggio d'ingresso in rotatoria $R_i$ - Ramo Nord   | 13,0 |
| Raggio d'uscita dalla rotatoria $R_u$ - Ramo Nord  | 20,0 |

## 6.5 Verifiche sulle rotatorie di progetto

Per le intersezioni a rotatoria sono state effettuate sia le verifiche sui raggi di deflessione, sia quelle di visibilità.

### Verifiche sui raggi di deflessione

Il criterio principale per definire la geometria delle rotatorie riguarda il controllo della deviazione delle traiettorie in attraversamento del nodo. Infatti, per impedire l'attraversamento di un'intersezione a rotatoria ad una velocità non adeguata, è necessario che i veicoli siano deviati per mezzo dell'isola centrale.

La valutazione del valore della deviazione viene effettuata per mezzo dell'angolo di deviazione  $\beta$ . Per ciascun braccio di immissione si raccomanda un valore dell'angolo di deviazione  $\beta$  di almeno  $45^\circ$ .

Nel progetto della rotatoria in esame, l'angolo di deviazione  $\beta$  formato dalle tangenti alle isole triangolari e all'isola centrale assume un valore inferiore ai  $45^\circ$  minimi raccomandati dalla normativa italiana. Risulta pertanto essenziale misurare i raggi di deflessione e verificare che la traiettoria percorsa sia tale che la massima velocità risulti sempre inferiore alla massima consentita, fissata pari a 50 km/h.

Si definisce in particolare deflessione di una traiettoria il raggio dell'arco di cerchio che passa a 1,50 m dal bordo dell'isola centrale e a 2,00 m dal ciglio delle corsie di entrata e uscita, come mostrato in Figura 11. Tale raggio non deve superare il valore di 100 m; è preferibile adottare valori sensibilmente inferiori a questo limite massimo.

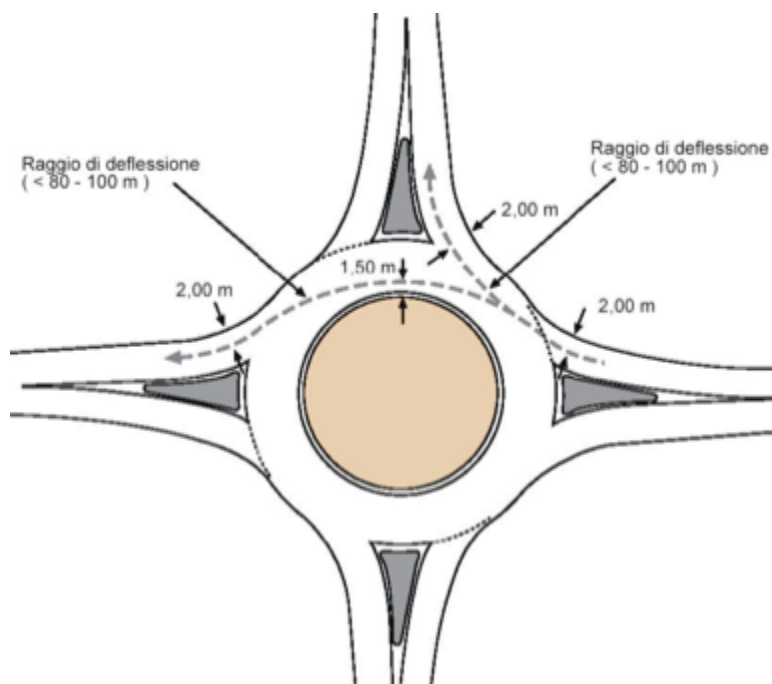


Figura 8 – Verifica raggi di deflessione

### Verifiche di visibilità

Il soddisfacimento del criterio della visibilità del quarto di corona serve ad assicurare agli utenti prossimi all'immissione in rotonda, la percezione dei veicoli all'interno della corona in tempo per modificare la propria velocità e quindi cedere il passaggio o eventualmente immettersi nell'anello.

Le modalità di verifica di questo criterio di visibilità, l'unico previsto dal DM 19/04/2006, si possono riassumere come segue:

- Si pone il punto di osservazione dell'utente ad una distanza di 15 m dalla linea di "dare precedenza", in mezz'ora della corsia di entrata in rotonda e ad un'altezza di 1 m sul piano viabile;
- Nel caso di rotonda a 4 o più bracci, la zona di cui è necessaria la visibilità completa corrisponde al quarto di corona giratoria posto alla sinistra del ramo di accesso, con l'aggiunta dell'area posta al di sotto dello stesso delimitata dalla retta così definita: passa per il punto di osservazione, è tangente alla circonferenza esterna e interseca il prolungamento del raggio che delimita superiormente il quarto di corona giratoria.

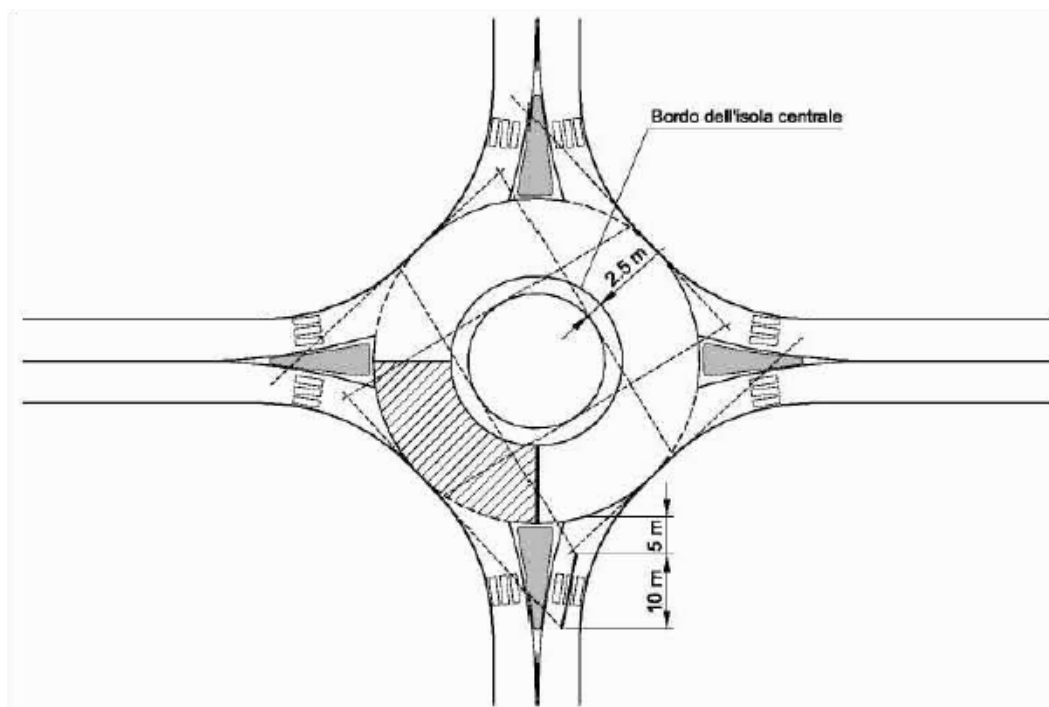


Figura 9 – Verifica di visibilità del quarto di corona

Per le intersezioni a rotatoria in progetto la verifica di visibilità del quarto di corona è sempre soddisfatta.

## 7 CORPO STRADALE

### 7.1 Rilevati

Il corpo del rilevato verrà realizzato con la terra proveniente dagli scavi per la realizzazione del sottoattraversamento della pista, opportunamente stabilizzata con leganti idraulici. La quota stradale di progetto è stata mantenuta mediamente alla quota di circa +1,00 m dal piano campagna.

Per quanto riguarda le fasi realizzative, si procederà alla preparazione del piano di posa, mediante allo scotico del terreno vegetale per uno spessore pari a 20 cm. In considerazione di quanto riportato precedentemente sulla caratterizzazione geologica dei terreni attraversati con la nuova viabilità di progetto e dell'altezza ridotta del rilevato (inferiore a 2,00 m), si rende necessario prevedere la stabilizzazione con calce del piano di posa del rilevato, per una profondità pari a cm 40, prima di procedere alla sua compattazione. Per la porzione del piano di posa del rilevato stabilizzato con calce, i valori di portanza CBR immediato (subito dopo addensamento) dovranno risultare maggiori del 10%. Tutto il piano di posa del rilevato e il sottofondo dovranno comunque garantire le prestazioni minime in termini di modulo di deformazione  $M_d$  riportate nel CSA in funzione della profondità rispetto al piano di posa della fondazione stradale.

## 8 SOVRASTRUTTURA STRADALE

Per quanto riguarda la viabilità locale (tratto A-B), la sovrastruttura sarà così composta:

- Fondazione di spessore pari a 20 cm in misto granulare costituito da aggregati vergini;
- Strato di base di spessore pari a 13 cm in conglomerato bituminoso;
- Strato di binder di spessore pari a 7 cm in conglomerato bituminoso;
- Strato di usura di spessore pari a 3 cm in conglomerato bituminoso.

### 8.1 Traffico di progetto

Per il dimensionamento della pavimentazione è necessario stabilire il volume di traffico che presumibilmente interesserà la strada durante il periodo di “vita utile”, in termini sia quantitativi che qualitativi. A causa della trascurabile influenza che gli autoveicoli hanno sul degrado di una sovrastruttura stradale, la componente di traffico che si considera per il calcolo è solo quella “pesante” ovvero quella composta dai veicoli commerciali (massa complessiva superiore a 3 tonnellate).

Nella fase di sviluppo progettuale attuale, trattandosi di un progetto di fattibilità tecnico economica, è stato valutato di utilizzare lo studio di traffico effettuato per la redazione del precedente Masterplan.

Lo studio di traffico di cui sopra tiene infatti conto di una configurazione viaria in forte evoluzione. Tuttavia, dato che l'infrastruttura è interessata da un volume di traffico maggiore, come è stato possibile desumere da un rilievo di traffico appositamente eseguito nel 2019, a favore di sicurezza è stato assunto un volume di traffico giornaliero medio (TGM), pari a circa 30 000 veicoli/giorno. Il tasso medio di crescita annuo è assunto pari all'1%.

Sulla base di tali informazioni è possibile calcolare il numero di passaggi di veicoli commerciali che si prevede transiterà sulla corsia di progetto (corsia più sollecitata) durante il primo anno di vita utile della sovrastruttura.

$$n_{\text{veicoli anno}} = g_L \cdot TGM \cdot p_c \cdot d$$

Dove:

- $g_L$  è il numero di giorni lavorativi in un anno pari a 300
- TGM è il traffico giornaliero medio sull'intera carreggiata
- $d$  è il coefficiente di distribuzione direzionale pari a 0,55

Il numero totale di passaggi di veicoli commerciali al termine della vita utile della pavimentazione è pari a:

$$N_c = n_{veicoli\ anno} \cdot \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Dove:

- $n$  è il numero di anni di vita utile prevista per la pavimentazione in esame, pari a 20
- $r$  è il tasso di incremento della motorizzazione, pari all'1%

Tramite gli spettri di traffico forniti dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali per le varie categorie di strade è possibile risalire alla frequenza di ciascuna classe di veicoli commerciali sul totale dei mezzi pesanti.

Tabella 6: Frequenza di ciascuna classe di veicoli commerciali

| STRADE EXTRAURBANE A FORTE TRAFFICO |      |             |
|-------------------------------------|------|-------------|
| N veicoli commerciali               |      | 10 899 407  |
| CLASSE                              | %    | N° passaggi |
| 1                                   | 0    | -           |
| 2                                   | 13.1 | 1 427 822   |
| 3                                   | 39.5 | 4 305 266   |
| 4                                   | 10.5 | 1 144 438   |
| 5                                   | 7.9  | 861 053     |
| 6                                   | 2.6  | 283 385     |
| 7                                   | 2.6  | 283 385     |
| 8                                   | 2.5  | 272 485     |
| 9                                   | 2.6  | 283 385     |
| 10                                  | 2.5  | 272 485     |
| 11                                  | 2.6  | 283 385     |
| 12                                  | 2.6  | 283 385     |
| 13                                  | 0.5  | 54 497      |
| 14                                  | 0    | -           |
| 15                                  | 0    | -           |
| 16                                  | 10.5 | 1 144 438   |

## 8.2 Dimensionamento della pavimentazione

La verifica prestazionale, in termini di vita utile, della pavimentazione è stata eseguita calcolando lo stato tenso-deformativo degli strati della sovrastruttura con metodo razionale mediante il software BISAR, sviluppato dalla Shell Research, e ampiamente diffuso ed applicato anche in Italia.

## 8.3 Il progetto delle sovrastrutture stradali flessibili

Le pavimentazioni stradali svolgono la funzione di ripartire sul terreno i carichi trasmessi dai veicoli, in particolare da quelli pesanti.

In linea di principio il metodo di progetto di una pavimentazione stradale non differisce sostanzialmente da quello di una qualsiasi altra struttura dell'ingegneria civile: note le caratteristiche meccaniche dei materiali da impiegare ed i carichi trasmessi dai veicoli, la sovrastruttura deve garantire un certo livello di integrità entro la cosiddetta vita utile.

In pratica però la grande variabilità dei materiali che possono essere impiegati, la difficoltà di definire compiutamente il danno subito e i livelli di carico, rendono il problema estremamente complesso.

Due sono i punti fondamentali che distinguono il progetto di una pavimentazione stradale da quello di una qualsiasi altra struttura civile:

- La difficoltà di individuare la natura e le caratteristiche intrinseche dei materiali impiegati, estremamente variabili con le condizioni climatiche e con la modalità di applicazione dei carichi;
- Il trascurare gli effetti prodotti dal peso proprio, in quanto la loro incidenza sullo stato tenso-deformativo è minimo rispetto a quella dei carichi accidentali (veicoli) e delle condizioni ambientali (temperatura e umidità).

Le moderne tecniche numeriche, basate sull'applicazione della teoria degli elementi finiti o del multistrato elastico, consentono di ricostruire al calcolatore un modello teorico della pavimentazione, costituita dalla sovrapposizione di differenti strati di conglomerato bituminoso, approssimando in modo più fedele possibile il suo comportamento reale. Tale algoritmo rientra tra i "metodi razionali" per il calcolo delle pavimentazioni flessibili che negli anni hanno sostituito i "metodi empirici" basati invece sull'osservazione diretta di tronchi stradali sperimentali.

I metodi fondati su una valutazione "razionale", cioè "per via di calcolo", si basano sullo studio del comportamento tenso-deformativo dei vari strati della pavimentazione attraverso cui si procede:

- Alla verifica del danno da fatica accumulato nei vari strati durante la vita utile della pavimentazione (legge di Miner);
- Alla verifica della profondità delle ormaie prodotte al termine della vita utile, le quali non devono superare il limite di tollerabilità per la funzionalità e la sicurezza del piano viabile.

Questo consente di associare ad ogni pavimentazione stradale, sottoposta ad un certo traffico, una *vita utile*, cioè di quel periodo di tempo, o di cicli di carico, al di là del quale la degradazione da essa subita ne rende necessario il rifacimento.



Si evidenzia che la vita utile della pavimentazione non esclude la necessità di interventi manutentivi non strutturali relativi al ripristino delle condizioni superficiali di regolarità ed aderenza.

#### 8.4 Dimensionamento sovrastrutturale con metodo razionale

Il processo progettuale per il dimensionamento strutturale di una pavimentazione stradale si basa principalmente su cinque passaggi:

- La definizione preliminare degli spessori di ogni singolo strato;
- La scelta dei materiali di impiego;
- La conoscenza dei dati di traffico e delle condizioni climatiche di esercizio;
- Il calcolo delle tensioni indotte dall'applicazione dei carichi;
- L'applicazione degli appropriati criteri di verifica.

In particolare la durata di una pavimentazione viene correlata al numero massimo di passaggi dell'asse standard che è in grado di sopportare prima di raggiungere il collasso strutturale.

Nota pertanto la classe di traffico assunta come riferimento, si determinerà il relativo stato tenso-deformativo indotto risolvendo la sovrastruttura tramite modelli di calcolo. Il massimo valore della deformazione orizzontale di trazione alla base degli strati legati sarà quindi utilizzato come dato di input per determinare, dalle curve di fatica, il numero massimo di cicli sopportabili dalla pavimentazione.

Sperimentalmente è stato dimostrato che tale operazione risulta cautelativa in quanto le curve di fatica determinate in laboratorio, o gli eventuali fattori di traslazione laboratorio-sito, sottovalutano il fenomeno del recupero (autoriparazione).

Tenuto conto che le proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi si modificano sensibilmente al variare della temperatura, tale operazione deve essere ripetuta per ciascun periodo dell'anno (stagione, mese, ecc.) a cui si associa una stessa temperatura media dell'aria. In particolare, sulla base delle temperature medie mensili dell'aria ricavate dalla stazione meteo più vicina alla zona interessata dal progetto, si può risalire alla temperatura del conglomerato bituminoso alla profondità  $z$  (espressa in centimetri) secondo la nota formula introdotta di Witczak:

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

Dove  $T_z$  è la temperatura alla profondità  $z$  e  $T_a$  è la temperatura dell'aria.

Ammettendo una ripartizione del traffico proporzionale nei giorni dell'anno di ciascun periodo (stagione, mese, ecc.), sarà possibile determinare il numero totale dei passaggi dell'asse standard che produce la rottura per fatica della pavimentazione sfruttando la legge di Miner, meglio nota come la legge "di accumulo lineare del danno da fatica".

La legge di Miner può essere enunciata nel modo seguente:

*"Se  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k$  sono le ampiezze delle deformazioni corrispondenti rispettivamente ad  $n_1, n_2, \dots, n_k$  cicli di carico applicati ad un materiale senza alcun ordine particolare, si produce la rottura per fatica quando la seguente disequazione è verificata con il segno di uguaglianza:*

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

Dove  $N_1$  è il numero di cicli di deformazione che porterebbe a rottura il materiale qualora l'ampiezza di deformazione fosse mantenuta costante pari a  $\varepsilon_1$ .

Supposto di aver risolto la struttura per un numero di periodi dell'anno pari a  $k$  determinando altrettante coppie di valori ( $\varepsilon_i, N_i$ ), l'equazione che consentirà di determinare il numero  $N_x$  di passaggi dell'asse standard che porta al collasso per fatica la pavimentazione sarà la seguente:

$$\sum_{i=1}^k \frac{\left(\frac{N_x}{k}\right)}{N_i}$$

Una volta individuato il numero totale  $N_x$  dei passaggi riferiti all'asse standard che la pavimentazione può sopportare, la determinazione della vita utile espressa in anni è calcolata dividendo tale valore  $N_x$  per la popolazione dei veicoli annui in assi standard equivalenti.

Nel caso si decida di suddividere l'anno in quattro periodi corrispondenti alle quattro stagioni, la determinazione del numero massimo di passaggi dell'asse standard assume la seguente espressione:

$$N_{tot} = \frac{4N_{tot1} \cdot N_{tot2} \cdot N_{tot3} \cdot N_{tot4}}{N_{tot2}N_{tot3}N_{tot4} + N_{tot1}N_{tot3}N_{tot4} + N_{tot2}N_{tot4} + N_{tot1}N_{tot2}N_{tot3}}$$

### 8.4.1 Verifica dei materiali legati

#### Legge di fatica assunta per materiali legati a bitume

La legge di fatica impiegata per l'analisi dei materiali legati a bitume è la legge di Finn. La procedura che ha portato ad ottenere i modelli di fatica più utilizzati, tra cui il modello di Finn, è quella di determinare le prestazioni a fatica del materiale in laboratorio, per poi, attraverso opportuni fattori di traslazione, ottenere risultati compatibili con il comportamento in esercizio.

La legge di Finn può essere espressa come:

$$N_t = 10^{-3.083} \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$$

Dove:

- $N_t$  è il numero di cicli di applicazione del carico, riferito all'asse standard considerato, che causa la fessurazione del 10% della superficie stradale;
- $\varepsilon_t$  è la deformazione orizzontale di trazione massima alla base degli strati legati a bitume riferita all'inizio della vita della pavimentazione;
- $E$  è il modulo complesso (espresso in MPa) dello strato più profondo in conglomerato bituminoso riferito alla temperatura effettiva dello strato stesso.

### 8.4.2 Verifica dei materiali non legati

#### Misti granulari non legati

Per evitare la formazione di ormaie sulla pavimentazione (Ferrari-Giannini "Ingegneria stradale Vol. II - Corpo stradale e pavimentazioni"), si deve limitare nella fondazione la deformazione verticale permanente  $\varepsilon_z$  e quindi la sollecitazione  $\sigma_z$ ,

Il controllo da effettuare per gli strati non legati di fondazione si basa sulla verifica dello stato tensionale di compressione verticale che, a seconda dei materiali, dovrà rispettare la seguente relazione:

$$\sigma_{z(max)} \leq 2 \div 4 \text{ Kg/cm}^2$$

#### Sottofondo

La natura ciclica dei carichi che transitano sulla superficie stradale è tale da produrre sulla sommità dello strato di fondazione e del terreno di sottofondo delle tensioni verticali  $\sigma_z$  che possono creare

avvallamenti sul piano viabile per effetto di accumulo di deformazioni plastiche  $\varepsilon_z$ . Tale evenienza è tanto più probabile quanto più elevato è il livello tenso-deformativo trasferito dalla sovrastruttura.

Analogamente a quanto visto per le leggi di fatica, esistono diversi criteri per la verifica razionale dello strato di fondazione e sottofondo. Il criterio proposto riprende il modello sviluppato dal Transport Research Laboratory (TRL):

$$\log N_z = -7,21 - 3,95 \cdot \log \varepsilon_z$$

Dove:

- $N_z$  è il numero di cicli di riferimento all'asse standard considerato che causa l'accumulo critico di deformazioni permanenti;
- $\varepsilon_z$  è la deformazione verticale di compressione sulla sommità dello strato (fondazione o sottofondo)

In particolare per i sottofondi, è necessario controllare che la massima tensione verticale  $\sigma_z$ , la quale non deve essere superata affinché, a causa del sommarsi di cedimenti plastici, non si producano ormaie nella pavimentazione. Tale valore è legato al numero di ripetizioni di carico  $N$  e al modulo  $E_d$  secondo la seguente relazione:

$$\sigma_z = \frac{0,006 \cdot E_d}{1 + 0,7 \cdot \log N}$$

## 8.5 Predimensionamento della pavimentazione

Il predimensionamento della pavimentazione è stato eseguito dapprima mediante l'utilizzo del "Catalogo delle Pavimentazione Stradali" del C.N.R. (B.U. n. 178/95) redatto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. Ciò al fine di determinare gli spessori di primo tentativo dei vari strati della pavimentazione, da utilizzare nel metodo semi-empirico, riportato nella "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993)" e utilizzato per le verifiche il numero di passaggi di assi equivalenti.

Per la realizzazione della viabilità in oggetto è stata scelta una sovrastruttura flessibile. Sulla base dei dati di traffico (numero totale dei veicoli commerciali transitanti durante la vita utile della strada, assunta pari a 20 anni), dei valori di portanza richiesti dal capitolato per il sottofondo (Modulo resiliente del sottofondo) e della categoria della strada di progetto (strada extraurbana secondaria a forte traffico), il Catalogo, per la sovrastruttura di progetto di tipo flessibile, fornisce gli spessori di seguito riportati.

Tabella 7: Spessori degli strati della pavimentazione ricavati dal Catalogo

| Strato     | Spessore |
|------------|----------|
| Usura      | 5 cm     |
| Binder     | 8 cm     |
| Base       | 18 cm    |
| Fondazione | 15 cm    |

La sovrastruttura stradale risultante dal predimensionamento è stata quindi verificata e ottimizzata (fino ad ottenere gli spessori di progetto riportati nei paragrafi precedenti) secondo la metodologia proposta dall'AASHTO (American Association of State Highway and Transport Officials), basata sull'osservazione diretta del comportamento di strutture già realizzate sotto l'azione di carichi stradali.

Tale metodo fornisce il numero di passaggi di un asse "standard" (asse singolo con ruote gemellate da 18 kips = 80 kN) che la sovrastruttura stradale è in grado di sopportare raggiungendo un fissato grado di ammaloramento finale ( $PSI_f$  = Present Serviceability Index).

La verifica eseguita con il metodo AASHTO consiste nel controllare che il numero di assi standard che la pavimentazione può sopportare sia maggiore del numero di assi equivalenti che transitano durante la vita utile della pavimentazione, calcolati attraverso lo spettro di traffico riportato nel "Catalogo delle Pavimentazione Stradali".

Per meglio comprendere le operazioni di dimensionamento mostrate nel seguito della presente relazione, è utile riportare alcuni passaggi analitici che stanno a monte dell'espressione fondamentale del dimensionamento.

L'indice assunto dall'AASHTO per valutare il decadimento della sovrastruttura è il PSI (Present Serviceability Index). Tale indice è funzione della media delle variazioni di pendenza del profilo, della profondità delle ormaie, della superficie delle buche e dei rattoppi, o di altre lesioni riferite all'unità di superficie. Il valore di PSI in corrispondenza di N passaggi di una data tipologia di asse è dato da:

$$PSI = PSI_0 - (PSI_0 - PSI_{lim}) \cdot \left(\frac{N}{\rho}\right)^\beta$$

Dove:

- $PSI_0$  è il valore del PSI all'inizio della vita utile della pavimentazione
- $PSI_{lim}$  è il valore del PSI per cui la pavimentazione si considera completamente dissestata

- N è il numero di passaggi di assi di ugual tipologia
- $\beta$  e  $\rho$  sono coefficienti funzione dell'indice di spessore della sovrastruttura e dei carichi

$$\beta = 0,4 + \frac{0,081 \cdot (L_1 + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} \cdot L_2^{3,23}}$$

$$\log \rho = 5,93 + 9,36 \cdot \log(SN + 1) - 4,79 \cdot \log(L_1 + L_2) + 4,33 \cdot \log L_2$$

Dove:

- $L_1$  è il peso dell'asse in esame espresso in kip (1kip = 4,45 kN)
- $L_2$  è il termine che assume valore 1,2 o 3 rispettivamente se l'asse è singolo, tandem o tridem
- SN è lo Structural Number, indice di spessore della pavimentazione espresso in pollici (1 pollice = 2,54 cm)

Lo Structural Number (o indice di spessore  $I_s$ ) rappresenta uno spessore equivalente della sovrastruttura che tiene di conto della resistenza strutturale della pavimentazione. Tale coefficiente è pari a:

$$SN = \sum_i a_i \cdot m_i \cdot s_i$$

Dove:

- $a_i$  è il coefficiente strutturale dell'i-esimo strato, funzione delle caratteristiche meccaniche del materiale in esame (modulo complesso per il conglomerato bituminoso o modulo resiliente per i materiali granulari)
- $m_i$  è il coefficiente di drenaggio dell'i-esimo strato
- $s_i$  è lo spessore dello strato i-esimo

Considerando le prime tre equazioni ed esprimendo lo SN in cm, la AASHTO, per il calcolo del numero di passaggi di assi standard che una pavimentazione è in grado di sopportare, ha proposto la seguente formula:

$$\log N_{80} = 9,36 \cdot \log \left( \frac{SN}{2,54} + 1 \right) - 0,2 + \frac{\log \left( \frac{PSI_0 - PSI_f}{PSI_0 - PSI_{lim}} \right)}{0,4 + \frac{1094}{\left( \frac{SN}{2,54} + 1 \right)^{5,19}}}$$

In tale espressione, al fine di tener conto della diversa capacità portante del sottofondo rispetto a quella studiata durante l'AASHTO Road Test e dell'aleatorietà delle grandezze in gioco, sono stati inseriti due ulteriori termini. Pertanto, l'espressione finale che fornisce il numero di passaggi di assi standard risulta essere la seguente:

$$\log N_{80} = Z_R \cdot S_o + 9,36 \cdot \log \left( \frac{SN}{2,54} + 1 \right) - 0,2 + \frac{\log \left( \frac{PSI_0 - PSI_f}{PSI_0 - PSI_{lim}} \right)}{0,4 + \frac{1094}{\left( \frac{SN}{2,54} + 1 \right)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log \frac{M_r}{6,89 \cdot 10^{-3}} - 8,07$$

Dove:

- I valori di PSI variano teoricamente dal valore ottimo di 5 al valore limite di 0 quando l'efficienza della pavimentazione è nulla. Tuttavia, a causa delle inevitabili imperfezioni superficiali l'indice di servizio iniziale  $PSI_0$  non è mai pari a 5, ma è generalmente assunto pari a 4,2. Il valore limite dell'indice di servizio  $PSI_{lim}$  in corrispondenze del quale la pavimentazione è completamente dissestata, si considera pari a 1,5. Il valore dell'indice di servizio finale  $PSI_f$  varia in funzione della tipologia di strada in esame.
- Il termine  $Z_R S_o$  rappresenta la deviazione standard nella predizione del traffico e della prestazione attribuita alla pavimentazione.
- $M_r$  rappresenta il modulo resiliente del sottofondo.

Le ipotesi assunte per il calcolo della pavimentazione secondo la relazione sopra riportata sono:

- Deviazione standard  $S_o$  pari a 0,45
- Parametro di affidabilità  $Z_R$  pari a -1,282, corrispondente ad un livello di affidabilità pari al 90%, coerentemente alle indicazioni del Catalogo delle Pavimentazioni del CNR per le strade extraurbane a forte traffico
- $PSI_0$  e  $PSI_{lim}$  pari ai valori indicati precedentemente
- $PSI_f$  pari a 2,5, coerentemente alle indicazioni del Catalogo delle Pavimentazioni del CNR per le strade extraurbane a forte traffico
- $M_r$  (modulo resiliente) del sottofondo pari a 90 MPa

Gli spessori degli strati della pavimentazione di progetto e i coefficienti per il calcolo dello Structural Number sono quelli riportati nella tabella seguente, dove è anche riportato il numero di passaggi che portano a rottura la pavimentazione di progetto.



Tabella 8: Calcolo dei passaggi ammessi della pavimentazione di progetto

| PASSAGGI AMMESSI                 |             |               |                    |                  |                    |                   |
|----------------------------------|-------------|---------------|--------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| strato                           | materiale   | spessore (cm) | coeff. strutturale | coeff. drenaggio | E* [MPa] @20°C 2Hz | CBR               |
| usura                            | congl. bit. | 3             | 0.44               | -                | -                  | -                 |
| binder                           | congl. bit. | 7             | 0.43               | -                | -                  | -                 |
| base                             | congl. bit. | 13            | 0.40               | -                | -                  | -                 |
| fondazione                       | misto gran. | 20            | 0.12               | 1                | 150                | -                 |
| sottofondo                       | -           | -             | -                  | -                | -                  | 9                 |
|                                  | SN          | 11.93         | PSIiniziale        | 4.2              |                    |                   |
|                                  | ZR          | -1.282        | PSIlimite          | 1.5              |                    |                   |
|                                  | S0          | 0.45          | PSIfinale          | 2.5              |                    |                   |
| <b>TOTALE</b>                    |             |               |                    |                  |                    | <b>24 925 592</b> |
| <b>dimensionamento corretto?</b> |             |               |                    |                  |                    |                   |
| <b>VERO</b>                      |             |               |                    |                  |                    |                   |

Nella tabella successiva si riporta invece il calcolo del numero di passaggi equivalenti da 80 kN, in base al traffico di progetto.

Tabella 9: Calcolo dei passaggi secondo il traffico di progetto

| tipo asse (kN)       | L1 peso (Kn) | L1 peso (kip) | L2 | b           | COEFF.EQUIV. (EALF) | n° passaggi   | passaggi equiv.   |
|----------------------|--------------|---------------|----|-------------|---------------------|---------------|-------------------|
| 10                   | 10           | 2.25          | 1  | 0.400435422 | 0.000282056         | -             | -                 |
| 15                   | 15           | 3.37          | 1  | 0.401136967 | 0.001168464         | 1 427 822.31  | 1 668             |
| 20                   | 20           | 4.49          | 1  | 0.402380555 | 0.003483358         | -             | -                 |
| 30                   | 30           | 6.74          | 1  | 0.40720541  | 0.017756709         | 1 427 822.31  | 25 353            |
| 40                   | 40           | 8.99          | 1  | 0.416412068 | 0.058697965         | 6 016 472.65  | 353 155           |
| 50                   | 50           | 11.24         | 1  | 0.431608993 | 0.149196521         | 2 343 372.50  | 349 623           |
| 60                   | 60           | 13.48         | 1  | 0.454491346 | 0.31700778          | 1 111 739.51  | 352 430           |
| 80                   | 80           | 17.98         | 1  | 0.530453092 | 1                   | 6 016 472.65  | 6 016 473         |
| 90                   | 90           | 20.22         | 1  | 0.587257764 | 1.57097047          | 283 384.58    | 445 189           |
| 100                  | 100          | 22.47         | 1  | 0.659186138 | 2.334482224         | 1 100 840.10  | 2 569 892         |
| 110                  | 110          | 24.72         | 1  | 0.748230271 | 3.327488653         | 1 427 822.31  | 4 751 063         |
| 120                  | 120          | 26.97         | 1  | 0.856426684 | 4.596730976         | 54 497.03     | 250 508           |
| 80 tandem            | 160          | 35.96         | 2  | 0.530453092 | 1.375541818         | 1 427 822.31  | 1 964 029         |
| 90 tandem            | 180          | 40.45         | 2  | 0.587257764 | 2.160935576         | 272 485.17    | 588 823           |
| 100 tandem           | 200          | 44.94         | 2  | 0.659186138 | 3.211177923         | 555 869.76    | 1 784 997         |
| 80 tridem            | 240          | 53.93         | 3  | 0.530453092 | 1.657584882         | 283 384.58    | 469 734           |
| 90 tridem            | 270          | 60.67         | 3  | 0.587257764 | 2.604016901         | 283 384.58    | 737 938           |
| 130 tridem           | 390          | 87.64         | 3  | 0.985853328 | 10.27795693         | 54 497.03     | 560 118           |
| <b>asse riferim.</b> | <b>80</b>    | 17.98         | 1  | 0.530453092 | 1                   | <b>TOTALE</b> | <b>21 220 993</b> |

Pertanto essendo il numero di passaggi di assi equivalenti ammessi dalla pavimentazione di progetto pari a 24 925 592 e quindi superiore al numero di passaggi di assi equivalenti calcolati in base al traffico di progetto, pari a 21 220 993, la pavimentazione risulta essere verificata.

Al fine di avere una maggiore certezza sul livello di prestazione della pavimentazione di progetto è stato quindi effettuato un calcolo con l'ausilio del software BISAR (ver. 3),

### 8.5.1 Il software BISAR

Il software BISAR, sviluppato dalla Shell Research, permette di calcolare le tensioni, le deformazioni e gli spostamenti in ogni punto di un sistema a multistrato elastico sottoposto a uno o più carichi uniformemente distribuiti su di un'impronta circolare.

Il sistema di riferimento è formato da piani orizzontali di spessore uniforme, infinitamente estesi in direzione orizzontale, composti da materiali isotropi, linearmente elastici ed omogenei. L'unica eccezione è lo stato di sottofondo che è considerato un semi-spazio infinitamente profondo.

I dati basilari di input richiesti dal software BISAR possono essere sintetizzati in:

- Numero ed entità dei carichi;
- Numero e spessore degli strati (eccetto il sottofondo perché considerato un semispazio);
- Moduli di Young e coefficienti di Poisson di ogni strato;
- Coordinate dei punti dove si vuole verificare lo stato tensionale e le deformazioni.

Occorre precisare che particolare attenzione è rivolta agli strati in conglomerato bituminoso in quanto la temperatura influenza severamente il comportamento e le prestazioni del materiale. Quindi, per tener conto della dipendenza dalla temperatura delle caratteristiche e delle risposte tensionali degli strati legati a bitume, l'analisi strutturale viene effettuata in riferimento a quattro diversi periodi, definiti relativamente alle temperature medie riscontrate nella zona di progetto.

Per il calcolo dello stato tenso-deformativo della sovrastruttura stradale si è assunto:

- Il traffico rappresentato da un carico normale massimo pari a 120 kN per asse standard (ESALS);
- Due ruote gemellate per asse standard, ossia con un carico di 30 kN gravante su ciascun pneumatico;
- Impronta di carico circolare di raggio pari a 10,93 cm per ciascun pneumatico.

### 8.5.2 Parametri di calcolo assunti

In primo luogo si sono individuate le temperature medie dei diversi strati in conglomerato bituminoso in funzione della temperatura dell'aria, distinguendo i diversi periodi stagionali.

Tabella 10: Temperature medie dell'aria in località Sesto Fiorentino (stazione metereologica)

| Periodo   | T aria media [°C] |
|-----------|-------------------|
| Inverno   | 10,4              |
| Primavera | 19,0              |

|         |      |
|---------|------|
| Estate  | 24,2 |
| Autunno | 12,9 |

Tabella 11: Calcolo delle temperature nei diversi strati in funzione della temperatura dell'aria

| Periodo 1 – Inverno   |                 |         |
|-----------------------|-----------------|---------|
| Strato                | Profondità [cm] | Tz [°C] |
| Usura                 | 1,5             | 15,6    |
| Binder                | 6,5             | 15,6    |
| Base                  | 16,5            | 15,5    |
| Periodo 2 – Primavera |                 |         |
| Strato                | Profondità [cm] | Tz [°C] |
| Usura                 | 1,5             | 27,3    |
| Binder                | 6,5             | 27,0    |
| Base                  | 16,5            | 26,5    |
| Periodo 3 – Estate    |                 |         |
| Strato                | Profondità [cm] | Tz [°C] |
| Usura                 | 1,5             | 34,3    |
| Binder                | 6,5             | 33,9    |
| Base                  | 16,5            | 33,1    |
| Periodo 4 – Autunno   |                 |         |
| Strato                | Profondità [cm] | Tz [°C] |
| Usura                 | 1,5             | 19,0    |
| Binder                | 6,5             | 18,9    |
| Base                  | 16,5            | 18,7    |

Per il sottofondo, cautelativamente, si assume un modulo pari a 90 MPa.

Per il calcolo sono stati assunti i parametri riportati in Tabella 13, 14, 15, 16.

Tabella 12: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 1

| Strato       | Spessore [cm] | Modulo elastico [MPa] | Coefficiente di Poisson |
|--------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| Usura in CB  | 3             | 3694                  | 0,30                    |
| Binder in CB | 7             | 5279                  | 0,30                    |

|                  |    |      |      |
|------------------|----|------|------|
| Base in CB       | 13 | 4228 | 0,30 |
| Fondazione in MG | 20 | 150  | 0,40 |
| Sottofondo       | -  | 90   | 0,40 |

Tabella 13: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 2

| Strato           | Spessore [cm] | Modulo elastico [MPa] | Coefficiente di Poisson |
|------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| Usura in CB      | 3             | 3108                  | 0,30                    |
| Binder in CB     | 7             | 4462                  | 0,30                    |
| Base in CB       | 13            | 3604                  | 0,30                    |
| Fondazione in MG | 20            | 150                   | 0,40                    |
| Sottofondo       | -             | 90                    | 0,40                    |

Tabella 14: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 3

| Strato           | Spessore [cm] | Modulo elastico [MPa] | Coefficiente di Poisson |
|------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| Usura in CB      | 3             | 2676                  | 0,30                    |
| Binder in CB     | 7             | 3858                  | 0,30                    |
| Base in CB       | 13            | 3143                  | 0,30                    |
| Fondazione in MG | 20            | 150                   | 0,40                    |
| Sottofondo       | -             | 90                    | 0,40                    |

Tabella 15: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 4

| Strato           | Spessore [cm] | Modulo elastico [MPa] | Coefficiente di Poisson |
|------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| Usura in CB      | 3             | 3547                  | 0,30                    |
| Binder in CB     | 7             | 5075                  | 0,30                    |
| Base in CB       | 13            | 4071                  | 0,30                    |
| Fondazione in MG | 20            | 150                   | 0,40                    |
| Sottofondo       | -             | 90                    | 0,40                    |

### 8.5.3 Analisi dei risultati

Coerentemente con i criteri di calcolo descritti nei precedenti paragrafi e in relazione ai parametri assunti per la pavimentazione in progetto, sono state eseguite le opportune modellazioni che hanno fornito i dati dello stato tenso-deformativo riportati in Tabella 17, Tabella 18, Tabella 19 e Tabella 20.

Tabella 16: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 1

|                                                                             |                  |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|
| Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume   | $\sigma_x$ [MPa] | 0,589 |
| Sollecitazione di compressione sul misto granulare                          | $\sigma_z$ [MPa] | 0,051 |
| Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo | $\sigma_z$ [MPa] | 0,031 |

Tabella 17: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 2

|                                                                             |                  |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|
| Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume   | $\sigma_x$ [MPa] | 0,557 |
| Sollecitazione di compressione sul misto granulare                          | $\sigma_z$ [MPa] | 0,056 |
| Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo | $\sigma_z$ [MPa] | 0,033 |

Tabella 18: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 3

|                                                                             |                  |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|
| Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume   | $\sigma_x$ [MPa] | 0,529 |
| Sollecitazione di compressione sul misto granulare                          | $\sigma_z$ [MPa] | 0,060 |
| Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo | $\sigma_z$ [MPa] | 0,035 |

Tabella 19: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 4

|                                                                             |                  |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|
| Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume   | $\sigma_x$ [MPa] | 0,581 |
| Sollecitazione di compressione sul misto granulare                          | $\sigma_z$ [MPa] | 0,052 |
| Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo | $\sigma_z$ [MPa] | 0,032 |

Per quanto riguarda le verifiche della sovrastruttura, per la verifica alla fessurazione degli strati in conglomerato bituminoso, si applica la Legge di Miner concernente l'accumulo del danno dovuto a sollecitazioni ripetute.

Deve essere pertanto verificato che, nell'arco della vita utile dell'infrastruttura (prevista pari a 20 anni), il numero di passaggi di assi standard (ESALS) calcolati sia minore del numero di cicli che portano al deterioramento della pavimentazione.

Si verifica inoltre a fatica il sottofondo.

Il traffico considerato per l'esecuzione delle verifiche a fatica è basato sui dati riportati precedentemente, trasformando il numero complessivo di veicoli commerciali al 2037 in passaggi di assi standard da 12 tonnellate (ESALS). Pertanto il numero complessivo di veicoli commerciali, pari a 10 889 407, corrisponde a 4 616 540 (4,62E+06) di assi standard da 12 tonnellate, utilizzando lo spettro di traffico per strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico. Il totale di passaggi di assi standard da 12 tonnellate per ciascun periodo stagionale è quindi pari a 1,155E+06, ipotizzando che il traffico sia ugualmente ripartito nel corso dell'anno.

In Tabella 21, 22, 23, 24 si riportano le verifiche degli stati tensionali per gli strati non legati della pavimentazione in progetto.

Tabella 20: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 1

| Strato           |                  | Sollecitazione di calcolo | Sollecitazioni massime ammissibili |
|------------------|------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Fondazione in MG | $\sigma_z$ [MPa] | 0,051                     | 0,200                              |
| Sottofondo       | $\sigma_z$ [MPa] | 0,031                     | 0,095                              |

Tabella 21: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 2

| Strato           |                  | Sollecitazione di calcolo | Sollecitazioni massime ammissibili |
|------------------|------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Fondazione in MG | $\sigma_z$ [MPa] | 0,056                     | 0,200                              |
| Sottofondo       | $\sigma_z$ [MPa] | 0,033                     | 0,095                              |

Tabella 22: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 3

| Strato           |                  | Sollecitazione di calcolo | Sollecitazioni massime ammissibili |
|------------------|------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Fondazione in MG | $\sigma_z$ [MPa] | 0,060                     | 0,200                              |
| Sottofondo       | $\sigma_z$ [MPa] | 0,035                     | 0,095                              |

Tabella 23: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 4

| Strato           |                  | Sollecitazione di calcolo | Sollecitazioni massime ammissibili |
|------------------|------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Fondazione in MG | $\sigma_z$ [MPa] | 0,052                     | 0,200                              |
| Sottofondo       | $\sigma_z$ [MPa] | 0,032                     | 0,095                              |

In Tabella 25 si riportano le verifiche a fatica degli strati in conglomerato bituminoso.

Tabella 24: Risultati della verifica a fatica della pavimentazione – calcolo coefficiente di danno

| Verifica a fatica strati in conglomerato bituminoso della pavimentazione |                                         |           |            |                                |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|------------|--------------------------------|
| Condizione di carico                                                     | Deformazioni $\epsilon$ [ $\mu$ strain] | Ni        | Neff       | Coefficiente di danno parziale |
| Condizione 1                                                             | 88,9                                    | 1,155E+06 | 14,211E+06 | 0,08                           |
| Condizione 2                                                             | 99,2                                    | 1,155E+06 | 11,334E+06 | 0,10                           |
| Condizione 3                                                             | 108,8                                   | 1,155E+06 | 9,413E+06  | 0,12                           |
| Condizione 4                                                             | 91,2                                    | 1,155E+06 | 26,909E+06 | 0,04                           |
| <b>Coefficiente di danno totale</b>                                      |                                         |           |            | <b>0,348</b>                   |

Dai risultati si evince che la pavimentazione in progetto soddisfa le verifiche per quanto riguarda la fatica negli strati in conglomerato bituminoso.

In Tabella 26 si riportano le verifiche a fatica del sottofondo

Tabella 25: Risultati della verifica a fatica del sottofondo

| Verifica a fatica strato di sottofondo |                                         |           |            |                                |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|------------|--------------------------------|
| Condizione di carico                   | Deformazioni $\epsilon$ [ $\mu$ strain] | Ni        | Neff       | Coefficiente di danno parziale |
| Condizione 1                           | 88,9                                    | 1,155E+06 | 10,988E+06 | 0,10                           |
| Condizione 2                           | 99,2                                    | 1,155E+06 | 8,040E+06  | 0,14                           |
| Condizione 3                           | 108,8                                   | 1,155E+06 | 6,205E+06  | 0,19                           |
| Condizione 4                           | 91,2                                    | 1,155E+06 | 20,398E+06 | 0,06                           |
| <b>Coefficiente di danno totale</b>    |                                         |           |            | <b>0,491</b>                   |

La pavimentazione in progetto garantisce per l'intera sovrastruttura una vita utile superiore a 20 anni.



## 9 OPERE D'ARTE

Nel progetto sono presenti quattro opere d'arte principali:

- Il ponte sull'attuale Via dell'Osmannoro, che attraversa il Nuovo Fosso Reale nel suo tratto iniziale ("Ponte sul Fosso Reale");
- Il ponte sul ramo di collegamento alla scarica e alla rampa di immissione sull'Autostrada A11, che scavalca sempre il Nuovo Fosso Reale ("Ponte su Rampa di accesso A11");
- Il Nuovo sotto attraversamento della pista aeroportuale denominato Sottopasso RWY 11-29.

I ponti sono tutti realizzati con travi in c.a.p. a cassone, la cui lunghezza e altezza sono diverse per le tre opere.

Tutti gli impalcati sono idonei per il transito dei carichi mobili di 1<sup>a</sup> categoria (N.T.C. 2008 al punto 5.1.3.3.4).

La quota di imposta degli impalcati è stata determinata tenendo conto del livello di piena relativo ad un tempo di ritorno pari a 200 anni previsto dal progetto idraulico; è stato quindi assunto un franco di sicurezza pari ad almeno 1,50 m, rispetto a tale livello. Inoltre, la quota di imposta, è stata ulteriormente incrementata per tenere conto anche dell'eventuale futuro adeguamento delle arginature del Fosso Reale nel tratto in cui esso non viene deviato; ciò impedirà la tracimazione delle acque in tutto il suo percorso.

### **"Ponte sul Fosso Reale"**

Il ponte sul Fosso Reale è composto da un impalcato di larghezza pari a 11,60 m e luce di calcolo pari a 26,00 m. È presente una corsia per senso di marcia, e le banchine. L'impalcato è costituito da 5 travi a cassone in c.a.p. di lunghezza pari a 26,60 m e di altezza pari a 1,20 m. Di seguito si riporta una sezione tipo con indicazione delle dimensioni di tutti gli elementi che costituiscono la sede stradale.

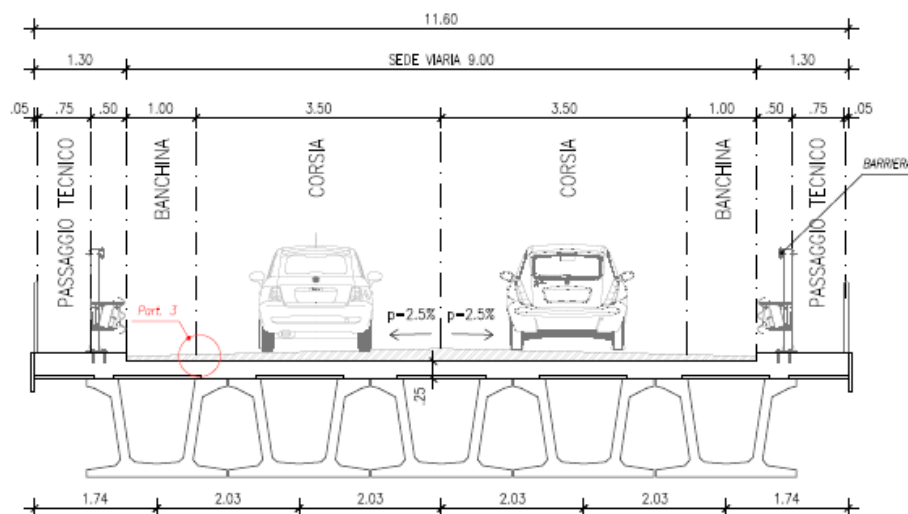


Figura 10 – Sezione tipo Ponte sul Fosso Reale

### “Ponte su Rampa di accesso A11”

Il ponte sul ramo di collegamento alla Rampa di immissione sull’autostrada A11 è composto da un impalcato di larghezza pari a 11,60 m e luce di calcolo pari a 36,00 m. È presente una corsia per senso di marcia e le banchine. L’impalcato è costituito da 5 travate a cassone in c.a.p. di lunghezza pari a 36,60 m e di altezza pari a 1,40 m. Di seguito si riporta una sezione tipo con indicazione delle dimensioni di tutti gli elementi che costituiscono la sede stradale.

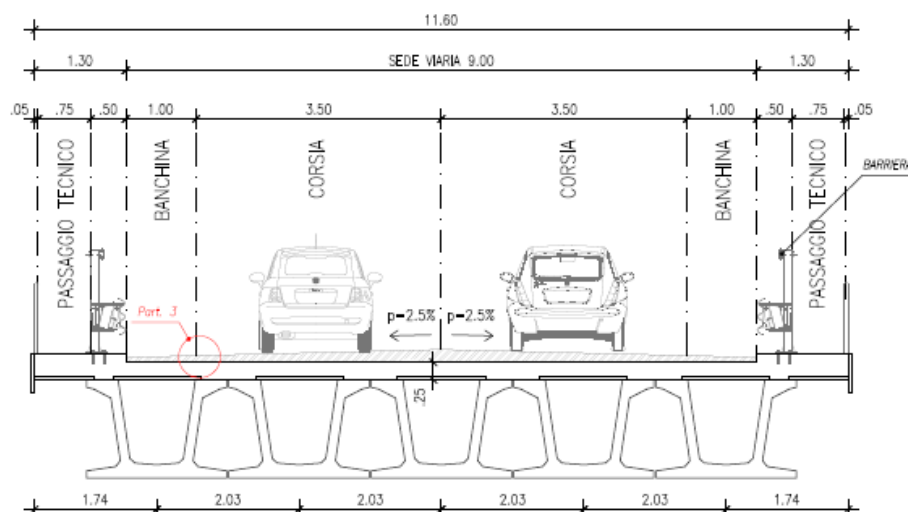


Figura 11 – Sezione tipo Ponte su Rampa di accesso A11

### **“Sottopasso RWY 11-29 Galleria Metodo Milano Top Down”**

Per consentire il collegamento tra Sesto e l’Osmannoro, come precedentemente descritto, è prevista la realizzazione di un’opera di sottoattraversamento, una galleria artificiale a sezione scatolare che complessivamente misura circa 412 e presenta una sezione stradale di larghezza massima di 14,43 ml.

Come tecnologia, per limitare scavi eccessivi e quindi ridurre l’esposizione ad eventi atmosferici e conseguenti potenziali allagamenti di un’ampia area di cantiere con tutto ciò che potrebbe determinare in termini gestione del cantiere si è optato per una tecnica di scavo TOP-DOWN (METODO MILANO) .

Questo approccio risulta di notevole efficacia in presenza di cantieri urbani o dove si intenda interferire al minimo con attività preesistenti; nel caso di specie risulta particolarmente interessante per la coesistenza con l’esercizio aeroportuale attività che richiede di minimizzare la presenza delle lavorazioni a favore della massima sicurezza del volo.

La galleria è formata da due corpi principali: un telaio esterno costituito da diaframmi laterali (80 cm) in scavati in continuità realizzati preventivamente e le cui testate vengono solidarizzate da cordoli, in una seconda fase vengono varate travi prefabbricate in c.a.p. ; una volta resa continua la struttura prefabbricata si gettano i traversi e la soletta di impalcato.

Il terreno viene scavato a foro cieco al di sotto dell’impalcato, che fa da puntone in testa ai diaframmi, completata questa fase la struttura risulta ancora non completamente reinterrata, ma comunque soggetta al transito degli automezzi di cantiere.

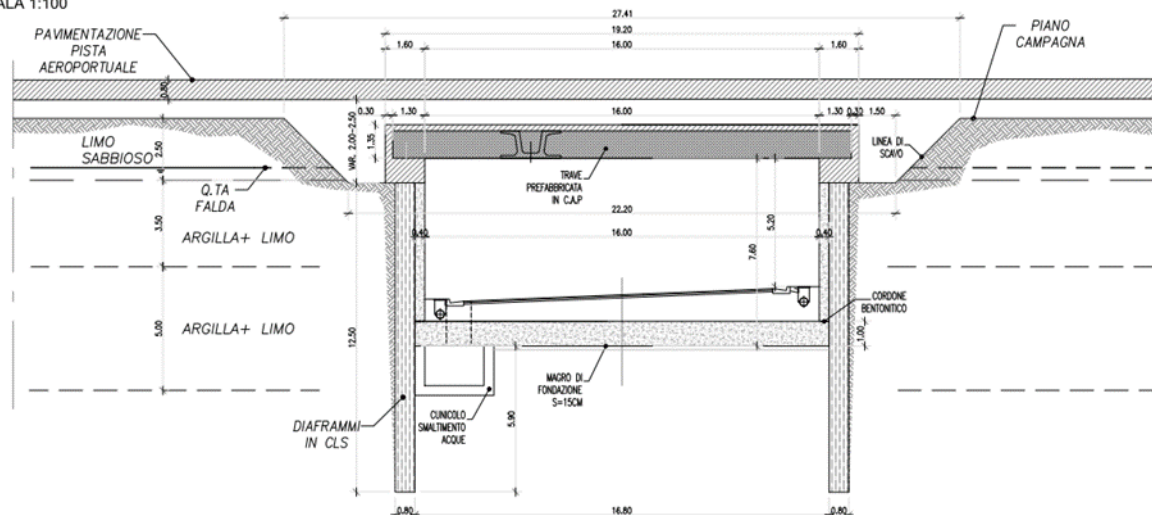
All’interno si realizza la vasca in c.a. impermeabile secondo il metodo della “vasca bianca”, mentre le pareti della vasca vengono agganciate ai cordoli diaframmi. L’estradosso delle vasche è posto al di sotto del piano a finire, pertanto l’intera idraulica di piattaforma è stata progettata e dimensionata per essere contenuta all’interno della vasca stessa (collettori, scarichi laterali e canalette di raccolta), la quale verrà realizzata con fondazione in perfetta continuità e assenza di giunti strutturali intermedi.

Per la parte immersa si adottano calcestruzzi impermeabili e, posando opportunamente in fase di costruzione dei giunti di fessurazione, in fase definitiva è possibile conseguire la perfetta tenuta dei conci reiniettando le apposite canalette lungo i giunti di costruzione.

La fondazione in c.a. della vasca costituisce anche il sottofondo rigido di base della pavimentazione stradale, formata da un pacchetto di tipo drenante, particolare attenzione verrà rivolta a garantire una limitata

fessurazione di estradosso. Nell'analisi strutturale esecutiva si terrà conto delle possibili distorsioni differenziali (variazioni termiche e ritiro per le diverse fasi costruttive) che le strutture possono subire.

GALLERIA ARTIFICIALE  
SCALA 1:100



Sezione tipo Galleria

Le opere oggetto della presente relazione sono state progettate e calcolate secondo i metodi della scienza delle costruzioni, adottando per le verifiche il criterio degli stati limite (S.L.). I criteri generali di sicurezza, le azioni di calcolo e le caratteristiche dei materiali sono stati assunti in conformità con D.Min. Infrastrutture e dei Trasporti 17 Gennaio 2018 e allegato Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" – NTC 2018, Circolare 21 gennaio 2019 n.7 "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018". Con riferimento alle NTC, per le opere in oggetto si considerano i seguenti parametri di calcolo: Vita nominale  $VN = 50$  anni (§ 2.4.1 "Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale"): Classe d'uso IV ; Coefficiente d'uso  $CU = 2.0$  ; Periodo di riferimento  $VR = VN \cdot CU = 100$  anni  $\geq 35$  anni.

Le opere provvisorie, accessorie alla realizzazione delle opere in progetto, sono state sempre progettate e calcolate adottando il criterio degli stati limite (S.L.), con i seguenti parametri di calcolo: Vita Nom. = 10 anni Classe d'uso II ; Coefficiente d'uso  $CU = 1.0$ ; Periodo di riferimento  $VR = VN \cdot CU = 10$  anni  $\geq 35$  anni

## 10 BARRIERE DI SICUREZZA

### 10.1 Premessa

A seconda della loro destinazione ed ubicazione, le barriere e gli altri dispositivi si dividono nei seguenti tipi:

- a) barriere centrali da spartitraffico;
- b) barriere laterali;
- c) barriere per opere d'arte, quali ponti, viadotti, sottovia, muri, ecc.;
- d) barriere o dispositivi per punti singolari, quali barriere per chiusura varchi, attenuatori d'urto per ostacoli fissi, letti di arresto o simili, terminali speciali, dispositivi per zone di approccio ad opere d'arte, dispositivi per zone di transizione e simili.

### 10.2 Finalità dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali

Le barriere di sicurezza stradale e gli altri dispositivi di ritenuta sono posti in opera essenzialmente al fine di realizzare per gli utenti della strada e per gli esterni eventualmente presenti, accettabili condizioni di sicurezza in rapporto alla configurazione della strada, garantendo, entro certi limiti, il contenimento dei veicoli che dovessero tendere alla fuoriuscita dalla carreggiata stradale.

Le barriere di sicurezza stradale e gli altri dispositivi di ritenuta devono quindi essere idonei ad assorbire parte dell'energia di cui è dotato il veicolo in movimento, limitando contemporaneamente gli effetti d'urto sui passeggeri.

### 10.3 Indici caratteristici dei dispositivi di ritenuta

La rigidità reale espressa dalla barriera in fase di urto, che deve tener conto anche del comportamento strutturale del veicolo, della sua massa, velocità e traiettoria, serve alla barriera per resistere gradualmente all'urto, essendo stata progettata per deformarsi e rompersi, ma sempre in maniera tale che la rottura avvenga in modo controllato: il fine è dunque quello di trattenere il veicolo in strada, limitare le azioni dell'urto sulle persone, reindirizzare il veicolo in carreggiata mantenendolo vicino alla barriera (piccoli angoli di riflessione). Questo viene ottenuto mediante una forte dissipazione dell'energia, ovvero con forti danneggiamenti permanenti della barriera e del veicolo.

Gli indici numerici che siano in grado di definire quantitativamente il concetto di cedevolezza o plasticità della barriera con un criterio unico e sicuro sono stati individuati nella valutazione delle sollecitazioni a cui sono

sottoposti i passeggeri durante l'urto, che sono valutabili attraverso le accelerazioni e le velocità che essi subiscono, e del comportamento strutturale del veicolo.

La sicurezza dei passeggeri è assicurata da:

- 1) decelerazione del veicolo (misurata in vari punti dell'abitacolo) mantenuta entro valori accettabili;
- 2) deformazioni dell'abitacolo inferiori ai limiti prefissati;
- 3) nessuna penetrazione di elementi di barriera nell'abitacolo;
- 4) traiettoria successiva all'urto senza capottamento ed il più possibile vicina alla barriera.

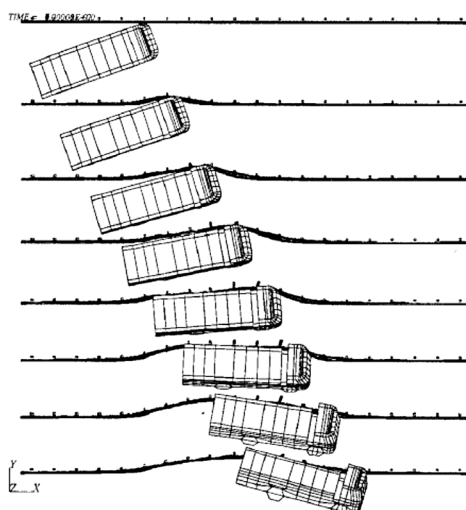


Figura 12 – Fasi d'urto

I primi due punti riguardano in maniera diretta la barriera, che presuppone la definizione preliminare delle grandezze da misurare durante e/o dopo l'impatto e gli strumenti con cui farlo. Per gli ultimi due punti solo un'analisi visiva successiva ai test può mettere in luce la risposta della barriera a quanto richiesto.

I quattro indici definiti per valutare le prestazioni di una barriera nei confronti della sicurezza degli occupanti sono:

- ASI (Acceleration Severity Index), Indice di severità dell'accelerazione;
- THIV (Theoretical Head Impact Velocity), Velocità teorica d'urto della testa;
- PHD (Post-impact Head Deceleration), Decelerazione post-urto della testa;
- VCDI (Vehicle Cockpit Deformation Index), Indice di deformazione dell'abitacolo del veicolo.

I primi tre indici servono a valutare il rischio che gli occupanti del veicolo possano subire gravi danni, dato che il corpo umano ha resistenza limitata a tempi molto brevi nei confronti delle violente accelerazioni.

La sola misura dell'accelerazione impressa al veicolo è però insufficiente, perché non tiene conto del tipo di veicolo, per cui si potrebbe, ad esempio, ipotizzare un veicolo molto deformabile per ottenere bassi valori di accelerazione, con la conseguenza però di avere grandi deformazioni dell'abitacolo con la seguente riduzione dello spazio vitale necessario agli occupanti. Per questo motivo il quarto indice misura le principali deformazioni dell'abitacolo per fissare valori limite.

#### 10.4 Caratteristiche prestazionali

Le caratteristiche prestazionali dei dispositivi adottati in progetto, secondo quanto indicato nelle istruzioni riportate dal D.M. Infr. e Trasp. 21 Giugno 2004, riguardano per ciascuna classe scelta, il livello di contenimento, l'indice di severità, le dimensioni, i vincoli, la larghezza di lavoro, ecc., tenendo conto della loro congruenza con: il tipo di supporto, il tipo di strada, le manovre ed il traffico prevedibile su di essa e le condizioni geometriche esistenti.

Uno dei requisiti fondamentali è che le barriere abbiano un livello di severità dell'urto di Tipo A, corrispondente ad un valore  $ASI \leq 1.00$  e ad un  $THIV \leq 33 \text{ Km/h}$ , come si desume dalla tabella seguente:

| Livello di severità dell'urto | Valori degli Indici                          |
|-------------------------------|----------------------------------------------|
| A                             | $ASI \leq 1,0$ e $THIV \leq 33 \text{ km/h}$ |
| B                             | $ASI \leq 1,4$ e $PHD \leq 20 \text{ g}$     |

Dove:

- $g = 9,8 \text{ m/s}^2$
- ASI Acceleration severity Index
- PHD Post-Impact Head Deceleration
- THIV Theoretical Head Impact Velocity

Il livello di severità dell'urto A garantisce un maggiore livello di sicurezza per gli occupanti del veicolo che esce di strada rispetto al livello B che viene preferito quando altre considerazioni si equivalgono.

Le accelerazioni limite sono interpretate come i valori al disotto dei quali il rischio per i passeggeri è molto basso (al massimo lesioni lievi). Per i passeggeri che indossano le cinture di sicurezza, le accelerazioni limite generalmente adottate sono:

$$a_x = 12 \text{ g}, a_y = 9 \text{ g}, a_z = 10 \text{ g}$$

Un altro aspetto valutato in fase di progettazione è la larghezza operativa (W) che individua lo spazio necessario alla barriera di sicurezza per poter operare in sicurezza; tale spazio indica l'area retrostante la barriera che deve essere libera da ostacoli.

La larghezza operativa (W) è la distanza fra il lato rivolto verso il traffico prima dell'urto della barriera di sicurezza e la massima posizione laterale dinamica di una qualunque parte principale della barriera.

Di seguito viene riportata la tabella contenente i valori di larghezza operativa w previsti per le barriere utilizzate:

| Classi di livelli di larghezza operativa (W) | Livelli di larghezza operativa [m] |
|----------------------------------------------|------------------------------------|
| W1                                           | $W \leq 0,60$                      |
| W2                                           | $W \leq 0,80$                      |
| W3                                           | $W \leq 1,00$                      |
| W4                                           | $W \leq 1,30$                      |
| W5                                           | $W \leq 1,70$                      |
| W6                                           | $W \leq 2,10$                      |
| W7                                           | $W \leq 2,50$                      |
| W8                                           | $W \leq 3,50$                      |

### 10.5 Individuazione delle zone da proteggere e della tipologia di barriere

Il tratto di viabilità di nuova realizzazione si sviluppa in parte in rilevato con altezza dal piano stradale quasi sempre superiore a 1,00 – 2,00 m. Inoltre sono presenti delle opere d'arte, nella fattispecie 2 ponti. Pertanto si rendono necessarie sia barriere bordo laterale, sia barriere bordo ponte. Inoltre sono previsti dei nuovi sotto attraversamenti dell'autostrada A11, come il nuovo scatolare in Via del Cantone. In questo caso è necessario sostituire gli attuali dispositivi di sicurezza del tipo bordo laterale posti sul rilevato autostradale con dispositivi del tipo bordo ponte. Si prevede quindi l'installazione di barriere bordo ponte con classe di contenimento H4 per un tratto di circa 100 m a cavallo del manufatto.



## 10.6 Scelta delle classi di barriere

La scelta dei dispositivi di sicurezza è stata eseguita, secondo quanto prescritto dal D.M. 21 giugno 2004, tenendo conto della loro destinazione ed ubicazione, del tipo e delle caratteristiche della strada e di quelle del traffico che la interesserà.

Le prescrizioni del sopracitato decreto sono riassunte nella seguente tabella:

| Strada                                                               | Tipo di traffico | Barriere spartitraffico | Barriere bordo laterale | Barriere bordo ponte |
|----------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Autostrade (A) e strade extraurbane principali (B)                   | I                | H2                      | H1                      | H2                   |
|                                                                      | II               | H3                      | H2                      | H3                   |
|                                                                      | III              | H3 – H4                 | H2 – H3                 | H3 – H4              |
| Strade extraurbane secondarie (C) e strade urbane di scorrimento (D) | I                | H1                      | N2                      | H2                   |
|                                                                      | II               | H2                      | H1                      | H2                   |
|                                                                      | III              | H2                      | H2                      | H3                   |
| Strade urbane di quartiere (E) e strade locali (F)                   | I                | N2                      | N1                      | H2                   |
|                                                                      | II               | H1                      | N2                      | H2                   |
|                                                                      | III              | H1                      | H2                      | H2                   |

Il tipo di traffico viene determinato sulla base dei volumi di traffico e della prevalenza dei mezzi che lo compongono secondo lo schema seguente:

| Tipo di traffico | TGM   | % veicoli con massa > 3,5 t |
|------------------|-------|-----------------------------|
| I                | ≤1000 | Qualsiasi                   |
| I                | >1000 | ≤ 5                         |
| II               | >1000 | 5 < n ≤ 15                  |
| III              | >1000 | > 15                        |

Dall'esame dei dati di traffico è stato determinato un volume giornaliero pari a circa 19 000 veicoli e una percentuale dei veicoli pesanti compresa tra il 5 % e il 15 %.

In funzione di questi due parametri si ricava il tipo di traffico che per il caso in esame risulta essere pari a II. La nuova viabilità in progetto è classificata come strada extraurbana secondaria. Pertanto sulla base delle tabelle si deduce che la classe di contenimento minimo richiesta per una barriera bordo laterale è N2, mentre per una barriera bordo ponte la classe di contenimento minimo è H2. Nel progetto si è quindi assunto H1

come livello di contenimento per le barriere bordo laterale e H2 per quelle bordo ponte. Inoltre per i tratti in approccio alle opere d'arte la classe di contenimento H2 è stata prolungata per una lunghezza di 60 m anche per le barriere bordo laterale.

## 10.7 Progetto delle barriere

Nel D.M. n. 2367/2004 viene introdotta la verifica delle barriere per effetto delle prove di crash condotte ai sensi delle norme UNI EN 1374 parte 1, 2, 3 e 4 ed inoltre viene sottolineato il ruolo del progettista, il cui compito è quello di prevedere quali saranno le condizioni operative delle barriere e di trovare accorgimenti e soluzioni tecniche tali per cui, in caso di urto dei veicoli, i sistemi di ritenuta si comportino alla stregua di quanto avviene nei crash-test che supportano l'omologazione da parte del Ministero.

### 10.7.1 Estensione delle protezioni

Per determinare l'estensione della protezione, sono stati considerati i seguenti aspetti:

- La protezione deve estendersi opportunamente oltre lo sviluppo longitudinale strettamente corrispondente all'opera, sino a raggiungere punti (prima e dopo l'opera) per i quali possa essere ragionevolmente ritenuto che il comportamento della barriera in opera sia paragonabile a quello delle barriere sottoposte a prova d'urto e comunque fino a dove cessi la sussistenza delle condizioni che richiedono la protezione;
- Le protezioni devono essere effettuate per una estensione almeno pari a quella indicata nel certificato di omologazione, ponendone circa due terzi prima dell'ostacolo, integrando lo stesso dispositivo con eventuali ancoraggi e con i terminali semplici indicati nel certificato di omologazione;
- Laddove non sia possibile installare un dispositivo con una lunghezza minima pari a quella effettivamente testata, sarà possibile installare una estensione di dispositivo inferiore a quella effettivamente testata, provvedendo però a raggiungere l'estensione minima attraverso un dispositivo diverso, di pari classe di contenimento o di classe ridotta, garantendo la continuità strutturale.

### 10.7.2 Modalità d'installazione della barriera

Per assicurare il corretto funzionamento delle barriere da installare, il progetto prevede la realizzazione di un arginello di dimensioni adeguate; in particolare verrà realizzato un arginello di larghezza sempre pari o superiore a 100 cm. Per l'installazione su opera d'arte o in presenza di opere di sostegno si provvederà invece all'installazione del montante sul cordolo in c.a. tramite apposita piastra fornita e certificata dal produttore della barriera.

In funzione della geometria dell'arginello, per evitare in caso di urto una eccessiva inclinazione del mezzo che possa pregiudicare il comportamento della barriera o che provochi il ribaltamento del veicolo, è necessario adottare un dispositivo con caratteristiche di deflessione dinamica compatibili.

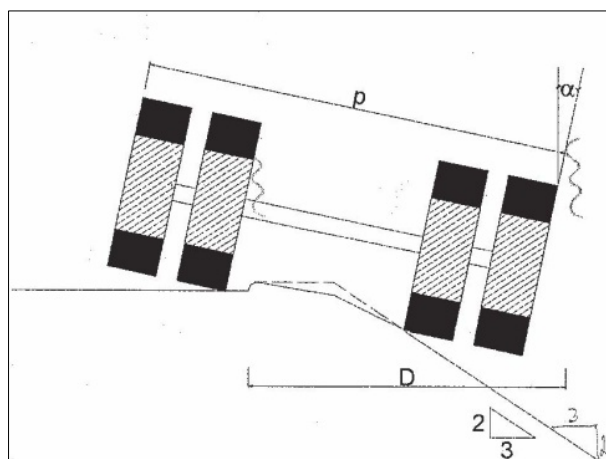


Figura 13: Relazione tra larghezza dell'arginello e deflessione della barriera

### 10.7.3 Terminali e raccordi tra barriere di classe differenti

Il collegamento tra due tipologie diverse di barriere avverrà tramite omologati raccordi indicati dal produttore delle barriere stesse.

Per quanto riguarda i terminali si prevede il graduale azzeramento della barriera di sicurezza approfondendo i montanti.

## 11 BILANCIO TERRE

| Quantità da progetto stradale                                                        |                                                                |                                                                             |                                                                |                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Scotico (mc)                                                                         | Sterro (mc)                                                    | Scavo in galleria a sezione corrente (mc)                                   | Fabbisogno di rilevato (mc)                                    | Fabbisogno ricoprimento argini (mc)                            |
| 11178,40                                                                             | 100155,53                                                      | 53707,50                                                                    | 78718,47                                                       | 38965,31                                                       |
| Conferimenti                                                                         |                                                                |                                                                             |                                                                |                                                                |
| 10 %Scotico (mc)                                                                     | Demolizioni cls (mc)                                           | Demolizioni acciaio (mc)                                                    | Fresature (mc)                                                 | Fanghi di bonifica (mc)                                        |
| 1117,84                                                                              | quantità da definire ad un livello di progettazione successivo | quantità da definire ad un livello di progettazione successivo              | quantità da definire ad un livello di progettazione successivo | quantità da definire ad un livello di progettazione successivo |
| Materiale da mettere in opera mediante riutilizzo di terre da progetto stradale (mc) |                                                                | Materiale disponibile per altre lavorazioni nell'ambito del Masterplan (mc) |                                                                |                                                                |
| 117683,79                                                                            |                                                                | 46239,81                                                                    |                                                                |                                                                |

## 12 ALLEGATO 1 – TABULATI DI CALCOLO – VERIFICHE STRADALI TRATTO A-B