



MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E
DEI TRASPORTI



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

Committente Principale



AEROPORTO INTERNAZIONALE DI FIRENZE - "AMERIGO VESPUCCI"

Opera

PROJECT REVIEW - PIANO DI SVILUPPO AEROPORTUALE AL 2035

Titolo Documento Completo

VBT1—ELABORATI GENERALI E SPECIALISTICI OPERE CIVILI
Relazione tecnica stradale

Livello di Progetto

SCHEDE DI APPROFONDIMENTO PROGETTUALE A LIVELLO MINIMO DI PROGETTO DI
FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

LIV	REV	DATA EMISSIONE	SCALA	CODICE FILE COMPLETO
PSA	01	MARZO 2024	—	FLR—MPL—PSA—VBT1—004—OC—RT
				TITOLO RIDOTTO
				Rel Tec Strad

01	03/24	EMISSIONE PER PROCEDURA VIA-VAS	TAE , SITECO	A. BURCHI	L. TENERANI
00	10/22	EMISSIONE PER DIBATTITO PUBBLICO	TAE , SITECO	D. VESTRINI	L.TENERANI
REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

COMMITTENTE PRINCIPALE	GRUPPO DI PROGETTAZIONE	SUPPORTI SPECIALISTICI
 ACCOUNTABLE MANAGER Dott. Vittorio Fanti	 DIRETTORE TECNICO Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631	PROGETTAZIONE SPECIALISTICA Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631
POST HOLDER PROGETTAZIONE Ing. Lorenzo Tenerani	RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631	SUPPORTO SPECIALISTICO Ing. Andrea Burchi
POST HOLDER MANUTENZIONE Ing. Nicola D'Ippolito		
POST HOLDER AREA DI MOVIMENTO Geom. Luca Ermini		

Sommario

1. Generalità.....	5
2. Inquadramento geologico.....	7
2.1. Modello geologico del sottosuolo.....	7
3. Inquadramento normativo.....	8
4. Caratteristiche funzionali e geometriche della strada.....	10
4.1. Classificazione funzionale e criteri compositivi della piattaforma.....	10
4.1.1. Allargamento delle corsie in curva.....	15
4.2. Organizzazione della sede stradale.....	15
4.2.1. Sezione stradale in sede artificiale.....	15
4.2.2. Elementi marginali e di arredo della sede stradale.....	16
4.2.3. Dispositivi di ritenuta.....	17
5. Descrizione del tracciato.....	17
6. Intersezioni.....	21
6.1. Nodo A – nuova rotatoria in Via dell’Osmannoro.....	21
6.2. Nodo B – nuovo svincolo autostradale.....	23
6.3. Nodo C – nuovo svincolo autostradale.....	26
6.4. Verifiche sulle rotatorie di progetto.....	26
7. Corpo stradale.....	28
7.3. Rilevati.....	28
7.4. Sovrastruttura stradale.....	29
7.5. Traffico di progetto.....	29
7.6. Dimensionamento della pavimentazione.....	31
7.6.1. Il progetto delle sovrastrutture stradali flessibili.....	31

7.6.2.	Dimensionamento sovrastrutturale con metodo razionale.....	32
7.6.3.	Verifica dei materiali legati.....	34
7.6.4.	Verifica dei materiali non legati.....	35
7.6.5.	Predimensionamento della pavimentazione	36
7.6.6.	Il software BISAR.....	41
7.6.7.	Parametri di calcolo assunti.....	42
7.6.8.	Analisi dei risultati	44
8	Opere d'arte.....	47
8.1.	Ponte su Fosso reale e Ponte su Rampa immissione A11.....	47
8.2.	Sottopasso RWY 11-29 – Galleria “Metodo Milano” Top Down	51
9	Barriere di sicurezza	55
	Allegato 1 – Tabulati di calcolo – verifiche stradali	62

Indice delle figure

Figura 1: Organizzazione della piattaforma stradale per categoria F1 (estratto da D.M. 05/11/2001).....	13
Figura 2: Organizzazione della piattaforma stradale per categoria C1 (estratto da D.M. 05/11/2001).....	14
Figura 3: Elementi marginali della sede stradale.....	16
Figura 4 – Sezione tipo Viabilità Tratto A-B.....	18
Figura 5 – Sezione tipo Viabilità interna aeroporto con ciclabile.....	20
Figura 6– Sezione tipo Viabilità interna aeroporto	20
Figura 7 – Planimetria rotatoria Nodo A.....	23
Figura 8 – Planimetria rotatoria Nodo B	25
Figura 9 – Verifica di visibilità del quarto di corona.....	28
Figura 10 - Planimetria sul Fosso Reale.....	48
Figura 11 - Profilo ponte sul Fosso Reale	48

Figura 12 - Planimetria Ponte su Rampa di accesso A11.....	50
Figura 13 - Profilo Ponte su Rampa di accesso A11.....	50
Figura 14 - Sezione tipo Ponte su fosso reale	51
Figura 15 - Sezione tipo in galleria.....	53
Figura 16 - Sezione tipo Galleria in curva.....	53
Figura 17 - Sezione tipo Galleria in corrispondenza della vasca di accumulo.....	54
Figura 18 – Classificazione dei Livelli di Traffico per la scelta tipologica.....	56
Figura 19 – Classificazione progettuale dei dispositivi di sicurezza longitudinali.....	57
Figura 20 – Classificazione delle barriere in termini di severità degli urti.....	59
Figura 21 – Deflessione dinamica (D) e Larghezza operativa (W).....	60
Figura 22 – Classificazione delle barriere in funzione della larghezza operativa (W).....	60
Figura 23 – Classi minime di barriere adottate in progetto.....	61

Indice delle tabelle

Tabella 1: Categorie di traffico ammesse in piattaforma.....	11
Tabella 2: Principali caratteristiche ammesse in piattaforma	11
Tabella 3: Dimensioni degli elementi della sede stradale.....	16
Tabella 4: Caratteristiche geometriche rotatoria Nodo A.....	22
Tabella 5: Caratteristiche geometriche rotatoria Nodo B.....	24
Tabella 6: Caratteristiche geometriche rotatoria Nodo C.....	26
Tabella 7: Frequenza di ciascuna classe di veicoli commerciali.....	30
Tabella 8: Spessori degli strati della pavimentazione ricavati dal Catalogo.....	36
Tabella 9: Calcolo dei passaggi ammessi della pavimentazione di progetto.....	40
Tabella 10: Calcolo dei passaggi secondo il traffico di progetto.....	40
Tabella 11: Temperature medie dell'aria in località Sesto Fiorentino (stazione metereologica).....	42
Tabella 12: Calcolo delle temperature nei diversi strati in funzione della temperatura dell'aria.....	42
Tabella 13: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 1.....	43

Tabella 14: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 2.....	43
Tabella 15: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 3.....	43
Tabella 16: Moduli elastici e coefficienti di Poisson utilizzati nel calcolo – Condizione di carico 4.....	44
Tabella 17: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 1.....	44
Tabella 18: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 2.....	44
Tabella 19: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 3.....	44
Tabella 20: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 4.....	44
Tabella 21: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 1.....	45
Tabella 22: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 2.....	45
Tabella 23: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 3.....	46
Tabella 24: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 4.....	46
Tabella 25: Risultati della verifica a fatica della pavimentazione – calcolo coefficiente di danno.....	46
Tabella 26: Risultati della verifica a fatica del sottofondo.....	46

1. Generalità

Il presente documento costituisce la Relazione tecnica delle opere viarie parte integrante della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale (o Masterplan) al 2035 dell'aeroporto di Firenze, qui sviluppata e dettagliata ad un livello tecnico ritenuto congruo con le finalità della presente fase procedurale, comunque non inferiore a quello del progetto di fattibilità tecnica ed economica di cui all'art. 41 del D. Lgs. n. 36/2023.

Il citato approfondimento tecnico viene previsto ad integrazione della Sezione Generale della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale al 2035, predisposta in aderenza alle normative e/o regolamenti specifici del settore aeronautico, rispetto alla quale si pone l'obiettivo di elaborare ulteriori elementi tecnici di studio, dettaglio, analisi e progettazione, ritenuti necessari ai fini del compiuto espletamento dei procedimenti amministrativi (di compatibilità ambientale e di autorizzazione) ai quali risulta per legge assoggettato lo strumento del Piano di Sviluppo Aeroportuale, così integrato in modo da rafforzarne la valenza e la funzione progettuale, strettamente interconnessa con quella pianificatoria e programmatica di investimento.

Le informazioni di seguito riportate vanno, pertanto, analizzate in stretta correlazione rispetto ai più ampi ed estesi aspetti tecnico-economici trattati all'interno dei documenti afferenti alla Sezione Generale del Masterplan, con i quali esse si relazionano secondo un processo capillare di progressivo approfondimento e dettaglio, ritenuto utile per una più completa, consapevole e piena visione dell'insieme delle previsioni di trasformazione dello scalo aeroportuale e delle aree circostanti, e per una più esauriente analisi e comprensione della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale.

La citata Project Review costituisce la nuova formulazione tecnica delle previsioni progettuali e di investimento che ENAC prevede di attuare, nel medio-lungo periodo (orizzonte 2035, coerente con quello del Piano Nazionale degli Aeroporti in fase di aggiornamento), relativamente all'infrastruttura aeroportuale di Firenze, redatta dal Gestore aeroportuale di intesa con l'Ente regolatore in attuazione degli obblighi di miglioramento, ottimizzazione e sviluppo dell'aeroporto insiti nel contratto di concessione che lega lo stesso Gestore alle Istituzioni dello Stato (Ministero delle Infrastrutture e ENAC) per la gestione totale dell'infrastruttura aeroportuale (bene dello

Stato). Ne consegue che l'insieme documentale di cui la presente relazione costituisce parte integrante deve essere visto e analizzato nella propria autonomia e indipendenza sostanziale, per quanto inevitabilmente consequenziale rispetto al precedente Masterplan 2014-2029 col quale risultano ancora sussistenti più elementi di dialogo che, tuttavia, ci si pone l'obiettivo di non assurgere a valenza prodromica e a funzionalità necessaria per una completa illustrazione, definizione e comprensione del nuovo Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035.

Si auspica, infine, di aver esaurientemente e correttamente tradotto e trasferito, all'interno della documentazione di cui al nuovo Masterplan 2035, quel prezioso bagaglio di esperienza e quell'insieme di utili risultanze derivanti dal dialogo costruttivo e dialettico che, nell'ultimo decennio, ha visto in più momenti la partecipazione di ENAC, del Gestore aeroportuale, degli Enti/Amministrazioni interessati, delle Istituzioni nazionali e regionali, dei vari stakeholders e della cittadinanza attiva intorno ai temi relativi al trasporto aereo, alla multimodalità della mobilità, al ruolo della rete aeroportuale territoriale toscana e al futuro dello scalo aeroportuale di Firenze, che ENAC vede sempre più strategico, integrato e funzionale alla rete nazionale ed europea dei trasporti.

6

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 1368,95 m
- Tratto 2: Nuova viabilità locale di Via del Pantano di lunghezza 565.8 m
- Tratto 3: Nuova viabilità interna all'area aeroportuale
- Tratto 4: Adeguamento e ampliamento di Via del Termine

Esso comprende inoltre la realizzazione di tre 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)
- Nuova intersezione a rotatoria a Sud-Est dello svincolo aeroportuale, al termine della nuova viabilità dell'aeroporto

Sono inoltre previste due rotatorie (nodi D ed E) nella riqualificazione di via del Termine.

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. 17 gennaio 2018 (NTC 2018), "Norme Tecniche per le Costruzioni"*
- *Circolare del 21 febbraio 2019, "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018"*

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 strada locale di progetto collegherà l'area industriale dell'Osmannoro e il centro abitato di Sesto Fiorentino allo svincolo della A11 di Sesto Fiorentino, consentendo l'accesso alle suddette aree; il tracciato si sviluppa in variante a quello esistente, che risulta interrotto dalla realizzazione della nuova pista aeroportuale.

La scala territoriale alla quale si colloca l'attuale Via dell'Osmannoro è quella interlocale e comunale in ambito extraurbano; la maggior parte dei flussi di traffico sulla strada è quindi legata all'accesso a questi due poli attrattivi.

Per quanto detto, la strada in progetto è stata correttamente classificata nell'ambito delle strade locali extraurbane - categoria F1, caratterizzate, secondo Il Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 5/11/2001, dai seguenti aspetti funzionali:

- Movimento servito: accesso;
- Entità dello spostamento: breve distanza;
- Funzione nel territorio: interlocale e comunale in ambito extraurbano;
- Componenti di traffico: tutte le componenti.

10

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 1.

Tabella 1: Categorie di traffico ammesse in piattaforma

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

11

Tabella 2: Principali caratteristiche ammesse in piattaforma

Strada Locale 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	-
Regolazione dei mezzi pubblici Regolazione del traffico pedonale Accessi	In carreggiata In banchina Non ammessi
Strada Locale Extraurbana – Categoria F1	

Limite di velocità (km/h)	90 km/h con 1 limitazione a 60 km/h
Numero delle corsie per senso di marcia	1
Limite inferiore velocità di progetto (km/h)	40 km/h
Limite superiore velocità di progetto (km/h)	100 km/h
Larghezza della corsia di marcia (m)	3,50 m
Larghezza minima dello spartitraffico (m)	-
Larghezza minima della banchina in sinistra (m)	-
Larghezza minima della banchina in destra (m)	1,00 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	-
Regolazione dei mezzi pubblici	In carreggiata
Regolazione del traffico pedonale	In banchina
Accessi	Ammessi

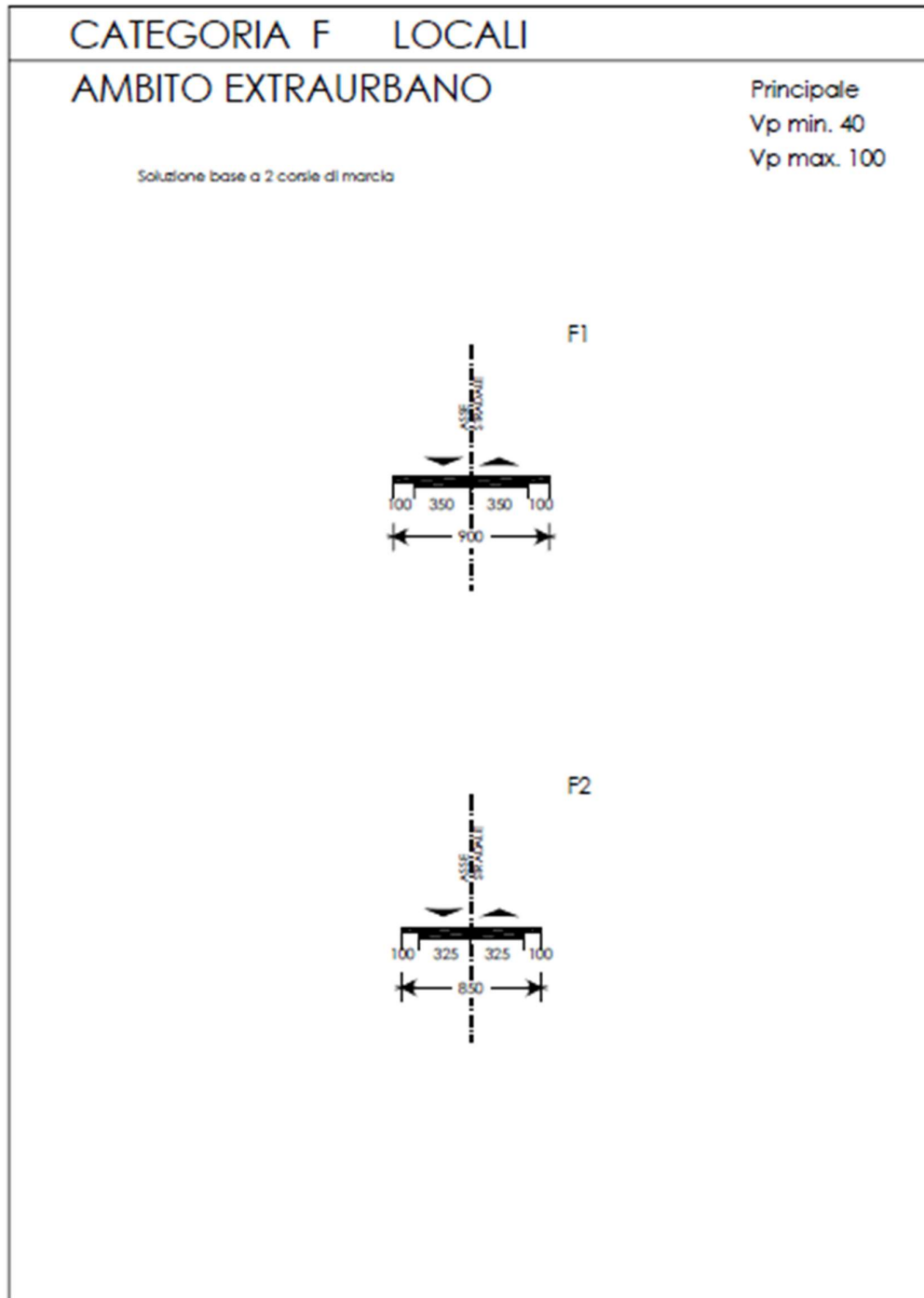


Figura 1: Organizzazione della piattaforma stradale per categoria F1 (estratto da D.M. 05/11/2001)

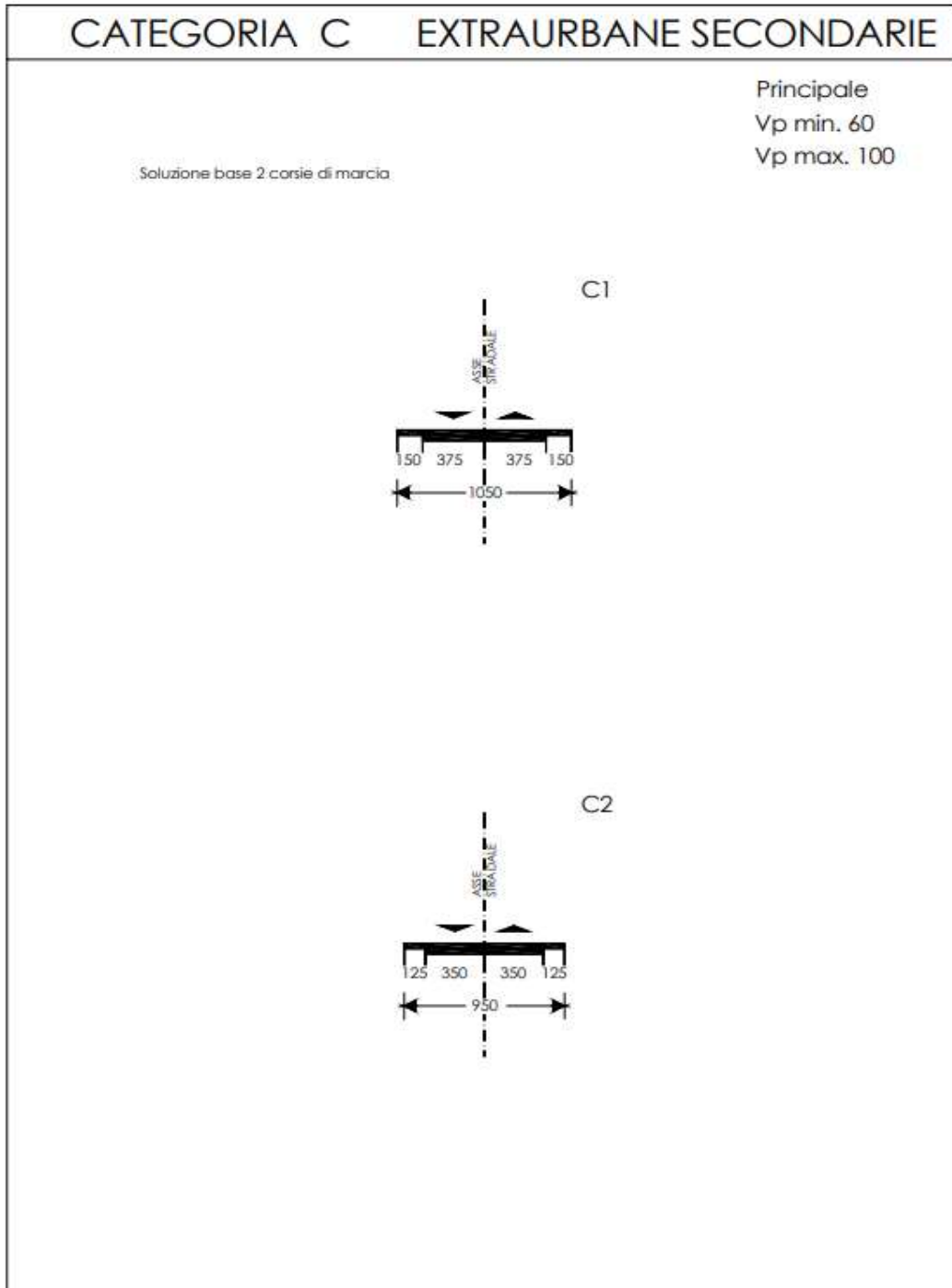


Figura 2: Organizzazione della piattaforma stradale per categoria C1 (estratto da D.M. 05/11/2001)

4.1.1. 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.

4.2. Organizzazione della sede stradale

4.2.1. 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 scavalcamento presenti nel tracciato in progetto.

4.2.2. 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.

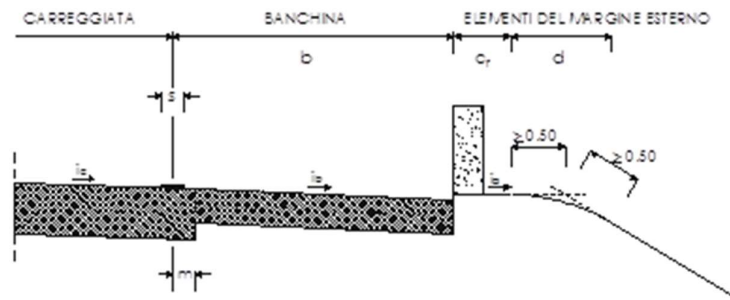


Figura 3: Elementi marginali della sede stradale

Tabella 3: Dimensioni degli elementi della sede stradale

Elemento	Denominazione	Dimensione
S	Striscia di delimitazione	0,12 m
M	Bordo carreggiata	≥ 0,30 m
lc	Pendenza trasversale carreggiata: in rettilineo in curva	2,5% 2,5% ≤ ic ≤ 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	1,25 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.

4.2.3. 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, con pendenza minima dello 0,5% 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 locale in ambito extraurbano (Tratto A-B)

Rispetto alla prima redazione della viabilità del nuovo Aeroporto, la tratta A-B ha subito una modifica piuttosto consistente che ne ha ridotto l'estensione e i tempi di percorrenza. Il tracciato presentato nel Progetto Esecutivo effettuava un lungo percorso (3.8 km) intorno alla nuova pista, costeggiandola e inserendosi tra essa e l'autostrada per collegarsi al Nodo B. Il nuovo tracciato prevede un sottopasso della lunghezza di 408 m che attraversa la nuova pista. L'opera richiesta riduce notevolmente l'estensione, portandola a 1.36 km, risultando costituita dalle due tratte di abbassamento del tracciato a una quota di 8 metri sotto il livello del piano campagna e dal sottopasso che le raccorda mediante

curve planimetriche con raggio minimo di 200m.

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 breve tratto rettilineo di circa 70 metri incontra la prima curva a sinistra di raggio 280,00 metri che pone il tracciato perpendicolare alla pista. Il tracciato procede il suo abbassamento, prima in trincea e poi tra muri ad "U" fino a trasformarsi in un sottopasso completo dell'estensione di circa 410 metri. Nella parte terminale del sottopasso ha inizio la curva di uscita e risalita, di raggio 200 m, che permette l'inserimento tra il nuovo Fosso Reale e la pista. Un breve tratto simil-rettilineo, interrotto da una breve curva di raggio 160.00 m necessaria all'inserimento sulla Rotatoria B, ne costituiscono la fine.

Il tracciato, come detto sopra, presenta una lunghezza di 1368.949 m e prevede un limite di 70 km/h per tutta la sua estensione, un limite ragionevolmente imposto vista la ridotta estensione del nuovo tratto. Un limite di 90 km/h avrebbe comportato un incremento degli allargamenti per visibilità in corrispondenza delle due curve di accesso e uscita al/dal sottopasso onerosi, incremento che non avrebbe comportato particolari riduzioni del tempo di percorrenza a fronte del maggior costo delle opere civili necessarie per la loro realizzazione.

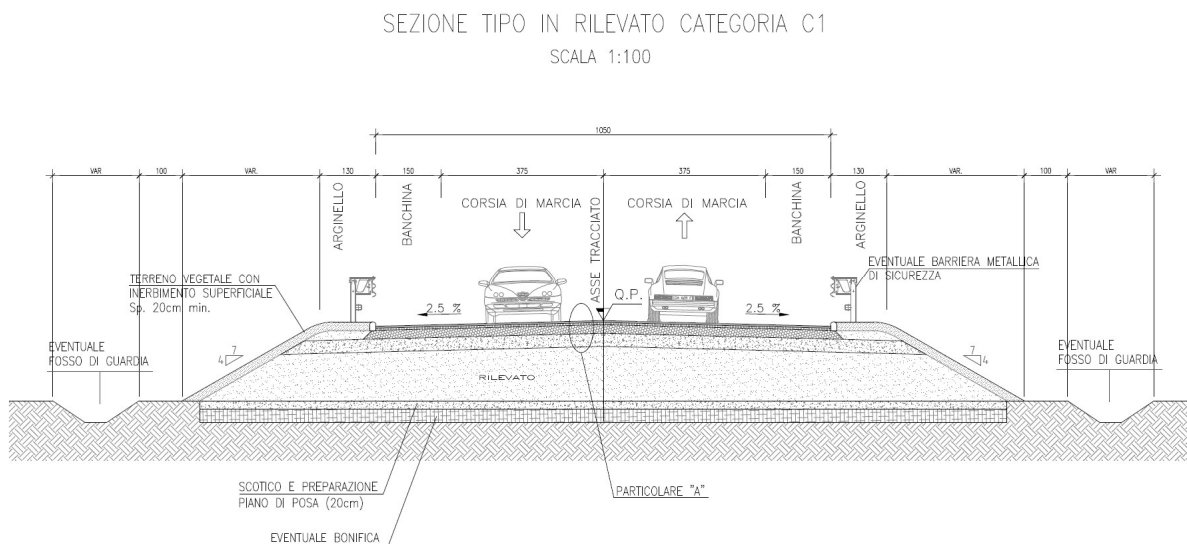


Figura 4 – Sezione tipo Viabilità Tratto A-B

Gli allargamenti per visibilità inseriti sono riportati nella tabella sottostante

Progressiva [m]	Allargamento Sx [m]	Allargamento Dx [m]
73.341	0	0
153.698	1.88	0
450.501	1.88	0
608.001	0	0
753.887	0	0
938.207	3.24	0
1144.489	3.24	0
1256.989	0	0
1368.949	0	0

Tratto 2 – Adeguamento viabilità locale – Via del Pantano

Questa viabilità è stata prevista per migliorare il collegamento tra l'area a sud dell'autostrada A11 e quella a nord a cavallo della stazione di servizio Peretola, sul lato ovest dell'intervento.

19

Immediatamente a valle del cavalcavia sull'Autostrada è prevista la realizzazione di un tratto di strada, di tipo F2, della lunghezza di 565,82 m che prosegue con un rettilineo l'andamento della strada esistente e, dopo una curva a destra, si unisce al tracciato esistente di Via del Pantano, rendendo più fluido l'attuale stato viabilistico. Altimetricamente, l'asse ha sviluppo sostanzialmente pianeggiante, con pendenze minime superiori allo 0.2% per favorire un minimo deflusso trasversale delle acque.

Tratto 3 – Nuova viabilità a servizio dell'area aeroportuale

La nuova viabilità interna all'area aeroportuale si stacca dalla rotatoria del Nodo B e corre dapprima parallelamente alla nuova pista e attorno all'area di compenso idraulico e, successivamente si dirige perpendicolarmente all'Autostrada A11 fino ad incontrare il cavalcavia di Via dei Giunchi, raccordandosi con la viabilità interna dell'aeroporto. E' stato inserito un nuovo nodo di intersezione a rotatoria alla base del cavalcavia di Via Giuchi.

SEZIONE TIPOLOGICA DEL PERCORSO CICLABILE
IN AFFIANCAMENTO ALLA VIABILITA' DI PROGETTO
SCALA 1:100

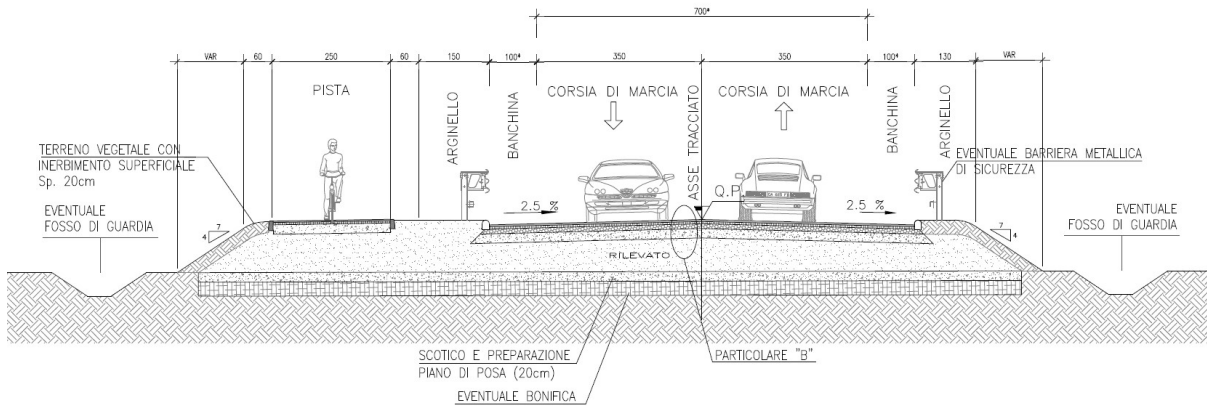


Figura 5 – Sezione tipo Viabilità interna aeroporto con ciclabile

SEZIONE TIPO IN RILEVATO CATEGORIA F1
SCALA 1:100

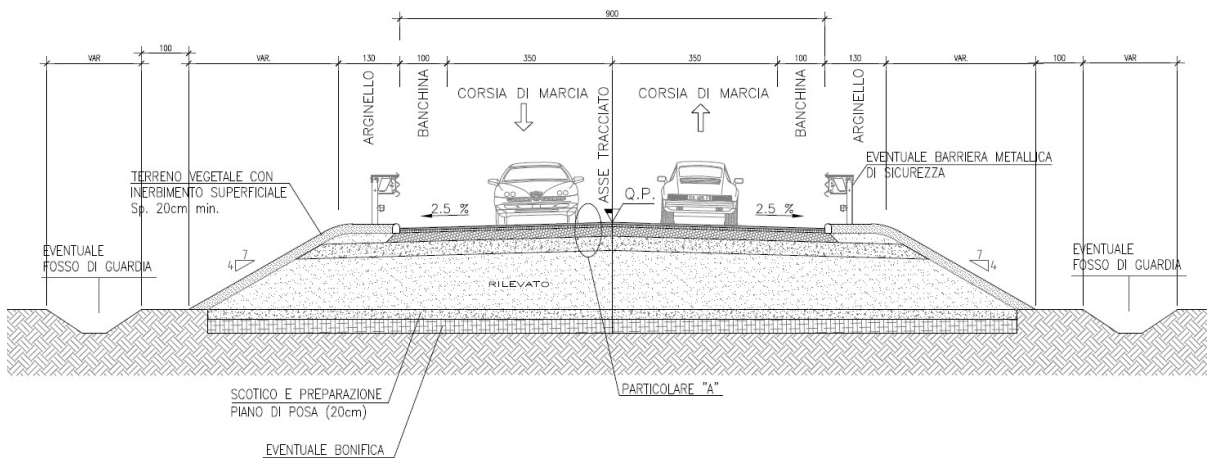


Figura 6– Sezione tipo Viabilità interna aeroporto

~~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.~~

Tratto 4 – Adeguamento e ampliamento di Via del Termine

Nel quadrante nord-est relativo alla pista esistente è presente Via del Termine, un asse di collegamento tra la zona a est dell'aeroporto e il lato sud del nodo ferroviario di Sesto Fiorenti. **Attraverso** l'esistente via Mario Luzi è possibile, costeggiando il fascio di binari sul lato sud, raggiungere uno svincolo a due livelli che collega, mediante sottopasso, i due lati della città tagliati dalla ferrovia.

Il potenziamento di Via del Termine e delle vie ad essa afferenti (Via delle due Case e via dei Cipressi) con l'inserimento di due intersezioni a rotatoria (D ed E) renderà più facile il deflusso dei veicoli dall'area del polo universitario alla zona a est della esistente pista aeroportuale, rendendo più sicure le intersezioni a fronte dell'aumento previsto del traffico.

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]
Diámetro esterno D_e	50,0
Larghezza corona giratoria L_c	6,0
Diámetro anello centrale D_a	44,0
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	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria R_u - Ramo Nord	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	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria R_u - Ramo Est	14,0
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	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria R_u - Ramo Ovest	14,0
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	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria R_u - Ramo Sud	14,0

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

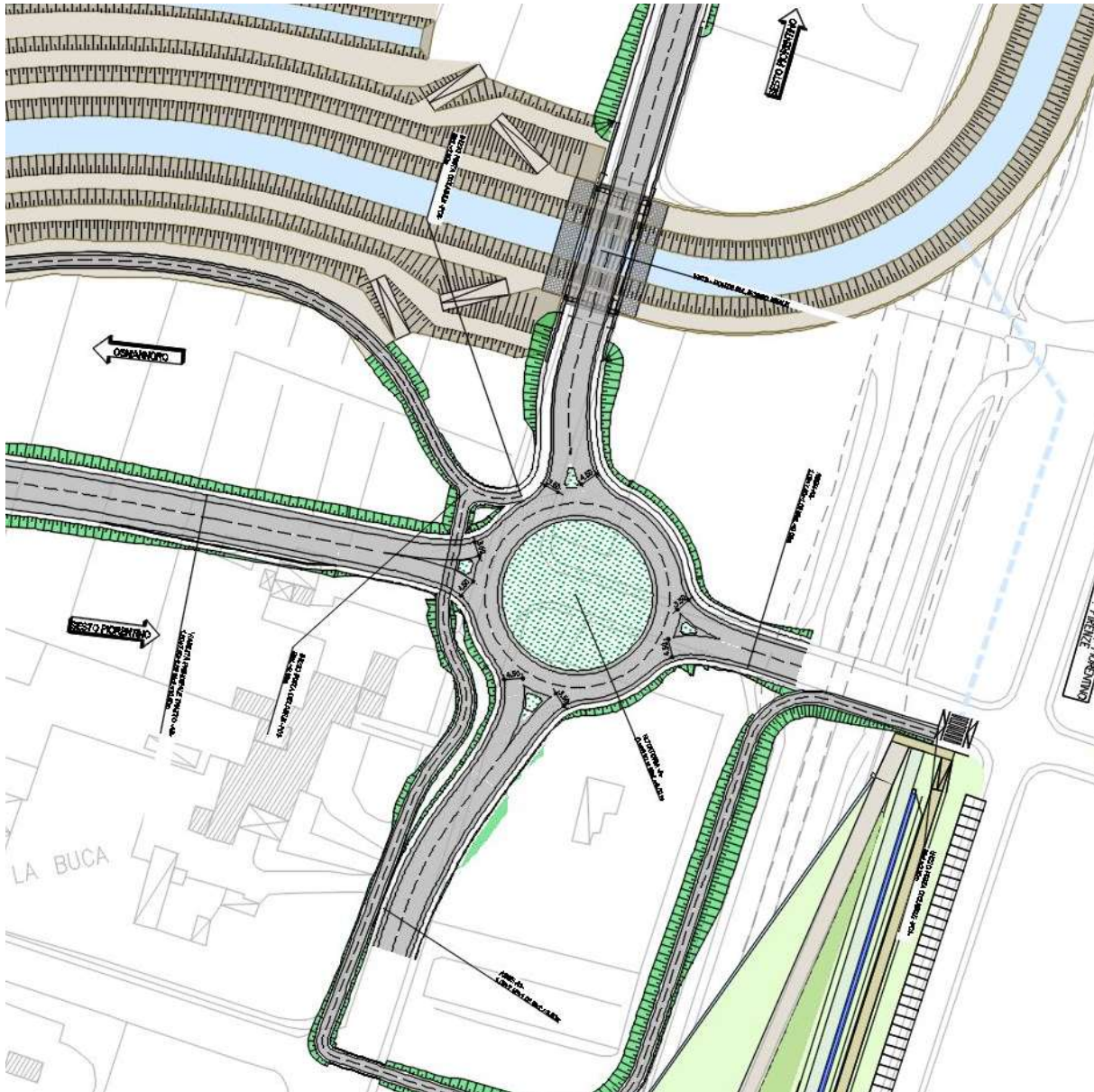


Figura 7 – Planimetria rotatoria Nodo A

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	44,0
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	12,0
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	12,0

Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Est	14,0
Larghezza bracci d'ingresso <i>Li</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	14,0
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	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria <i>Ru</i> - Ramo Sud-Est	14,0

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.

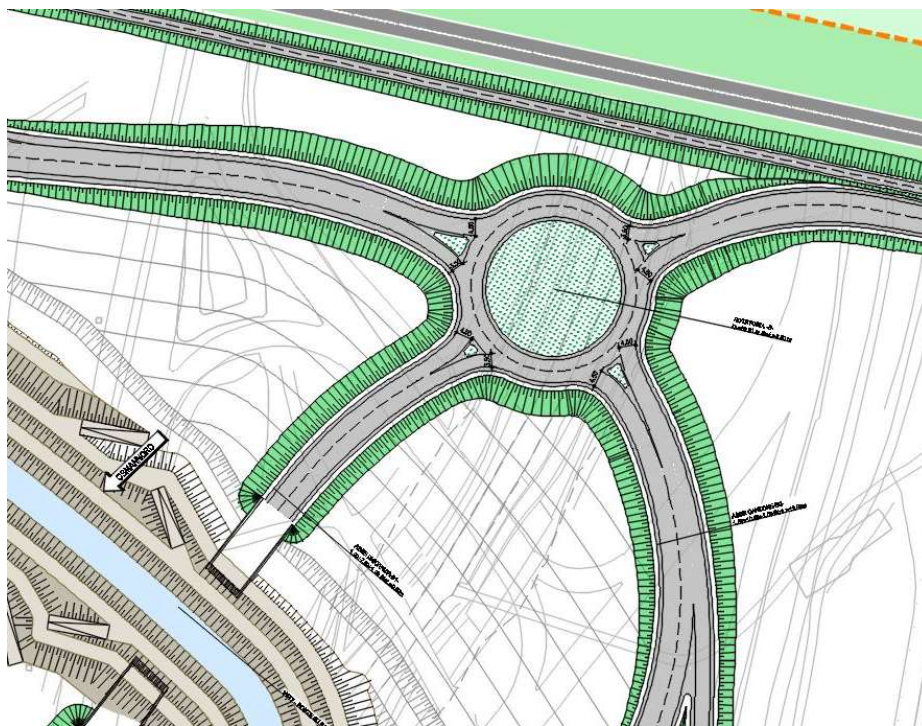


Figura 8 – Planimetria rotatoria Nodo B

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 C – nuovo svincolo autostradale

Al termine della nuova viabilità dell'aeroporto è prevista la creazione di una rotatoria (nodo C) che permetta l'inserimento nel sistema viario del traffico proveniente dal lato est dell'aeroporto con relative viabilità.

I flussi di traffico previsti per questa viabilità non sono paragonabili a quelli delle rotatorie precedenti, pertanto si è deciso di adottare un diametro esterno di 45m, anche in considerazione del fatto che uno degli accessi (sul lato Ovest) sarà utilizzato per la sola manutenzione della cassa di laminazione prevista nell'area a sud della tratta BC.

Tabella 6: Caratteristiche geometriche rotatoria Nodo C

Elemento geometrico	Dimensione [m]
Diametro esterno D_e	45,0
Larghezza corona giratoria L_c	9,0
Diametro anello centrale D_a	27,0
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	12,0
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	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria R_u - Ramo Est	14,0
Larghezza bracci d'ingresso L_i - Ramo Sud-Ovest	3,5
Larghezza bracci d'uscita L_u - Ramo Sud-Ovest	4,5
Raggio d'ingresso in rotatoria R_i - Ramo Sud-Ovest	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria R_u - Ramo Sud-Ovest	14,0
Larghezza bracci d'ingresso L_i - Ramo Sud-Est	3,5
Larghezza bracci d'uscita L_u - Ramo Sud-Est	4,5
Raggio d'ingresso in rotatoria R_i - Ramo Sud-Est	12,0
Raggio d'uscita dalla rotatoria R_u - Ramo Sud-Est	14,0

6.4 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 β . Per ciascun braccio di immissione si raccomanda un valore dell'angolo di deviazione β di almeno 45°.

Nel progetto delle rotatorie in esame, l'angolo di deviazione β formato dalle tangenti alle isole triangolari e all'isola centrale assume sempre un valore superiore ai 45° minimi raccomandati dalla normativa italiana. Non risulta quindi necessario valutare i raggi di deflessione per la corretta implementazione delle indicazioni del DM.

Verifiche di visibilità

Il soddisfacimento del criterio della visibilità del quarto di corona serve ad assicurare agli utenti prossimi all'immissione in rotatoria, 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 mezzzeria della corsia di entrata in rotatoria e ad un'altezza di 1 m sul piano viabile;
- Nel caso di rotatoria 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.

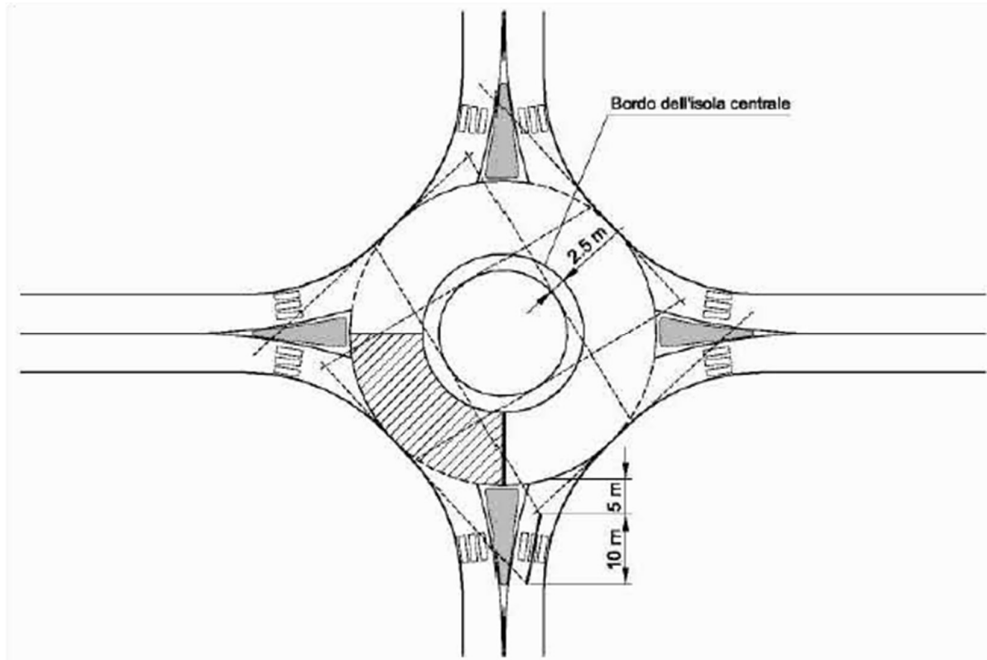


Figura 9 – Verifica di visibilità del quarto di corona

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

28

7 Corpo stradale

7.3 Rilevati

Il corpo del rilevato verrà realizzato con la terra proveniente dagli scavi delle aree di laminazione, opportunamente stabilizzate 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.

7.4 Sovrastruttura stradale

Per quanto riguarda la viabilità la sovrastruttura sarà così composta:

- Fondazione di spessore pari a 30 cm in misto granulare costituito da aggregati vergini
- Strato di base di spessore pari a 20 cm in conglomerato bituminoso;
- Strato di binder di spessore pari a 5 cm in conglomerato bituminoso;
- Strato di usura di spessore pari a 4 cm in conglomerato bituminoso.

7.5 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).

Lo studio di traffico condotto da Aleph Srl tiene infatti conto di una configurazione viaria in forte evoluzione. Tuttavia, dato che l'infrastruttura attualmente è interessata da un volume di traffico maggiore, come è stato possibile desumere da un rilievo di traffico appositamente eseguito, 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:

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

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 7: 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

7.6 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.

7.6.1. 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.

7.6.2. 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 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k$ 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_i è il numero di cicli di deformazione che porterebbe a rottura il materiale qualora l'ampiezza di deformazione fosse mantenuta costante pari a ϵ_i .

Supposto di aver risolto la struttura per un numero di periodi dell'anno pari a k determinando altrettante coppie di valori (ϵ_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.

34

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:

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

7.6.3. 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;
- ε_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.

7.6.4. 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 ε_z e quindi la sollecitazione σ_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 σ_z che possono creare avvallamenti sul piano viabile per effetto di accumulo di deformazioni plastiche ε_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;
- ε_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 σ_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:

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

7.6.5. 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 8: 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
- β e ρ 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)

38

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 $Z_R \cdot S_o$ 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_o 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 9: 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		
TOTALE						24 925 592
dimensionamento corretto?						
VERO						

40

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

Tabella 10: 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
asse riferim.	80	17.98	1	0.530453092	1	TOTALE	21 220 993

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),

7.6.6. 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 semispazio 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.

7.6.7. 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 11: 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 12: 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 13: 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

43

Tabella 14: 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 15: 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 16: 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

7.6.8. 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 17: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 1

Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume	σ_x [MPa]	0,589
Sollecitazione di compressione sul misto granulare	σ_z [MPa]	0,051
Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo	σ_z [MPa]	0,031

44

Tabella 18: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 2

Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume	σ_x [MPa]	0,557
Sollecitazione di compressione sul misto granulare	σ_z [MPa]	0,056
Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo	σ_z [MPa]	0,033

Tabella 19: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 3

Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume	σ_x [MPa]	0,529
Sollecitazione di compressione sul misto granulare	σ_z [MPa]	0,060
Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo	σ_z [MPa]	0,035

Tabella 20: Risultati analisi tenso-deformativa per la pavimentazione – Condizione di carico 4

Sollecitazione massima di trazione alla base degli strati legati a bitume	σ_x [MPa]	0,581
Sollecitazione di compressione sul misto granulare	σ_z [MPa]	0,052

Sollecitazione di compressione massima in sommità allo strato di sottofondo	σ_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 21: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 1

Strato		Sollecitazione di calcolo	Sollecitazioni massime ammissibili
Fondazione in MG	σ_z [MPa]	0,051	0,200
Sottofondo	σ_z [MPa]	0,031	0,095

Tabella 22: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 2

Strato		Sollecitazione di calcolo	Sollecitazioni massime ammissibili
Fondazione in MG	σ_z [MPa]	0,056	0,200
Sottofondo	σ_z [MPa]	0,033	0,095

Tabella 23: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 3

Strato		Sollecitazione di calcolo	Sollecitazioni massime ammissibili
Fondazione in MG	σ_z [MPa]	0,060	0,200
Sottofondo	σ_z [MPa]	0,035	0,095

Tabella 24: Risultati delle verifiche per gli strati non legati della pavimentazione – Condizione di carico 4

Strato		Sollecitazione di calcolo	Sollecitazioni massime ammissibili
Fondazione in MG	σ_z [MPa]	0,052	0,200
Sottofondo	σ_z [MPa]	0,032	0,095

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

Tabella 25: Risultati della verifica a fatica della pavimentazione – calcolo coefficiente di danno

Verifica a fatica strati in conglomerato bituminoso della pavimentazione				
Condizione di carico	Deformazioni ϵ [μ 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
Coefficiente di danno totale				0,348

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 26: Risultati della verifica a fatica del sottofondo

Verifica a fatica strato di sottofondo				
Condizione di carico	Deformazioni ϵ [μ 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

Coefficiente di danno totale	0,491
------------------------------	-------

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

8 Opere d'arte

Nel progetto sono presenti tre opere d'arte maggiori:

- 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 discarica e alla rampa di immissione sull'Autostrada A11, che scavalca sempre il Nuovo Fosso Reale ("Ponte su Rampa di accesso A11");
- Il Sottopasso che attraversa la nuova pista nel nuovo tratto di viabilità principale A-B ("sottopasso RWY 11-29");

8.1. Ponte su Fosso reale e Ponte su Rampa immissione A11

I due ponti sono analoghi ed entrambi realizzati con travi in c.a.p. a cassone, la cui lunghezza e altezza sono diverse per le due opere. Tutti gli impalcati sono idonei per il transito dei carichi mobili di 1a categoria (N.T.C. 2018 al punto 5.1.3.3.4).

47

Le indicazioni progettuali per la definizione delle caratteristiche geometriche e fisiche delle opere d'arte relativi alla presente emissione del progetto, sono stati oggetto di preventiva concertazione con gli enti territoriale preposti. 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.

Per la definizione della posizione delle spalle, sono state condotte valutazioni specifiche per ciascuna opera considerata e sono riportate qui di seguito in via sintetica:

- In linea generale, è stata sempre verificata la compatibilità idraulica della posizione delle spalle con l'onda di piena con $Tr=200$ anni; in tal senso, la distanza minima tra

le spalle è sempre tale da non interferire in alcun modo con la sezione idraulica del canale corrispondente alla piena duecentennale;

- Nel caso del ponte sull'attuale via dell'Osmannoro, che attraversa il Nuovo Fosso Reale nel suo tratto iniziale ("Ponte sul Fosso Reale"), considerato che, nel tratto a monte del ponte, gli argini del Fosso Reale sono costituiti da muri a retta in c.a. e che gli argini in terra iniziano soltanto a valle dello stesso ponte, è sembrato opportuno posizionare le spalle in modo tale da dare continuità al muro d'argine; in questo modo, gli argini in terra iniziano a valle del ponte e sono stati raccordati alle spalle dello stesso mediante muri di transizione che hanno anche la funzione di setti antifiltrazione. Lo schema grafico della posizione delle spalle rispetto alla piena duecentennale e la posizione dei muri di transizione sono riportati in Figura 10 e Figura 11;

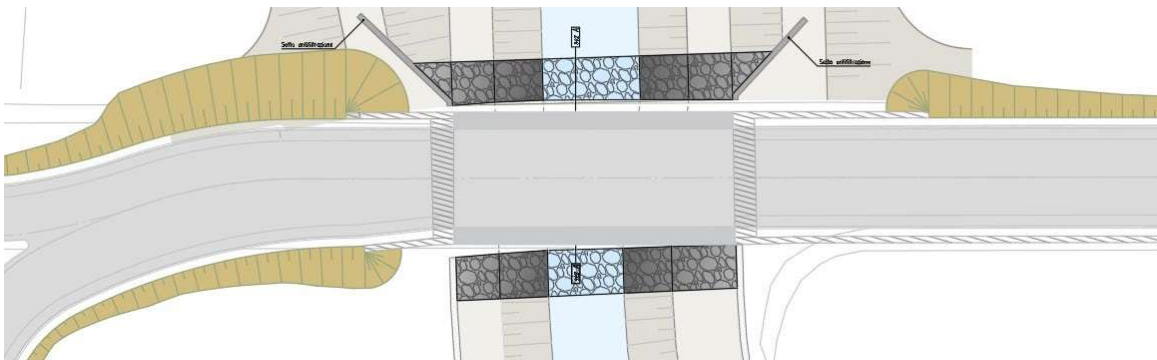


Figura 10 - Planimetria sul Fosso Reale

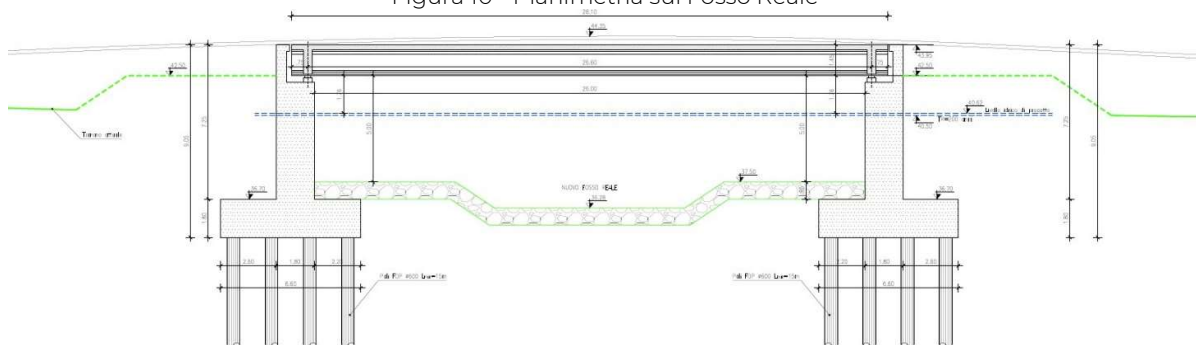


Figura 11 - Profilo ponte sul Fosso Reale

- Nel caso del ponte sul ramo di collegamento alla discarica e alla rampa di immissione sull'Autostrada A11, che scavalca sempre il Nuovo Fosso Reale ("Ponte

su Rampa di accesso A11”), fatto salvo la compatibilità idraulica, sono state condotte considerazioni di tipo diverso; in prima istanza, è stato ipotizzato di evitare qualsiasi interferenza delle spalle con gli argini in terra, posizionando le stesse oltre gli argini, ad una distanza dal piede degli stessi pari a 6 m; in questa posizione, per consentire l’inerbimento e la manutenzione degli argini, era stata ipotizzata, inizialmente, una luce sulla sommità degli argini pari a 3.4 m. In tale ipotesi, considerato che la luce dell’impalcato era pari a 63,50 m, dal quale risultava un’altezza della sezione dell’impalcato pari ad almeno 3,20 m, la quota dell’estradosso dell’impalcato risultava pari a 47,30 m. Volendo mantenere un limite di velocità pari a 40 km/h e quindi una velocità di progetto pari a 50 km/h, il valore minimo del raggio del raccordo verticale previsto dal D.M. 19/4/2006 sarebbe pari a 1500 m, incompatibile con l’andamento altimetrico del tracciato. Inoltre tale soluzione richiederebbe una pendenza della livelletta superiore al 7% per raccordarsi alla rampa autostradale, pendenza inammissibile con i valori limiti previsti dal D.M. 19/4/2006. In considerazione di ciò, in seconda istanza, è stata valutata la possibilità di lasciare inalterata la posizione delle spalle e ridurre la luce sulla sommità dell’argine a quella strettamente necessaria per poter ispezionare le travi dell’impalcato, pari a 1,00 m; in tale ipotesi, la quota dell’estradosso dell’impalcato risultava comunque pari a 44,90 m. Tuttavia anche in questa seconda ipotesi, il raggio altimetrico minimo previsto dal D.M. 19/04/2006 risultava incompatibile con l’andamento altimetrico. Inoltre, considerato anche la larghezza dell’impalcato in corrispondenza della biforcazione con la rampa dell’A11, che risulta pari a 13,30 m e le difficoltà di inerbimento degli argini al disotto delle opere d’arte, con la necessità di prevedere comunque la protezione dell’intero argine con una mantellata in pietrame, si è optato per utilizzare la possibilità di deroga prevista dalla circolare esplicativa delle NTC 2018 al punto 5.1.2.4, quando gli elementi del ponte fanno parte di un progetto unitario e quindi soddisfano i requisiti di compatibilità idraulica di cui al punto appena menzionato, posizionando le spalle in corrispondenza degli argini, come mostrato in Figura 12 e Figura 13, e provvedendo a raccordare le spalle agli argini con muri di transizione.

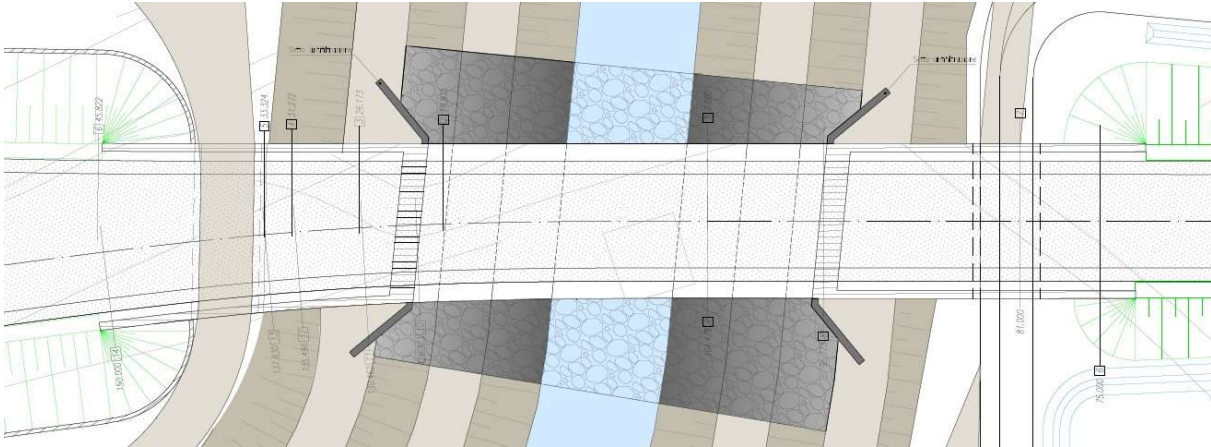


Figura 12 - Planimetria Ponte su Rampa di accesso A11

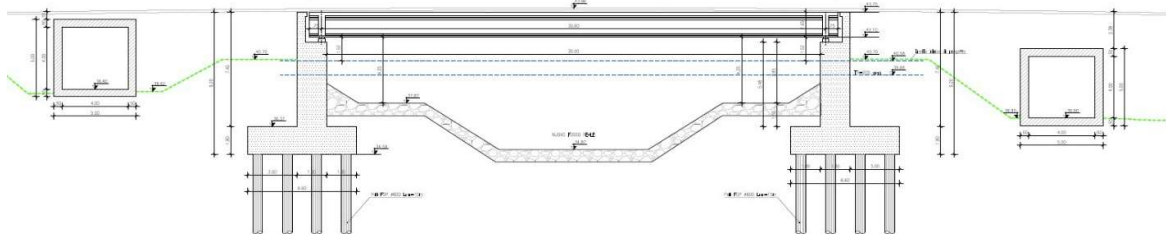


Figura 13 - Profilo Ponte su Rampa di accesso A11

In definitiva, anche se le spalle dei ponti in progetto interessano i corpi arginali dei corsi d'acqua, non è pregiudicata la sicurezza delle opere stesse ed è comunque garantita la compatibilità idraulica. Infatti, come già accennato, è previsto un graduale raccordo delle scarpate arginali con le spalle dei ponti e un rivestimento in scogliera intasata con calcestruzzo di tutta la superficie in ombra del ponte compreso i tratti di raccordo. Inoltre la posizione planimetrica delle spalle non limita la sezione idraulica, che risulta essere verificata con i franchi richiesti per un tempo di ritorno pari a 200 anni. Gli accorgimenti presi fanno in modo da garantire la compatibilità idraulica per tutte le opere in progetto.

“Ponte su Fosso reale e Ponte su Rampa di accesso A11”

Sia il ponte sul ramo di collegamento alla Rampa di immissione sull'autostrada A11 che il Ponte sul Fosso Reale sono composti 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 travi 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.

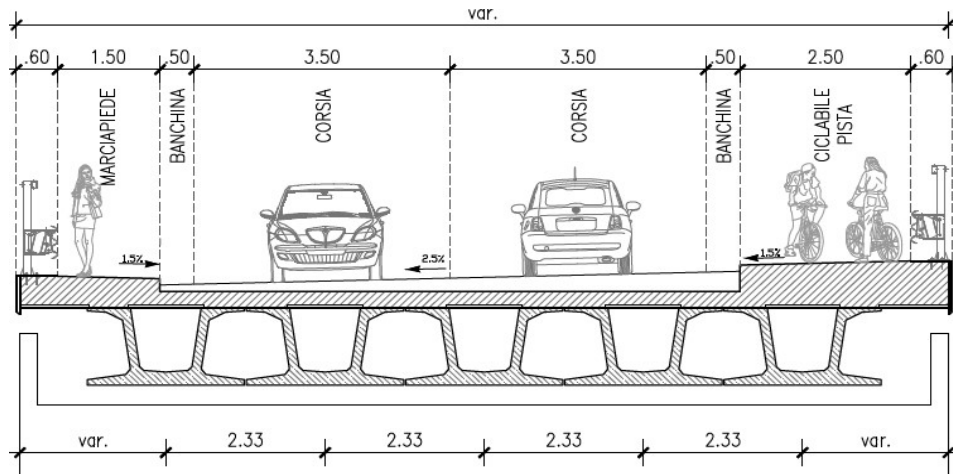


Figura 14 - Sezione tipo Ponte su fosso reale

8.2. 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 variabile da 12.70m a 16.00.

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 di sezione variabile da 80cm a 60cm scavati in continuità realizzati preventivamente e le cui testate vengono solidarizzate da cordoli. Per contrastare le

spinte sui diaframmi durante le fasi di scavo viene realizzato un sistema di trave autoportante tipo “TRAVE NPS” a struttura mista acciaio – CLS portante se stessa ed il solaio di competenza oltre che, ovviamente, le spinte del terreno. Il terreno viene scavato a foro cieco al di sotto dell’impalcato, che fa da puntone in testa ai diaframmi.

Terminata la fase di scavo verranno realizzati la soletta di fondo e i paramenti laterali interni che costituiscono il corpo vero e proprio dello scatolare gettato in opera del tunnel e supporta tutti i carichi statici e dinamici e delle spinte del terreno.

Per la raccolta delle acque meteoriche all’interno viene realizzata una vasca in c.a. impermeabile secondo il metodo della “vasca bianca” posizionata sotto la soletta di fondo nel punto di minimo della tratta. L’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 posando opportunamente in fase di costruzione dei giunti bentonici per le riprese di getto.

Infine, per contrastare le spinte sulle pareti laterali e sul fondo della piattaforma stradale derivanti dalla pressione idrostatica, è stata proseguita la sezione ad U dello scatolare anche oltre la zona della pista di decollo e per tutta la parte in trincea fino alla quota di -2.00m dal P.C. Di seguito si riportano le immagini delle diverse sezioni.

9 Barriere di sicurezza

Secondo quanto previsto dal quadro normativo i dispositivi di ritenuta che possono essere impiegati nel presente progetto sono:

- Le barriere di sicurezza dotati di marcatura CE ai sensi della norma EN 1317-5;
- I terminali speciali testati:
 - a) omologati ai sensi del decreto ministeriale 21.6.2004;
 - b) non omologati ma rispondenti alle norme UNI ENV 1317-4. In questo caso l'impiego è subordinato alla verifica di rispondenza alla norma UNI ENV 1317-4 che gli enti appaltanti devono eseguire richiedendo preventivamente i rapporti di 'crash test' al riguardo necessari, rilasciati da campi prova certificati secondo le norme ISO EN 17025.

In particolare, i dispositivi che risultano sprovvisti di marcatura CE, possono essere utilizzati entro i dodici mesi dall'entrata in vigore del D.M. 28.6.2011, purché immessi sul mercato entro il 31 dicembre 2010, ovvero installati prima di tale termine, nel caso in cui il fabbricante o produttore coincida con la stazione appaltante, rientranti in una delle due seguenti casistiche:

- a) dispositivi di ritenuta stradale omologati fino al 31 dicembre 2010, ai sensi del D.M. 21.6.2004;
- b) i dispositivi di ritenuta stradale sottoposti con esito positivo alle prove d'urto prescritte dalla norma EN 1317, i cui rapporti di prova siano stati verificati, ai sensi del D.M. 21 giugno 2004 e del relativo allegato tecnico, da parte della stazione appaltante.

In considerazione di quanto appena esposto, per la redazione del presente progetto è stato fatto riferimento alle sole barriere di sicurezza dotate di marcatura CE.

Conformemente a quanto contenuto nel DM 2367 del 21.06.2004, indicazioni riprese nella Circolare esplicativa prot. 62032 in merito all'uniforme applicazione delle norme in materia di progettazione, omologazione, impiego dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni" sono stati protetti i seguenti elementi del margine stradale:

- I margini di tutte le opere d'arte all'aperto, quali ponti, viadotti, ponticelli, sovrappassi e muri di sostegno della carreggiata, indipendentemente dalla loro estensione longitudinale e dall'altezza sul piano di campagna;
- Il margine stradale nelle sezioni in rilevato dove il dislivello tra il colmo dell'arginello ed il piano di campagna è maggiore o uguale a 1 m le cui scarpate abbiano pendenza maggiore o uguale a 2/3;
- Gli ostacoli fissi che potrebbero costituire un pericolo per gli utenti della strada in caso di urto.

La scelta della categoria minima dei dispositivi di sicurezza installati l'ungo la viabilità di progetto è stata effettuata secondo quanto prescritto dal DM 2367, a seconda della destinazione e ubicazione, della categoria e dell'andamento piano altimetrico dell'infrastruttura stradale ed infine considerando le caratteristiche e la composizione delle correnti veicolari che la percorreranno tanto in termini quantitativi, riferendosi al Traffico Giornaliero Medio (TGM) previsto, quanto qualitativi in termini di categorie veicolari e quantità di veicoli pesanti che le percorreranno.

Pertanto, nella definizione del grado di contenimento delle barriere si è fatto riferimento alle seguenti tabelle, contenute nel citato DM 2367, dove la prima definisce il livello di traffico in relazione al TGM e alla percentuale di veicoli pesanti, mentre la seconda definisce il grado di contenimento minimo delle barriere a seconda dell'elemento da proteggere a partire dal tipo di strada e dal livello di traffico atteso.

Livello di Traffico	TGM	% Veicoli con massa > 3.5 t
I	≤ 1000	qualunque
	> 1000	≤ 5
II	> 1000	5 – 15
III	> 1000	> 15

Figura 18 – Classificazione dei Livelli di Traffico per la scelta tipologica

Tipo di strada	Tipo di traffico	Barriere spartitraffico	Barriere bordo laterale	Barriere bordo ponte
Autostrade (A)	I	H2	H1	H2

Strade extraurbane principali (B)	II	H3	H2	H3
	III	H3-H4 (2)	H2-H3 (2)	H3-H4 (2)
Strade extraurbane secondarie (C)	I	H1	N2	H2
	II	H2	H1	H2
	III	H2	H2	H3
Strade locali (F)	I	N2	N1	H2
	II	H1	N2	H2
	III	H1	H1	H2

Figura 19 – Classificazione progettuale dei dispositivi di sicurezza longitudinali

Si richiama l'attenzione sul fatto che la destinazione "Barriere bordo ponte" si riferisce solo ad "opere di luce superiore a 10 metri; per luci minori sono equiparate al bordo laterale", indipendentemente dalla loro altezza sul piano campagna. I muri di sostegno, che sono evidentemente opere di luce nulla, sono pertanto da equiparare anch'essi al bordo laterale, indipendentemente dall'altezza sul piano campagna e dalla loro estensione.

In ogni caso i muri e le opere d'arte, indipendentemente dalla loro luce e dalla loro altezza sul piano campagna, devono essere sempre protetti con barriere di classe non inferiore ad H2.

Si evidenzia che il criterio definito dalla norma si riferisce alla luce dell'opera e non alla lunghezza dell'eventuale cordolo soprastante, che può interessare anche eventuali muri andatori. Nel caso in cui la barriera sia da installare su cordolo in cemento armato, la tipologia di barriera sarà del tipo "da bordo opera d'arte" sebbene della classe corrispondente al bordo laterale, quindi già provata su cordolo in cemento armato.

Al fine di consentire un corretto funzionamento delle barriere, il D.M. 21.6.2004 prevede che si estenda la protezione con una barriera della medesima classe per uno sviluppo sufficiente a garantire che la barriera funzioni opportunamente nel punto di inizio e di fine del tratto da proteggere. A monte e a valle dei tratti che necessitano di protezione deve essere pertanto previsto un tratto di barriera denominato "ala prima" e "ala dopo" in modo da assicurare che le condizioni di funzionamento siano soddisfacenti in tutto il tratto di interesse. Il D.M. 21.6.2004 prevede che "Le protezioni dovranno in ogni caso essere

effettuate per una estensione almeno pari a quella indicata nel certificato di omologazione, ponendone circa due terzi prima dell'ostacolo (...omissis...)".

Nel caso di "dispositivi misti" secondo il D.M. 21.6.2004 (barriera bordo ponte accoppiata a barriera bordo laterale), la lunghezza di funzionamento (L_f) della barriera installata sarà uguale alla maggiore tra quelle prescritte nelle omologazioni dei due tipi di dispositivo da impiegare.

Una transizione potrà essere considerata strutturalmente continua laddove il sistema realizzato dall'accoppiamento dei due dispositivi (bordo opera e bordo laterale o spartitraffico) preveda:

- l'utilizzo di barriere dello stesso materiale;
- la continuità degli elementi longitudinali resistenti che devono avere, in generale, lo stesso profilo. Tale requisito è inderogabile per la lama principale. Per gli altri elementi longitudinali, purché tutti strutturalmente "resistenti", potranno essere adottati pezzi speciali di raccordo.

Si considerano elementi longitudinali "resistenti" la lama principale a tripla onda, l'eventuale lama secondaria sottostante o soprastante la lama principale, ed i profilati aventi funzione strutturale. Non sono considerati elementi strutturali "resistenti" i correnti superiori arretrati rispetto al fronte della barriera e con esclusiva funzione di antibaltamento ed i correnti inferiori pararuota.

La continuità degli elementi longitudinali di 2 barriere può essere garantita anche se questi sono installati ad altezze leggermente diverse (max 20 cm). In questo caso dovranno essere utilizzati elementi di raccordo inclinati sul piano verticale di non più di 4.6° e sul piano orizzontale di non più di 5°.

Il DM 2367 classifica le barriere, oltre che per la classe di contenimento, anche per quanto attiene alla severità dell'urto che viene determinato in base ai valori assunti dagli indici: A.S.I (indice di severità dell'accelerazione), T.H.I.V. (indice di velocità della testa teorica) e P.H.D. (indice di decelerazione della testa dopo l'impatto); tali indici risultano definiti nella norma UNI EN 1317 parti 1 e 2. In base agli indici sopra citati la norma UNI EN 1317-2 individua due classi di severità riassunte nella tabella seguente.

Livello di severità dell'urto	Valori degli indici		
A	ASI ≤ 1.0	THIV ≤ 33 km/h	PHD $\leq 20g$
B	ASI ≤ 1.4		

Figura 20 – Classificazione delle barriere in termini di severità degli urti

Sempre la norma UNI EN 1317-2 puntualizza:

- “il livello di severità d'urto A garantisce un maggior livello di sicurezza per gli occupanti di un veicolo che esce di strada rispetto al livello B e viene preferito quando altre considerazioni si equivalgono”;
- “in luoghi pericolosi specifici in cui il contenimento di un veicolo che esce di strada (come un camion di trasporto pesante) è la considerazione principale, può essere necessario adottare e installare una barriera di sicurezza senza un livello di severità d'urto specifico. I valori degli indici registrati nella prova della barriera di sicurezza, tuttavia, devono essere citati nel resoconto di prova”.

Riguardo alla deformabilità si è fatto riferimento ai due seguenti parametri che vengono determinati dalle prove di crash-test:

- La deflessione dinamica ovvero è il massimo spostamento dinamico trasversale del frontale del sistema di contenimento;
- La larghezza operativa (W) ovvero la distanza tra la posizione iniziale del frontale del sistema stradale di contenimento e la massima posizione dinamica laterale di qualsiasi componente principale del sistema.

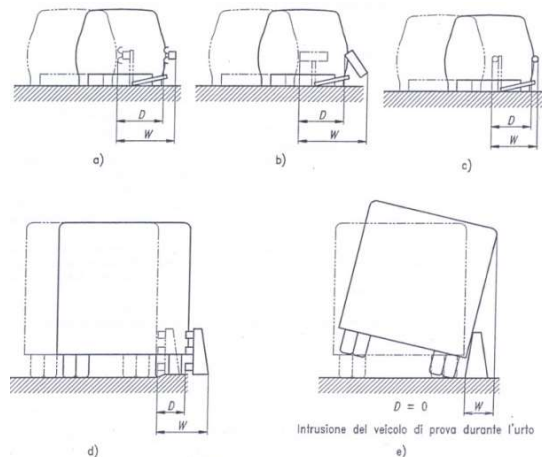


Figura 21 – Deflessione dinamica (D) e Larghezza operativa (W)

Ai fini della limitazione degli effetti dell'urto per gli occupanti dei veicoli leggeri, si sono previste barriere con un indice ASI minore o uguale a 1.0, ad eccezione dei tratti ritenuti particolarmente pericolosi (opere d'arte), in cui il contenimento del veicolo in svio diviene un fattore essenziale ai fini della sicurezza, dove saranno utilizzate barriere con un indice ASI fino ad 1,4.

Nella tabella seguente si riporta la classificazione delle barriere di sicurezza in base alla classe di larghezza operativa (W) a cui appartengono.

Classe di appartenenza	W [m]
W1	$W \leq 0,6$
W2	$W \leq 0,8$
W3	$W \leq 1,0$
W4	$W \leq 1,3$
W5	$W \leq 1,7$
W6	$W \leq 2,1$
W7	$W \leq 2,5$
W8	$W \leq 3,5$

Figura 22 – Classificazione delle barriere in funzione della larghezza operativa (W)

Ai fini della scelta della classe di barriere di sicurezza sono stati considerati i seguenti elementi:

- la pendenza delle scarpate;
- l'altezza del rilevato;
- tipologia di opera d'arte;
- la presenza di elementi rigidi, edifici, strade, ferrovie, depositi materiale pericoloso o simili in prossimità del confine stradale;
- la percentuale di traffico pesante;
- il tipo di strada secondo il DM 05/11/2001.

All'infrastruttura è stata attribuito il Tipo di traffico II (secondo il D.M. n. 2367 del 21.06.2004) in funzione del TGM bidirezionale ed alla percentuale di veicoli pesanti (VP) previsti in progetto.

Nella tabella seguente sono riassunte le scelte effettuate nella redazione del progetto. In aggiunta a quanto indicato nella tabella seguente si precisa che tutte le barriere da bordo laterale è previsto siano caratterizzate dalla classe minima di danno agli occupanti (ASI A).

Tipo di strada	Destinazione	Strada tipo C
Viabilità principale	Bordo laterale con rilevato $H_{ril} < 1$ m	Nessuna protezione
	Bordo laterale con rilevato $H_{ril} \geq 1$ m	H1BL (W4)
	Opera d'arte di luce $L \leq 10$ m	H1BL (W4)
	Opera d'arte di luce $L \geq 10$ m	H2BP (W4)
	Galleria	Newjersey cls

Figura 23 – Classi minime di barriere adottate in progetto

Allegato 1 – Tabulati di calcolo – verifiche stradali

Dati generali profilo

Tipo piattaforma:	Carreggiata singola
Posizione asse:	Centro
Tipo normativa:	ITA - Normativa stradale 2002 - Italia
Tipo strada:	C1 - Extraurbana secondaria
Velocità minima:	60.00 km/h
Velocità massima:	100.00 km/h

✓ 1 Livelletta - N. 1	Pendenza: -0.020 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.020 v/h	0.070 v/h	

✓ 2 Parabola altimetrica - N. 1	Raggio: 9795.435 m Lunghezza: 105.935 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		9795.435 m	40.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		9795.435 m	246.807 m	43.81 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		9795.435 m	819.016 m	43.81 km/h

✓ 3 Livelletta - N. 2	Pendenza: -0.009 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.009 v/h	0.070 v/h	

✓ 4 Parabola altimetrica - N. 2	Raggio: 6000.000 m Lunghezza: 188.372 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		6000.000 m	20.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		6000.000 m	823.045 m	80.00 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		6000.000 m	3614.221 m	80.00 km/h

✓ 5 Livelletta - N. 3	Pendenza: -0.041 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.041 v/h	0.070 v/h	



✓ 6 Parabola altimetrica - N. 3	Raggio: 3000.000 m Lunghezza: 113.159 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		3000.000 m	40.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		3000.000 m	823.045 m	80.00 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		3000.000 m	2584.794 m	80.00 km/h



✓ 7 Livelletta - N. 4	Pendenza: -0.003 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.003 v/h	0.070 v/h	

✓ 8 Parabola altimetrica - N. 4	Raggio: 2800.000 m Lunghezza: 188.210 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		2800.000 m	40.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		2800.000 m	690.818 m	73.29 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		2800.000 m	2257.852 m	73.29 km/h

✓ 9 Livelletta - N. 5	Pendenza: 0.064 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.064 v/h	0.070 v/h	




✓ 10 Parabola altimetrica - N. 5	Raggio: 1236.726 m Lunghezza: 110.512 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		1236.726 m	20.000 m	







 Raggio minimo comfort accelerazione verticale	1236.726 m	280.059 m	46.67 km/h
 Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)	1236.726 m	688.065 m	46.67 km/h







 11 Livelletta - N. 6	Pendenza: -0.025 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
 Pendenza massima		0.025 v/h	0.070 v/h	




Dati generali asse








Tipo piattaforma:	Carreggiata singola
Posizione asse:	Centro
Tipo normativa:	ITA - Normativa stradale 2002 - Italia
Tipo strada:	E - Urbana di quartiere 1+1
Velocità minima:	40.00
Velocità massima:	60.00





 1 Rettifilo - N. 1	Lunghezza: 24.790	Elemento	Riferimento	Velocità
 Lunghezza minima		24.790	30.000	40.00
 Lunghezza massima		24.790	880.000	40.00



 2 Raccordo - N. 1	Raggio: 75.000 Lunghezza: 33.515	Elemento	Riferimento	Velocità
 Raggio minimo in funzione della velocità		75.000	51.422	40.00
 Lunghezza minima per una corretta percezione		33.515	32.574	46.91
 Raggio minimo dal rettifilo precedente		75.000	24.790	
 Raggio minimo dal rettifilo successivo		75.000	289.681	
 Raccordo senza transizioni				






 3 Clotoide - N. 1	Parametro A: 40.000 Lunghezza: 21.333	Elemento	Riferimento	Velocità
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata		40.000	55.330	51.33
 Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli		40.000	35.822	51.33
 Parametro A minimo da criterio ottico		40.000	25.000	
 Parametro A massimo da criterio ottico		40.000	75.000	
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta		40.000	53.342	51.33




 4 Rettifilo - N. 2	Lunghezza: 289.681	Elemento	Riferimento	Velocità
 Lunghezza minima		289.681	50.000	60.00
 Lunghezza massima		289.681	1320.000	60.00







 5 Clotoide - N. 2	Parametro A: 80.000 Lunghezza: 30.142	Elemento	Riferimento	Velocità
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata		80.000	75.600	60.00
 Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli		80.000	59.488	60.00
 Parametro A minimo da criterio ottico		80.000	70.776	
 Parametro A massimo da criterio ottico		80.000	212.328	
 Rapporto parametri A da criterio ottico		1.000	0.667	
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta		80.000	74.239	60.00




 6 Raccordo - N. 2	Raggio: 212.328 Lunghezza: 328.455	Elemento	Riferimento	Velocità
 Raggio minimo in funzione della velocità		212.328	51.422	40.00
 Lunghezza minima per una corretta percezione		328.455	41.667	60.00
 Raggio minimo dal rettifilo successivo		212.328	124.294	

 7 Clotoide - N. 3	Parametro A: 80.000 Lunghezza: 30.142	Elemento	Riferimento	Velocità
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata		80.000	75.600	60.00

 Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	80.000	59.488	60.00
 Parametro A minimo da criterio ottico	80.000	70.776	
 Parametro A massimo da criterio ottico	80.000	212.328	
 Rapporto parametri A da criterio ottico	1.000	0.667	
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta	80.000	74.239	60.00

 8 Rettifilo - N. 3 Lunghezza: 124.294	Elemento	Riferimento	Velocità
 Lunghezza minima	124.294	50.000	60.00
 Lunghezza massima	124.294	1320.000	60.00

 9 Clotoide - N. 4 Parametro A: 60.000 Lunghezza: 16.202	Elemento	Riferimento	Velocità
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata	60.000	33.600	40.00
 Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	60.000	15.712	40.00
 Parametro A minimo da criterio ottico	60.000	74.065	
 Parametro A massimo da criterio ottico	60.000	222.194	
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta	60.000	34.421	40.00

 10 Raccordo - N. 3 Raggio: 222.194 Lunghezza: 22.663	Elemento	Riferimento	Velocità
 Raggio minimo in funzione della velocità	222.194	51.422	40.00
 Lunghezza minima per una corretta percezione	22.663	27.778	40.00

Dati generali profilo

Tipo piattaforma:	Carreggiata singola
Posizione asse:	Centro
Tipo normativa:	ITA - Normativa stradale 2002 - Italia
Tipo strada:	E - Urbana di quartiere 1+1
Velocità minima:	40.00 km/h
Velocità massima:	60.00 km/h

✓ 1 Livelletta - N. 1	Pendenza: 0.027 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.027 v/h	0.080 v/h	

✓ 2 Parabola altimetrica - N. 1	Raggio: 1000.000 m Lunghezza: 61.136 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		1000.000 m	20.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		1000.000 m	292.705 m	47.71 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		1000.000 m	706.618 m	47.71 km/h

✓ 3 Livelletta - N. 2	Pendenza: -0.034 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.034 v/h	0.080 v/h	

✓ 4 Parabola altimetrica - N. 2	Raggio: 3500.000 m Lunghezza: 116.941 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		3500.000 m	40.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		3500.000 m	462.963 m	60.00 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		3500.000 m	1481.372 m	60.00 km/h

✓ 5 Livelletta - N. 3	Pendenza: -0.001 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.001 v/h	0.080 v/h	




✓ 6 Parabola altimetrica - N. 3	Raggio: 4000.000 m Lunghezza: 25.396 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		4000.000 m	20.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		4000.000 m	462.963 m	60.00 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		4000.000 m	0.000 m	60.00 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di Sorpasso)		4000.000 m	0.000 m	60.00 km/h



✓ 7 Livelletta - N. 4	Pendenza: -0.007 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.007 v/h	0.080 v/h	

✓ 8 Parabola altimetrica - N. 4	Raggio: 2009.899 m Lunghezza: 31.564 m	Elemento	Riferimento	Velocità
● Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie		2009.899 m	40.000 m	
● Raggio minimo comfort accelerazione verticale		2009.899 m	456.003 m	59.55 km/h
● Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)		2009.899 m	0.000 m	59.55 km/h

✓ 9 Livelletta - N. 5	Pendenza: 0.009 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
● Pendenza massima		0.009 v/h	0.080 v/h	

✓ 10 Parabola altimetrica - N. 5	Raggio: 1000.000 m Lunghezza: 37.756 m	Elemento	Riferimento	Velocità
----------------------------------	--	----------	-------------	----------

 Raggio minimo per evitare il contatto con la superficie	1000.000 m	20.000 m	
 Raggio minimo comfort accelerazione verticale	1000.000 m	205.761 m	40.00 km/h
 Raggio minimo da visibilità (con Distanza di arresto)	1000.000 m	0.000 m	40.00 km/h

 11 Livelletta - N. 6	Pendenza: -0.029 v/h	Elemento	Riferimento	Velocità
 Pendenza massima		0.029 v/h	0.080 v/h	

Dati generali asse

Tipo piattaforma:	Carreggiata singola
Posizione asse:	Centro
Tipo normativa:	ITA - Normativa stradale 2002 - Italia
Tipo strada:	C1 - Extraurbana secondaria
Velocità minima:	60.00
Velocità massima:	100.00

1 Rettifilo - N. 1 Lunghezza: 73.341	Elemento	Riferimento	Velocità
Lunghezza minima	73.341	30.000	34.55
Lunghezza massima	73.341	760.026	34.55





2 Clotoide - N. 1 Parametro A: 150.000 Lunghezza: 80.357	Elemento	Riferimento	Velocità
Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata	150.000	53.377	50.42
Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	150.000	86.316	50.42
Parametro A minimo da criterio ottico	150.000	93.333	
Parametro A massimo da criterio ottico	150.000	280.000	
Rapporto parametri A da criterio ottico	0.714	0.667	
Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta	150.000	31.873	50.42








3 Raccordo - N. 1 Raggio: 280.000 Lunghezza: 296.803	Elemento	Riferimento	Velocità
Raggio minimo in funzione della velocità	280.000	118.110	60.00
Lunghezza minima per una corretta percezione	296.803	55.556	80.00
Raggio minimo dal rettifilo precedente	280.000	73.341	




4 Clotoide - N. 2 Parametro A: 210.000 Lunghezza: 157.500	Elemento	Riferimento	Velocità
Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata	210.000	134.400	80.00
Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	210.000	108.730	80.00
Parametro A minimo da criterio ottico	210.000	93.333	
Parametro A massimo da criterio ottico	210.000	280.000	
Rapporto parametri A da criterio ottico	1.400	0.667	
Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta	210.000	114.276	80.00








5 Rettifilo - N. 2 Lunghezza: 145.886	Elemento	Riferimento	Velocità
Lunghezza minima	145.886	90.000	80.00
Lunghezza massima	145.886	1760.000	80.00






6 Clotoide - N. 3 Parametro A: 192.000 Lunghezza: 184.320	Elemento	Riferimento	Velocità
Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata	192.000	134.400	80.00
Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	192.000	91.894	80.00
Parametro A minimo da criterio ottico	192.000	66.667	
Parametro A massimo da criterio ottico	192.000	200.000	
Rapporto parametri A da criterio ottico	1.280	0.667	
Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta	192.000	119.602	80.00







 7 Raccordo - N. 2 Raggio: 200.000 Lunghezza: 206.282	Elemento	Riferimento	Velocità
 Raggio minimo in funzione della velocità	200.000	118.110	60.00
 Lunghezza minima per una corretta percezione	206.282	50.898	73.29
 Raggio minimo dal rettifilo precedente	200.000	145.886	




 8 Clotoide - N. 4 Parametro A: 150.000 Lunghezza: 112.500	Elemento	Riferimento	Velocità
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata	150.000	93.927	66.88
 Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	150.000	84.020	66.88
 Parametro A minimo da criterio ottico	150.000	66.667	
 Parametro A massimo da criterio ottico	150.000	200.000	
 Rapporto parametri A da criterio ottico	0.781	0.667	
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta	150.000	79.568	66.88

 9 Rettifilo - N. 3 Lunghezza: 12.857	Elemento	Riferimento	Velocità
 Lunghezza massima	12.857	949.190	43.14
 Lunghezza massima flesso	12.857	17.120	43.14

 10 Clotoide - N. 5 Parametro A: 64.000 Lunghezza: 25.600	Elemento	Riferimento	Velocità
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata	64.000	34.331	40.43
 Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	64.000	58.432	40.43
 Parametro A minimo da criterio ottico	64.000	53.333	
 Parametro A massimo da criterio ottico	64.000	160.000	
 Rapporto parametri A da criterio ottico	1.000	0.667	
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula esatta	64.000	22.364	40.43

 11 Raccordo - N. 3 Raggio: 160.000 Lunghezza: 33.762	Elemento	Riferimento	Velocità
 Raggio minimo in funzione della velocità	160.000	118.110	60.00
 Lunghezza minima per una corretta percezione	33.762	24.328	35.03
 Raggio minimo dal rettifilo precedente	160.000	12.857	
 Raggio minimo dal rettifilo successivo	160.000	14.140	

 12 Clotoide - N. 6 Parametro A: 64.000 Lunghezza: 25.600	Elemento	Riferimento	Velocità
 Parametro A minimo da limitazione del contraccolpo Formula approssimata	64.000	16.358	27.91
 Parametro A minimo da limitazione della pendenza longitudinale dei cigli	64.000	48.547	27.91
 Parametro A minimo da criterio ottico	64.000	53.333	
 Parametro A massimo da criterio ottico	64.000	160.000	
 Rapporto parametri A da criterio ottico	1.000	0.667	

 13 Rettifilo - N. 4 Lunghezza: 14.140	Elemento	Riferimento	Velocità
 Lunghezza minima	14.140	30.000	25.00
 Lunghezza massima	14.140	550.000	25.00