



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
A.a. 2020/2021
Sessione di Laurea Dicembre 2021

Impiego di metodologie BIM per la progettazione stradale in contesti paesaggistici vincolati

Relatore:
Prof. Ing. Orazio Baglieri

Candidati:
Mariarosa Raco

Correlatore:
Ing. Bruno Polifroni

Sommario

Abstract.....	6
1. BIM.....	7
1.1 Cos'è il BIM	7
1.2 InfraBIM.....	9
1.3 Interoperabilità.....	10
1.4 Livello di maturità	10
1.5 Livello di dettaglio (LOD).....	12
2. Implementazione del BIM	14
2.1 Limitazione all'implementazione del BIM.....	15
3. Caso studio	16
3.1 Inquadramento territoriale.....	16
3.2 Descrizione dell'intervento	18
4. Modellazione con Civil Design 13.0	19
4.1 Terreno	20
4.2 Criteri utilizzati per la definizione del tracciato.....	22
4.3 Caratteristiche geometriche del tracciato	26
4.4 Andamento planimetrico.....	27
4.4.1 Verifica dei rettili	27
4.4.2 Inserimento delle curve circolari	28
4.4.3 Assegnazione delle pendenze trasversali alle curve	30
4.4.4 Progettazione ed inserimento dei raccordi clotoidici	35
4.4.5 Andamento dei cigli.....	37
4.4.6 Allargamento della carreggiata in curva	39
4.5 Andamento altimetrico dell'asse	41

4.5.1	Raccordi verticali	41
4.5.2	Raccordi verticali convessi e dossi	43
4.5.3	Raccordi verticali concavi e sacche	45
4.6	Distanze di visibilità	48
4.6.1	Distanza di visibilità per l'arresto.....	48
4.7	Diagramma delle velocità	61
4.7.1	Perdita di tracciato	63
4.8	Sezioni trasversali	64
4.9	Pavimentazione stradale.....	66
4.9.1	Pavimentazione tipo.....	67
4.9.2	Calcolo sovrastruttura stradale	68
4.10	Barriere stradali e dispositivi di sicurezza.....	71
4.11	Intersezione a rotatoria.....	75
4.11.1	Elaborati grafici	81
4.12	Tracciato BIM	81
4.13	Modellazione con OpenRoads.....	86
5.	Conclusioni	94
6.	Bibliografia e sitografia.....	96

Abstract

L'obiettivo della seguente tesi è quello di approfondire la metodologia Building Information Modeling (BIM) nell'ambito della progettazione delle infrastrutture stradali, in quanto nel settore edilizio risulta essere già sviluppato.

Principalmente la procedura viene utilizzata per integrare le diverse discipline che sono necessarie nelle varie fasi del progetto: pianificazione, progetto, costruzione e manutenzione.

Operare con progetti a vasta scala non è di facile gestione, si parla di opere che si estendono per diversi chilometri, in maniera georeferenziata e comprendenti rilievi territoriali. Utilizzando questa metodologia, lo scopo è quello di utilizzare un modello unico virtuale che riesce a racchiudere molte informazioni inerenti a diversi aspetti del progetto; questi dati possono essere messi a servizio di tutti i soggetti coinvolti per migliorare la cooperazione.

Nel presente elaborato viene fornita inizialmente una descrizione sulla metodologia BIM, successivamente viene applicata ad un caso studio reale per valutare la potenzialità del BIM nel progetto di un'infrastruttura stradale. Il caso studio è rappresentato dalla realizzazione di una proposta progettuale riguardante una strada intercomunale nel comune di Fiumedinisi, provincia di Messina.

Inizialmente è stato individuato un corridoio ideale per il passaggio della nuova infrastruttura adattandola a quella esistente, cercando di non modificare l'assetto territoriale presente, rispettando i vincoli di natura paesaggistica. Infine, sono stati realizzati dei collegamenti con la viabilità esistente attraverso la modellazione di una intersezione a raso a rotatoria.

1. BIM

1.1 Cos'è il BIM

Nel periodo attuale si sta assistendo allo sviluppo di metodologie innovative come BIM, acronimo di Building Information Modeling, il cui significato indica la modellazione informativa di una costruzione. Il BIM, come si pensa nella maggior parte dei casi, non rappresenta proprio un software ma è un insieme di strumenti utilizzati per la creazione di modelli virtuali dettagliati che riguardano gli aspetti del progetto. In linea generale, la procedura BIM permette di integrare interattivamente i contributi multidisciplinari che intervengono nelle varie fasi del progetto: dalla pianificazione, al progetto, alla costruzione e manutenzione.

Si assiste al passaggio dal CAD (Computer Aided Design – Progettazione assistita dall'elaboratore) al BIM dove la progettazione viene concepita in modo completamente diverso: una delle tante differenze risiede nella modellazione 3D; bisogna fare attenzione, in quanto non bisogna intendere il BIM come un'evoluzione del CAD poiché si tratta di programmi di approccio alla progettazione totalmente differenti: nel BIM vi è la presenza di un unico modello, questo viene ad essere utilizzato come “base” da cui estrarre tutto quello che serve, poiché in esso sono presenti tutte le informazioni necessarie per ogni fase della progettazione (manutenzione, strutture, impianti, ...), arrivando a quella gestionale (computi metrici); permette di far collaborare ed integrare le diverse figure, progettisti, strutturisti ed impiantisti, mentre nel CAD vi è il tradizionale disegno creato in modo indipendente, quindi, una modifica apportata non viene visualizzata immediatamente dagli altri componenti, deve essere riportata negli altri file di lavoro e questo comporta un elevato tempo di rielaborazione. [1]

Attraverso l'utilizzo del BIM si assiste ad una velocizzazione dei tempi, in quanto non vi è più la necessità di disegnare linee e polilinee, ma bisognerà inserire oggetti che siano dotati di particolari proprietà e ciò comporta una riduzione degli errori.

Per definire una regolamentazione nell'ambiente BIM e fornire una tempistica di adozione della metodologia nelle Opere Pubbliche è stato emanato il decreto Baratonò n. 560 del 1° dicembre 2017 le Direttive Europee (2014/24/UE):

- Per opere con importo superiore a *100 milioni di euro* è stato necessario adottare la metodologia BIM già dal 1° gennaio 2019;
- Per lavori con importo superiore a *50 milioni di euro* è stata adottata la metodologia BIM dal 1° gennaio 2020;
- Per lavori con importo superiore a *15 milioni di euro* è stata adottata la metodologia BIM dal 1° gennaio 2021;
- Per lavori con importo superiore a quello che viene riportato nell'art. 35 del Codice dei contratti pubblici bisognerà adottare la metodologia BIM a partire dal 1° gennaio 2022;
- Per lavori con importo superiore a *1 milione di euro* invece si dovrà adottare la metodologia BIM dal 1° gennaio 2023;
- Infine, per lavori con importo inferiore a *1 milione di euro* si adotterà la metodologia BIM dal 1° gennaio 2025. [2]

La Norma UNI11337-2017 prevede una classificazione delle dimensioni:

- 3D: classificazione che vede una modellazione tridimensionale a cui si possono aggiungere delle informazioni;
- 4D: classificazione riguardante l'analisi della durata. È possibile controllare lo sviluppo del progetto al fine di aumentare la produttività;
- 5D: classificazione relativa all'analisi dei costi. È possibile eseguire un controllo dal punto di vista finanziario per migliorare il budget del progetto;
- 6D: classificazione del ciclo di vita e manutenzione. È possibile venire a conoscenza di quale sarà il comportamento della struttura prima che questa venga realizzata.

- 7D: classificazione per la valutazione della sostenibilità. In questa dimensione si può conoscere lo stato in cui si trova la struttura per poter tenerla sotto controllo.

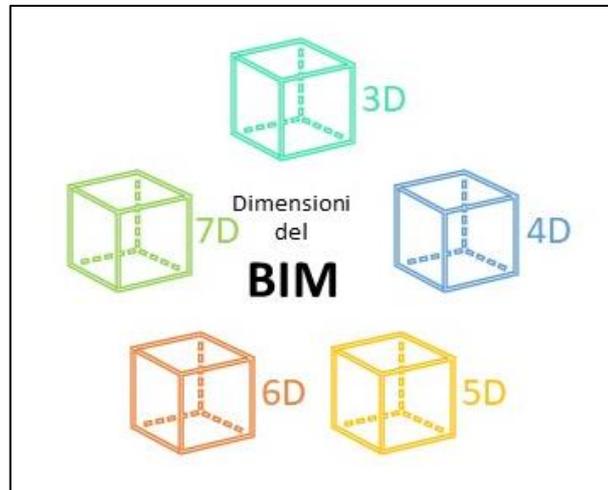


Figura 1-1: rappresentazione delle dimensioni del BIM

1.2 InfraBIM

Un ambito importante in cui applicare il BIM per cercare di ottimizzare i processi è senz'altro la progettazione di infrastrutture, in questo caso si parla di InfraBIM.

In questo settore si riscontrano delle difficoltà dovute al fatto che la modellazione informatizzata, sia in ambito stradale che ferroviario, coinvolge diversi aspetti come l'analisi ambientale, le interferenze con le infrastrutture e con le opere esistenti.

Tramite le piattaforme GIS vengono gestiti i dati relativi al territorio; si parla di dati disomogenei che devono essere resi necessariamente omogenei in formato digitale per poter gestire in maniera semplice i dati del rilievo che rappresentano il punto di partenza della creazione del modello digitale del terreno (DTM), arrivando successivamente alla creazione della modellazione digitale in 3D dell'infrastruttura.

La caratteristica del BIM è quella di caratterizzare le componenti del modello dell'infrastruttura attraverso la definizione di classi di oggetti associando un contenuto informativo.

Il vantaggio di questo sistema è che permette l'estrazione di ciò che è fondamentale per lavorare: i profili, le planimetrie e le sezioni trasversali; inoltre, è possibile costruire e tenere "dinamicamente attivo" un unico modello virtuale interscambiabile, capace di racchiudere la maggior parte delle informazioni dell'infrastruttura che possono essere monitorate per fornire in tempo reale le informazioni necessarie relative al traffico, allo stato di esercizio, arrivando così alla creazione di una piattaforma efficiente. [3]

1.3 Interoperabilità

Una grande opera necessita di una pianificazione su tutti i livelli, partendo da quello urbano a quello logistico, da quello temporale a quello economico; questo modello permette ai professionisti di poter lavorare utilizzando dei formati standardizzati.

Nell'ambito delle infrastrutture gioca un ruolo importante l'interoperabilità con le altre piattaforme BIM, ovvero il trasferimento dei contenuti ottenuti da diversi software, tra questi vi è il noto formato IFC (Industry Foundation Classes) supportato da BuildingSMART; Il fatto che ogni programma usi il proprio linguaggio rappresenta un problema poiché rende difficile la collaborazione con altri programmi.

Per risolvere questo problema bisogna utilizzare un formato standard che assicuri l'interoperabilità e l'interscambio dei dati, senza incorrere nel pericolo di perdere informazioni di qualsiasi genere, anche se alcune volte, ancora per poco, questo problema può presentarsi. Il LandXML rappresenta lo standard più diffuso nell'ambito delle infrastrutture poiché è un formato che assicura un'interazione operativa tra i professionisti.

Nell'ambito delle infrastrutture, dal momento che si lavora molto con riqualificazione di strade esistenti, risulta importante poter trasformare in modo digitale le caratteristiche geometriche di queste. [4]

1.4 Livello di maturità

In questi anni la metodologia BIM è cresciuta sempre più, ed è per questo che, nel contesto della costruzione, è nata l'esigenza di poter classificare la maturità attraverso dei

livelli di collaborazione che sono noti proprio come livelli di maturità BIM in cui si riconoscono tre categorie diverse:

- Una prima categoria nota come PAM (Project Assessment Models), in cui si valuta il livello di competenza nei confronti di un progetto;
- Una seconda categoria nota come OAM (Organization Assessment Models), in cui si misura la maturità delle organizzazioni che utilizzano i processi BIM;
- Una terza categoria in cui rientrano gli operatori BIM. [5]

Nel capitolo 5 della norma UNI 11337:2017 “Edilizia e opere di ingegneria civile – Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni – Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi” si possono definire cinque livelli di maturità:

- Livello “0”: non digitale;
- Livello “1”: base;
- Livello “2”: elementare;
- Livello “3”: avanzato;
- Livello “4”: ottimale

Livello di Maturità (UNI 11337-1)	Livello 0	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4
Esigenze individuate dalla norma	Trasferimento di contenuti informativi tramite elaborati informativi non digitali	Trasferimento di contenuti informativi attraverso elaborati informativi digitali e non	Trasferimento di contenuti informativi prevalentemente attraverso modelli informativi grafici, eventualmente accompagnati da elaborati informativi grafici digitali	Modelli informativi grafici ed elaborati comunicano attraverso schede informative digitali di prodotto e di processo	Trasferimento di contenuti informativi attraverso modelli informativi (virtualizzabili in senso grafico, documentale, multimediale)

Figura 1-2: matrice di maturità BIM¹

Nel Livello “0” non vi è alcun livello di cooperazione, ciascuno dei progettisti lavora in un documento proprio. Vengono utilizzati dei documenti cartacei per condividere le informazioni.

Nel Livello “1” vi è una collaborazione parziale. Attraverso elaborati in formato digitale vengono trasferiti i contenuti informativi. In questo livello rimane comunque la presenza

¹ Fonte: norma UNI 11337-1

del cartaceo. Inoltre, viene utilizzato un CDE (Common Data Environment) che rappresenta un ambiente di condivisione dati (ACDat);

Nel Livello “2” si ha una collaborazione completa, vengono utilizzati diversi modelli CAD, bisogna però assicurare la presenza di un tipo di file comune che contenga tutte le informazioni relative al progetto (file IFC). Si utilizzando dei modelli informativi grafici per trasferire i contenuti informativi; vi è ancora la presenza di elaborati informativi grafici digitali. In questo livello si introduce la gestione del tempo (4D) e il costo (5D).

Nel livello “3” si assiste a un’integrazione completa. Il modello sarà condiviso per essere accessibile a coloro che hanno lavorato nel progetto. Per rendere più facile una connessione tra i modelli informativi grafici e gli elaborati si possono impiegare delle schede digitali che hanno una comunicazione diretta con i modelli tecnici.

Nel livello “4” si utilizzano modelli informativi documentati per il trasferimento dei contenuti. [5]

1.5 Livello di dettaglio (LOD)

Tutte le informazioni relative al BIM, riguardanti gli elementi del modello, vengono raccolte in un database di informazioni, per poi definire quelle necessarie alla modellazione.

Il LOD (Level Of Detail) permette la definizione della qualità e della quantità di un contenuto da parte di coloro che sono parte attiva del progetto.

La definizione delle caratteristiche di ogni livello è stata affrontata dall’American Institute of Architects che ha pubblicato un quadro Level of Detail in cui si hanno cinque livelli: LOD 100, LOD 200, LOD 300/350, LOD 400, LOD 500; la normativa italiana, la UNI 11337-4:2017 concorde con gli standard internazionali fa una distinzione: si ha il LOD che rappresenta il livello di sviluppo degli oggetti digitali, a sua volta composto dal LOG che è il livello di sviluppo degli oggetti che comprende gli attributi geometrici, e dal LOI, è un livello di sviluppo degli oggetti che comprende gli attributi informativi.

Ogni LOD è concatenato al livello precedente, portando con sé tutte le caratteristiche.

La normativa adotta la scala generale:

- LOD 100: l'elemento è rappresentato graficamente in modo generico, è un modello che contiene i requisiti di prestazione;
- LOD 200: l'elemento viene rappresentato graficamente in modo generico (quantità, orientamento, dimensioni, forma, posizione);
- LOD 300/350: l'elemento risulta rappresentato in modo specifico (posizione, dimensione, orientamento);
- LOD 400: l'elemento è rappresentato in modo specifico (posizione, dimensione, orientamento), riporta dei dettagli che riguardano la produzione che va dalla fabbricazione all'installazione;
- LOD 500: l'elemento è rappresentato in modo veritiero, si cerca di rispecchiare la realtà che viene controllata in cantiere (posizione, dimensione, forma, quantità, orientamento). [6]

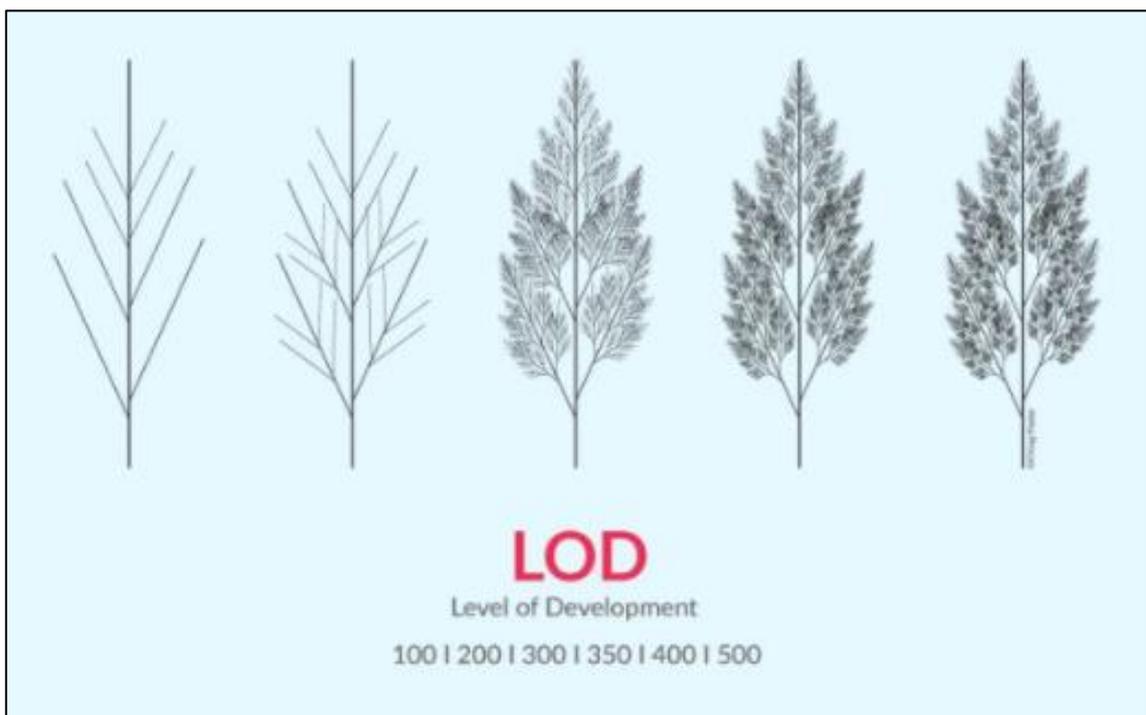


Figura 1-3: Level of Development

I LOD non si riferiscono alle infrastrutture ma alle costruzioni poiché la differenza tra i due sta nei dettagli: nei primi bisogna avere un'ampia visione di questi per poter

concentrarsi sulle caratteristiche di tutto quello che è presente in un'infrastruttura, mentre nel caso delle costruzioni ci si sofferma su caratteristiche relative agli ambienti interni.

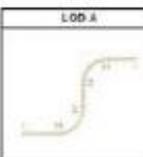
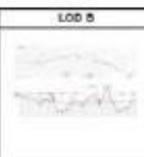
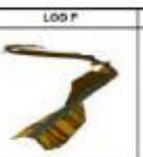
LOD A	LOD B	LOD C	LOD D	LOD E	LOD F	LOD G
						
Geometria Tracciato planimetrico base (2D).	Geometria Tracciato planimetrico complessivo di curve di transizione. Tracciato altimetrico complessivo di raccordi verticali.	Geometria Tracciato pianometrico completo.	Geometria Modello stradale a superfici, costruito sull'asse 3D.	Geometria Modello stradale completo a superfici, costruito sull'asse 3D.	Geometria Come LOD E. (mezzo di quanto eseguito).	Geometria Nuovi manufatti. Come LOD F (con aggiornamenti). Manutenzione e gestione su tracce esistenti. Come LOD C e D (a partire da).
Oggetto Asse 2D	Oggetto Asse 2D nel piano orizzontale. Asse 2D nel piano verticale.	Oggetto Asse 3D	Oggetto Asse 3D Superfici 3D	Oggetto Asse 3D Superfici 3D	Oggetto Asse 3D Superfici 3D	Oggetto Asse 3D Superfici 3D
Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Lunghezze rettili • Raggi curve circolari 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Parametri cotanti • Livellato • Raccordi verticali • Categoria stradale 	Caratteristiche	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Sezione trasversale da categoria stradale • Riduzione dei cigli • Allargamenti in curva 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Sezioni tipo • Pendenza scarpate • Smaltimento acque di piovantona • Volumi di materiale (movimenti terra, pavimentazioni, ecc.) 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Certificazioni di prodotto • Certificati di omologazione • Informazioni su terre e rocce da scavo • Esiti prove in situ • Esiti prove di laboratorio 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Data di ultima manutenzione • Soggetto manutenzione • Tipo di intervento • Stato lavori

Figura 1-4: Esempio di LOD tracciati stradali

2. Implementazione del BIM

La tanta popolarità del BIM non si riflette in modo significativo nell'adozione da parte dei professionisti che, titubanti sull'argomento, non sono propensi all'adozione della nuova metodologia. Però, si sta assistendo ad un maggiore utilizzo nell'ambito delle infrastrutture, a seguito del diffondersi di una competizione nell'aggiudicarsi i nuovi lavori, e quindi la maggior parte delle aziende ha capito l'influenza che ha questo nell'assegnazione di un progetto.

Dal momento che il metodo BIM si basa su un modello che è comune a tutti coloro che lavorano nel progetto, una modifica che viene fatta da un componente, viene resa visibile a tutti, risulta quindi necessario garantire un approccio integrato.

I vantaggi dei progetti realizzati con le tecniche BIM sono davvero molti, tra cui: minori rielaborazioni, diminuzione degli errori, collaborazione ottimale e dati utili per gestire la manutenzione.

Ci si sofferma a pensare quale sia il modo migliore per implementare il BIM affinché questo riscuota maggior successo; bisogna tenere presente che il BIM trasforma in meglio i metodi di lavoro ed è per questo che bisogna far sì che si diffonda il prima possibile. Però la maggior parte delle aziende mostra una certa preoccupazione nel cambiamento che vedrà un approccio basato sul BIM, dal momento che rompe gli schemi di pensiero convenzionali.

Per poter implementare il BIM è necessario tenere presente che risulta di fondamentale importanza la preparazione degli operatori ad un cambiamento nell'esecuzione dei progetti, completamente diversa della precedente: non si avrà più a che fare con punti, linee, ma ci si concentra su modelli intelligenti molto accurati. Linee, archi, e così via, si trovano ancora alla base di un progetto, però bisogna anche dire che ormai il CAD è diventato 3D. La visualizzazione dei modelli 3D è molto importante per la costruzione, aiuta a comprendere meglio i dettagli del progetto.

Nell'implementazione del BIM bisogna eseguire delle analisi, sia per quanto riguarda il livello dell'azienda, sia per il livello di progetto.

Dopodiché bisogna cercare di capire il livello di conoscenza del BIM, dei software che si dovranno utilizzare; bisogna anche modificare il metodo di lavoro del personale, ci deve essere una maggiore comunicazione tra i dipendenti che devono lavorare in maniera integrata. [7]

È possibile prevedere i problemi, andando ad intervenire preventivamente, cercando di eliminare i costi e ridurre i tempi di riprogettazione.

2.1 Limitazione all'implementazione del BIM

Il BIM ha dimostrato di avere benefici, ma sono altrettanti i problemi che devono essere superati. Innanzitutto, il problema principale è l'elevato costo, le aziende pensano la formazione BIM come qualcosa di troppo costoso, sia dal punto di vista della formazione che dell'acquisto delle licenze dei software. L'interoperabilità è un altro dei problemi a cui segue un'ideologia abituale a non voler cambiare il modo in cui si lavora; infine, non per importanza, c'è uno scarso personale esperto in campo BIM.

3. Caso studio

Al fine di verificare la validità della nuova metodologia BIM si è scelto di studiare un caso reale e si è potuto constatare come questa metodologia semplifica il lavoro.

Il caso studio è stato progettato e verificato inizialmente con il software CivilDesign 13.0 per arrivare all'esportazione di un file IFC, in un secondo momento è stato creato in OpenRoads e successivamente esportato in formato IFC.

L'operatività BIM è stata garantita con gli altri operatori coinvolti (strutturisti, idraulici, impiantisti, ambientalisti) attraverso il protocollo di interscambio aperto *.ifc; questo metodo rende il processo di lavoro ottimale.

Lo studio in esame riguarda il programma di riorganizzazione del sistema della viabilità, finalizzato a migliorare il collegamento del Comune di Fiumedinisi con la grande viabilità regionale attraverso la viabilità esistente nel territorio del Comune di Nizza di Sicilia.

Il progetto in esame, oltre ad essere stato eseguito a scopo didattico, sarà anche utilizzato come una reale soluzione progettuale.

Prima di giungere alla soluzione presa in esame, sono state analizzate diverse alternative allo scopo di valutare la migliore opzione che restituisse un'adeguata geometria stradale, facendo attenzione ai problemi dovuti dall'ambiente circostante.

3.1 Inquadramento territoriale

Dal momento che il caso in esame si trova in un contesto con molteplici vincoli paesaggistici, è risultato necessario effettuare una verifica della compatibilità paesaggistica.

Il comune di Fiumedinisi e il Comune di Nizza ricadono entrambi nel territorio della Provincia di Messina, sono collegati unicamente dalla Strada Provinciale n.27, che dipartendosi dalla S.S. 114 Orientale Sicula in prossimità dell'abitato di Nizza di Sicilia, collega il centro abitato di Fiumedinisi con la riviera Jonica.

Il suo tracciato, dall'andamento stretto e tortuoso, si sviluppa a mezza costa seguendo la sponda sud-ovest del Torrente Fiumedinisi e nonostante i ripetuti interventi di messa in sicurezza, in parecchi tratti risulta essere a rischio frane.

La Strada Provinciale esistente non riesce a svolgere pienamente le finalità richieste perché il tracciato ha caratteristiche plano-altimetriche che ne limitano l'utilizzo. Inoltre, la probabile caduta di materiale franato sulla piattaforma stradale o la presenza di mezzi incidentati potrebbero addirittura impedire temporaneamente il transito sulla Strada Provinciale 27 e quindi isolare il Comune di Fiumedinisi.

Il territorio del Comune di Fiumedinisi risulta collegato con quello del Comune di Nizza di Sicilia anche da una pista carrabile esistente lungo la sponda sud del torrente. Essa costituisce la sede della condotta fognaria realizzata dal Comune di Fiumedinisi ed è separata dal torrente in parte mediante muri in cemento armato ed in parte mediante gabbionate in pietrame.



Figura 3-1: posizione della Strada Intercomunale

I paesaggi riconosciuti sono:

- Area della Catena Settentrionale Monti Peloritani;
- Valle del Nisi e Monte Scuderi.

La zona in cui si trova il progetto è situata nel settore orientale della Sicilia, in cui, come detto precedentemente, si ha la presenza dei Monti Peloritani. La zona presenta una morfologia complicata dal momento che sono presenti monti tortuosi, inoltre sono presenti numerosi torrenti caratterizzati da bacini modesti.

Bisogna prestare molta attenzione durante la realizzazione del progetto in quanto vi sono delle limitazioni sia nella realizzazione di discariche di rifiuti, nella realizzazione di cave, di tralicci e soprattutto vi è una forte limitazione nei movimenti di terra per non incorrere nella trasformazione del paesaggio ed è per questo che non è possibile realizzare opere che non siano di origine naturale.

3.2 Descrizione dell'intervento

Il tracciato di progetto, di lunghezza pari a 2,658 *km* tratta il completamento della strada intercomunale che collega il comune di Nizza di Sicilia con quello di Fiumedinisi, adattando il tracciato, quanto più possibile, alla pista carrabile, al fine di generare un percorso alternativo a quello definito dalla Strada Provinciale 27.

Il collegamento della strada di nuova realizzazione con la Strada Provinciale avverrà, a monte, all'altezza della Chiesa della Madonna delle Grazie, ed a valle, in prossimità dell'abitato di Nizza di Sicilia, con un collegamento intermedio in corrispondenza dell'Area Artigianale.

La progettazione geometrica è stata basata sui seguenti criteri:

- “D.M. 5 Novembre 2001: Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade”;
- Art. 146 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, Decreto Legislativo 22 Gennaio 2004 per verificare la compatibilità paesaggistica;
- soluzioni tecniche per limitare l'impatto sull'ambiente;
- limitazione dei movimenti di terra;
- valutazione in modo puntuale dei costi di costruzione;
- scelta delle modifiche del tracciato in funzione della topografia, altimetria, manufatti esistenti ed espropri.

4. Modellazione con Civil Design 13.0

Il progetto è stato realizzato tramite l'utilizzo del programma Civil Design 13.0, creato da Digicorp Ingegneria S.r.l.

Esso permette una modellazione dinamica tridimensionale, è possibile eseguire la progettazione in ogni sua fase in 3D e questo rende possibile avere una visione di quello che sarà il progetto finale, questo è molto importante perché la maggior parte delle volte risalta problemi che non potevano essere visti in altri modi. Il software crea modelli digitali a triangoli, a curve di livello e successivamente è possibile ricavare sezioni e profili che rappresentano la base da cui iniziare la progettazione del caso studio.

Ogni qual volta si apportano delle modifiche al progetto, tracciati, profili e sezioni vengono aggiornati poiché sono dinamici.

I tracciati vengono costruiti e verificati secondo quanto previsto dalle normative vigenti. [8]

La metodologia BIM in questo caso ci è servita per poter comunicare riguardo le modifiche apportate al progetto. Il BIM permette di costruire un database in cui conservare tutte le informazioni relative al progetto per poterle visionarle e modificarle in qualsiasi momento. Durante la progettazione, venivano aggiunte continuamente informazioni da parte di tutti i progettisti, informazioni che in un'epoca precedente dovevano essere progettate singolarmente, e alla fine assemblarle nel progetto finale, in questo modo invece è possibile inserirle sin da subito. Dal momento che si è deciso di procedere con la costruzione di due gallerie, le modifiche da apportare erano continue ed erano subito disponibili per coloro i quali dovevano collaborare al progetto, questo vale anche dal punto di vista dell'idraulica, ...

L'utilizzo di software come CivilDesign ma anche OpenRoads Designer e altri ancora permette la progettazione in 3D e permette inoltre l'accesso al file di base del progetto.

4.1 Terreno

La realizzazione del modello stradale è stata effettuata partendo dal rilievo fornito dal gruppo di progettisti del Comune di Messina.

Nell'immagine seguente viene riportato l'intero rilievo da cui è iniziata la progettazione, in esso sono presenti le diverse curve di livello, assegnate ai diversi layer in base alla loro quota e la restituzione aerofotogrammetrica:

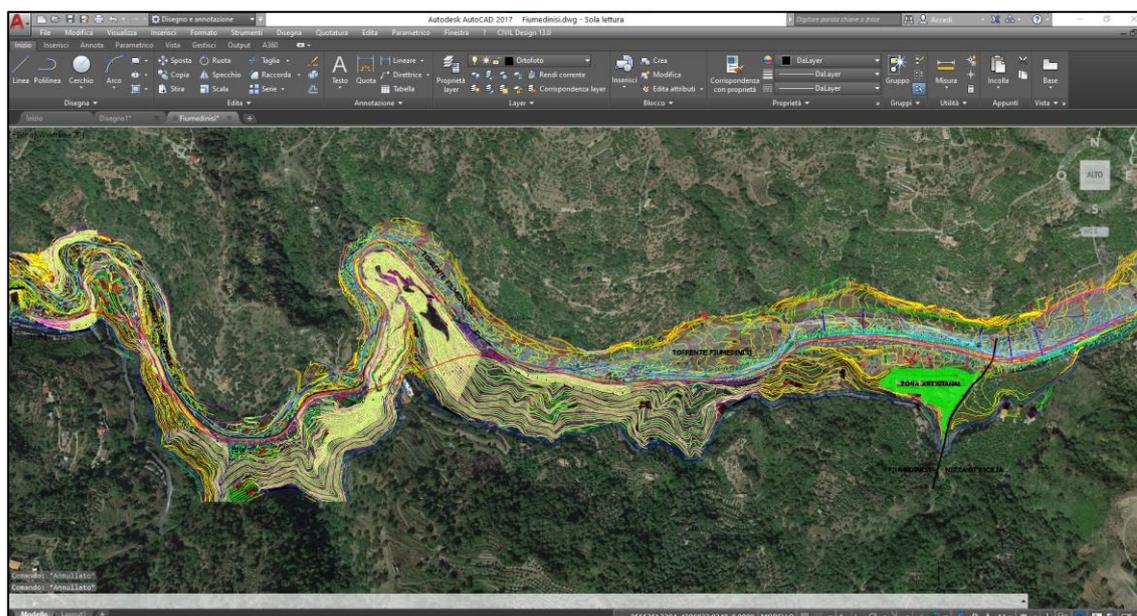


Figura 4-1: rilievo del terreno

Il rilievo celerimetrico del progetto e la restituzione dei punti in coordinate tridimensionali georiferite rispetto al sistema di Gauss-Boaga (lineare) sono stati utilizzati per creare una superficie TIN (Triangulated Irregular Network) che rappresenta la base per creare il modello DTM (Digital Terrain Model), necessario per la realizzazione del tracciato planimetrico e altimetrico in quanto restituisce le diverse quote.

Dal seguente comando di CivilDesign è stato possibile creare il modello digitale andando a selezionare i punti e le polilinee da prendere in considerazione:

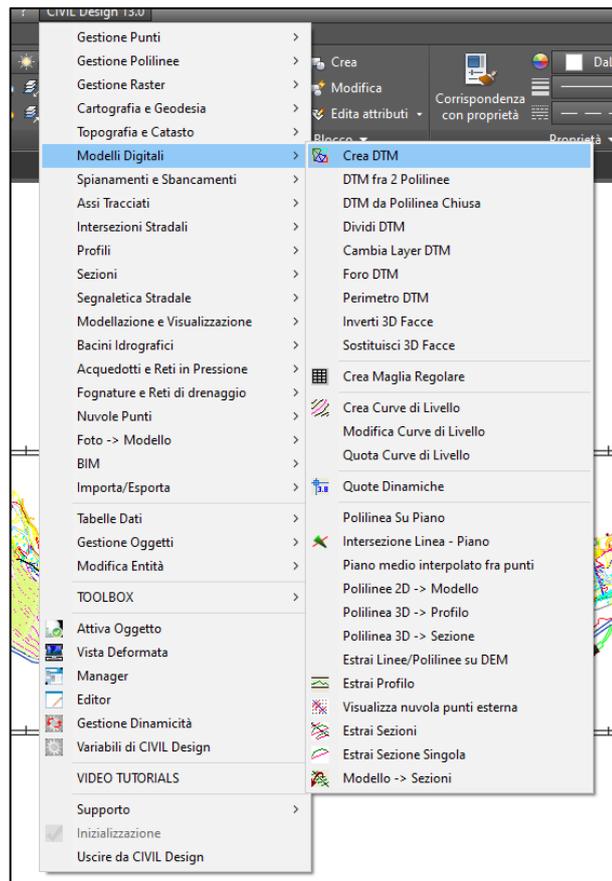


Figura 4-2: creazione del DTM tramite CivilDesign

È stato ottenuto il seguente modello digitale:

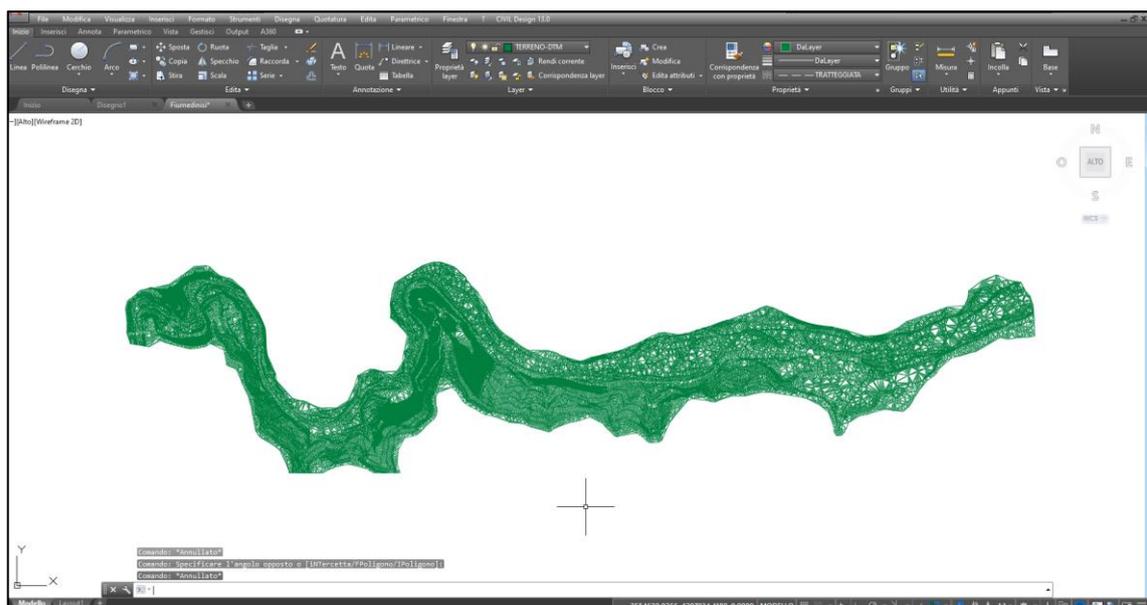


Figura 4-3: DTM area di progetto

4.2 Criteri utilizzati per la definizione del tracciato

Il passo successivo è stato quello di studiare il percorso: l'obiettivo era collegare i due punti, il primo, che va da Nizza di Sicilia fino al secondo punto, rappresentato dalla Chiesa della Madonna delle Grazie.

Inizialmente, era stato pensato di realizzare una strada di categoria C1, ma successivamente al sopralluogo effettuato, si è capito che la strada di progetto prevista seguiva proprio la pista arginale la cui sezione era inferiore alla C1, decidendo di adottare una categoria F2.

Sono state ipotizzate diverse soluzioni di tracciato, ma è stata la strada esistente a fornire l'indirizzo base per il tracciamento dell'asse stradale, riscontrando notevoli difficoltà nell'adattare la nuova Normativa (D.M. 05/11/2001). Lo scopo era quello di ottenere un tracciato che fosse il più possibile simile al precedente, eccezione fatta per due tratti in cui è stata prevista la realizzazione di due gallerie, realizzabile con un costo minimo e non recando danni all'ambiente circostante. È stato necessario ottimizzare l'asse stradale affinché risultasse sicuro e confortevole.

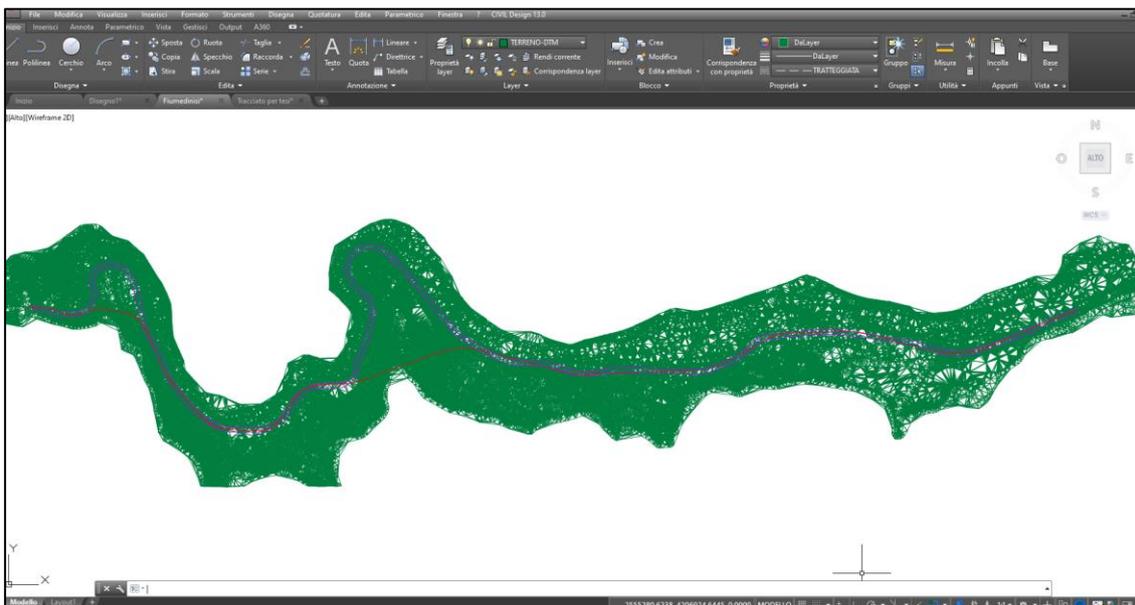


Figura 4-4: Superficie TIN e asse principale

Per la creazione dell'asse planimetrico sono stati impegnati rettifili, archi e clotoidi. Il software ha permesso una verifica diretta degli elementi nel rispetto della normativa, è risultato molto complicato seguire il tracciato esistente, in quanto inizialmente, in diversi punti non veniva rispettata la normativa; dopo diversi tentativi, la verifica degli elementi costituenti l'asse principale è risultata essere soddisfatta come riportato di seguito:

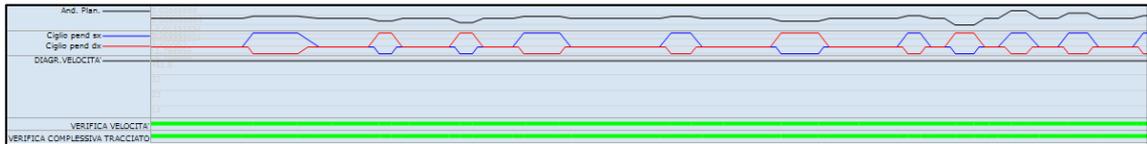


Figura 4-5: Verifica del tracciato

Ogni elemento che compone il tracciato è stato analizzato; sono riportati gli elementi con le rispettive caratteristiche:

Tabella 4-1: Elementi geometrici del tracciato

Tipo	Prog.I. [m]	Prog.F. [m]	Svil. [m]	Parametro [m]	Raggio I. [m]	Raggio F. [m]	Verso	pt dx [%]	pt sx [%]
RETTIFILO	0,000	204,943	204,943	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	204,943	229,697	24,754	72,100	0,000	210,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	229,697	329,945	100,248	0,000	210,000	210,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	329,945	377,564	47,619	100,000	210,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	377,564	487,968	110,404	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	487,968	512,168	24,200	66,000	0,000	180,000	Sx	0,000	0,000
ARCO	512,168	540,293	28,125	0,000	180,000	180,000	Sx	7,000	-7,000
CLOTOIDE	540,293	564,493	24,200	66,000	180,000	0,000	Sx	0,000	0,000
RETTIFILO	564,493	669,363	104,870	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	669,363	693,568	24,205	51,600	0,000	110,000	Sx	0,000	0,000
ARCO	693,568	721,741	28,173	0,000	110,000	110,000	Sx	7,000	-7,000
CLOTOIDE	721,741	745,946	24,205	51,600	110,000	0,000	Sx	0,000	0,000
RETTIFILO	745,946	812,076	66,131	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	812,076	837,076	25,000	75,000	0,000	225,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	837,076	917,954	80,878	0,000	225,000	225,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	917,954	942,954	25,000	75,000	225,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	942,954	1141,595	198,641	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	1141,595	1167,684	26,089	78,300	0,000	235,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	1167,684	1211,633	43,949	0,000	235,000	235,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	1211,633	1237,722	26,089	78,300	235,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	1237,722	1390,294	152,573	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	1390,294	1414,459	24,165	65,400	0,000	177,000	Sx	0,000	0,000
ARCO	1414,459	1498,604	84,145	0,000	177,000	177,000	Sx	7,000	-7,000
CLOTOIDE	1498,604	1522,768	24,165	65,400	177,000	0,000	Sx	0,000	0,000
RETTIFILO	1522,768	1674,669	151,901	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	1674,669	1698,857	24,188	64,500	0,000	172,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	1698,857	1726,920	28,064	0,000	172,000	172,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	1726,920	1751,108	24,188	64,500	172,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	1751,108	1781,584	30,477	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	1781,584	1805,833	24,249	41,200	0,000	70,000	Sx	0,000	0,000
ARCO	1805,833	1847,258	41,424	0,000	70,000	70,000	Sx	7,000	-7,000
CLOTOIDE	1847,258	1871,507	24,249	41,200	70,000	0,000	Sx	0,000	0,000
RETTIFILO	1871,507	1901,571	30,064	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	1901,571	1930,692	29,121	41,800	0,000	60,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	1930,692	1964,867	34,175	0,000	60,000	60,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	1964,867	1993,987	29,121	41,800	60,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	1993,987	2035,511	41,524	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	2035,511	2059,760	24,249	45,400	0,000	85,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	2059,760	2102,653	42,893	0,000	85,000	85,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	2102,653	2126,902	24,249	45,400	85,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	2126,902	2203,511	76,609	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	2203,511	2227,680	24,169	64,100	0,000	170,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	2227,680	2258,072	30,392	0,000	170,000	170,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	2258,072	2282,242	24,169	64,100	170,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	2282,242	2339,906	57,665	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	2339,906	2368,749	28,843	41,600	0,000	60,000	Sx	0,000	0,000
ARCO	2368,749	2399,415	30,666	0,000	60,000	60,000	Sx	7,000	-7,000
CLOTOIDE	2399,415	2428,257	28,843	41,600	60,000	0,000	Sx	0,000	0,000
RETTIFILO	2428,257	2456,915	28,658	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	2456,915	2471,272	14,357	28,100	0,000	55,000	Sx	0,000	0,000
ARCO	2471,272	2485,430	14,158	0,000	55,000	55,000	Sx	7,000	-7,000
CLOTOIDE	2485,430	2499,787	14,357	28,100	55,000	0,000	Sx	0,000	0,000
RETTIFILO	2499,787	2521,491	21,704	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	2521,491	2530,380	8,889	20,000	0,000	45,000	Dx	0,000	0,000
ARCO	2530,380	2554,007	23,627	0,000	45,000	45,000	Dx	-7,000	7,000
CLOTOIDE	2554,007	2562,895	8,889	20,000	45,000	0,000	Dx	0,000	0,000
RETTIFILO	2562,895	2583,493	20,597	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500
CLOTOIDE	2583,493	2592,382	8,889	20,000	0,000	45,000	Sx	0,000	0,000
ARCO	2592,382	2600,365	7,984	0,000	45,000	45,000	Sx	7,000	-7,000
CLOTOIDE	2600,365	2609,254	8,889	20,000	45,000	0,000	Sx	0,000	0,000
RETTIFILO	2609,254	2648,522	39,268	0,000	0,000	0,000		-2,500	-2,500

Successivamente è stato effettuato il calcolo delle rotazioni e dell'andamento dei cigli mediante un comando presente in CivilDesign nel quale viene selezionata la tipologia di strada, in questo caso F2 extraurbana ed è già nota la larghezza delle corsie e delle banchine:

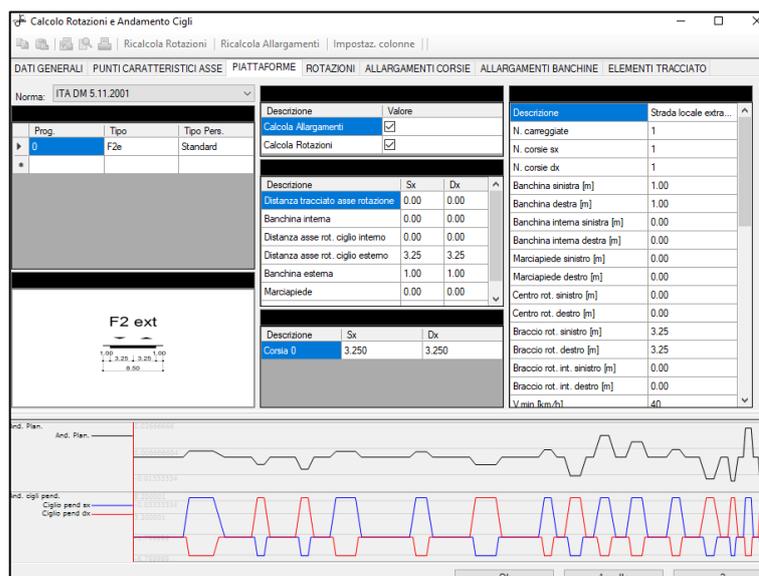


Figura 4-6: Calcolo rotazioni e andamento cigli

Viene restituito un tracciato completo di piattaforma stradale che è stato ottenuto dopo aver effettuato il calcolo delle sopraelevazioni in funzione della tipologia di sezione prescelta, comando che ha permesso in un secondo momento di ottenere le sezioni trasversali che fossero congruenti con l'andamento del tracciato:

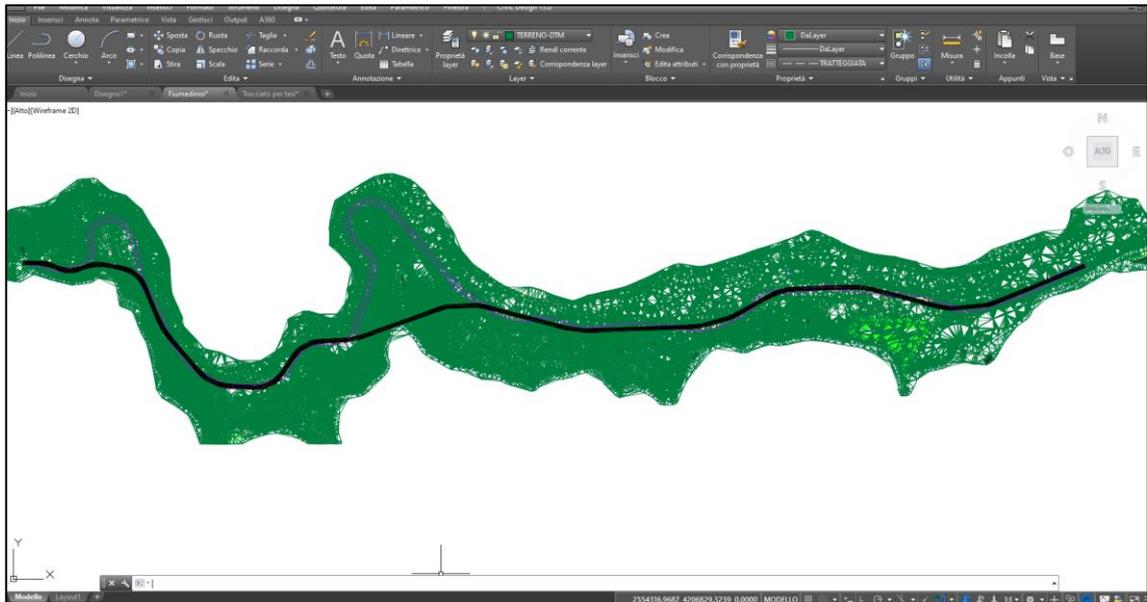


Figura 4-7: Tracciato completo

4.3 Caratteristiche geometriche del tracciato

Per la progettazione del tracciato si è fatto riferimento alla Normativa Italiana, “D.M. 6792/2001, Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade”.

Dopo varie discordanze riguardo al tipo di strada da adottare si è giunti alla conclusione che, per una buona progettazione, il nuovo tracciato dovesse appartenere alla strada di tipo F2; questa è una strada locale extraurbana e presenta un valore minimo della larghezza totale della carreggiata pari a 8,50 m. Si riportano le caratteristiche principali:

F2

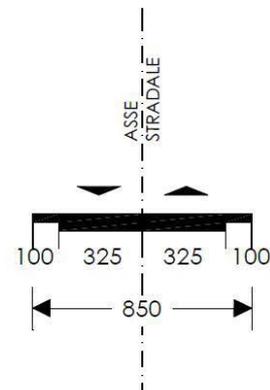


Tabella 4-2: proprietà principali della strada di tipo F2

Larghezza corsia (m)	Larghezza minima della banchina in destra (m)	Numero delle corsie per senso di marcia	Limite inferiore (km/ora)	Limite superiore (km/ora)
3,25	1,00	1	40	100

4.4 Andamento planimetrico

Il progetto in esame, come detto precedentemente, consiste in un completamento di infrastruttura esistente. A causa dei vincoli plano-altimetrici legati al percorso carrabile già esistente, l'applicazione puntuale del D.M. 05/11/2001 ha comportato notevoli difficoltà.

La scelta dell'andamento planimetrico della strada di progetto è stata prevalentemente condizionata, oltre che dai muri preesistenti, dall'impossibilità di realizzare rilevati nell'alveo del torrente Fiumedinisi, che avrebbero generato notevoli problemi in ordine all'impatto ambientale ed alle condizioni idrauliche dello stesso torrente.

Rettifili, curve circolari e raccordi a raggio variabile sono gli elementi che caratterizzano l'andamento planimetrico del tracciato.

4.4.1 Verifica dei rettifili

Per la progettazione dei rettifili bisogna fare attenzione per seguire diversi criteri. Innanzitutto, è necessario controllare la lunghezza del rettifilo per una serie di motivi che vengono riportati di seguito:

- Vi è l'influenza della forza centrifuga che impegna l'aderenza in senso trasversale per quanto riguarda un elemento di tracciato a curvatura non nulla. Se la somma vettoriale della forza centrifuga e delle resistenze longitudinali supera il valore dell'aderenza disponibile, il veicolo comincia a sbandare lateralmente, per cui il conducente riduce la velocità;
- aiutare a percepire il superamento del limite di sicurezza perché quando il conducente percorre lunghi rettifili a forte velocità, ha lo sguardo fissato su punti a una certa distanza dal veicolo e non vede la parte laterale della strada per cui non riesce a valutare la velocità del veicolo;
- valutare quando ridurre la velocità prima di immettersi nella curva successiva;
- Limitare gli effetti di abbagliamento durante la guida notturna;
- Monotonia di guida, tipica dei lunghi rettilinei, che può indurre sonnolenza.

Per questi motivi, la lunghezza di ogni rettifilo deve soddisfare la seguente relazione:

$$L_{min} \leq L_r \leq L_{max}$$

Dove:

- $L_{max} = 22 \cdot V_{p,max}$ lunghezza massima dei rettifili;
- L_{min} , lunghezza minima dei rettifili, valore riportato nella tabella:

Velocità [km/h]	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Lunghezza min [m]	30	40	50	65	90	115	150	190	250	300	360

Figura 4-8: Lunghezza minima dei rettifili

La velocità di progetto ipotizzata è $V_p = 40 \text{ km/h}$, quindi $L_{min} = 30 \text{ m}$ ed $L_{max} = 22 \cdot 40 = 880 \text{ m}$.

L_{min}	L_{max}
30 m	880 m

4.4.2 Inserimento delle curve circolari

La scelta dei raggi delle curve è scaturita da un'attenta analisi geomorfologica del territorio rispettando i vincoli naturali ed artificiali esistenti, ma anche rispettando le prescrizioni della nuova Norma stradale.

Nella progettazione delle curve circolari bisogna prestare molta attenzione; per fare in modo che esse possano essere percepite in modo corretto devono rispettare principalmente due requisiti importanti:

- Sicurezza della circolazione;
- Comfort di marcia.

Il raggio di curvatura R è l'elemento fondamentale della progettazione, da esso dipende il rispetto dei requisiti appena citati.

Nell'abaco di Koppel, riportato di seguito, è stato effettuato il controllo per verificare la linearità degli elementi planimetrici scelti, ovvero avere poche variazioni di manovra e di velocità da parte del conducente conseguente agli elementi planimetrici.

Nel seguente abaco sono rappresentate le lunghezze dei raggi delle curve R_1 e R_2 , nelle ascisse il valore del raggio R_1 e nelle ordinate il valore dell'altro raggio R_2 , il rapporto tra i due raggi delle curve circolari è regolato proprio da questo abaco:

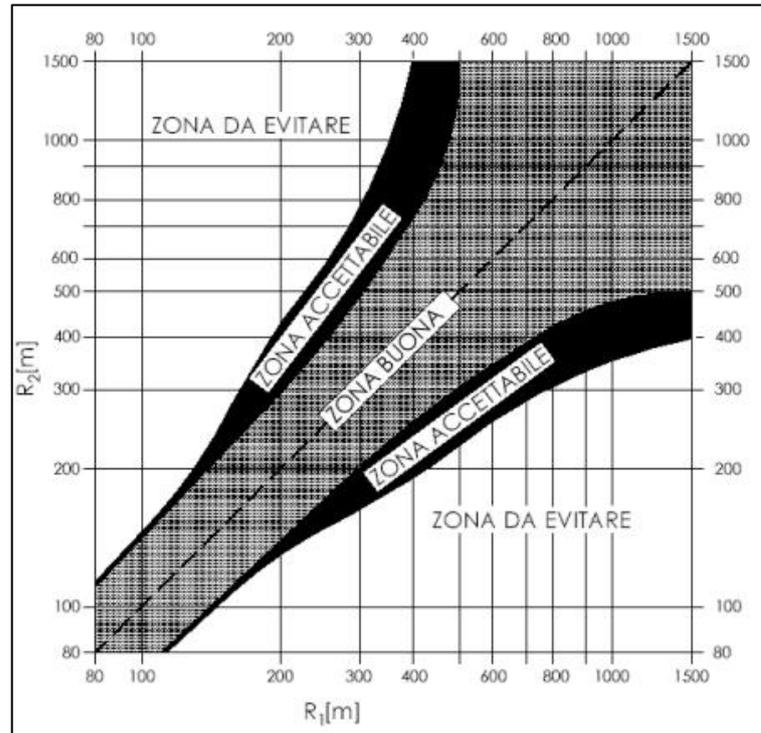


Figura 4-9: Abaco per la verifica di compatibilità di due curve circolari successive²

Il quadrante del seguente diagramma è diviso in 3 zone:

1. Zona buona;
2. Zona accettabile;
3. Zona da evitare.

Bisogna dover rientrare almeno nella zona accettabile, in caso si ricadesse nella zona da evitare il tracciato risulterebbe pericoloso e dovrebbe essere modificato. [9]

Il progetto delle curve circolari deve tenere in considerazione diversi fattori imposti dalla Normativa Italiana:

² D.M. 05/11/01, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

- 1) La corretta percezione dell'arco di cerchio può essere garantita solo se viene percorso per almeno 2,5 secondi. Ne consegue che ogni curva deve avere una lunghezza maggiore di:

$$t = \frac{L}{v_p} = 2,5 \text{ s} \rightarrow L = \frac{V_p}{3,6} \cdot 2,5 = \frac{40}{3,6} \cdot 2,5 = 27,78 \text{ m}$$

- 2) In fase di progettazione si dovrebbero scegliere due curve successive in modo tale che il conducente possa avere una buona percezione del rettilineo; deve essere verificata la seguente relazione:

$$\begin{cases} R > L_R & \text{per } L_R < 300 \text{ m} \\ R > 400 \text{ m} & \text{per } L_R \geq 300 \text{ m} \end{cases}$$

4.4.3 Assegnazione delle pendenze trasversali alle curve

Dopo aver inserito i raccordi circolari si è provveduto a calcolare la loro pendenza trasversale. Ad essa la Norma attribuisce un ruolo importante nel contrastare la forza centrifuga, essendo qualcosa di fisicamente concreto, dal momento che è realizzata artificialmente, mentre, il coefficiente di aderenza trasversale risulta più aleatorio dal momento che dipende da innumerevoli fattori (velocità, condizioni del manto, dello pneumatico, ...).

Bisogna tenere presente che la pendenza trasversale nel rettilineo della piattaforma stradale deve essere garantita per assicurare il rapido deflusso dell'acqua superficiale.

Viene assunto un valore di pendenza minima delle falde della carreggiata pari al 2,5%.

[9]

A seconda del tipo di strada vengono adottate le seguenti sistemazioni:

STRADE TIPO	PIATTAFORMA	PENDENZE TRASVERSALI
A, B, D a due o più corsie per carreggiata		
E a quattro corsie		
altre strade		

Figura 4-10: pendenze trasversali della piattaforma stradale in rettifilo

Nell'arco di cerchio si ha che la pendenza trasversale è uguale su tutta la lunghezza. La geometria dell'arco circolare dipende dalla velocità; questo fattore influenza anche la geometria della sezione trasversale lungo le curve. La variazione della pendenza trasversale mira a compensare gli effetti causati alla forza centrifuga. La seguente equazione rappresenta la condizione di stabilità del veicolo:

$$\frac{V_p^2}{R \cdot 127} = q + f_t$$

Dove:

- R : raggio dell'arco circolare [m];
- V_p : velocità di progetto della curva [km/h];
- q : pendenza trasversale [–];
- f_t : coefficiente di aderenza disponibile trasversalmente [–].

Il coefficiente di aderenza trasversale ottenuto da prove sperimentali viene legato alla velocità di percorrenza:

Velocità km/h	25	40	60	80	100	120	140
aderenza trasv. max imp. $f_{i \max}$ per strade tipo A, B, C, F extra urbane, e relative strade di servizio	-	0,21	0,17	0,13	0,11	0,10	0,09
aderenza trasv. max imp. $f_{i \max}$ per strade tipo D, E, F urbane, e relative strade di servizio	0,22	0,21	0,20	0,16	-	-	-

Figura 4-11: Quota limite del coefficiente di aderenza impegnabile trasversalmente

Le strade di categoria F2 possono raggiungere una pendenza trasversale massima del 7%. Esplicitando il raggio della curva circolare si ottiene:

$$R = \frac{V_P^2}{127 [q + f_t]}$$

E bisogna ricordare che per il raggio minimo delle curve circolari, considerato elemento restrittivo del tracciato planimetrico di progetto, la Normativa impone che assuma il valore calcolato dall'espressione appena scritta, utilizzando come valore di velocità il valore minimo relativo al tipo di strada, e una pendenza trasversale massima. [10]

Il raggio minimo può essere calcolato come riportato di seguito:

$$R_{min} = \frac{V_{P,min}^2}{127 [q_{max} + f_{t,max}]}$$

Si può decidere che raggio utilizzare:

1. $R = R_{min}$, in questo caso la pendenza trasversale viene assunta pari a quella massima stabilita dalla Normativa.

Nel caso in esame si ha un raggio minimo pari a:

$$R_{min} = \frac{40^2}{127[0,07 + 0,210]} = 45 \text{ m}$$

2. $R > R_{min}$, in questo caso la Normativa definisce due valori da confrontare con R :

- $R^* = \frac{V_{P,max}^2}{127[q_{max}+f_{t,max}]} = \frac{100^2}{127[0,07+0,210]} = 281,21 \text{ m}$
- $R_{2,5} = K \cdot R^* = 1,69 \cdot 281,21 = 475,25 \text{ m}$
Dove $K = 1,69$ per le strade F extraurbane

Per valutare la pendenza trasversale da adottare in curva bisogna tenere in conto di queste tre diverse situazioni:

1. $R_{min} < R \leq R^*$, in questo caso la pendenza trasversale viene ad essere assunta pari a quella massima stabilita dalla Normativa;
2. $R^* < R \leq R_{2,5}$, considerando questa situazione, si ha invece che la pendenza trasversale deve essere definita attraverso gli abachi. Si entra con il valore del raggio, si traccia la parallela all'asse delle ordinate fino ad intersecare la retta inclinata corrispondente all'estremo superiore della velocità di progetto della strada $V_{p,max}$. Da tale punto si traccia la parallela alle ascisse fino ad intersecare l'asse delle ordinate sul quale si legge il valore cercato della pendenza trasversale.
3. $R > R_{2,5}$, si assume il valore della pendenza trasversale corrispondente al valore minimo, è pari 2,5%.

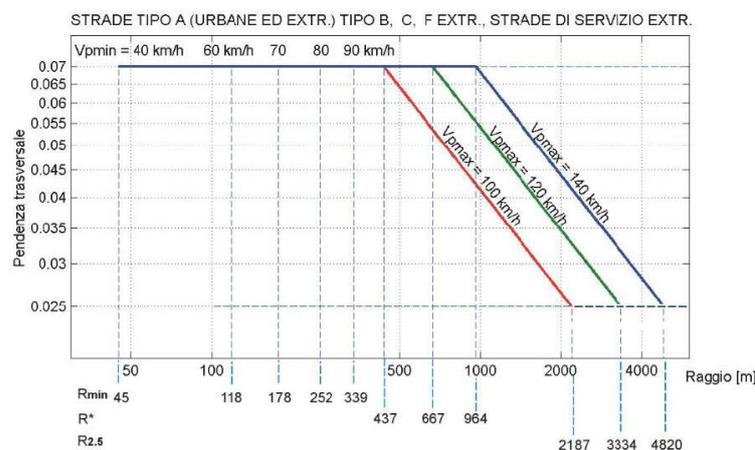


Figura 4-12: Abaco per il progetto delle curve circolari³

Utilizzando l'abaco si può scegliere un generico raggio R :

- R_{min} : raggio minimo che può essere adottato per una strada specifica con velocità di progetto fissa;

³ D.M. 05/11/01, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

- R^* : raggio minimo che può essere adottato per adottare la massima velocità di progetto;
- $R_{2,5}$: raggio minimo corrispondente alla pendenza minima trasversale del 2,5%.
- R' : raggio minimo che può essere adottato mantenendo la sezione trasversale come nel rettifilo.

Il tracciato in esame è stato progettato tenendo presente la minima velocità di progettazione. I raggi ricadono in questa situazione $R_{min} < R \leq R^*$, la pendenza da adottare è quella massima.

Tabella 4-3: Curve circolari del tracciato

Elemento	V_P [km/h]	R_{min}	R^*	$R_{2,5}$	R	q	L_{min}	L
3	40	45	281	475	210	0,07	27,78 m	100,248
7	40				180			28,125
11	40				110			28,173
15	40				225			80,878
19	40				235			43,949
23	40				177			84,145
27	40				172			28,064
31	40				70			41,424
35	40				60			34,175
39	40				85			42,893
43	40				170			30,392
47	40				60			30,666
51	40				55			28,158
55	40				45			27,827
59	40	45	27,984					

Dopo aver fissato la pendenza trasversale i_c , è necessario garantire il coordinamento di quest'ultima con la pendenza longitudinale i_l della livelletta contenente la curva. La Normativa introduce la pendenza geodetica J , funzione sia della pendenza trasversale che di quella longitudinale:

$$J = \sqrt{i_t^2 + i_c^2}$$

Deve essere $\leq 10\%$ per le strade di tipo A e B, e $\leq 12\%$ per le rimanenti tipologie di strade.

4.4.4 Progettazione ed inserimento dei raccordi clotoidici

I raccordi progressivi o meglio note come curve a raggio variabile, sono elementi che permettono il passaggio dal rettilineo ad una curva e inoltre permettono il collegamento di più curve.

L'introduzione delle curve a raggio variabile nel tracciato ha i seguenti scopi:

- Controllare la variazione dell'accelerazione centrifuga non compensata (contraccolpo);
- Limitare la variazione delle pendenze lungo la carreggiata;
- Dare una corretta percezione del tracciato.

Le clotoidi sono curve a raggio variabile, appartengono al gruppo delle spirali e presenta la seguente equazione:

$$r \times s = A^{n+1}$$

Dove:

- r : raggio di curvatura nel punto generico;
- s : ascissa curvilinea nel punto generico;
- n : fattore di forma, nel caso delle clotoidi $n = 1$;
- A : fattore di scala.

Per la ricerca del parametro "A" della clotoide, parametro di scala degli elementi costituenti la clotoide stessa, sono state rispettate le procedure imposte dalla Norma la quale descrive quattro criteri per tale scopo, uno di tipo dinamico e gli altri tre di tipo ottico:

1. Limitazione del contraccolpo, serve a limitare la variazione di accelerazione trasversale non compensata nell'unità di tempo

$$A \geq A_{min} = 0,021 \cdot V^2$$

2. Criterio ottico della sopraelevazione del ciglio esterno:

$$A \geq A_{min} = \sqrt{\frac{B_i(q_f - q_i)}{\left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f}\right) \frac{\Delta i_{max}}{100}}}$$

- 3) Criterio ottico per la percezione del raccordo:

$$A_{min} \geq \frac{R}{3}$$

4. Criterio ottico per la percezione della curva

$$A \geq A_{min} \leq R$$

Per ogni curva è stato considerato il valore più restrittivo di A . Le clotoidi utilizzate nel seguente progetto in esame sono state utilizzate clotoidi di transizione a raggio conservato. I calcoli di progetto e le verifiche ad esso collegate, sono state tutte effettuate con il software CivilDesign 13.0, ma è stato comunque effettuato un controllo a campione sulle scelte operate e sulle verifiche fra i parametri delle clotoidi inserite.

La tabella riassume tutti i calcoli eseguiti per ogni clotoide:

Tabella 4-4: Clotoidi del tracciato

V_P	q_l	q_r	Δi_{max}	B	A_{min}	A_{min2}	A_{min3}	A_{max}	A
40,000	0,025	0,048	0,191	4,250	33,600	58,190	70,000	210	72,100
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	58,190	70,000	210	100,000
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	53,870	60,000	180	66,000
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	53,870	60,000	180	66,000
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	42,110	36,670	110	51,600
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	42,110	36,670	110	51,600
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	60,230	75,000	225	75,000
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	60,230	75,000	225	75,000
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	61,550	78,330	235	78,300
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	61,550	78,330	235	78,300
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	53,420	59,000	177	65,400
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	53,420	59,000	177	65,400
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	52,660	57,330	172	64,500
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	52,660	57,330	172	64,500
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	33,600	23,330	70	41,200
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	33,600	23,330	70	41,200
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	37,020	28,330	85	45,400
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	37,020	28,330	85	45,400
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	52,350	56,670	170	64,100
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	52,350	56,670	170	64,100
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,600
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,600
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800
40,000	0,025	0,048	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800
40,000	0,048	0,025	0,191		33,600	31,100	20,000	60	41,800

4.4.5 Andamento dei cigli

Nelle curve a raggio variabile viene realizzata la rotazione della sezione stradale per eseguire il graduale passaggio della pendenza trasversale dal valore di un elemento a quello che lo segue. Questo avviene facendo ruotare la piattaforma stradale intorno al suo asse, secondo diversi casi; nel caso in esame si ha questa situazione:

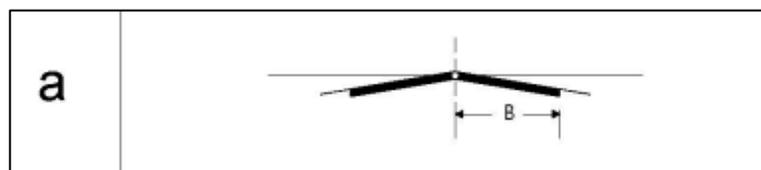


Figura 4-13: Criterio di individuazione dell'asse di rotazione della piattaforma stradale

Nelle strade di tipo F2 ad unica carreggiata si ha che la sagoma in rettilineo è a doppia falda garantendo già dalla progressiva iniziale la pendenza trasversale minima del 2,5%; si

distinguono due fasi in cui si assiste al passaggio dalla sagoma del rettifilo a quella della curva circolare: nella prima fase, di transizione, si ha la rotazione della sola falda esterna intorno all'asse della piattaforma fino a realizzare una superficie piana, nella seconda fase, di rotazione, si ha la rotazione dell'intera carreggiata:

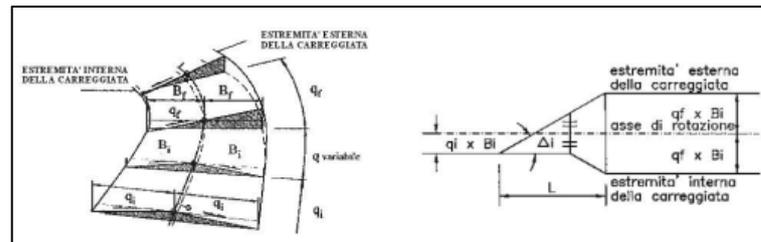


Figura 4-14: Pendenze trasversali nelle curve a raggio variabile

La sovrappendenza longitudinale Δi dell'estremità della carreggiata non deve superare il valore massimo per limitare la velocità di rotazione trasversale della sagoma stradale:

$$\Delta i_{max} = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{B_i}{v} \cdot 100 \cong 18 \cdot \frac{B_i}{V}$$

$$\Delta i_{max} = 18 \cdot \frac{3,25}{40} = 1,462\%$$

Dove:

- $\frac{dq}{dt}$: variazione della pendenza trasversale nel tempo pari a $0,05 \text{ rad/s}$;
- B_i : distanza fra l'asse di rotazione e l'estremità della carreggiata all'inizio della curva a raggio variabile;
- V : velocità di progetto in km/h .

Quando si ha il cambiamento di segno della pendenza trasversale della carreggiata lungo una curva a raggio variabile, durante una certa fase della rotazione la pendenza trasversale risulta inferiore al 2,5%, valore minimo per garantire il deflusso delle acque meteoriche. In questi casi, per evitare la formazione di un ristagno di acqua, è necessario avere un valore minimo della pendenza longitudinale, pari a:

$$\Delta i_{min} = 0,1 \cdot B_i$$
$$\Delta i_{min} = 0,1 \cdot 3,25 = 0,325\%$$

4.4.6 Allargamento della carreggiata in curva

Nei tratti curvilinei del tracciato il franco fra i veicoli diminuisce rispetto a quello che si ha in rettilineo, è necessario allargare la corsia nelle curve circolari di una quantità E data dalla relazione:

$$E = \frac{K}{R}$$

Dove:

- $K = 45$;
- R : raggio esterno della corsia.

La corsia conserva la larghezza del rettilineo nel caso in cui si ha che l'allargamento è inferiore a 20 cm. [9]

Il software CivilDesign effettua il calcolo automatico degli allargamenti, vengono riportati di seguito gli allargamenti che sono stati effettuati lungo il tracciato:

Tabella 4-5: Allargamenti in curva

Prog [m]	All 1 Sx E [m]	All 1 Sx I [m]	All 0 Sx E [m]	All 0 Sx I [m]	All 0 Dx I [m]	All 0 Dx E [m]	All 1 Dx I [m]	All 1 Dx E [m]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
197,443	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
237,197	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214	0,000	0,214	0,000
322,445	0,000	0,000	0,000	0,214	0,000	0,214	0,000	0,000
385,064	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
480,468	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
519,668	0,000	0,000	0,250	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000
532,793	0,000	0,000	0,250	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000
571,993	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
661,863	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
701,068	0,000	0,000	0,409	0,000	0,409	0,000	0,000	0,000
714,241	0,000	0,000	0,409	0,000	0,409	0,000	0,000	0,000
753,446	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
804,576	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
844,576	0,000	0,000	0,000	0,200	0,000	0,200	0,000	0,000
910,454	0,000	0,000	0,000	0,200	0,000	0,200	0,000	0,000
950,454	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1134,095	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1175,184	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1204,133	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1245,222	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1382,794	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1421,959	0,000	0,000	0,254	0,000	0,254	0,000	0,000	0,000
1491,104	0,000	0,000	0,254	0,000	0,254	0,000	0,000	0,000
1530,268	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1667,169	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1706,357	0,000	0,000	0,000	0,262	0,000	0,262	0,000	0,000
1719,420	0,000	0,000	0,000	0,262	0,000	0,262	0,000	0,000
1758,608	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1774,084	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1813,333	0,000	0,000	0,643	0,000	0,643	0,000	0,000	0,000
1839,758	0,000	0,000	0,643	0,000	0,643	0,000	0,000	0,000
1879,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1894,071	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1938,192	0,000	0,000	0,000	0,750	0,000	0,750	0,000	0,000
1957,367	0,000	0,000	0,000	0,750	0,000	0,750	0,000	0,000
2001,487	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2028,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2067,260	0,000	0,000	0,000	0,529	0,000	0,529	0,000	0,000
2095,153	0,000	0,000	0,000	0,529	0,000	0,529	0,000	0,000
2134,402	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2196,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2235,180	0,000	0,000	0,000	0,265	0,000	0,265	0,000	0,000
2250,572	0,000	0,000	0,000	0,265	0,000	0,265	0,000	0,000
2289,742	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2332,406	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2376,249	0,000	0,000	0,750	0,000	0,750	0,000	0,000	0,000
2391,915	0,000	0,000	0,750	0,000	0,750	0,000	0,000	0,000
2435,757	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2449,415	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2478,351	0,000	0,000	0,818	0,000	0,818	0,000	0,000	0,000
2507,287	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2513,991	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2537,880	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000
2546,507	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000
2570,395	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2575,993	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2596,374	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
2616,754	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2648,522	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

4.5 Andamento altimetrico dell'asse

Il profilo longitudinale dell'asse stradale è composto da elementi con pendenza costante, detti livellette, collegati tramite tratti curvi, detti raccordi verticali, come creste e sacche.

La Normativa Italiana prevede una pendenza massima per ogni tipo di strada. In questo caso il valore massimo ammissibile è pari al 10% come riportato in tabella:

Tabella 4-6: Pendenze massime delle livellette di progetto

TIPO DI STRADA		AMBITO URBANO	AMBITO EXTRAURBANO
AUTOSTRADA	A	6%	5%
EXTRAURBANA PRINCIPALE	B	-	6%
EXTRAURBANA SECONDARIA	C	-	7%
URBANA DI SCORRIMENTO	D	6%	-
URBANA DI QUARTIERE	E	8%	-
LOCALE	F	10%	10%

Questi valori possono essere aumentati di una unità quando lo sviluppo della livelletta sia tale da non penalizzare la sicurezza e la circolazione.

4.5.1 Raccordi verticali

Ogni raccordo verticale è stato disegnato considerando i criteri imposti dalla Normativa:

1. I raccordi verticali sono scelti in modo da evitare il contatto con i veicoli. Viene richiesto:

$$\begin{cases} R_V \geq 20 \text{ m nei dossi} \\ R_V \geq 40 \text{ m nelle sacche} \end{cases}$$

2. L'accelerazione verticale è controllata con il valore limite a_{lim} per garantire il comfort dell'utenza:

$$a_v = \frac{v_p^2}{R_V} \leq a_{lim} = 0,6 \frac{m}{s^2}$$

Altri criteri sono forniti in funzione della visibilità. In questo caso bisogna fare delle distinzioni tra creste e sacche; per entrambe le curve, la distanza di visibilità di arresto D è stata calcolata come:

$$D = v_p \cdot \tau + \frac{v_p^2}{2g \cdot [f_e(v) \pm \Delta i]}$$

Dove:

- τ rappresenta il tempo di reazione totale calcolato:

$$\tau = 2,8 - 0,01 \cdot V + 1 = 2,8 \text{ s}$$

- Δi rappresenta la variazione della pendenza [-];
- g è l'accelerazione di gravità $\left[\frac{m}{s^2}\right]$;
- f_e è il coefficiente di aderenza equivalente.

La lunghezza di ciascuna curva verticale è stata calcolata come:

$$L = R_V \frac{\Delta i}{100}$$

Dove:

- R_V : raggio del cerchio osculatore;
- Δi : variazione di pendenza tra gli elementi [%].

4.5.2 Raccordi verticali convessi e dossi

Per garantire la sicurezza su un raccordo convesso è necessario che il conducente di un veicolo veda l'ostacolo (fisso o mobile) almeno ad una distanza D dipendente dalla velocità di progetto e dalle caratteristiche della strada. [9]

Si fa riferimento alla distanza di visibilità per l'arresto considerando sia la posizione del conducente che dell'ostacolo, rispettivamente h_1 e h_2 . La posizione del conducente è assunta pari ad un'altezza di 1,10 m dal marciapiede, mentre l'altezza dell'ostacolo è assunta pari a 0,10 m.

Il grafico seguente fornisce il raggio verticale minimo che può essere adottato considerando una curva verticale in funzione della distanza D e della variazione di pendenza Δi , ottenuta dalla media della pendenza iniziale e finale.

È possibile distinguere due situazioni diverse:

1. La distanza D è superiore alla lunghezza L del raccordo parabolico misurata sulla proiezione orizzontale: $D > L$:

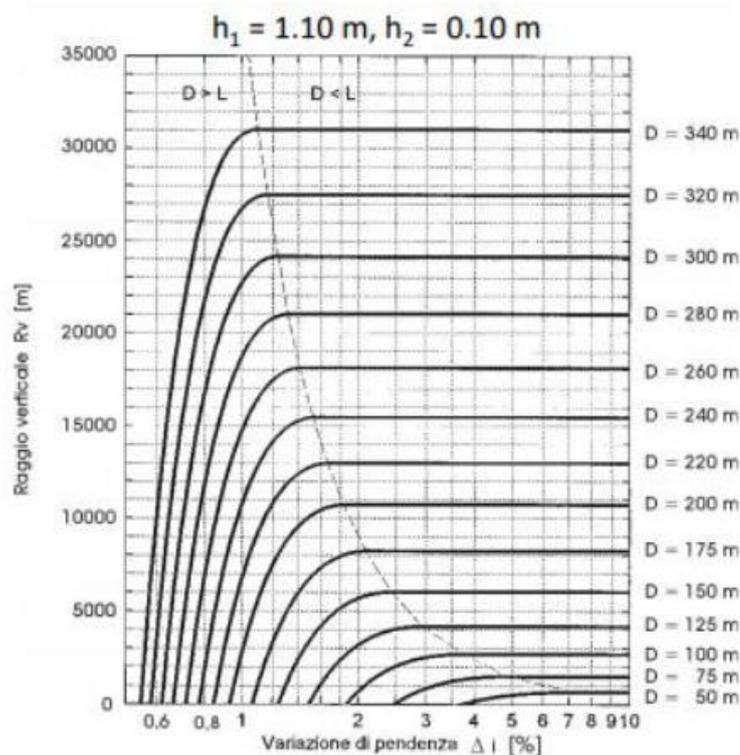


Figura 4-15: Abaco per il calcolo del raggio minimo R_V dei raccordi verticali convessi e dei dossi nelle strade a senso unico⁴

Il valore del raggio verticale minimo può essere calcolato anche in forma analitica mediante la seguente espressione:

$$R_V = \frac{2 \cdot 100}{\Delta i} \left[D - 100 \frac{h_1 + h_2 + 2\sqrt{h_1 \cdot h_2}}{\Delta i} \right]$$

- La distanza D è inferiore alla lunghezza L del raccordo parabolico misurata sulla proiezione orizzontale: $D < L$. La posizione di entrambi i punti, che corrisponde alla posizione dei due conducenti, è assunta pari a 1,10 m dalla superficie di pavimentazione. L'abaco per la valutazione del raggio verticale minimo è il seguente:

⁴ D.M. 05/11/01, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

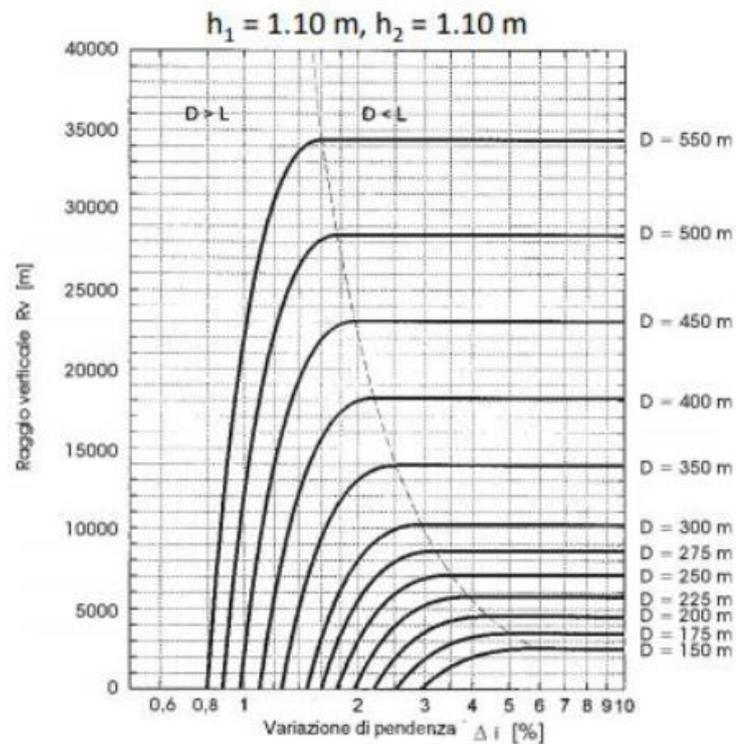


Figura 4-16: Abaco per il calcolo del raggio minimo dei raccordi verticali convessi e dei dossi nelle strade a doppio senso⁵

L'espressione analitica da utilizzare per il calcolo del raggio R_V è la seguente:

$$R_V = \frac{D^2}{2(h_1 + h_2 + 2\sqrt{h_1 \cdot h_2})}$$

4.5.3 Raccordi verticali concavi e sacche

Per quanto riguarda i raccordi verticali concavi durante le ore diurne non è presente alcun problema relativo al problema di visibilità dei conducenti, ma durante le ore notturne, si possono formare delle zone buie dovute all'interazione tra le caratteristiche geometriche e l'ampiezza del fascio luminoso prodotto dai fari di illuminazione dei veicoli. [9]

⁵ D.M. 05/11/01, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

Considerando la distanza di visibilità per l'arresto, si ipotizza un veicolo isolato sulla carreggiata. L'altezza dei fari è ipotizzata di 0,5 m e la divergenza del fascio luminoso verso l'alto rispetto l'asse del veicolo è pari a $\vartheta = 1^\circ$.

Il raggio minimo del raccordo può essere stimato dal diagramma riportato:

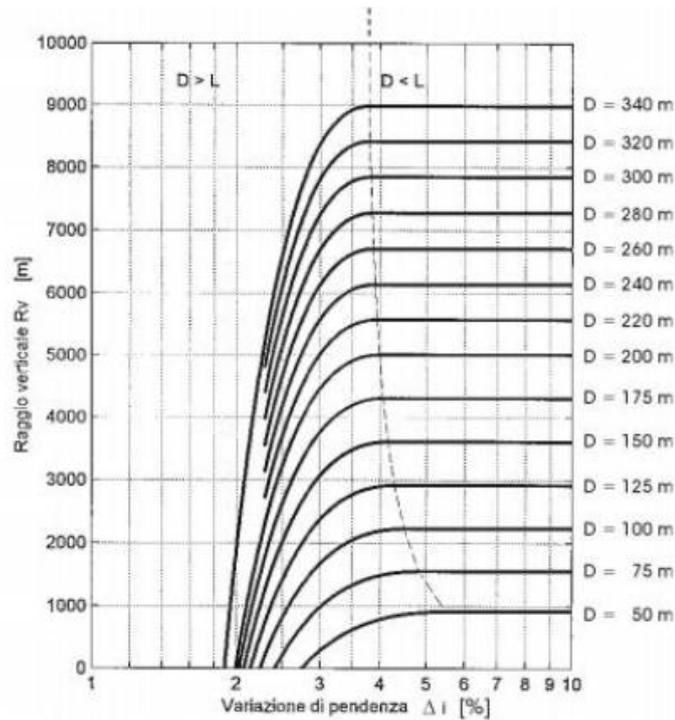


Figura 4-17: Abaco per il calcolo del raggio minimo dei raccordi verticali concavi e sacche

Si distinguono due casi:

1. La distanza D è inferiore alla lunghezza L del raccordo parabolico misurata sulla proiezione orizzontale: $D < L$. L'espressione analitica per il calcolo del raggio R_V è la seguente:

$$R_V = \frac{D^2}{2(h + D \cdot \sin \vartheta)}$$

2. La distanza D è superiore alla lunghezza L del raccordo parabolico misurata sulla proiezione orizzontale: $D > L$. L'espressione analitica per il calcolo del raggio R_V è la seguente:

$$R_V = \frac{2 \cdot 100}{\Delta i} \left[D - \frac{100}{\Delta i} (h + D \cdot \sin \vartheta) \right]$$

Il profilo longitudinale del terreno è stato estratto con una funzione di CivilDesign indicando come riferimento l'asse principale e il modello DTM, sono state successivamente inserite livellette e raccordi parabolici (nel rispetto della normativa) che hanno permesso di creare il profilo di progetto.

Il profilo di progetto è stato costruito inserendo 7 livellette, tutte con pendenza minore del 10%:

- 1) $D = 2,45; L = 180,00; P = 1,36\%$
- 2) $D = 15,70; L = 419,49; P = 3,74\%$
- 3) $D = 27,60; L = 817,11; P = 3,38\%$
- 4) $D = 20,34; L = 284,49; P = 7,15\%$
- 5) $D = 13,94; L = 493,77; P = 2,82\%$
- 6) $D = 7,02; L = 202,78; P = 3,46\%$
- 7) $D = 23,80; L = 250,88; P = 9,49\%$

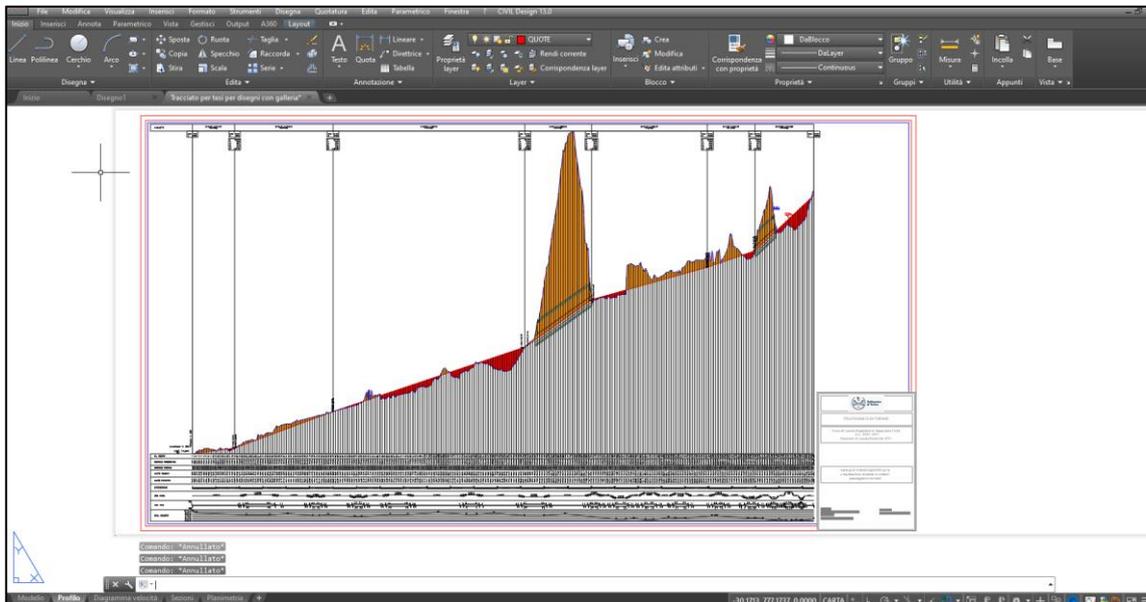


Figura 4-18: Profilo altimetrico

4.6 Distanze di visibilità

Condizione necessaria nei confronti della sicurezza della circolazione è avere una certa visuale libera sulla strada e soprattutto in corrispondenza delle intersezioni.

La distanza di visuale libera viene definita dalla Normativa come la “lunghezza del tratto di strada che il conducente riesce a vedere davanti a sé indipendentemente dalle condizioni del traffico e dalle condizioni atmosferiche di illuminazione”.

Nella creazione del progetto, bisogna tenere conto delle seguenti distanze:

1. Distanza di visibilità per l'arresto;
2. Distanza di visibilità per il sorpasso;
3. Distanza di visibilità per la manovra di cambiamento di corsia.

4.6.1 Distanza di visibilità per l'arresto

Viene considerato dalla normativa come “spazio minimo necessario perché un conducente possa arrestare il veicolo in condizione di sicurezza davanti ad un ostacolo improvviso”.

È data dalla somma di due contributi:

$$D_A = D_1 + D_2$$

Con:

$$D_1 = \frac{V_0}{3,6} \tau$$

Con il primo termine si rappresenta lo spazio percorso alla velocità iniziale V_0 durante il tempo complessivo di reazione τ (tempo necessario al conducente per percepire la presenza dell'ostacolo)

$$D_2 = \frac{1}{3,6} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \left[f_l(V) \pm \frac{i\%}{100} \right] + r_0(V) + \frac{R_a(V)}{1000 P}} dV$$

Il secondo termine rappresenta lo spazio di arresto inteso come la distanza percorsa dal veicolo che va dal momento in cui si inizia a frenare fin quando si ferma. [9]

In definitiva si ha:

$$D_A = \frac{V_0}{3,6} \tau - \frac{1}{3,6} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \left[f_l(V) \pm \frac{i\%}{100} \right] + r_0(V) + \frac{R_a(V)}{1000 P}} dV$$

Dove:

- V_0 è la velocità del veicolo all'inizio della frenatura, pari alla velocità di progetto desunta dal diagramma di velocità [km/h];
- τ : è il tempo di reazione psicotecnica, calcolato secondo la seguente relazione:

$$\tau = \begin{cases} 2,8 - 0,01V + 1 & \text{nel caso di strade extraurbane} \\ 2,8 - 0,01V + 3 & \text{nel caso di strade in ambito urbano} \end{cases}$$

- $f_l(V)$: coefficiente di aderenza longitudinale che viene ricavato dalla seguente tabella.

VELOCITA' km/h	25	40	60	80	100	120	140
f_l Autostrade	-	-	-	0.44	0.40	0.36	0.34
f_l Altre strade	0,45	0.43	0.35	0.30	0.25	0.21	-

Tabella 4-7: Coefficiente di aderenza in funzione della velocità

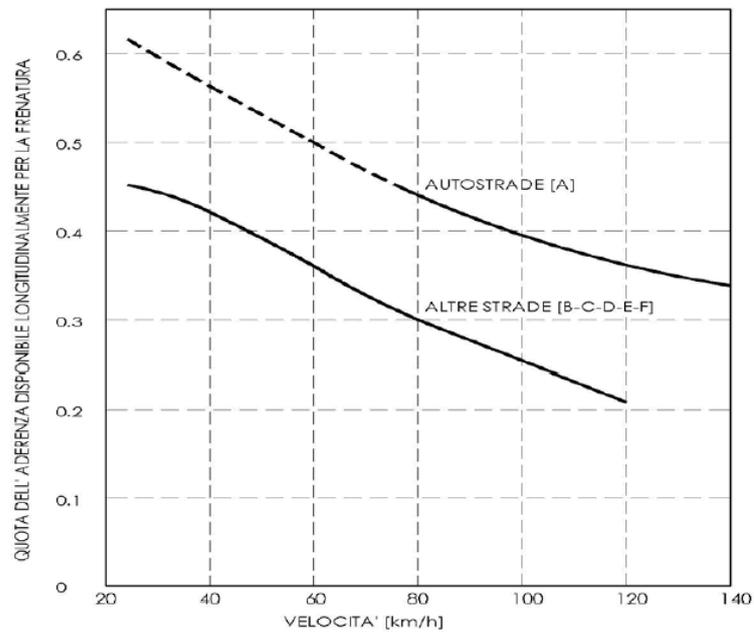


Figura 4-19: Coefficiente di aderenza in funzione della velocità

- i : pendenza [%];
- $R_a(V)$: resistenza aerodinamica;
- $r_0(V)$: resistenza al rotolamento;
- m : massa del veicolo.

Poiché il calcolo è laborioso, invece di procedere con lo sviluppo analitico, conviene utilizzare un approccio di tipo grafico. La Normativa fornisce due abachi, uno valido per le autostrade (tipo A), e uno per le altre strade (tipo B-C-D-E-F).

PER LE ALTRE STRADE

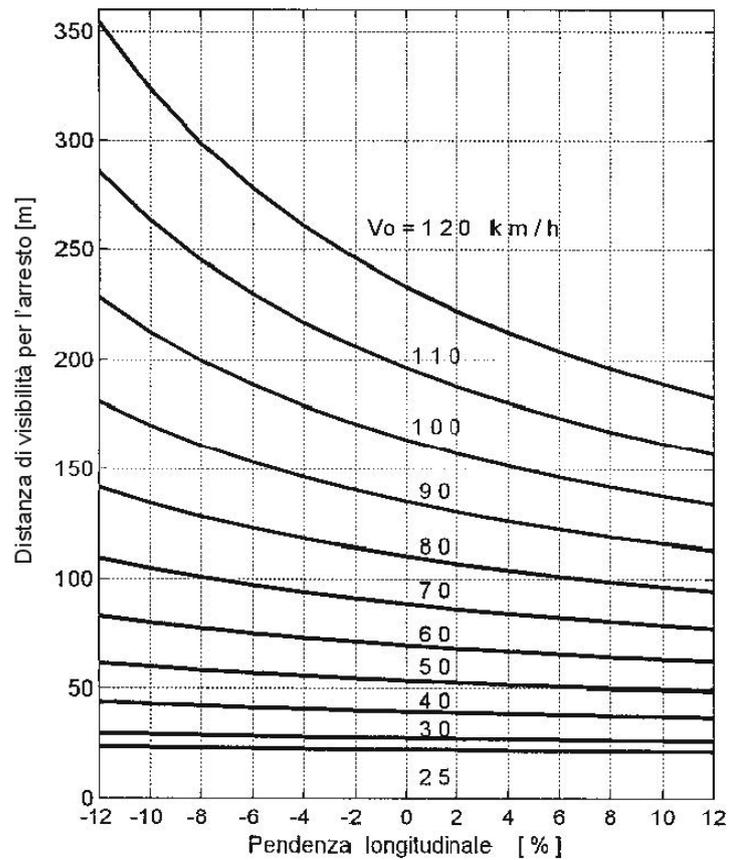


Figura 4-20: Abaco per il calcolo di D_A (altre strade)⁶

La distanza di visibilità per l'arresto da garantire è:

$$D_A = 40 \text{ m}$$

La quale viene soddisfatta sull'intero tracciato.

Il software ha restituito i risultati riportati di seguito:

⁶ D.M. 05/11/01, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

Progressiva [m]	Da_dx [m]	Dva_edx > □	Da_sx [m]	Dva_esx > Da_sx
0,000	165,048	OK	165,048	OK
5,000	156,343	OK	156,343	OK
10,000	148,246	OK	148,246	OK
15,000	140,460	OK	140,460	OK
20,000	135,877	OK	135,877	OK
25,000	134,827	OK	134,827	OK
30,000	134,019	OK	134,019	OK
35,000	132,980	OK	132,980	OK
40,000	132,179	OK	132,179	OK
45,000	131,150	OK	131,150	OK
50,000	130,127	OK	130,127	OK
55,000	129,338	OK	129,338	OK
60,000	128,326	OK	128,326	OK
65,000	127,544	OK	127,544	OK
70,000	126,541	OK	126,541	OK
75,000	125,766	OK	125,766	OK
80,000	124,774	OK	124,774	OK
85,000	124,006	OK	124,006	OK
90,000	123,024	OK	123,024	OK
95,000	122,047	OK	122,047	OK
100,000	121,290	OK	121,290	OK
105,000	120,323	OK	120,323	OK
110,000	119,574	OK	119,574	OK
115,000	118,616	OK	118,616	OK
120,000	117,874	OK	117,874	OK
125,000	116,926	OK	116,926	OK
130,000	115,983	OK	115,983	OK
135,000	115,251	OK	115,251	OK
140,000	114,318	OK	114,318	OK
145,000	113,593	OK	113,593	OK
150,000	112,669	OK	112,669	OK
155,000	111,951	OK	111,951	OK
160,000	111,036	OK	111,036	OK
165,000	110,127	OK	110,127	OK
170,000	109,419	OK	109,419	OK
175,000	108,519	OK	108,519	OK
180,000	107,817	OK	107,817	OK
185,000	106,926	OK	106,926	OK
190,000	106,230	OK	106,230	OK
195,000	105,348	OK	105,348	OK
200,000	104,471	OK	104,471	OK
204,943	0,000	OK	0,000	OK
205,000	103,785	OK	103,785	OK
210,000	102,917	OK	102,917	OK
215,000	102,238	OK	102,238	OK
220,000	101,378	OK	101,378	OK
225,000	100,705	OK	100,705	OK
229,697	0,000	OK	0,000	OK
230,000	99,862	OK	99,862	OK
235,000	99,862	OK	99,862	OK
240,000	99,862	OK	99,862	OK
245,000	99,862	OK	99,862	OK
250,000	99,862	OK	99,862	OK
255,000	99,862	OK	99,862	OK
260,000	99,862	OK	99,862	OK
265,000	99,862	OK	99,862	OK
270,000	99,862	OK	99,862	OK
275,000	99,862	OK	99,862	OK
280,000	99,862	OK	99,862	OK
285,000	99,862	OK	99,862	OK
290,000	99,862	OK	99,862	OK
295,000	99,862	OK	99,862	OK
300,000	99,862	OK	99,862	OK

305,000	99,862	OK	99,862	OK
310,000	99,862	OK	99,862	OK
315,000	99,862	OK	99,862	OK
320,000	99,862	OK	99,862	OK
325,000	99,862	OK	99,862	OK
329,945	0,000	OK	0,000	OK
330,000	99,864	OK	99,864	OK
335,000	101,365	OK	101,365	OK
340,000	102,697	OK	102,697	OK
345,000	104,226	OK	104,226	OK
350,000	105,581	OK	105,581	OK
355,000	107,139	OK	107,139	OK
360,000	108,518	OK	108,518	OK
365,000	110,105	OK	110,105	OK
370,000	111,509	OK	111,509	OK
375,000	113,125	OK	113,125	OK
377,564	0,000	OK	0,000	OK
380,000	114,554	OK	114,554	OK
385,000	116,200	OK	116,200	OK
390,000	117,654	OK	117,654	OK
395,000	119,331	OK	119,331	OK
400,000	120,811	OK	120,811	OK
405,000	122,520	OK	122,520	OK
410,000	121,778	OK	121,778	OK
415,000	120,072	OK	120,072	OK
420,000	118,382	OK	118,382	OK
425,000	116,916	OK	116,916	OK
430,000	115,257	OK	115,257	OK
435,000	113,614	OK	113,614	OK
440,000	112,187	OK	112,187	OK
445,000	110,574	OK	110,574	OK
450,000	108,977	OK	108,977	OK
455,000	107,588	OK	107,588	OK
460,000	106,020	OK	106,020	OK
465,000	104,468	OK	104,468	OK
470,000	103,115	OK	103,115	OK
475,000	101,591	OK	101,591	OK
480,000	100,082	OK	100,082	OK
485,000	98,765	OK	98,765	OK
487,968	0,000	OK	0,000	OK
490,000	97,283	OK	97,283	OK
495,000	95,816	OK	95,816	OK
500,000	94,534	OK	94,534	OK
505,000	93,093	OK	93,093	OK
510,000	91,666	OK	91,666	OK
512,168	0,000	OK	0,000	OK
515,000	91,058	OK	91,058	OK
520,000	91,058	OK	91,058	OK
525,000	91,058	OK	91,058	OK
530,000	91,058	OK	91,058	OK
535,000	91,058	OK	91,058	OK
540,000	91,058	OK	91,058	OK
540,293	0,000	OK	0,000	OK
545,000	92,478	OK	92,478	OK
550,000	93,927	OK	93,927	OK
555,000	95,391	OK	95,391	OK
560,000	96,869	OK	96,869	OK
564,493	0,000	OK	0,000	OK
565,000	98,361	OK	98,361	OK
570,000	99,868	OK	99,868	OK
575,000	101,390	OK	101,390	OK
580,000	102,239	OK	102,239	OK
585,000	101,158	OK	101,158	OK
590,000	100,084	OK	100,084	OK
595,000	99,197	OK	99,197	OK
600,000	98,137	OK	98,137	OK

605,000	97,085	OK	97,085	OK
610,000	96,214	OK	96,214	OK
615,000	95,174	OK	95,174	OK
620,000	94,143	OK	94,143	OK
625,000	93,287	OK	93,287	OK
630,000	92,269	OK	92,269	OK
635,000	91,257	OK	91,257	OK
640,000	90,417	OK	90,417	OK
645,000	89,419	OK	89,419	OK
650,000	88,427	OK	88,427	OK
655,000	87,602	OK	87,602	OK
660,000	86,623	OK	86,623	OK
665,000	85,651	OK	85,651	OK
669,363	0,000	OK	0,000	OK
670,000	84,841	OK	84,841	OK
675,000	83,882	OK	83,882	OK
680,000	82,929	OK	82,929	OK
685,000	82,133	OK	82,133	OK
690,000	81,193	OK	81,193	OK
693,568	0,000	OK	0,000	OK
695,000	80,462	OK	80,462	OK
700,000	80,462	OK	80,462	OK
705,000	80,462	OK	80,462	OK
710,000	80,462	OK	80,462	OK
715,000	80,462	OK	80,462	OK
720,000	80,462	OK	80,462	OK
721,741	0,000	OK	0,000	OK
725,000	81,183	OK	81,183	OK
730,000	81,978	OK	81,978	OK
735,000	82,927	OK	82,927	OK
740,000	83,884	OK	83,884	OK
745,000	84,847	OK	84,847	OK
745,946	0,000	OK	0,000	OK
750,000	85,661	OK	85,661	OK
755,000	86,637	OK	86,637	OK
760,000	87,619	OK	87,619	OK
765,000	88,609	OK	88,609	OK
770,000	89,605	OK	89,605	OK
775,000	90,445	OK	90,445	OK
780,000	91,454	OK	91,454	OK
785,000	92,470	OK	92,470	OK
790,000	93,494	OK	93,494	OK
795,000	94,354	OK	94,354	OK
800,000	95,391	OK	95,391	OK
805,000	96,435	OK	96,435	OK
810,000	97,486	OK	97,486	OK
812,076	0,000	OK	0,000	OK
815,000	98,368	OK	98,368	OK
820,000	99,432	OK	99,432	OK
825,000	100,505	OK	100,505	OK
830,000	101,585	OK	101,585	OK
835,000	102,672	OK	102,672	OK
837,076	0,000	OK	0,000	OK
840,000	103,582	OK	103,582	OK
845,000	104,217	OK	104,217	OK
850,000	104,217	OK	104,217	OK
855,000	104,217	OK	104,217	OK
860,000	104,217	OK	104,217	OK
865,000	104,217	OK	104,217	OK
870,000	104,217	OK	104,217	OK
875,000	104,217	OK	104,217	OK
880,000	104,217	OK	104,217	OK
885,000	104,217	OK	104,217	OK
890,000	104,217	OK	104,217	OK
895,000	104,217	OK	104,217	OK
900,000	104,217	OK	104,217	OK

605,000	97,085	OK	97,085	OK
610,000	96,214	OK	96,214	OK
615,000	95,174	OK	95,174	OK
620,000	94,143	OK	94,143	OK
625,000	93,287	OK	93,287	OK
630,000	92,269	OK	92,269	OK
635,000	91,257	OK	91,257	OK
640,000	90,417	OK	90,417	OK
645,000	89,419	OK	89,419	OK
650,000	88,427	OK	88,427	OK
655,000	87,602	OK	87,602	OK
660,000	86,623	OK	86,623	OK
665,000	85,651	OK	85,651	OK
669,363	0,000	OK	0,000	OK
670,000	84,841	OK	84,841	OK
675,000	83,882	OK	83,882	OK
680,000	82,929	OK	82,929	OK
685,000	82,133	OK	82,133	OK
690,000	81,193	OK	81,193	OK
693,568	0,000	OK	0,000	OK
695,000	80,462	OK	80,462	OK
700,000	80,462	OK	80,462	OK
705,000	80,462	OK	80,462	OK
710,000	80,462	OK	80,462	OK
715,000	80,462	OK	80,462	OK
720,000	80,462	OK	80,462	OK
721,741	0,000	OK	0,000	OK
725,000	81,183	OK	81,183	OK
730,000	81,978	OK	81,978	OK
735,000	82,927	OK	82,927	OK
740,000	83,884	OK	83,884	OK
745,000	84,847	OK	84,847	OK
745,946	0,000	OK	0,000	OK
750,000	85,661	OK	85,661	OK
755,000	86,637	OK	86,637	OK
760,000	87,619	OK	87,619	OK
765,000	88,609	OK	88,609	OK
770,000	89,605	OK	89,605	OK
775,000	90,445	OK	90,445	OK
780,000	91,454	OK	91,454	OK
785,000	92,470	OK	92,470	OK
790,000	93,494	OK	93,494	OK
795,000	94,354	OK	94,354	OK
800,000	95,391	OK	95,391	OK
805,000	96,435	OK	96,435	OK
810,000	97,486	OK	97,486	OK
812,076	0,000	OK	0,000	OK
815,000	98,368	OK	98,368	OK
820,000	99,432	OK	99,432	OK
825,000	100,505	OK	100,505	OK
830,000	101,585	OK	101,585	OK
835,000	102,672	OK	102,672	OK
837,076	0,000	OK	0,000	OK
840,000	103,582	OK	103,582	OK
845,000	104,217	OK	104,217	OK
850,000	104,217	OK	104,217	OK
855,000	104,217	OK	104,217	OK
860,000	104,217	OK	104,217	OK
865,000	104,217	OK	104,217	OK
870,000	104,217	OK	104,217	OK
875,000	104,217	OK	104,217	OK
880,000	104,217	OK	104,217	OK
885,000	104,217	OK	104,217	OK
890,000	104,217	OK	104,217	OK
895,000	104,217	OK	104,217	OK
900,000	104,217	OK	104,217	OK

1205,000	106,915	OK	106,915	OK
1210,000	106,915	OK	106,915	OK
1211,633	0,000	OK	0,000	OK
1215,000	107,828	OK	107,828	OK
1220,000	109,206	OK	109,206	OK
1225,000	110,792	OK	110,792	OK
1230,000	112,194	OK	112,194	OK
1235,000	113,608	OK	113,608	OK
1237,722	0,000	OK	0,000	OK
1240,000	115,033	OK	115,033	OK
1245,000	116,677	OK	116,677	OK
1250,000	118,128	OK	118,128	OK
1255,000	119,591	OK	119,591	OK
1260,000	121,066	OK	121,066	OK
1265,000	122,770	OK	122,770	OK
1270,000	124,272	OK	124,272	OK
1275,000	125,786	OK	125,786	OK
1280,000	127,537	OK	127,537	OK
1285,000	129,079	OK	129,079	OK
1290,000	127,546	OK	127,546	OK
1295,000	125,785	OK	125,785	OK
1300,000	124,261	OK	124,261	OK
1305,000	122,533	OK	122,533	OK
1310,000	121,036	OK	121,036	OK
1315,000	119,339	OK	119,339	OK
1320,000	117,659	OK	117,659	OK
1325,000	116,202	OK	116,202	OK
1330,000	114,553	OK	114,553	OK
1335,000	113,121	OK	113,121	OK
1340,000	111,502	OK	111,502	OK
1345,000	109,899	OK	109,899	OK
1350,000	108,505	OK	108,505	OK
1355,000	106,931	OK	106,931	OK
1360,000	105,562	OK	105,562	OK
1365,000	104,017	OK	104,017	OK
1370,000	102,671	OK	102,671	OK
1375,000	101,154	OK	101,154	OK
1380,000	99,652	OK	99,652	OK
1385,000	98,342	OK	98,342	OK
1390,000	96,867	OK	96,867	OK
1390,294	0,000	OK	0,000	OK
1395,000	95,580	OK	95,580	OK
1400,000	94,132	OK	94,132	OK
1405,000	92,699	OK	92,699	OK
1410,000	91,446	OK	91,446	OK
1414,459	0,000	OK	0,000	OK
1415,000	90,230	OK	90,230	OK
1420,000	90,230	OK	90,230	OK
1425,000	90,230	OK	90,230	OK
1430,000	90,230	OK	90,230	OK
1435,000	90,230	OK	90,230	OK
1440,000	90,230	OK	90,230	OK
1445,000	90,230	OK	90,230	OK
1450,000	90,230	OK	90,230	OK
1455,000	90,230	OK	90,230	OK
1460,000	90,230	OK	90,230	OK
1465,000	90,230	OK	90,230	OK
1470,000	90,230	OK	90,230	OK
1475,000	90,230	OK	90,230	OK
1480,000	90,230	OK	90,230	OK
1485,000	90,230	OK	90,230	OK
1490,000	90,230	OK	90,230	OK
1495,000	90,230	OK	90,230	OK
1498,604	0,000	OK	0,000	OK
1500,000	90,631	OK	90,631	OK

1505,000	92,053	OK	92,053	OK
1510,000	93,319	OK	93,319	OK
1515,000	94,765	OK	94,765	OK
1520,000	96,227	OK	96,227	OK
1522,768	0,000	OK	0,000	OK
1525,000	97,703	OK	97,703	OK
1530,000	99,193	OK	99,193	OK
1535,000	100,517	OK	100,517	OK
1540,000	102,035	OK	102,035	OK
1545,000	103,568	OK	103,568	OK
1550,000	105,116	OK	105,116	OK
1555,000	106,679	OK	106,679	OK
1560,000	108,065	OK	108,065	OK
1565,000	109,657	OK	109,657	OK
1570,000	111,265	OK	111,265	OK
1575,000	112,888	OK	112,888	OK
1580,000	114,324	OK	114,324	OK
1585,000	115,978	OK	115,978	OK
1590,000	117,405	OK	117,405	OK
1595,000	115,495	OK	115,495	OK
1600,000	113,607	OK	113,607	OK
1605,000	111,739	OK	111,739	OK
1610,000	109,893	OK	109,893	OK
1615,000	108,066	OK	108,066	OK
1620,000	106,261	OK	106,261	OK
1625,000	104,662	OK	104,662	OK
1630,000	102,893	OK	102,893	OK
1635,000	101,144	OK	101,144	OK
1640,000	99,414	OK	99,414	OK
1645,000	97,704	OK	97,704	OK
1650,000	96,012	OK	96,012	OK
1655,000	94,339	OK	94,339	OK
1660,000	92,685	OK	92,685	OK
1665,000	91,049	OK	91,049	OK
1670,000	89,432	OK	89,432	OK
1674,669	0,000	OK	0,000	OK
1675,000	87,832	OK	87,832	OK
1680,000	86,250	OK	86,250	OK
1685,000	84,840	OK	84,840	OK
1690,000	83,290	OK	83,290	OK
1695,000	81,758	OK	81,758	OK
1698,857	0,000	OK	0,000	OK
1700,000	80,242	OK	80,242	OK
1705,000	78,743	OK	78,743	OK
1710,000	77,261	OK	77,261	OK
1715,000	75,795	OK	75,795	OK
1720,000	74,346	OK	74,346	OK
1725,000	72,912	OK	72,912	OK
1726,920	0,000	OK	0,000	OK
1730,000	71,495	OK	71,495	OK
1735,000	70,093	OK	70,093	OK
1740,000	68,710	OK	68,710	OK
1745,000	67,470	OK	67,470	OK
1750,000	66,122	OK	66,122	OK
1751,108	0,000	OK	0,000	OK
1755,000	64,791	OK	64,791	OK
1760,000	63,477	OK	63,477	OK
1765,000	62,181	OK	62,181	OK
1770,000	60,902	OK	60,902	OK
1775,000	59,640	OK	59,640	OK
1780,000	58,394	OK	58,394	OK
1781,584	0,000	OK	0,000	OK
1785,000	57,164	OK	57,164	OK
1790,000	55,950	OK	55,950	OK
1795,000	54,752	OK	54,752	OK
1800,000	53,568	OK	53,568	OK

1805,000	52,495	OK	52,495	OK
1805,833	0,000	OK	0,000	OK
1810,000	52,238	OK	52,238	OK
1815,000	52,238	OK	52,238	OK
1820,000	52,238	OK	52,238	OK
1825,000	52,238	OK	52,238	OK
1830,000	52,238	OK	52,238	OK
1835,000	52,238	OK	52,238	OK
1840,000	52,238	OK	52,238	OK
1845,000	52,238	OK	52,238	OK
1847,258	0,000	OK	0,000	OK
1850,000	53,089	OK	53,089	OK
1855,000	54,569	OK	54,569	OK
1860,000	56,072	OK	56,072	OK
1865,000	57,600	OK	57,600	OK
1870,000	59,153	OK	59,153	OK
1871,507	0,000	OK	0,000	OK
1875,000	60,731	OK	60,731	OK
1880,000	62,335	OK	62,335	OK
1885,000	62,011	OK	62,011	OK
1890,000	60,287	OK	60,287	OK
1895,000	58,703	OK	58,703	OK
1900,000	57,143	OK	57,143	OK
1901,571	0,000	OK	0,000	OK
1905,000	55,506	OK	55,506	OK
1910,000	53,997	OK	53,997	OK
1915,000	52,511	OK	52,511	OK
1920,000	51,047	OK	51,047	OK
1925,000	49,516	OK	49,516	OK
1930,000	48,099	OK	48,099	OK
1930,692	0,000	OK	0,000	OK
1935,000	47,851	OK	47,851	OK
1940,000	47,851	OK	47,851	OK
1945,000	47,851	OK	47,851	OK
1950,000	47,851	OK	47,851	OK
1955,000	47,851	OK	47,851	OK
1960,000	47,851	OK	47,851	OK
1964,867	0,000	OK	0,000	OK
1965,000	47,952	OK	47,952	OK
1970,000	49,352	OK	49,352	OK
1975,000	50,774	OK	50,774	OK
1980,000	52,219	OK	52,219	OK
1985,000	53,686	OK	53,686	OK
1990,000	55,176	OK	55,176	OK
1993,987	0,000	OK	0,000	OK
1995,000	56,690	OK	56,690	OK
2000,000	58,229	OK	58,229	OK
2005,000	59,792	OK	59,792	OK
2010,000	61,381	OK	61,381	OK
2015,000	62,996	OK	62,996	OK
2020,000	64,638	OK	64,638	OK
2025,000	66,307	OK	66,307	OK
2030,000	67,651	OK	67,651	OK
2035,000	66,827	OK	66,827	OK
2035,511	0,000	OK	0,000	OK
2040,000	66,132	OK	66,132	OK
2045,000	65,320	OK	65,320	OK
2050,000	64,635	OK	64,635	OK
2055,000	63,837	OK	63,837	OK
2059,760	0,000	OK	0,000	OK
2060,000	63,171	OK	63,171	OK
2065,000	63,171	OK	63,171	OK
2070,000	63,171	OK	63,171	OK
2075,000	63,171	OK	63,171	OK
2080,000	63,171	OK	63,171	OK
2085,000	63,171	OK	63,171	OK
2090,000	63,171	OK	63,171	OK
2095,000	63,171	OK	63,171	OK
2100,000	63,171	OK	63,171	OK

2102,653	0,000	OK	0,000	OK
2105,000	63,666	OK	63,666	OK
2110,000	64,800	OK	64,800	OK
2115,000	65,827	OK	65,827	OK
2120,000	66,987	OK	66,987	OK
2125,000	68,161	OK	68,161	OK
2126,902	0,000	OK	0,000	OK
2130,000	69,221	OK	69,221	OK
2135,000	70,421	OK	70,421	OK
2140,000	71,503	OK	71,503	OK
2145,000	72,728	OK	72,728	OK
2150,000	73,965	OK	73,965	OK
2155,000	75,077	OK	75,077	OK
2160,000	76,337	OK	76,337	OK
2165,000	77,467	OK	77,467	OK
2170,000	78,751	OK	78,751	OK
2175,000	80,047	OK	80,047	OK
2180,000	81,208	OK	81,208	OK
2185,000	82,529	OK	82,529	OK
2190,000	83,710	OK	83,710	OK
2195,000	85,055	OK	85,055	OK
2200,000	86,414	OK	86,414	OK
2203,511	0,000	OK	0,000	OK
2205,000	87,627	OK	87,627	OK
2210,000	89,011	OK	89,011	OK
2215,000	90,039	OK	90,039	OK
2220,000	90,039	OK	90,039	OK
2225,000	90,039	OK	90,039	OK
2227,680	0,000	OK	0,000	OK
2230,000	90,039	OK	90,039	OK
2235,000	90,039	OK	90,039	OK
2240,000	89,413	OK	89,413	OK
2245,000	88,221	OK	88,221	OK
2250,000	87,040	OK	87,040	OK
2255,000	86,025	OK	86,025	OK
2258,072	0,000	OK	0,000	OK
2260,000	84,862	OK	84,862	OK
2265,000	83,708	OK	83,708	OK
2270,000	82,716	OK	82,716	OK
2275,000	81,580	OK	81,580	OK
2280,000	80,454	OK	80,454	OK
2282,242	0,000	OK	0,000	OK
2285,000	79,483	OK	79,483	OK
2290,000	78,374	OK	78,374	OK
2295,000	77,275	OK	77,275	OK
2300,000	76,325	OK	76,325	OK
2305,000	75,243	OK	75,243	OK
2310,000	74,170	OK	74,170	OK
2315,000	73,241	OK	73,241	OK
2320,000	72,184	OK	72,184	OK
2325,000	71,136	OK	71,136	OK
2330,000	70,098	OK	70,098	OK
2335,000	69,198	OK	69,198	OK
2339,906	0,000	OK	0,000	OK
2340,000	68,179	OK	68,179	OK
2345,000	67,171	OK	67,171	OK
2350,000	66,295	OK	66,295	OK
2355,000	65,305	OK	65,305	OK
2360,000	64,326	OK	64,326	OK
2365,000	63,473	OK	63,473	OK
2368,749	0,000	OK	0,000	OK
2370,000	62,693	OK	62,693	OK
2375,000	62,693	OK	62,693	OK
2380,000	62,693	OK	62,693	OK
2385,000	62,693	OK	62,693	OK
2390,000	62,693	OK	62,693	OK
2395,000	62,693	OK	62,693	OK
2399,415	0,000	OK	0,000	OK
2400,000	62,667	OK	62,667	OK

2405,000	61,876	OK	61,876	OK
2410,000	61,204	OK	61,204	OK
2415,000	60,426	OK	60,426	OK
2420,000	59,653	OK	59,653	OK
2425,000	58,995	OK	58,995	OK
2428,257	0,000	OK	0,000	OK
2430,000	58,234	OK	58,234	OK
2435,000	56,868	OK	56,868	OK
2440,000	55,312	OK	55,312	OK
2445,000	53,681	OK	53,681	OK
2450,000	52,079	OK	52,079	OK
2455,000	50,504	OK	50,504	OK
2456,915	0,000	OK	0,000	OK
2460,000	48,956	OK	48,956	OK
2465,000	47,435	OK	47,435	OK
2470,000	46,022	OK	46,022	OK
2471,272	0,000	OK	0,000	OK
2475,000	45,628	OK	45,628	OK
2480,000	45,628	OK	45,628	OK
2485,000	45,628	OK	45,628	OK
2485,430	0,000	OK	0,000	OK
2490,000	47,015	OK	47,015	OK
2495,000	48,649	OK	48,649	OK
2499,787	0,000	OK	0,000	OK
2500,000	50,223	OK	50,223	OK
2505,000	48,937	OK	48,937	OK
2510,000	47,273	OK	47,273	OK
2515,000	45,640	OK	45,640	OK
2520,000	44,036	OK	44,036	OK
2521,491	0,000	OK	0,000	OK
2525,000	42,461	OK	42,461	OK
2530,000	40,914	OK	40,914	OK
2530,380	0,000	OK	0,000	OK
2535,000	40,791	OK	40,791	OK
2540,000	40,791	OK	40,791	OK
2545,000	40,791	OK	40,791	OK
2550,000	40,791	OK	40,791	OK
2554,007	0,000	OK	0,000	OK
2555,000	41,145	OK	41,145	OK
2560,000	42,715	OK	42,715	OK
2562,896	0,000	OK	0,000	OK
2565,000	44,313	OK	44,313	OK
2570,000	46,022	OK	46,022	OK
2575,000	46,452	OK	46,452	OK
2580,000	44,815	OK	44,815	OK
2583,493	0,000	OK	0,000	OK
2585,000	43,207	OK	43,207	OK
2590,000	41,553	OK	41,553	OK
2592,382	0,000	OK	0,000	OK
2595,000	40,791	OK	40,791	OK
2600,000	40,791	OK	40,791	OK
2600,365	0,000	OK	0,000	OK
2605,000	42,187	OK	42,187	OK
2609,254	0,000	OK	0,000	OK
2610,000	43,652	OK	43,652	OK
2615,000	45,221	OK	45,221	OK
2620,000	46,736	OK	46,736	OK
2625,000	48,363	OK	48,363	OK
2630,000	49,931	OK	49,931	OK
2635,000	51,526	OK	51,526	OK
2640,000	53,243	OK	53,243	OK
2645,000	54,895	OK	54,895	OK
2650,000	0,000	-	0,000	-

4.7 Diagramma delle velocità

Ogni tipologia di strada, in questo caso F2, è caratterizzata da un prefissato intervallo di velocità di progetto, che definisce un range di valori in base ai quali dimensionare le caratteristiche geometriche degli elementi presenti nel tracciato stradale:

- $V_{P,max} = 100 \text{ km/h}$ è il limite superiore dell'intervallo, il veicolo non può andare oltre questa velocità. Corrisponde alla massima velocità compatibile in rettilineo e in orizzontale e da un punto di vista operativo viene utilizzata per la progettazione degli elementi meno vincolanti del progetto;
- $V_{P,min} = 40 \text{ km/h}$ rappresenta invece il limite inferiore, è la velocità di progetto degli elementi plano-altimetrici più vincolanti (ad esempio: raggio minimo delle curve circolari).

L'andamento delle velocità relativo all'asse stradale viene rappresentato nel diagramma delle velocità. Si prende come riferimento il tracciato planimetrico calcolando per ogni suo elemento la velocità di progetto che deve essere contenuta nei limiti descritti precedentemente.

Per analizzare l'andamento delle velocità di progetto lungo il tracciato, è necessario elencare le ipotesi sulle quali esso è basato:

1. Quando un veicolo percorre un rettilineo, una curva circolare con raggio $R > R_{2,5}$, la sua velocità tende a raggiungere il limite superiore $V_{P,max}$. Il raggio $R_{2,5}$ rappresenta il raggio delle curve circolari caratterizzata da pendenza trasversale della sagoma stradale pari al 2,5% e il valore si trova in funzione del tipo di strada: per una strada locale in ambito extraurbano è pari a $R_{2,5} = 2187 \text{ m}$.
2. Gli elementi del tracciato planimetrico che possono essere interessati dallo spazio di accelerazione conseguente all'uscita da una curva circolare sono:
 - Rettilinei;
 - Curve circolari con $R > R_{2,5}$;
 - Clotoidi.
3. Lo spazio di decelerazione conseguente all'ingresso in una curva circolare può interessare solo i seguenti elementi del tracciato planimetrico:

- Rettilinei;
 - Curve circolari con $R > R_{2,5}$;
 - Clotoidi.
4. I valori dell'accelerazione e della decelerazione, di cui ai punti precedenti sono fissati in $\pm 0,8 \text{ m/s}^2$;
 5. Quando un veicolo si muove su una curva circolare di raggio $R < R_{2,5}$, la sua velocità di percorrenza si mantiene costante;
 6. Si assume che le pendenze longitudinali del tracciato stradale non influenzino la velocità di percorrenza. [9]

Calcolata la lunghezza di transizione D_T , indica lo spazio percorso da un veicolo affinché la si verifichi la variazione della velocità da V_{P1} a V_{P2} , calcolata come riportato di seguito:

$$D_T = \frac{\Delta V \cdot V_m}{12,96 \cdot a}$$

Dove:

- ΔV : differenza di velocità $V_{P2} - V_{P1}$;
- V_m : velocità media;
- a : accelerazione (o decelerazione) $\pm 0,8$.

Viene calcolata la distanza di riconoscimento D_r , distanza necessaria per riconoscere un ostacolo e le manovre di altri veicoli; se l'avvenimento da riconoscere è la variazione di curvatura dell'asse stradale, la distanza si calcola come:

$$D_r = t \cdot v_p$$

$$D_r = 12 \cdot 11,11 = 133,33 \text{ m}$$

Dove:

- $t = 12 \text{ secondi}$;

- v_p velocità in m/s relativa all'elemento che presenta il raggio più grande.

Quando si entra in una curva, per riconoscere il cambio di curvatura, la distanza di transizione deve essere inferiore alla distanza di riconoscimento:

$$D_T < D_r$$

Tale limite non è valido lungo i tratti di accelerazione e decelerazione prossimi alle rotatorie.

Per aumentare la sicurezza e diminuire la probabilità di incidenti, il diagramma di velocità deve limitare la velocità tra due elementi adiacenti. Considerando una velocità di progetto di 40 km/h , è necessario avere:

- Nel passaggio da tratti caratterizzati da una velocità di percorrenza $V_{p,max}$ a curve circolari caratterizzate da una velocità di percorrenza V_p inferiore:
 - $\Delta V = |V_f - V_i| \leq 5 \text{ km/h}$
- Nel passaggio fra una curva circolare caratterizzata da una velocità di percorrenza V_i ad un'altra curva circolare caratterizzata da un'altra velocità di percorrenza V_f :
 - $\Delta V = |V_f - V_i| < 20 \text{ km/h}$ (obbligatorio);
 - $\Delta V = |V_f - V_i| < 10 \text{ km/h}$ (consigliabile).

4.7.1 Perdita di tracciato

La situazione di un raccordo concavo che segue un raccordo convesso può mascherare un tratto intermedio del tracciato. Questa situazione è definita “perdita di tracciato” e può provocare nell'utente senso di disorientamento in quanto il tracciato compare ad una distanza inferiore a quella riportata nella seguente tabella: [9]

Tabella 4-8: Andamento numerico velocità di percorrenza – distanza di ricomparsa

Velocità [km/h]	25	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Distanza di ricomparsa [m]	150	180	220	280	350	420	500	560	640	720	800	860

Bisogna cercare di evitare queste situazioni, in particolare quando si tratta di intersezioni.



Figura 4-21: Perdita di tracciato

4.8 Sezioni trasversali

Le sezioni trasversali rappresentano una sezione tipologica del tracciato. Gli elementi che costituiscono la sezione sono: la piattaforma, le banchine, l'arginello, la cunetta e il fosso.

In base alla loro posizione rispetto alla piattaforma stradale e rispetto al livello del terreno, si hanno diverse tipologie di sezioni, si hanno sezioni a mezza costa, sezioni in trincea e sezioni in rilevato.

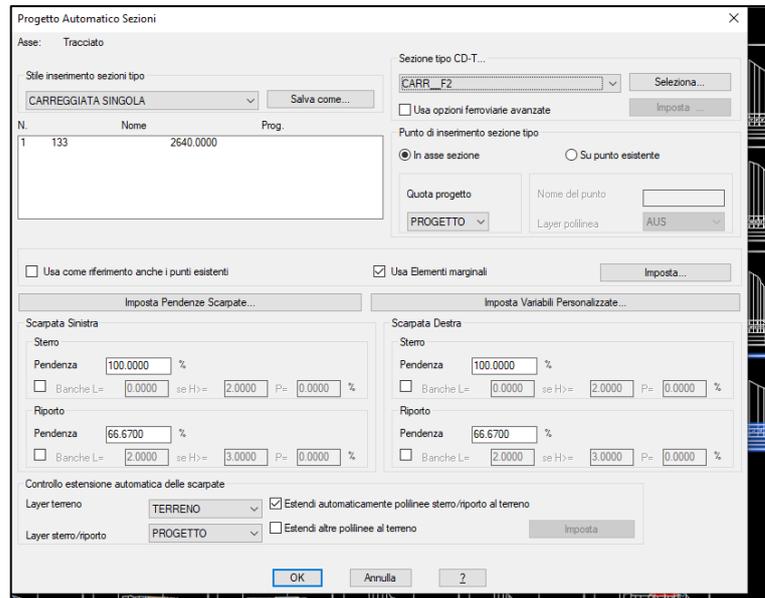
Le aree rappresentative degli scavi sono riportate di colore giallo, le aree che rappresentano i riporti in colore rosso.

Il terreno impiegato per le sezioni in rilevato è appartenente alla classe A1 – A2 – A3. La sezione in esame presenta una scarpata con pendenza 3:2, è ricoperta da uno strato erboso pari a circa 20 ÷ 30 cm.

Per la sezione in scavo si ha la pendenza della scarpata pari a 1:1, ricoperta da uno strato erboso pari a circa 20 ÷ 30 cm.

Infine, per la sezione in mezza costa sono presenti entrambe le situazioni.

Tramite il seguente comando CivilDesign:



È stato possibile estrarre le sezioni trasversali:

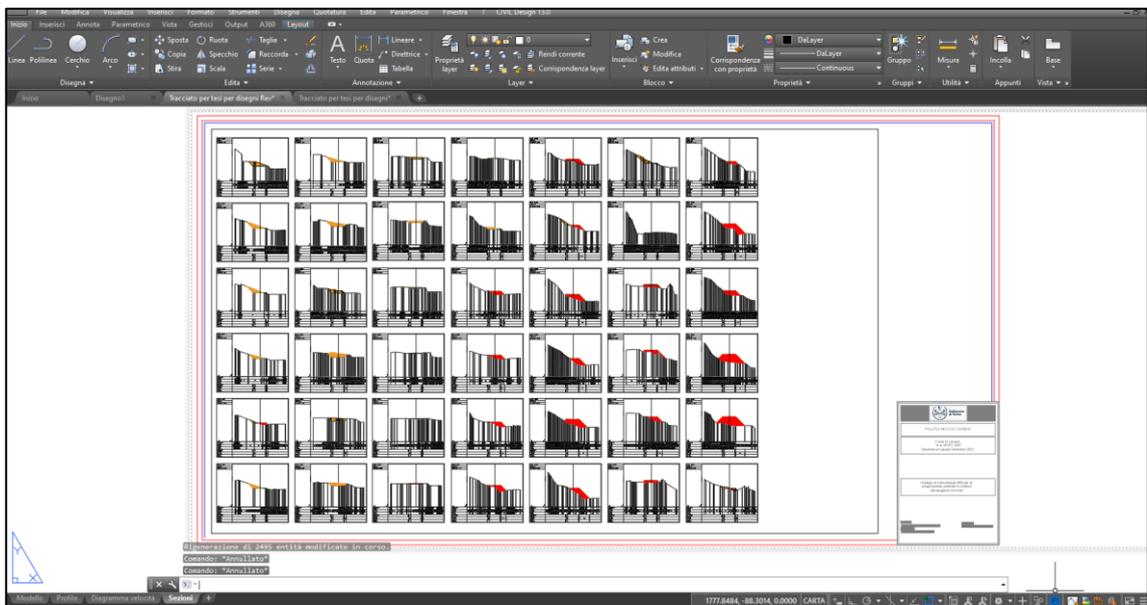


Figura 4-22: Sezioni trasversali

Dopo aver individuato le sezioni principali, è stato effettuato il calcolo delle aree tramite il comando presente in CivilDesign per poi procedere al calcolo dei volumi; questi

sono necessari per conoscere il quantitativo di terra che deve essere scavato e il quantitativo di terra necessario per il rilevato.

Il software utilizza il metodo delle sezioni ragguagliate:

$$V = (A_1 + A_2) \frac{d}{2}$$

Dove:

- A_1 rappresenta l'area corrispondente alla prima sezione;
- A_2 rappresenta l'area corrispondente alla seconda sezione;
- d è la distanza che si ha tra le due sezioni.

Il software permette di estrarre un report in cui vengono riportati sezione per sezione i volumi di sterro e di riporto, per un totale di:

Tabella 4-9: calcolo dei volumi

Pagina: COMPUTO DEI VOLUMI			
Descrizione: Volume dalla sezione	alla sezione	Simbolo	Volume [m3]
A	RILEVATO	m ³	5275.600
B	STERRO	m ³	3334.000

4.9 Pavimentazione stradale

È stata effettuata la scelta di una pavimentazione “flessibile”; per effettuare il dimensionamento delle pavimentazioni si è fatto riferimento al “Catalogo delle Pavimentazioni Stradali” CNR.

Il numero complessivo di passaggi di veicoli commerciali che transitano sulla corsia più caricata indicano il traffico che le sovrastrutture di catalogo possono sopportare.

Presumendo che, il nastro stradale in esame, per i 20 anni della vita economica della strada sarà soggetto ad un traffico che mediamente oscillerà tra i 4 – 5 milioni di veicoli commerciali annui, corrispondenti a 1500 v.p./giorno secondo Road

Research Laboratory (Gran Bretagna), e sempre nell'ottica di non dover intervenire con potenziamenti dei pacchetti di pavimentazioni (incrementi di traffico dovuti ad insediamenti, oggi non prevedibili), si è scelto di adottare una pavimentazione che presenti un modesto aumento rispetto a quelle di catalogo.

4.9.1 Pavimentazione tipo

Per l'asse principale, ci si è riferiti a strade di tipo "F", la portanza del sottofondo è $M_r = 90 \text{ N/mm}^2$, le condizioni climatiche quelle dell'Italia Meridionale, l'affidabilità pari al 95% e l'indice di funzionalità $PSI = 2,5$.

I valori possono leggersi nella tabella seguente, riferita ad un traffico P di tipo pesante.

Tabella 4-10: Affidabilità e P.S.I.

Tipo di strada	Affidabilità (%)	P.S.I.
Autostrade extraurbane	90	3
Autostrade urbane	95	3
Strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico	90	2,5
Strade extraurbane secondarie - turistiche	85	2,5
Strade extraurbane secondarie - ordinarie	80	2,5
Strade urbane di scorrimento	95	2,5
Strade urbane di quartiere e locali	90	2
Corsie preferenziali	95	2,5

La pavimentazione tipo che si ricava dai calcoli di cui al paragrafo successivo, prevede dunque gli spessori riportati nella seguente tabella riepilogativa

Tabella 4-11: Spessore strati

Strato	Spessore
Manto di usura	3 cm
Strato di binder	7 cm
Strato di base in misto cementato	10 cm

Misto granulare stabilizzato	30 cm
------------------------------	-------

Caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali - Conglomerato bituminoso per strato di usura						
Traffico	Granulometria	Bitume	Stabilità Marshall (75 colpi)		Rigidezza Marshall	Vuoti residui Marshall
(1)	(2)	[%]	[kg]	[daN]	[kg/mm]	[%]
P		4,5 ÷ 6	≥ 1100	≥ 1080	300 ÷ 450	4 ÷ 6

4.9.2 Calcolo sovrastruttura stradale

La pavimentazione deve possedere i seguenti requisiti per permettere il traffico pesante o veloce:

- Buona aderenza ed antisdrucchiolevolezza nelle condizioni climatiche più sfavorevoli;
- Buona resistenza alle azioni tangenziali (in particolare quella dovuta alla frenatura);
- Buona resistenza ai carichi verticali, alle sollecitazioni a fatica e alle variazioni termiche;
- Stesa su idoneo strato di posa che garantisca la portanza.

La pavimentazione è stata determinata in modo che le deformazioni che si inducono rimangano nel campo elastico e le condizioni limite “deformazioni plastiche” siano raggiunte dopo un certo numero di anni che ci rappresenta la durata della sovrastruttura.

Il conglomerato bituminoso ha un comportamento visco-elastico influenzato dalla temperatura nelle sue caratteristiche meccaniche.

La temperatura, durante il giorno diminuisce con la profondità, inverso risulta il comportamento durante la notte (la variazione degli strati sottostanti quello superficiale, nei climi temperati saranno dell'ordine di 10° - 15°).

Le variazioni stagionali (40°-50°) avvengono con gradualità e perciò modificano il comportamento meccanico degli strati bitumati. Infatti, nella stagione estiva si ha una riduzione dei moduli degli strati superficiali che porta come conseguenza che, al passaggio dei carichi, si determina un aumento degli scorrimenti e delle deformazioni

permanenti e in particolare un aumento della flessione max del piano di posa della sovrastruttura.

Pertanto, nel dimensionamento si farà riferimento a quest'ultima condizione (più gravosa).

Carico di traffico al fine del dimensionamento della sovrastruttura

La resistenza meccanica della pavimentazione dipende infine dall'entità e dalla composizione del traffico nel periodo di vita utile della sovrastruttura.

Assumendo i dati del Road Research Laboratory (Gran Bretagna) si può determinare il numero medio di assi (n_m) per veicoli pesanti ($v_p = 1,5 t$).

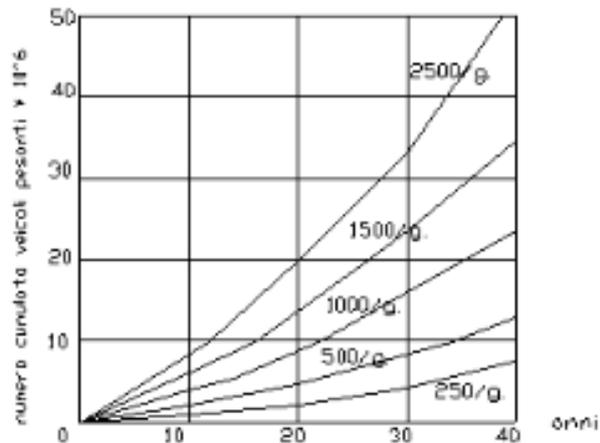
Tipo di strada	Veicoli pesanti / giorno per direzione	n_m
Autostrade e S.G.C.	≥ 1000	2,7
Strade extraurbane	250 ÷ 1000	2,4
Strade urbane		2,25

Pertanto, il numero di assi equivalenti cumulati in n anni di vita del conglomerato risulta:

$$N_c = 365 \cdot T_l \cdot n_m \cdot t_e \cdot \sum_{i=1}^n (1 + r)^{i-1}$$

Dove:

- T : traffico medio giornaliero dei veicoli pesanti;
- n_m : coefficiente relativo al numero medio di assi (di cui alla tabella precedente);
- t_e : coefficiente di equivalenza per il tipo di asse ($t_e = 0,4$ per autostrade ed S.G.C., mentre si assume il valore 0,3 per strade extraurbane);
- r : tasso d'incremento annuo del traffico;
- n : durata di vita stimata del conglomerato.

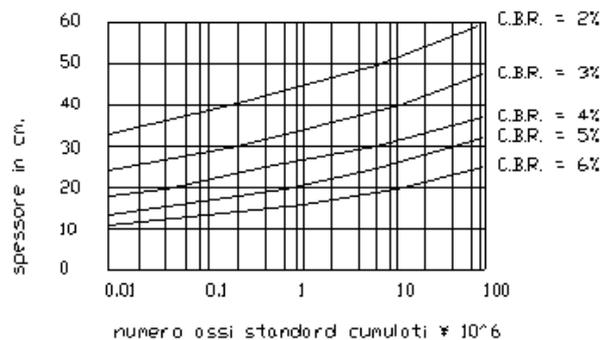


Fissato il numero di anni di vita presunta e il tipo di strada in relazione al numero di veicoli pesanti/giorno, si ricava dalla figura precedente N_c , ovvero il numero cumulato di veicoli pesanti 10^6 e da questo inserendo il valore di n_m e t_e si ha che N_n , cioè il numero di assi standard cumulati, è pari a $N_c \cdot n_m^{t_e}$.

Nel nostro caso si fissa un valore di 800 veicoli pesanti al giorno ($v.p. = 1,5 t$), una vita presunta di 20 anni, $n_m = 2,4$. Pertanto, si ricava:

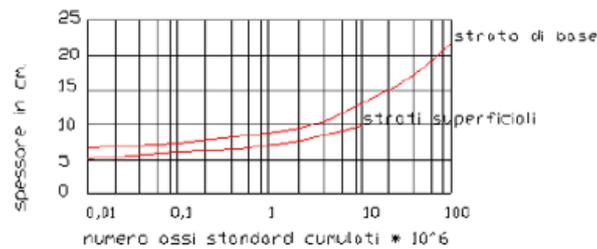
$$N_c = 8,0 \cdot 10^6$$

$$N_n = 8,0 \cdot 10^6 \cdot 2,4^{0,3} = 11,4 \cdot 10^6$$



Dalla figura precedente, per $N_n = 11,4 \cdot 10^6$ e per un $C.B.R. = 5\%$, si ricava uno spessore minimo del sottofondo di 27 cm circa.

Dalla figura seguente si ricava infine lo spessore dello strato di base pari 11 cm e degli strati superficiali, pari ad un totale di 10 cm (binder + tappetino).



In conclusione, si adotta:

- Sottofondo o strato di fondazione in misto naturale di spessore di 30 cm, in sicurezza rispetto allo strato di calcolo, pari a 27 cm (anche a compensazione della riduzione prevista sullo strato di base, per comodità costruttiva);
- Strato di base formato da un impasto di misto granulometrico proveniente da frantumazione o da formazioni naturali stabilizzato con conglomerato cementizio (misto cementato) dello spessore di 10 cm;
- Conglomerato bituminoso aperto (binder) dello spessore di 7 cm;
- Conglomerato bituminoso chiuso (strato di usura-tappetino) di 3 cm (a completamento degli strati superficiali).

4.10 Barriere stradali e dispositivi di sicurezza

Le barriere stradali vengono utilizzate per impedire ai veicoli di urtare un oggetto e per garantire il contenimento dei veicoli nella carreggiata stradale. Poiché le barriere sono esse stesse una fonte potenziale d'urto, il loro uso dovrebbe essere considerato con attenzione.

Inoltre, le barriere devono cercare di limitare danni eccessivi sui passeggeri, questo può avvenire assorbendo, attraverso la propria deformazione, parte dell'energia cinetica che il veicolo ha al momento dell'urto. [11]

Per ciò che concerne la normativa specifica, si applica il D.M. LL.PP. 21.06.04, aggiornamento del D.M. 03.06.98 (n.223) che disciplina l'impiego delle barriere di sicurezza per le opere stradali.

Affinché la barriera risulti idonea deve verificare i seguenti obiettivi:

- Offrire un'adeguatezza strutturale;
- cercare di contenere il veicolo;
- garantire sicurezza agli occupanti del veicolo;
- creare una traiettoria di rinvio del veicolo.

I parametri che definiscono il comportamento di una barriera in caso di impatto sono:

- larghezza operativa (W): è riferita all'intero sistema barriera-veicolo e indica lo spazio necessario tra il lato del veicolo rivolto verso la barriera e la barriera stessa. Rappresenta la somma della larghezza della barriera e della deflessione dinamica;
- deflessione dinamica (D): è riferita alla sola barriera e rappresenta lo spostamento laterale che la barriera può avere;
- intrusione del veicolo (V_i): misura lo spazio necessario che serve al veicolo per evitare di colpire l'oggetto protetto dalla barriera in caso di collisione.

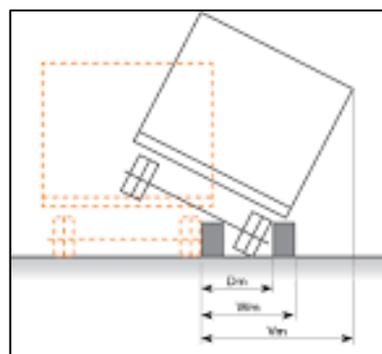


Figura 4-23: specifiche tecniche delle barriere stradali

Le barriere si possono classificare in base al comportamento che assumono durante l'impatto. Si hanno 8 classi per la larghezza operativa (W) e 9 classi per (V_i).

Nella progettazione della barriera bisogna verificare che ci sia una velocità disponibile. È necessario conoscere lo spazio disponibile per ospitare la deflessione della barriera. Durante un urto, la barriera come anche il veicolo, non devono interagire con nessun tipo di oggetto fisso, come pareti, pali, strutture, ...

Il comportamento della barriera e del veicolo durante l'impatto deve essere preso in considerazione durante la fase di progettazione.

La capacità di trattenere i veicoli in collisione viene descritta dal livello di contenimento (L_c) delle barriere di sicurezza che è la capacità della barriera di contenere il veicolo e assorbire energia durante l'impatto:

$$L_c = \frac{1}{2} M (v \sin \alpha)^2$$

dove:

- M : massa del veicolo [t];
- v : velocità di impatto [m/s];
- α : angolo di impatto [deg].

Le barriere vengono classificate in base a questo livello di contenimento, si ha un livello di contenimento normale (N), alto e molto alto (H).

La Normativa Italiana classifica le barriere in due livelli normali:

- N1, contenimento minimo $L_c = 44 \text{ kJ}$
- N2, contenimento medio $L_c = 82 \text{ kJ}$

E quattro livelli alti:

- H1, contenimento normale $L_c = 127 \text{ kJ}$
- H2, contenimento alto $L_c = 288 \text{ kJ}$
- H3, contenimento molto alto $L_c = 463 \text{ kJ}$
- H4, contenimento ad alto rischio $L_c = 572 \text{ kJ}$

La selezione della barriera può essere effettuata in base al tipo di traffico e alla tipologia di infrastruttura. Il traffico su strada è classificato in tre livelli:

Tabella 4-12: Tipo di traffico

Tipo di traffico	Traffico giornaliero medio	% massa veicoli
I	≤ 1000	Qualsiasi
I	> 1000	≤ 5
II	> 1000	$5 < n \leq 15$
III	> 1000	> 15

Tabella 4-13: classi minime delle barriere

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

In funzione della classe di traffico per la strada in progetto (III) e del tipo di strada, che si ricorda è una F2 del DM 05/11/2001, è dunque stato stabilito che le barriere utilizzate saranno di tipo:

- Classe H1 per i bordi laterali;
- Classe H2 per i bordo ponte.

In definitiva, nei confronti della sicurezza passiva bisogna dare un'adeguata importanza ai sistemi di ritenuta.

L'obiettivo di tali dispositivi è quello di evitare conseguenze tragiche durante un incidente, anche se evitarli totalmente non è possibile; inoltre, ci si pone come obiettivo di aumentare la sicurezza stradale facendo in modo che il veicolo non fuoriesca dalla carreggiata ma subisca un semplice urto.

4.11 Intersezione a rotatoria

La rotatoria è un'intersezione a raso realizzata quando, in un incrocio a più bracci, i flussi veicolari presenti nelle altre strade non sono trascurabili.

Una caratteristica delle rotatorie è quella di non attribuire importanza ad alcuna delle strade che si intersecano, questo è importante quando si hanno strade con lo stesso livello gerarchico.

Si hanno tre categorie di rotatorie:

- Rotatorie convenzionali, presentano un diametro esterno di $40 \div 50 \text{ m}$;
- Rotatorie compatte, presentano un diametro esterno di $25 \div 40 \text{ m}$;
- mini rotatorie, presentano un diametro esterno di $14 \div 25 \text{ m}$.

Vi è inoltre un'informazione riguardante la sistemazione dell'isola centrale; nel caso di mini rotatorie con diametro compreso tra 25 e 18 m si può considerare in parte transitabile per facilitare le manovre dei veicoli pesanti, mentre si può rendere completamente sormontabile nelle mini rotatorie che hanno un diametro che va da 18 a 14 m , infine, le rotatorie compatte non sono sormontabili. [9]

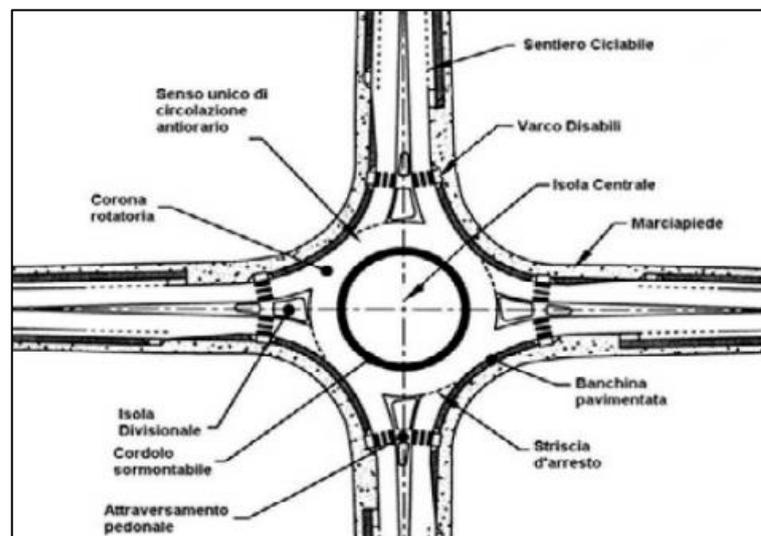


Figura 4-24: intersezione a rotatoria

Vengono riportati i valori delle larghezze degli elementi modulari delle rotatorie:

Elemento modulare	Diametro esterno della rotatoria (m)	Larghezza corsie (m)
Corsie nella corona rotatoria (*), per ingressi ad una corsia	≥ 40	6,00
	Compreso tra 25 e 40	7,00
	Compreso tra 14 e 25	7,00 - 8,00
Corsie nella corona rotatoria (*), per ingressi a più corsie	≥ 40	9,00
	< 40	8,50 - 9,00
Bracci di ingresso (**)		3,50 per una corsia 6,00 per due corsie
Bracci di uscita (*)	< 25	4,00
	≥ 25	4,50

(*) deve essere organizzata sempre su una sola corsia.

(**) organizzati al massimo con due corsie.

Figura 4-25: larghezze degli elementi modulari delle rotatorie⁷

“In ambito extraurbano l’adozione di mini rotatorie viene limitata agli incroci di tipo F/F tra strade locali, mentre le rotatorie compatte sono consentite per gli incroci di tipo C/C, C/F, F/C”. [12]

La caratteristica principale delle rotatorie è il criterio di assegnazione delle precedenza. Si hanno:

- rotatorie con il diritto di precedenza alle correnti che si immettono sull’anello; in questo caso viene evitato l’arresto dei veicoli che si immettono sull’anello;
- rotatorie con diritto di precedenza alle correnti presenti sull’anello; nel secondo criterio viene data la priorità alle correnti che si muovono sull’anello e si garantisce la completa mobilità. [12]

I vantaggi delle rotatorie sono i seguenti:

- riduzione dei punti di conflitto poiché vengono eliminate le manovre di attraversamento;
- riduzione del numero di incidenti;
- riduzione dei tempi di attesa per l’immissione;
- riduzione degli agenti inquinanti;

⁷ D.M. 19/04/2006 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali”.

- condizioni di sicurezza;
- impatto ambientale ridotto.

Nel definire la geometria delle rotatorie risulta di fondamentale importanza controllare la deviazione delle traiettorie che attraversano il nodo. Si può fare questo utilizzando come parametro di controllo l'angolo di deviazione β . Al raggio di entrata $R_{e,2}$ bisogna aggiungere una quantità pari a $3,50\text{ m}$, mentre per quanto riguarda il braccio di immissione è consigliabile utilizzare un valore pari a $\beta = 45^\circ$. [12]

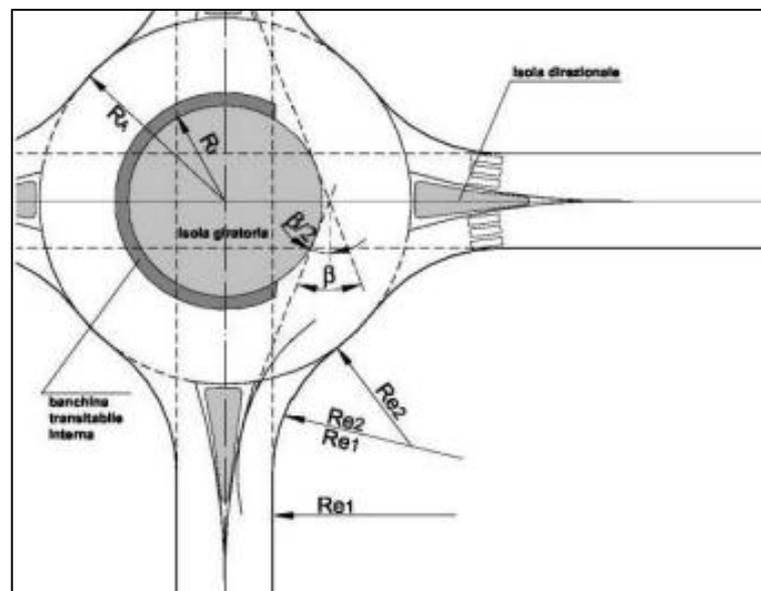


Figura 4-26: elementi di progetto della rotatoria

In ambito extraurbano si ha che i valori dei raggi di entrata sono pari ai seguenti:

- $R_{e,2} = 12\text{ m}$;
- $R_{e,1} = 5R_{e,2}$

Mentre, i valori dei raggi di uscita sono:

- $R_{a,2} = 14\text{ m}$;

$$- R_{a,1} = 4R_{a,2}$$

Per far sì che le intersezioni a raso funzionino correttamente bisogna eseguire una gerarchizzazione delle manovre per cercare di gestire i veicoli che si trovano nelle strade principali e secondarie; una soluzione per risolvere il problema è l'introduzione di segnali di precedenza o di stop per i vari punti di conflitto.

All'interno dell'area di intersezione si ha che le condizioni di visibilità per le manovre prioritarie devono essere assunte pari a quelle previste dalla Normativa nei confronti delle arterie stradali confluenti nei nodi, mentre per le manovre non prioritarie si utilizza il criterio dei triangoli di visibilità relativi ai punti di conflitto di intersezione generati dalle correnti veicolari. Il lato maggiore del triangolo di visibilità viene rappresentato dalla distanza di visibilità principale, data dall'espressione: [13]

$$D = v \cdot t$$

Dove:

- v : velocità di riferimento [m/s], pari al valore della velocità di progetto caratteristica del tratto considerato o, in presenza di elementi impositivi di velocità, dal valore prescritto dalla segnaletica;
- t : tempo di manovra pari a:
 - o 12 s in presenza di manovre regolate da precedenza;
 - o 6 s in presenza di manovre regolate da Stop.

Nelle intersezioni a rotatoria, i conducenti che arrivano alla rotatoria, per poter dare precedenza, devono poter vedere i veicoli che si trovano all'interno di essa; bisogna avere almeno una visuale libera nella parte sinistra per un quarto dello sviluppo dell'intero anello. [13]

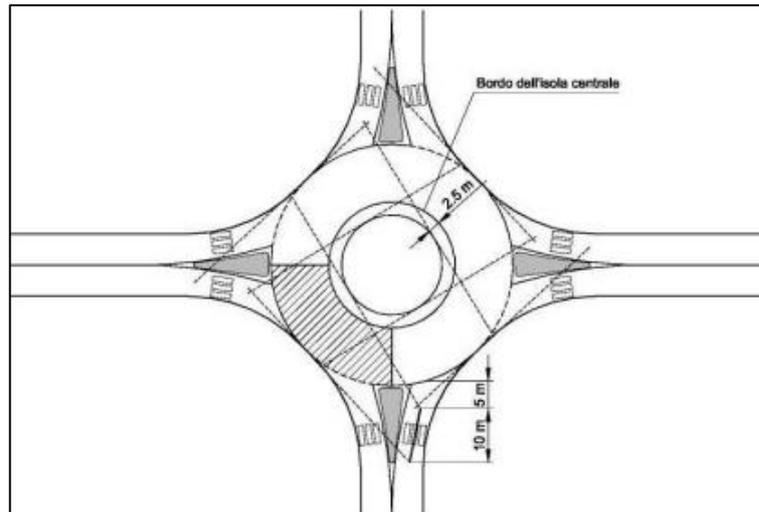


Figura 4-27: visibilità nelle rotatorie

L'intersezione è stata progettata per permettere di collegare la strada in esame con la viabilità esistente all'altezza della Chiesa della Madonna delle Grazie. In questo tratto vengono ad essere collegate la strada provinciale 27 con una strada secondaria, utilizzata solo come alternativa alla strada provinciale.

La creazione dell'intersezione è stata creata tramite un apposito comando di CivilDesign che permette il disegno della rotatoria completa, prendendo in considerazione la progettazione di una mini rotatoria, le caratteristiche sono riportate di seguito:

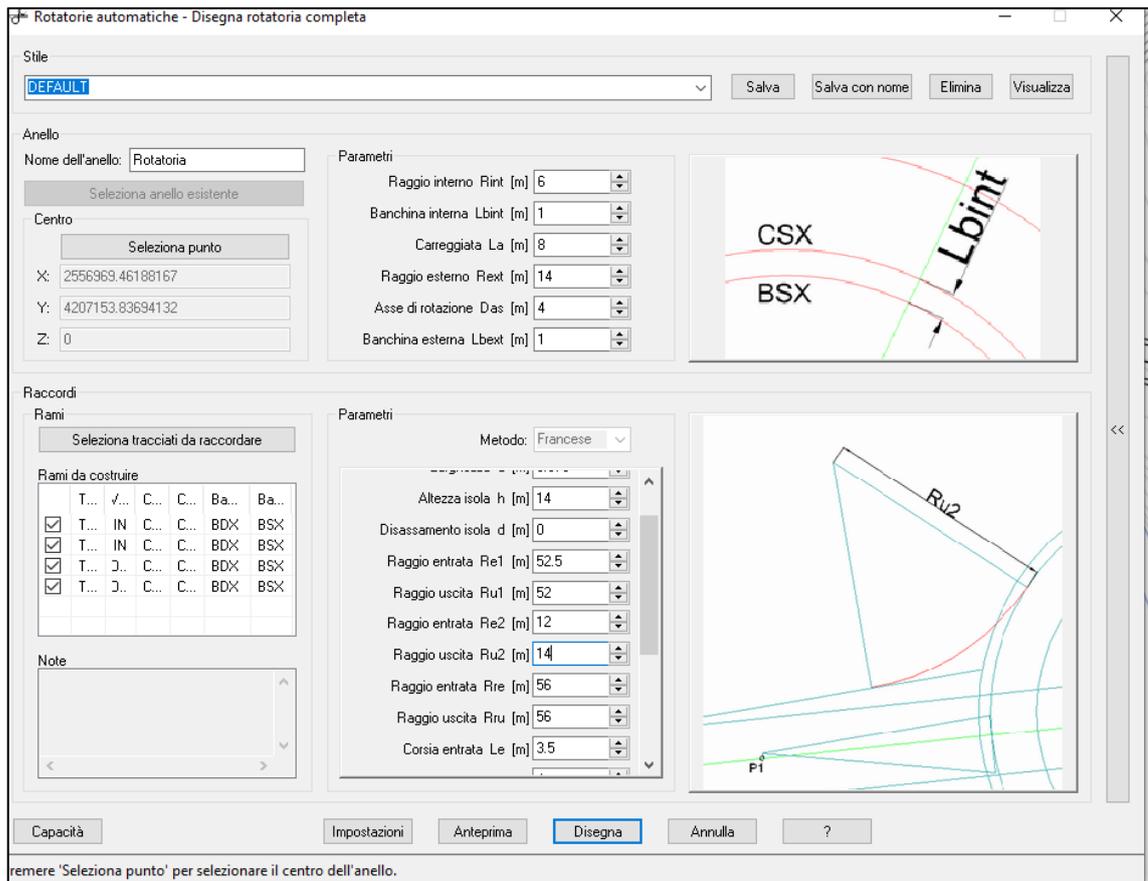
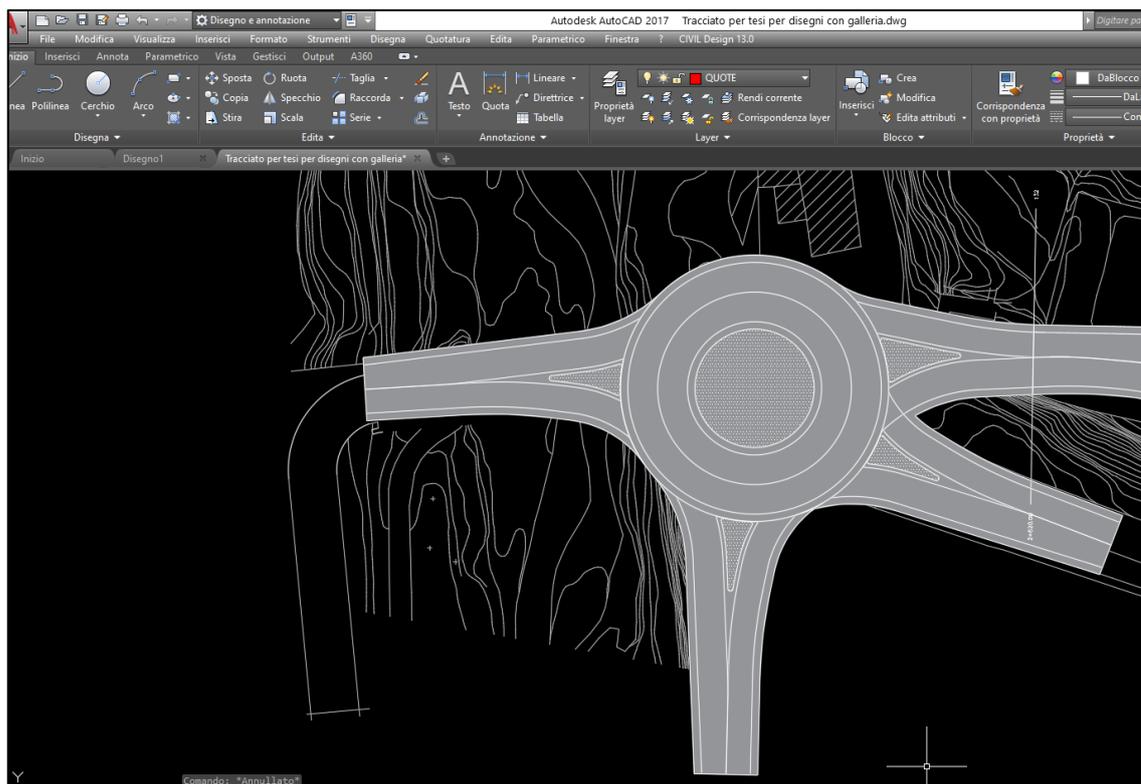


Figura 4-28: Creazione rotatoria



4.11.1 Elaborati grafici

Dopo la conclusione del progetto stradale sono stati creati i seguenti elaborati:

Tabella 4-14: Elaborati grafici

Allegato 1	PLANIMETRIA	SCALA 1:1000
Allegato 2	POLIGONALE D'ASSE	SCALA 1:1000
Allegato 3	PROFILO LONGITUDINALE	SCALA 1:2000 /1:200
Allegato 4	SEZIONI TRASVERSLI	SCALA 1:200

4.12 Tracciato BIM

Dopo aver terminato il progetto si crea dal comando CivilDesign la planimetria di progetto automatica 3D; avendo ora degli oggetti 3D, nel menu BIM presente nel software troviamo il comando "Progetto CivilDesign -> Oggetti 3D", tale comando crea

oggetti BIM a partire dagli oggetti generati dal comando prima eseguito riguardante la planimetria di progetto automatica, si apre la seguente finestra:

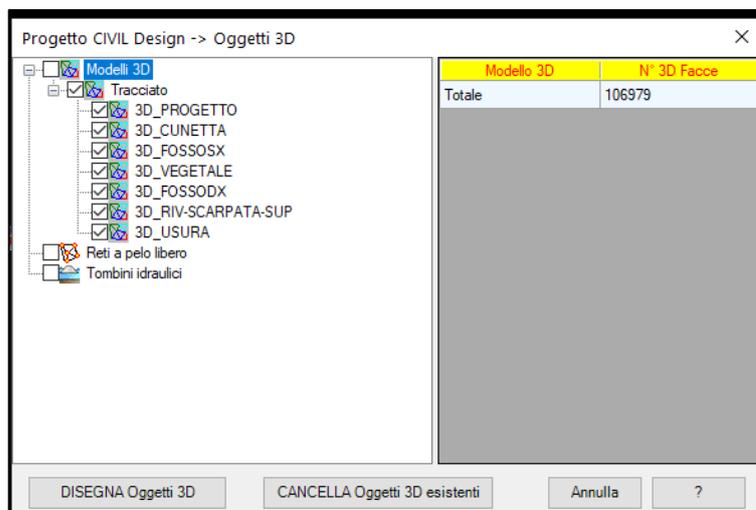


Figura 4-29: Oggetti 3D

Avviando il processo si ha la creazione degli oggetti solidi e delle mesh degli elementi che sono stati spuntati, si creeranno dei layer con il prefisso BIM_.

Si passa alla gestione materiali in cui è possibile gestire i materiali associabili agli oggetti con suddivisioni per categorie:

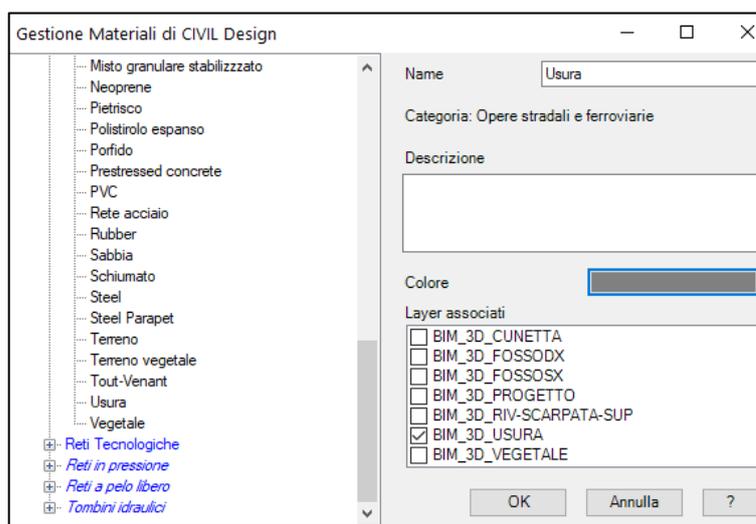


Figura 4-30: gestione materiali

Si possono utilizzare i materiali già presenti o creare un materiale, ad esempio in questo caso è stato creato il materiale “usura” a cui è stato associato un colore grigio ed è stato associato al layer BIM_3D_USURA.

Una volta definito il materiale bisogna classificare gli oggetti presenti all’interno del disegno sempre tramite il comando che si trova nel menù BIM; questo comando permette di creare degli stili utenti a partire dalle classificazioni generali: OmniClass (origine americana) o UniClass (origine anglosassone); si crea uno stile utente che si chiamerà “Stradale”:

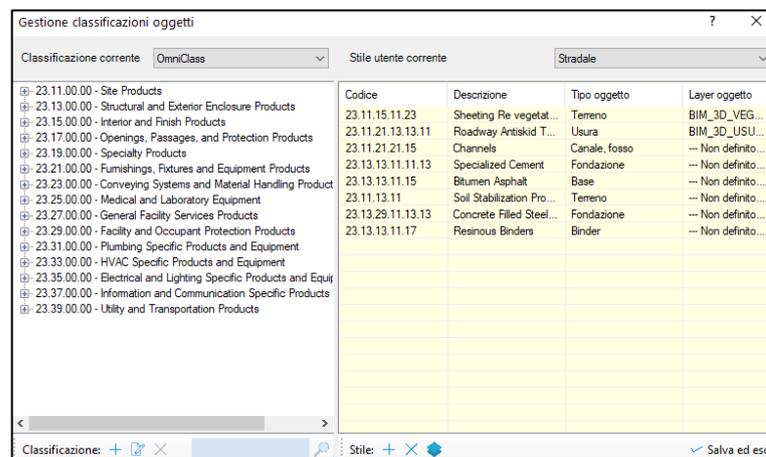


Figura 4-31: classificazione oggetti

Vengono definiti gli oggetti 3D, questo comando consente di assegnare un materiale e una classificazione a tutti gli oggetti BIM presenti:

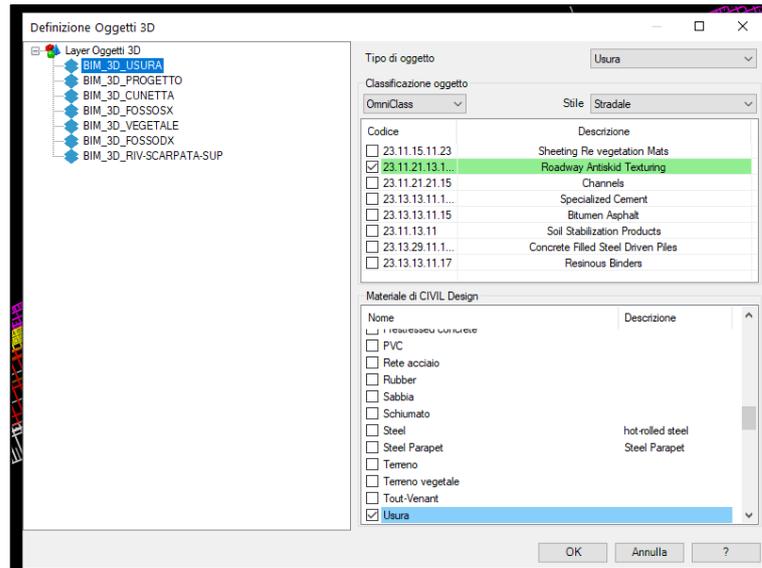
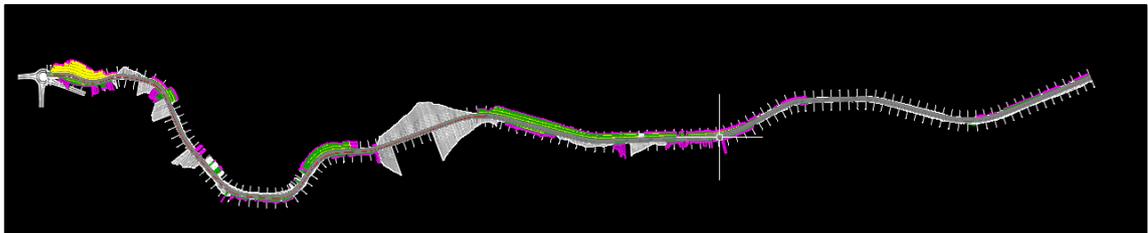


Figura 4-32: definizione oggetti 3D

È stato associato ad ogni oggetto sia il materiale che la classificazione; quindi, da un oggetto 3D semplice si ottiene un oggetto 3D intelligente:



A questo punto viene esportato il modello IFC:

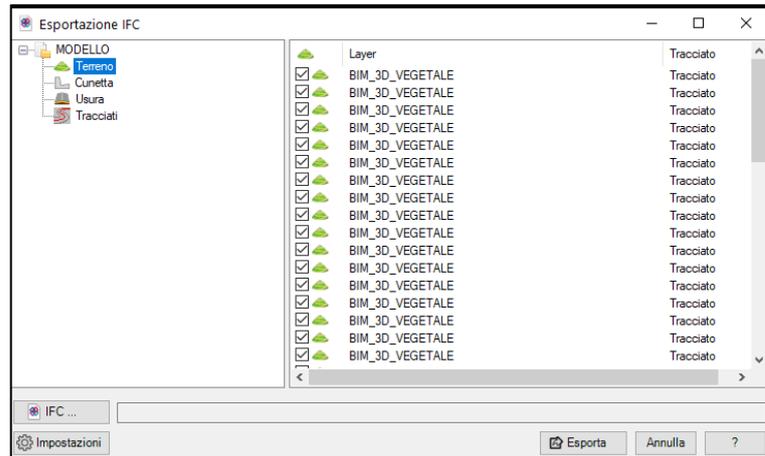


Figura 4-33: esportazione modello IFC

Una volta esportato il file IFC viene visualizzato nel software “BIMVision” che permette la visualizzazione dei file IFC:

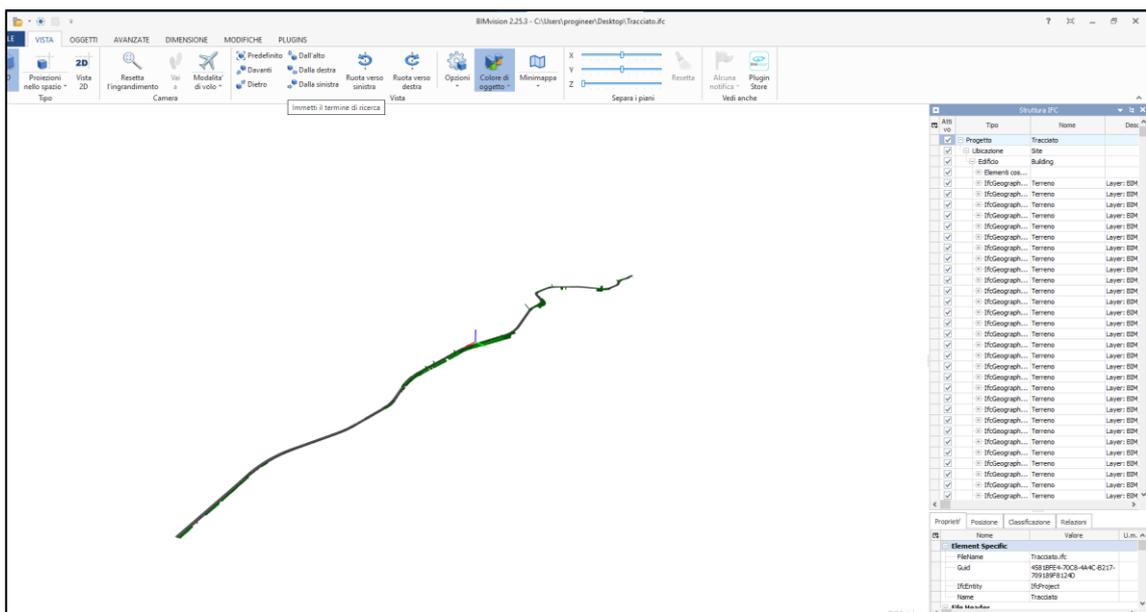
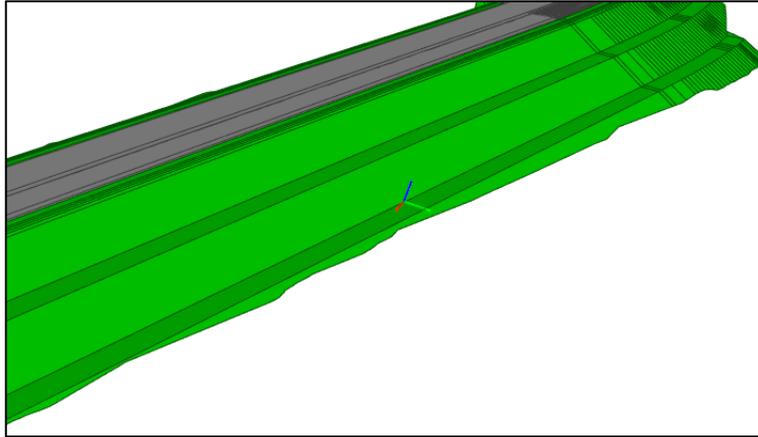


Figura 4-34: visualizzazione file IFC



È possibile sfruttare le potenzialità di questi visualizzatori per conoscere le aree, lunghezza, vedere la classificazione e anche delle informazioni generali.

4.13 Modellazione con OpenRoads

Dopo aver concluso l'intero progetto in CivilDesign 13.0, è stato creato il tracciato in OpenRoads Concept Station, un software di progettazione concettuale della rete stradale che permette di realizzare progetti in breve tempo. Questo software come anche CivilDesign 13.0 lavora in "tempo reale", infatti il tracciato viene costruito a partire dalle Mappe Bing che sono sempre aggiornate:

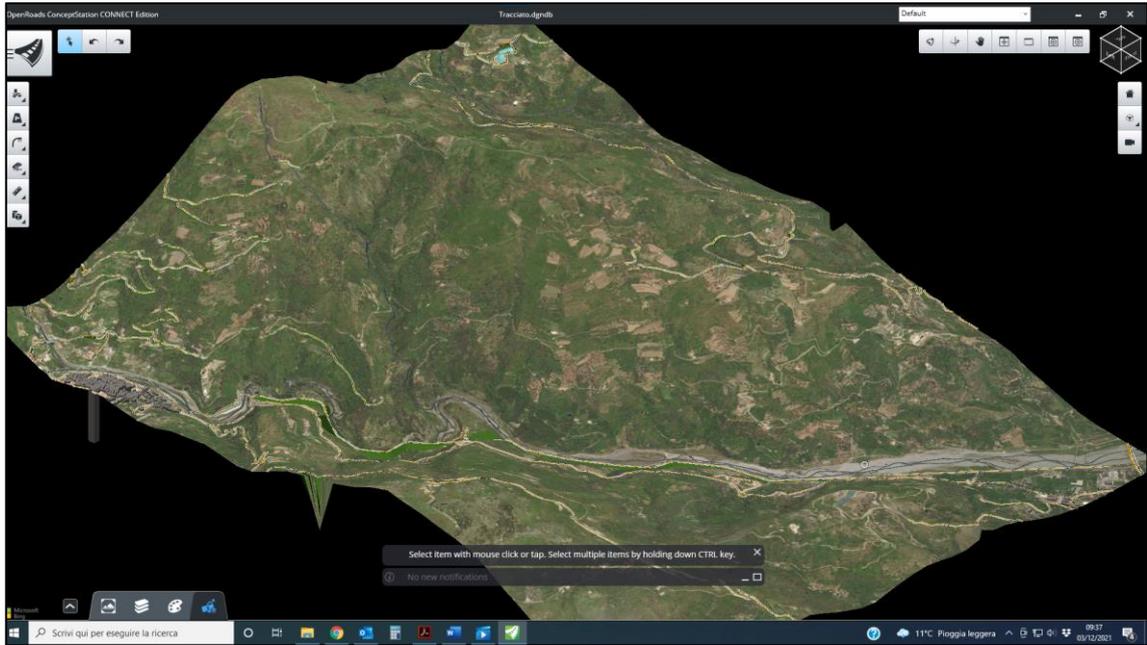


Figura 4-35: terreno di OpenRoads Concept Station

Per poter definire il tracciato è stato necessario definire la sezione tipo della strada, in questo caso F2, con le relative caratteristiche geometriche riportate nella Normativa:

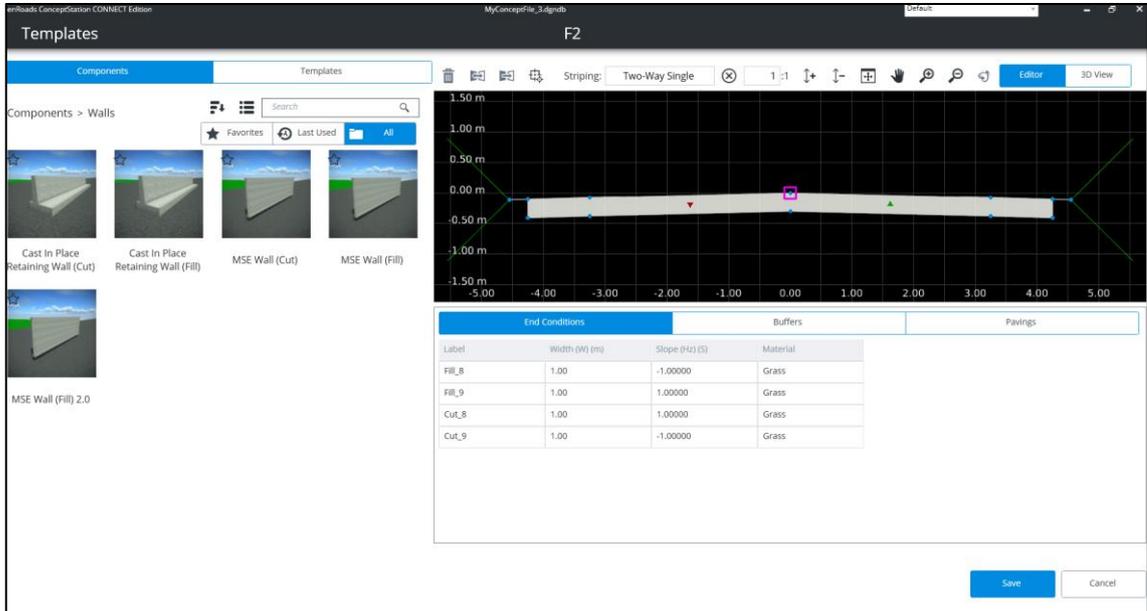


Figura 4-36: creazione della sezione tipo

Dopo aver determinato il tipo di sezione con cui progettare il tracciato e aver indicato la velocità di progetto, è stato creato il tracciato planimetrico:

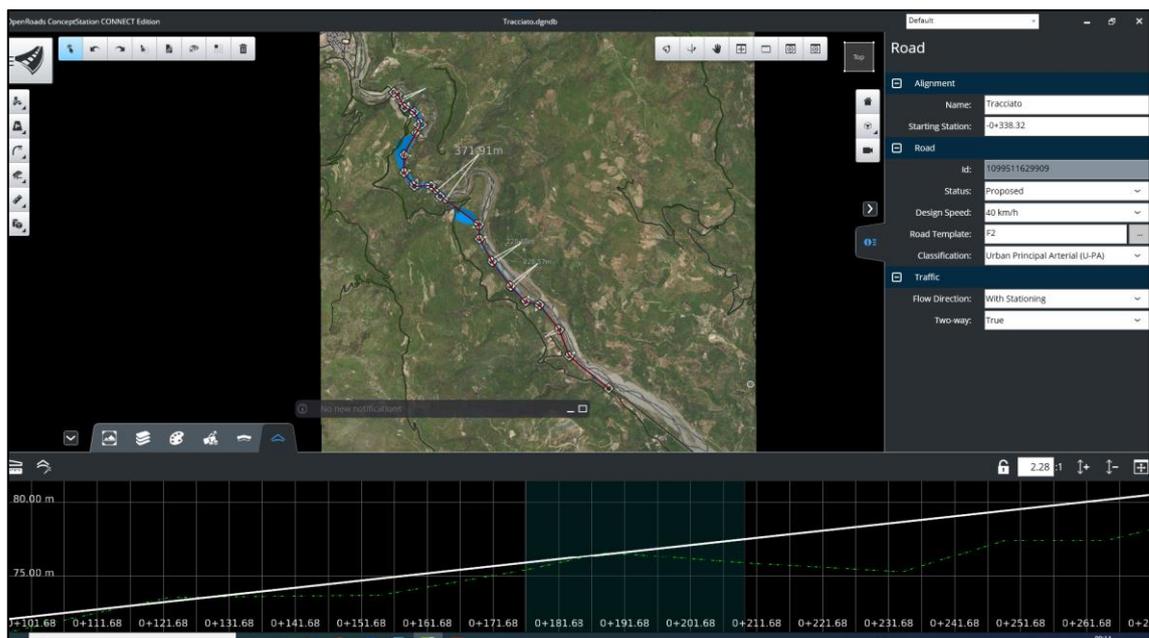


Figura 4-37: Tracciato in OpenRoads Concept Station

Per passare successivamente alla definizione del tracciato altimetrico, aggiungendo, eliminando o modificando i vertici altimetrici:

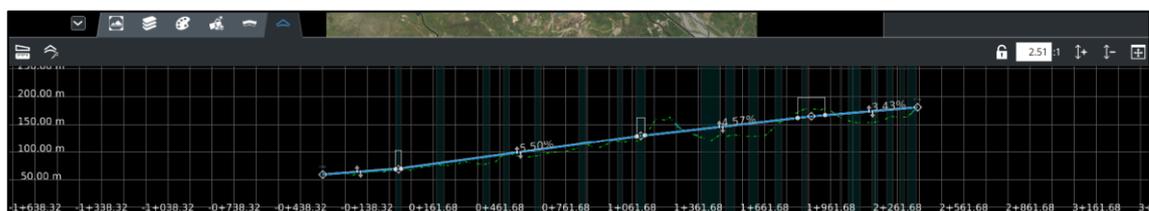


Figura 4-38: Altimetria in OpenRoads Concept Station

Dopo aver verificato il tracciato sia dal punto di vista planimetrico che altimetrico si è passati all'inserimento dell'intersezione a rotatoria per collegare il tracciato appena creato con la viabilità esistente:

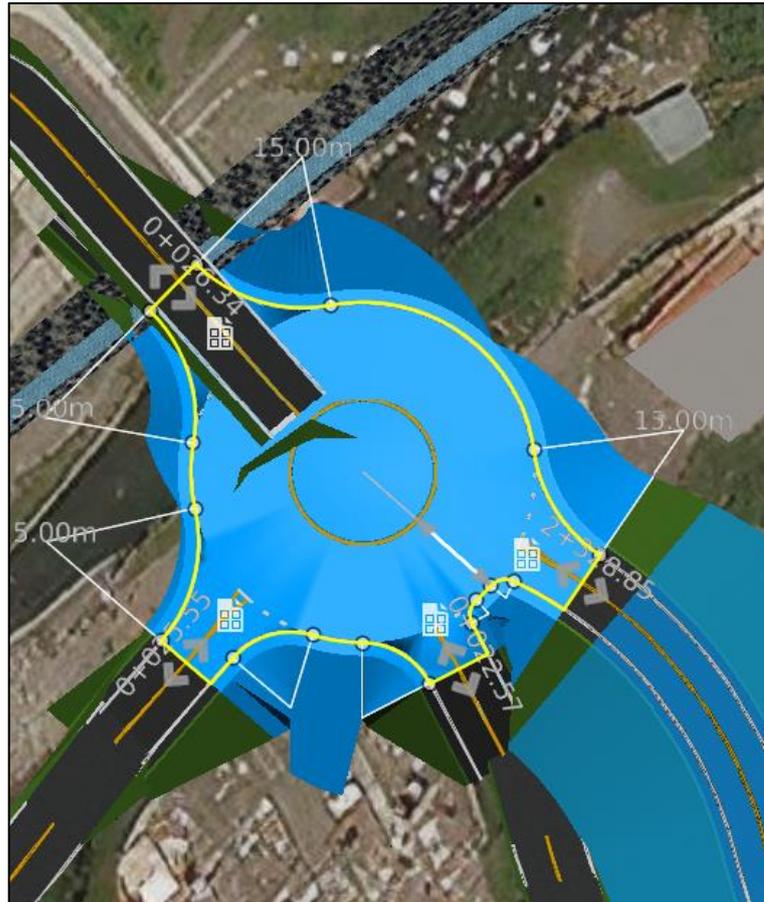


Figura 4-39: intersezione a rotatoria in OpenRoads Concept Station

Attraverso il comando “Tunnel” sono state inserite le due gallerie nei tratti in cui erano state previste. Si riporta la rappresentazione dei due tunnel:

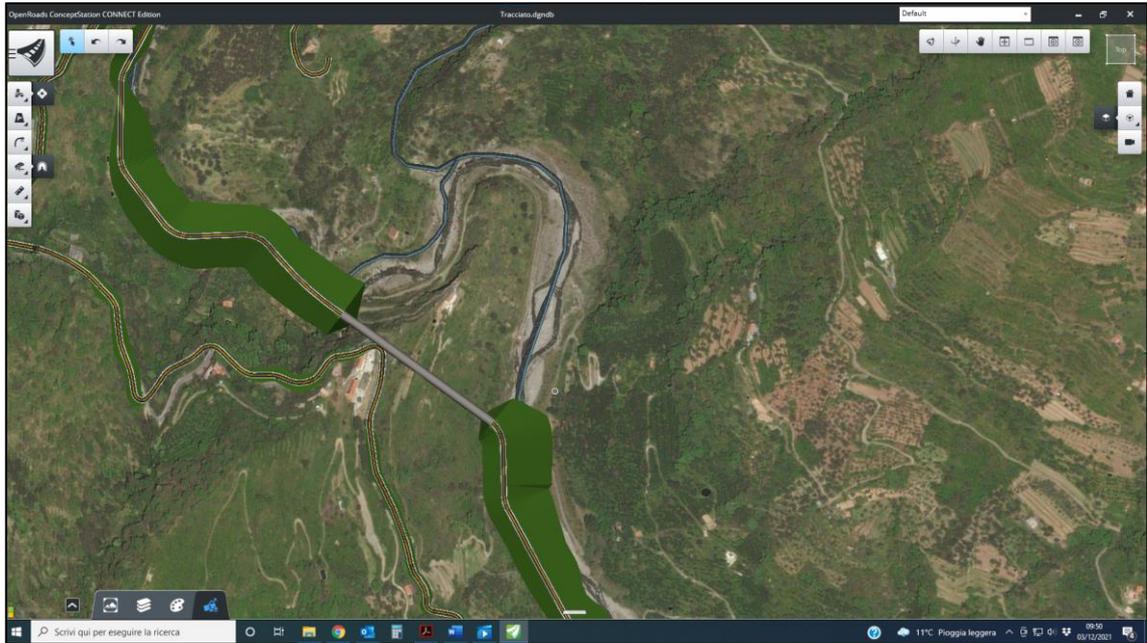


Figura 4-40: primo tratto in galleria

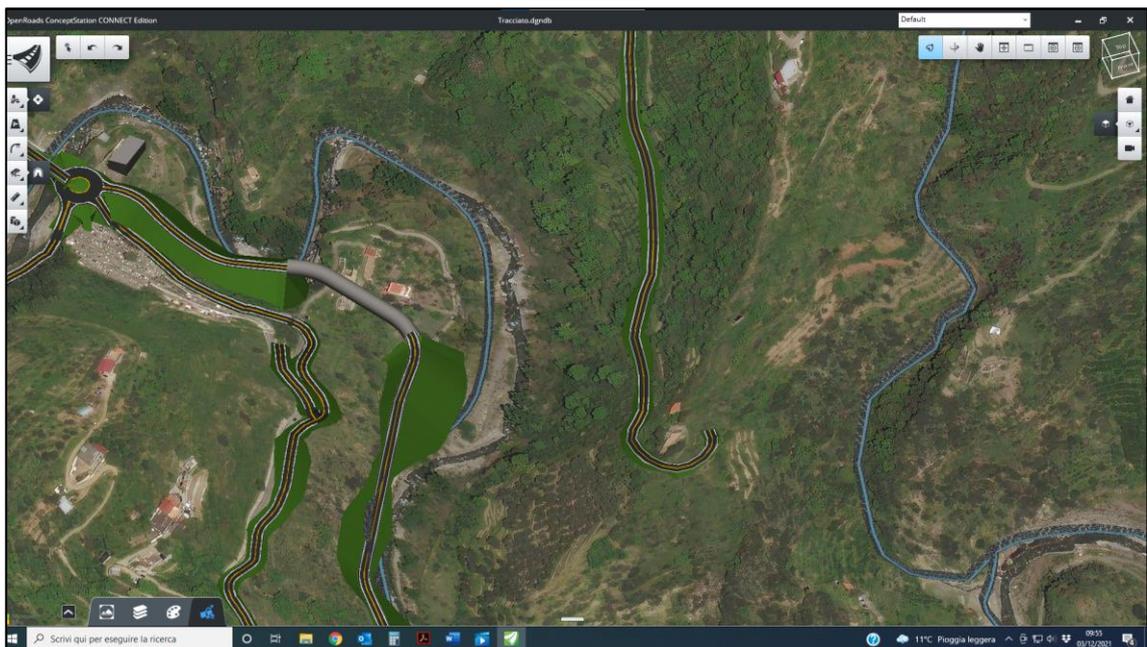


Figura 4-41: secondo tratto in galleria

Successivamente si è passati in OpenRoads Designer; questo software fa parte della famiglia Bentley ed è un programma incentrato sulla costruzione delle infrastrutture in modo dettagliato. Il software possiede delle caratteristiche all'avanguardia per quanto

riguarda l'ambito delle infrastrutture; crea il terreno a partire da diverse opzioni (mesh 3D, curve di livello, punti di rilievo) e permette di creare un progetto che può essere condiviso dall'intero team progettuale.

Per poter utilizzare il seguente software è stato necessario esportare dei file, tra cui alcuni fondamentali:

- Microstation (.dgn);
- Alignment (.alg);
- Terrain (.tin).

Si procede con l'importazione dei dati iniziando dall'importazione del terreno di cui si può vedere la modellazione in 3D, passaggio fondamentale per poter realizzare il tracciato:

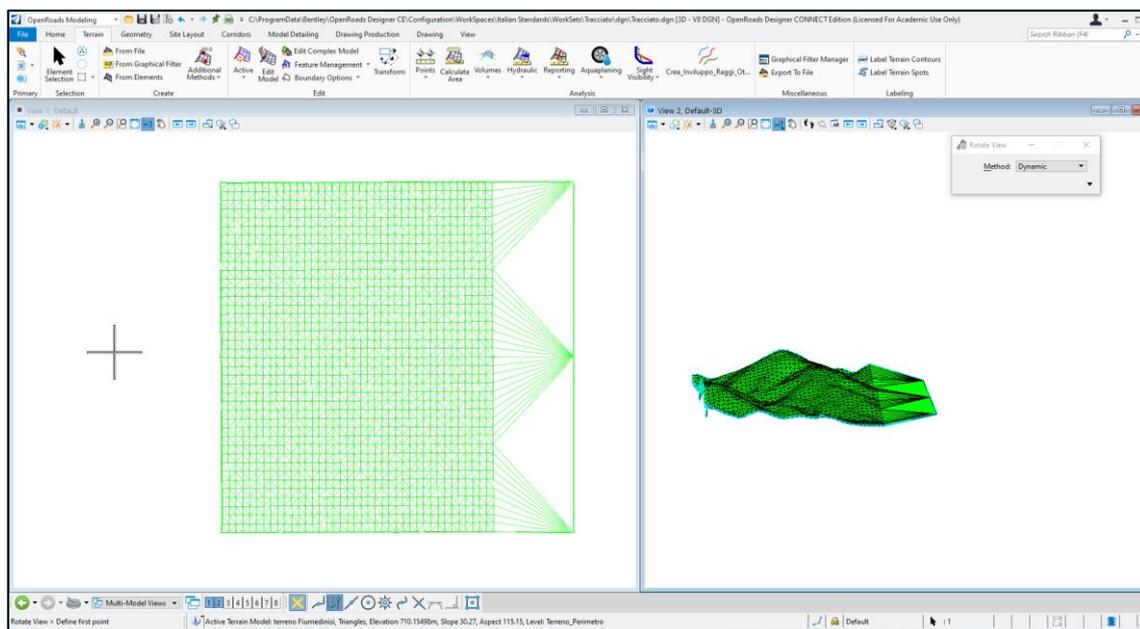


Figura 4-42: terreno DTM in OpenRoads Designer

Successivamente sono state importate anche le mesh poligonali e il tracciato geometrico che è stato importato come una geometria senza alcuna proprietà; dopo aver creato il tracciato planimetrico è stato creato il "Corridor" scegliendo la sezione "F2" per far sì che venga rispettato il D.M. 05/11/2001:

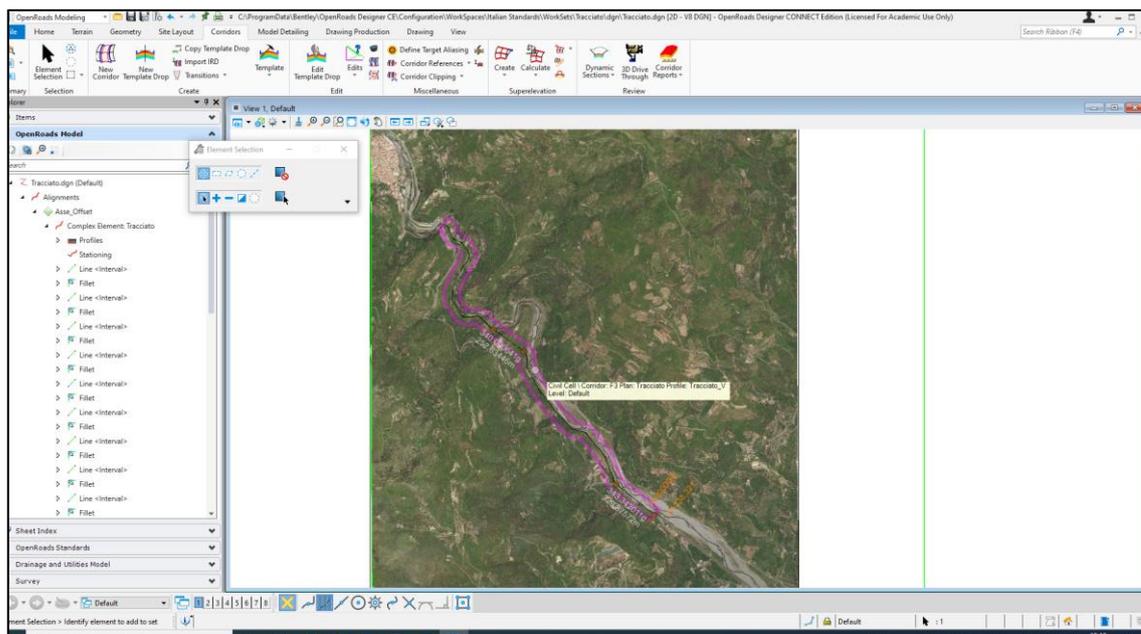


Figura 4-43: "Corridor" in OpenRoads Designer

Anche il tracciato altimetrico è stato progettato con l'utilizzo di livellette e di raccordi tali da rispettare la Normativa.

Con la progettazione del tracciato planimetrico e del tracciato altimetrico è stato effettuato il controllo plano-altimetrico.

Dopo aver importato il terreno e il tracciato è possibile prendere visione delle sezioni trasversali che si hanno lungo il tracciato, procedendo così al calcolo della sopraelevazione dei cigli stradali per ottenere la rotazione della pavimentazione in base al tracciato:

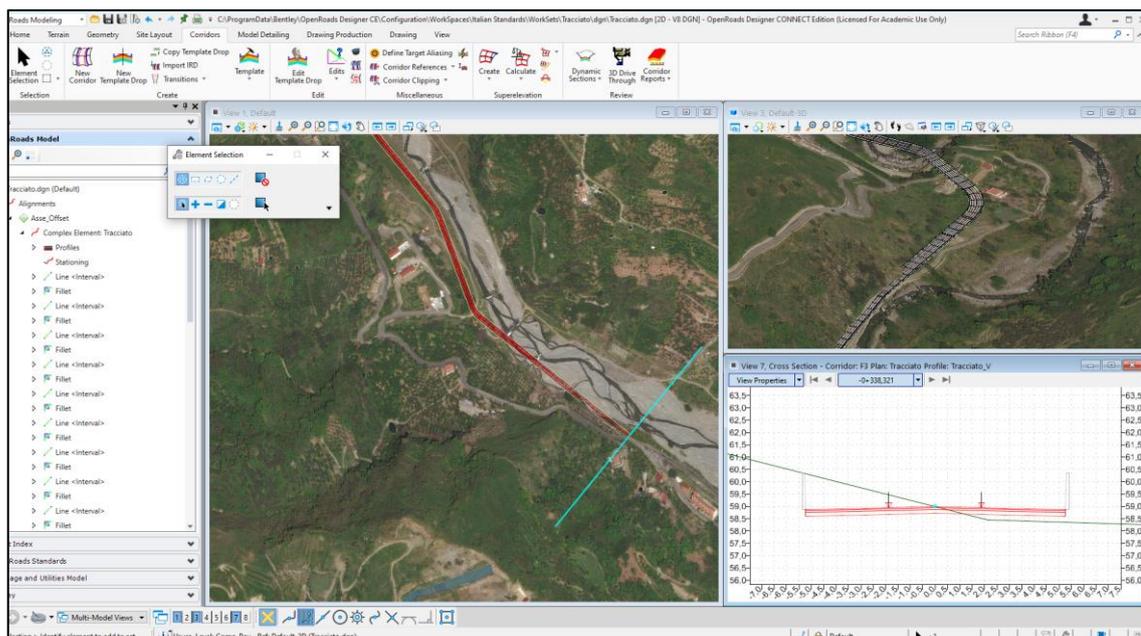
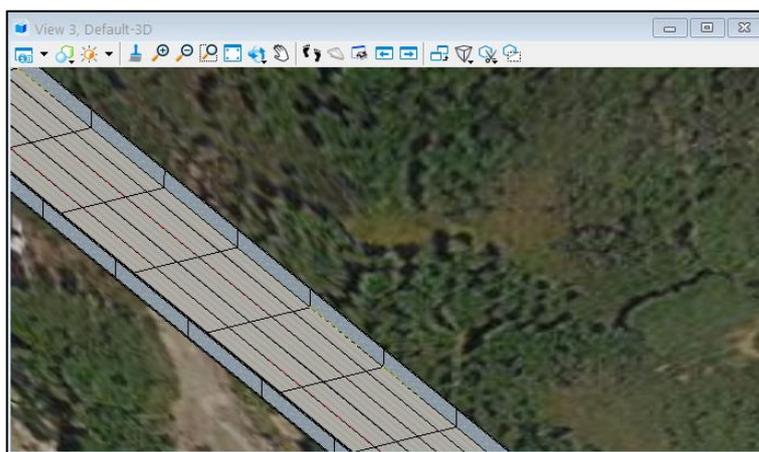


Figura 4-44: Sezioni trasversali in OpenRoads Designer



Il software possiede un Template Editor in cui è possibile configurare la sezione con le componenti che si vogliono aggiungere, queste si adattano al tracciato, sia nei punti in cui si ha rilevato sia dove si ha trincea.

Si effettuano nuovamente tutte le verifiche relative al diagramma della velocità, alla distanza di visibilità e al coordinamento plano-altimetrico, verifiche già viste nella modellazione con CivilDesign.

Anche il seguente tracciato è stato esportato in un file .IFC e successivamente caricato nel software “BIMVision”:

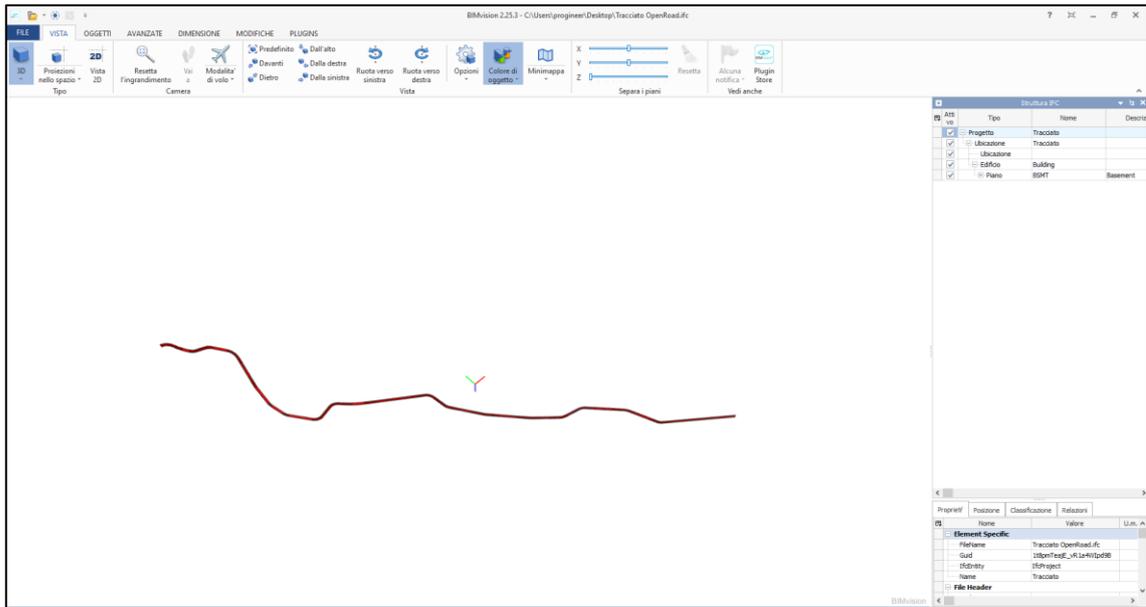
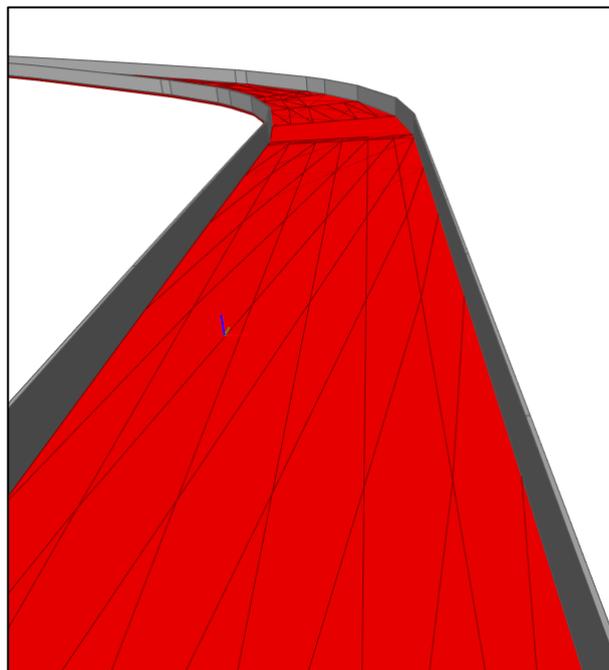


Figura 4-45: visualizzazione file IFC



5. Conclusioni

Attraverso il software CivilDesign 13.0 è stato possibile ottenere la creazione del tracciato stradale. Questo software, seppure molto delicato nell'utilizzo, ha permesso di creare il profilo altimetrico, le sezioni trasversali, visualizzare, controllare e modificare il

tutto in modo piuttosto semplice. Dopo aver effettuato tutte le verifiche è stato generato il modello per poi classifica e definire gli oggetti 3D in modo intelligente che ha permesso l'esportazione di un file IFC.

La conoscenza posseduta riguardava la parte teorica, ciò che riguardava la Normativa, ed è stato fondamentale per interpretare il metodo di lavoro del software, per capire le limitazioni che manifestava quando qualcosa non rispettava la Normativa vigente.

Alla fine del lavoro eseguito è stato raggiunto ciò che era stato prefissato, ovvero progettare un tracciato stradale che fosse il più possibile simile a quello esistente. I tentativi e il tempo speso per fare questo è stato molto, ma la possibilità che ho avuto nel lavorare con questo tipo di modellazione mi ha permesso di velocizzare i tempi e di capire in modo più chiaro lo schema progettuale.

È stato creato lo stesso tracciato anche con i software OpenRoads per poter mettere a luce le differenze che hanno i due nella modellazione BIM.

La differenza nei due software è stata riscontrata innanzitutto nella facilità di progettazione, OpenRoads rende più facile la modellazione delle sezioni tipo e l'inserimento delle opere d'arte, ma comunque rimane il fatto che serve una buona conoscenza precedente per poterli utilizzare entrambi. Crea immediatamente oggetti 3D a cui poi viene associata una classificazione degli oggetti che permette anche qui l'esportazione del file IFC.

In questo ambito di tesi ho avuto modo di utilizzarli e di imparare nuovi comandi, ma quello che possono offrire è superiore a quelle che sono le aspettative. Come seconda differenza, il software Bentley crea dei formati .dgn mentre CivilDesign crea dei formati .dwg quindi risulta che quest'ultima riesca a scambiare in modo più semplice i file con altri programmi. Rimane comunque il fatto che entrambi permettono l'esportazione di file IFC.

Si sono presentati problemi di facile risoluzione e altri un po' più complicati, questo sempre dovuto alla conoscenza della metodologia.

In conclusione, mi sento di dire che la metodologia BIM applicata alle infrastrutture può migliorare di molto l'iter progettuale portando ad una riduzione dei tempi e ad un

miglioramento della progettazione ed è per questo che è di fondamentale importanza l'implementazione di questi software, a partire dall'ambiente universitario.

6. Bibliografia e sitografia

- [1] G. Accademy, «Corso BIM».
- [2] C. d. c. O. d. BIM. [Online].
- [3] «Ingenio web,» [Online]. Available: <https://www.01building.it/bim/infrabim-infrastrutture/>.
- [4] S. I. Coghe, «BIM per le infrastrutture».
- [5] V. f. i. l. d. m. d. BIM. [Online]. Available: <https://www.01building.it/bim/livelli-maturita-approccio-bim/>.
- [6] L. e. g. d. d. n. p. BIM. [Online]. Available: <https://www.01building.it/bim/lod-progettazione-bim/>.
- [7] V. K. Thomas, «Come implementare con successo il BIM,» [Online].
- [8] «<https://www.digicorpengineering.com/digiweb/>,» [Online].
- [9] D. C. S. O. Michele Agostinacchio, La progettazione delle strade.
- [10] Normativa, *D.M. 05/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade"*.
- [11] M. d. L. Pubblici, *Legge 21 giugno 2004*.
- [12] Normativa, *D.M. 19/04/06 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali"*..
- [13] L. tecnica. [Online]. Available: <https://legislazionetecnica.it/node/1411873>.