



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Metodologia per l'analisi di visibilità delle intersezioni stradali urbane esistenti

Relatori:

Prof. Marco Bassani

Prof. Marco Piras

Ing. Lorenzo Catani

Ing. Nives Grasso

Candidato:

Mouslem Chour 202265

Settembre 2018

Sommario

Ringraziamenti	iii
Abstract	1
Introduzione	2
1 Verifiche di visibilità nelle intersezioni	5
1.1 Tipologie di intersezione.....	5
1.1.1 Intersezioni a raso di tipo lineare	7
1.1.2 Intersezione di tipo lineare a raso con rotatoria	8
1.2 Analisi di visibilità nelle intersezioni.....	8
1.2.1 Distanza di visibilità per l'arresto	8
1.2.2 Visibilità nelle intersezioni lineari	13
1.2.3 Visibilità nelle intersezioni a rotatoria	21
1.3 Analisi bibliografica	25
2 Strumenti e Metodi	27
2.1 Obiettivi dello studio.....	27
2.2 Acquisizione dei punti di riferimento.....	27
2.3 Creazione delle nuvole dei punti tramite fotogrammetria	30
2.3.1 Strumenti usati per l'acquisizione delle immagini	30
2.3.2 Calibrazione delle fotocamere	31
2.3.3 Acquisizione delle immagini	38
2.3.4 Creazione della nuvola dei punti tramite le immagini.....	39
2.4 Acquisizione nuvole punti con laser scanner	43
2.5 Confronto tra nuvole di punti.....	47
2.6 Distanze di visibilità valutate.....	49
2.6.1 Distanza di visibilità disponibile.....	49
2.6.2 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-veicolo.....	50
2.6.3 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-pedone.....	52
2.7 Algoritmo per la valutazione delle distanze di visibilità	53
3 Casi studio	57
3.1 Casi di studio	57
3.2 Le coordinate dei punti di riferimento.....	60
3.3 Nuvola dei punti derivata da laser scanner.....	64

3.3.1	Rotatoria	64
3.3.2	Intersezione	69
3.4	Modelli 3D derivati da immagini	72
3.4.1	Modello con immagini "WIDE ANGLE"	72
3.4.2	Rotatoria	73
3.4.3	Intersezione	78
3.5	Confronto tra le nuvole considerate	84
3.5.1	Rotatoria	84
3.5.2	Intersezione	91
3.6	Creazione della mesh	93
3.7	Formazione del DSM.....	100
4	Analisi di visibilità	104
4.1	Determinazione delle traiettorie del veicolo.....	104
4.2	Rotatoria	106
4.2.1	Valutazione della distanza di visibilità disponibile (ASD)	107
4.2.2	Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-veicolo.....	118
4.2.3	Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-pedone.....	125
4.3	Intersezione.....	135
4.3.1	Distanza di visibilità disponibile per la traiettoria 4.....	135
4.3.2	Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-veicolo.....	138
4.3.3	Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-pedone.....	141
5	Conclusioni.....	144
	Bibliografia	146
	Allegato 1	148
	Allegato 2	149

Ringraziamenti

Nonostante le difficoltà affrontate nello stilare questa tesi, credo che scrivere queste linee sia la cosa più difficile. Questo lavoro è il frutto di un lungo percorso e vorrei ringraziare me stesso per non aver mai mollato, anche quando le difficoltà sembravano invalicabili. Tante volte ho pensato di non potercela fare e che le cose non vanno mai come desideriamo. E invece sì, ce l'ho fatta!

Un grande ringraziamento particolare va a mia madre e mio padre che, con il loro dolce e instancabile sostegno, sia morale che economico, mi hanno permesso di arrivare fin qui oggi. Grazie alle mie sorelle e miei fratelli Farah, Hussein, Hassan, Mariam, Malak, Rihab, e Rim e alle loro rispettive mogli e mariti, e ai loro stupendi figli, che nonostante migliaia di chilometri di distanza che ci separavano, mi sono stati sempre e comunque vicini con il loro affetto e il loro indeterminato sostegno. Un grazie speciale a mia sorella Faten e alla sua famiglia, che sono stati durante questi anni il mio rifugio fondamentale quando avevo bisogno di sentirmi in famiglia.

Un ringraziamento particolare va ai miei relatori, i professori Marco Bassani e Marco Piras, e gli ingegneri Lorenzo Catani e Nives Grasso per i loro preziosi consigli e le loro disponibilità e pazienza. Mi avete fornito tutti gli strumenti di cui avevo bisogno per intraprendere la strada giusta e portare a compimento la mia tesi.

Ringrazio Michele per tutto il suo sostegno e supporto. Sei stato fondamentale per arrivare a questo traguardo.

Ai ragazzi del settimo, un grande ringraziamento per tutto il vostro supporto, per i caffè presi insieme e le interminabili partite di briscola, per le notti trascorse davanti ai computer e per tutte le risate. Grazie per avermi fatto sentire a casa. In particolare un grazie speciale ad Antonio e ai suoi discorsi, Arianna e la sua immensa creatività e disponibilità, a Lea, ai suoi consigli ed il suo abbraccio quando ho sostenuto il mio ultimo esame e a Sharon al suo spirito e la sua allegria.

Ringrazio tutti amici, coinquilini, colleghi, e persone che mi hanno accompagnato durante questo percorso.

Abstract

Questo lavoro di tesi tratta il tema dell'analisi di visibilità nelle intersezioni stradali urbane. Nell'ambito della progettazione delle infrastrutture stradali, l'analisi di visibilità è lo strumento attraverso il quale si verifica l'esistenza di spazi sufficienti all'esecuzione di manovre di guida fondamentali per la sicurezza degli utenti della strada, anche e soprattutto per quelli più vulnerabili come pedoni e ciclisti (essi sono indicati nella letteratura tecnica di settore con il termine "vulnerable road users").

Per le strade di nuovo impianto, le normative vigenti impongono l'obbligatorietà dell'analisi di visibilità, ciò per garantire, già all'atto della costruzione, una corretta interazione spaziale tra i diversi utenti. Questa tesi affronta nello specifico il tema della misura della distanza di visuale libera intesa come la lunghezza della porzione di traiettoria che il guidatore vede di fronte a sé. Essa, se confrontata con la distanza necessaria per l'esecuzione delle manovre anzidette, permette di verificare se sussistano spazi di visuale sufficienti ad arrestare il veicolo di fronte a potenziali ostacoli (es. altri veicoli, altri utenti), evitando per quanto possibile la collisione e gli effetti negativi che ne derivano.

Il fatto che al momento non esista alcuna norma tecnica che imponga una verifica di visibilità per le strade esistenti, rende questo tema aperto e suscettibile di proposte ma anche di interpretazioni. La metodologia messa a punto in questa tesi prevede: (a) l'acquisizione di dati geospaziali di linee e punti appartenenti la superficie che identifica lo spazio stradale, (b) la successiva ricostruzione di un modello tridimensionale metricamente corretto del medesimo spazio. Dall'analisi del modello 3D è possibile condurre le stime di distanza tra punto di osservazione e punto osservato che conducono alla misura della visuale libera. L'operazione, se ripetuta lungo le diverse traiettorie che si presume siano percorse dai vari utenti in auto, in bici o semplicemente a piedi, permette di avere una valutazione distribuita di tale grandezza che, come illustrato in questo documento di tesi, costituisce una misura fondamentale per la valutazione della sicurezza intrinseca di una strada.

In questa tesi, la metodologia è stata applicata a due casi studio. A partire da dati spaziali raccolti sia attraverso il laser scanner, sia per mezzo di immagini fotografiche ricomposte mediante tecnica fotogrammetrica, sono stati ricostruiti diversi modelli tridimensionali di due intersezioni urbane, una lineare e l'altra a rotatoria. Un primo confronto tra i modelli ricostruiti ha messo in evidenza il grado di similitudine tra le due tecniche di ripresa dell'ambiente stradale. I modelli 3D ricostruiti attraverso le due tecniche sono stati successivamente riportati in ambiente GIS, ambiente adatto allo studio delle traiettorie dei punti di osservazione e le posizioni dei punti osservati. I più lontani punti osservati dalle diverse posizioni di osservazione forniscono la misura della distanza di visuale libera.

Introduzione

Le indagini svolte dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) nel 2015 [1] rivelano che il 74,9% degli incidenti stradali hanno avuto luogo nelle strade urbane, il 19,8% nelle Autostrade e il 5,3% nelle strade extraurbane. L'alta percentuale di incidenti nelle strade urbane causa un numero di feriti e di morti pari, rispettivamente, al 71% e al 43,7% del totale delle persone coinvolte in incidenti. Tra le cause più frequenti vi sono la guida distratta, seguita dal mancato rispetto delle regole di circolazione e di sicurezza e dalla velocità troppo elevata, che, complessivamente, provocano circa il 40% degli incidenti.

Tali statistiche dimostrano che vi è una continua necessità di eseguire controlli di sicurezza a tutti i livelli, dai progetti in corso di redazione sino alle infrastrutture già esistenti attraverso ispezioni specifiche. Tali controlli sono individuati come "Analisi di Sicurezza" [2], e sono un complesso di attività di tipo preventivo e reattivo, che individuano le situazioni potenzialmente pericolose già a partire dai progetti e che mirano alla rimozione delle cause e all'adozione, se necessario, di adeguate contromisure.

I controlli di sicurezza prevedono tra l'altro che siano eseguite specifiche analisi di visibilità per verificare se il campo visivo del conducente in movimento sia sufficientemente ampio e tale da evitare, in caso di necessità, la collisione con altri veicoli e/o ostacoli presenti sulla sede. Per tale analisi si ricorre all'uso dei software di progettazione stradale che al loro interno possiedono codici applicativi specifici e dedicati a tale tipo di analisi: essi mettono in evidenza i tratti lungo i quali il progetto rispetta o non rispetta le specifiche norme di sicurezza indicate nelle norme tecniche. Nel caso di infrastrutture esistenti, l'utilizzo di tali software è più complesso poiché è necessario ricostruire in modo preciso l'andamento plano-altimetrico del tracciato, ma anche la posizione e la forma di elementi dello spazio stradale che possono ostruire e limitare la visibilità degli utenti.

Tra le diverse tipologie di ostruzione ottica vi sono le attrezzature di arredo e sicurezza (barriere, pali segnali stradali), la vegetazione, le scarpate artificiali e naturali, gli edifici, e più in generale tutte le superfici opache che limitano la visione diretta dei diversi utenti rispetto a potenziali ostacoli che si potrebbero collocare lungo la loro traiettoria di marcia. Questi elementi tuttavia non possono essere ricostruiti in modo fedele nell'ambito dei Digital Terrain Model (DTM) impiegati nei software di progettazione. Questo perché i DTM non possono contenere elementi convessi, ossia elementi intersecabili con una qualunque retta verticale più di una volta. Tale limitazione non permette di modellare molte delle ostruzioni alla visuale, il che si traduce in una modellazione poco fedele della realtà e, conseguentemente, in un'analisi poco accurata della effettiva distanza di visuale libera disponibile per l'utenza.

Per le strade esistenti risulta quindi più conveniente ricorrere ai Geographic Information Systems (GIS), poichè capaci di integrare in un unico ambiente le diverse informazioni e database degli oggetti 3D che caratterizzano lo spazio stradale. I GIS permettono di analizzare un'entità geografica, sia per la sua completa natura geometrica, sia per il suo ricco contenuto informativo. La loro grande capacità di ricevere, analizzare e combinare dati anche da diversi altri sistemi (anche di tipo vettoriale in formati "Computer Aided Design" - CAD), lo rende potenzialmente impiegabile in diverse applicazioni ingegneristiche che riguardano la progettazione e il controllo delle infrastrutture.

L'obiettivo della tesi è di sviluppare una metodologia per studiare le distanze di visibilità nelle intersezioni urbane esistenti. Il metodo utilizzato prevede la realizzazione di un Digital Elevation Model (DEM) a partire da modelli tridimensionali dei singoli elementi formanti lo spazio stradale, che a loro volta definiscono il cosiddetto "Ground Truth", ossia lo stato reale del luogo. Tali modelli tridimensionali sono stati creati usando due diversi sistemi di rilevamento: modelli tridimensionali fotogrammetrici e altri derivati da laser scanner. Lo studio è stato svolto prendendo a riferimento due diverse intersezioni esistenti: una lineare e una rotatoria.

Nel primo capitolo sono illustrate le regole per l'esecuzione dell'analisi di visibilità secondo il D.M. 19/04/06 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali" e, a titolo di confronto con altre norme internazionali, è stato eseguito un raffronto con le norme tecniche australiane. Nel capitolo sono definite le distanze di visibilità da garantire lungo i tronchi e le intersezioni, e sono definite le tipologie di intersezione a raso che saranno considerate come casi studio. Il capitolo affronta inoltre il problema di visibilità nelle intersezioni a incrocio e nelle rotatorie.

Nel secondo capitolo sono introdotti gli obiettivi specifici dello studio e gli strumenti e i metodi utilizzati per perseguirli. Sono descritti gli strumenti impiegati nel rilievo topografico per l'acquisizione delle informazioni geospaziali dei punti caratterizzanti lo spazio stradale: il laser scanner, per il rilievo diretto dei punti, e le macchine fotografiche per l'acquisizione delle immagini da cui sono poi stati determinati altri punti della superficie con tecnica di restituzione fotogrammetrica. Il manoscritto riporta la descrizione delle metodologie di rilievo, di elaborazione dei dati, di formazione dei modelli tridimensionali. Nello specifico, sono stati impiegati: (a) il software Scene per derivare le nuvole di punti dalle scansioni laser, (b) il software Photoscan per derivare le nuvole di punti dalle immagini terrestri, (c) il software Cloud Compare per verificare la corrispondenza delle due nuvole di punti, il software ArcGIS per la misura delle distanze di visibilità attraverso lo sviluppo con codice Python di un algoritmo dedicato.

Nel terzo capitolo sono presentati i casi studio: (a) la rotatoria e (b) l'intersezione a raso. Sono descritti i luoghi in cui sono stati eseguiti i rilievi, i risultati dell'elaborazione dei dati come nuvole di punti da scansioni laser e da immagini terrestri. Sono riportati inoltre i risultati del confronto tra i modelli 3D creati a partire dalle due sorgenti di dati mediante il software Cloud Compare. Infine, è descritta la procedura impiegata per la formazione dei due modelli digitali della superficie (Digital Surface Models – DSM) dei due luoghi di studio.

Nel quarto capitolo è descritta la procedura per la rappresentazione delle traiettorie dei veicoli e degli attraversamenti pedonali in ogni caso studio. Sono stati identificati i punti di conflitto tra veicoli e tra veicolo e pedone. Sono state definite le traiettorie su cui stimare le distanze di visibilità disponibili (available sight distance – ASD) per i due casi studio. Per ogni traiettoria i valori di ASD sono stati

sintetizzati in funzione dell'ascissa curvilinea della traiettoria. L'analisi ha riguardato tanto i conflitti veicolo-veicoli, quanto quelli veicolo-pedone e veicolo-ciclista.

1 Verifiche di visibilità nelle intersezioni

Le intersezioni sono un elemento fondamentale delle reti stradali poichè permettono agli utenti di esercitare le scelte di svolta che permettono di seguire l'itinerario programmato. Per un'interazione sicura tra gli utenti è necessario che durante l'avvicinamento ai punti di conflitto essi siano in grado di vedersi reciprocamente per permettere loro di adeguare la velocità, e fornire il tempo necessario di adeguarsi alle regole di precedenza in base alla manovra che devono eseguire [2].

1.1 Tipologie di intersezione

L'intersezione stradale è l'area in cui si realizza l'incrocio di tre o più tronchi stradali, detti rami o bracci [2]. Esistono diversi tipi di intersezione:

- **a raso**, quando disposte su un unico piano; si suddividono in intersezioni lineari e a rotatoria, e si possono ulteriormente distinguere a seconda del numero di strade che vi convergono (a tre, a quattro o più rami); le manovre di incrocio, immissione, emissione e svolta delle correnti di traffico sono stabilite nel rispetto di precise regole di precedenza dell'una o dell'altra corrente;
- **a livelli sfalsati**, quando i tronchi principali si incrociano su livelli diversi; un complesso di rampe e aree di intersezione a raso consentono il passaggio da un livello ad un altro; gli svincoli costituiscono una particolare tipologia di questo genere di intersezione: in essi è esclusa la possibilità che le diverse correnti di traffico si possano incrociare; questa tipologia è obbligatoria per tutte quelle strade caratterizzate da flussi veicolari elevati e/o veloci tali da non rendere prudente l'incrocio delle correnti di traffico principali.

Le intersezioni sono classificate in quattro ordini gerarchici secondo le regole stabilite per i tronchi. Le norme italiane stabiliscono otto classi diverse (quattro urbane e quattro extraurbane). La matrice 8 x 8 di Figura 1.2 individua tutte le classi e definisce le regole di associazione tra tipologia e categoria [2].

Il deflusso dei veicoli nelle intersezioni a raso può essere regolato mediante regole di precedenza (a destra nelle intersezioni libere, con priorità di una corrente sull'altra in presenza di segnali quali lo "stop" o di "precedenza"), o con impianti semaforici.

Nelle intersezioni a raso si verificano una o più interferenze fra le correnti di traffico. Esse rappresentano potenziali punti di conflitto (Figura 1.2) tra i veicoli. La numerosità e la tipologia di interferenza dipendono dal numero di rami confluenti nell'intersezione e dalla tipologia stessa di

intersezione. I punti di conflitto si distinguono in: punti di conflitto di attraversamento, di diversione e di immissione.

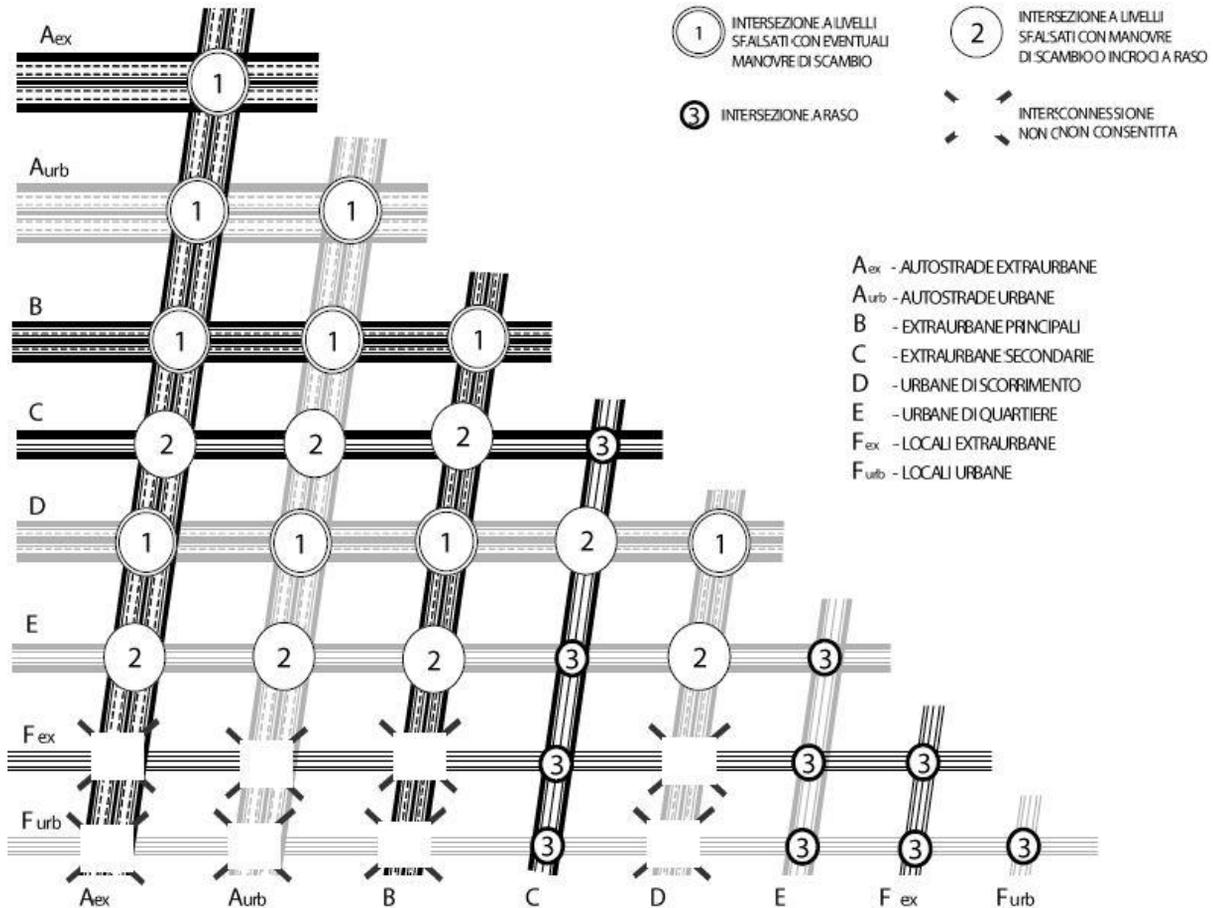


Figura 1.1 Organizzazione della rete stradale e tipologie di intersezioni ammesse

Al fine di svolgere efficacemente la loro funzione le intersezioni devono consentire agli utenti di riconoscere l'itinerario programmato e compiere in sicurezza le scelte circa la direzione da seguire. Lo schema dell'intersezione deve risultare congruente con le caratteristiche della strada e dei flussi che vi convergono. Ogni corrente in entrata o in uscita si distribuisce in una corrente diretta e in una o più correnti di svolta. Le correnti dirette sono considerate principali rispetto a quelle di svolta (indicate quindi come secondarie). Ai fini della sicurezza, la zona di intersezione deve essere visibile da una

determinata distanza tale che si possano prendere le opportune decisioni in merito alla velocità di attraversamento e all'eventuale arresto del veicolo.

La Figura 1.2 illustra i punti di conflitto nel caso di intersezione a quattro rami e rotonda. Dalla figura si nota la significativa differenza nel numero di punti di conflitto tra la rotonda (4 punti) e l'intersezione lineare (16 punti).

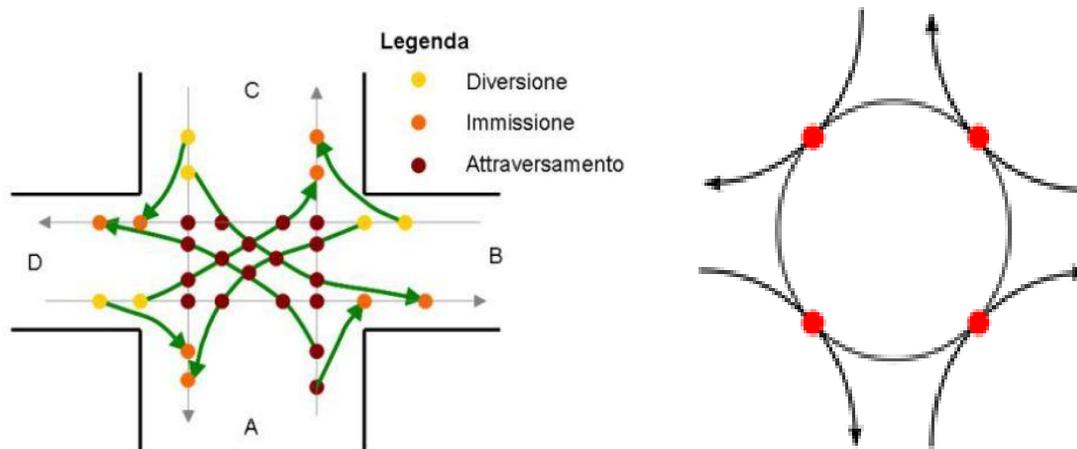


Figura 1.2 Punti di conflitto di una intersezione lineare a quattro rami e una rotonda

1.1.1 Intersezioni a raso di tipo lineare

L'intersezione a raso è un semplice incrocio fra due o più strade. Per una corretta progettazione delle intersezioni è necessario che siano verificate alcune condizioni:

- devono essere rispettate le condizioni plano-altimetriche degli assi confluenti, realizzando le intersezioni in corrispondenza di tronchi stradali rettilinei o in tratti curvilinei, nel rispetto delle distanze minime di visibilità; in più gli assi delle strade convergenti non devono formare angoli inferiori a 70° ;
- per l'interferenza con nodi adiacenti, è necessario considerare, nel calcolo della distanza minima, la segnaletica di preavviso.

Il numero ottimale di bracci confluenti in un'intersezione è quattro. Un numero più elevato renderebbe difficile un'immediata comprensione sia per quanto riguarda la direzione da intraprendere, sia per l'orientamento. Inoltre, intersezioni interessate da un volume di traffico elevato, con l'aumentare del numero di bracci imporrebbero lunghi tempi di attraversamento.

I bracci di un'intersezione a raso devono essere regolamentati da una gerarchia di precedenza per mezzo di segnali, o da lanterne semaforiche; la scelta sul sistema di regolazione è tipicamente svolta dal progettista o dal gestore della rete.

Per quanto riguarda invece la disposizione dei bracci nell'intersezione, è da valutare anzitutto l'entità dell'angolo con il quale i segmenti si incontrano. La soluzione maggiormente vantaggiosa sarebbe quella di intersecare i segmenti stradali con un angolo di 90°. Angoli più acuti creano un'area di intersezione più lunga e aumentano il tempo di percorrenza dell'area dell'incrocio e la permanenza dei veicoli in un'area pericolosa; l'angolo retto garantisce, invece, una minimizzazione dell'area dell'incrocio stesso, inoltre migliora le condizioni di visibilità in quanto in un incrocio ad angolo retto si ha una buona visuale in tutte le direzioni, mentre un angolo acuto garantirebbe un'ottima visione da un lato, ma una molto ridotta dal lato opposto.

1.1.2 Intersezione di tipo lineare a raso con rotatoria

Il DM 19/04/2006 individua tre tipologie di rotatorie sulla base della dimensione del diametro del cerchio in cui si possono inscrivere:

- mini-rotatorie con diametro esterno compreso fra i 14 e i 25 metri;
- rotatorie compatte con diametro compreso tra i 25 e i 40 metri;
- rotatorie convenzionali con diametro esterno maggiore di 40 metri.

1.2 Analisi di visibilità nelle intersezioni

L'analisi delle condizioni di visibilità nelle intersezioni stradali è di particolare interesse per la corretta progettazione di queste aree di conflitto e per la loro gestione nel tempo (inserimento di arredo urbano o altri elementi), al fine di fornire al guidatore lo spazio sufficiente per manovrare il veicolo in sicurezza.

Nell'ambito della sicurezza alla guida la visibilità è una caratteristica importante. Le intersezioni stradali devono consentire ai conducenti una visibilità sufficiente per verificare la presenza di veicoli in arrivo sulla strada che si interseca, per decidere quale manovra effettuare e completare la manovra in tutta sicurezza, riducendo al minimo il rischio di collisione con il veicolo che sopraggiunge sull'altra via.

Occorre dunque evitare che elementi, impedimenti progettuali o ambientali (quali alberi, cartelli pubblicitari o vegetazione), possano ostruire la visione dei potenziali veicoli circolanti nell'intersezione.

1.2.1 Distanza di visibilità per l'arresto

Le Norme Italiane [2] suddividono le distanze di visibilità da garantire in tre categorie: (a) distanza di visibilità per l'arresto, (b) per il sorpasso, e (c) per la manovra di cambio corsia.

Per ogni categoria di strada, è necessario eseguire un tipo di verifiche. Le distanze di visibilità per l'arresto devono essere verificate per qualsiasi tipo di strada anche nel caso di intersezioni. Tale distanza è lo spazio minimo necessario affinché il conducente possa arrestare il veicolo in caso di un ostacolo imprevisto.

Tale distanza si calcola tramite la seguente formula:

$$D_A = D_1 + D_2 = \frac{V_0}{3.6} \cdot \tau - \frac{1}{3.6^2} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \left[f_1(V) \pm \frac{1}{100} \right] + \frac{R_a(V)}{m} + r_0(V)} dV \quad (1.1)$$

in cui:

D_1 = spazio di percezione e reazione percorso nel tempo (sempre di percezione e reazione) τ .

D_2 = spazio di frenatura.

V_0 = la velocità del veicolo al momento di frenatura e pari alla velocità di progetto ottenuta dalla diagramma di velocità [km/h].

V_1 = velocità finale del veicolo uguale a 0 nel caso di arresto [km/h].

i = la pendenza longitudinale del tracciato [%].

τ = tempo complessivo di reazione [s].

g = accelerazione di gravità [m/s^2].

R_a = resistenza aerodinamica [N].

m = la massa del veicolo [kg].

f_1 = quota limite del coefficiente di aderenza impegnabile longitudinalmente per la frenatura.

r_0 = resistenza unitaria al rotolamento, trascurabile [N/kg].

La resistenza aerodinamica R_a si calcola tramite la seguente formula 1.2

$$R_a = \frac{1}{2 \cdot 3.6^2} \rho C_x S V^2 \quad [\text{N}] \quad (1.2)$$

In cui :

C_x = il coefficiente aerodinamico

S = la superficie resistente [m^2]

ρ = la massa volumica dell'area in condizioni standard [kg/m^3]

f_1 = questi valori sono riportati nella tabella della tabella 1.1 estratta delle Norme Italiane [2], che dipende della velocità e se la strada è autostrada o no.

Tabella 1.1 Valori limite del coefficiente di aderenza longitudinale

VELOCITA' Km/h	25	40	60	80	100	120	140
f_1 Autostrade	-	-	-	0.44	0.40	0.36	0.34
f_1 Altre Strade	0.45	0.43	0.35	0.30	0.25	0.21	-

Per il tempo complessivo di percezione e reazione (Eq 1.3), si assumano i valori linearmente decrescenti con la velocità da 2,6 s per 20 km/h, a 1,4 s per 140 km/h, in considerazione della attenzione più concentrata alle alte velocità.

$$\tau = (2.8 - 0.01 V) \quad [s] \quad (1.3)$$

In casi particolari, come un'intersezione complessa o difficile da interpretare, tale valore deve essere aumentato di 1 s nel caso in cui questa situazione si verifichi in ambito extraurbano e 3 s in ambito urbano. Il DM 2001 fornisce dei grafici (Figure 1.3 e 1.4), che mostrano la distanza di visibilità per l'arresto rispetto alla velocità e la pendenza longitudinale, calcolata rispetto alle formule precedenti, supponendo che le variabili assumano i seguenti valori: C_x è il coefficiente aerodinamico pari a 0.35; S la superficie maestra resistente pari a 2.1 m², ρ la massa volumica dell'aria in condizioni standard pari a 1.15 kg/m³, e infine m la massa del veicolo in kg.

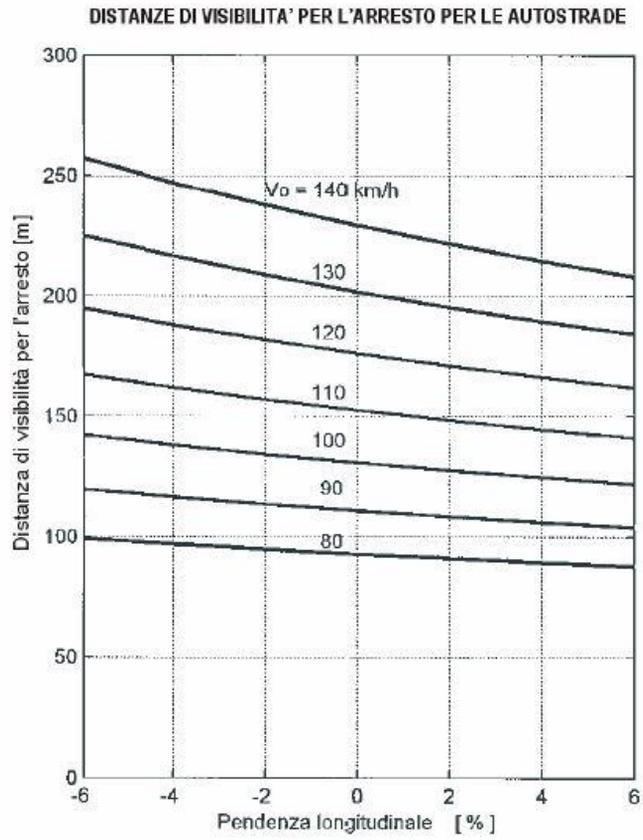


Figura 1.3 Distanza per l'arresto nelle autostrade

PER LE ALTRE STRADE

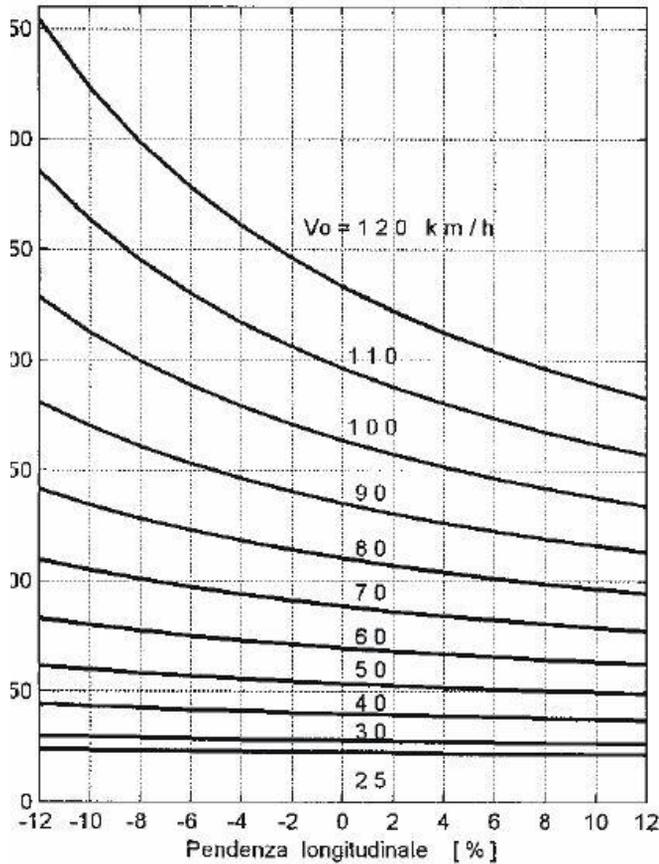


Figura 1.4 Distanza per l'arresto nelle altre strade

Le Norme Australiane del 2002 [21] introducono la distanza di visibilità per l'arresto (Stopping Sight Distance, SSD) come la minima distanza che permette al guidatore di reagire in caso di emergenza e di arrestare il veicolo in sicurezza. Anche per queste norme essa è la somma di due componenti (Eq 1.4): la distanza percorsa durante il tempo di reazione, pari a 2 secondi in ambito urbano, e quella percorsa dal momento della frenata. Si considera l'altezza del guidatore pari a 1.15 metri, mentre quella dell'ostacolo è di 0.2 metri. . Tale distanza ha la stessa definizione sia nelle Norme italiane che in quelle Australiane, ovvero come somma della distanza percorsa nel tempo d'arresto e la distanza di frenatura. La differenza consiste nel calcolo della seconda distanza: secondo le norme Australiane essa dipende solo dalla velocità, dalla pendenza e dal coefficiente di decelerazione, invece, nelle Norme Italiane si calcola aggiungendo a questi ultimi la resistenza aerodinamica, il coefficiente di aderenza, e la resistenza unitaria al rotolamento.

$$SSD = \frac{R_T \cdot V}{3.6} + \frac{V^2}{254 \cdot (d + 0.01a)} \quad [s] \quad (1.4)$$

in cui:

SSD = la distanza d'arresto [m]

d = coefficiente di decelerazione

R_T = tempo di reazione [s]

V = velocità iniziale [Km/h]

a = la pendenza in %

Il coefficiente di decelerazione permette di considerare la riduzione dell'aderenza in caso di superficie stradale bagnata; esso assume un valore massimo quando la velocità è minima, come evidenziato nelle Tabella 1.2, in cui sono riportati i valori della SSD rispetto alla velocità e al tempo di reazione.

Tabella 1.2 Distanza per l'arresto (SSD) secondo le Norme Australiane

Velocità [km/h]	Coefficiente di decelerazione	Distanza di arresto [m]	
		Rt=2.5 s	Rt=2 s
50	0.52		45
60	0.48		65
70	0.45		85
80	0.43	115	105
90	0.41	140	130
100	0.39	170	
110	0.37	210	
120	0.35	250	
130	0.33	300	

1.2.2 Visibilità nelle intersezioni lineari

La Normativa Italiana specifica che, nelle analisi di visibilità, lo sguardo del guidatore è collocato alla quota di 1,10 m da terra. La sua visuale lungo le strade intersecate può essere ostruita da alberi, cartelli pubblicitari o vegetazione bassa e fitta. Per garantire visibilità la norma impone l'esecuzione delle analisi dei triangoli di visibilità (Figura 1.5). Tali triangoli devono risultare sgombri da ostruzioni che devono avere un'altezza inferiore al metro per consentire la visione reciproca dei guidatori.

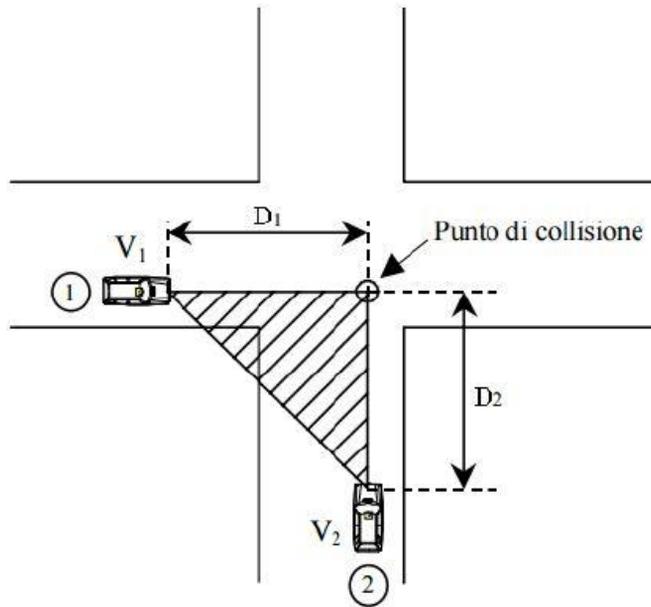


Figura 1.5 Area del triangolo di visibilità

Siano V_1 e V_2 due veicoli con distanza di arresto rispettivamente D_1 e D_2 . Quest'ultima è pari allo spazio minimo necessario affinché un conducente possa arrestare il veicolo in condizioni di sicurezza. Questa grandezza varia da strada a strada in funzione della conformazione della stessa (lunghezza del tratto, ampiezza della curvatura).

L'espressione matematica 1.1 che permette di valutarla tiene conto dei seguenti elementi:

- velocità di riferimento del ramo in questione;
- accelerazione di gravità g ;
- coefficiente di aderenza longitudinale che diminuisce all'aumentare della velocità di marcia;
- pendenza longitudinale del ramo di ingresso che può essere in salita o in discesa e di maggiore interesse psicologico;
- il tempo di reazione complessivo.

In questo processo si distinguono tre tipi di errori:

- errore di percezione;
- errore di decisione: se dopo aver percepito correttamente lo stimolo si erra nel decidere sul da farsi (esempio: in presenza di un ostacolo si deve decidere velocemente se frenare o schivarlo)

- errore di azione: avviene quando, dopo aver percepito correttamente lo stimolo e aver deciso adeguatamente come comportarsi, si pecca nell'azione vera e propria (ad esempio, azionando la frizione al posto del freno).

In situazioni di scarsa visibilità, aumenta la probabilità di incorrere in errori di percezione. La costruzione dei triangoli di visibilità, rappresenta un'ottima soluzione progettuale volta a creare una migliore leggibilità complessiva di un incrocio.

Si sottolinea inoltre che, in base al tipo di regolamentazione dell'intersezione (libera o regolamentata), varia il criterio di costruzione dei triangoli di visibilità.

Nel caso di intersezione libera (Figura 1.6), per la quale la precedenza viene data alla destra senza alcuna corrente privilegiata, la collisione può essere evitata se i veicoli che sopraggiungono, possano reciprocamente vedersi ad una distanza pari a quella di arresto.

Si ricavano così quattro triangoli di visibilità le cui ipotenuse delimitano la zona tratteggiata che deve essere libera da ostacoli.

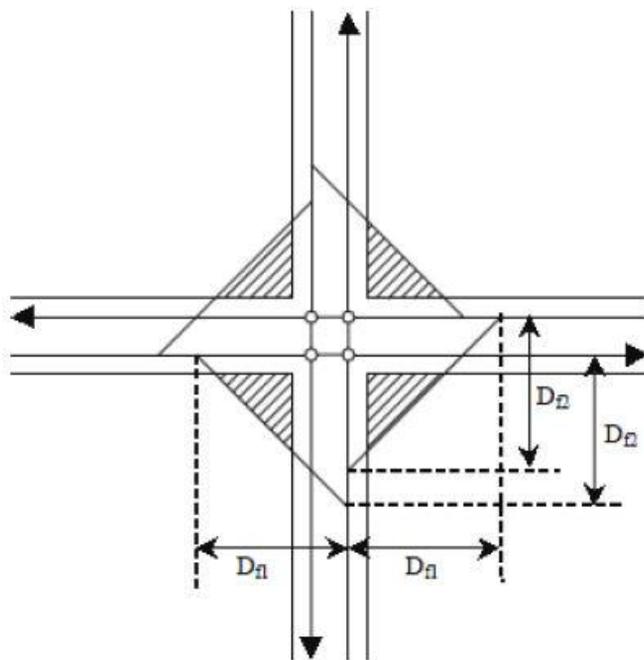


Figura 1.6 Triangolo di visibilità in una intersezione libera

Per l'incrocio regolato con segnali di "precedenza" (Figura 1.7), la zona di visuale libera dovrà essere calcolata supponendo che il guidatore del veicolo che percorre la strada secondaria a bassa velocità, alla distanza di 30 metri dal ciglio della strada, possa vedere sull'asse della strada principale un tratto di lunghezza L .

Questa lunghezza L si ricava in funzione della velocità di riferimento dell'intersezione utilizzando la "curva A" dell'abaco nella Figura 1.9 .

Tale grandezza permette al conducente del veicolo, proveniente dalla strada secondaria, di valutare la possibilità di immissione senza dover ridurre ulteriormente la velocità oppure la necessità di arrestarsi.

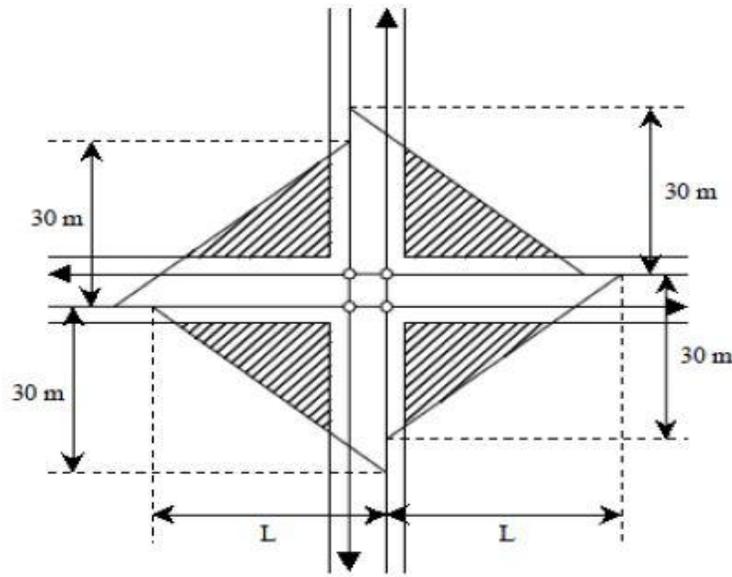


Figura 1.7 Triangolo di visibilità in una intersezione con vincolo di dare la precedenza

Nel caso di strada regolata con il "segnale di stop" (Figura 1.8) occorre assicurare al guidatore del veicolo su strada secondaria la visibilità di un tratto L' dell'asse principale sufficiente a consentirgli, partendo da fermo e da una distanza di 3 metri dal ciglio della strada principale, la manovra di immissione senza causare rallentamenti o altri condizionamenti nella corrente veicolare principale.

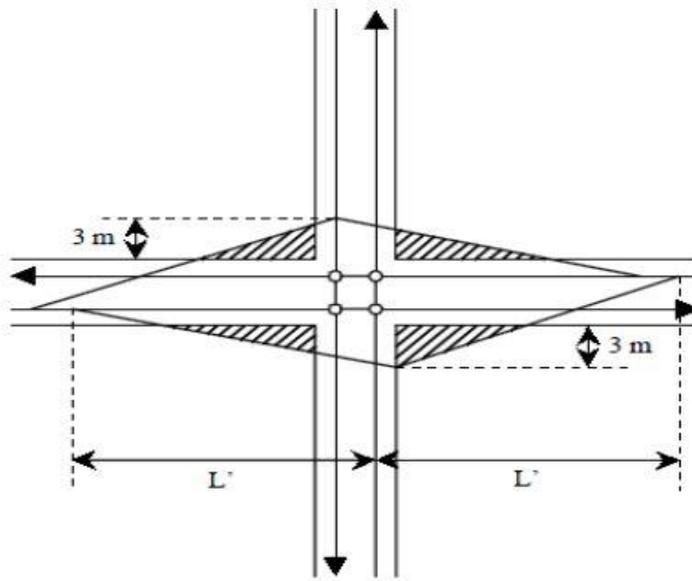


Figura 1.8 Triangolo di visibilità in una intersezione regolata da Stop

La lunghezza L' si ricava in funzione della velocità V di progetto della strada principale dalla curva B dell'abaco nella Figura 1.9 se la strada principale nella zona dell'intersezione è a due corsie, altrimenti dalla curva B' se nella strada principale è presente una corsia dedicata per la svolta a sinistra.

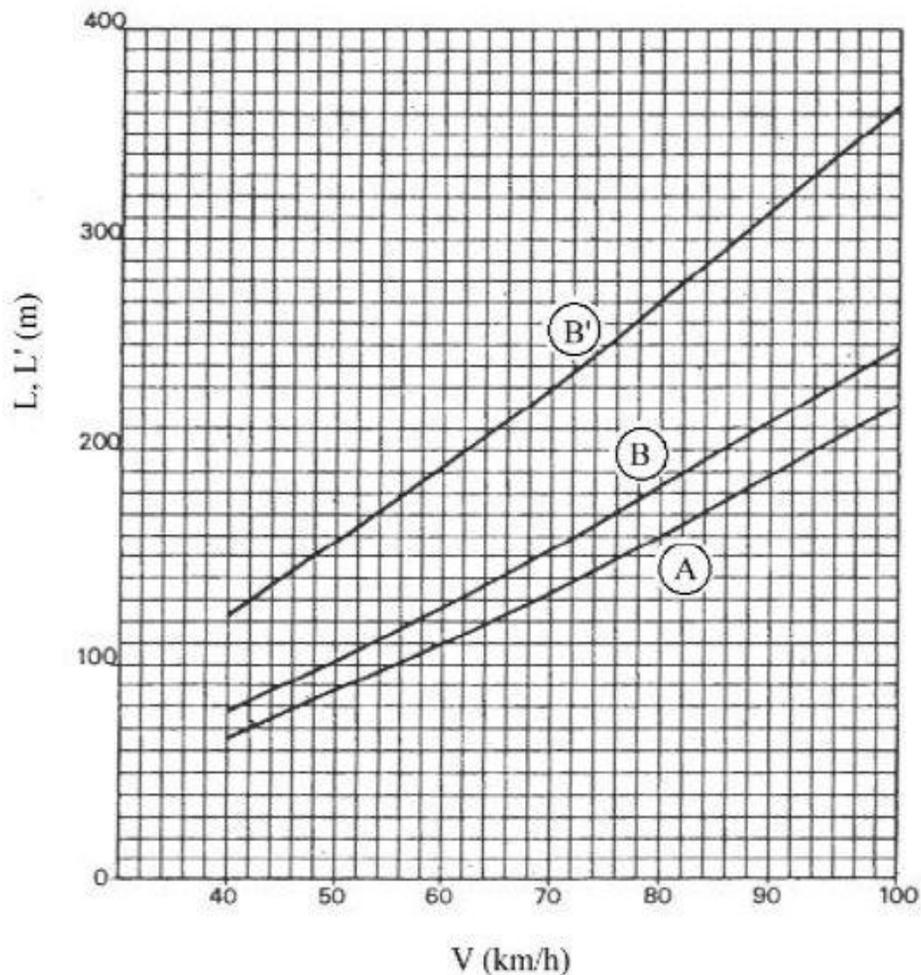


Figura 1.9 Abaco per il calcolo dei triangoli di visibilità

A differenza delle Norme italiane, le Norme Australiane non introducono il concetto di triangoli di visibilità nelle intersezioni lineari rispetto al loro tipo di regolamento, ma definiscono delle distanze di visuale uguali tra loro che devono essere garantite in ogni tipo di intersezione lineari. Le analisi di visibilità nelle intersezioni lineari sono trattate nel Capitolo 13 delle Norme Australiane [21], in cui si considerano due altezze differenti del guidatore: 1.15 metri per automobili e 2.4 metri in caso di camion. In tale caso si definiscono 4 distanze di visibilità da verificare:

- Approach Sight Distance (ASD) (da 1.15 m a 0 m): è la distanza minima che permette al guidatore di vedere la geometria dell'intersezione e la segnaletica stradale in essa presente. Tale distanza è

calcolata analogamente alla SSD; la differenza tra di esse consiste nel considerare l'altezza degli ostacoli pari a 0.2 m, nel caso di SSD, e 0 m, nel caso di Approach Sight Distance .

- Safe Intersection Sight Distance (SISD)(da 1.15m a 1.15m)(eq 1.4) : è la distanza di visibilità minima necessaria affinché, il veicolo che si appresta ad entrare nell'intersezione, avendo la precedenza, possa osservare gli altri veicoli che intersecano la sua traiettoria, da una distanza di 5 m dal ciglio dell'intersezione, garantendo così, il tempo necessario per arrestare il veicolo prima del punto di conflitto. Per calcolare tale distanza si usa la stessa formula del SSD ma al tempo di reazione viene aggiunto il tempo di osservazione. Tale distanza è calcolata tra due punti: il primo rappresenta l'osservatore sul ramo con precedenza e l'altro il veicolo di conflitto, posizionati entrambi ad una altezza pari a 1.15 m (Figura10).

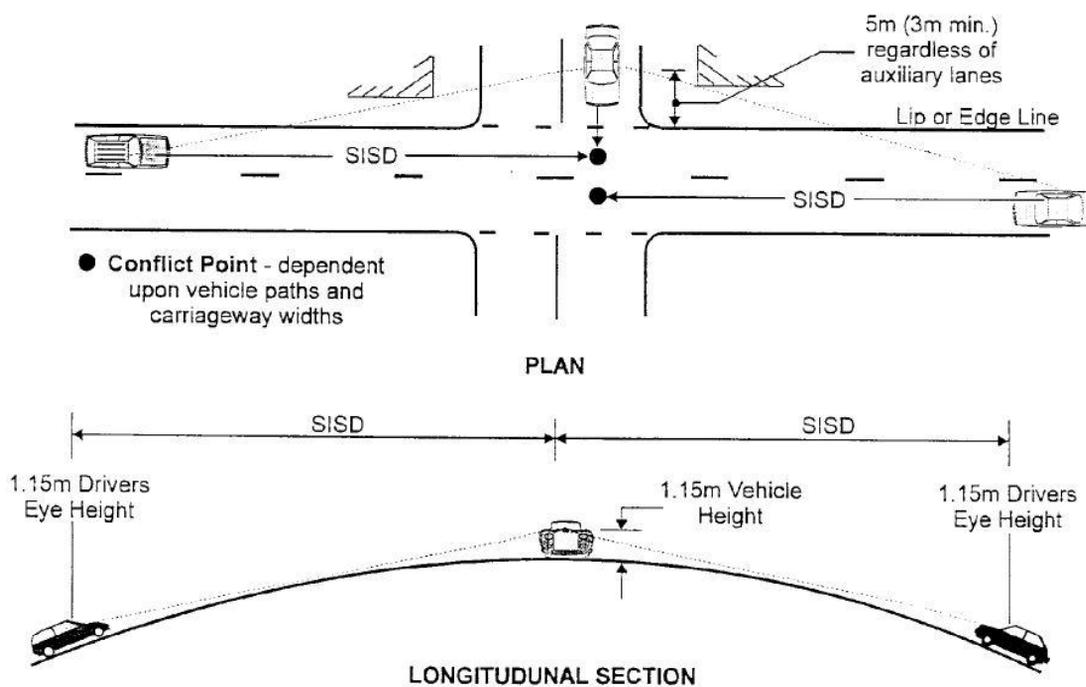


Figura 1.10 Rappresentazione SISD

- Entering Sight Distance (ESD)(da 1.15m a 1.15m): essa è la distanza necessaria per entrare nell'intersezione ed accelerare senza causare un blocco del traffico.

La tabella 1.3, estratta da tali Norme, mostra i valori delle distanze di visibilità ESD, ASD e SISD rispetto alla velocità, al raggio di curvatura e al coefficiente di decelerazione.

Tabella 1.3 Distanze di visibilità per l'intersezione lineare

Velocità di progettazione (km/h)	Decelerazione (g) ⁽¹⁾	Inserimenti della distanza di visualizzazione da 1,15 a 1,15 m (m) ⁽³⁾	ASD – Approccio alla distanza di visibilità (1.15m a 0.0m)				SISD – Distanza di intersezione della vista sicura (1.15m a 1.15m)			
			Minimo assoluto 2.0 $secs$ ⁽⁵⁾		Desiderabile e 2.5 s ⁽⁵⁾		Minimo assoluto 2.0 s ⁽⁵⁾		Desiderabile 2.5 s ⁽⁵⁾	
			m ⁽²⁾	min R ⁽⁴⁾	m ⁽²⁾	min R ⁽⁴⁾	m ⁽²⁾	min R ⁽⁴⁾	m ⁽²⁾	min R ⁽⁴⁾
40	0.56	100	33	500	39	700	66	500	72	600
50	0.52	125	47	1000	54	1300	89	900	96	1000
60	0.48	160	63	1800	71	2200	113	1400	121	1600
70	0.45	220	82	2900	91	3600	140	2200	149	2500
80	0.43	305	103	4600	114	5700	170	3200	181	3600
90	0.41	400	128	7200	140	8600	203	4500	215	5100
100	0.39	500	157	10800	170	12600	240	6300	253	7000
110	0.37	500	190	15700	205	18300	282	8700	297	9600
120	0.35	500	229	22800	245	26100	329	11800	345	13000

1.2.3 Visibilità nelle intersezioni a rotatoria

I guidatori che si apprestano a percorrere una rotatoria devono vedere i veicoli che percorrono l'anello centrale al fine di cedere ad essi la precedenza o eventualmente arrestarsi; sarà sufficiente una visione completamente libera sulla sinistra per un quarto dello sviluppo dell'intero anello, posizionando l'osservatore a 15 metri dalla linea che delimita il bordo esterno dell'anello giratorio.

Una visione completa al disopra dell'isola centrale può indurre i conducenti a diminuire la loro attenzione verso sinistra e a non rispettare la precedenza. Per questo motivo, è opportuno che la vista al disopra dell'isola centrale sia interdetta dalla presenza di piante o di altre attrezzature; è però comunque importante che l'isola centrale non presenti ostacoli alla vista (piante di alto fusto) a meno di 2 metri dal ciglio non sormontabile sagomato che delimita l'isola stessa (in assenza di quest'ultimo, 2,50 metri).

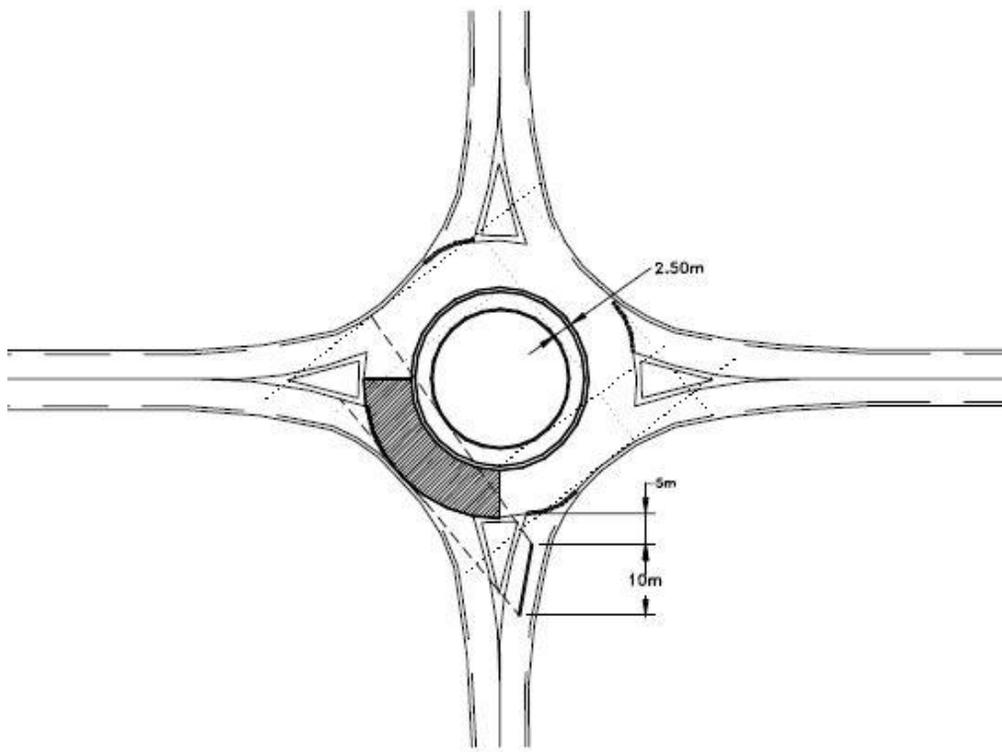


Figura 1.11 Visibilità in una intersezione a rotatoria

Il DM 19/04/2006 illustra le modalità di verifica di questo criterio di visibilità (Figura 1.11) che si possono riassumere nei seguenti passaggi fondamentali.

- si pone il punto di osservazione dell'utente in ingresso ad una distanza di 15 m dalla linea di "dare la precedenza" coincidente con il bordo esterno dell'anello giratorio;
- si fissa la posizione planimetrica del veicolo in immissione sulla mezzeria della corsia di entrata in rotatoria (a una distanza minima di 1,5 m dal bordo laterale della carreggiata);

Con queste ipotesi, la zona di cui è necessaria la visibilità completa, corrisponde al quarto di corona circolare posto alla sinistra del ramo di accesso, con l'aggiunta dell'area posta al di sotto dello stesso, delimitata dalla retta avente le seguenti proprietà: passa per il punto di osservazione, è tangente al cerchio esterno ed interseca il prolungamento del raggio della rotatoria delimitante superiormente il quarto di corona.

Le Norme Australiane, al contrario, stabiliscono tre tipi di verifiche di visibilità nel caso di una intersezione rotatoria, rappresentati nella figura 1.12.

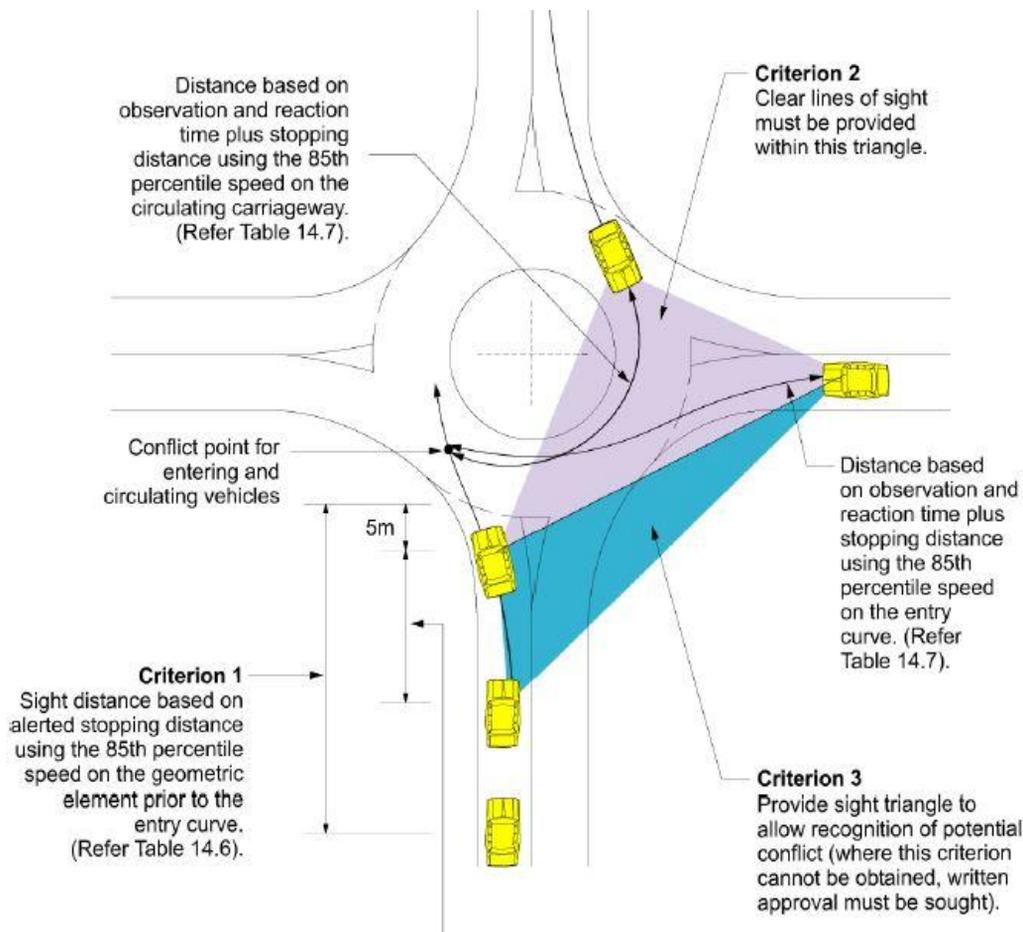


Figura 1.12 Distanze di visibilità in una rotatoria secondo le Norme Australiana

Il primo criterio è Approach Sight Distance che permette al guidatore, dal punto dello Stop ad un'altezza di 1.15 m, di vedere entrambi i lati della rotatoria, la zona centrale e i veicoli che circolano in essa. Tale distanza dipende dalla velocità del veicolo (Tabella 1.4).

Tabella 1.4 Il criterio 1 nel caso della rotatoria

*Velocità (km/h)	#Distanza di Arresta (m)
40	30
50	40
60	60
70	70
80	105
90	130
100	160
110	190
120	230

* Sull'elemento geometrico prima della curva di ingresso.
Misurato da un'altezza dell'occhio di un'autovettura di 1,15 m fino a un'altezza di taglio dell'oggetto di 0 m.

Il secondo criterio ha lo stesso concetto del SISD nel caso di intersezione lineare a raso. Esso garantisce che il guidatore abbia una visibilità non ostacolata per eventuali veicoli che si avvicinano ed entrano nella rotatoria. Tale distanza è data dalla somma di quella percorsa in 4 secondi, (tempo di reazione più tempo di osservazione), e la distanza d'arresto; essa è misurata dal punto di conflitto lungo la traiettoria del veicolo. Se le traiettorie non sono determinate, la distanza si misura 5 m prima dello stop. I valori di tale distanza dipendono anche dalla velocità, come riportato nella Tabella 1.5.

Tabella 1.5 Il criterio 2 nel caso di rotatoria

85thVelocità percentuale (km/h)	Criterio 2 Distanza di visibilità (m)	
	Minimo assoluto: 2,5 secondi di osservazione e tempo di reazione	Minimo auspicabile - 4s Tempo di osservazione e di reazione
20	17	25
30	28	40
40	40	57
50	54	74
60	71	96
70	91	121
80	114	147

Il terzo criterio definisce il campo visivo del guidatore attraverso i triangoli di visibilità, in cui non deve essere presente nessun ostacolo. Essi garantiscono al guidatore in avvicinamento ad un'altezza di 1.15 m, e prima dello Stop, il tempo di fermarsi ed evitare il veicolo (anche ad un'altezza di 1.15 m) già in circolazione nella rotatoria.

1.3 Analisi bibliografica

Fondamentali per tale lavoro di tesi, come punto di partenza, sono state ricerche effettuate in anni precedenti in ambito di analisi di visibilità.

NCHRP Research Report 875[22] stima l'effetto della variazione della ISD sulla frequenza di incidenti. Tale studio introduce il fattore Crash Modification Factors (CMF), il quale indica il cambiamento della sicurezza stradale dopo aver effettuato delle modifiche alla geometria o alla circolazione stradale (limite di velocità). Nella Figura 1.13 è riportato il grafico di variazione del coefficiente di sicurezza rispetto alla distanza di visibilità ad una velocità di 35 mph (56.32 km/h) per diverse AADT (Average Annuale Daily Traffic).

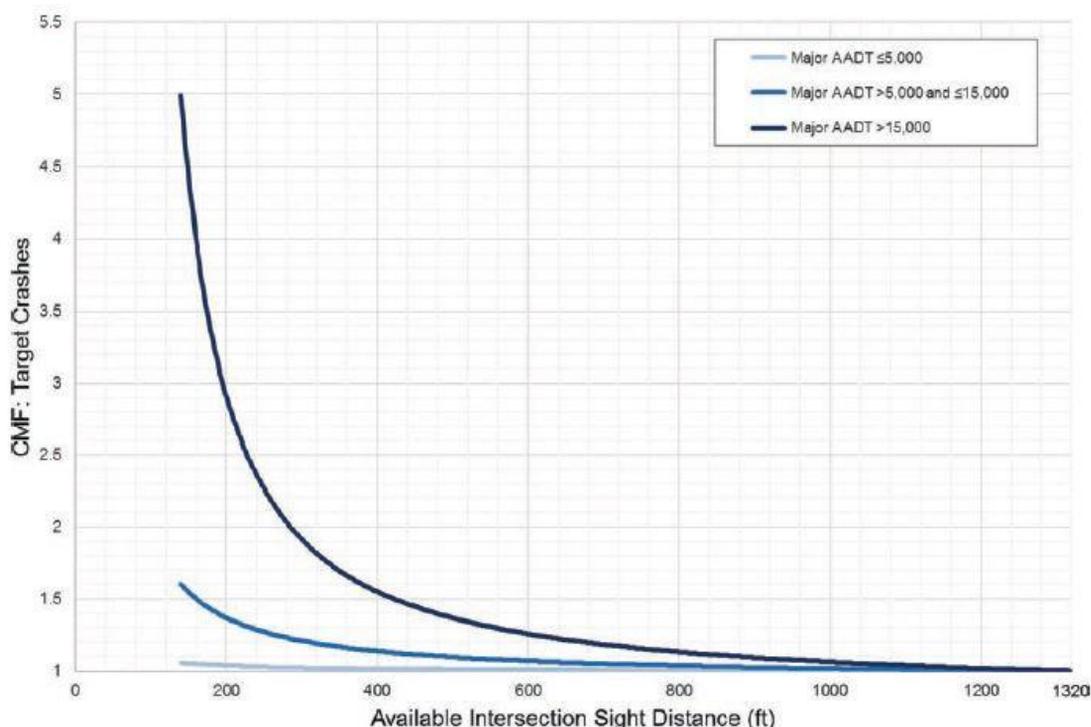


Figura 1.13 CMF rispetto alla ISD a 35mph

Considerando la ISD disponibile e la nuova ISD, si calcola il nuovo fattore CMF. Poiché l'andamento dei grafici è decrescente, aumentando l'ISD, il nuovo CMF sarà minore del precedente. Ciò indica una relazione tra la frequenza di incidenti e la ISD. Da tali risultati si dimostra, infatti, la dipendenza della frequenza di incidenti dalla visibilità: una maggior visibilità comporterà un minor numero di incidenti, viceversa, una scarsa visibilità ne aumenterà il numero.

Recenti ricerche sull'integrazione dei modelli digitali nei software GIS dimostrano come, attraverso tali tool, sia possibile valutare le distanze di visibilità in strade esistenti. GIS consente, tramite il comando "Line Of sight", di creare delle linee tra due punti che rispettano il modello disponibile e di identificare la presenza di ostacoli, qualora essi fossero intersecati. Tale tool è stato utilizzato per determinare le distanze di visibilità, sia in rettilinei (Khattak et al., 2005; Castro et al., 2011; Bassani et al., 2015) che in intersezioni (Jung et al., 2018). Due metodi sono stati introdotti; il primo consiste nel creare dei punti separati da un determinato passo lungo la traiettoria del veicolo, e ricavare le distanze visibili da ogni punto. Invece, il secondo metodo, utilizzato nel caso di intersezioni, ipotizza la geometria del campo visivo del guidatore attraverso dei triangoli, variandone il raggio visivo, l'angolazione e la posizione degli ostacoli.

La qualità del modello digitale utilizzato per rappresentare il terreno e la geometria stradale ha un effetto diretto sulla qualità dei risultati e la loro affidabilità. Due diversi tipi di modelli sono stati usati, DTM (Digital Terrain Model) e DSM (Digital Surface Model). IL DTM rappresenta la superficie del terreno, mentre, il DSM include tutti gli oggetti che sono presenti sulla superficie, quali alberi, edifici e vegetazione che possono rappresentare degli ostacoli per la visione del guidatore. Per costruire il DSM sono stati usati diverse metodologie. (Khattak et al., 2005) hanno proposto l'utilizzo di un lidar, equipaggiato su aereo, per effettuare delle scansioni ed integrarle all'interno del software GIS. (Jung et al., 2018) propone anche l'utilizzo del lidar, ma effettuando delle scansioni di 360° da diversi punti della zona di studio. L'utilizzo del lidar richiede conoscenza tecnica e un costo elevato.

Per raggiungere lo stesso obiettivo, (Bassani et al., 2015) hanno utilizzato un iniziale modello 3D, costruito attraverso il DTM, la mappa tecnica e l'ortofoto. Per migliorare tale modello, gli autori hanno utilizzato uno smartphone per scattare delle immagini, le quali hanno permesso di costruire delle nuvole di punti evidenziando i dettagli non visibili sul modello iniziale, e, successivamente integrate per migliorare il DSM. Da tale lavoro di ricerca, si è potuto constatare che le nuvole di punti derivate dalle immagini fotografiche, anche di bassa qualità, possono essere integrate su DTM per avere un modello che riflette lo stato attuale del caso studio.

Per determinare la posizione del veicolo nel modello, è necessario tracciare delle linee che descrivono le traiettorie del veicolo. Diverse ricerche sono state effettuate allo scopo di elaborare un metodo che calcoli anticipatamente la traiettoria del veicolo. Una ricerca in Giappone (Alhajyaseen et al., 2013) ha determinato le traiettorie nelle intersezioni, registrando dei filmati che vengono elaborati per determinare la posizione del veicolo; da tale ricerca è emerso come il guidatore decida la traiettoria. Secondo l'analisi empirica dei dati, la distribuzione del percorso dei veicoli a svolta a sinistra dipende dall'angolo di intersezione, dal raggio dell'angolo, dal numero di corsie di uscita, dal tipo di veicolo e dalla velocità. Gli autori confermano la complessità della determinazione delle traiettorie e concludono che tale metodo ha delle limitazioni.

La Normativa Australiana è una delle poche normative internazionali che ha proposto metodi per il tracciamento della traiettoria. Basate su diverse ricerche, esse propongono che il guidatore tenda a mantenere una distanza di 1.5 metri dal ciglio della strada in un percorso rettilineo; mentre, lungo una traiettoria curvilinea, esso tenda a massimizzare il raggio per avere una velocità massima di percorrenza.

2 Strumenti e Metodi

2.1 Obiettivi dello studio

L'obiettivo di questa tesi è valutare le distanze di visibilità nelle intersezioni stradali tramite modelli tridimensionali in due diversi tipi di intersezioni urbani: una intersezione lineare e una rotonda. Tali modelli sono stati generati attraverso due diverse metodologie: modelli derivati da immagini fotogrammetriche e altri derivati dalle scansioni effettuate con laser scanner. Per il primo metodo, sono state scattate delle immagini e registrati dei filmati usando due diverse camera digitali, una reflex e un'action cam. Allo scopo di georeferenziare i modelli, sono stati distribuiti sui siti dei rilievi dei punti di riferimento, determinandone le coordinate. Per il secondo metodo, sono state utilizzate le scansioni effettuate con laser scanner, le quali, data la maggior accuratezza, offrono la possibilità di validare il modello derivato da immagini, effettuando un confronto tra i modelli ottenuti attraverso le due metodologie.

Successivamente, tali modelli sono stati importati sul software GIS per creare il DSM delle intersezioni in esame. Per raggiungere l'obiettivo di questo lavoro, sono state tracciate le traiettorie dei veicoli e i percorsi dei pedoni lungo l'attraversamento e valutate tre distanze di visibilità attraverso un algoritmo sviluppato che permette di elaborare le linee di visibilità che collegano un punto di osservazione e un punto osservato, e di verificare la presenza di ostacoli. I risultati sono stati rappresentati in diversi tipi di grafico rispetto alla distanza valutata.

2.2 Acquisizione dei punti di riferimento

Il rilievo topografico consente di utilizzare strumenti specifici: GNSS e stazione totale. Tali strumenti sono stati usati allo scopo di determinare le coordinate dei punti di riferimento (marker) e consentire la georeferenziazione del rilievo.

La determinazione delle coordinate è stata fatta tramite l'integrazione di questi strumenti. Determinato il punto di stazione, si può misurare usando il GNSS le coordinate di questo punto in termini di est, nord e h (ellissoidica). Successivamente, si è posizionata la stazione totale su questo punto e sono state effettuate le misure degli angoli degli altri punti rispetto a quello della stazione. Tali punti sono posizionati su diverse altezze e sono distribuiti in modo tale da poter coprire tutta l'area di interesse in modo da ottenere i dettagli degli elementi importanti. Per determinare la posizione di un punto è

necessario effettuare tre letture: angolo orizzontale (azimutale), angolo verticale (zenitale) e distanza inclinata. Tramite questo metodo è stato effettuato un rilievo indiretto delle coordinate di tutti i marker.

GNSS

Il sistema di posizionamento GNSS (Global Navigation Satellite System) è un sistema di navigazione basato sulla ricezione di segnali radio emessi da una costellazione di satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra. Inizialmente sviluppato come sistema ad uso militare, è stato rapidamente reso disponibile agli utenti civili. GPS (Global Positioning System), sviluppato e mantenuto dal Dipartimento di Difesa degli Stati Uniti, è il sistema GNSS maggiormente diffuso e pienamente operativo. Le costellazioni di satelliti in orbita sono, oltre al sistema statunitense GPS, anche quella russa GLONASS, europea GALILEO e cinese COMPASS/BEIDOU.

I ricevitori per la navigazione satellitare sono utilizzati per svariate applicazioni come il posizionamento, la navigazione ed il monitoraggio. Utilizzare il sistema di posizionamento GPS consente la stima della coordinata (latitudine, longitudine, altezza ellissoidica) con accuratezze da 20 metri ad 1 millimetro;

Il sistema GPS, come qualsiasi altro sistema GNSS, è costituito da 3 segmenti: segmento spaziale: la costellazione satellitare; segmento di controllo: le stazioni a terra che gestiscono il sistema; segmento di utilizzo: utenti del sistema

Il GNSS utilizzato per determinare la posizione dei punti di riferimento è un ricevitore GNSS Leica 1200 (Figura 2.1)[16]. Tale strumento, collegato ad una antenna, fornisce per ogni punto delle coordinate spaziale rispetto ad un sistema di riferimento.



Figura 2.1 Ricevitore GNSS Leica 1200

Stazione Totale

La stazione totale consente di misurare angoli e distanze di una serie di punti e di determinarne l'esatta collocazione spaziale rispetto ad un sistema di coordinate predefinito. Si può posizionare lo strumento topografico in un qualunque punto dotato delle necessarie condizioni di visibilità e impostare un sistema di coordinate locale con l'origine sulla stazione stessa. Il punto sul quale viene messo lo strumento si chiama punto di stazione.



Figura 2.2 Stazione Totale

Lo strumento utilizzato è il Leica TS06, installato su un treppiede mobile (Figura 2.2)[14].

2.3 Creazione delle nuvole dei punti tramite fotogrammetria

2.3.1 Strumenti usati per l'acquisizione delle immagini

Per garantire un confronto tra modelli generati con diverse camera digitali, sono state usate due diverse macchine fotografiche: Nikon D3100x e GarminVirb Elite.

La Nikon D3100 è una fotocamera reflex con un sensore di immagine CMOS , costituito da un circuito integrato e una matrice di pixel. La luce arriva attraverso le lenti dell'obiettivo e viene elaborata dal filtro di colore prima di raggiungere la matrice di pixel. Tale fotocamera genera immagini in formato DX da 14,2 megapixel (Figure 2.3 (a)).



Figura 2.3 Telecamere usate

(a):[Nikon 3100] (b):[Garmin Virb Elite]

La fotocamera Garmin VIRB Elite (Figura 2.3(b)), è una Action Cam da 1080p HD che abbina la registrazione avanzata di video e acquisizione di fotografie alle funzionalità Wi-Fi e GPS avanzate.

Questo dispositivo ha diverse modalità di acquisizione di foto e registrazione di video, tra cui le modalità Ultra Zoom e Wide angle. Si è scelto di utilizzare due fotocamere Garmin, ognuna con una differente modalità, per confrontare i risultati e capire la differenza tra queste due modalità in termine di distorsione. Nelle Figure 2.4, la immagine a destra è stata scattata con la modalità Ultra Zoom, invece, quella a sinistra con la modalità Wide angle. Si può notare che quest'ultima modalità presenta un grave problema di distorsione dell'immagine, in quanto l'oggetto ripreso presenta una deformazione.



Figura 2.4 Immagine scattata con la modalità Wide angle a sinistra e immagine con la modalità ultra zoom a destra

2.3.2 Calibrazione delle fotocamere

Prima di usare le immagini, è fondamentale effettuare una calibrazione delle fotocamere, poiché lo strumento ottico utilizzato potrebbe presentare delle distorsioni dovute alle lenti impiegate [13]. Nessuna lente è perfetta e le lenti economiche usate in molte fotocamere sono ben lontane da essere perfette. Le imperfezioni delle lenti producono distorsioni come l'aberrazione cromatica, l'aberrazione sferica o astigmatismo (variazione della messa a fuoco attraverso la scena), e distorsioni geometriche che provocano uno spostamento del punto proiettato rispetto a dove si dovrebbe trovare.

La distorsione geometrica è generalmente l'effetto più problematico che si può incontrare nelle fotocamere e comprende due componenti: radiale e tangenziale [14].

La distorsione radiale radiale provoca una traslazione dei punti proiettati sul piano dell'immagine, lungo una semiretta radiale che ha origine nel principal point. Essa si verifica in due modi (Figura 2.5):

- **barrel distortion o distorsione a botte** si verifica quando l'ingrandimento della lente diminuisce con l'aumentare della distanza dal punto principale. In presenza di questo effetto, linee rette verticali che si trovano vicino al bordo dell'immagine appariranno curve verso l'esterno.
- **pincushion distortion o distorsione a cuscino** si verifica quando, al contrario, l'ingrandimento aumenta con l'aumentare della distanza dal punto principale e quindi, in presenza di questo effetto, linee rette verticali che si trovano vicino al bordo dell'immagine appariranno curve verso l'interno.

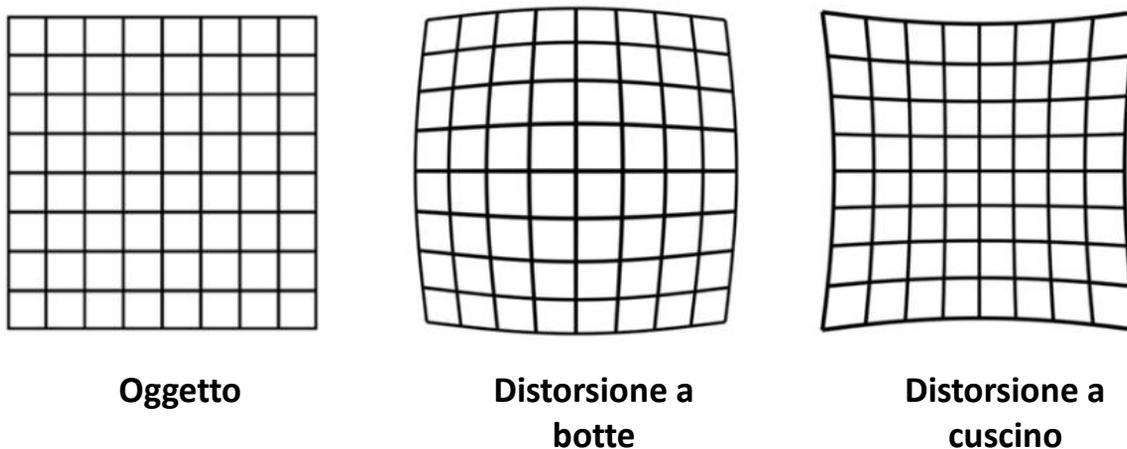


Figura 2.5 Distorsione geometrica radiale

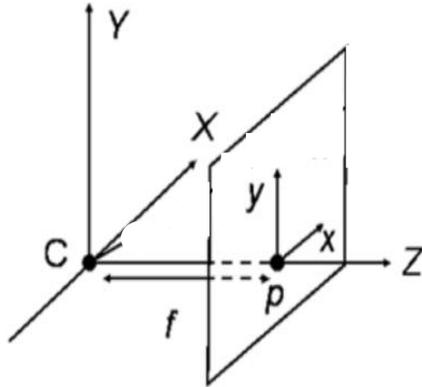
La distorsione tangenziale, o distorsione decentrante, si verifica in direzione ortogonale alla direzione radiale e solitamente è molto bassa.

La calibrazione di una fotocamera è un processo che comporta la stima di un certo numero di parametri intrinseci ed estrinseci di una fotocamera e la distorsione delle lenti. Le tecniche di calibrazione si basano sull'acquisizione, con la fotocamera da calibrare, di punti reali nello spazio le cui coordinate relative spaziali sono note e sull'analisi delle proiezioni di questi punti ottenute nell'immagini acquisite. La calibrazione è utile per eliminare le distorsioni, stimare la distanza tra un oggetto e la fotocamera, misurare le dimensioni di un oggetto nell'immagine o trovare la posizione della fotocamera nello spazio.

- Parametri intrinseci: lunghezza focale (f_x e f_y), punto principale (c_x e c_y), coefficienti di distorsione (Radial Distortion k_1, k_2, k_3 e k_4 e Tangential Distortion: p_1, p_2) [15].
- Parametri estrinseci: la posizione della camera nello spazio rispetto a un oggetto fisso.

La lunghezza focale è misurata tra il centro ottico di una lente ed il punto di focalizzazione dei raggi paralleli entranti (Figura 2.6). Questo parametro mostra la capacità del sistema di convertire e divergere

la luce. La lunghezza focale di un obiettivo ha un errore del 4% sul valore dichiarato dal costruttore. Skew è un coefficiente che suppone che gli assi X e Y non siano ortogonali. Per le fotocamere di ultima generazione non è necessario considerarlo perchè gli assi sono perfettamente ortogonali.



C= Centro ottico
P= Punto principale
f= Lunghezza focale

Figura 2.6 Parametri di calibrazione

La calibrazione di una fotocamera può essere eseguita mediante l'utilizzo di software, come Agisoft Lens, oppure tramite un toolbox di MATLAB. Essi richiedono l'acquisizione di una serie di fotogrammi (almeno 15) di una scacchiera (chessboard) calibrata, ripresa da angolazioni diverse e sfruttando l'intera area di presa del sensore.

Agisoft Lens

Agisoft Lens (Figura 2.7) è un software usato per effettuare la calibrazione delle fotocamere. L'uso di questo software richiede di caricare tra 10 e 20 foto di una scacchiera, premere il tasto di calibrazione.

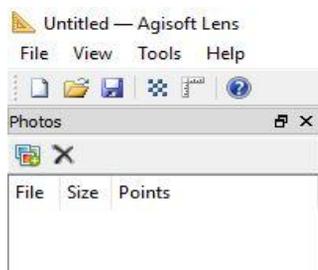


Figura 2.7 Agisoft Lens toolbars

Per ogni fotocamera, si è deciso di effettuare la calibrazione tramite due serie di immagini diverse.

La prima calibrazione è stata effettuata caricando una prima serie di 15 foto della scacchiera del software, una scacchiera esistente nella barra degli strumenti. Questa operazione ha dato i primi valori di calibrazione (Figura 2.8).

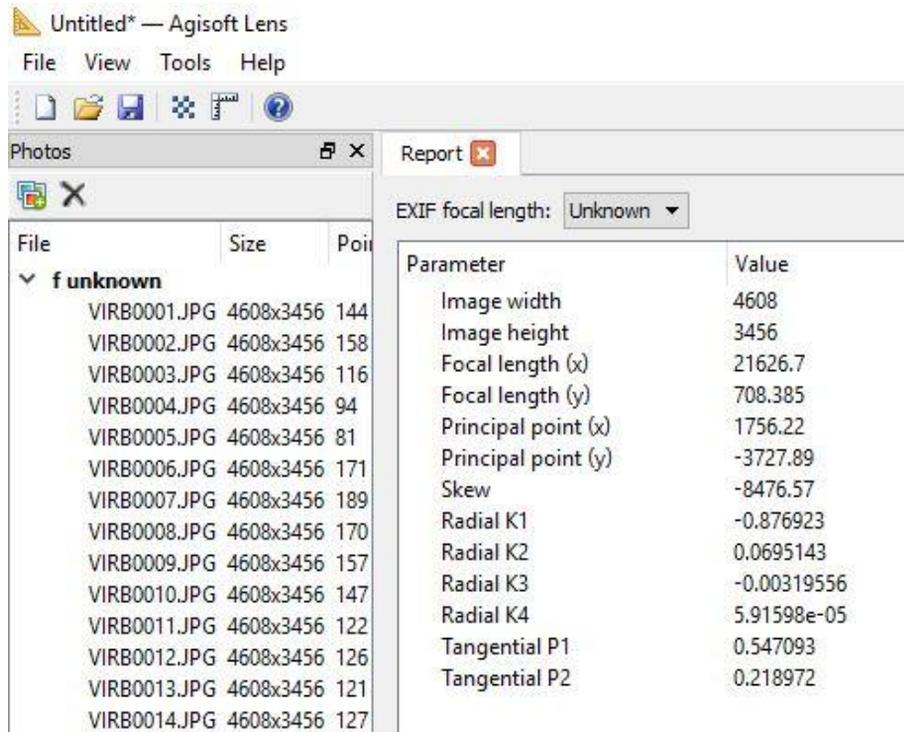


Figura 2.8 La prima calibrazione fatta usando Agisoft Lens

La seconda calibrazione con Agisoft Lens è stata effettuata caricando una seconda serie di immagini della scacchiera composta da quadri con lato pari a 100 mm (il software richiede immissione dei dati in mm) rappresentata nella Figura 2.9.



Figura 2.9 Scacchiera calibrata

Tabella 2.1 Parametri di calibrazione ottenuti con Lens usando due diverse serie di foto

Parametro	Chessboard software	Cheesboard laib
width[pixel]	4608	4608
height[pixel]	3456	3456
fx[pixel]	21626.744418	2331.360469
fy[pixel]	708.384947	2331.523642
cx	1756.221143	2253.369851
cy	-3727.893854	1691.629297
skew	-8476.572090	2.960417
k1	-0.876923	-0.378358
k2	0.069514	0.212092
k3	-0.003196	-0.100210
k4	0.000059	0.037186
p1	0.547093	0.000225
p2	0.218972	-0.000034

La Tabella 2.1 mostra i risultati delle due operazioni di calibrazione. Si può notare una differenza di alcuni parametri. Perciò è stata effettuata la calibrazione usando Matlab, allo scopo di avere una certezza su tutti i parametri.

Matlab

Matlab dispone di un toolbox (Figura 2.10) che consente di determinare i parametri di calibrazione delle fotocamere, chiamato "Camera Calibration".

L'operazione di calibrazione dovrà essere svolta sia sulle fotografie sia sui fotogrammi (frame) poichè sono registrati in formati diversi. All'inizio sono state caricate 31 immagine della scacchiera. Successivamente sono richieste le dimensioni in millimetri dei riquadri della scacchiera dX , dY , pari a 100 mm in questo caso.



Figura 2.10 L'applicazione di calibrazione su Matlab

Sono stati selezionati i 3 coefficienti di distorsione ($K1, K2$ e $K3$), la distorsione tangenziale e il Skew. Dopo aver impostato il programma, Matlab inizia il processo di calibrazione della macchina fotografica e a calcolare i parametri.

Una volta effettuata la calibrazione, è utile analizzare l'errore. Il software è riuscito a distinguere tutti i punti che devono essere identificati per avere una buona calibrazione, e anche tramite un grafico, permette di visualizzare gli errori in pixel delle immagini elaborate (Figura 2.11).

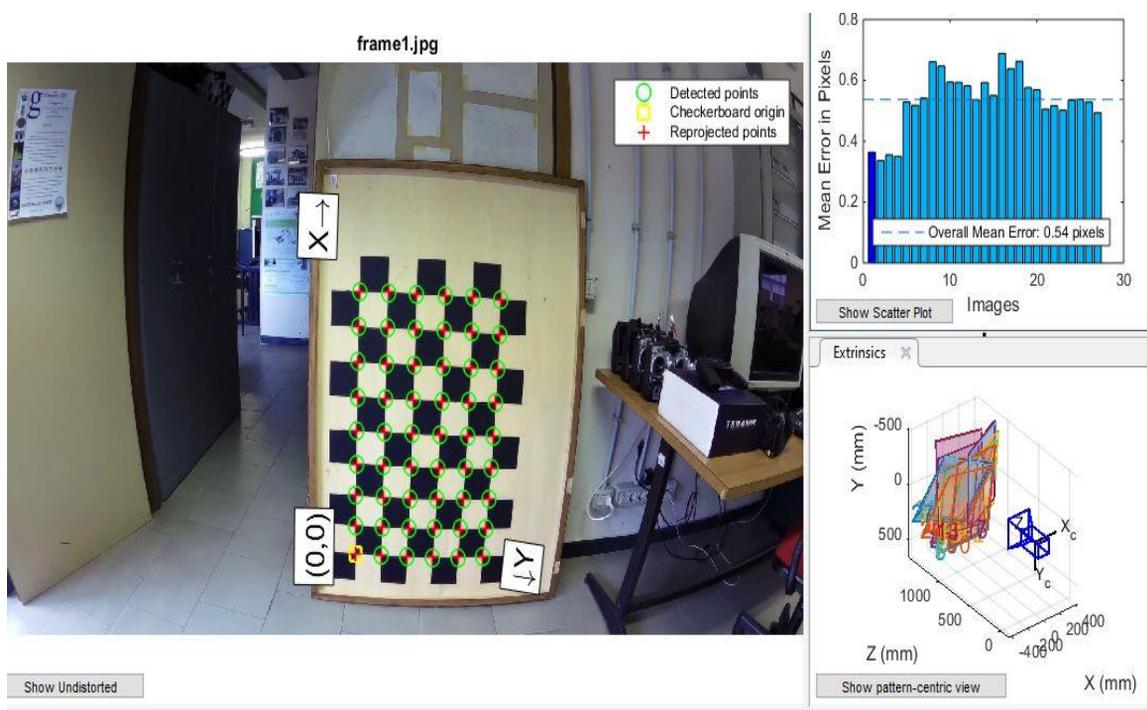


Figura 2.11 Elaborazione della scacchiera, gli errori e i parametri estrinseci

MATLAB permette, inoltre, di visualizzare i parametri estrinseci, ovvero la posizione relativa della scacchiera rispetto alla camera rappresentati in basso nella Figura 2.11. La piramide blu rappresenta il campo di visuale (FOV) effettivo della fotocamera.

Un campo di visuale elevato come quello della Garmin Virb comporta un'elevata distorsione delle immagini, come si può ben notare nella prima immagine della Figura 2.12. Tramite il comando "Undistort image" è possibile rimuovere tale distorsione, come mostrato nella seconda figura.



Figura 2.12 Correzione della distorsione

Per quanto riguarda i frame, questi sono stati estratti dai filmati grazie ad uno script di MATLAB (Allegato A).

La calibrazione è stata effettuata due volte: la prima volta con 31 frames e una seconda tramite 92 frames, da un totale di 987 frame, scelti casualmente in entrambi i casi dallo stesso video. Tale processo ha lo scopo di valutare quanto il numero di frames influenzi i risultati della calibrazione.

I risultati dei diversi processi sono riportati nella Tabella 2.2 seguente. I valori delle lunghezze focale f_x e f_y sono in Pixels.

Tabella 2.2 Parametri di calibrazione ottenuti con Matlab immagini e frames

PARAMETRI	IMMAGINI	VIDEO	
		31 frame	92 frame
width[pixel]	-	-	-
height[pixel]	-	-	-
f_x[pixel]	2363.5000	963.4345	965.2576
f_y[pixel]	2360.9000	960.5202	961.5129
cx	2286.5000	942.0876	937.4656
cy	1733.9000	538.2658	541.1547
skew	0.2895	5.0375	4.3751
k1	-0.3976	-0.3472	-0.3663
k2	0.2561	0.1104	0.2013
k3	-0.1292	0.0455	-0.0955
k4	-	-	-
p1	-0.0028	0.0015	2.96E-04
p2	-0.0009	-0.0017	-0.0011

Come si evince dalla tabella, il numero dei frames estratti dal video non influenzi particolarmente i valori dei risultati ottenuti; infatti essi sono simili tra loro.

La diversità dei risultati ottenuti tramite i frame e quelli ottenuti tramite le foto, è dovuta al fatto che la risoluzione del video diminuisce rispetto a quella delle foto fatte con la stessa fotocamera. Si può, inoltre, notare che i parametri ottenuti da Matlab elaborando le immagini sono molto simili a quelli ottenuti calibrando le immagini scattate in laboratorio elaborate con Agisoft Lens (Tabella 2.1).

2.3.3 Acquisizione delle immagini

La costruzione di modelli 3D con fotografie è stata utilizzata per anni; una delle più recenti scoperte in ambito tecnologico e informatico è la costruzione di modelli 3D con tecniche automatiche e con prese quasi casuali. La facilità di acquisire immagini dell'ambiente circostante e degli oggetti di interesse ha consentito lo sviluppo di software in grado di assemblare questi fotogrammi e comporre una superficie tridimensionale e metrica.

Il passaggio fondamentale è ovviamente l'acquisizione di buone fotografie digitali, che possono essere acquisite da fotocamere professionali, compatte, o anche da smartphone. È importante garantire una sovrapposizione laterale e trasversale almeno di 70% tra una foto e la successiva. Per garantire questa condizione e velocizzare i tempi di esecuzioni sono stati registrati anche dei filmati.

Sono stati distribuiti dei marker in diverse posizioni a diverse altezze di ogni luogo (rotatoria e intersezione), in modo da poter coprire tutto la zona di interesse durante lo svolgimento dello studio. Tali marker sono punti di riferimento che sono state determinate le loro coordinate e rendono le immagine georeferenziate.

Usando le due fotocamere, sia la reflex che la action cam, le fotografie sono state scattate da diverse posizioni sia della rotatoria che dell'intersezione, provando a ottenere una visione completa delle zone di interesse, in modo da inquadrare tutti i punti di riferimento da diverse posizioni di ripresa, e coprire l'entrata delle intersezioni e i punti di conflitto che sono molto importanti per le analisi di sicurezza, conservando la sovrapposizione minima tra una foto e l'altra.

Oltre alle immagini, usando la telecamera Garmin, sono stati effettuati dei filmati, successivamente convertiti in frame, in modo tale da poter confrontare i modelli ottenuti con dati di input differenti (risoluzione e qualità).

Per garantire la copertura totale dei dettagli, sono stati effettuati foto e video sia da punti (gli angoli dell'intersezione) che da altezze differenti (5 m, 3,5 m e altezza d'uomo); per tale scopo è stata usata un'asta telescopica sulla quale è stata ancorata la telecamera.

2.3.4 Creazione della nuvola dei punti tramite le immagini

Le immagini scattate usando le telecamere sono state elaborate con il software Photoscan allo scopo di creare dei modelli tridimensionali.

PhotoScan è un software per la generazione di nuvole di punti da immagini, ma può anche essere utilizzato per generare modelli DEM (Digital Elevation Model), e per elaborare delle ortofoto .

La fase di acquisizione delle immagini è una delle più importanti, visto e considerato che senza di essa non si potrebbe procedere con il lavoro; essa è stata effettuata usando due telecamere diverse ad altezze differenti.

Alcune superfici creano difficoltà al software PhotoScan. Esse sono:

- Oggetti trasparenti, a specchio o riflettenti; foto di tali oggetti, se proprio necessarie, vanno scattate in presenza di cielo nuvoloso in modo da limitare questi effetti per il software.
- Superfici mobili come acqua e macchine.

Perciò, tali oggetti critici hanno condizionato la scelta dei luoghi, in modo da evitare zone in cui essi sono presenti e zone trafficate. Inoltre, la metodologia utilizzata per scattare le immagini e i filmati permette di ottenere delle immagini da cui il software può fornire ottimi risultati.

I criteri utilizzati sono:

- sovrapposizione (longitudinali e trasversali) tra le immagini del 60-80%;

- usare punti di riferimento per georeferenziare il modello;
- ripresa del punto di riferimento da diversi punti di acquisizione.

Tali passaggi sono fondamentali per ottenere dei buoni risultati.

Il workflow rappresentato nella Figura 2.13 mostra i passaggi necessari per elaborare una nuvola dei punti tramite immagine fotogrammetriche.

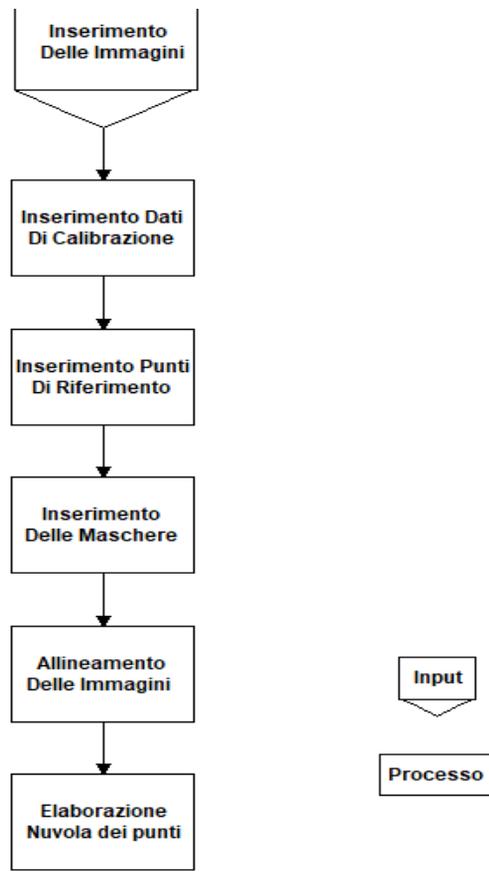


Figura 2.13 Workflow per l’elaborazione della nuvola dei punti derivata dalle immagini

Come primo passaggio, si devono caricare le immagini acquisite sul campo in un gruppo di immagini chiamato “chunk” . Per aggiungere i parametri della calibrazione delle telecamere, si usa il comando Camera Calibration nella quale vanno verificati i parametri della camera e, se non corretti, è possibile modificarli cambiando manualmente i valori. Nella Figura 2.14 sono riportati i parametri inseriti in PhotoScan, ottenuti dalla calibrazione della camera Garmin attraverso le immagini elaborate con Matlab.

Initial	Adjusted	GPS/INS Offset
f:	2363.5	
cx:	2286.5	b1: 132.4
cy:	1733.9	b2: -38.1007
k1:	-0.3976	p1: -0.0028
k2:	0.2561	p2: -0.017
k3:	-0.1292	p3: 0
k4:	0	p4: 0

Figura 2.14 Parametri di calibrazione della camera Garmin attraverso l'elaborazione di immagini con Matlab in PhotoScan

Allo scopo di georeferenziare la nuvola dei punti e avere un'alta precisione, sono stati aggiunti i punti di riferimento con le loro coordinate. È possibile aggiungere tali punti manualmente, andando a cercare ogni punto (scacchiera) e nominandolo. Dopo averli inseriti in tutte le foto, si carica un file .txt che contiene tutti i punti di riferimento con le loro coordinate fornite dal rilievo topografico. Successivamente, tutte le superfici lucide, che possono provocare errori durante l'elaborazione, sono state nascoste usando delle maschere.

Il comando Align Photos permette di allineare le immagini caricate in ogni chunk, e scegliere la qualità desiderata dell'elaborato. In questo caso, è stata scelta la qualità Medium. Si crea, così, una Sparse Cloud, ovvero nuvola di punti ricavata dall'allineamento delle foto caricate.

In fine, è stata creata la nuvola dei punti dando una vera e propria forma all'elaborato 3D, andando a compattare la nuvola creata dall'allineamento delle immagini nella fase precedente.

Merge Chunks può essere usato nel caso in cui siano stati effettuati rilevamenti di punti da posizioni differenti; in questo caso, infatti, risultava necessario creare un chunk per ogni punto di rilievo e successivamente, unirli in un unico gruppo contenente tutte le immagini.

Con l'ausilio di Merge chunks (Figura 2.15), è possibile selezionare i chunk che devono essere uniti. Si può scegliere di unire i gruppi in base a diversi "criteri", quali la nuvola dei punti, i modelli, o punti di riferimento. Nel caso in esame, i gruppi di fotografie sono stati uniti rispetto ai punti di riferimento (marker).



Figura 2.15 Il comando merge chunk di PhotoScan

2.4 Acquisizione nuvole punti con laser scanner

I laser scanner 3D sono sempre più utilizzati per la scansione di superfici e ambienti in svariati settori e campi di applicazione.

Questa tecnologia ha velocizzato enormemente la fase di acquisizione di coordinate 3D che definiscono le geometrie di un oggetto rilevato, sia esso un immobile o un impianto, eseguita scansionando lo spazio e acquisendo nuvole di punti ad una velocità che arriva ad oggi fino ad un milione di punti al secondo.

Questi sensori sono strumenti che consentono il rilevamento di modelli tridimensionali di oggetti a scale e risoluzioni differenti. Sono strumenti in grado di misurare ad altissima velocità la posizione di centinaia di migliaia di punti. Il risultato dell'acquisizione è un insieme di punti molto denso comunemente denominato "nuvola di punti". Inoltre, esistono laser scanner 3D che montano una fotocamera digitale integrata che, dopo la fase di acquisizione dei dati geometrici, acquisisce, attraverso procedure automatiche, immagini dello spazio rilevato. Le foto così acquisite saranno successivamente mosaicate dai software di elaborazione dei dati e applicate alle nuvole di punti per arricchirle delle informazioni di colore.

Il principio base è l'emissione di un segnale luminoso (Laser) da parte di un emettitore e la ricezione del segnale di ritorno da parte di un ricevitore. Nella fase di ricezione il laser scanner utilizza tecniche differenti per il calcolo della distanza che contraddistinguono il tipo di strumento.

In base alla tecnica utilizzata, i laser scanner 3D si definiscono a 'tempo di volo' (TOF) quando calcolano la distanza in base al tempo intercorso tra l'emissione del laser e la ricezione del segnale di ritorno, o a 'differenza di fase' (Phase shift based) quando il calcolo viene eseguito confrontando le fasi del segnale emesso e di quello di ritorno.

L'emettitore è montato su un corpo che ruota intorno ad un asse verticale che contiene uno specchio, a sua volta rotante sul suo asse orizzontale, che ha la funzione di riflettere il laser ed indirizzarlo verso il punto rilevato. Il movimento del corpo e dello specchio avvengono a velocità elevatissime, consentendo l'acquisizione dei dati ad una velocità che può arrivare fino ad un milione di punti al secondo.

La velocità e il passo delle rotazioni possono essere impostate dall'operatore da cui dipende la risoluzione della scansione, cioè la densità della griglia di punti rilevati ad una certa distanza, e la qualità del dato acquisito. I due parametri determinano quindi anche la durata della scansione che può variare da circa trenta secondi fino a varie decine di minuti per scansioni complete a 360°.

Durante l'acquisizione lo strumento archivia, per ciascun punto rilevato, la distanza calcolata e gli angoli orizzontale e verticale in base alla posizione del corpo e dello specchio. Oltre a queste informazioni, viene acquisito anche il valore di riflettanza della superficie colpita dal laser che sarà tanto più alto quanto la superficie tenderà al colore bianco.

Il risultato finale sarà una nuvola di punti 3D (3D Point Cloud) a colori, rappresentante lo spazio tridimensionale intorno al punto di scansione, caratterizzata da una elevata accuratezza.

Il laser scanner Focus di CAM2 (Figura 2.16) [13], è stato usato per effettuare le scansioni.



Figura 2.16 Laser Scanner Faro Focus 3D

Il Focus 3D è stato posizionato in un punto e ,attraverso delle scansioni di 360° , ha raccolto dei punti e acquisito immagini. Tale procedura è stata svolta in diversi punti allo scopo ricoprire l'intera area di indagine con diversi punti di ripresa. Il tempo di ogni scansione dipende dalla risoluzione della nuvola dei punti generata.

La fase di elaborazione dei dati svolta in laboratorio è stata effettuata con il software Faro Scene, progettato specificamente per il CAM2 Focus 3D, il laser scanner usato per effettuare le scansioni. Il software permette di gestire ed elaborare i dati tramite il riconoscimento automatico degli oggetti nella zona di interesse e la registrazione delle scansioni. In quest'ultime vengono identificati i punti di riferimento che consentono di ottenere la nuvola dei punti.

Le scansioni sono dei file con milioni di dati rilevati da un'unica posizione, i quali indicano la loro posizione, riflettenza e colore per i singoli punti di scansione.

La Figura 2.17 rappresenta il workflow della creazione della nuvola dei punti generata tramite il software Scene.

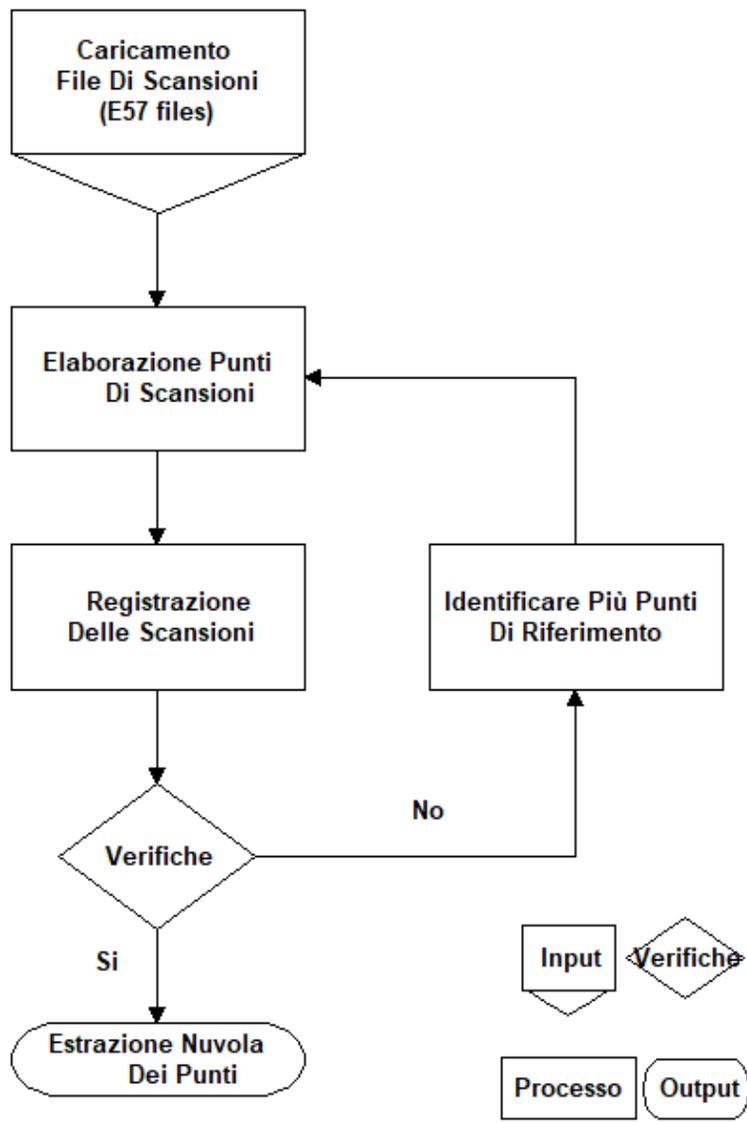


Figura 2.17 Workflow per elaborare la nuvola dei punti derivata dalle scansioni

Dopo aver caricato le scansioni, il software applicherà dei filtri per eliminare eventuali punti che non rappresentano punti veri sul luogo di scansione. Tali punti potrebbero avere una riflettanza minore di quella che si è stabilito essere la soglia, ad esempio dei punti in una zona d'ombra, dove la visibilità era limitata nell'atto della rilevazione. Durante la fase di scansione, il laser scanner ha memorizzato delle immagini colorate che andrà ad aggiungere ai file processati. Lo step successivo consiste nell'individuare automaticamente o anche manualmente dei target, cioè punti di riferimento per ogni scansione, in questo caso le scacchiere. Il software andrà a cercare i punti di riferimento che sono segnalati e altri punti non definiti che è riuscito a definire (elementi identificabili nella zona di scansione); perciò è necessario effettuare un controllo per eliminare tutti i punti che non sono utili per

identificare il modello ed aggiungere manualmente altri di cui si conoscono le coordinate e che il software non è riuscito a identificare.

Dopo questi step, bisogna collocare le scansioni. Se i target sono stati ben collocati e riconosciuti dal programma, al termine di questa operazione verrà visualizzata una finestra che indica un'errore minimo, e massimo. L'errore diminuisce aumentando il numero dei target riconosciuti.

Il secondo step prevede la registrazione delle scansioni. Tale processo consiste nell'unire in un unico sistema di riferimento tutti i punti scansionati da diverse posizioni. Essi vengono registrati e salvati in un sistema di coordinate relativo alla posizione dello scanner; di conseguenza un punto rilevato da posizioni differenti avrà coordinate diverse.

La registrazione delle scansioni si basa sul principio che consente di individuare oggetti e considerarli punti di riferimento; essi possono essere punti d'angolo o qualsiasi altro oggetto identificabile.

In questo lavoro sono stati usati i punti di riferimento (le scacchiere) di cui si sono misurate le coordinate.

Terminato il processo di registrazione, il software mostra degli indici per verificare i risultati; tali verifiche sono rappresentate da un semaforo che indica quanto il valore degli errori ottenuti sia accettabile (Figura 2.18):

- Verde: tutte le scansioni sono state elaborate con successo;
- Giallo: le scansioni sono state elaborate con successo ma ad alcune potrebbe servire un trattamento speciale;
- Rosso: la scansione non è stata fatta.



Figura 2.18 Esempio di controllo valore degli errori

La nuvola di punti del progetto è costituita da tutti i punti forniti dalle singole scansioni elaborate: preparazioni preliminari, collocazione e registrazione.

Una volta effettuato il processo e verificati i risultati, è possibile estrarre la nuvola dei punti, generata da Scene in diversi formati, CAD, XYZ e altri. In questo caso sono state esportate attraverso un formato .txt.

2.5 Confronto tra nuvole di punti

Per esaminare l'affidabilità delle nuvole derivate dalle immagini, si è deciso di confrontarle con le nuvole ottenute tramite laser scanner. Per tale scopo, si è utilizzato Cloud Compare, un software per l'elaborazione delle nuvole di punti e delle Mesh che permette il confronto tra elementi tridimensionali. La Figura 2.19 mostra il workflow del confronto tra le nuvole.

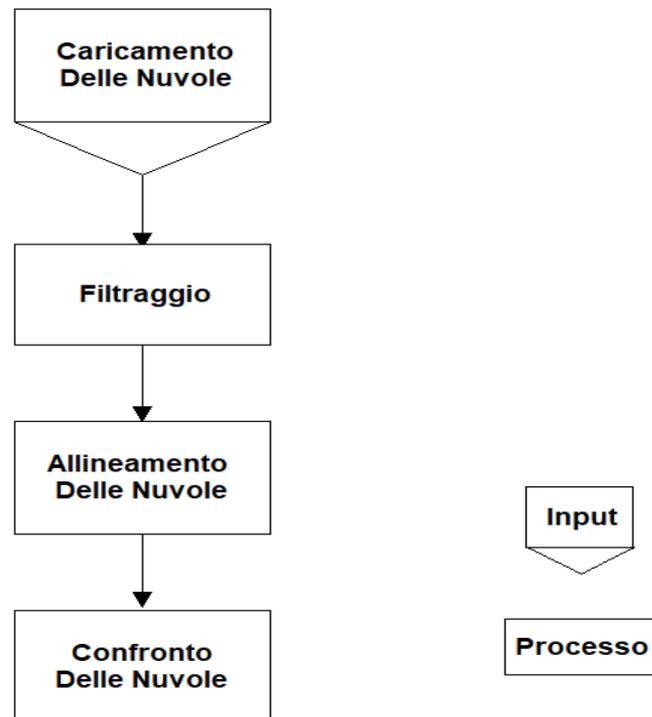


Figura 2.19 Workflow per effettuare il confronto tra le nuvole di punti

Le due nuvole dei punti da confrontare vanno caricate sul software e devono entrambe avere la stessa scala. Per assicurare ciò, si può scegliere un elemento che sia chiaro e ben visibile nelle due nuvole, o anche una distanza tra due punti o oggetti, e confrontare le due misure. Se esse sono uguali, vuol dire che le nuvole possiedono la stessa scala.

Prima di procedere con il confronto delle nuvole, esse devono essere prive di ogni tipo di rumore, causato dal processo di elaborazione. Il software permette il filtraggio delle nuvole per eliminare tale

disturbo. Tale comando "Noise filter" permette anche di eliminare i punti isolati, la cui presenza non permette di migliorare il modello.

Durante i rilievi, possono essere presenti degli elementi considerati come disturbo. Essi non hanno una presenza permanente nel luogo, come per esempio, i veicoli in movimento o pedoni. Elementi come questi nascondono la vera geometria della zona di interesse e devono essere eliminati manualmente, selezionando la zona in cui sono presenti.

La registrazione degli elementi prevede la sovrapposizione di due nuvole ponendo attenzione ad unire il loro centro di gravità. Si selezionano i due elementi tramite i comandi Tools -> Registration -> Match bounding-box. Successivamente, tramite il comando traslazione e rotazione si sovrappongono le due nuvole.

Per concludere la registrazione di queste ultime, vengono usati i comandi 'Tools -> Registration -> Align (point pairs picking). Questi permettono di segnalare 3 punti equivalenti in entrambe le nuvole ed allinearle. Tramite il comando "Role assignment" viene assegnato un ruolo alla nuvola che può essere di riferimento o di confronto.

Cloud Compare riesce a calcolare due diverse distanze, ovvero due diversi tipi di confronto:

- **Cloud/Cloud distance:** la distanza tra due punti di due nuvole ;
- **Cloud/Mesh distance:** la distanza tra due punti di una nuvola ed una mesh.

In questo lavoro, sono stati effettuati i confronti tra due nuvole, quindi sono state calcolate le Cloud/Cloud distance.

Prima di iniziare il processo di confronto, cioè calcolare la distanza tra le due nuvole (Cloud/Cloud distance), è necessario stabilire quale delle due nuvole è quella di riferimento e quale quella da confrontare. Tale operazione è compiuta cliccando su Tools -> Distances -> Cloud/Cloud distance.

Fatto questo, i risultati del confronto possono essere visualizzati tramite una scala cromatica (Figura 2.20).

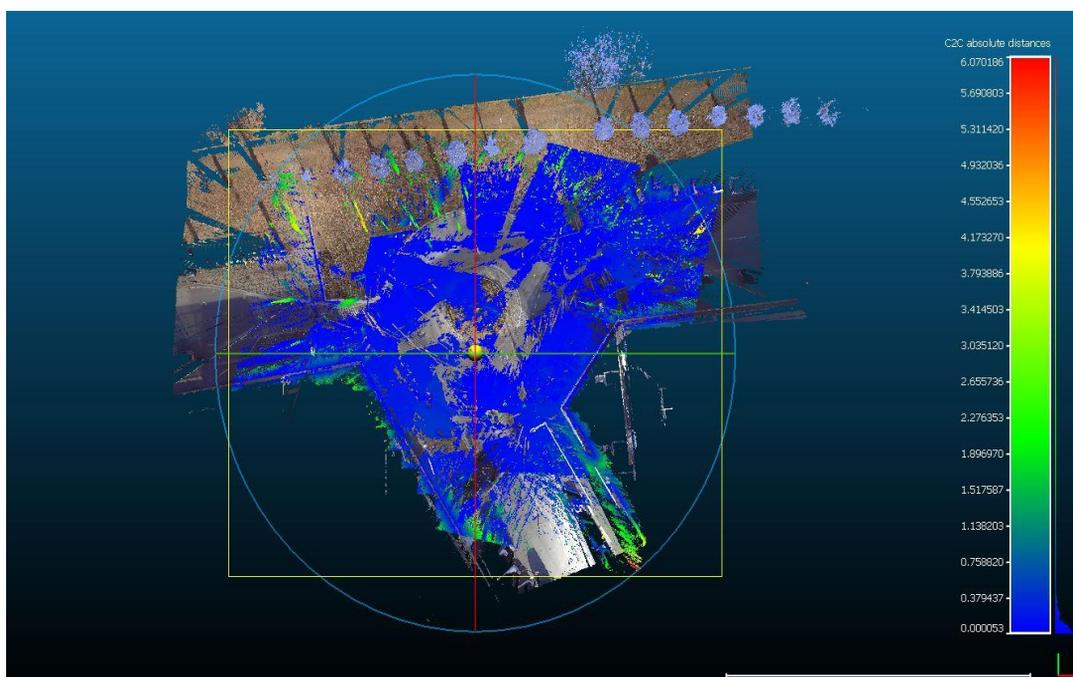


Figura 2.20 Esempio dei risultati del confronto tra due nuvole di punti attraverso scala cromatica

I risultati possono essere visualizzati anche statisticamente, usando la distribuzione di Gauss o quella Weibull, o attraverso un istogramma, che indica quanti punti delle due nuvole differiscono tra di loro in base alla medesima distanza.

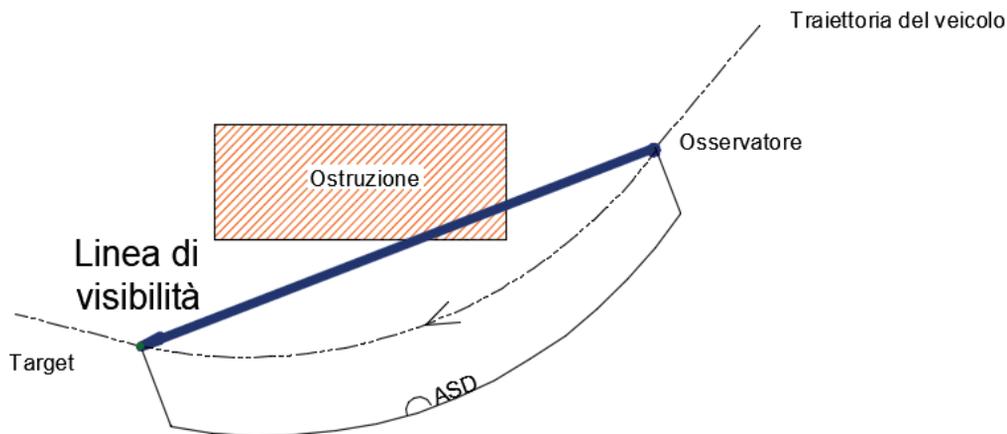
2.6 Distanze di visibilità valutate

Durante il lavoro di questa tesi si è deciso di valutare delle distanze di visibilità che considerano l'interazione tra tutti gli utenti: veicolo-veicolo, veicolo-utente debole (pedone e ciclista).

2.6.1 Distanza di visibilità disponibile

La Figura 2.21, rappresenta uno schema illustrativo della distanza di visibilità disponibile lungo un tratto stradale curvilineo. L'occhio del guidatore è stato collocato ad una altezza di 1.1 metri, come proposto dalle Norme Italiane, e il target ad una altezza di 0.1 m. Il caso proposto presenta un ostacolo tra la posizione dell'osservatore e il target. Qualora l'altezza dell'ostacolo (h_o) intersecasse la linea di visibilità che collega l'osservatore al target, la visione dell'utente stesso potrebbe essere ostacolata. Tale caso non può essere analizzato attraverso una rappresentazione piana, ma implica la necessità di effettuare un'analisi tridimensionale, considerando la geometria stradale e tutti gli oggetti che possono ostruire la visibilità del guidatore, quali veicoli parcheggiati e/o vegetazione.

Vista in piano



Sezione verticale

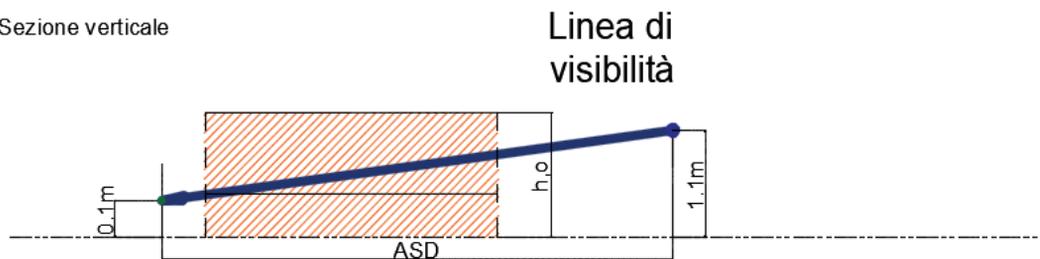
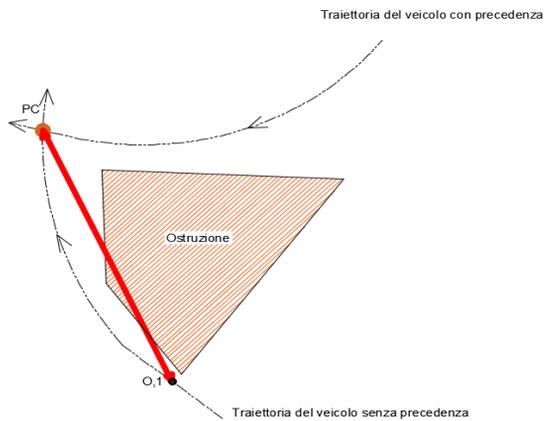


Figura 2.21 Stima della distanza di visibilità disponibile rispetto all'altezza dell'ostruzione

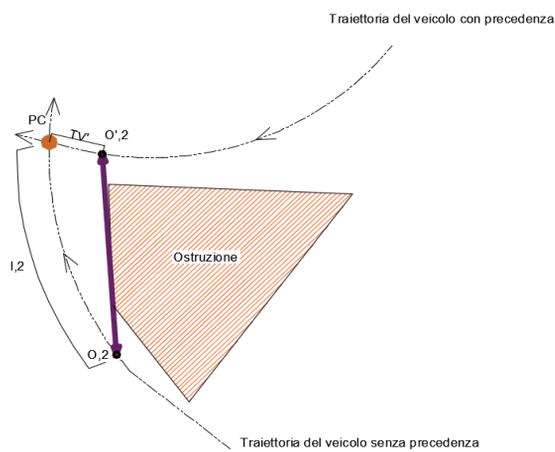
2.6.2 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-veicolo

Per le intersezioni prese in esame in questa tesi, si è deciso di verificare la visibilità del punto di conflitto tra due veicoli, elaborando il seguente criterio: il guidatore che non ha la precedenza, prima di entrare nell'intersezione, deve assicurarsi che non vi sia un veicolo che intersechi la sua traiettoria.

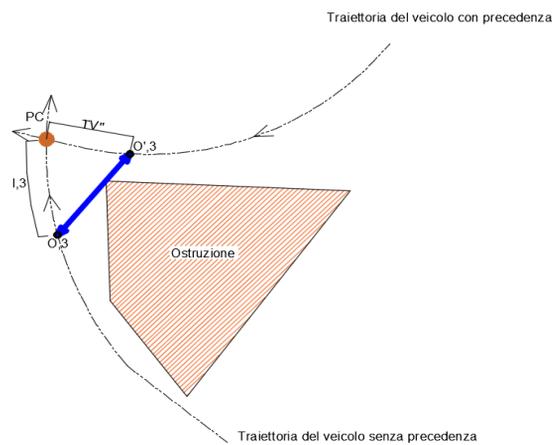
La Figura 2.22 illustra la reciproca visibilità tra due guidatori, osservatore 1 (O) e osservatore 2 (O'), in due traiettorie rispetto al loro punto di conflitto (PC). Quando il guidatore si trova nel punto di osservazione O,1, il punto di conflitto non è visibile (Figura 2.22(a)). Proseguendo lungo la sua traiettoria, nel punto O,2, l'osservatore è in grado di vedere sia il punto di conflitto sia il tratto visibile TV' della traiettoria dell'osservatore 2 (Figura 2.22(b)); avvicinandosi verso il punto di conflitto (1,3<1,2), la lunghezza del tratto visibile aumenta (TV''>TV') (Figura 2.22(c)). Ciò garantisce non solo la visibilità del punto di conflitto tra le due traiettorie, ma anche un tratto della traiettoria del veicolo in conflitto in modo da permettere al guidatore di fermarsi per evitare l'impatto.



(a) L'osservatore non è in grado di vedere il punto di conflitto a causa della presenza dell'ostacolo



(b) L'osservatore è in grado di vedere sia il punto di conflitto sia il tratto TV' della traiettoria del secondo veicolo



(c) L'osservatore è in grado di vedere sia il punto di conflitto sia il tratto TV''>TV' della traiettoria del secondo veicolo

Figura 2.22 Le distanze di visibilità delle traiettorie rispetto al punto di conflitto

Per le traiettorie prese in considerazione, tali linee di visibilità legano due punti posti ad un'altezza di 1.1 metri, poichè si considerano entrambi gli utenti, osservatore e target. In questo caso, la traiettoria è stata discretizzata in modo tale da posizionare i punti di osservazione a ogni metro.

2.6.3 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-pedone

Una delle situazioni più pericolose per gli utenti deboli, quali pedoni, ciclisti e disabili, è l'attraversamento da un lato all'altro della strada in un'intersezione non controllata da semaforo. Il guidatore deve avere una distanza visibile necessaria a rallentare e nel caso fermare il veicolo prima di collidere con l'utente debole.

La Figura 2.23 mostra come, quando il guidatore è nella posizione O,1, egli non sia in grado di vedere il punto di conflitto tra la sua traiettoria e l'attraversamento, ma solo un tratto $L,1$ lungo la traiettoria del pedone. Ciò non indica un grave problema di visibilità, poiché è necessario considerare anche ulteriori fattori, quali: distanza tra il punto di osservazione e il punto di conflitto e la velocità cui viaggia il veicolo. Invece, proseguendo lungo la sua traiettoria, raggiunta la posizione O,2, il guidatore è in grado di vedere non solo il punto di conflitto, ma anche una distanza $L,2 > L,1$.

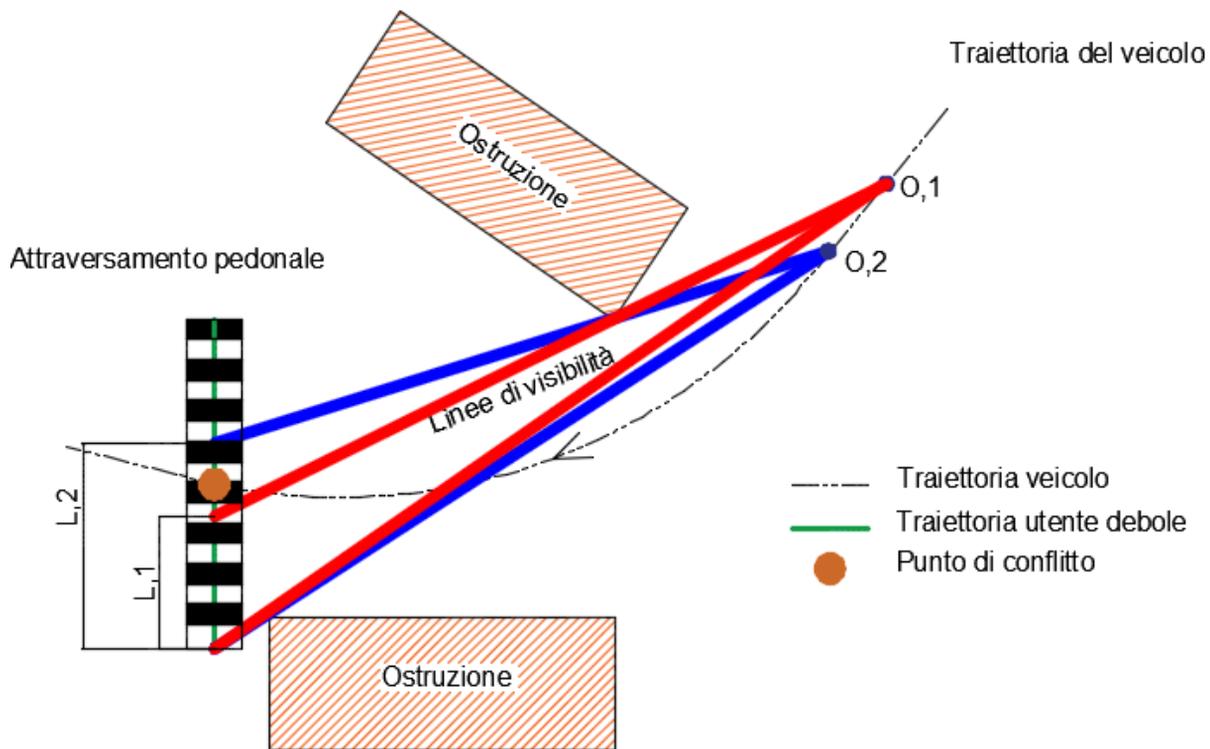


Figura 2.23 Visibilità veicolo-pedone rispetto al punto di conflitto

Per garantire tale criterio, la traiettoria del guidatore è stata discretizzata con un passo di 1 metro ad un'altezza di 1,1 metri.

La traiettoria del pedone, posizionata in mezz'ora delle strisce di attraversamento, è stata discretizzata creando dei punti a 25 centimetri, i quali rappresentano i target. È stato deciso anche di collocare il target per tali analisi a tre diverse altezze: 0, 1 e 1.5 metri, allo scopo di includere tutti gli utenti: pedoni (per esempio i bambini), ciclisti e disabili.

2.7 Algoritmo per la valutazione delle distanze di visibilità

Per valutare le distanze di visibilità è stato sviluppato un algoritmo in grado di analizzare le linee di collegamento tra il punto di osservazione e il target e determinare la posizione di un eventuale ostacolo che interseca tale linee.

Tale algoritmo è stato generato attraverso Model Builder, strumento che permette di costruire un TOOLBOX, ovvero un insieme di tool in ArcGIS.

La Figura 2.24 presenta lo schema a blocchi dell'algoritmo creato per analizzare le linee di visibilità.

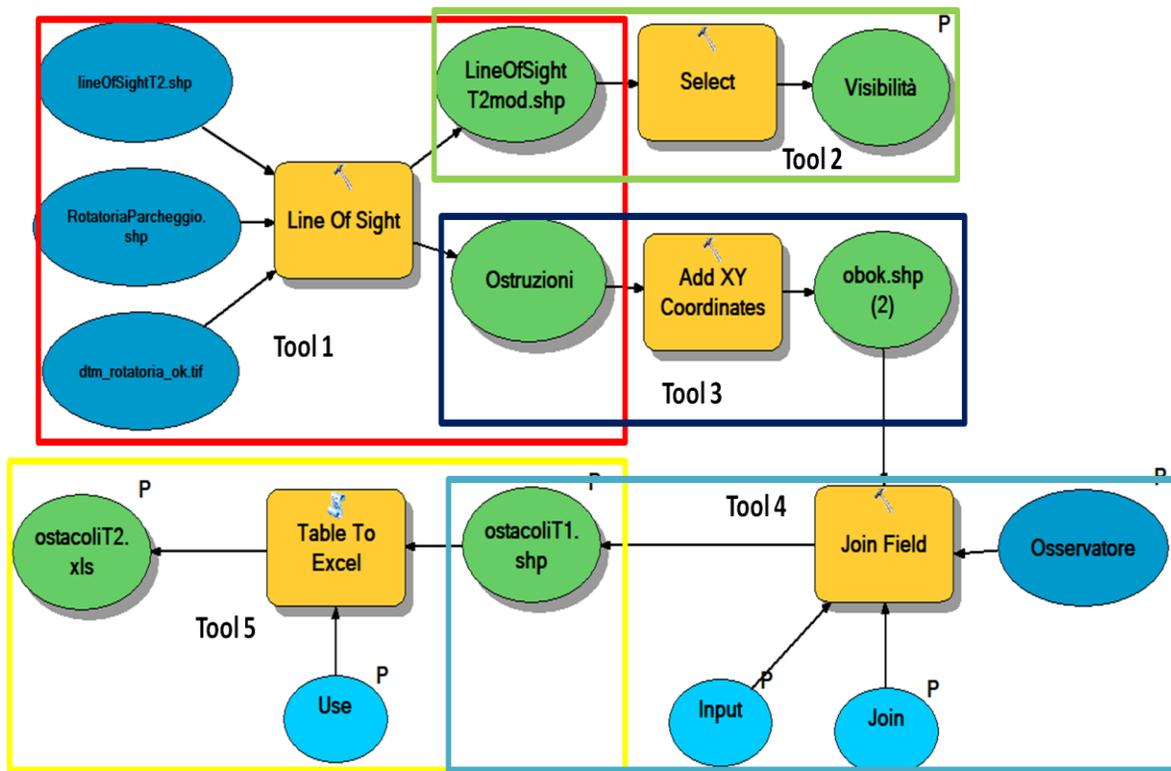


Figura 2.24 Workflow del Toolbox creato con ModelBuilder

Il primo tool utilizzato è “Line Of Sight” (Figura 2.25). Tale tool richiede come input le linee che collegano l’osservatore al target (.shp), il DSM (.shp) e il DTM del terreno (.tif).

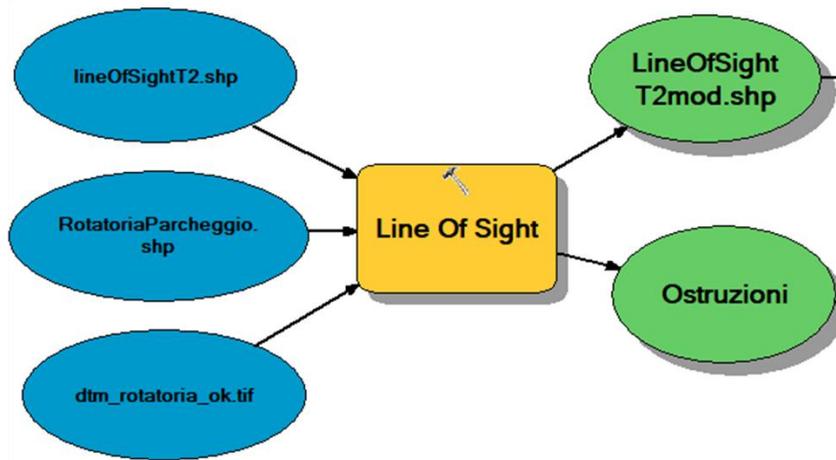


Figura 2.25 Primo Tool “Line of Sight”: fornisce l’analisi delle linee elaborate e la presenza di ostacoli

Il software analizza le linee, creando come primo output uno shapefile, che fornisce una tabella che rappresenta tutte le linee elaborate, e 3 codici che descrivono le condizioni di visibilità in queste linee; essi sono:

- VisCode: descrive la visibilità lungo la linea. Il tool suddivide la linea in due tratti nel caso in cui il target non sia visibile dell’osservatore. Nella tabella il valore 1 indica che il tratto della linea è visibile e 2 se non lo è, dopo che la visione è stata interrotta da un ostacolo.
- TarIsVis: rappresenta la visibilità del target: se il target è visibile, tale codice è 1, in caso opposto, è 0.
- OBSTR_ MPID: è l’identificativo dell’ostacolo che impedisce all’osservatore di vedere il target. ArcScene visualizza l’ID dei multipatch della superficie, nel caso in cui ostacoli la visuale dell’osservatore. Invece, indica 9999 se il target è visibile.

I primi due codici, VisCode e TarIsVis, aiutano ad identificare il campo visivo di ogni osservatore.

OBSTR_ MPID serve ad identificare la natura dell’ostacolo, ovvero la superficie che intralcia l’osservatore. Tali informazioni possono essere utilizzate nel caso in cui si volessero fare degli interventi per migliorare le condizioni di visibilità.

Il secondo output invece è un altro shapefile che contiene tutti gli ostacoli che impediscono all’osservatore di vedere il target.

Dopo aver elaborato le linee nel primo processo, tutti i target visibili dall'osservatore sono stati selezionati con il secondo tool "Select" (Figura 2.26). Il tool permette di identificare per ogni punto la distanza massima alla quale l'osservatore può usufruire di una visuale priva di ostacoli.

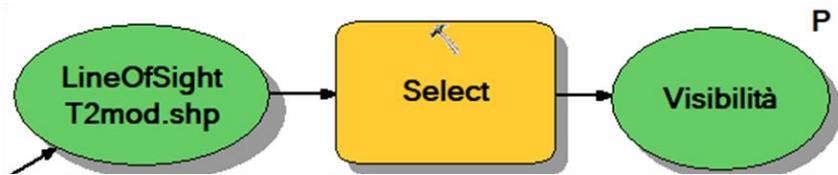


Figura 2.26 Secondo Tool “Select”: identifica la distanza di visuale libera

Il secondo output del comando "Line of Sight" è un shapefile nel quale sono elencati tutti gli ostacoli: sono i punti in cui una linea di visuale interseca un ostacolo. Tramite il terzo comando "Add XY Coordinate" (Figura 2.27), ad ogni ostacolo vengono associate le rispettive coordinate spaziali.

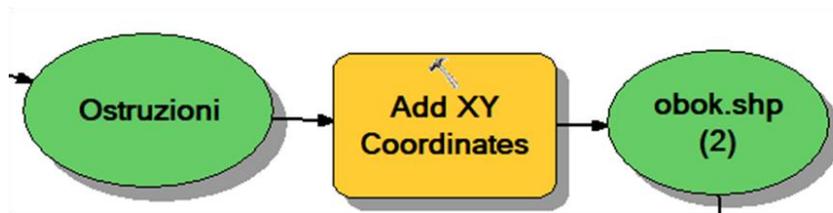


Figura 2.27 Terzo Tool “Add XY Coordinates”: assegna ad ogni ostacole le rispettive coordinate spaziali

Il quarto tool "Join Fields" (Figura 2.28) collega gli osservatori agli ostacoli, in modo tale da identificare per ogni osservatore l'ostacolo che gli impedisce di vedere il target, riportando in una tabella le coordinate dei rispettivi ostacoli.

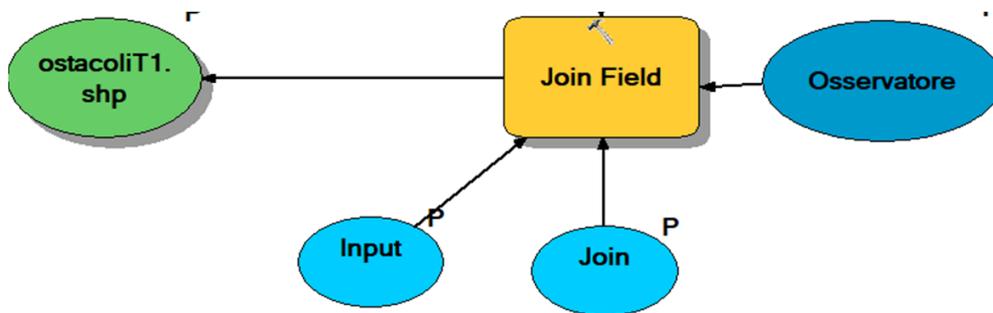


Figura 2.28 Quarto Tool “Join Field”: collega gli osservatori agli ostacoli che ostruiscono la visuale del target

Il tool “Table To Excel” (Figura 2.29) considera come input lo shapefile degli ostacoli. Tale tool permette di esportare le tabelle già create degli ostacoli con le loro coordinate spaziali in EXCEL.

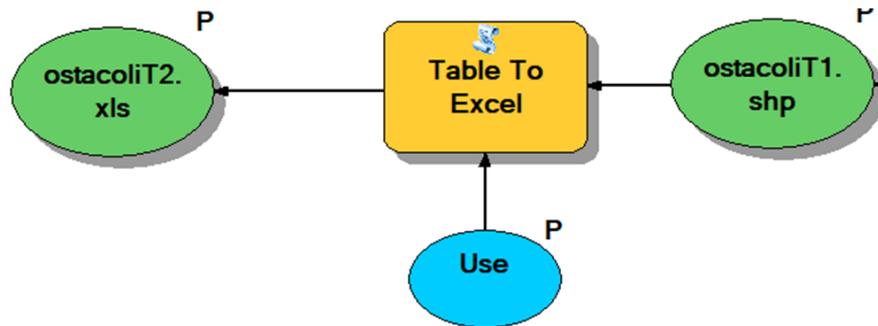


Figura 2.29 Quinto Tool “Table to Excel”: permette di esportare le coordinate degli ostacoli

3 Casi studio

3.1 Casi di studio

Si è deciso di svolgere le verifiche di visibilità di due diversi tipi di intersezione: una rotatoria e un'intersezione lineare. I due casi di studio si trovano a Torino (Italia) e hanno diverse caratteristiche (Figura 3.1).



Figura 3.1 I due casi di studio

Rotatoria

Il primo caso di studio è una rotatoria (Figura 3.2) situata sul Lungo Dora Siena ($45^{\circ}04'29.4''N$ $7^{\circ}42'09.2''E$) a Torino. È una rotatoria a tre bracci, di cui uno è a senso unico, due a doppio senso di marcia e su entrambi i lati dei tre bracci sono presenti dei parcheggi. Essa si trova nelle vicinanze di un

polo universitario che comprende un campus (Campus Einaudi) e la residenza universitaria EDISU Olimpia.

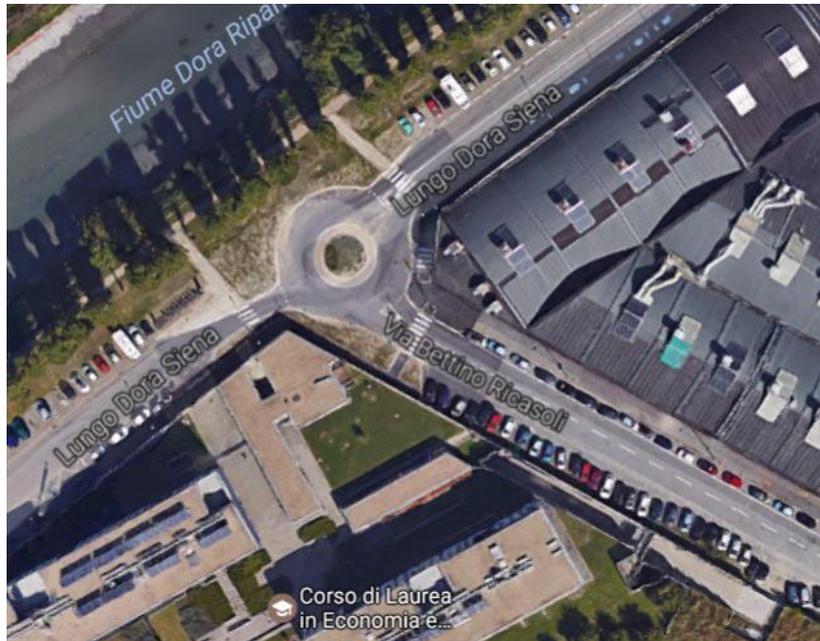


Figura 3.2 Rotatoria sul Lungo Dora Siena

Intersezione

L'intersezione (Figura 3.3) si trova anche a Torino ($45^{\circ}03'14.4''N$ $7^{\circ}39'40.1''E$) tra via Evangelista Torricelli e via Gian Domenico Cassini, entrambe vie a senso unico con parcheggi su entrambi i lati.



Figura 3.3 Intersezione via Torricelli- via Cassini

Questo luogo è stato scelto perché ha delle caratteristiche geometriche tipiche della maggior parte delle intersezioni di Torino, nel cuore di una zona residenziale.

In entrambi i luoghi, la presenza di edifici, e dei veicoli parcheggiati su entrambi i lati delle strade, può limitare le condizioni di visibilità.

Tabella 3.1 Dati raccolti durante i rilievi

		ROTATORIA	INTERSEZIONE
Fotocamera Reflex	[immagini]	330	286
GARMIN	ULTRA ZOOM	110	163
(Foto)	[immagini]	20	-
GARMIN	ULTRA ZOOM	02:20	05:36
(Video)	[min]	02:48	-
	WIDE ANGLE		

La Tabella 3.1 mostra il numero di immagini che sono state acquisite e la durata dei filmati registrati nei luoghi di interesse.

3.2 Le coordinate dei punti di riferimento

Allo scopo di avere un modello geo-referenziato, e tramite il rilievo topografico sono state determinate le coordinate dei punti di riferimento.

Sono stati considerati due diversi sistemi di riferimento:

- **sistema di riferimento locale**
- **Sistema di riferimento globale :WGS84**

Nelle tabelle 3.2 e 3.3, sono riportate le coordinate di tutti i marker della rotatoria e dell'intersezione. Nel caso della rotatoria, le coordinate sono state calcolate rispetto ad un sistema di riferimento globale (WGS84), invece, nell'intersezione le coordinate sono misurate rispetto ad un sistema di riferimento locale. Nelle Figure 3.4 e 3.5, i marker sono stati posizionati sull'ortofoto di Torino.

Tabella 3.2 Coordinate dei marker della rotatoria sistema di riferimento globale

Marker	Easting [m]	Northing[m]	Altitude [m]
M12	397895.6916	4992075.237	273.43551
M14	397887.2287	4992061.527	273.43551
M15	397877.0269	4992050.178	272.48061
M16	397867.9516	4992064.848	272.38174
N1	397860.7973	4992072.364	273.50794
N10	397897.9172	4992077.352	271.9709
N11	397895.6897	4992075.235	272.66605
N2	397847.5489	4992070.087	273.62125
N3	397843.2042	4992084.419	273.24361
N4	397865.5065	4992096.982	272.98714
N5	397874.3348	4992092.881	272.89594
N6	397894.9014	4992101.36	273.21305
N7	397894.4016	4992089.781	273.55614
N8	397914.9157	4992103.427	272.69793
N9	397921.8539	4992082.443	272.92051



Figura 3.4 I punti di riferimento prelevati nel caso della rotatoria

Tabella 3.3 Coordinate dei marker della intersezione: sistema di riferimento locale

Marker	Easting [m]	Northing[m]	Altitude [m]
1001	100.0007	115.975	101.7571
1002	96.2351	116.9802	100.7827
1003	87.6319	119.1788	102.2382
1004	83.1015	120.3904	102.0313
1005	79.876	102.5511	101.6937
1006	86.6346	100.776	101.2905
1007	96.0083	98.335	100.6109
1008	96.2953	98.0848	101.6847
1009	93.412	88.7108	101.6772
1010	93.8883	86.8854	102.1631
1011	92.1347	79.3514	101.5775
1012	107.7175	79.5973	102.0028
1013	109.7293	89.1649	101.0316
1014	111.573	92.5604	101.5129
1015	115.9335	93.1394	101.8873
1016	121.7194	91.6235	101.0373
1017	115.514	111.8425	100.5275
1018	114.7152	112.8562	101.5791
1019	115.9513	118.5845	100.9234



Figura 3.5 I punti di riferimento prelevati nel caso dell'intersezione

3.3 Nuvola dei punti derivata da laser scanner

Nel caso della rotatoria, il laser scanner CAM2 è stato posizionato in tre punti diversi in modo tale da poter coprire tutte le zone di interesse (Figure 3.6), e, di conseguenza, ottenere delle nuvole dei punti che comprendono tutti i dettagli e le caratteristiche fondamentali che possano essere utili per lo studio (alberi, segnali stradali). Il tempo necessario per completare ogni scansione è 7 minuti. Esso dipende dalle risoluzioni della scansione.



Figura 3.6 Punti in cui sono effettuate le scansioni con laser scanner

Invece, nel caso dell'intersezione a raso, sono state effettuate 5 scansioni, vista la diversa natura della zona: in questo caso la zona d'interesse contiene più ostacoli, per esempio la zona dei parcheggi è più ampia rispetto alla zona della rotatoria, e anche la presenza di edifici alti. Perciò, si è dovuto effettuare più scansioni di più punti per poter includere tutta la zona nelle scansioni.

3.3.1 Rotatoria

Allo scopo di elaborare la nuvole dei punti derivata dalla scansioni laser è stato utilizzato il software Scene.

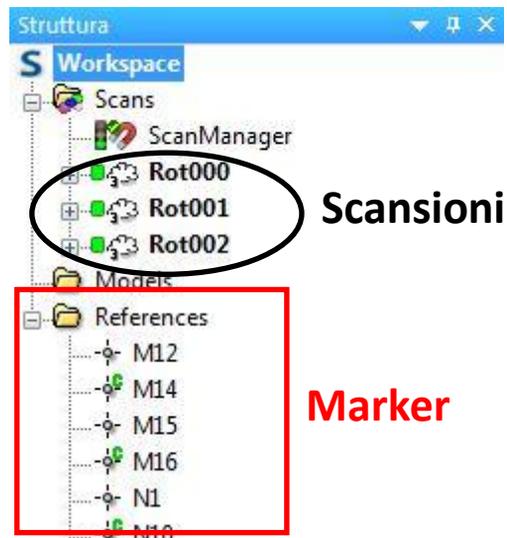


Figura 3.7 Le scansioni e i punti di riferimento

Tracciando le scansioni nella sezione Workspace Scans, si caricano le tre scansioni effettuate dal laser. Sono state caricate tre scansioni chiamate Rot000, Rot001, Root002. Nella sezione References sono riportati i punti di riferimento che identificano le scansioni (Figura 3.7).

Si prosegue con la procedura di elaborazione, e successivamente, cliccando sul tasto destro su ScanManager, Visualizza e scegliendo visualizza 3D, è possibile visualizzare la nuvola elaborata (Figura 3.8).

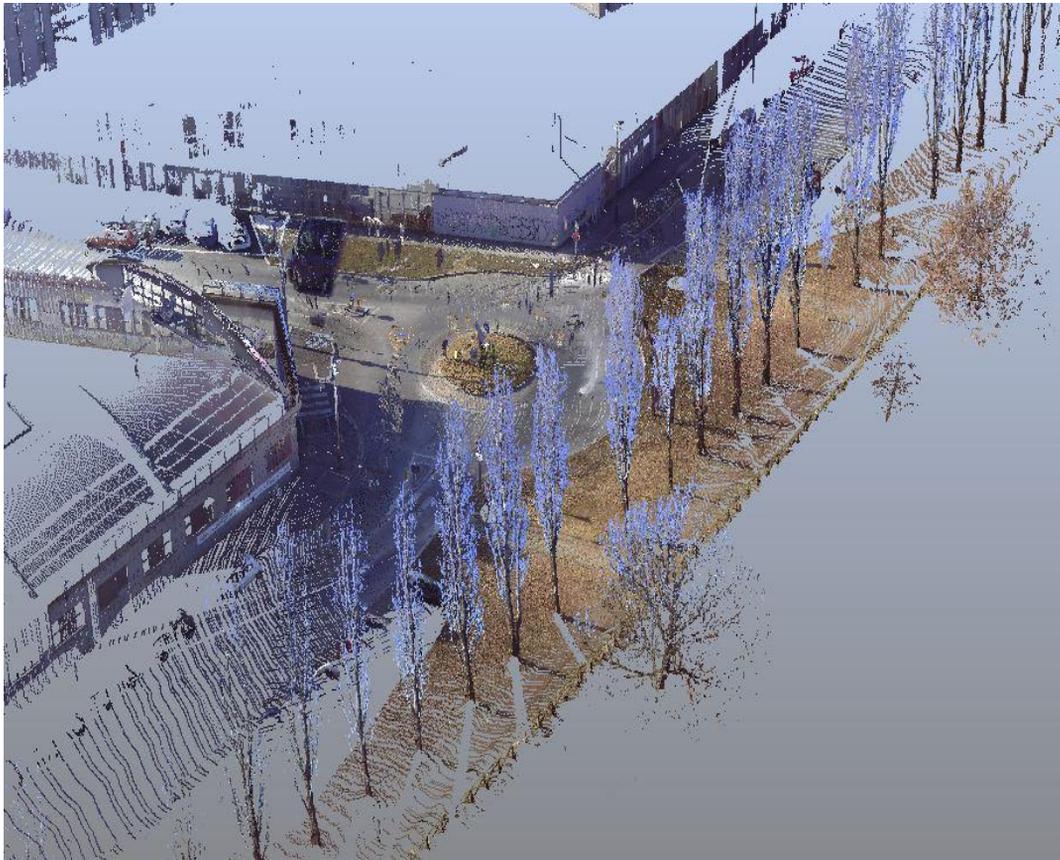


Figura 3.8 La nuvola dei punti ottenuta tramite Scene della rotatoria

Nella sezione ScanManager, si possono vedere i risultati delle scansioni ottenute, come illustrato nelle Figure 3.9e 3.10.

Oggetto ottimizzato	Tensione dei target m...	Tensione punto di sca...	Scansione/Gruppo
ScanFit	0,0042	---	Rot002
ScanFit	0,0035	---	Rot000
ScanFit	0,0021	---	Rot001
References	---	---	Workspace

Figura 3.9 Risultati scansioni della rotatoria dati da Scene

Per ogni scansione elaborata, Rot000, Rot001 e Root002, è riportato un semaforo che indica il colore verde il quale indica che il valore di Tensione dei target è accettabile. La tensione dei target mostra tutte le coppie di riferimento utilizzate per la registrazione, indicando la differenza nel sistema di coordinate globale tra la posizione e l'orientamento dei due corrispondenti oggetti di riferimento in diverse scansioni. Valori prossimi allo zero indicano un buon risultato di registrazione.

Nella finestra “Tensione dei target”, per ogni target identificato (Figura 3.10), attraverso il valore di tensione, è indicato quanto le scacchiere di riferimento siano state ben collocate e riconosciute dal programma; l’errore diminuisce, aumentando il numero dei target. Il software fornisce l’errore minimo, massimo e il valore medio, che sono, rispettivamente, 0, 0.0139 e 0.0041 metri. Anche in questo caso il semaforo verde indica che questo valore medio è accettabile.

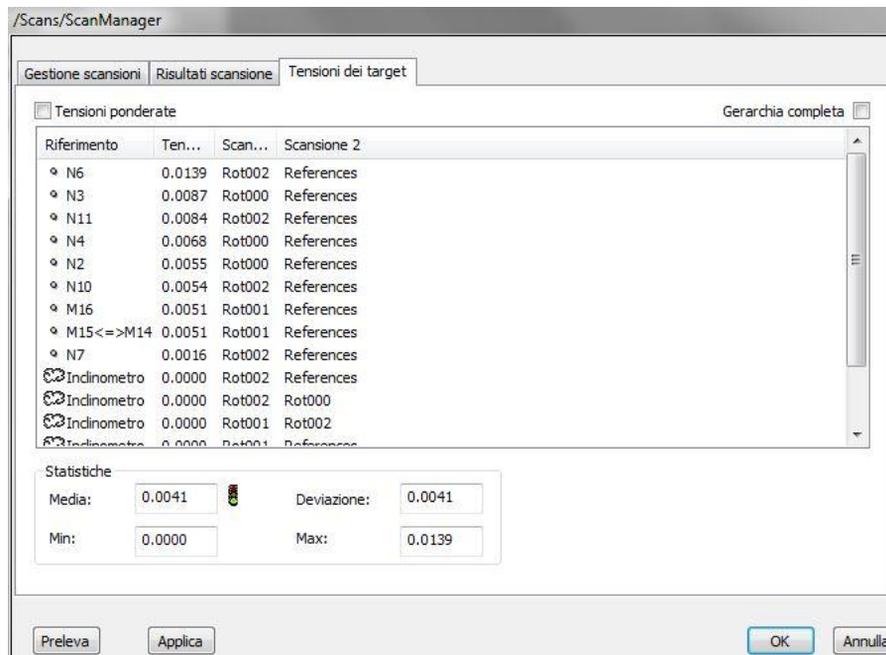


Figura 3.10 Tensioni dei target: i valori degli errori nel caso della rotatoria

3.3.2 Intersezione

Per effettuare le scansioni con laser scanner nell'intersezione, esso è stato posizionato in diversi punti allo scopo di carpire tutti i dettagli e la geometria del luogo.

Caricando le scansioni, in questo caso 5 (Figura 3.11), e seguendo il processo descritto prima, è possibile ottenere la nuvola dei punti dell'incrocio.

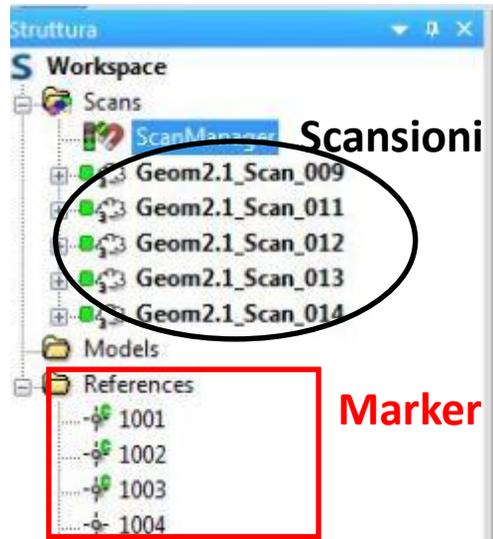


Figura 3.11 Le scansioni nell'intersezione



Figura 3.12 La nuvola dei punti della intersezione completa ottenuta tramite Scene

La nuvola ottenuta elaborando queste 5 scansioni è mostrata nella Figura 3.12, dove si vede l'intersezione dall'alto.

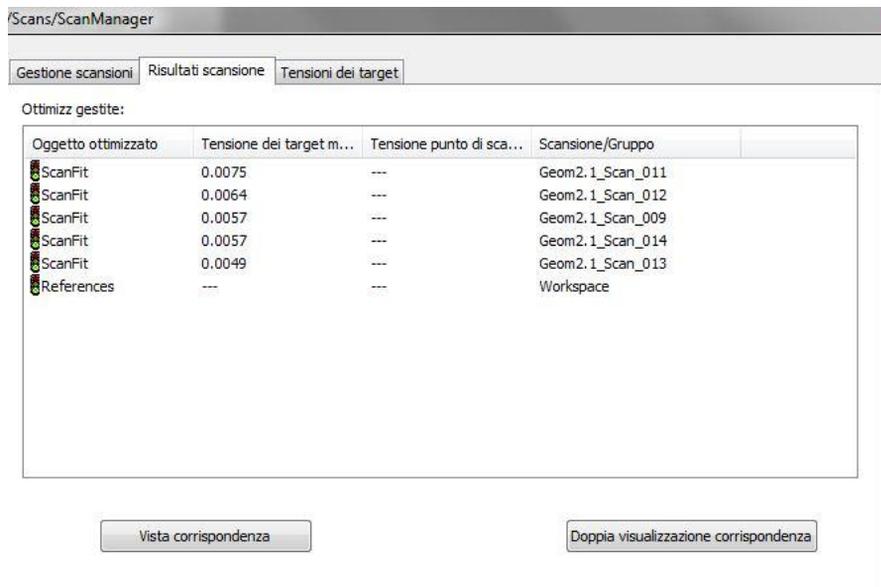


Figura 3.13 Risultati scansioni dell' intersezione dati da Scene

Nella sezione “Risultati scansioni” sono riportati i risultati (Figure 3.13 e 3.14) di ogni scansioni con un indice (il semaforo) che indica quali valori sono accettabili.

Anche nella sezione “Tensioni dei target” sono indicati i valori dell’errore minimo (0 m), medio (0.06 m) e massimo (0.0226 m).

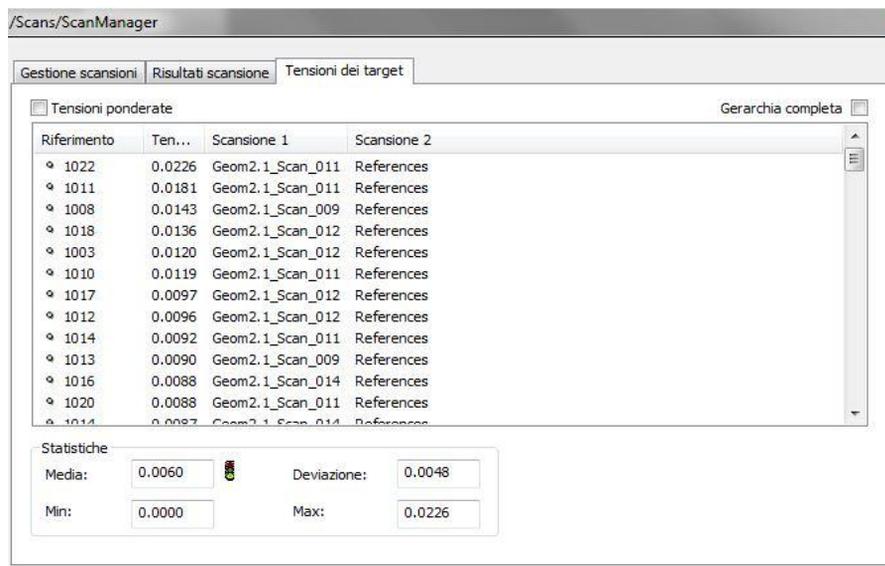


Figura 3.14 Tensioni dei target: i valori degli errori nel caso dell' intersezione

Tutte le nuvole elaborate da Scene sono state estratte andando su ScanManager>Estrazioni > Nuvola di punti. Scene fornisce le nuvole in formato.txt.

3.4 Modelli 3D derivati da immagini

3.4.1 Modello con immagini "WIDE ANGLE"

Come già menzionato nella sezione 2.3.1, le immagini e i video sono stati acquisiti in due modalità diverse: Wide angle e Ultra zoom. Allo scopo di verificarne l'efficienza e quanto tale modalità sia affidabile, sono state caricate le fotografie su Photoscan ed è stato eseguito il processo di elaborazione.

Come già anticipato in precedenza, a causa della grave distorsione delle immagini da elaborare, si è arrivati alla conclusione che tale modalità risulta inadeguata per la ricostruzione dell'ambiente 3D e ci si è orientati all'utilizzo della modalità Ultra Zoom per l'elaborazione dei modelli. Infatti, per verificare l'efficienza della modalità, sono stati caricati 43 frame estratti da video registrati da diversi punti nel caso della rotatoria. I risultati sono riportati nella Figura 3.15. La nuvola ottenuta è molto disturbata, con formazione di cilindri con centro i punti in cui sono stati registrati i video. Tali nuvole non possono essere affidabili per qualsiasi tipo di verifica.

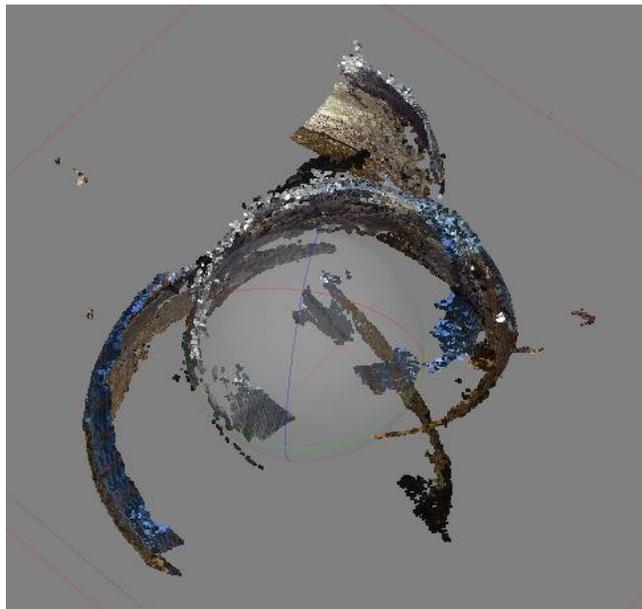


Figura 3.15 Nuvola dei punti ottenuta usando frame estratti dei video registrati a modalità Wide angle

A fronte di tali risultati, i rilievi fatti con la fotocamera Gramin sono stati trascurati e non sono stati utilizzati per creare la nuvola di punti ed effettuare un confronto. Quindi, tutti i modelli creati sono stati generati usando delle foto scattate usando la Garmin in modalità Ultra zoom.

3.4.2 Rotatoria

Allo scopo di creare un modello 3D derivato dalle immagine fotogrammetriche in un'intersezione a rotatoria, sono stati utilizzati due dispositivi, una fotocamera Reflex e una action cam.

Modelli generati con camera reflex

Le immagini scattate con la Nikon Reflex sono state importate sul software PhotoScan, processandole per elaborare la nuvola dei punti.

Ogni immagine è stata elaborata, nascondendo le superfici che possano provocare errori: superfici lucide e riflettenti, il cielo, veicoli e vetro di edifici. Tale superfici sono state mascherate utilizzando il comando Mask. Successivamente, sono stati inseriti i punti di riferimento come mostrato nella Figura 3.16.



Figura 3.16 Maschera e marker inseriti in una foto della rotatoria

È necessario aggiungere, come riferimento, un file .CSV; tale file contiene i nomi e le coordinate di ogni punto ottenuti tramite il rilievo topografico. I marker individuati nelle foto devono avere lo stesso nome presente nel file aggiunto.

La nuvola dei punti è stata generata allineando le foto rispetto ai punti di riferimento, utilizzando un gruppo di 48 immagine scattate con la Nikon.

Photoscan ha elaborato una nuvola finale di 287549 punti rappresentata nella Figura 3.17.

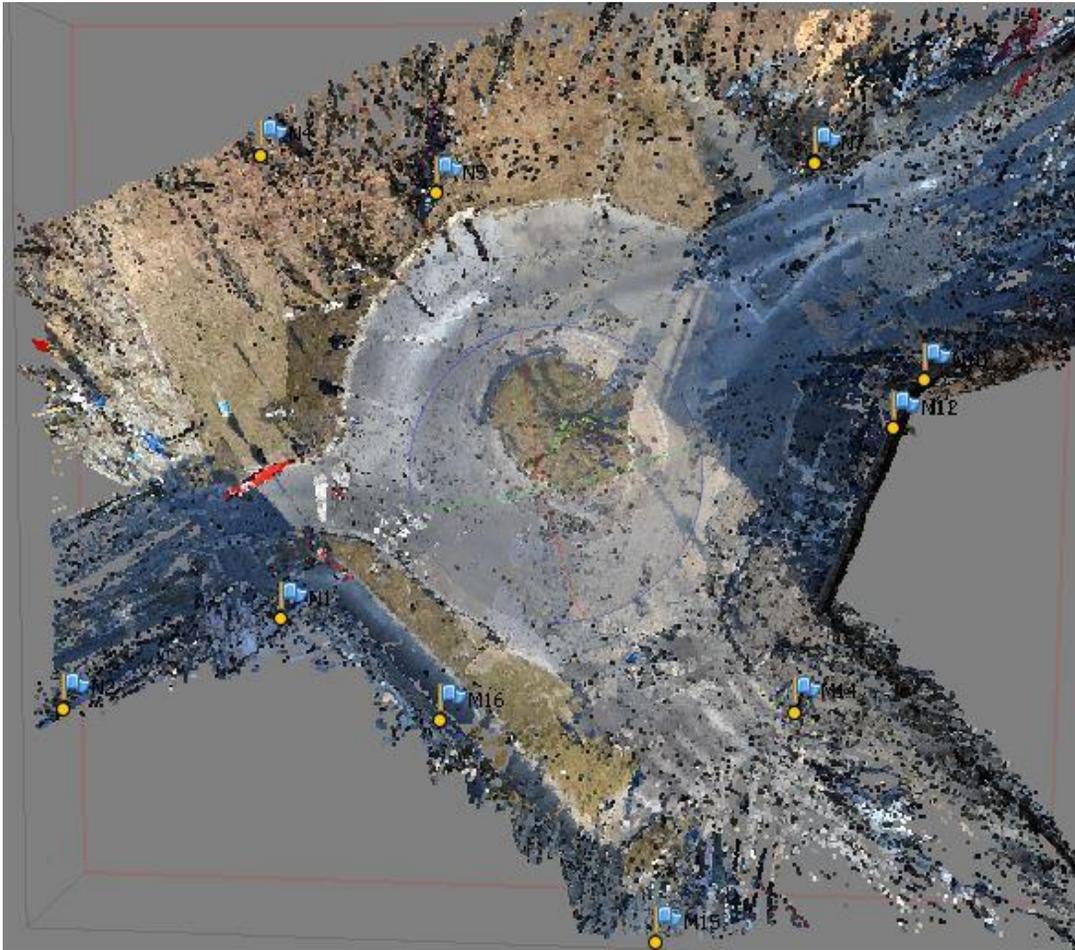


Figura 3.17 Nuvola dei punti creata usando le foto scattate con la Nikon Reflex

Nella sezione References è possibile visualizzare gli errori dopo la creazione della nuvola: il software calcola un errore in millimetri per ogni marker, poi calcola un errore totale che in questo caso è di 0.0151 metri (Tabella 3.4). Tale errore può essere accettabile fino a 5 centimetri.

Dalla nuvola dei punti si può partire per creare la Mesh e poi creare la texture utile per avere un modello a tre dimensione il più dettagliato possibile. In seguito, è possibile generare DEM e ortofoto.

Tabella 3.4 Errori calcolati da Photoscan per la nuvola creata delle foto scattate con la Nikon reflex

Punto	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error(m)
N5	397874.3	4992093	272.8959	0.012096
N6	397894.9	4992101	273.2131	0.011248
N7	397894.4	4992090	273.5561	0.019214
N4	397865.5	4992097	272.9871	0.015149
N3	397843.2	4992084	273.2436	0.014699
N11	397895.7	4992075	272.6661	0.007167
M14	397887.2	4992062	273.4355	0.021236
M15	397877	4992050	272.4806	0.02104
N2	397847.5	4992070	273.6213	0.021154
N1	397860.8	4992072	273.5079	0.0128
M16	397868	4992065	272.3817	0.009823
N10	397897.9	4992077	271.9709	0.012571
N8	397914.9	4992103	272.6979	0.018698
N9	397921.9	4992082	272.9205	0.014566
M12	397895.7	4992075	272.6657	0
Total error (m)				0.015188

Video registrati tramite action cam

Utilizzando la fotocamera Garmin Virb, sono stati registrati dei video da diversi punti, trasformati in frame usando uno script Matlab.

Sono stati inseriti i parametri della Garmin, ottenuti tramite la calibrazione. Dopo aver caricato 47 foto e aggiunti i punti di riferimento e le maschere dove è necessario, si prosegue con la stessa procedura di prima, cioè allineando le foto, e creando la nuvola formata da 227345 punti (Figura 3.18).

La Tabella 3.5 mostra i valori degli errori ricavati durante la creazione della nuvola. L'errore ottenuto usando questi frame è di 0.0263 metri, valore accettabile.

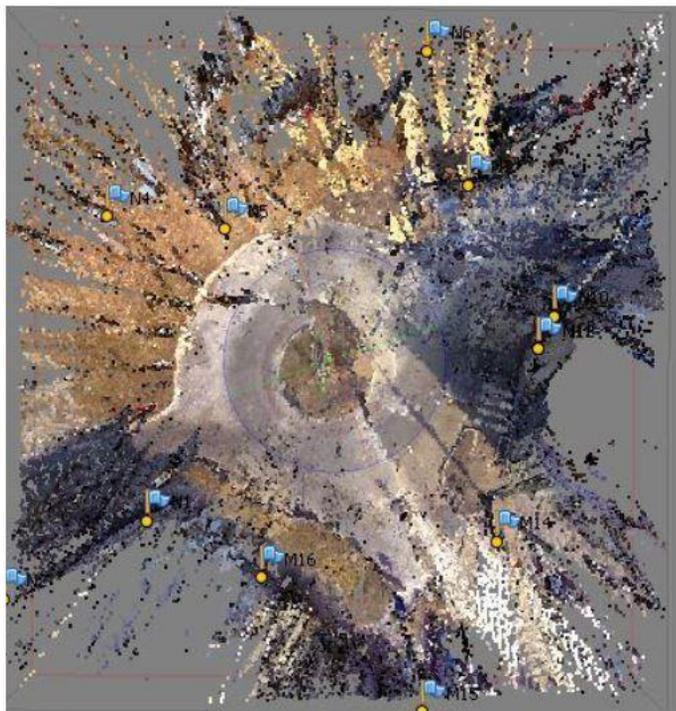


Figura 3.18 La nuvola dei punti creata usando i frame

Tabella 3.5 Errori calcolati da Photoscan per la nuvola creata dei frame

Punto	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error(m)
M16	397867.9516	4992064.848	272.38174	0.01107
N5	397874.3348	4992092.881	272.89594	0.012769
N11	397895.6897	4992075.235	272.66605	0.005836
N7	397894.4016	4992089.781	273.55614	0.011055
N6	397894.9014	4992101.36	273.21305	0.01692
M14	397887.2287	4992061.527	273.43551	0.016433
N10	397897.9172	4992077.352	271.9709	0.013408
N9	397921.8539	4992082.443	272.92051	0.066451
N8	397914.9157	4992103.427	272.69793	0.041424
M15	397877.0269	4992050.178	272.48061	0.009421
N3	397843.2042	4992084.419	273.24361	0.009391
N4	397865.5065	4992096.982	272.98714	0.009982
N1	397860.7973	4992072.364	273.50794	0.053038
N2	397847.5489	4992070.087	273.62125	0
M12	397895.6916	4992075.237	272.66572	0
Total error (m)				0.02633

3.4.3 Intersezione

Per Creare la nuvola dei punti tridimensionale nel caso dell'intersezione tra via Torricelli e via Cassini, sono state usate le stesse macchine fotografiche utilizzate nel caso della rotatoria, una Nikon Reflex e una action cam Gramin Virb.

Foto scattate con fotocamera reflex

Caricando 48 immagine scattate attraverso la macchine fotografica Nikon Reflex da diversi punti e seguendo la stessa procedura di prima, è possibile creare una nuvola di punti.

Anche per queste immagini, si è seguita la stessa procedura, identificando i punti di riferimento e mascherando gli elementi che possano provocare confusione per il software. Successivamente, si è proceduto all'allineamento delle immagini e alla creazione della nuvola dei punti rappresentata nella Figura 3.19, formata da 1658456 punti.

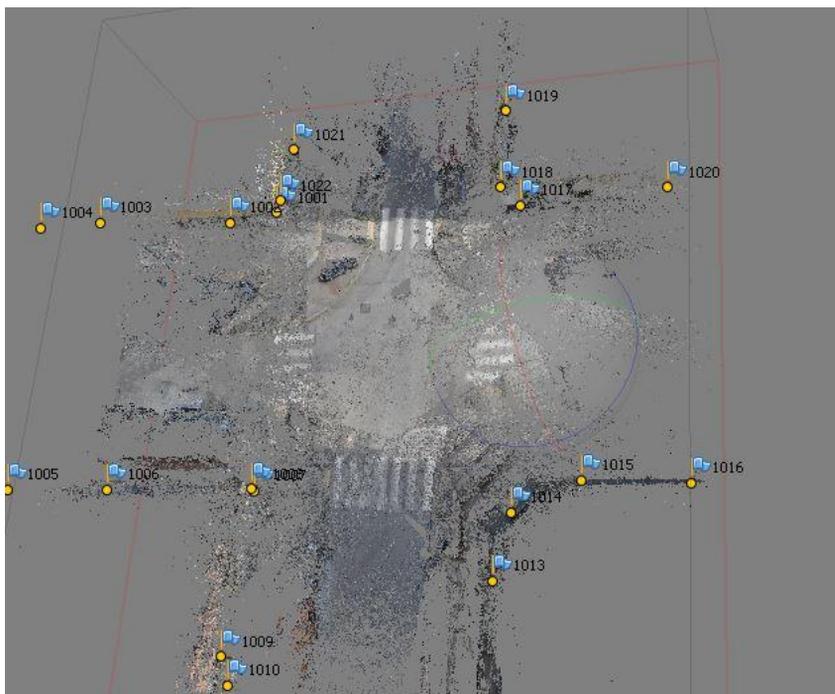


Figura 3.19 Nuvola creata da Photoscan con le foto della Nikon

Gli errori sono rappresentati nella Tabella 3.6. E' stato calcolato un errore totale di circa 4 cm, un errore abbastanza accettabile.

Tabella 3.6 Errori calcolati da Photoscan per la nuvola creata delle foto della Nikon

Punto	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error(m)
1001	100.0007	115.975	101.7571	0.014217
1002	96.2351	116.9802	100.7827	0.010548
1003	87.6319	119.1788	102.2382	0.013031
1004	83.1015	120.3904	102.0313	0.012494
1005	79.876	102.5511	101.6937	0.015217
1006	86.6346	100.776	101.2905	0.020197
1007	96.0083	98.335	100.6109	0.018149
1008	96.2953	98.0848	101.6847	0.012663
1009	93.412	88.7108	101.6772	0.042947
1010	93.8883	86.8854	102.1631	0.061569
1011	92.1347	79.3514	101.5775	0.150533
1012	107.7175	79.5973	102.0028	0.06445
1013	109.7293	89.1649	101.0316	0.008812
1014	111.573	92.5604	101.5129	0.009656
1015	115.9335	93.1394	101.8873	0.019934
1016	121.7194	91.6235	101.0373	0.023747
1017	115.514	111.8425	100.5275	0.01426
1018	114.7152	112.8562	101.5791	0.010088
1019	115.9513	118.5845	100.9234	0.026262
1020	124.6344	109.4669	101.4656	0.005934
1021	101.54	120.5552	101.3454	0.009749
1022	100.423	116.6045	102.0625	0.021067
	Total error (m)			0.040965

Frame estratti dei video del action cam

Allo scopo di elaborare una nuvola di punti del luogo di interesse tramite il software PhotoScan, sono stati estratti i frame dei video registrati da tutti e quattro gli angoli dell'intersezione (Figura 3.20).



Figura 3.20 Punti di ripresa nell' intersezione

Con il codice Matlab, estratti i frame, sono stati creati gruppi (chunk) di immagini su PhotoScan. Ogni gruppo contiene i frame estratti dai video registrati dallo stesso punto, allo scopo di non far confondere il software.

Caricando i frame ed elaborando ogni chunk, si genera la nuvola dei punti allineando i frame. In questo caso, si sono ottenuti dei risultati diversi rispetto a quelli della rotondella: le nuvole elaborate sono disturbate e hanno degli errori elevati che non sono accettabili.

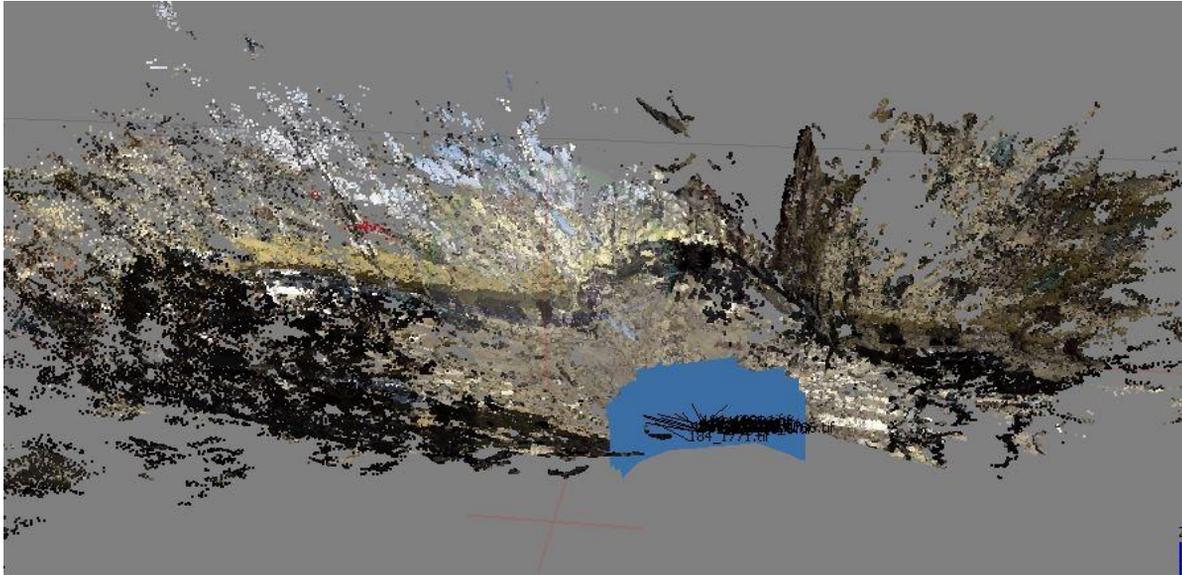


Figura 3.21 Nuvola dei punti creata da PhotoScan usando i frame dei video registrati dal punto 1

Nella Figura 3.21, è riportata la nuvola dei punti elaborata caricando 29 frame dei video registrati del punto di rilievo numero 1. I rettangoli blu rappresentano i fotogrammi; i quali hanno origine dallo stesso punto, cioè il punto 1. Questa nuvola di 258154 punti, come si vede nella figura, è molto disturbata, come si può ben notare nella Tabella 3.7, la quale mostra i valori degli errori relativi ad ogni punto di riferimento e un errore totale per tutta la nuvola. Questo errore vale circa 30 cm che è molto elevato e non è accettabile.

Tabella 3.7 Errori calcolati da Photoscan per la nuvola creata dei frame dal punto 1

Punto	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error(m)
1017	115.514	111.8425	100.5275	0.165957
1020	124.6344	109.4669	101.4656	0.110732
1018	114.7152	112.8562	101.5791	0.216528
1022	100.423	116.6045	102.0625	0.126306
1021	101.54	120.5552	101.3454	0.142726
1006	86.6346	100.776	101.2905	1.310761
1008	96.2953	98.0848	101.6847	0.059852
1007	96.0083	98.335	100.6109	0.031214
1005	79.876	102.5511	101.6937	0
1009	93.412	88.7108	101.6772	0
1015	115.9335	93.1394	101.8873	0
1014	111.573	92.5604	101.5129	0
1010	93.8883	86.8854	102.1631	0
1011	92.1347	79.3514	101.5775	0
1016	121.7194	91.6235	101.0373	0
1001	100.0007	115.975	101.7571	0.10225
1002	96.2351	116.9802	100.7827	
1013	109.7293	89.1649	101.0316	0
1012	107.7175	79.5973	102.0028	0
1003	87.6319	119.1788	102.2382	0
1004	83.1015	120.3904	102.0313	0.521936
1019	115.9513	118.5845	100.9234	0.664026
	Total error (m)			0.300737

Il secondo esempio riportato nella Figura 3.22 mostra la nuvola dei punti usando dei frame di video registrati nel punto 4.

Tale nuvola è il frutto dell'elaborazione di un gruppo di 35 frame, che è formata di 2586643 punti , anche in questo caso, molto disturbata e con errori elevati riportati nella Tabella 3.8.

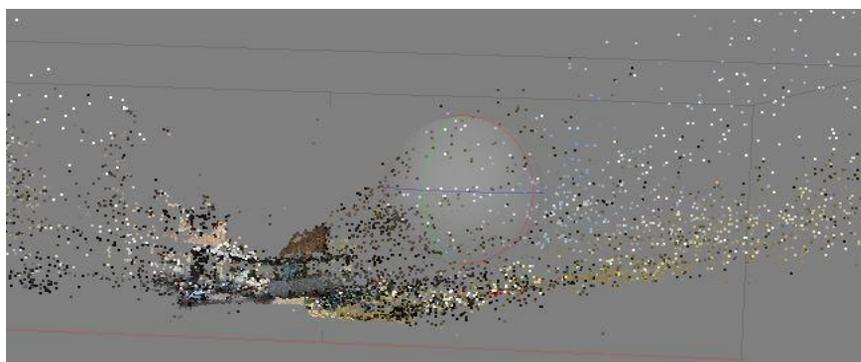


Figura 3.22 Nuvola dei punti creata da PhotoScan usando i frame dei video registrati dal punto 4

Tabella 3.8 Errori calcolati da Photoscan per la nuvola creata dei frame dal punto 4

Punto	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error(m)
1009	93.412	88.7108	101.6772	0.020495
1010	93.8883	86.8854	102.1631	0.007469
1011	92.1347	79.3514	101.5775	0.025599
1008	96.2953	98.0848	101.6847	0.027325
1012	107.7175	79.5973	102.0028	0.556655
1007	96.0083	98.335	100.6109	0.025464
1006	86.6346	100.776	101.2905	0.005662
1003	87.6319	119.1788	102.2382	0.100882
1004	83.1015	120.3904	102.0313	0.265473
1005	79.876	102.5511	101.6937	0.024538
1002	96.2351	116.9802	100.7827	0.281365
1001	100.0007	115.975	101.7571	3.309509
1021	101.54	120.5552	101.3454	0.06731
1014	111.573	92.5604	101.5129	0
1015	115.9335	93.1394	101.8873	0
1017	115.514	111.8425	100.5275	0
1022	100.423	116.6045	102.0625	0
1013	109.7293	89.1649	101.0316	0
1016	121.7194	91.6235	101.0373	0
1018	114.7152	112.8562	101.5791	0
1019	115.9513	118.5845	100.9234	0
1020	124.6344	109.4669	101.4656	0
Total error (m)				0.720802

La tabella mostra un errore totale di circa 72,1 cm, che è troppo elevato e non accettabile.

I punti con errori 0m sono dei punti di riferimento non coinvolti nel processo di elaborazione, in quanto non visibili dal punto di ripresa. Per esempio, il punto 1014 (punto di riferimento) è visibile dal punto 1 ma non dal punto 4 (punti di ripresa).

Tali risultati giustificano che, nel caso della intersezione lineare, i modelli creati tramite frame estratti dai video, non sono stati considerati nelle prossime fasi di lavoro.

PhotoScan permette di estrarre le nuvole elaborate nel formato .txt. Ogni nuvola creata con un errore accettabile è stata estratta in tale formato per poter essere importata nel software CloudCompare nelle prossime fasi di lavoro.

3.5 Confronto tra le nuvole considerate

3.5.1 Rotatoria

Le nuvole ottenute da PhotoScan, tramite le foto scattate e video registrati usando la Nikon e la action cam Garmin Virb, sono state confrontate con quella generata da Scene, considerata come nuvola di riferimento.

3.5.1.1 Nuvola derivata dalle immagine

In questa sezione viene confrontata la nuvola dei punti creata da PhotoScan elaborando delle immagine scattate tramite Nikon Reflex, costituita da 287549 punti con la nuvola di riferimento, ottenuta tramite Scene.

Entambe le nuvole, sono state caricate sul software CloudCompare nel formato .txt.

Cliccando sul comando “Align” (point pairs picking), il software chiede di assegnare a ogni nuvola il suo ruolo: da allineare e di riferimento.

Lo step successivo è scegliere e inserire i punti di riferimento. Sono stati scelti tre punti: N6, N10 e M16.

Si inseriscono le coordinate di questi punti come mostrato nella Figura 3.23.

	X	Y	Z	Error	
A0	397874	4.99209e+06	272.896	0	<input type="checkbox"/>
A1	397898	4.99208e+06	271.971	0	<input type="checkbox"/>
A2	397868	4.99206e+06	272.382	0	<input type="checkbox"/>

	X	Y	Z	Error	
R0	397874	4.99209e+06	272.896	0	<input type="checkbox"/>
R1	397898	4.99208e+06	271.971	0	<input type="checkbox"/>
R2	397868	4.99206e+06	272.382	0	<input type="checkbox"/>

adjust scale Rotation: Tx Ty Tz
 auto update zoom

Figura 3.23 Punti di riferimento usati per il confronto

Il punto inserito è contraddistinto sulla corrispondente nuvola, attraverso la lettera A, se esso fa parte della nuvola da allineare, la lettera R, se è quella di riferimento (Figure 3.24 e 3.25). In tali figure sono visibili 3 punti sulla nuvola di riferimento (R0, R1 e R2) ed altri 3 sulla nuvola da confrontare (A0, A1 e A2).

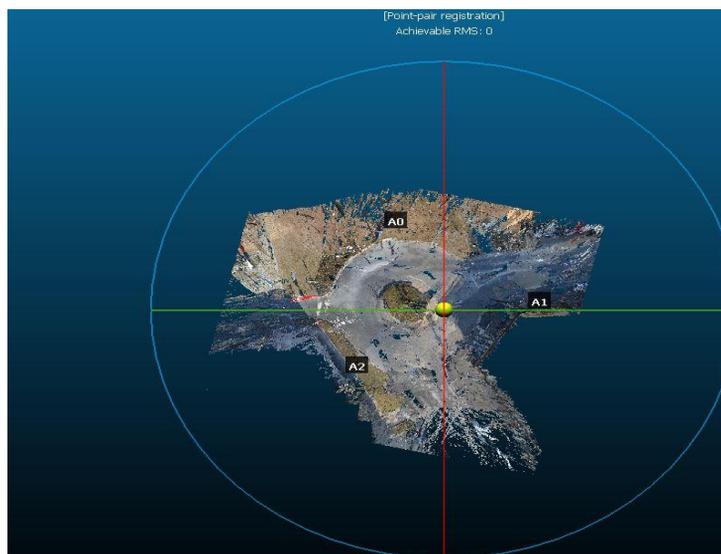


Figura 3.24 Punti di riferimento sulla nuvola da confrontare

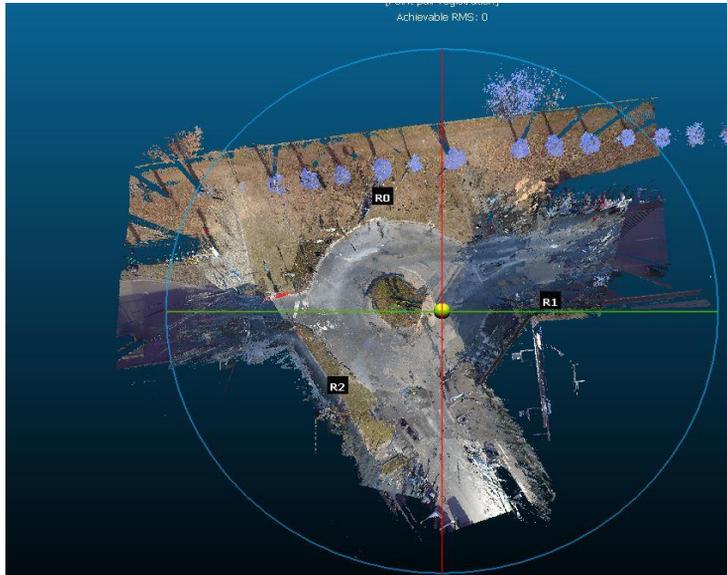


Figura 3.25 Punti di riferimento nella nuvola di riferimento

A questo punto, si può procedere con il calcolo della distanza tra le due nuvole, Cloud/Cloud. CloudCompare calcola la distanza tra i punti delle nuvole: per ogni punto della nuvola da allineare cerca il suo corrispondente in quella di riferimento e calcola la distanza tra la perpendicolare (distanza vera) e il punto più vicino (Figura 3.26) .

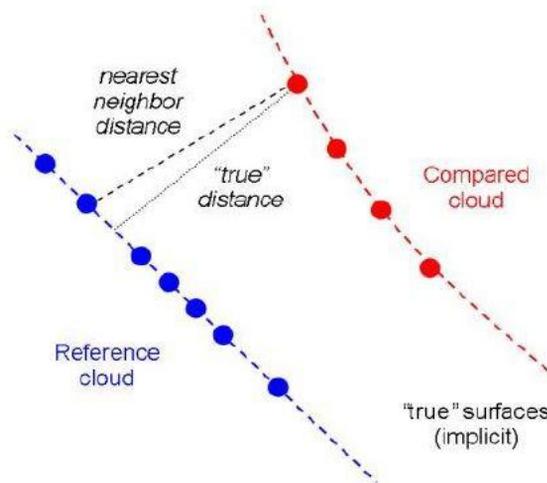


Figura 3.26 Comparazione tra le due nuvole [14]

Dopo aver terminato il processo, CloudCompare genera i risultati attraverso una scala cromatica, dove blu indica una distanza vicina e rosso una distanza lontana.

Nella Figura 3.27, si illustrano i risultati di questo confronto. Si può notare che la maggiore parte della nuvola confrontata è colorata di blu. In alcune parti, in particolare nelle zone estreme, è presente una colorazione verde. Questo può essere dovuto al fatto che, durante i rilievi fotografici, queste zone non siano state rilevate correttamente perchè di poco interesse per un'analisi di visibilità.

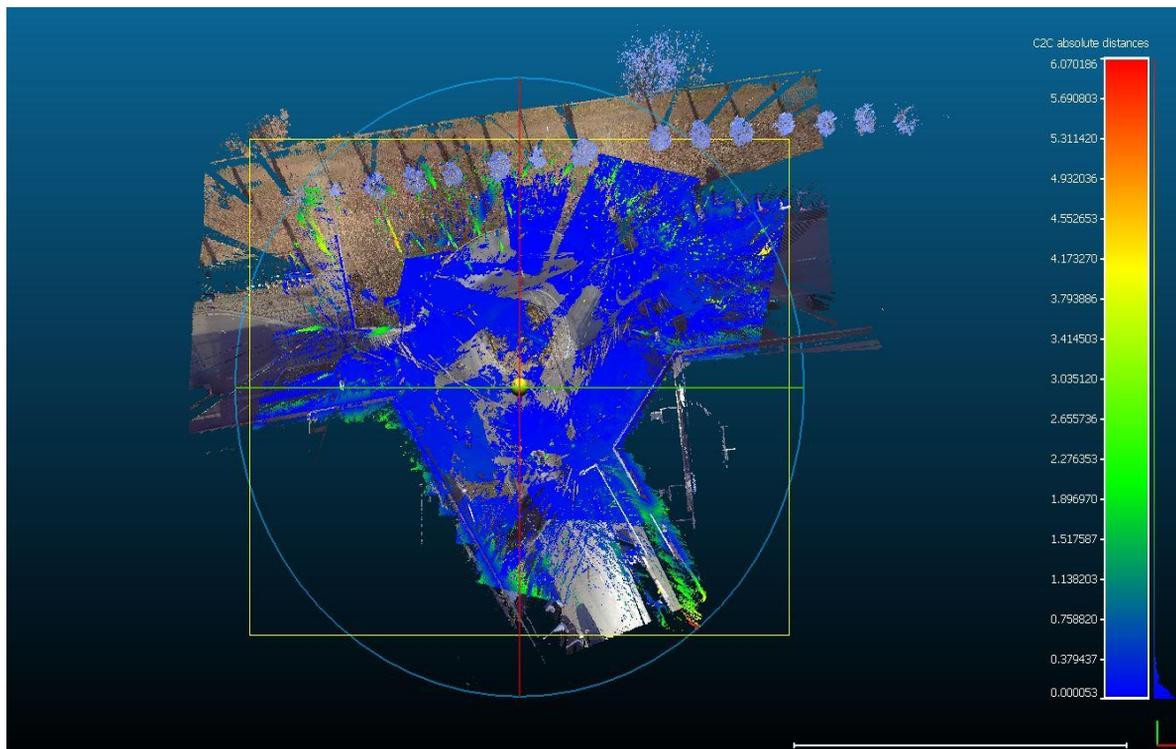


Figura 3.27 Risultati del confronto della nuvola elaborata tramite immagini nel caso della rotatoria

Il software usato permette anche di visualizzare i risultati staticamente tramite distribuzione di Gauss, fornendo un istogramma che mostra il numero di punti con una determinata distanza (cloud/cloud distance). In questo caso, l'istogramma (Figura 3.28) conferma quello visto nella figura precedente: la maggiore parte dei punti ha una distanza minore di 0.15cm con una media di distanza di 0.147633cm e una standard deviation di 0.199130.

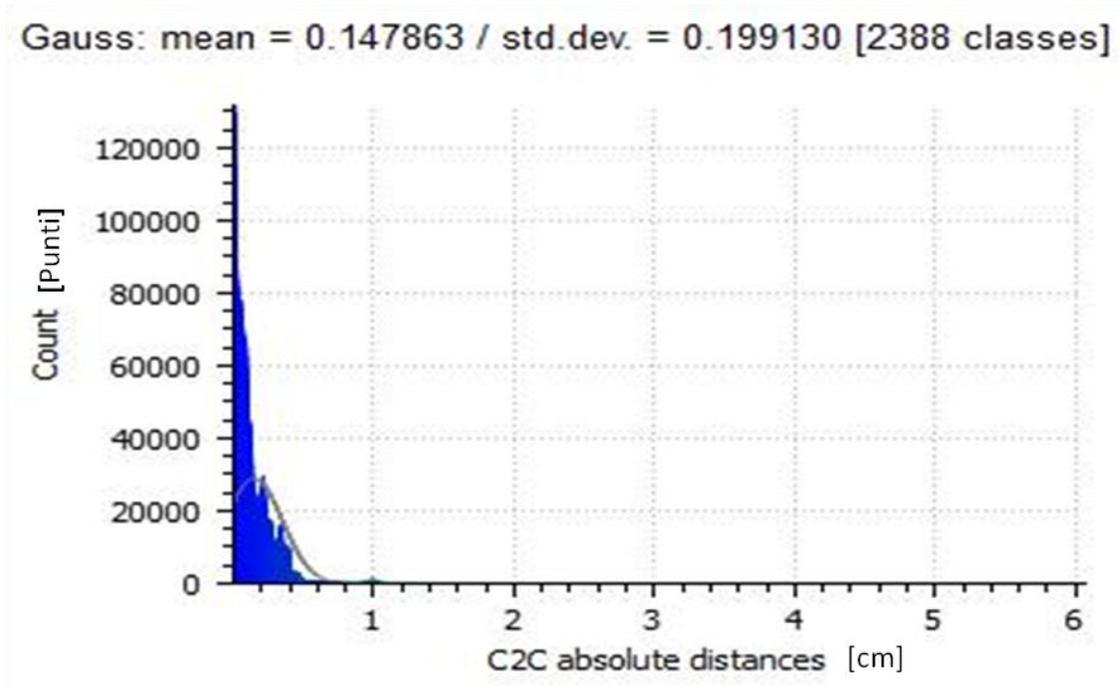


Figura 3.28 Distanze tra i punti delle nuvole nel caso della rotatoia (nikon)

3.5.1.2 Nuvola creata dai video frame

La seconda nuvola della rotatoria è stata generata usando i frame estratti dai video. Tale nuvola è formata da 227345 punti ed è stata confrontata con la stessa nuvola usata nel caso precedente, cioè quella elaborata da Scene.

Come punti di riferimento sono stati usati gli stessi punti del caso precedente, i punti N6, N10 e M16.

Procedendo con l'elaborazione, Cloud Compare mostra i risultati del confronto (Figura 3.29 sempre usando la stessa scala cromatica. Nella Figura 3.29, si nota che la maggiore parte dei punti è colorata in blu anche se ci sono pochissimi punti verdi che possono essere trascurati.

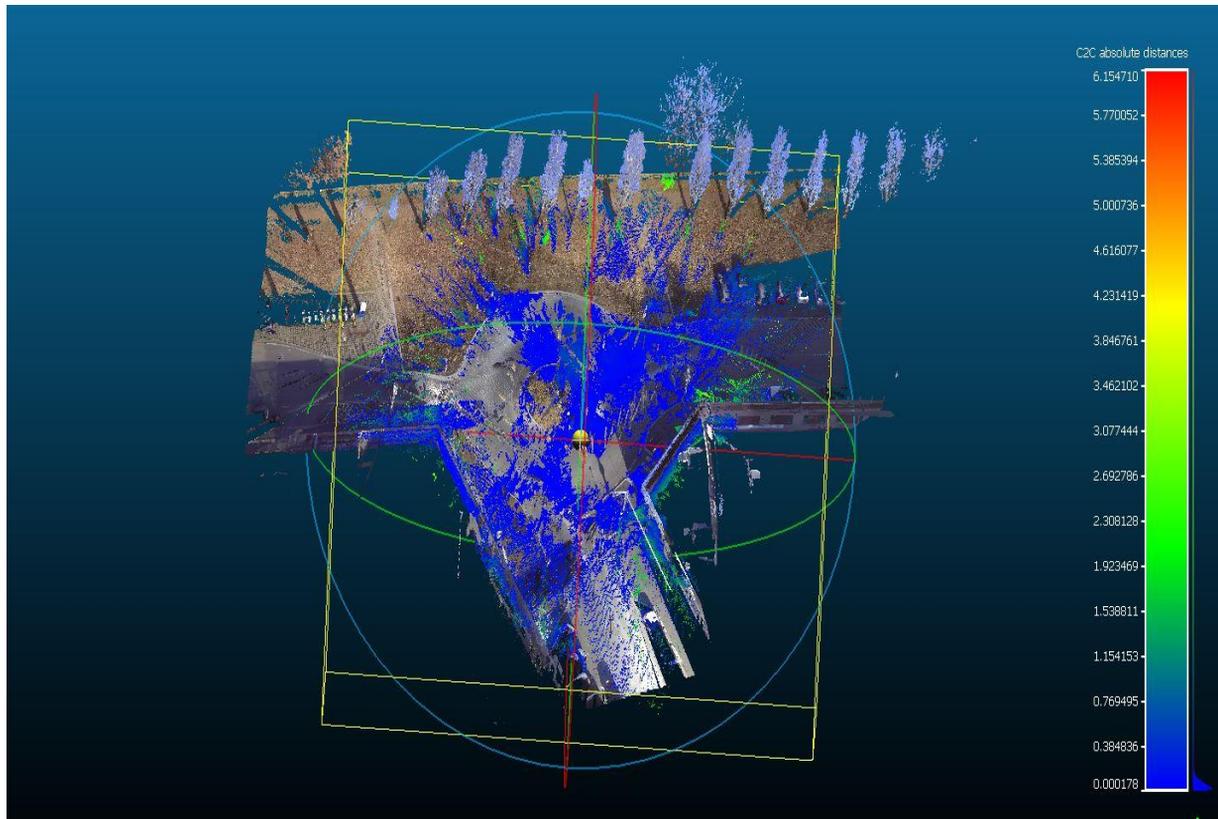


Figura 3.29 Risultati del confronto della nuvola elaborata dei frame nel caso della rotatoria

L'istogramma (Figura 3.30) mostra che il maggior numero dei punti ha una distanza prossima a zero, una media di distanza di 0.102cm e un standard deviation di 0.18476.

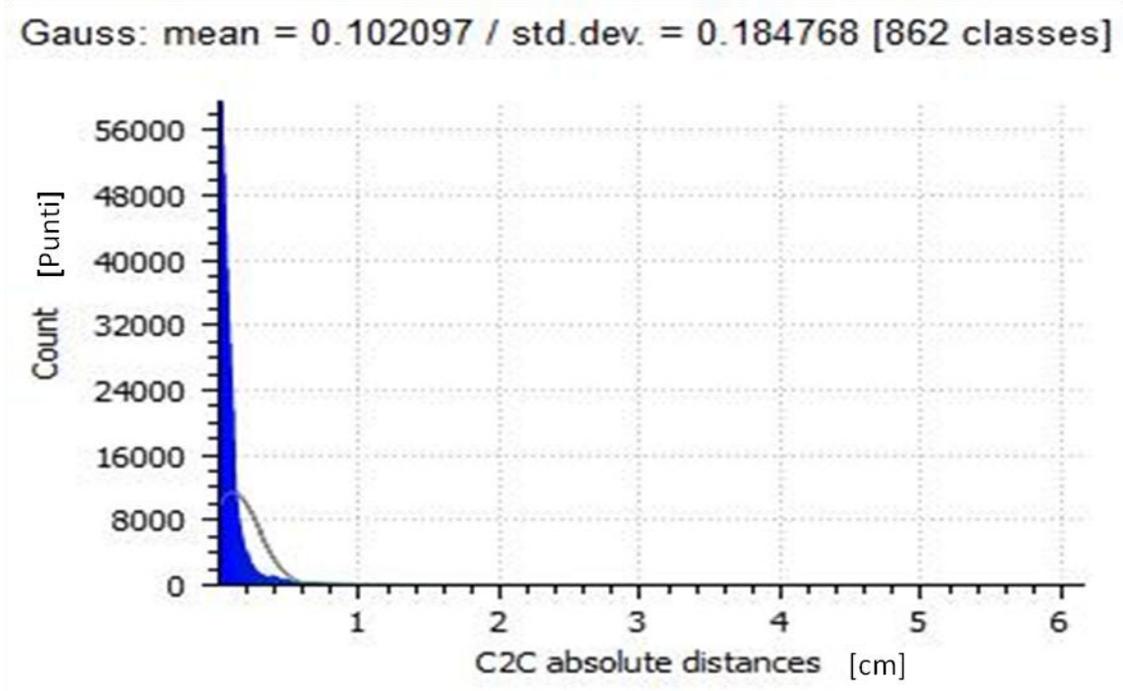


Figura 3.30 Distanze tra i punti delle nuvole nel caso della rotatoria (frame)

Si può notare da questi due confronti, che, tra le nuvole ottenute elaborando i fotogrammi (Nikon e Gramin Virb) e la nuvola ottenuta elaborando le scansioni di un Laser scanner, entrambe le nuvole danno un risultato abbastanza simile; anche nella nuvola elaborata dalle immagini della Nikon si manifestano meno spazi vuoti, ovvero zone dove non ci sono punti della nuvola; questo potrebbe essere dovuto al fatto che la risoluzione della Nikon è maggiore di quella della Garmin Virb.

3.5.2 Intersezione

Nel caso dell'intersezione, con PhotoScan, è stata estratta un'unica nuvola di punti, quella ottenuta dopo l'elaborazione delle immagine scattate usando la Nikon Reflex. Tale nuvola, formata da 1658456 punti, è stata confrontata con la nuvola di riferimento elaborata da Scene.

Per completare la registrazione, sono stati scelti 4 punti: 1001, 1007, 1011 e 1020 (Figura 3.31). Alla fine della registrazione si ottiene un modello (Figura 3.32), dove la nuvola rossa è la nuvola da allineare e la quella gialla è di riferimento.

	X	Y	Z
A0	100.001	115.975	101.757
A1	92.1347	79.35	101.58
A2	124.634	109.467	101.466
A3	96.0083	98.335	100.611

	X	Y	Z
R0	100.001	115.975	101.757
R1	92.13	79.35	101.58
R2	124.634	109.467	101.466
R3	96.0083	98.335	100.611

Figura 3.31 Punti di riferimento usati per il confronto nel caso dell'intersezione

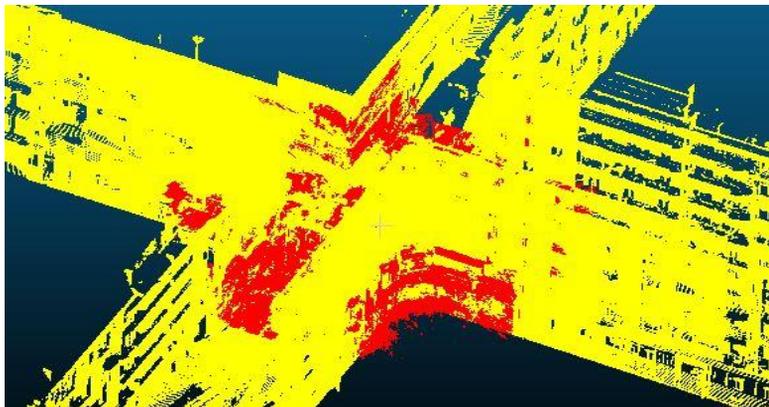


Figura 3.32 Nuvole dopo la fine delle registrazioni

Successivamente, è possibile effettuare il confronto calcolando la distanza tra i punti delle nuvole, cloud/cloud distance, e vedere i risultati in scala cromatica. I risultati sono illustrati nella Figura 3.33, da cui si può notare che i punti della nuvola da confrontare sono quasi tutti colorati in blu, il che significa che essi si trovano nella stessa posizione in entrambe le nuvole.

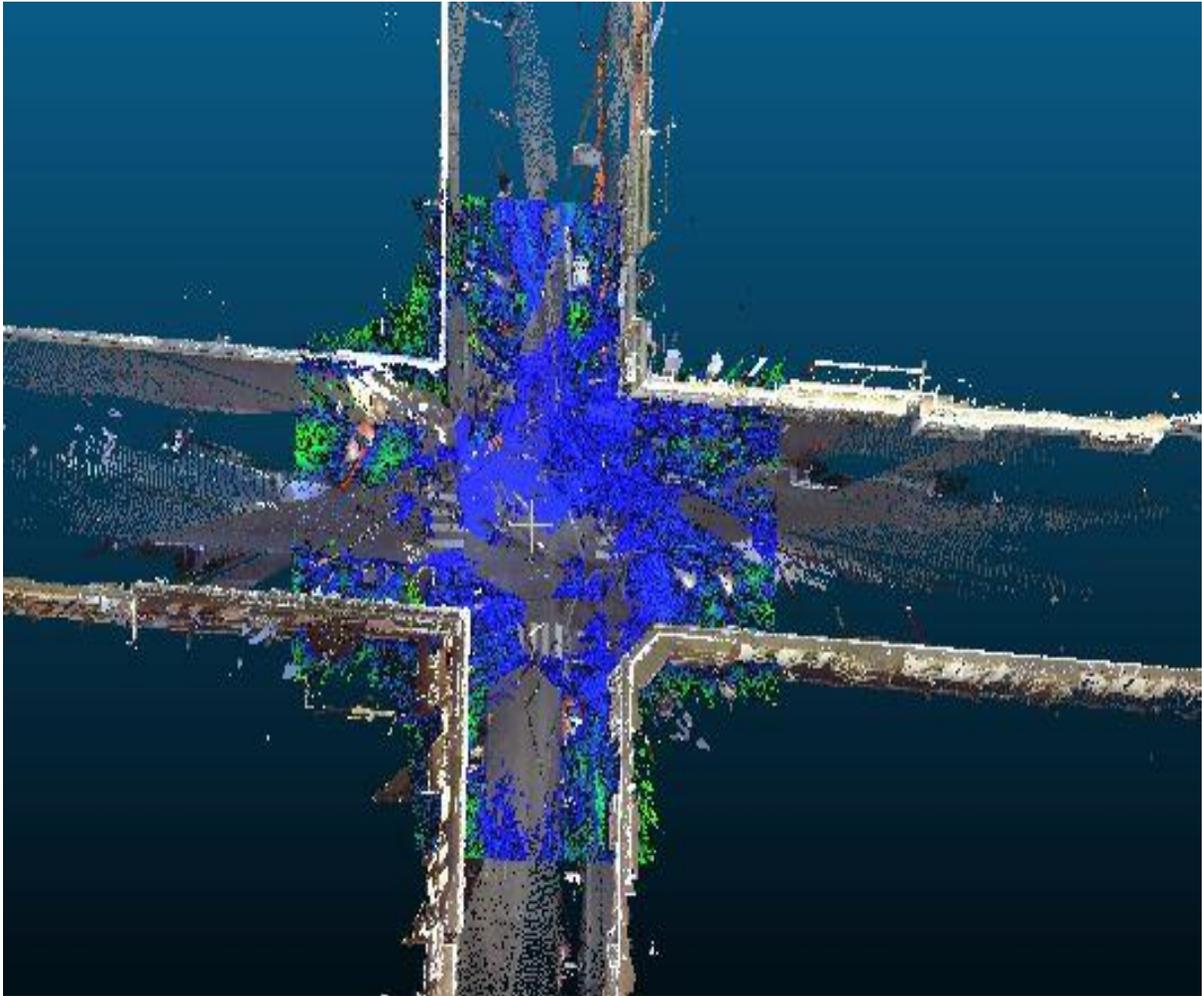


Figura 3.33 Risultati del confronto nel caso dell'intersezione

L'istogramma che rappresenta la distribuzione di Gauss (Figura 3.34) mostra gli stessi risultati. Quasi tutti i punti hanno una distanza minore di 0.8 cm e il maggior numero dei punti ha una distanza minore della media di 0.152cm. La standard deviation è pari a 0.204155.

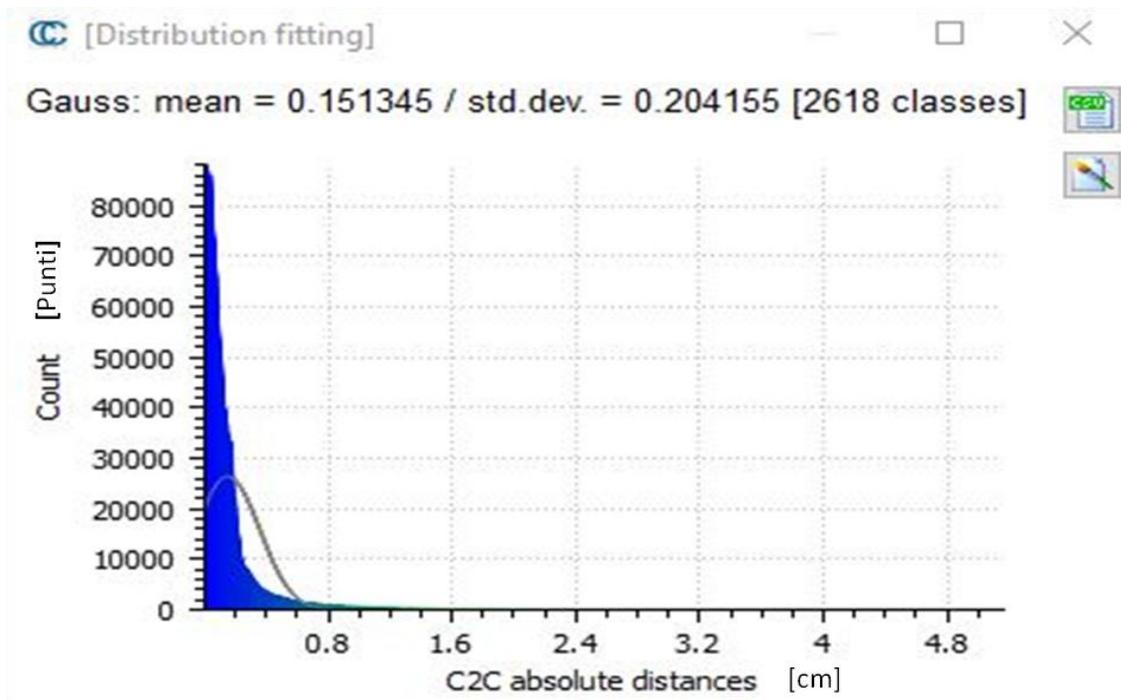


Figura 3.34 Distanze tra i punti delle nuvole nel caso dell'intersezione

Analizzando il risultato ottenuto da questo confronto, si vede che, anche nel caso dell'intersezione, in un incrocio dove sono presenti ostacoli notevoli, edifici e macchine parcheggiate, la nuvola creata dalle immagine della Nikon mostra ancora buon risultati con errori accettabili.

3.6 Creazione della mesh

Per realizzare una mesh che includa tutti gli elementi presenti nei luoghi di interesse, è stato deciso di utilizzare delle nuvole di punti ottenute attraverso due metodologie: le prime derivate da fotogrammi e le altre derivate da scansioni laser scanner.

Nella Figura 3.35 si illustrano gli step per generare la mesh. Si parte dalle immagini scattate nella fase del rilievo fotogrammetrico e georeferenziate tramite i punti di riferimento. Le nuvole derivate da tali immagini con errore minore di 5 cm sono considerate affidabili ed è stato effettuato il confronto con la nuvola creata dalle scansioni del laser scanner. L'ultima fase è creare la mesh derivata da ogni nuvola.

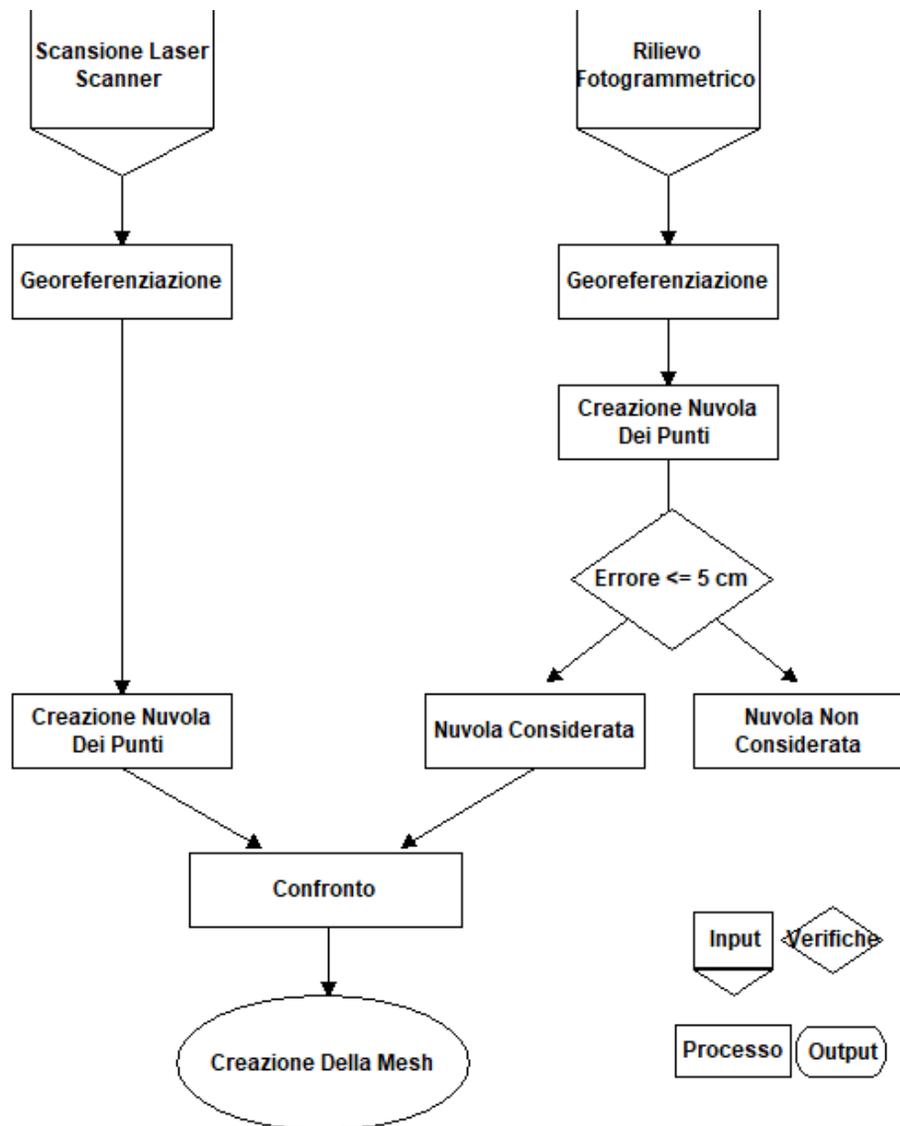


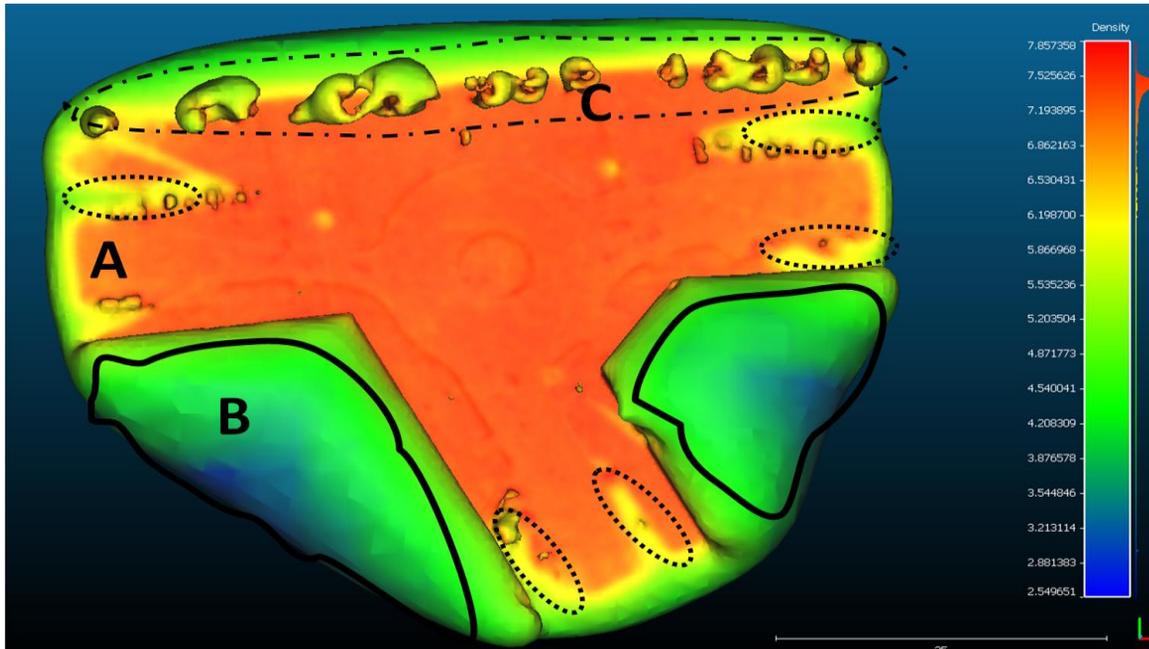
Figura 3.35 Workflow per la generazione della mesh

La mesh è una collezione di vertici e di facce che definiscono la forma di un oggetto in un ambito tridimensionale. Il concetto si basa sull'idea di collegare punti nello spazio creando dei triangoli per formare una superficie. È stato deciso di creare la mesh, usando il software Cloud Compare tramite l'interfaccia "Poisson Surface Reconstruction". Il comando richiede di inserire dei parametri che dipendono dalla qualità della nuvola e che influenzano la qualità del risultato. Il primo parametro "Octree depth" aiuta ad avere più chiarezza al livello di risultati quando è più alto; si è deciso di elaborare le mesh con un valore uguale a 16. Il secondo parametro è "Sample per node", il quale dipende da quanto la

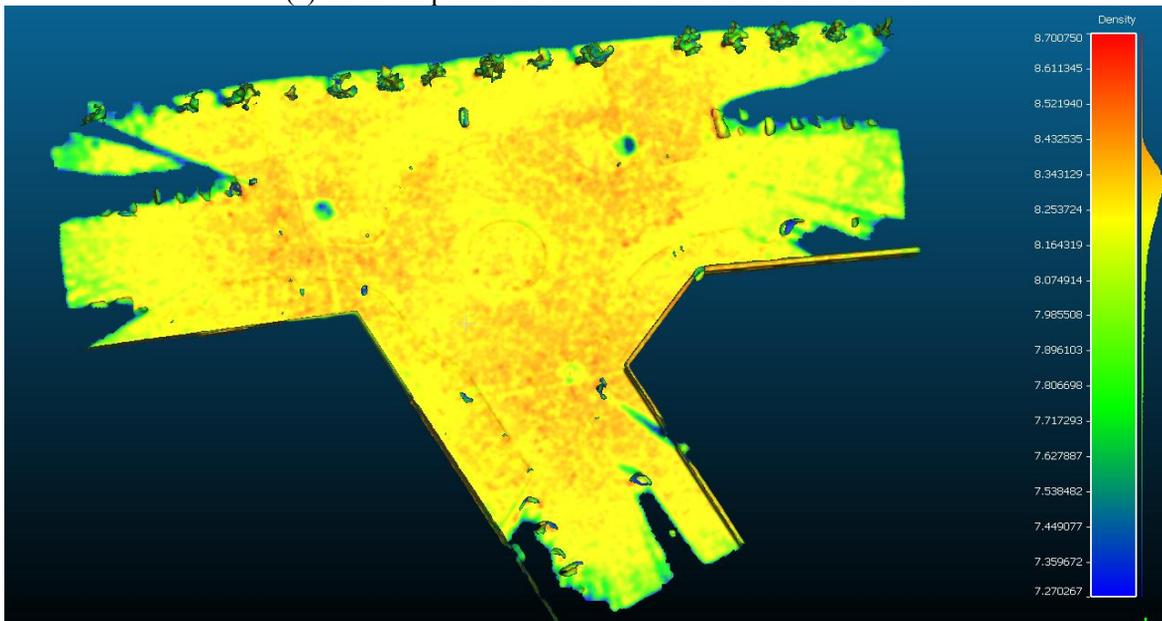
nuvola sia disturbata (da 1.5 a 5, se poco disturbata). Le nuvole usate sono state precedentemente filtrate; perciò è stato inserito un valore pari a 3.

Il software permette anche di avere la mesh in una scala di densità, cioè colorata rispetto a quella della superficie. Tale scala permette di effettuare anche un filtraggio della mesh elaborata, in modo tale da eliminare tutte le zone a bassa densità che possono modificare lo stato reale del luogo.

Le zone A nella Figura 3.36a sono le zone in cui si trovavano dei veicoli parcheggiati, e hanno un'alta riflessione. Le zone B, invece, sono state create dal software elaborando la mesh, collegando i punti che rappresentano le facciate degli edifici, creando dentro di essi dei triangoli che formano superfici non esistenti. Nelle zone C, sono state sopravvalutate le dimensioni degli alberi, considerando anche la loro ombra. Fissando un limite di densità, tali superfici sono state eliminate dalla mesh (Figura 3.36b). Nella Figura 3.36 viene rappresentata la mesh derivata dalla nuvola di punti di laser nel caso della rotatoria prima e dopo l'eliminazione di tali zone. Si nota la differenza tra la prima mesh, non filtrata, e la seconda filtrata attraverso la scala di densità. Si può vedere che la mesh filtrata è più realistica e chiara e ha una superficie più liscia.



(a) La mesh prima di eliminare le zone di bassa densità



(b) La mesh dopo aver eliminato le zone di bassa densità

Figura 3.36 Mesh della rotatoria creata tramite CloudCompare derivata della nuvola laser

Nelle Figure 3.37 e 3.38 sono rappresentate le mesh della rotatoria derivate dalle immagini fotogrammetriche, scattate utilizzando la Reflex e la action cam. Si può notare la differenza tra questi due modelli: quello della action cam è molto più limitato rispetto a quello della Reflex e contiene meno informazioni: le zone C identificate nella Figura 3.37 non sono presenti nella mesh derivata dalle immagini della Garmin (Figura 3.38). Nel modello derivato dalle immagini della Reflex (Figura 3.37), in termine di densità, si può notare che la bassa densità della superficie, zone individuate attraverso dei rettangoli sulle rispettive figure, si concentra nelle zone in cui c'è alta riflessione, ad esempio in corrispondenza delle finestre degli edifici. Invece, nel modello derivato dalle immagini dell'action cam, la bassa densità è presente alla fine del modello e nelle zone che hanno un'altezza maggiore di 1.5 metri, zone di nessun interesse nel caso di studio.

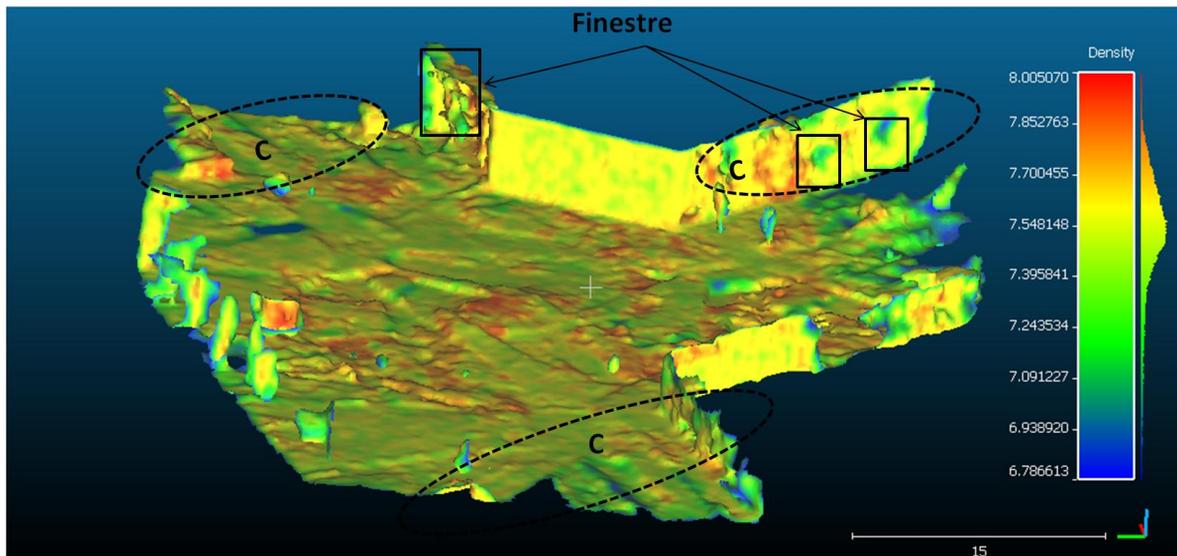
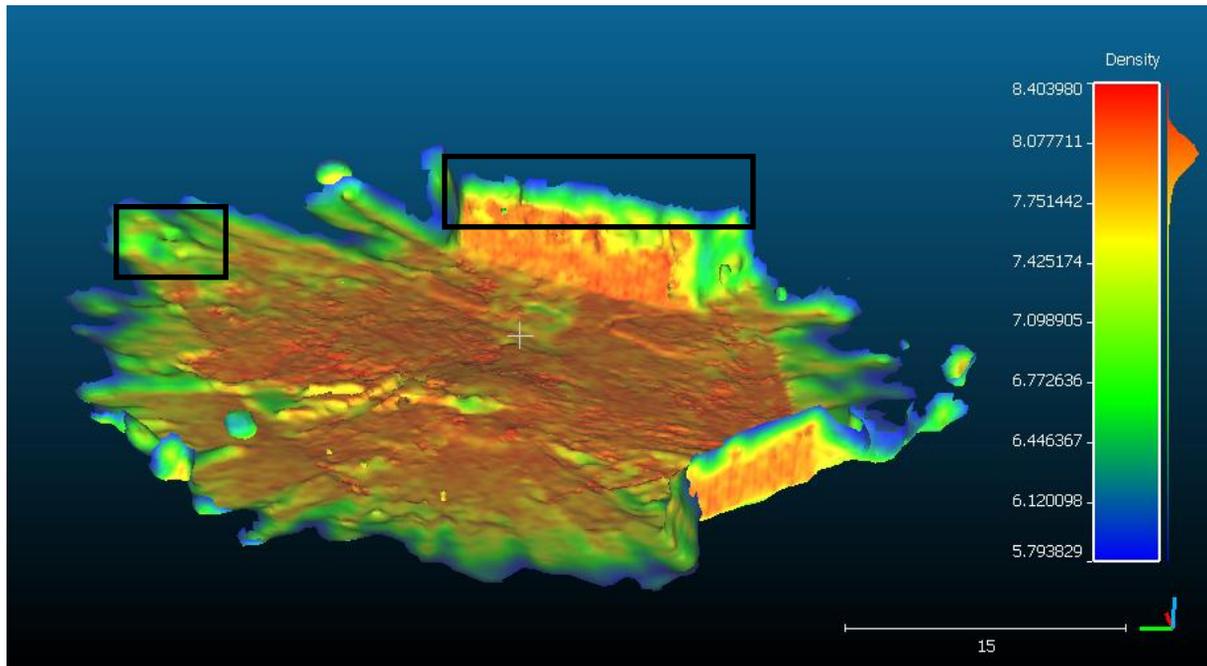


Figura 3.37 Mesh della rotatoria creata tramite CloudCompare derivata dalle immagine della Reflex. I rettangoli individuano zone a bassa densità. Le zone C sono solo presenti nel modello creato tramite la Reflex



action cam. I rettangoli individuano zone a bassa densità.

Nel caso dell'intersezione, ambito più complicato, dalle Figure 3.39 e 3.40, si nota la differenza tra i due modelli creati tramite le scansioni laser e le immagini della Reflex. In tali Figure, sono state identificate le zone di bassa densità nelle mesh. Tali zone includono gli oggetti con alta riflessione (finestre, veicoli) e le zone limite del modello. Nella zona D nelle Figure 3.39 e 3.40 è stata identificata la stessa zona in entrambi i modelli. Nel modello derivato dalle scansioni laser, tale zone è stata rappresentata in un modo più raffinato e dettagliato: si può notare la superficie piana del manto stradale e del marciapiede e la differenza di livello tra essi. Invece, nella Figura 3.40, le superfici non rappresentano lo stesso livello di accuratezza rispetto al modello precedente.

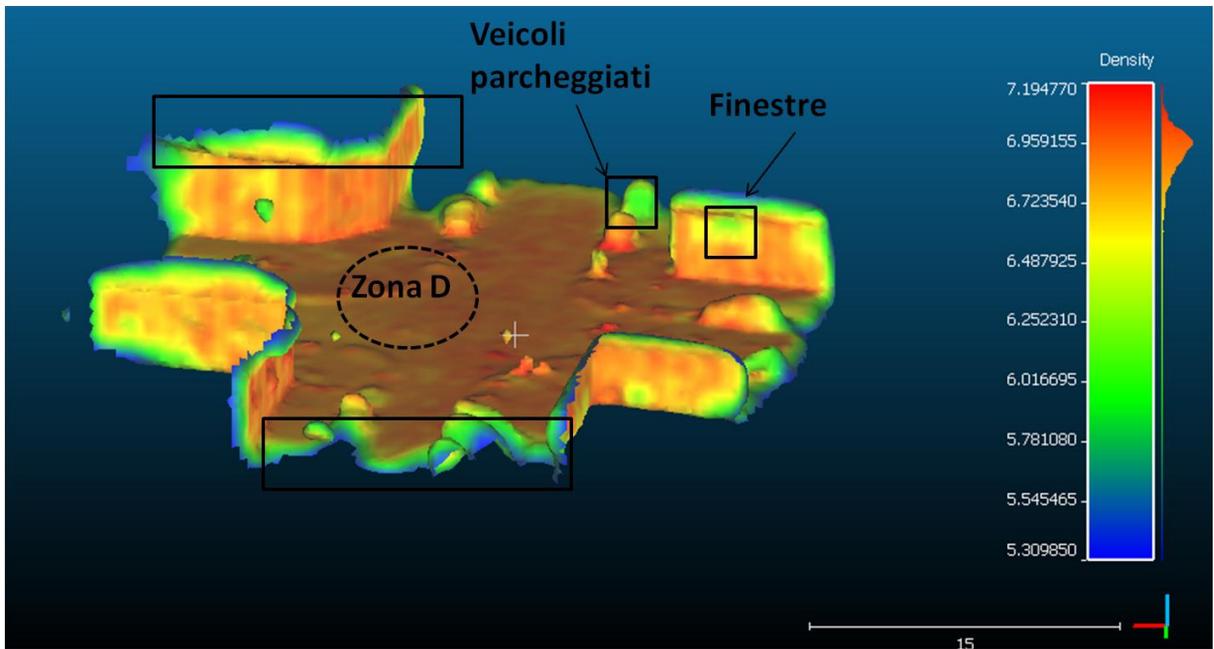


Figura 3.38 Mesh dell'intersezione creata tramite CloudCompare derivata della nuvola laser. I rettangoli individuano zone a bassa densità. La zona D individua la zona confrontata tra il modello laser e quello derivato dalle immagini

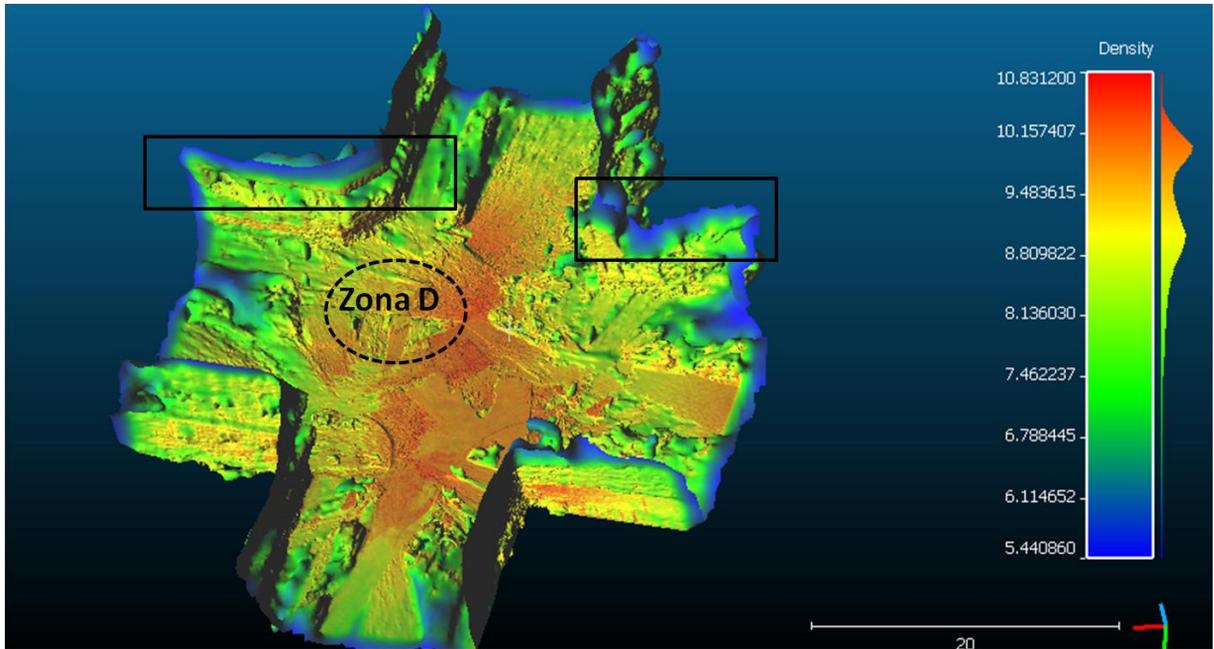


Figura 3.39 Mesh della intersezione creata tramite CloudCompare derivata dalle immagine della Reflex. I rettangoli individuano zone a bassa densità. La zona D individua la zona confrontata tra il modello laser e quello derivato dalle immagini

3.7 Formazione del DSM

Per effettuare le analisi di visibilità durante questo studio, è stato deciso di utilizzare il DSM che include tutti gli oggetti presenti nei luoghi di studio.

Il DTM rappresenta il modello del terreno (Figura 3.41). Tale modello è stato caricato in formato .tif su ArcScene, e può rappresentare la base per costruire il DSM aggiungendo gli elementi presenti: edifici, alberi, veicoli.



Figura 3.40 Il DTM della zona della rotatoria

Nei casi di studio, le condizioni di visibilità sono influenzate dagli edifici e dai veicoli parcheggiati. I modelli creati, anche se riflettono in buon modo i casi di studio, sono limitati alla zona delle intersezioni, sia nel caso dell'intersezione lineare che nel caso della rotatoria. Allo scopo di studiare la visibilità anche prima che il veicolo entri nell'intersezione, si è proceduto a rappresentare i veicoli parcheggiati sui lati della strada. Durante la determinazione della geometria stradale, sono stati tracciati i poligoni che rappresentano le zone di parcheggio e sono stati riportati su ArcScene (Figura 3.42). Tale software permette di trasformare tali poligoni 2D in blocchi 3D attribuendo loro un'altezza di 1.60 m, formando dei volumi (Figura 3.43).

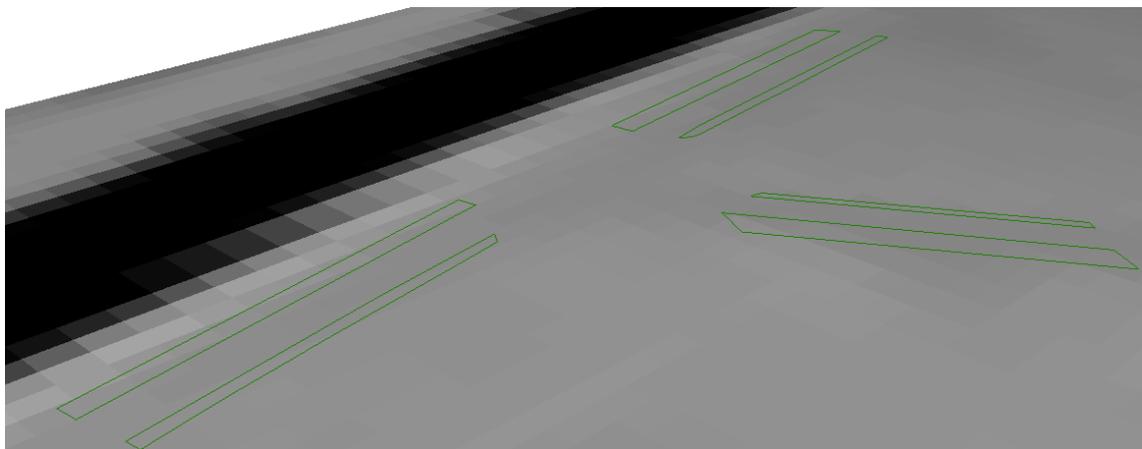


Figura 3.41 Rappresentazione 2D dei veicoli parcheggiati

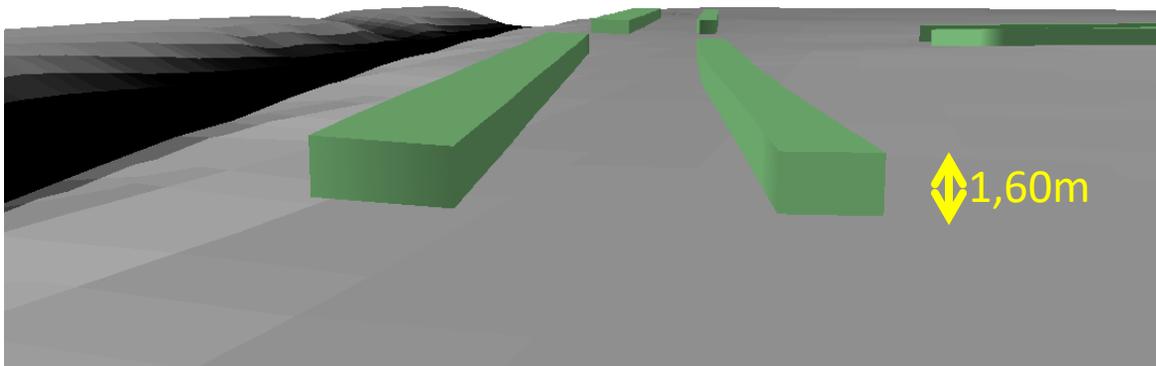


Figura 3.42 Rappresentazione 3D dei veicoli parcheggiati

Il passo successivo consente di caricare il modello tridimensionale georeferenziato creato in precedenza tramite scansioni laser o immagini. I modelli sono stati importati nel formato .dxf che contiene le informazioni geografiche, ovvero le coordinate. Una volta caricato, il modello è stato salvato su ArcScene come Multipatch. Tale formato può rappresentare aree e volumi in 3D, dando il vero volume a tutti gli elementi presenti nel modello.

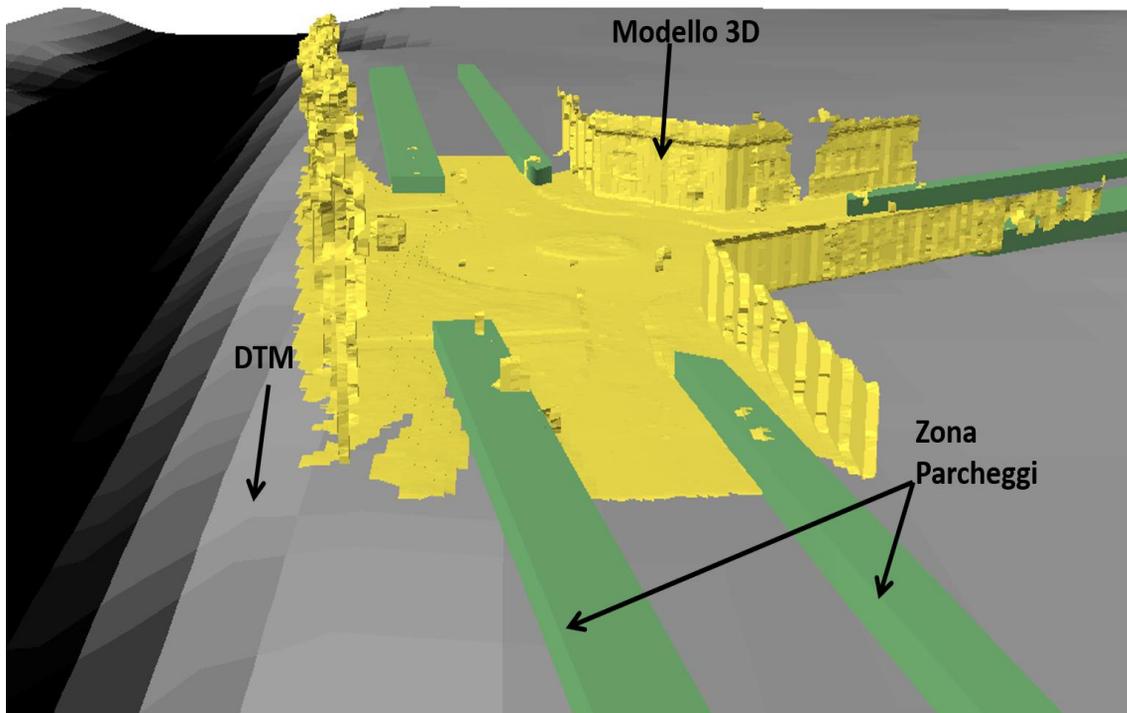


Figura 3.43 Il DSM creato nel caso della rotatoria

Infine, il modello 3D e i blocchi che rappresentano i veicoli parcheggiati sono stati uniti per formare un unico shapefile che è stato usato per valutare le distanze di visibilità.

4 Analisi di visibilità

L'ultima fase di questo lavoro di tesi consiste nel determinare e tracciare le traiettorie del veicolo per valutare le distanze di visibilità, nei due casi di studio: rotatoria e intersezione lineare. Tali traiettorie sono state suddivise in punti di osservazione e punti osservati, considerando diverse posizioni e altezze, non solo del conducente, ma anche del target, in base al tipo di analisi effettuata: distanza disponibile lungo la traiettoria del guidatore, interazione tra due traiettorie di veicoli in conflitto tra loro e interazione tra la traiettoria di un veicolo e quella di un utente debole.

4.1 Determinazione delle traiettorie del veicolo

Le traiettorie dei veicoli si distribuiscono trasversalmente all'interno delle corsie. Questo è stato osservato ripetutamente in vari studi, che confermano come tale distribuzione sia normalmente distribuita nella corsia di marcia. Le norme tecniche sulla progettazione delle strade fissano la mezzzeria della corsia come il luogo di punti su cui basare l'analisi di visibilità, ciò in relazione al fatto che sebbene il guidatore sia collocato alla sinistra del veicolo, gli obblighi del codice della strada e la tendenza dei guidatori a occupare la porzione di corsia più a destra. Ciò permette in linea di principio ad assumere per valida l'indicazione della norma tecnica anche quando siano condotte analisi su strade esistenti. L'alternativa a questo approccio deterministico è quello di studiare diverse traiettorie che, con probabilità di accadimento differenti, possono essere adottate dai guidatori.

Per ragioni di semplicità, rimandando eventualmente l'approccio statistico a studi successivi, in questa tesi si è deciso di assumere la posizione dell'osservatore (guidatore, ciclista o pedone) esattamente al centro dello spazio ad egli riservato nella sede stradale (corsia, pista ciclabile, percorso pedonale).

Il primo passo per tracciare le traiettorie è stato quello di importare sul software ArcMap l'ortofoto di Torino (2016) dal goeportale del Comune di Torino. Per determinare la geometria stradale con precisione, è stata importata la carta tecnica, che identifica: zone di parcheggio, marciapiede, edifici e vegetazione. La zona oggetto delle verifiche è delimitata a un'area compresa tra il centro delle intersezioni fino a 100 metri da esso.

Partendo dall'ortofoto e la carta tecnica, sono state disegnate delle polilinee che rappresentano gli elementi fondamentali di questo studio, quali: la segnaletica stradale, parcheggi, marciapiedi,

vegetazione e attraversamenti pedonali . Tali polilinee georeferenziate sono state estratte in formato .dxf, e riportate su Autocad, dove sono state tracciate le traiettorie attraverso i seguenti criteri:

- lungo i rettilinei e prima delle intersezioni, le traiettorie sono in mezzera delle carreggiate,
- lungo tratti curvi, è stata tracciata la tangente a due linee rettilinee, con il massimo raggio possibile.

Nel caso della rotatoria sono state identificate sei possibili traiettorie; nel caso dell'intersezione lineare quattro (i dettagli grafici sono integralmente riportati nell'Allegato 2).

Per maggior chiarezza e per mostrare il metodo utilizzato, si presenta la creazione della traiettoria numero 3 nel caso della rotatoria (Figura 4.1). Posizionato il guidatore al centro della carreggiata, è stata tracciata la traiettoria rettilinea di ingresso nella rotatoria. Per tracciare la traiettoria curvilinea, sono stati realizzati quattro cerchi: il primo identifica la mezzera della rotatoria; il secondo di raggio 10 m è tangente alla traiettoria rettilinea e al primo cerchio; il terzo cerchio di raggio 20 m è tangente alla mezzera della rotatoria e la traiettoria rettilinea che il guidatore segue quando abbandona la rotatoria; il quarto cerchio di raggio 50 m è tangente sia al secondo che al terzo cerchio. Quindi, la traiettoria del guidatore è costituita dalla traiettoria rettilinea di ingresso, dall'arco del secondo cerchio che collega la traiettoria di ingresso e il primo cerchio, dall'arco di collegamento tra il secondo e il terzo cerchio, dall'arco del terzo cerchio che collega il quarto con la traiettoria di uscita.

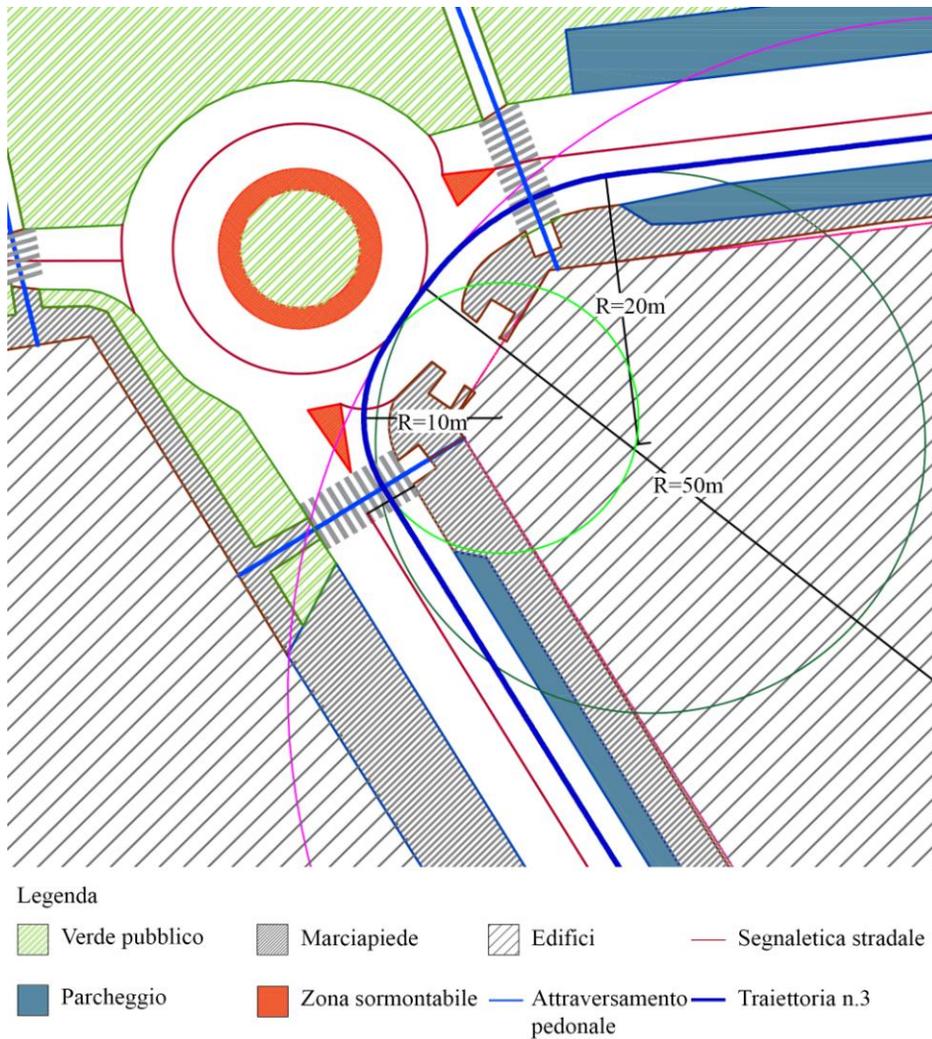


Figura 4.1 Costruzione della traiettoria 3 nel caso della rotatoria

Sono stati anche identificati gli attraversamenti pedonali con delle linee blu . Si è supposto che il pedone attraversi lungo la linea di mezz'ora dell'attraversamento.

4.2 Rotatoria

Dopo la costruzione delle traiettorie, è possibile identificare le traiettorie in conflitto, e i punti di conflitto veicolo–utente debole (pedone, ciclista) e decidere il tipo di verifiche da effettuare sulle traiettorie che rappresentano condizioni critiche in termini di visibilità (Figura 4.2).

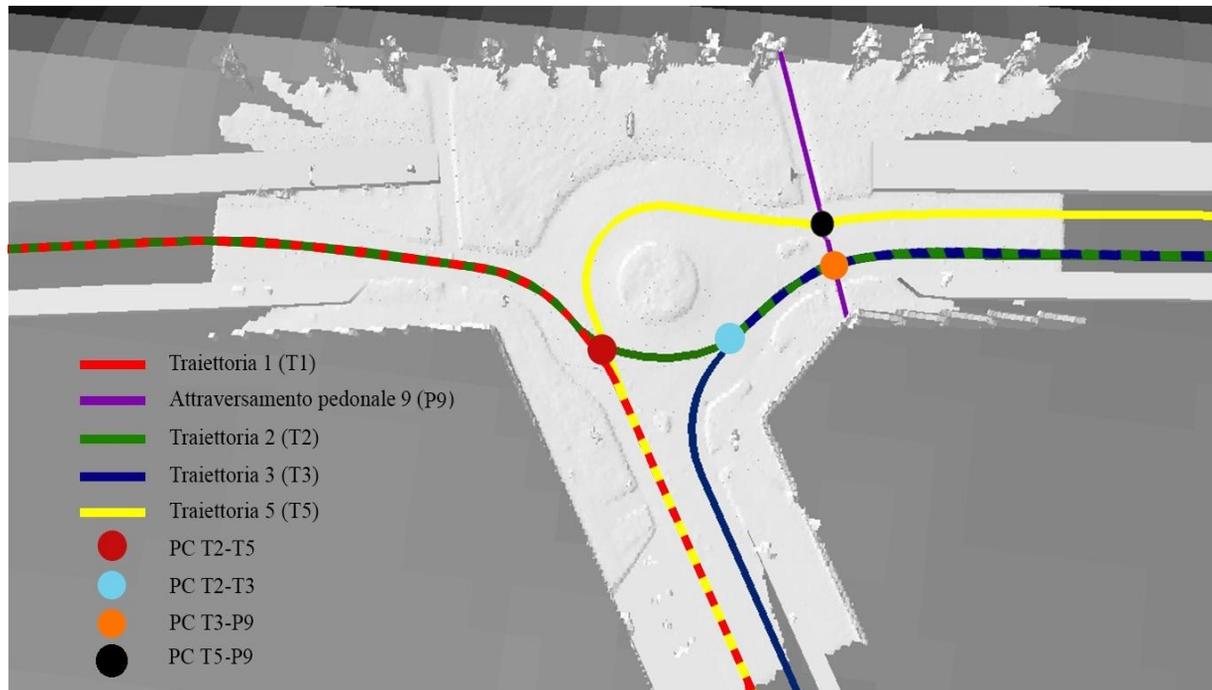


Figura 4.2 Le traiettorie analizzate e i punti di conflitto

Al fine di valutare la distanza di visibilità disponibile sono state scelte le tre traiettorie che accedono alla rotonda attraverso i suoi tre rami: le traiettorie sono 1, 3 e 5.

Invece per la distanza di visibilità rispetto al punto di conflitto tra due veicoli, sono state valutate le condizioni di visibilità nel caso di conflitto tra la traiettoria 2 e 5, e il conflitto tra la traiettoria 3 e 2.

Per il conflitto tra la traiettoria del veicolo e l'attraversamento pedonale, è stato valutata l'interazione tra l'attraversamento pedonale 9 e le traiettorie 3 e 5.

4.2.1 Valutazione della distanza di visibilità disponibile (ASD)

Per valutare tale distanza, l'osservatore è stato collocato ad una distanza di 1.1 m e il traget a 0.1 m. Ogni osservatore è stato collegato tramite linee di visibilità a tutti i possibili traget ad una distanza di 100 m. È stato posizionato un osservatore ogni 5 m ed un target ogni 1 m.

Traiettoria 1

Dopo aver caricato il DSM su ArcGis, la traiettoria 1 è stata aggiunta come polilinea. Tale traiettoria è stata discretizzata usando il tool "Create Random Point" per creare i punti di osservazione e i punti target (Figura 4.2 e 4.3).

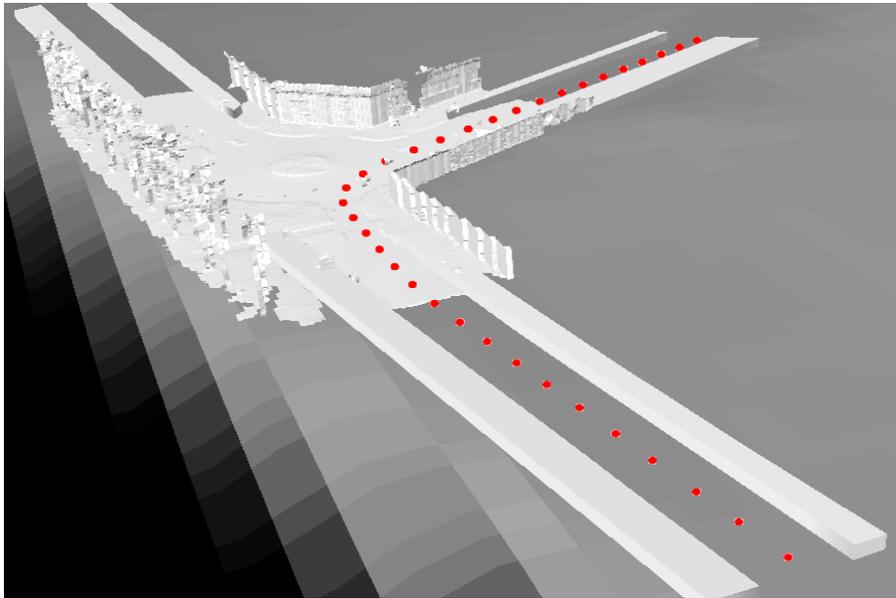


Figure 4.3 Punti di osservazione lungo la traiettoria 1

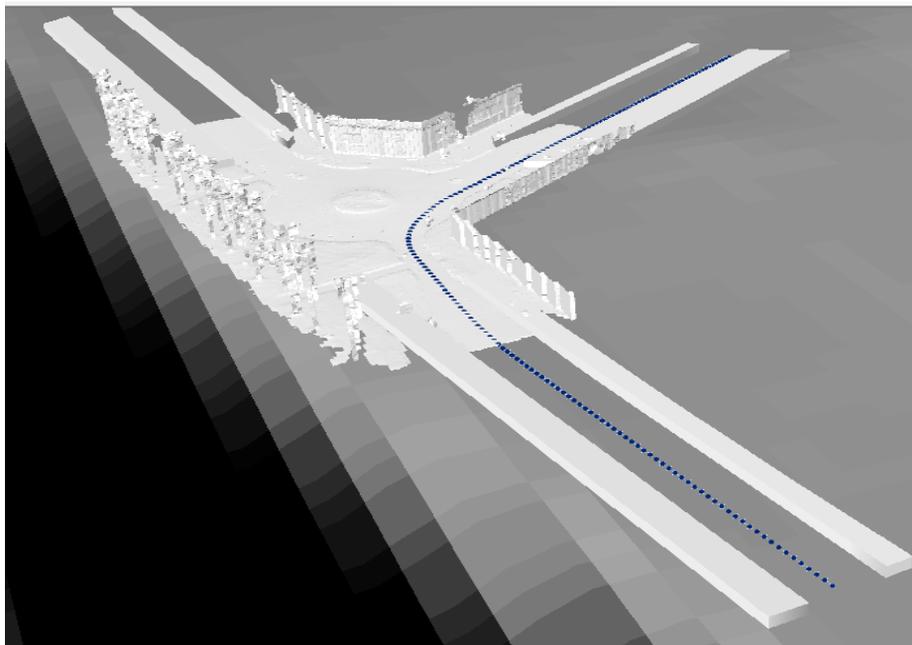


Figure 4.4 Punti target lungo la traiettoria 1

Per creare le linee che collegano i punti di osservazione e punti target è stato utilizzato il comando "Construct Line of Sight" (Figura 4.5). Successivamente, tutte le linee che non rappresentano una possibile linea di visuale, quando l'osservatore ha superato il target, sono state cancellate.

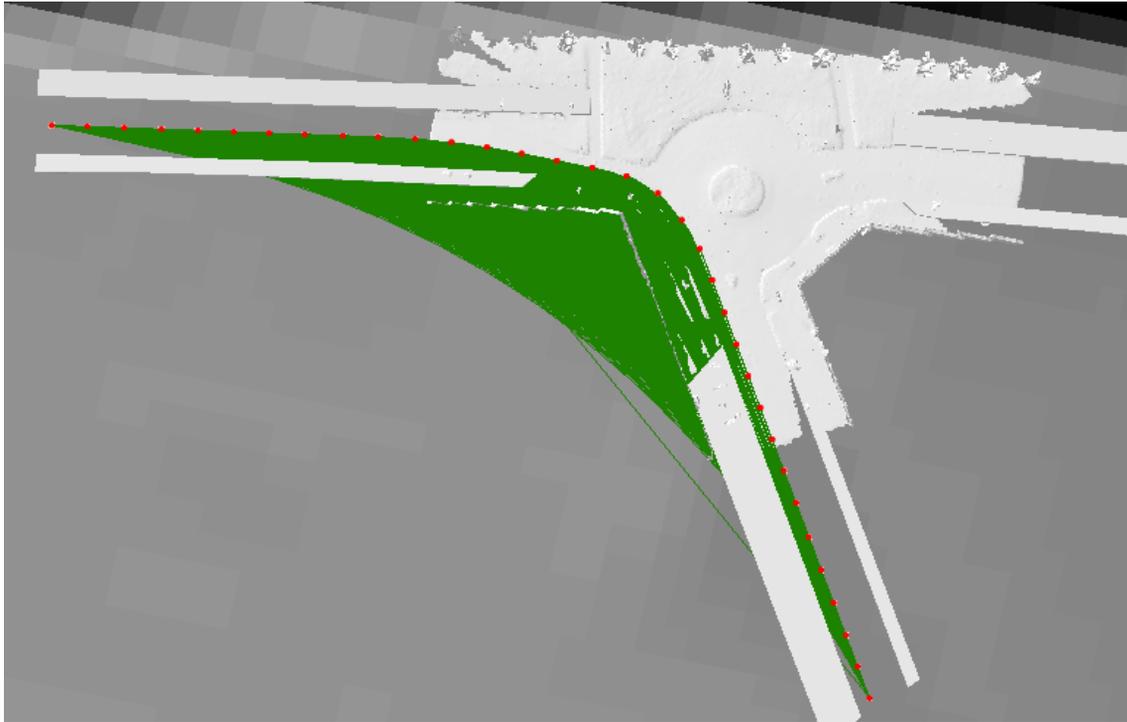


Figure 4.5 Linee di visibilità della traiettoria 1

Si procede l'analisi lanciando il toolbox creato con ModelBuilder per elaborare le linee create ed ottenere le linee di visibilità. I risultati sono illustrati nella Figura 4.6. Le parti colorate in blu sono visibili per l'osservatore, invece, quelle in rosso non sono visibili.

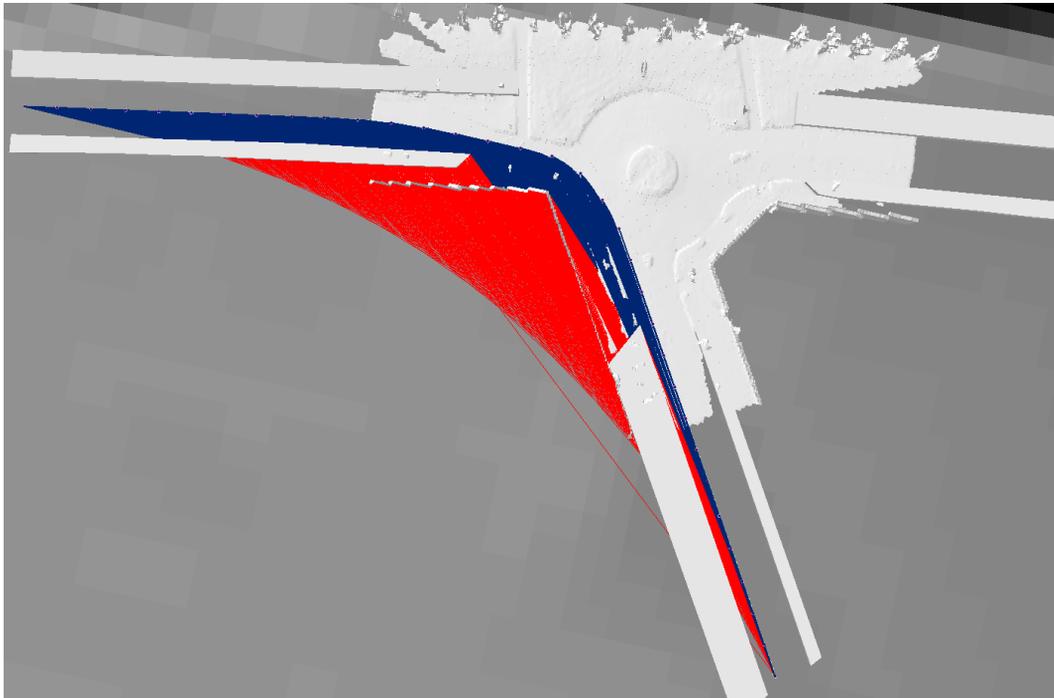


Figure 4.6 Linee di visibilità create con il Toolbox della traiettoria 1

Tale procedura è stata effettuata due volte utilizzando due diversi modelli tridimensionali: uno derivato dalle scansioni laser scanner e il secondo chiamato Sfm (Structure from motion) derivato dalle immagini acquisite utilizzando la macchina fotografica Reflex.

Dopo l'elaborazione delle linee, il software genera una tabella in cui sono riportati i seguenti parametri:

- FID rappresenta l'identificativo di ogni linea;
- Shape identifica la tipologia dello shapefile (polilinea, punto);
- SourceOID rappresenta l'identità dell'osservatore;
- VisCode assume valore 1 per il tratto visibile della linea, 2 per la porzione non visibile;
- TarIsVis assume valore 1 se il target è visibile, 0 se non visibile.
- OBSTR_MPID assume valore -9999 nel caso di assenza di ostacolo, altrimenti indica l'ID dell'ostacolo.

Come riportato nella Tabella 4.1 per gli osservatori da 81 a 84 (SourceOID), i parametri VisCode e TarIsVis sono 1, il che indica che sia l'intera linea sia il target sono visibili; infatti OBSTR_MPID è pari a -9999, data l'assenza di ostacolo. Invece, per l'osservatore 85, la linea di visibilità è suddivisa in due porzioni, identificate da FID 85 e 86; la prima parte presenta VisCode 1 in quanto è visibile dal punto di

osservazione, mentre la seconda, con VisCode 2, non è visibile. Il TarIsVis di tali FID sono pari a 0 e OBSTR_MPID pari a 5, valore che identifica la zona di parcheggio a destra del guidatore.

Tabella 4.1 Esempio parametri ottenuti dopo l'elaborazione delle linee

FID	SourceOID	VisCode	TarIsVis	OBSTR_MPID
81	81	1	1	-9999
82	82	1	1	-9999
83	83	1	1	-9999
84	84	1	1	-9999
85	85	1	0	5
86	85	2	0	5
87	86	1	0	5
88	86	2	0	5

Per ogni osservatore è stato identificato il target visibile più lontano. La distanza che separa tali punti è la distanza di visibilità disponibile (ASD). Esse sono rappresentate nel grafico della Figura 4.7.

Il grafico mostra un primo andamento decrescente della distanza di visibilità disponibile; ciò è dovuto al fatto che, mentre il guidatore si avvicina alla rotatoria, la sua visuale è ostacolata dalla presenza della zona parcheggio; infatti essa raggiunge il valore minimo quando il guidatore accede alla rotatoria, a causa della presenza dell'edificio. Quando l'osservatore è al centro della rotatoria, la distanza di visibilità inizia ad aumentare fino al valore di 80 m. Oltre questo valore, il grafico presenta una linea tratteggiata in quanto, quando l'osservatore è nei punti di osservazione tra i 90 e 170 m, egli è in grado di avere una visuale libera da ostacoli, ma la fine del modello tridimensionale ne causa un decremento. Tale tratto non descrive lo stato reale delle condizioni di visibilità.

L'andamento del grafico giustifica le operazioni di analisi effettuate, in quanto, quando il guidatore è in procinto di accedere alla rotatoria, la distanza di visibilità si riduce progressivamente.

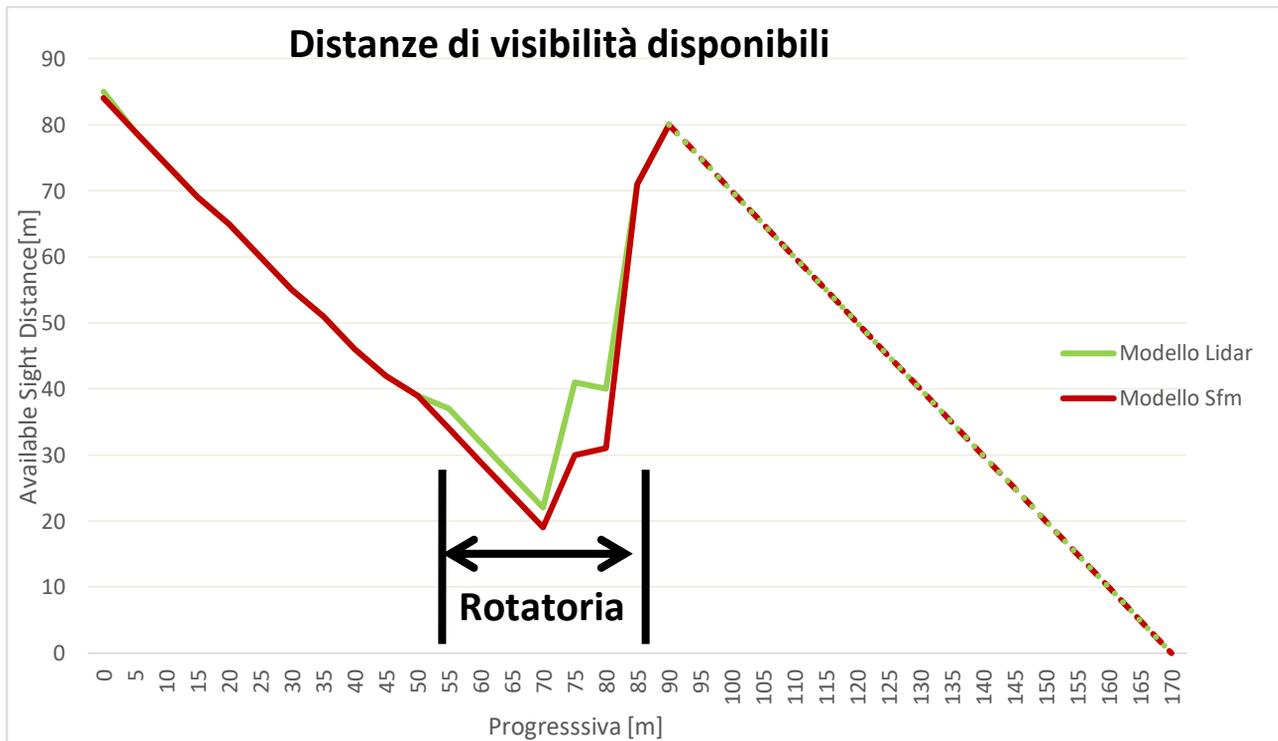


Figure 4.7 Le distanze di visibilità disponibile per traiettorie 1

In tale grafico è riportato anche il confronto tra due modelli tridimensionali differenti: modello Lidar e modello Sfm. Si può notare come nel primo tratto, si sono ottenute le stesse distanze di visibilità in quanto in entrambi i modelli sono presenti le stesse zone di parcheggio inserite manualmente. La zona che identifica la rotatoria presenta dei valori differenti in quanto i modelli non sono perfettamente identici; ciò è dovuto alla diversa modalità di generazione dei modelli e conferma i risultati ottenuti nel confronto presentati nella sezione 3.5.1.1.

Traiettoria 3

La seconda traiettoria di cui è stata valutata la distanza di visibilità disponibile è la traiettoria 3. Le linee che collegano i punti di osservazione a quelli osservati sono stati elaborati usando il toolbox utilizzato precedentemente. Come nel caso della traiettoria 1, sono stati utilizzati due DSM derivati dai due diversi modelli 3D.

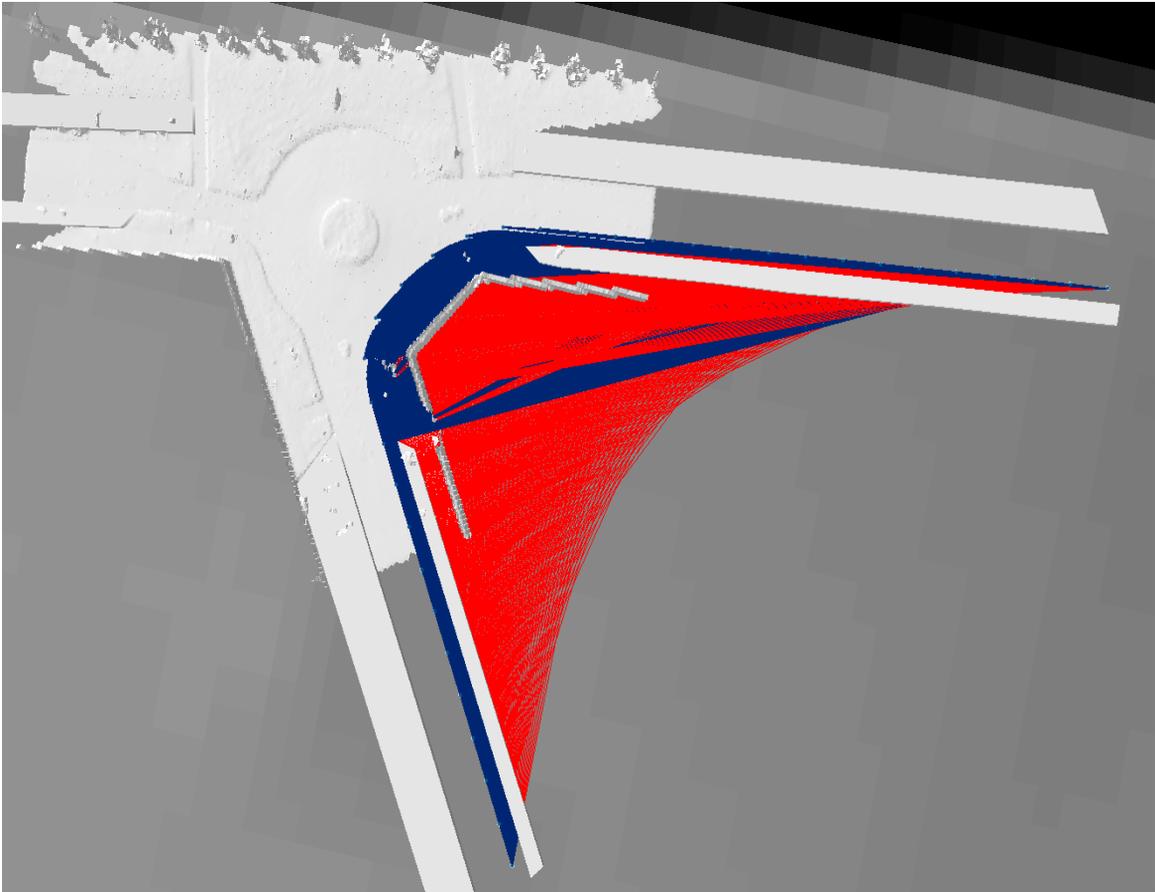


Figure 4.8 Linee di visibilità create con il Toolbox della traiettoria 3

Nella Figura 4.8, le linee di colore blu identificano quelle visibili, mentre quelle rosse indicano quelle non visibili a causa di un ostacolo.

I risultati sono rappresentati nel grafico della Figura 4.9. Il grafico mostra un primo andamento decrescente della distanza di visibilità disponibile; ciò è dovuto al fatto che, mentre il guidatore si avvicina alla rotatoria, la sua visuale è ostacolata dalla presenza della zona pacheggio. Prima di accedere

alla rotatoria, la distanza di visibilità diminuisce ulteriormente a causa della presenza di un ostacolo stradale, un palo. Quando le linee di visibilità non intersecano più tale ostacolo, la distanza di visibilità aumenta.

Quando il guidatore accede alla rotatoria, a causa della presenza dell'edificio, la ASD diminuisce nuovamente, per poi aumentare al centro della rotatoria fino al valore massimo di 90m.

Oltre questo valore, il grafico presenta una linea tratteggiata in quanto, quando l'osservatore è nei punti di osservazione tra i 80 e 170 m, egli è in grado di avere una visuale libera da ostacoli, ma la fine del modello tridimensionale ne causa un decremento. Tale tratto non descrive lo stato reale delle condizioni di visibilità.

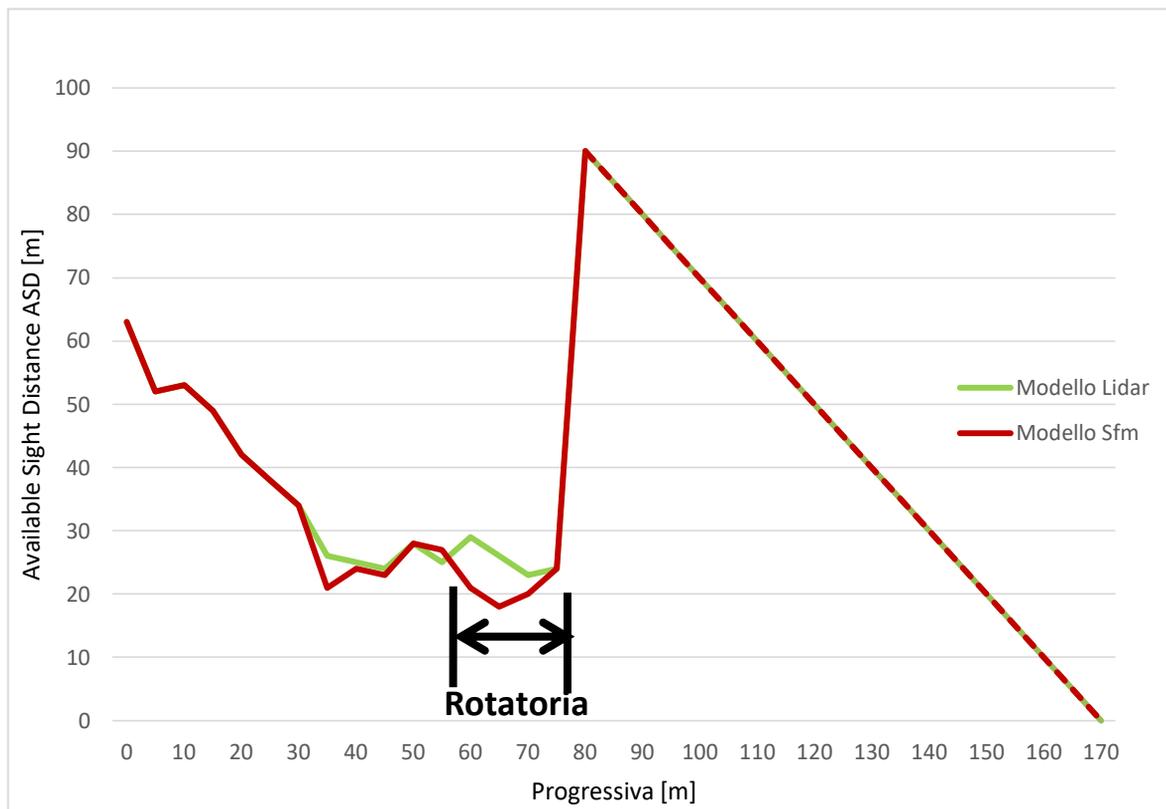


Figure 4.9 Le distanze di visibilità disponibile per traiettorie 3

In tale grafico è riportato anche il confronto tra i due modelli tridimensionali: modello Lidar e modello Sfm. Si può notare come nel primo tratto, si sono ottenute le stesse distanze di visibilità in quanto in entrambi i modelli sono presenti le stesse zone di parcheggio. Gli effetti dovuti alla presenza

del palo in entrambi i modelli causa dei risultati differenti in quanto esso viene maggiormente sovradimensionato nel modello Sfm (Figura 4.10).

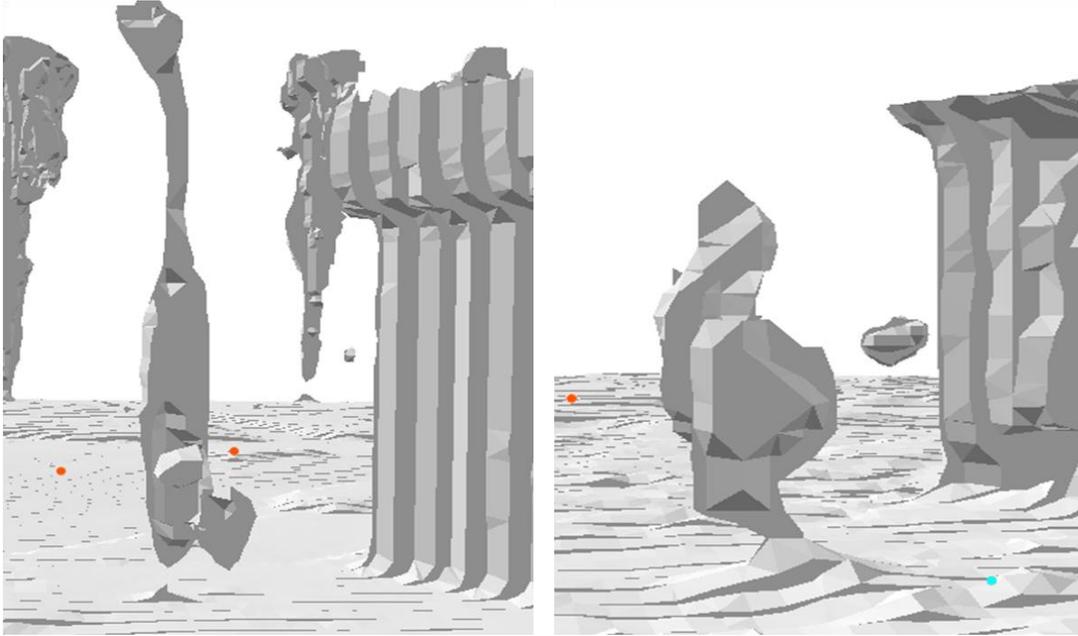


Figura 4.10 Palo nel modello Lidar, a sinistra, nel modello Sfm, a destra

La zona che identifica la rotatoria presenta dei valori differenti in quanto il modello Lidar è più accurato rispetto al modello Sfm.

Traiettoria 5

Le linee di visuale riportate in Figura 4.11 sono il frutto del collegamento ideale tra punti di osservazione e punti osservati relativi alla traiettoria 5.

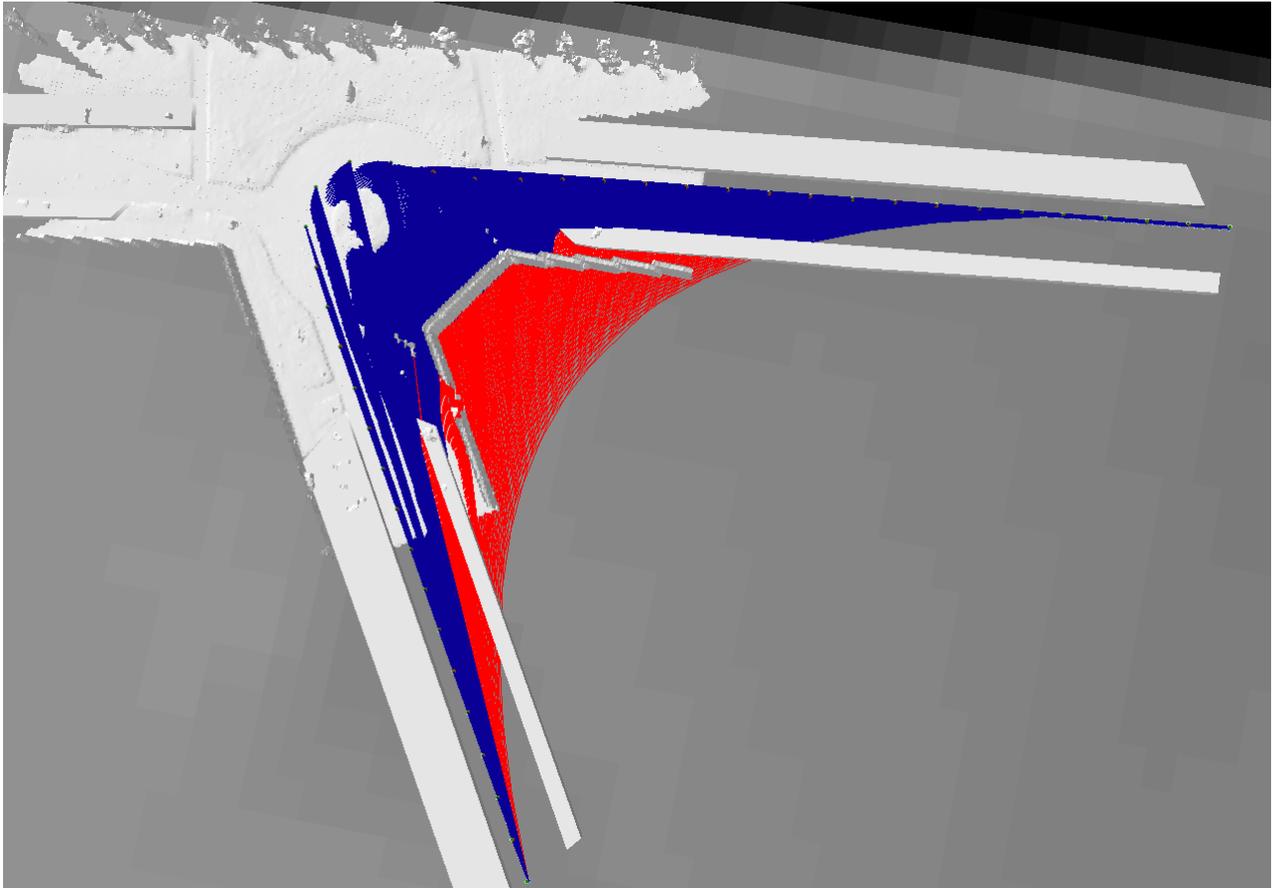


Figura 4.11 Linee di visibilità create con il Toolbox della traiettoria 5

Le distanze estratte sono riportate nel grafico della Figura 4.12.

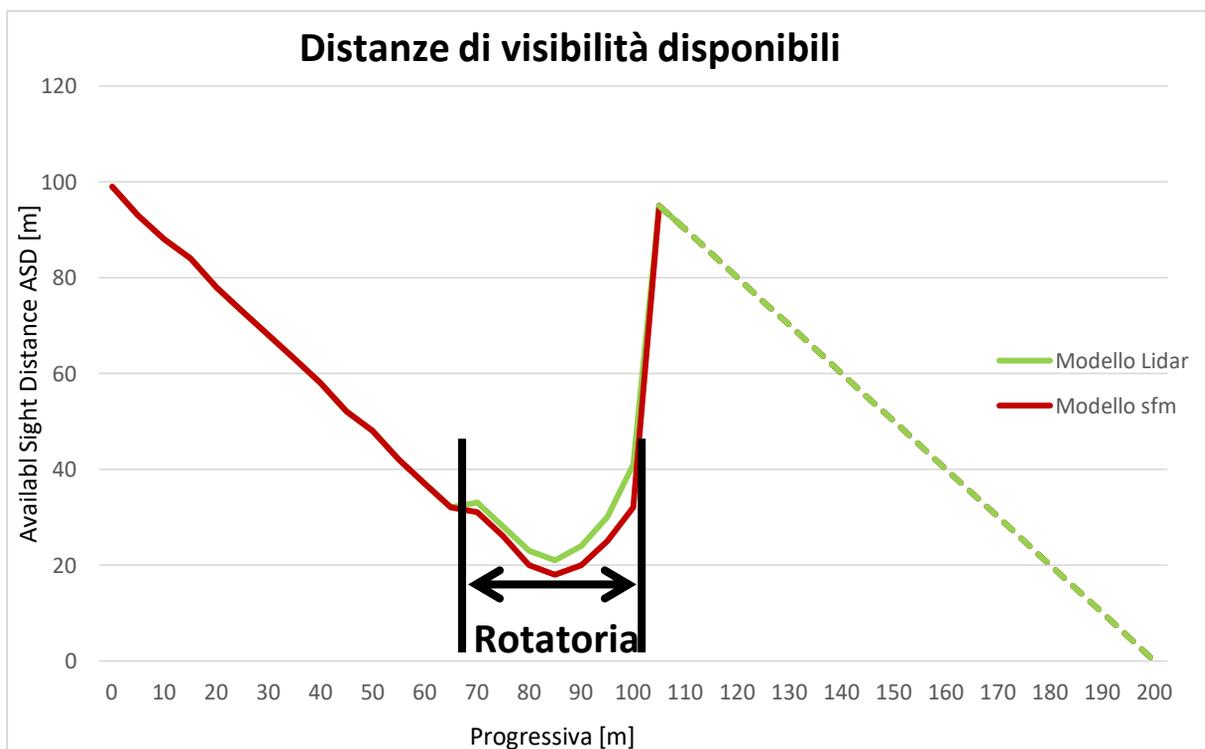


Figura 4.12 Le distanze di visibilità disponibili della traiettorie 5

Il grafico ottenuto mette in evidenza che la minima distanza di visuale libera è nella zona centrale del grafico. Appena il guidatore accede alla rotatoria, il suo campo visivo si restringe, la distanza visibile libera diminuisce e raggiunge un valore minimo quando il veicolo raggiunge il centro della rotatoria, per poi ricresce. La parte finale del grafico, dove la ASD diminuisce, è dovuto alla limitazione del modello tridimensionale.

Si può notare anche la differenza tra la distanza di visibilità disponibile calcolata tramite il modello derivato da laser e quello Sfm. Tale differenza è talmente piccola che può essere considerata trascurabile. Ciò implica la validità del modello fotogrammetrico e la sua capacità di rappresentare lo stato reale (ground truth) anche in un ambito molto complicato e dettagliato.

Dalle analisi effettuate si evince che la ASD minima è di 18 m per tutte le traiettorie considerate quando il veicolo circola nella rotatoria.

4.2.2 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-veicolo

Per tale tipo di analisi, le linee di visibilità sono state tracciate tra due guidatori ad altezza 1.1 m, e si è stabilito di discretizzare la traiettoria dell'osservatore con passo di 1 m, per ottenere dei risultati più dettagliati.

Tale criterio è stato applicato alla traiettoria 2 che entra in conflitto con le traiettorie 3 e 5 (Figura 4.13).

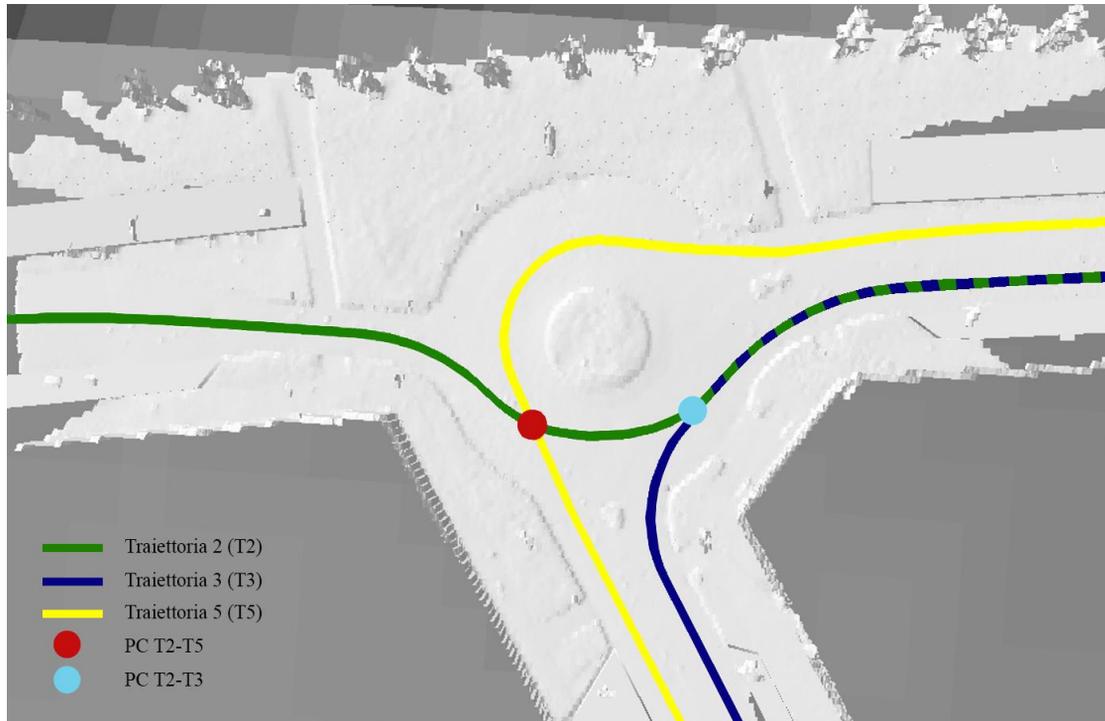


Figura 4.13 I punti di conflitto della traiettoria 2 con le traiettorie 3 e 5

Conflitto tra le traiettorie 2 e 5

Sono state create le linee che collegano i punti di osservazione della traiettoria 2 con quelli della traiettoria 5 fino al punto di conflitto.

Ogni retta della Figura 4.14 identifica la traiettoria 5 che termina con il punto di conflitto con la traiettoria 2. La traiettoria 5 è suddivisa in due parti: porzione visibile dai punti di osservazione lungo la traiettoria 2, identificata dal colore blu, e porzione non visibile caratterizzata dal colore rosso.

Dal primo punto di osservazione della traiettoria 2, il guidatore non è in grado di vedere l'intera traiettoria 5, ma solo buona parte di essa. Proseguendo lungo la sua traiettoria, il tratto non visibile

diventerà sempre più piccolo, fino a quando, l'osservatore sarà in grado di vedere non solo l'intera traiettoria 5, ma anche il punto di conflitto.

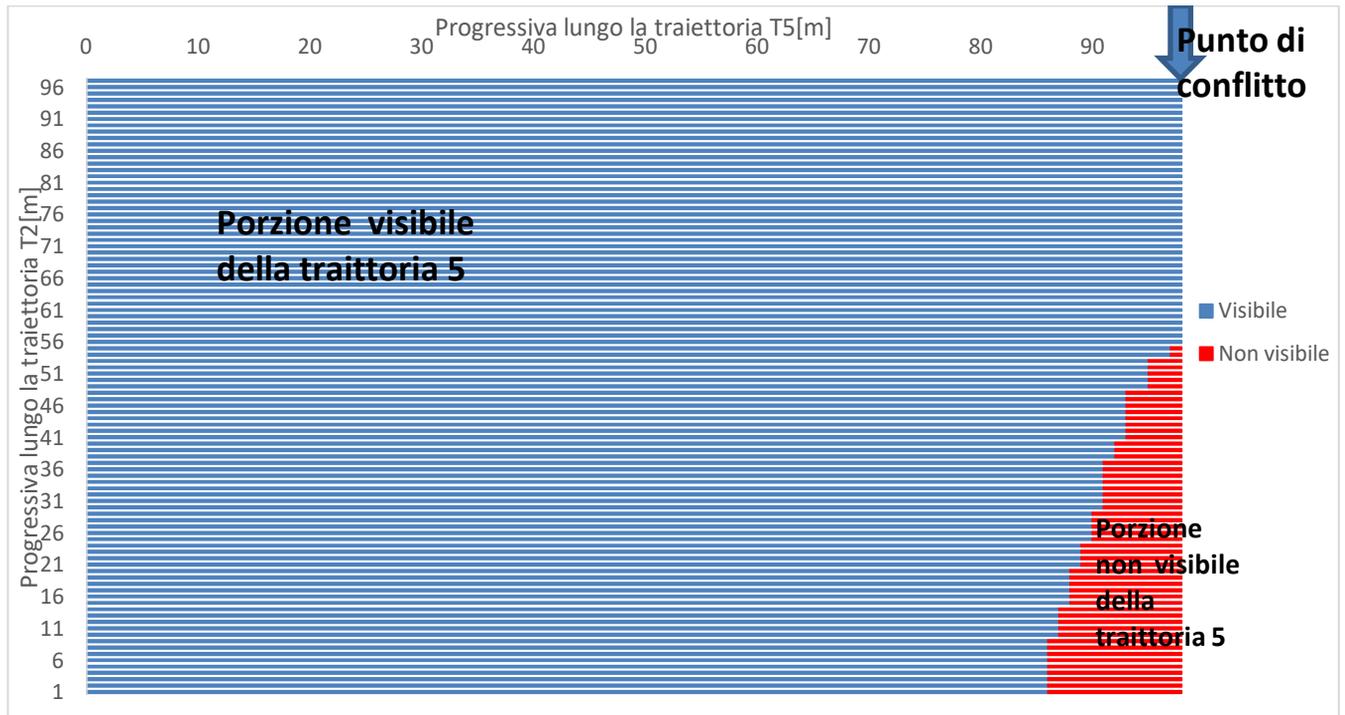


Figura 4.14 Distanze visibili rispetto al punto di conflitto tra le traiettorie 2 e 5

Quando il guidatore è posizionato nel primo punto della traiettoria 2 (0 m), egli non è in grado di osservare il punto di conflitto; in particolar modo, la sua visuale è ostacolata a 6 metri da tale punto lungo la traiettoria 5, porzione di quest'ultima intersecata dalle linee di visibilità blu (Figura 4.15). Proseguendo verso la rotatoria, il tratto non visibile della traiettoria in conflitto risulta minore. In particolare, dal punto di osservazione a 37 m lungo la progressiva della traiettoria 2, l'osservatore non può usufruire della visuale a 3 m dal punto di conflitto (Figura 4.16). Dopo aver percorso 55 metri lungo la traiettoria 2, il guidatore riesce a vedere il punto di conflitto con la traiettoria 5 (Figura 4.17).

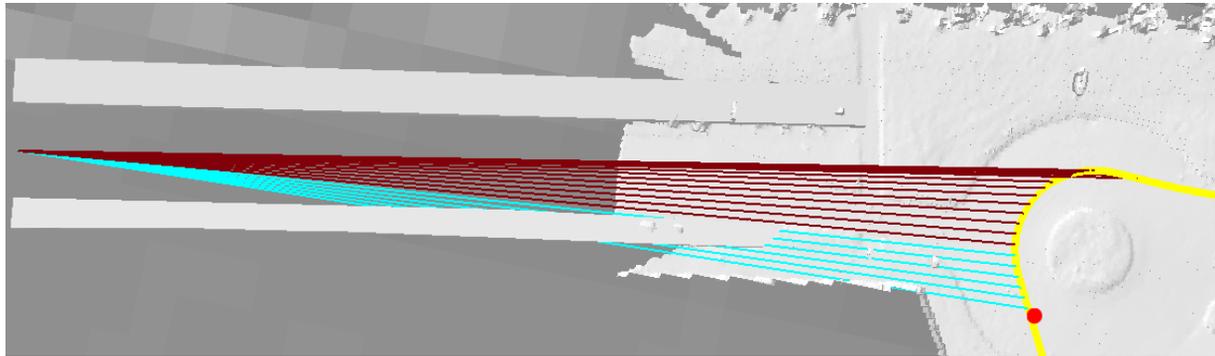


Figura 4.15 Distanza visibile della traiettoria 5 dal primo punto di osservazione sulla traiettoria 2

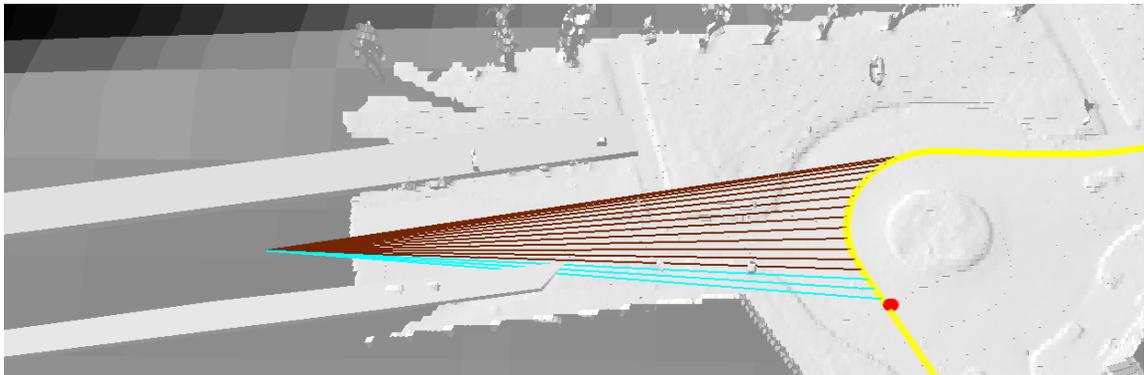


Figura 4.16 Distanza visibile della traiettoria 5 dal punto di osservazione di 37 m sulla traiettoria 2

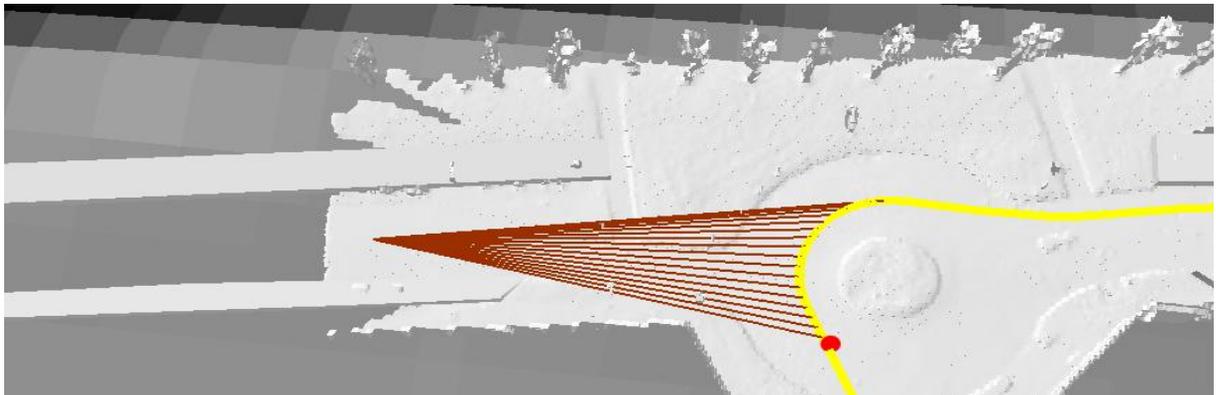


Figura 4.9 Distanza visibile della traiettoria 5 dal punto di osservazione di 55 m sulla traiettoria 2

Con i risultati estrapolati dall'analisi effettuata, si evince che l'assenza di visibilità da tutti i punti di osservazione della traiettoria 2 del punto di conflitto con la traiettoria 5, non risulta un problema alla circolazione in quanto, prima di accedere alla rotatoria il punto di conflitto è a lui visibile. Inoltre, l'osservatore è in grado di vedere tempestivamente l'altro veicolo quando quest'ultimo ha già imboccato la rotatoria, garantendogli la precedenza.

Conflitto tra le traiettorie 3 e 2

Lo stesso tipo di analisi è stato svolto anche per il conflitto tra la traiettoria 3 e la traiettoria 2, seguendo lo stesso procedimento di discretizzazione della traiettoria.

I risultati sono rappresentati nella Figura 4.18. Le rette identificano la traiettoria 2 che termina con il punto di conflitto con la traiettoria 3. Si utilizza la stessa colorazione precedente per identificare i tratti visibili (colore blu) e i tratti non visibili (colore rosso). Il grafico mostra che l'osservatore, dal primo punto di osservazione, è in grado di vedere solo un piccolo tratto della traiettoria 2. Tale tratto aumenta, quando egli si avvicina alla rotatoria, fino a vedere il punto di conflitto. L'osservatore, però, non riesce a vedere l'intera traiettoria 2 da nessun punto di osservazione.

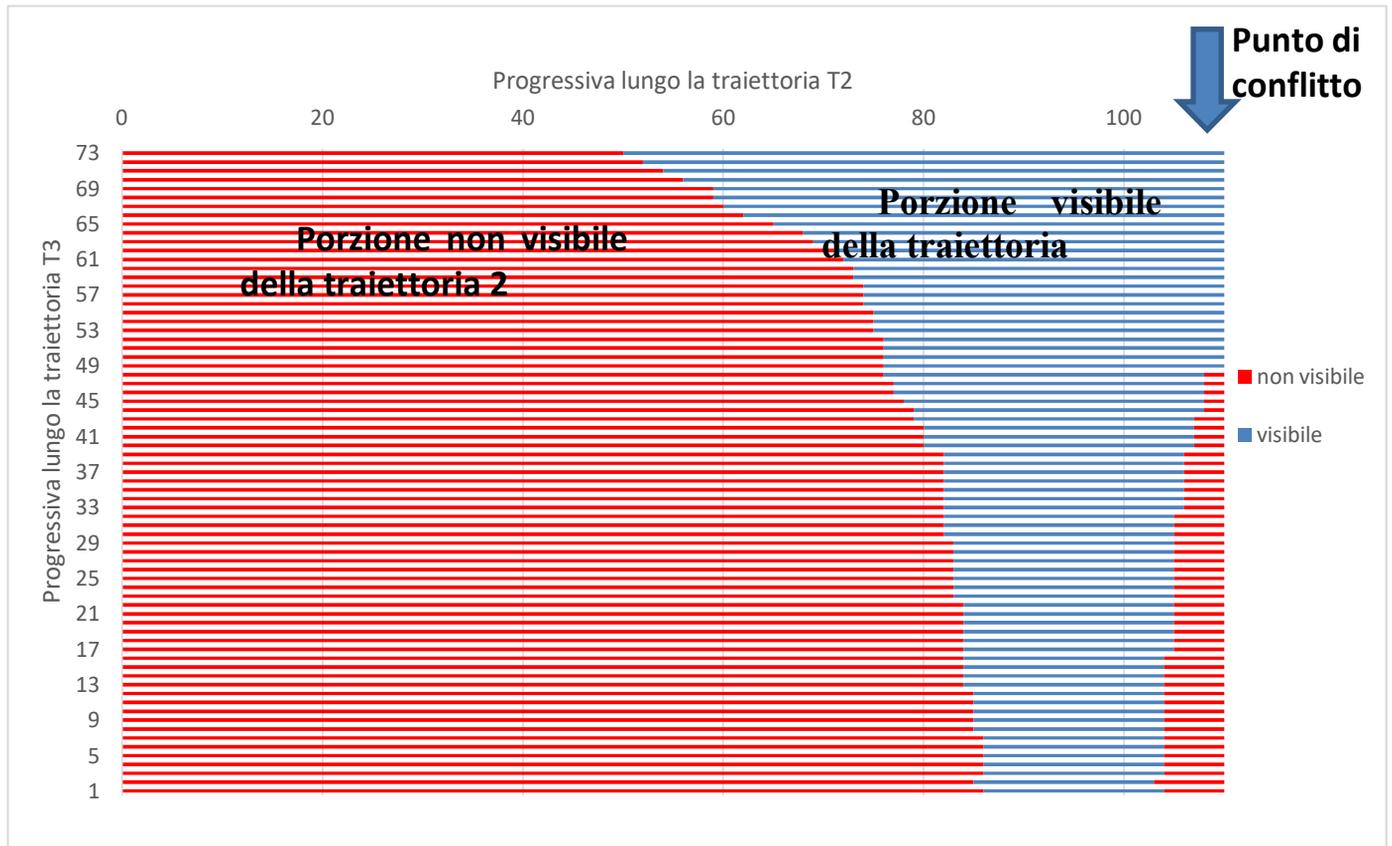


Figura 4.18 Le distanze visibili rispetto al punto di conflitto tra le traiettorie 3 e 2

Quando il guidatore è al primo punto di osservazione, 0 m, egli è in grado di vedere solo parte della traiettoria 2, cioè quando l'altro veicolo percorre la rotatoria, senza vedere il punto di conflitto (Figura 4.19). Solo quando l'osservatore è a 49 m della sua traiettoria, egli sarà in grado di vedere il punto di conflitto (Figura 4.20).

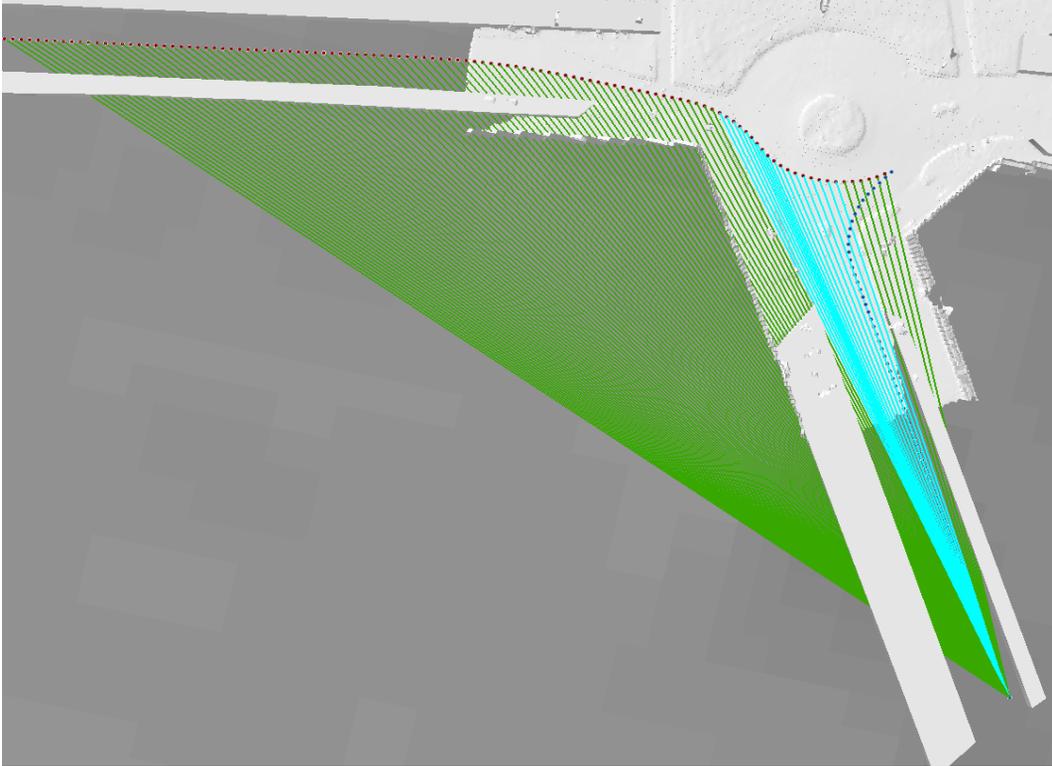


Figura 4.19 Distanze visibili dal punto a 0 m della traiettoria 3 rispetto al punto di conflitto della traiettorie 2

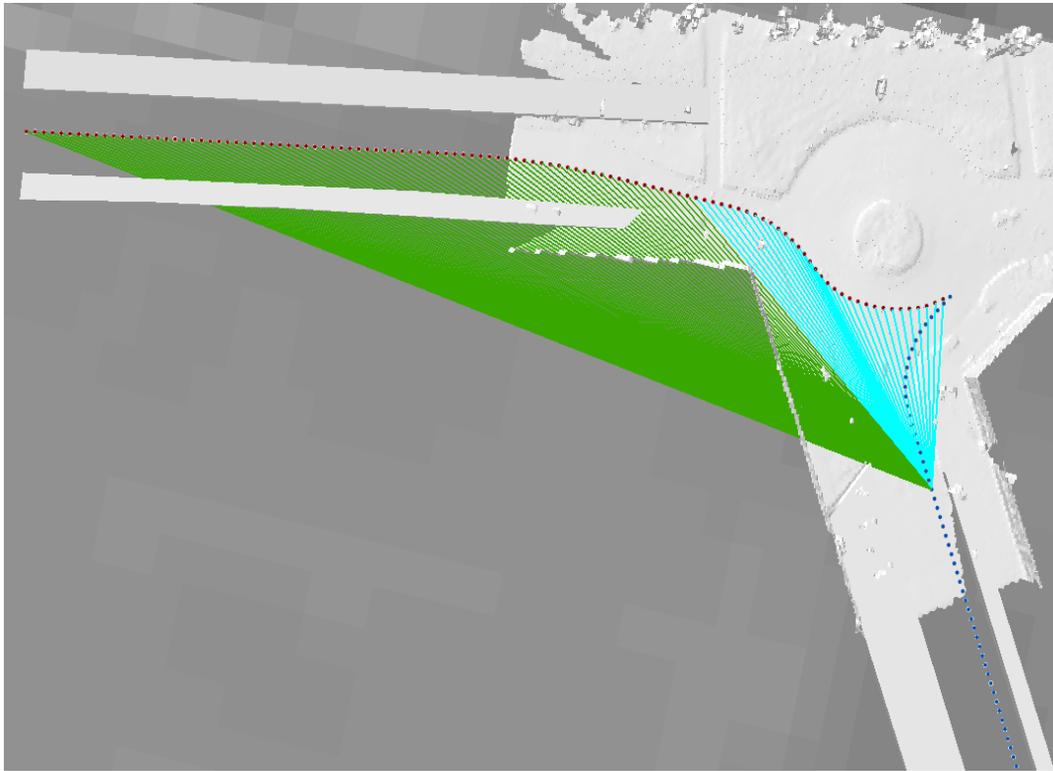


Figura 4.20 Distanze visibili dal punto a 49 m della traiettoria 3 rispetto al punto di conflitto della traiettorie 2

Con i risultati estrapolati dall'analisi effettuata, si evince che, anche se l'osservatore della traiettoria 3 non riesce a vedere l'intera traiettoria del veicolo in conflitto, è comunque in grado di vederlo impegnare la rotatoria da ogni punto di osservazione, garantendogli le precedenza previste dal codice stradale.

4.2.3 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-pedone

Il terzo tipo di analisi è stato effettuato allo scopo di valutare la distanza visibile dell'attraversamento pedonale dai punti di osservazione lungo la traiettoria del veicolo. Sono stati scelti due casi dove si presentano due diverse condizioni di visibilità: il conflitto tra l'attraversamento 9 con traiettoria 5 e traiettoria 3. Entrambe le traiettorie sono state discretizzate con un passo di 1 m, mentre la traiettoria del pedone lungo la mezzera dell'attraversamento pedonale, con passo di 25 cm, considerando l'altezza del target pari sia a 0 m sia a 1 m.

Traiettoria 5 con l'attraversamento pedonale 9

Il primo caso scelto è il conflitto tra la traiettoria 5 con l'attraversamento pedonale 9 (Figura 4.21). Usando il tool "Line of Sight" sono state create le linee che collegano i punti di osservazione ai punti dell'attraversamento. Il punto di conflitto delle due traiettorie si trova a 10 metri lungo l'attraversamento.

Successivamente, usando il modello creato con ModelBuilder, le linee di collegamento sono state elaborate per esaminare la visibilità lungo l'attraversamento, mentre l'osservatore si sposta lungo la traiettoria 5.

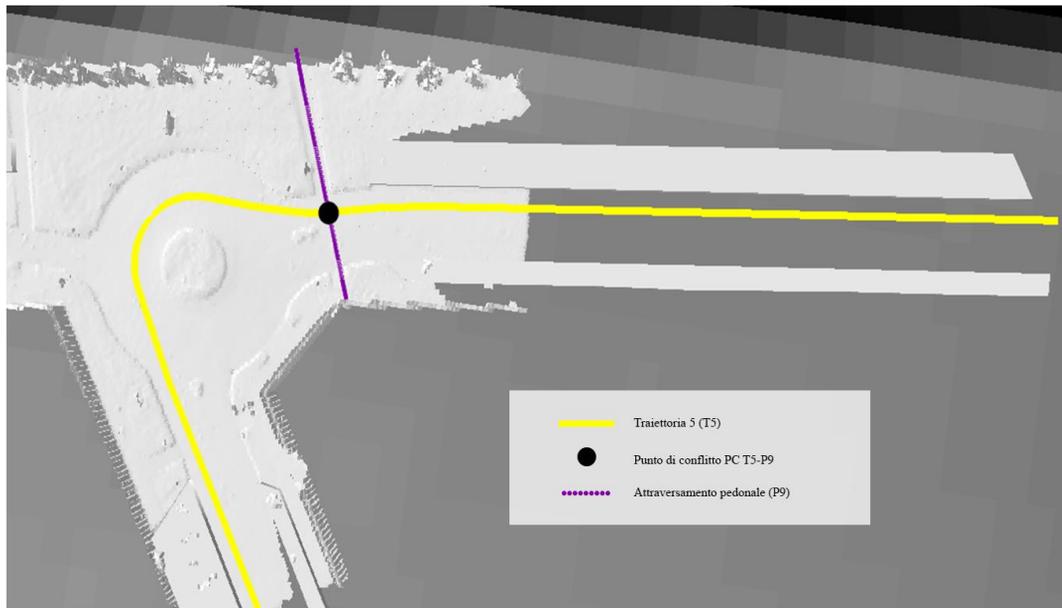


Figure 4.21 Linee di visibilità tra la traiettoria 5 e l'attraversamento pedonale 9

La Figura 4.22 mostra i risultati ottenuti considerando l'altezza del target pari a 0 m. Le rette identificano l'attraversamento pedonale. Il tratto visibile dalla traiettoria del guidatore presenta colore blu, mentre il tratto non visibile, colore rosso.

Sin dal primo punto di osservazione, l'osservatore è in grado di vedere il punto di conflitto con l'attraversamento pedonale. Procedendo verso la rotatoria, il campo visivo del guidatore si allarga, e la lunghezza del tratto visibile lungo l'attraversamento aumenta.

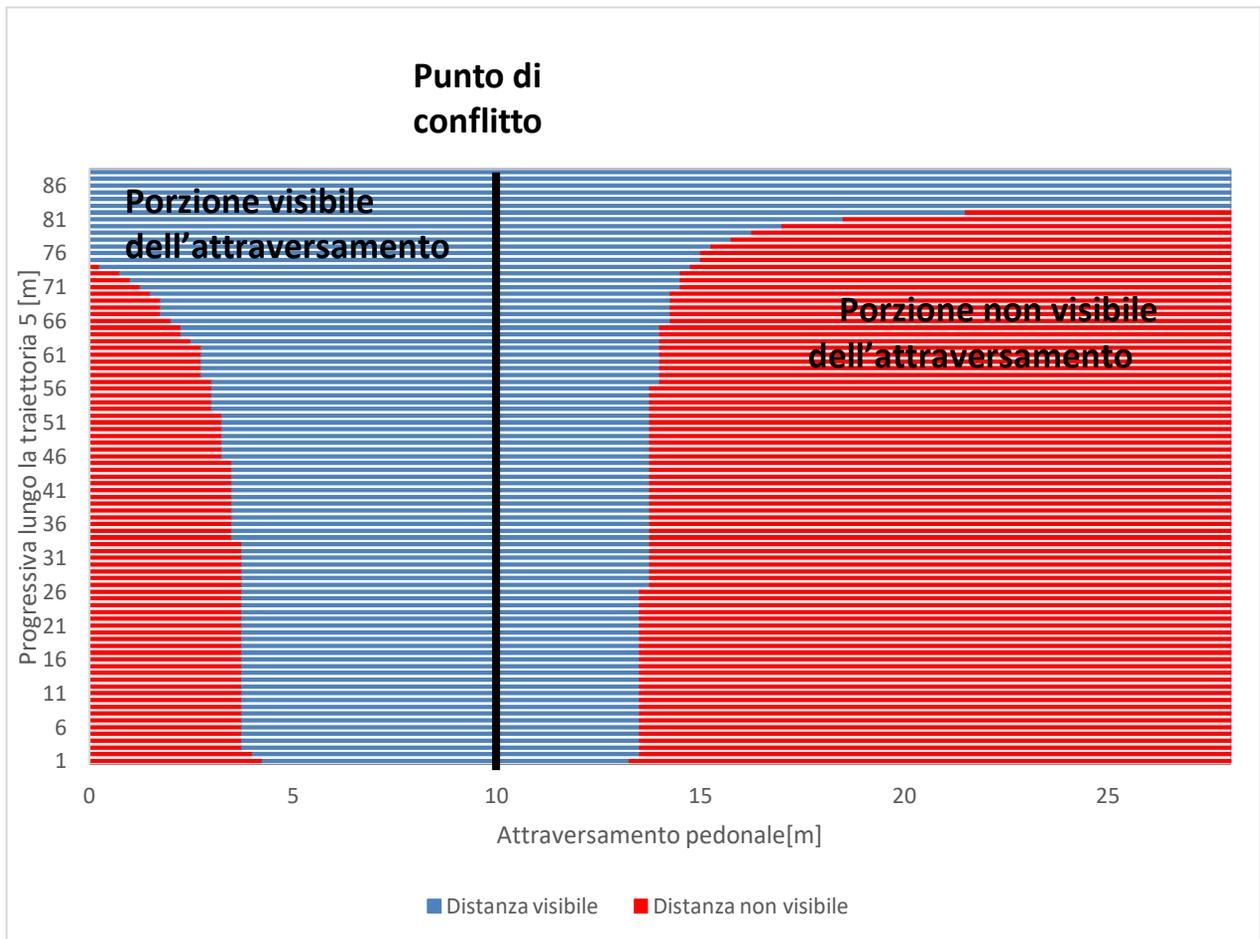


Figura 4.22 Distanze visibili dai punti di osservazione lungo la traiettoria 5 dell'attraversamento pedonale con target a 0 m di altezza

La Figura 4.23 mostra i risultati ottenuti considerando l'altezza del target pari a 1 m. Tale grafico presenta lo stesso andamento del grafico precedente, cioè l'osservatore è in grado di vedere il punto di conflitto già dal primo punto di osservazione.

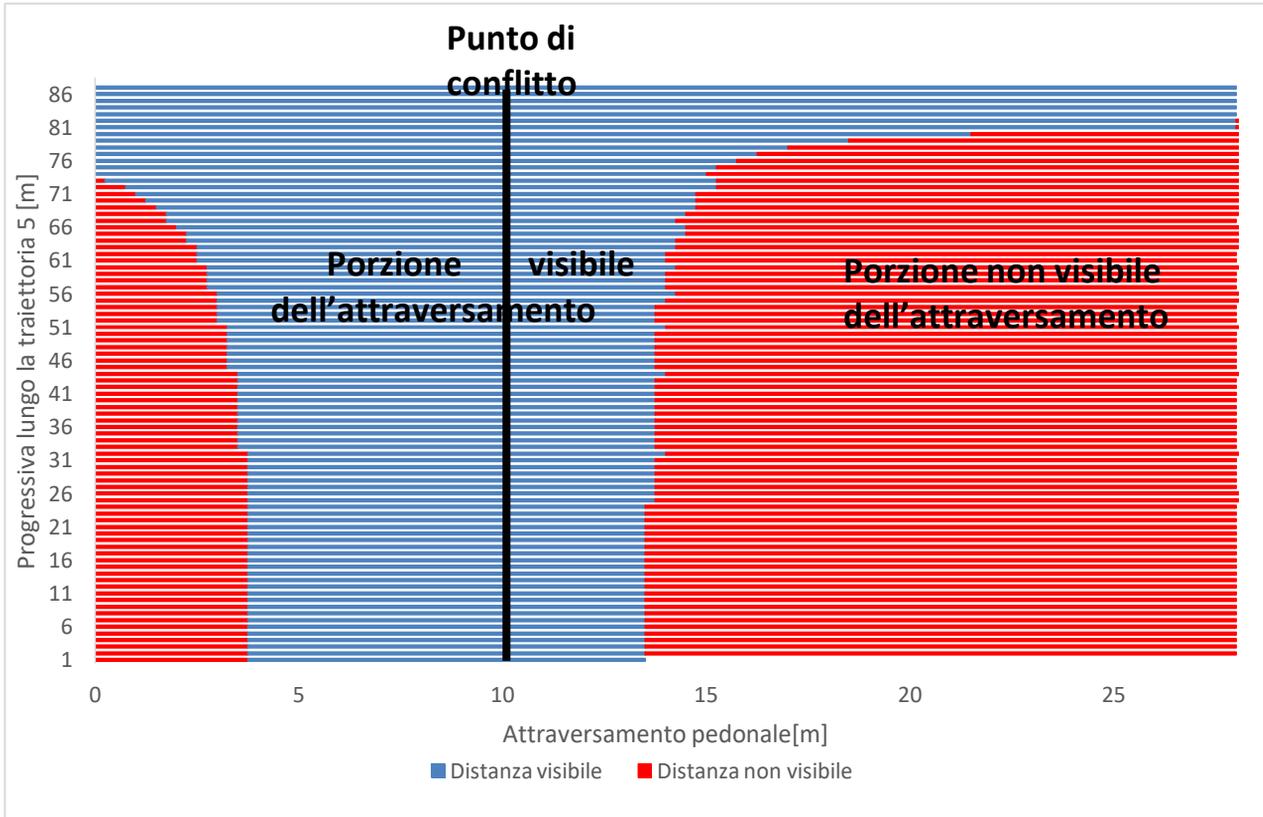


Figura 4.23 Distanze visibili dai punti di osservazione lungo la traiettoria 5 dell'attraversamento pedonale con target a 1 m di altezza

Il grafico nella Figura 4.24 mostra il confronto tra le distanze visibili dall'osservatore lungo la traiettoria 5 dell'attraversamento pedonale, con un target posizionato al livello della strada con quelle con target a 1 m. Da tale grafico si evince che il campo visivo del conducente non è particolarmente influenzato dall'altezza del pedone.

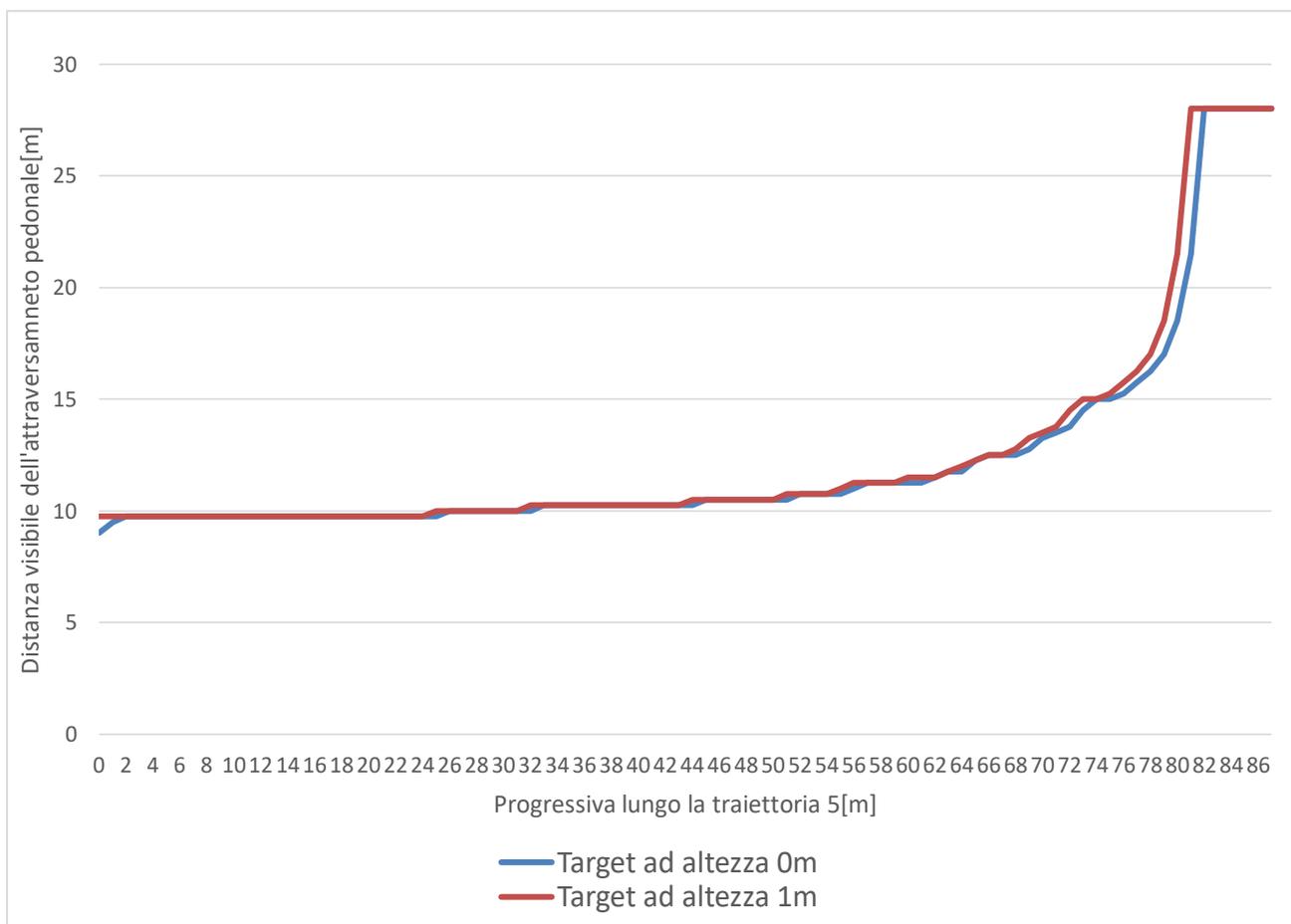
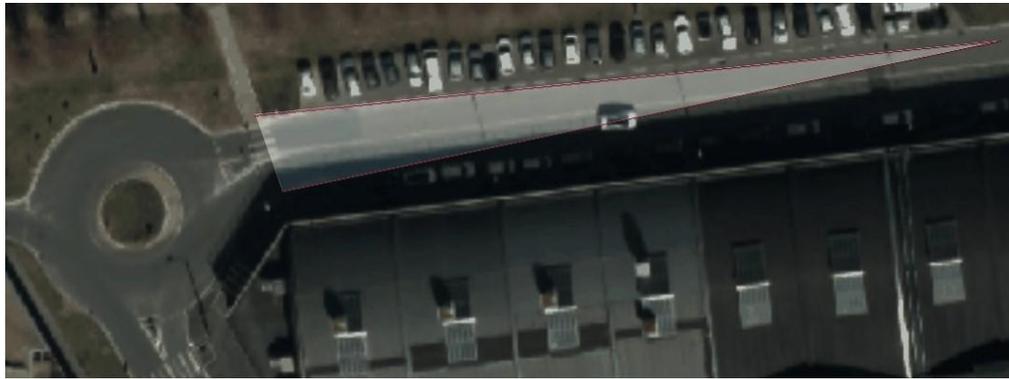


Figura 4.24 Confronto tra le distanze visibili dell’attraversamento pedonale con target sia a 0 m che a 1 m

Nella Figura 4.25, si illustra il campo visivo del guidatore su diversi punti della traiettoria 5. Quando l’osservatore è a 80 m dall’attraversamento pedonale, il suo campo visivo è tale da garantirgli la visuale completa della segnaletica stradale orizzontale (Figura 4.25(a)). A 27 m, il campo visivo dell’osservatore aumenta (Figura 4.25(b)). Quando l’osservatore è a 10 m, è in grado di avere una copertura visiva più ampia che gli permette di intravedere anche parte dei marciapiedi.

Tali risultati mostrano quanto la visibilità del guidatore sia influenzata dalla zona parcheggi, in quanto i veicoli parcheggiati impediscono di vedere l’utente, sia pedone che ciclista, in procinto di accedere all’attraversamento, non garantendogli la completa sicurezza.



(a) Osservatore a 80 m dall'attraversamento pedonale



(b) Osservatore a 27 m dall'attraversamento pedonale



(c) Osservatore a 10 m dall'attraversamento pedonale

Figura 4.25 Il campo visivo del guidatore a 10, 27 e 80 metri dal punto di conflitto

Traiettoria 3 con l'attraversamento pedonale 9

Il secondo caso studio è il conflitto tra la traiettoria 3 e l'attraversamento pedonale 9. Per tale analisi si è utilizzato la procedura precedente. Il punto di conflitto di tale traiettorie si trova a 5.5 m dell'attraversamento (Figura 4.26).

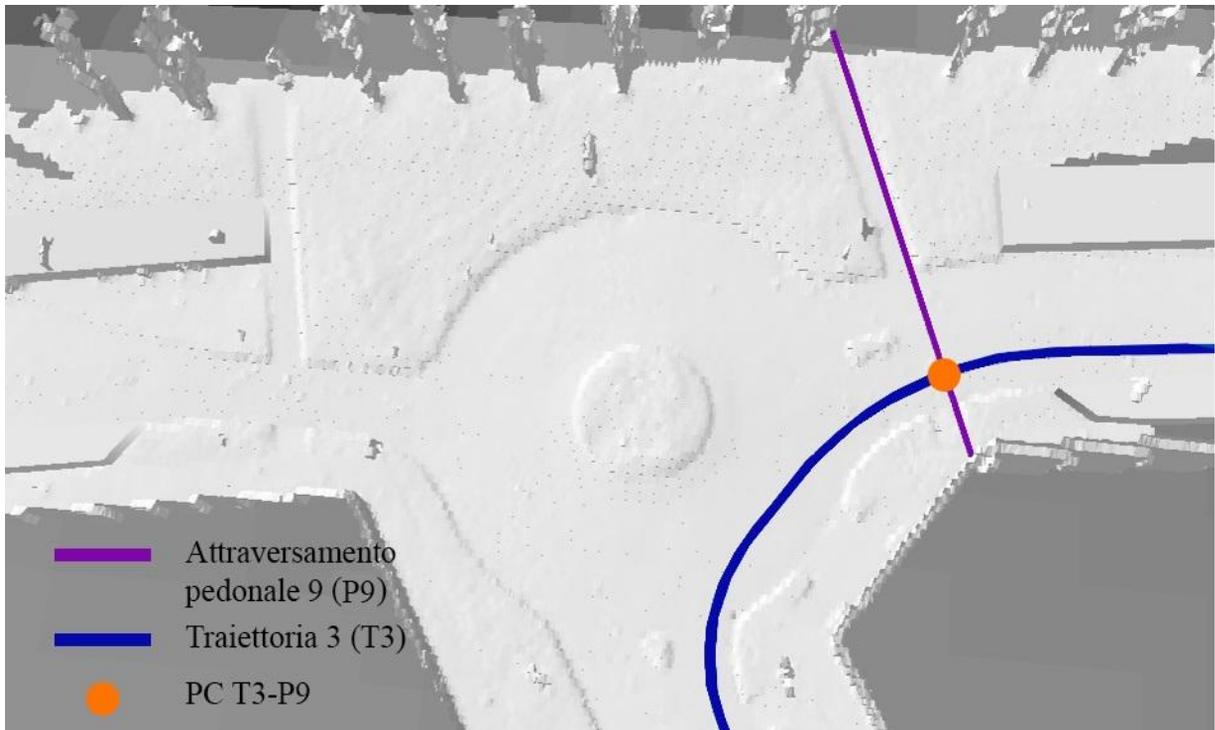


Figura 4.26 Il punto di conflitto tra la traiettoria 3 e l'attraversamento 9

Tale conflitto è un caso critico, in quanto l'attraversamento pedonale è posizionato immediatamente dopo la curva, che limita la visibilità del conducente. Inoltre, la presenza di un edificio alla destra del guidatore causa una scarsa visibilità dell'attraversamento anche prima della curva.

La Figura 4.27 mostra i risultati ottenuti considerando il target a livello della superficie stradale. Il guidatore dal primo punto di osservazione non è in grado di osservare nessun tratto dell'attraversamento pedonale. Quando il guidatore è a 27 metri dall'attraversamento, egli riesce a vedere sia un tratto dell'attraversamento che il punto di conflitto con la traiettoria del target. Proseguendo lungo la traiettoria, l'osservatore riesce sempre più a vedere parte dell'attraversamento.

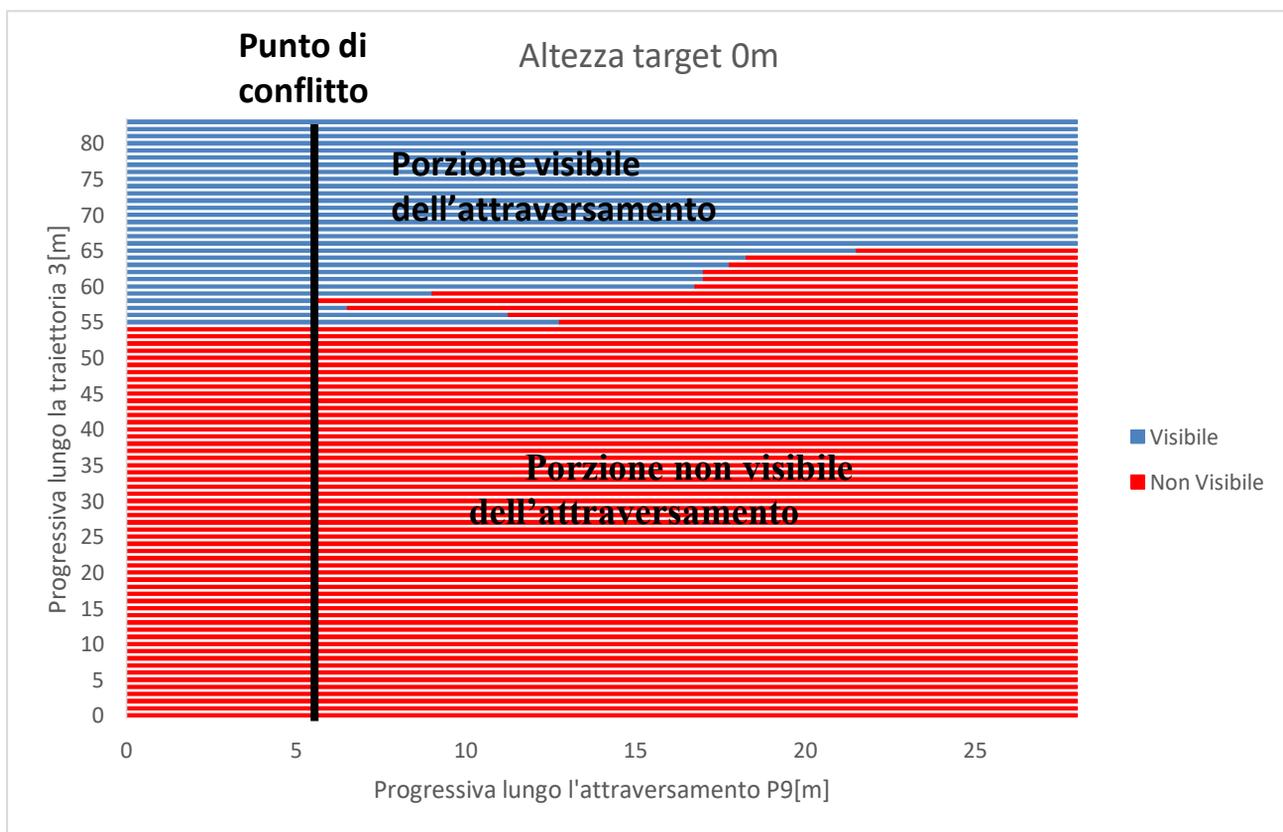


Figura 4.27 Distanze visibili dai punti di osservazione della traiettoria 3 dell'attraversamento pedonale con target posizionato al livello della superficie stradale

La Figura 4.28 mostra i risultati ottenuti considerando il target a 1 m di altezza. Come nel caso precedente Il guidatore dal primo punto di osservazione non è in grado di osservare nessun tratto dell'attraversamento pedonale. Il guidatore riesce a vedere il punto di conflitto 30 m prima di esso.

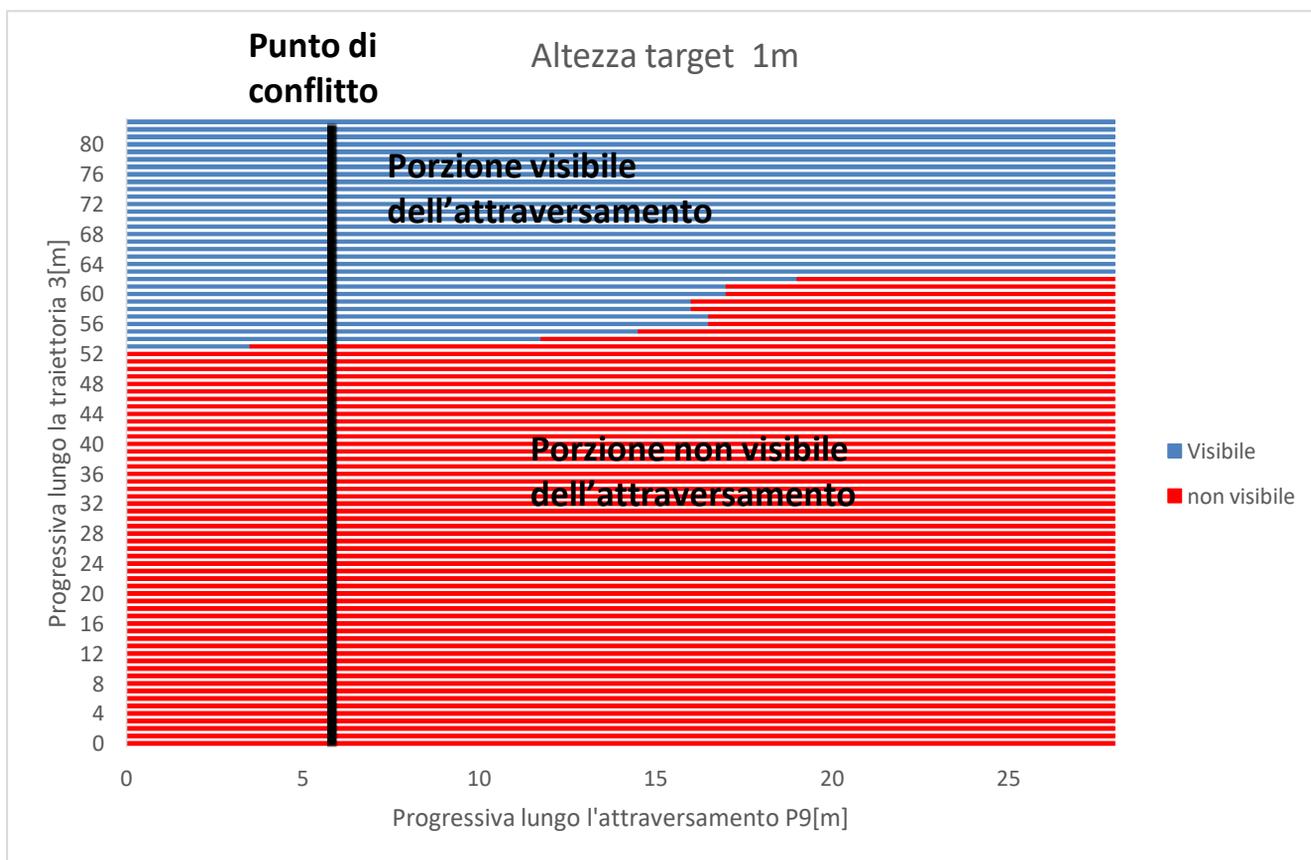


Figura 4.28 Distanze visibili dai punti di osservazione della traiettoria 3 dell'attraversamento pedonale con target posizionato a 1 m di altezza

Nella Figura 4.29, sono rappresentate le distanze visibili lungo l'attraversamento pedonale 9 con target ad altezze 0 e 1 metro. Il confronto mostra che nei punti di osservazione più lontani e in quelli più vicini, l'altezza dell'ostacolo non influisce particolarmente sulla distanza visibile. Invece, si presenta una differenza nei punti intermedi. Si può notare anche la variazione della visibilità del punto di conflitto, posizionato a 5.5 metri; esso è visibile da 30 m, se il target è alto 1 metro, e 3 metri prima, a 27 metri, quando si considera l'altezza del target pari a 0m.

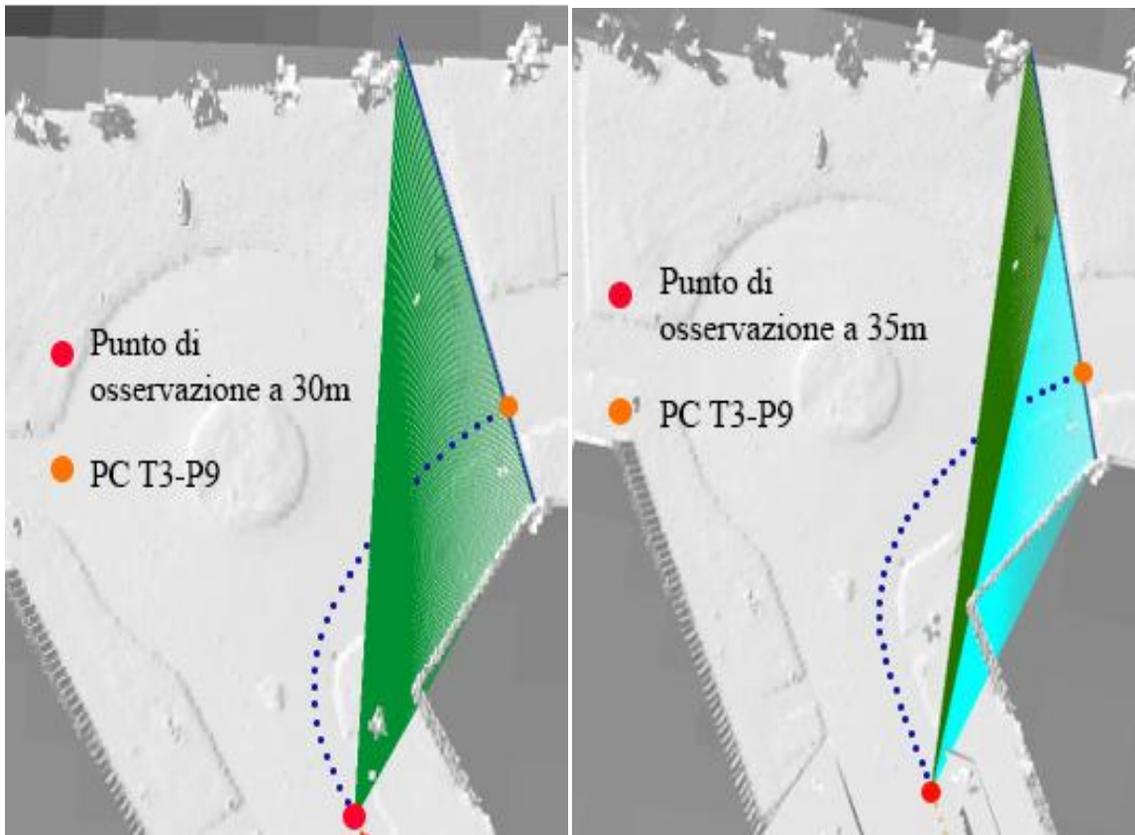


Figura 4.30 Distanze visibili dell'attraversamento pedonale dai punti di osservazione della traiettoria 3

Da tale analisi si evince che in un caso critico come quello analizzato, le condizioni di visibilità possono cambiare repentinamente; infatti, sono sufficienti 5 m a permettere all'osservatore di poter vedere il punto di conflitto.

4.3 Intersezione

Per le analisi effettuate sull'intersezione, è stato utilizzato il modello laser. Per tale caso di studio, sono state stimate la distanza disponibile per la traiettoria 4, la distanza rispetto al punto di conflitto tra tale traiettorie e la traiettoria 1, e l'interazione tra la traiettoria 3 e l'attraversamento pedonale 4 (Figura 4.31).



Figura 4.31 I punti di conflitto tra le traiettorie 1 e 4, tra la traiettoria 3 e l'attraversamento pedonale 4

4.3.1 Distanza di visibilità disponibile per la traiettoria 4

Per tale analisi, la traiettoria 4 è stata discretizzata con passo pari a 5m. I punti di osservazione sono stati collegati ai target attraverso delle linee, le quali sono state successivamente elaborate tramite Model Builder. I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 4.32, dove le linee che collegano un target visibile dall'osservatore sono identificate sono di colore verde, invece, le linee blu rappresentano i collegamenti a un target non visibile.

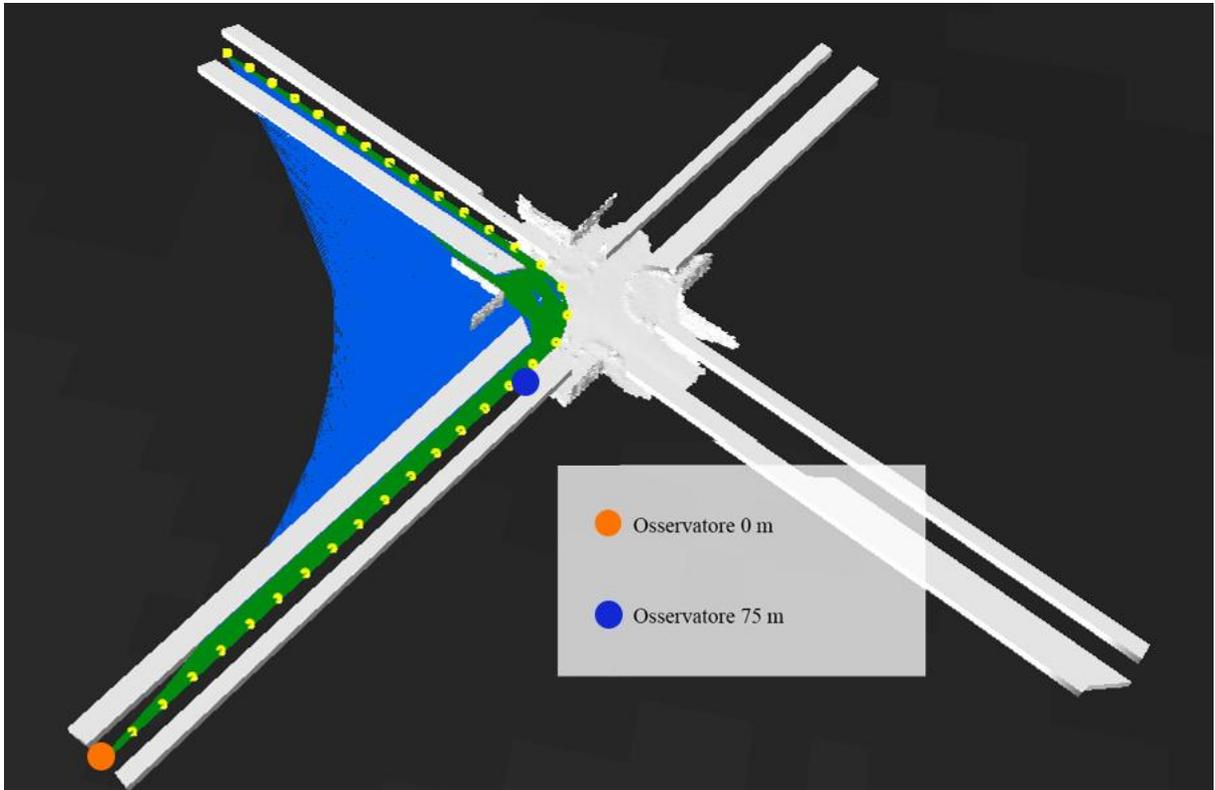


Figura 4.32 Linee di visibilità ASD nella traiettoria 4

La Figura 4.33 mostra le distanze di visibilità prive di ostacoli lungo la traiettoria 4. Tale grafico presenta un andamento iniziale decrescente dovuto alla presenza di zone di parcheggio. Infatti, quando l'osservatore è posizionato nel primo punto di osservazione (0 m), la ASD assume valore massimo, per poi raggiungere il valore minimo pari a 15 m, quando l'osservatore è in prossimità dell'intersezione (75 m). Proseguendo lungo la traiettoria, la distanza di visibilità cresce progressivamente fino a 70 m. Il grafico presenta una linea tratteggiata poichè, quando l'osservatore è nei punti di osservazione tra i 100 e 165 m, egli è in grado di avere una visuale libera da ostacoli, ma la fine del modello tridimensionale ne causa un decremento. Tale tratto non descrive lo stato reale delle condizioni di visibilità.

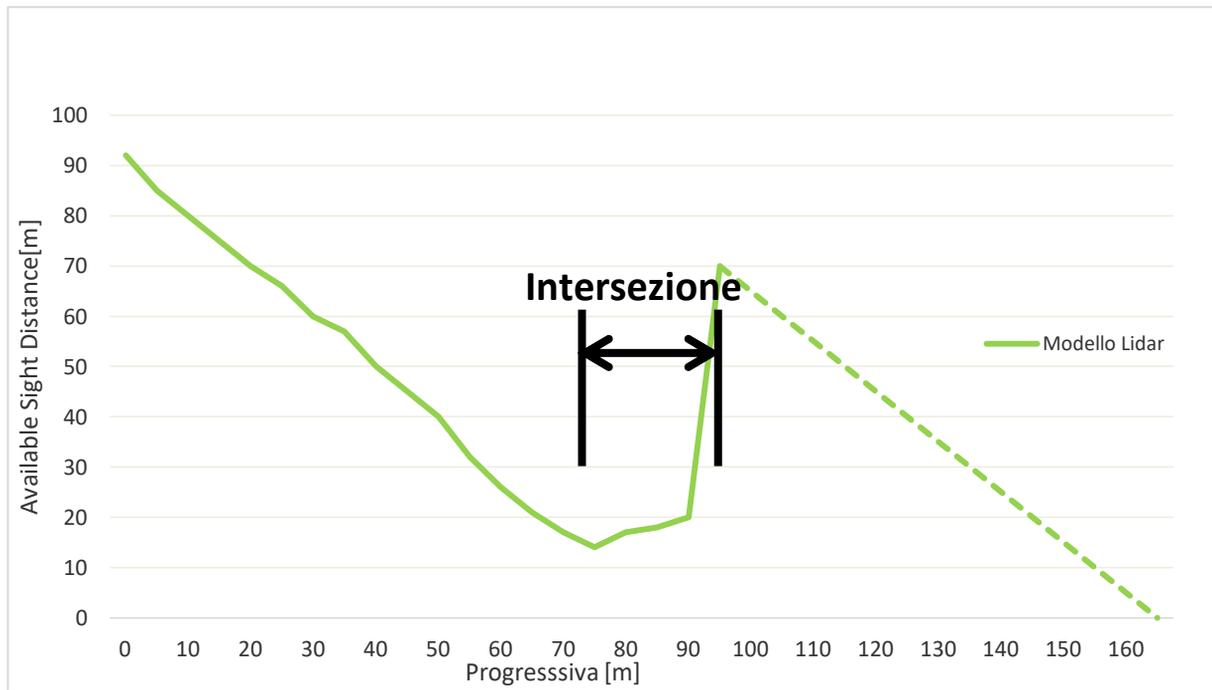


Figura 4.33 Distanze di visibilità disponibile lungo la traiettoria 4

4.3.2 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-veicolo

Per valutare la distanza di visibilità rispetto al punto di conflitto tra la traiettoria 4 e la traiettoria 1, entrambe le traiettoria 4 sono state discretizzate con passo di 1 m; il loro punto di conflitto si trova a 99 m lungo la traiettoria 1 (Figura 4.34).

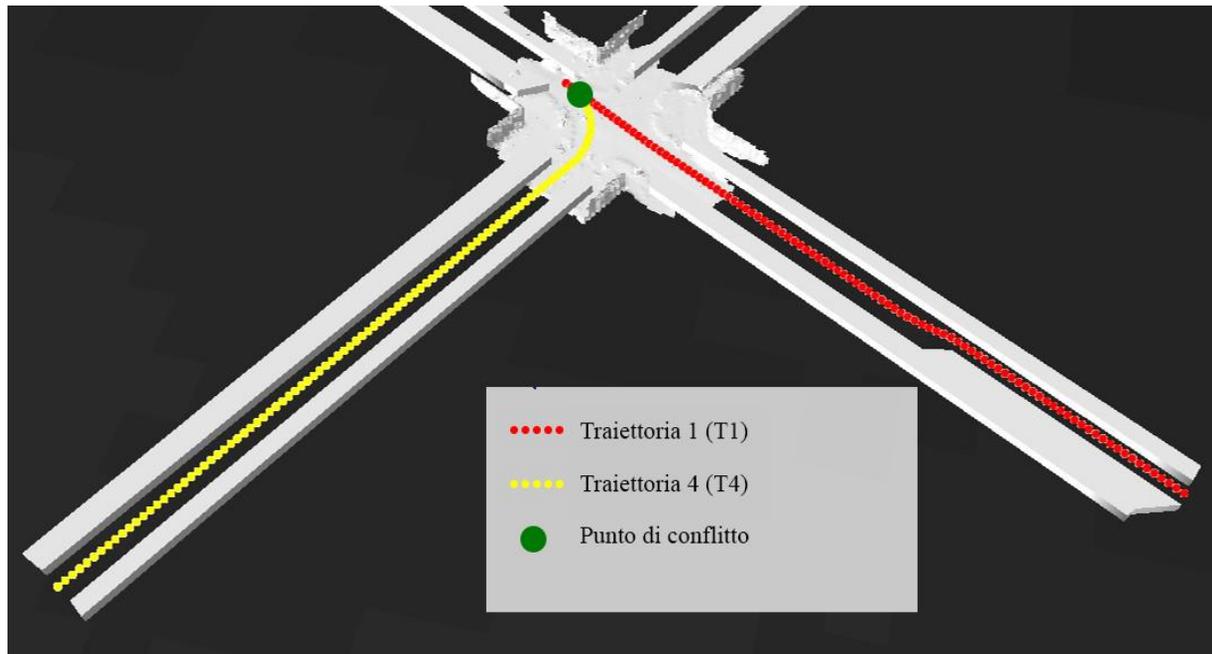


Figura 4.34 Conflitto tra le traiettorie 4 e 1

Le distanze visibili della traiettoria 1 dalla traiettoria 4 rispetto al loro punto di conflitto sono rappresentate nella Figura 4.35. Le rette identificano la traiettoria 1 che termina con il punto di conflitto con la traiettoria 4. Si utilizza la stessa colorazione precedente per identificare i tratti visibili (colore blu) e i tratti non visibili (colore rosso). Tale grafico mostra che la porzione visibile della traiettoria 1 sia pressochè limitata lungo tutta la traiettoria 4. Infatti, essa è di 6 metri lungo i primi 46 metri della traiettoria 4, per poi aumentare leggermente qualche metro prima del punto di conflitto, il quale è visibile solo dall'ultimo punto di osservazione.

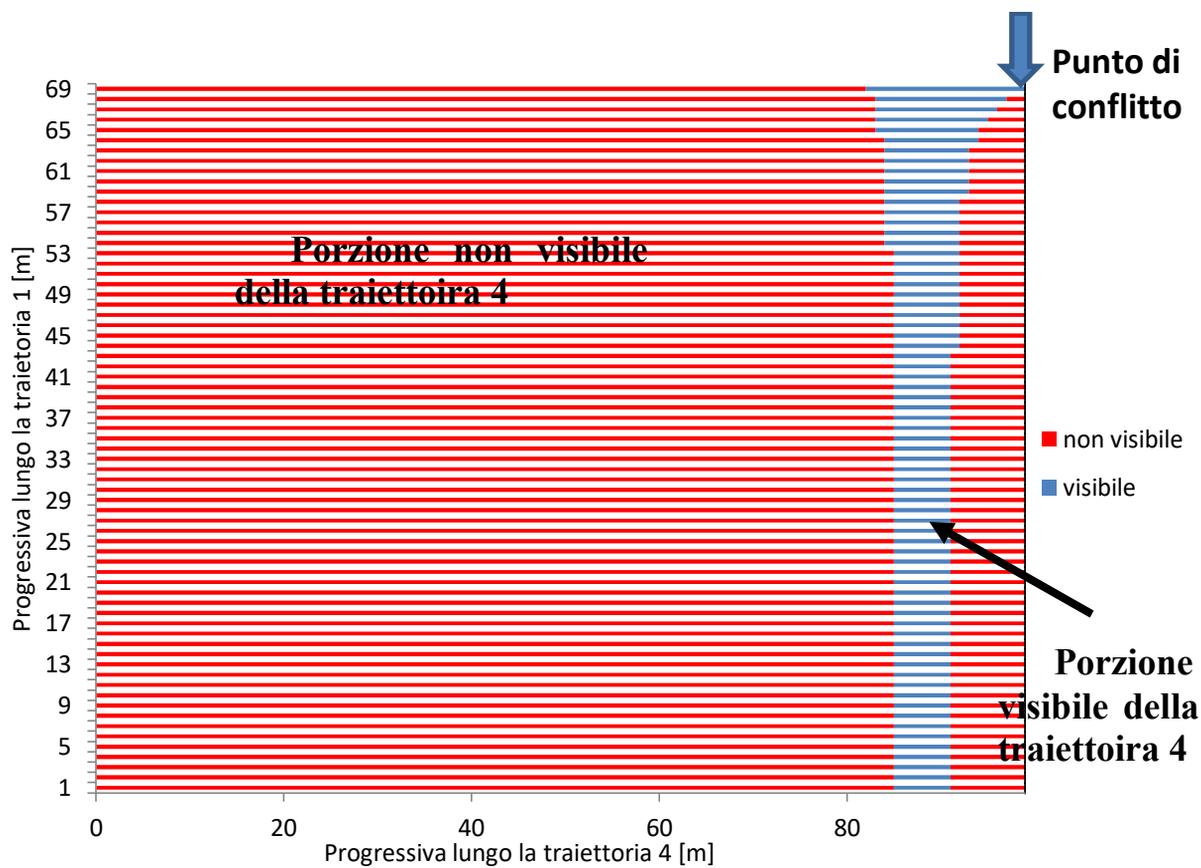


Figura 4.35 Le distanze visibili lungo la traiettoria 1 dalla traiettoria 4 rispetto a loro punto di conflitto

Tali risultati sono riportati in dettaglio nella Figura 4.36. In questa figura, le linee viola collegano gli osservatori ai punti non visibili, invece, quelle blu indicano le linee osservatore-target non ostacolate. Si nota, inoltre, che la larghezza della zona blu è quasi costante, il che indica che il tratto visibile della traiettoria 4 è sempre lo stesso, e il punto di conflitto non è visibile dai punti di osservazione.

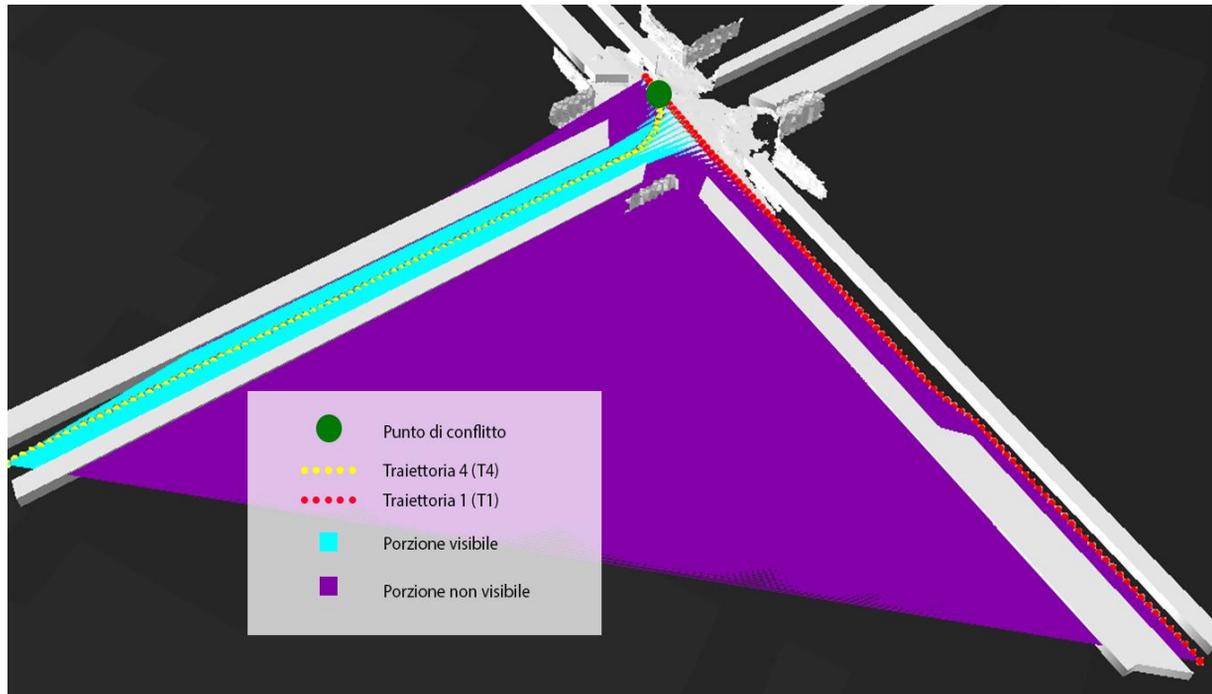


Figura 4.36 Linee visibilità rispetto al punto di conflitto tra le traiettorie 1 e 4

Da tali risultati si evince l'importanza di effettuare questo tipo di analisi in caso di intersezioni, in quanto l'utente della traiettoria 4 è in grado di vedere il guidatore della traiettoria in conflitto solo in prossimità dell'intersezione stessa, non garantendo con eccessiva sicurezza l'ingresso nell'intersezione di quest'ultimo.

4.3.3 Visibilità rispetto al punto di conflitto veicolo-pedone

Per stimare questi tipo di distanze di visibilità, sono stati considerati la traiettoria 3, discretizzata con passo pari a 1 m, e l'attraversamento pedonale P4 (Figura 4.37). Il punto di conflitto si trova a 7.5 m lungo l'attraversamento.

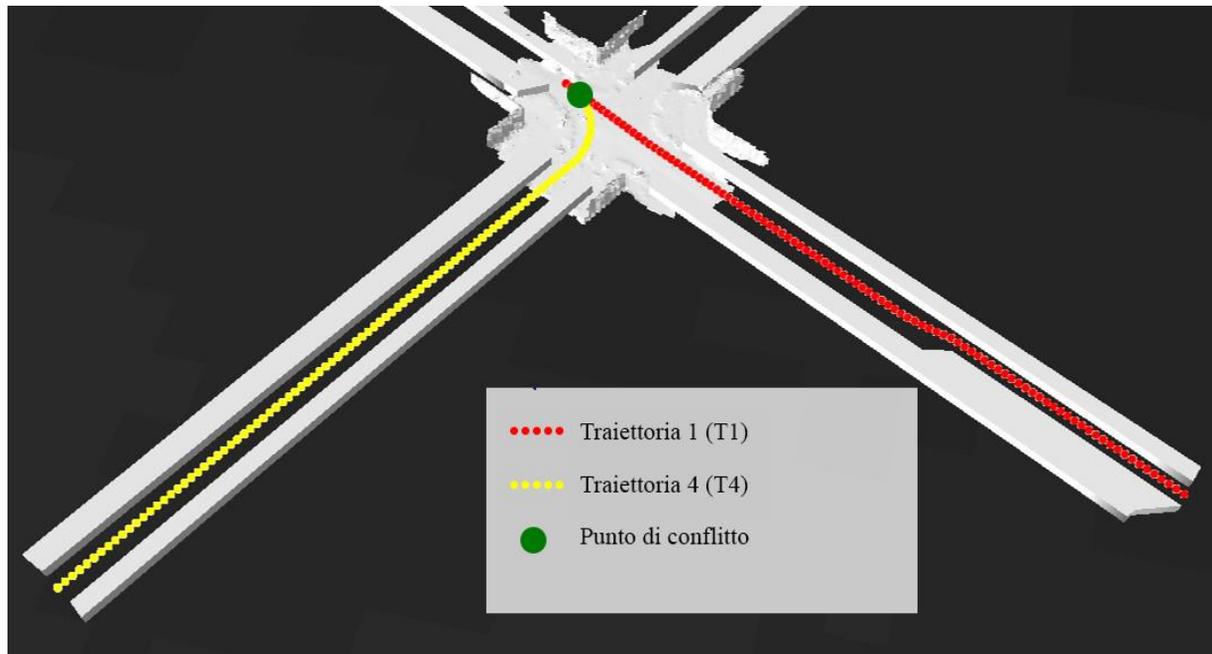


Figura 4.37 Il conflitto tra la traiettoria 3 e l'attraversamento 4

Il grafico rappresentato nella Figura 4.38 mostra i tratti visibili dell'attraversamento pedonale P4 da ogni punto di osservazione lungo la traiettoria 3. Tale grafico mostra che l'osservatore non è in grado di vedere l'attraversamento pedonale fino al punto di osservazione a 66 m lungo la sua traiettoria. Solo in prossimità dell'intersezione, a 12 m dall'attraversamento, il guidatore potrà vedere interamente quest'ultimo.

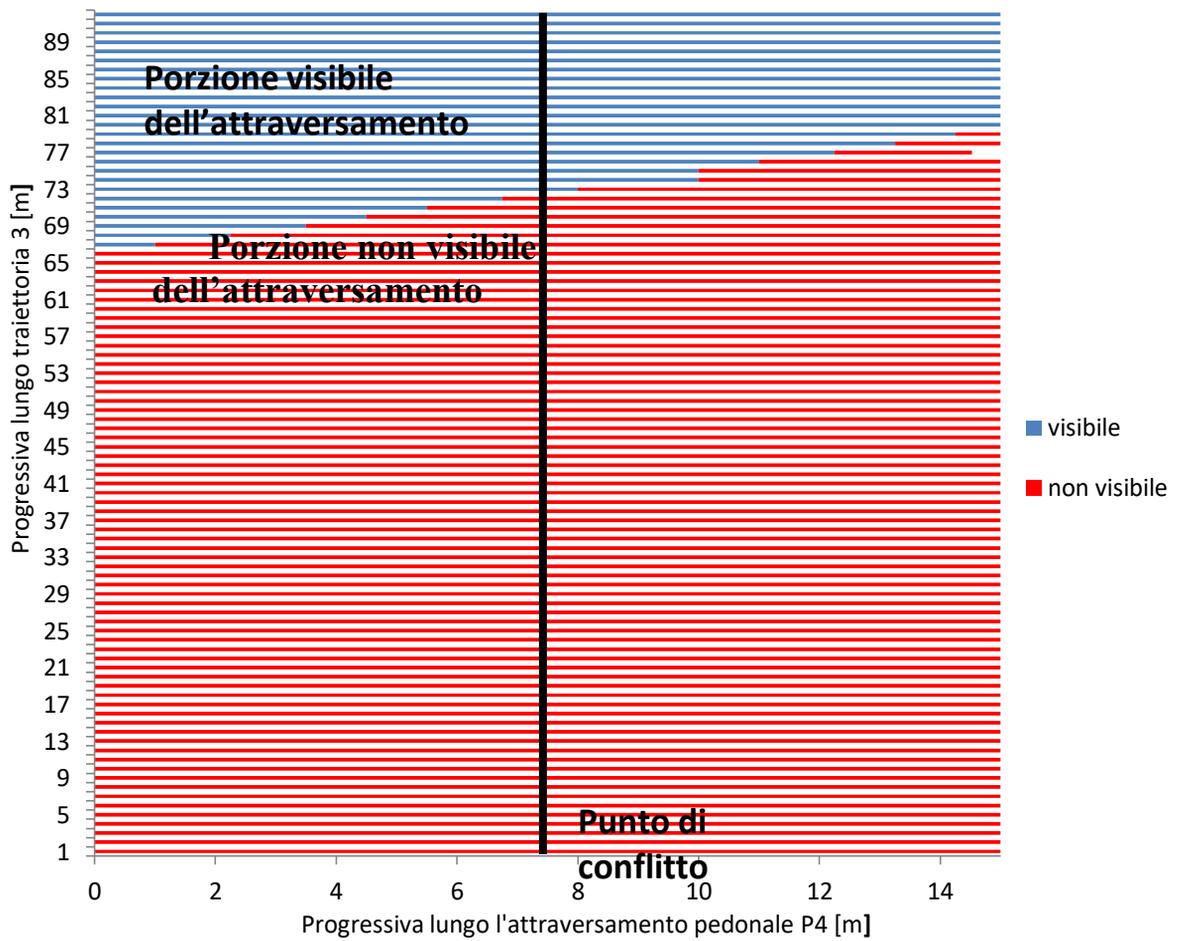


Figura 4.38 Distanze visibili dell'attraversamento P4 dalla traiettoria 3

In particolare, quando l'osservatore è posizionato a 19 m dall'attraversamento, potrà non solo vedere gran parte di esso, ma anche il punto di conflitto (Figura 4.39).

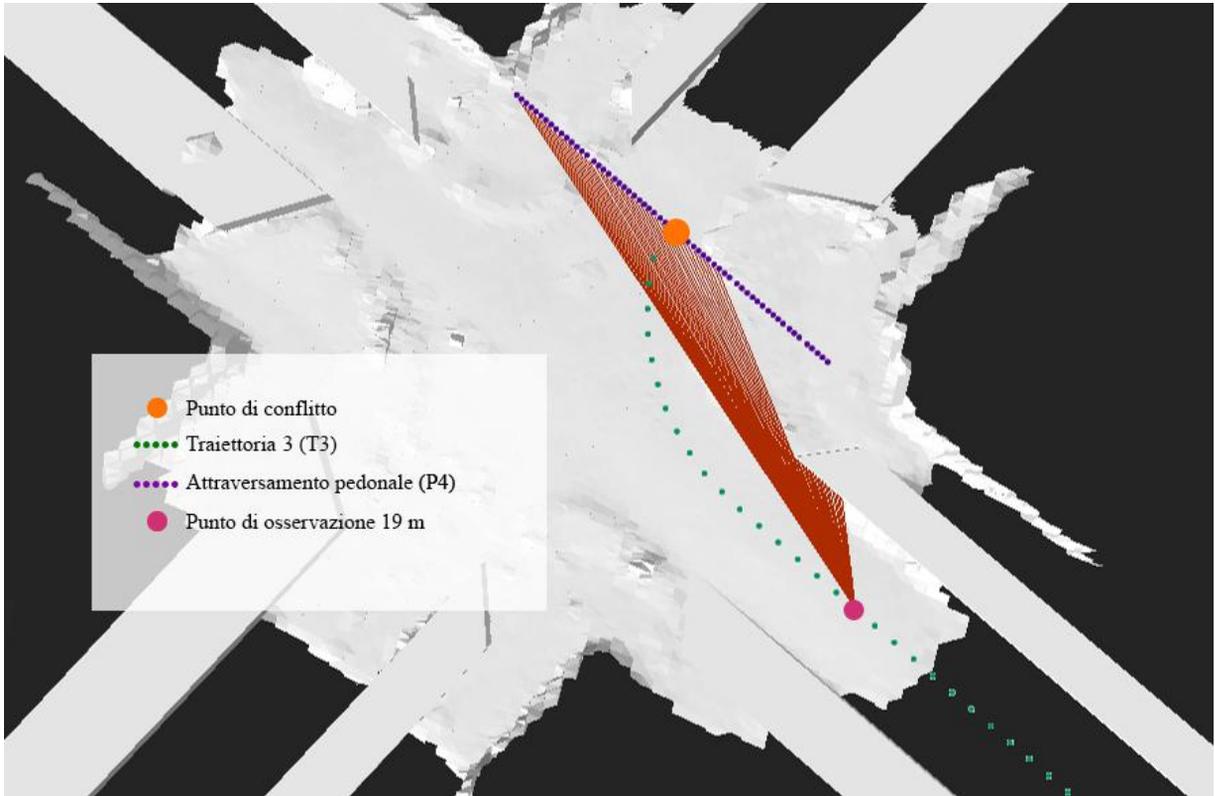


Figura 4.39 Punto di osservazione lungo la traiettoria 3 a 19 metri dall'attraversamento pedonale P4

Da tali risultati si evince l'importanza dell'analisi effettuata in quanto non è garantita la sicurezza dell'utente debole, poiché l'attraversamento pedonale inizia ad essere visibile solo quando il guidatore è in prossimità dell'intersezione.

5 Conclusioni

I problemi di visibilità nelle intersezioni, in particolare quelle urbane, sono causa di numerosi incidenti. L'attuale quadro normativo non impone nello specifico alcun correttivo o contromisura da apportare per accrescere la distanza di visuale libera e renderla compatibile con le esigenze di movimento dei diversi utenti, fatto salvo nel caso delle strade e nelle intersezioni di nuova costruzione. Nella speranza che future regole normative possano regolare in modo chiaro e preciso anche l'ambito delle infrastrutture esistenti, è oggi necessario sviluppare strumenti e metodi per la stima delle effettive condizioni di visibilità che oggi sono garantite all'utenza.

Il lavoro di tesi ha portato allo sviluppo di una possibile metodologia per la stima della distanza di visibilità disponibile attraverso la ricostruzione tridimensionale di modelli tramite l'elaborazione di immagini fotogrammetriche (da macchine Reflex e action cam) e con laser scanner. Per disporre di modelli georeferenziati sono stati identificati, nelle immagini, dei punti di riferimento le cui coordinate sono state ricavate attraverso l'ausilio di una stazione totale.

È altresì importante sottolineare che, dal confronto tra il modello laser e quello fotogrammetrico, si evince l'originalità di tale lavoro, poichè la limitata differenza dei valori delle distanze di visibilità non differiscono notevolmente, e ciò dimostra come sia possibile valersi di strumenti a costo contenuto per ottenere dei risultati affidabili, non dissimili da quelli ottenuti utilizzando strumenti costosi, anche in luogo complesso quale un'intersezione di una zona urbana densamente edificata.

L'ausilio del software Photoscan ha portato all'elaborazione di immagini, mediante l'utilizzo di punti di riferimento, che ha condotto alla realizzazione di nuvole di punti per ogni macchina fotografica utilizzata. Tale software ha fornito, a seguito dell'elaborazione, un errore totale per ognuna di esse, indice di livello di affidabilità delle stesse nuvole, ed in base a questo, si è proceduto ad una selezione tra esse. Inoltre, per rendere ulteriormente attendibili i risultati attesi, si è proceduto ad un confronto di esse con altre nuvole di punti ricavate con il software Scene che elabora scansioni tramite il Laser Scanner. Si è potuto pertanto notare come le nuvole ottenute con tale software rappresentano in maniera inappuntabile i luoghi esaminati, per cui esse sono state considerate un valido riferimento per i successivi confronti. Questa procedura è stata eseguita per entrambi i luoghi oggetto di studio. Nel caso della rotatoria esaminata le nuvole ottenute sono due, una ricavata con fotocamera Reflex, e l'altra tramite frame ottenuti da filmati realizzati con la action cam. Nel caso dell'intersezione invece, si è elaborata un'unica nuvola, ottenuta tramite immagini di una macchinetta fotografica Reflex.

Successivamente il software Cloud Compare ha consentito la comparazione delle nuvole di punti fornendo un istogramma che espone il numero di punti aventi la medesima distanza nelle due nuvole, e ciò ha potuto far emergere la verosimiglianza del modello fotografico confrontato. Gli istogrammi ottenuti mostrano come la maggior parte dei punti non sono differenti tra loro, cioè lo stesso punto si trova nella medesima posizione nei due elementi tridimensionali, implicando che le nuvole create, elaborate tramite immagini, si confondono con il modello reale. Inoltre tali nuvole sono state in secondo luogo elaborate con il medesimo software allo scopo di creare mesh delle superfici dei luoghi analizzati.

I risultati, ottenuti nel caso dell'intersezione lineare, mostrano tuttavia delle limitazioni del metodo sviluppato. Si è potuto difatti realizzare una nuvola di punti unicamente con le immagini ottenute dalla macchinetta fotografica Reflex. È infatti importante rimarcare che, nel caso dell'intersezione, essa è localizzata all'interno di un tessuto urbano in cui vi sono molti elementi di disturbo (veicoli in sosta, edifici ecc..) e ciò non predispone ad visione ottimale nel momento dei rilievi, conducendo all'ottenimento di un modello disturbato. Al contrario nel caso della rotatoria, la zona di interesse risulta più ampia, per cui si è arrivati ad ottenere un modello più ottimale rispetto a quello sopra citato con entrambi i mezzi di rilevamento (action cam e Reflex).

I modelli tridimensionali sono stati in seguito integrati nell'ambito GIS con il DTM per creare il DSM che rappresenta tutti gli elementi che compongono l'intersezione quali vegetazione, segnaletica stradale, architetture e inserzioni pubblicitarie. Sono stati altresì definiti tre tipi di analisi che prendono in considerazione tutti gli utenti in movimento nella zona come veicoli ed utenti deboli. In primo luogo le analisi condotte mostrano la distanza di visuale libera del guidatore lungo la sua traiettoria. Successivamente ulteriori indagini prevedono l'interazione tra un veicolo e un'altro che effettuano due traiettorie in conflitto; si considera la distanza dalla quale il guidatore riesce a vedere il punto di conflitto e quale porzione dell'altra traiettoria è a lui visibile. La terza tipologia di analisi, che coinvolge gli utenti deboli in attraversamento, è stata eseguita considerando la distanza visibile dell'attraversamento ad ogni metro della traiettoria del veicolo.

Gli esiti conseguiti nel presente lavoro sono congruenti con la tendenza manifestata negli ultimi anni che vede sempre più l'ausilio di codici GIS nello studio e nell'analisi di visibilità delle strade esistenti. Lo studio sin qui svolto costituisce il preludio ad analisi di visibilità che tiene conto della velocità delle diverse utenze e del riguardo delle precedenze nei punti di conflitto. Un ulteriore sviluppo in tale ambito potrà offrire aiuto per comprendere in un contesto spazio-temporale complesso come quello stradale, quali siano le contromisure più efficaci da poter adoperare per apportare progressi nella viabilità già esistente e nelle condizioni di visibilità che interessano i tessuti urbani.

Bibliografia

- [1] Istituto Nazionale di Statistica, 2016. Incidenti stradali nell'anno 2015, Dati provvisori. <https://www.istat.it/it/files/2016/07/Incidenti-stradali-2015.pdf?title=Incidenti+stradali+-+dati+provvisori+-+19/lug/2016+-+Testo+integrale+e+nota+metodologica.pdf>
- [2] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001. Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade. Decreto Ministeriale 6792, Roma, Italia.
- [3] Timothy Crothers, NRS509, November 30, 2005. Use of Geographic Information Systems in the Management of Transportation Systems
- [4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2006. Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali. Decreto Ministeriale 16.04.2006 (GU n.170 del 24.07.2006), Roma, Italia.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. 4th edition.
- [6] Thill, J.C., 2000. Geographic Information Systems for transportation in perspective. Transportation Research Part C 8,3-12.
- [7] Han, K., J. Montufar, S. Minty, and A. Clayton. 2002. Techniques for building multijurisdictional geographic information system platforms for transportation analysis. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1804:187-195.
- [8] Castro, M., L. Iglesias, and J.A. Sanchez, L. Ambrosio. Sight distance analysis of highways using GIS tools. Transportation Research Part C 19(2011), 997-1005.
- [9] Bassani, M., Grasso, N., Piras, M., 2015. 3D GIS based evaluation of the available sight distance to access safety of urban roads. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3, 2015. ISPRS Geospatial Week 2015, 28 Sep-03 Oct 2015, La Grande Motte, France
- [10] Easa, S.M. Pedestrian. Lateral Clearance Needs for Stopping Sight Distance at Single Lane Symmetrical Roundabouts, 2017

- [11] Easa, S.M. Pedestrian. Crossing Sight Distance: Lateral Clearance Guidelines for Roadways. Transportation Research Record 2588, Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016, 32–42
- [12] Rodegerdts, L., M. Blogg, E. Wemple, E. Myers, M. Kyte, M. Dixon, G. List, A. Flannery, R. Troutbeck, W. Brilon, N. Wu, B. Persaud, C. Lyon, D. Harkey, and C. Carter. Roundabouts in the United States. National Cooperative Highway Research Program Report 572, Transportation Research Board, Washington, DC, 2007.
- [13] McGlone, J.C, Mikhail, E., Bethel, J. 2004. Manual of Photogrammetry, American society for Photogrammetry and Remote Sensing, 5th edition, Bethesda, MD.
- [14] https://learn.foundry.com/modo/902/content/help/pages/rendering/camera_matching.html
- [15] <https://www.tigersupplies.com/Products/Leica-Flexline-TS06-Plus-Reflectorless-Manual-Total-Station-LEI6006191-.aspx>
- [16] <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>
- [17] <http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gpsgis/gis08plus/brochures-datasheet/leica%20viva%20gis08plus%20ds%20it.pdf>.
- [18] Khattak, A. J., and H. Shamayleh. 2005. Highway safety assessment through geographic information system-based data visualization. Journal of Computing in Civil Engineering 19.4:407–411
- [19] Wael K.M. Alhajyaseen, Miho Asano, Hideki Nakamura, Dang Minh Tan. Transportation Research Part C 32(2013), 179–192
- [20] http://geomap.reteunitaria.piemonte.it/WEBCAT/CAPABILITIES/wms_coto_ortofoto_2016.xml
- [21] Department of Main Roads, Chapter 14-Roundabouts. Road Planning and Design Manual
- [22] NCHRP Research Report 875: Guidance for Evaluation the Safety Impacts of Intresection Sight Distance

Allegato 1

```
clc;
close all;
imtool close all;
clear;
workspace;
fontSize = 14;
disp inizio
readerobj = VideoReader('VIRB0459.MP4'); [Inserire nome video]
numFrames = get(readerobj,
'NumberOfFrames');
numFrames
numberOfFramesWritten=0;
for k = 1 : 15 : numFrames [ il passo per estrarre I frame, un frame ogni 15]
thisFrame = read(readerobj, k);
outputBaseFileName = sprintf('459-imwrite(thisFrame, outputBaseFileName, 'tif');
[Nominare I frame che sono estratte in formato .tif con il loro ordine]
progressIndication = sprintf('Wrote frame disp(progressIndication);
numberOfFramesWritten = numberOfFramesWritten + 1;
end

disp '=== Fine ==='
```

Allegato 2

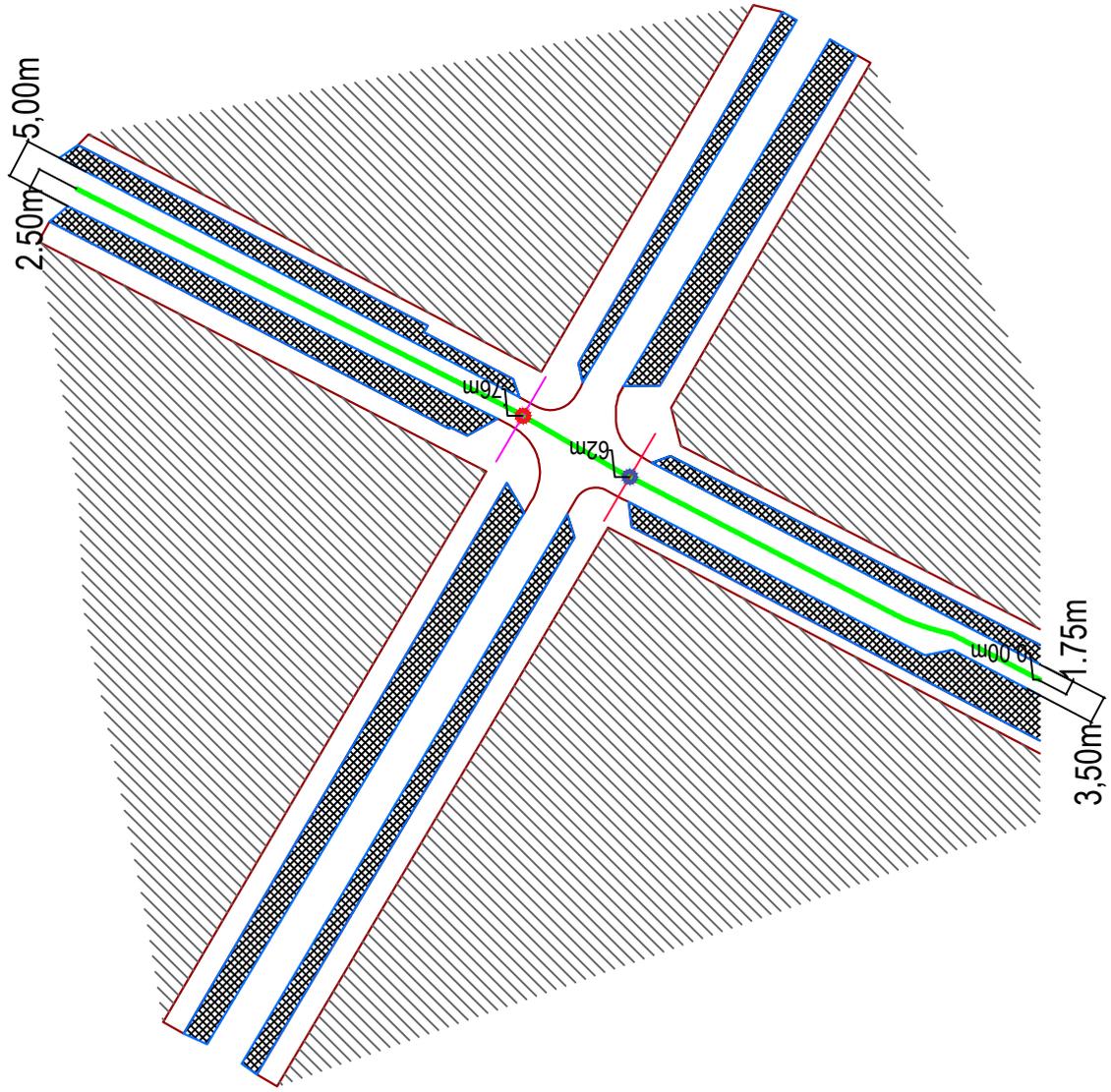
Nel presente allegato sono riportate le traiettorie tracciate in entrambi casi studio.

Traitтория 1



Intersezione via
Torricelli- via
Cassini
Torino

scala :1/1000



Ostruzioni $h > 2m$
 Ostruzioni $h = 1.6m$

Traitтория 1 (T1)
 Attraversamneto pedonale P3
 Attraversamneto pedonale P1

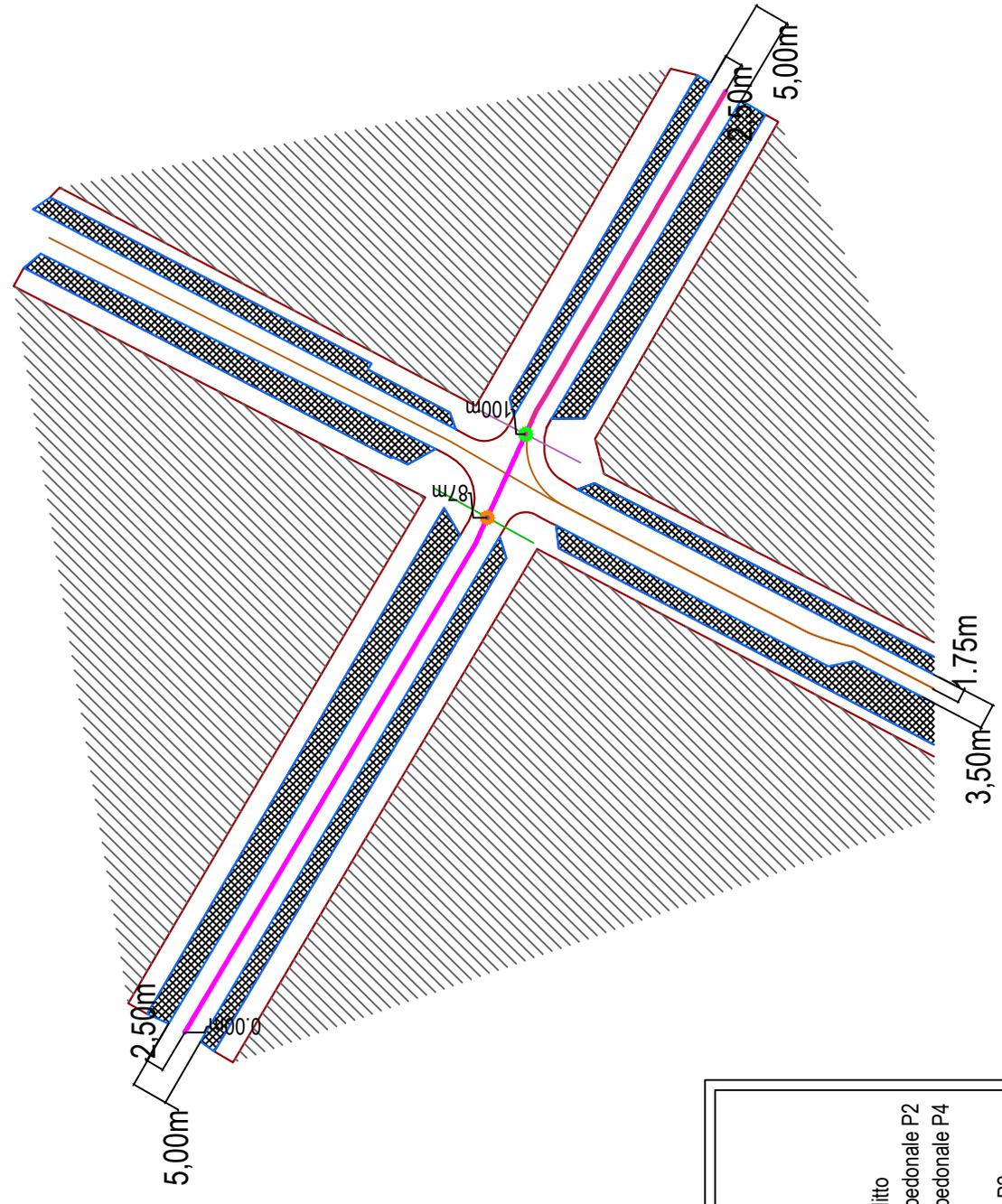
Punto di conflitto T1 e P3
 Punto di conflitto T1 e P1

Traitтория 2



Intersezione via
Toricelli- via
Cassini
Torino

scala :1/1000



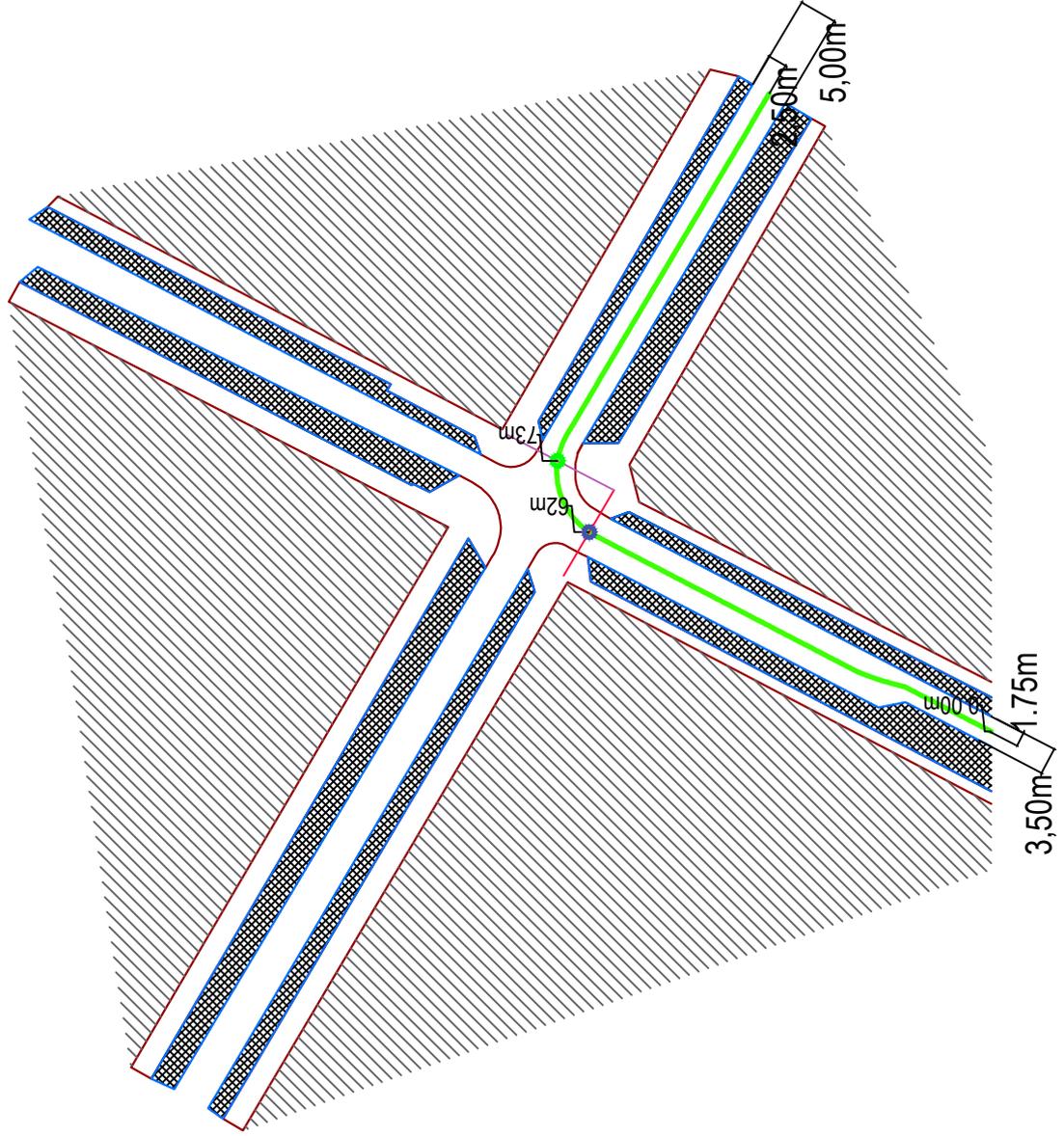
- Ostruzioni h>2m
- Ostruzioni h=1.6m
- Traitтория 2 (T2)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamento pedonale P2
- Attraversamento pedonale P4
- Punto di conflitto T2 e P2
- Punto di conflitto T2 e P4

Traitтория 3



Intersezione via
Toricelli- via
Cassini
Torino

scala :1/1000



Ostruzioni h>2m
 Ostruzioni h=1.6m

Traitтория 3 (T3)
Attraversamneto pedonale P3
Attraversamneto pedonale P4

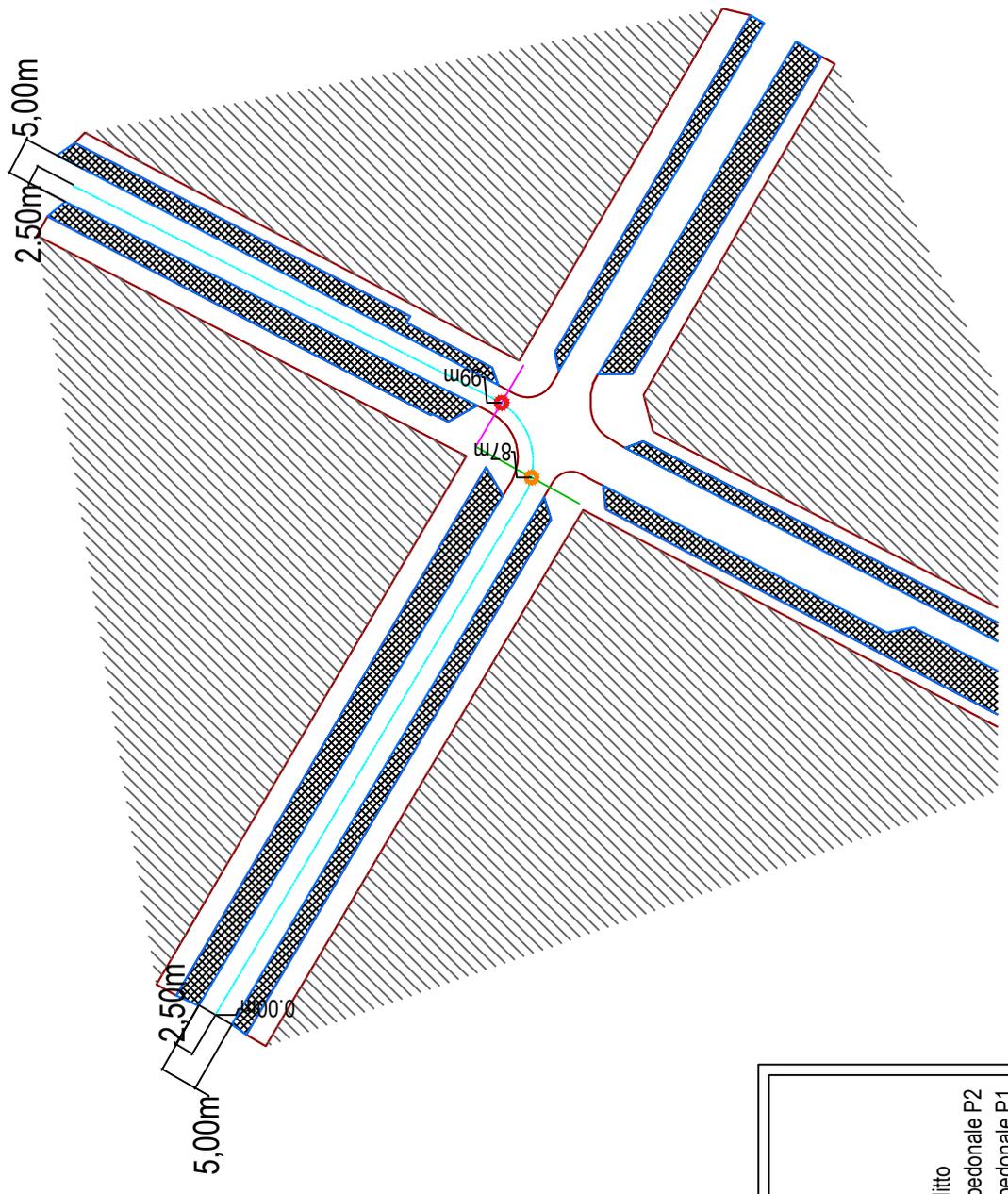
Punto di conflitto T3 e P3
 Punto di conflitto T3 e P3

Traitтория 4



Intersezione via
Torricelli- via
Cassini
Torino

scala :1/1000

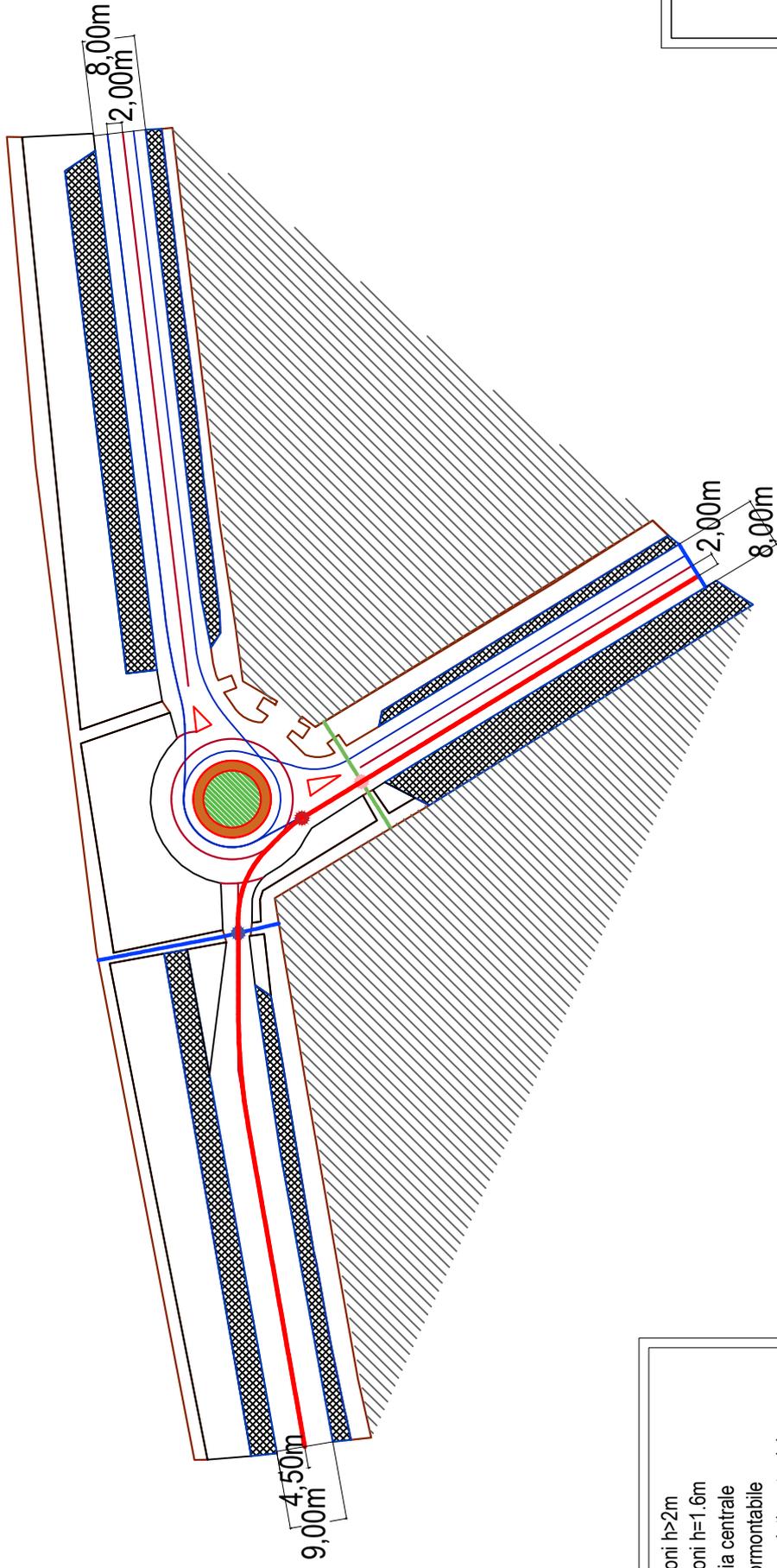


- Ostruzioni h>2m
- Ostruzioni h=1.6m
- Traitтория 4 (T4)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamneto pedonale P2
- Attraversamneto pedonale P1
- Punto di conflitto T4 e P2
- Punto di conflitto T4 e P1

Traittoria 1

Rotatoria Lungo
Dora Siena
Torino

scala :1/1000

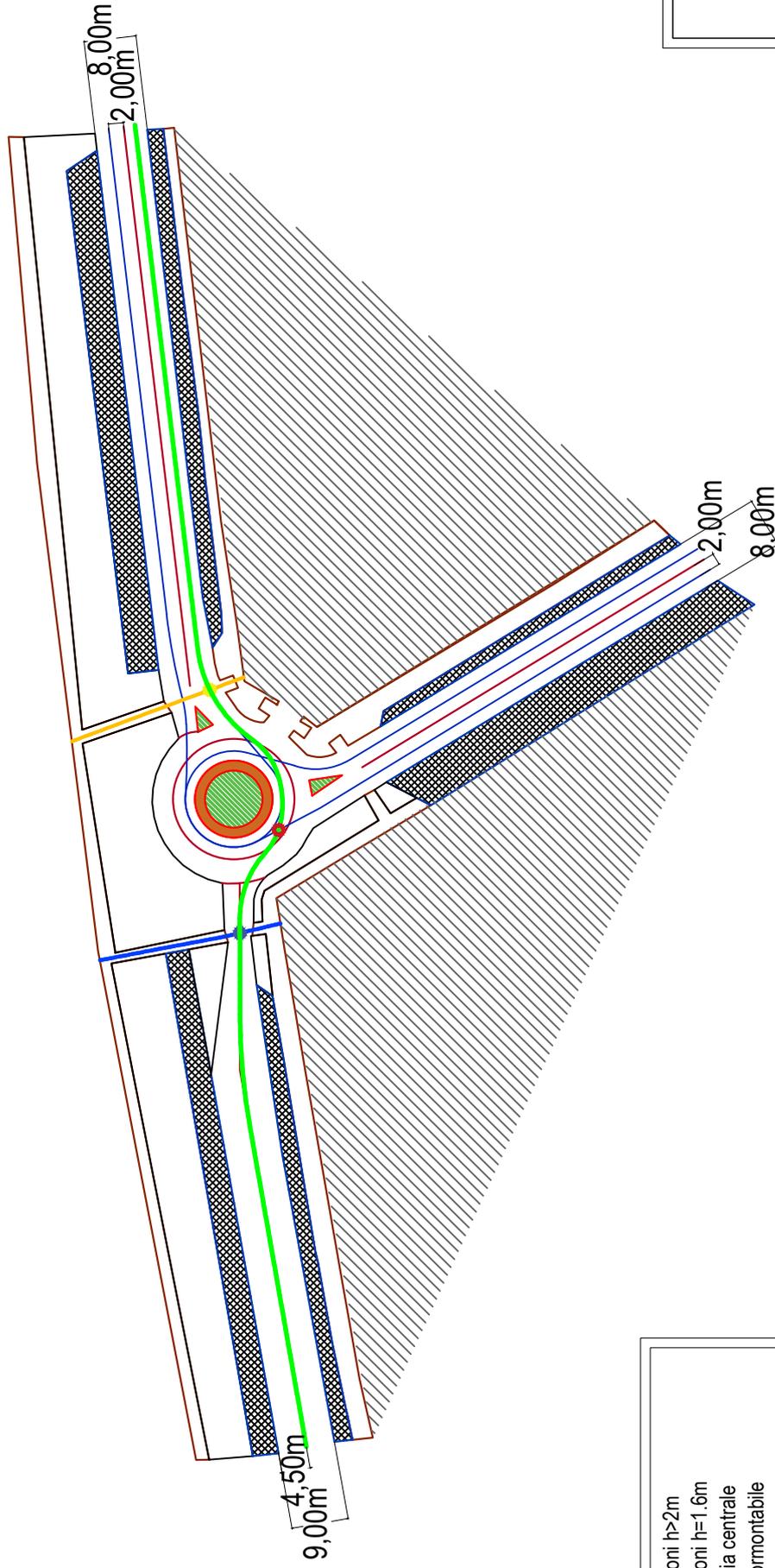


- Ostruzioni $h > 2m$
- Ostruzioni $h = 1.6m$
- Rotatoria centrale
- Area sormontabile
- Segnaletica stradale
- Traittoria 1 (T1)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamento pedonale P7
- Attraversamento pedonale P8
- Punto di conflitto T1 e P7
- Punto di conflitto T1 e P8
- Punto di conflitto T1 e T5

Traittoria 2

Rotatoria Lungo
Dora Siena
Torino

scala :1/1000

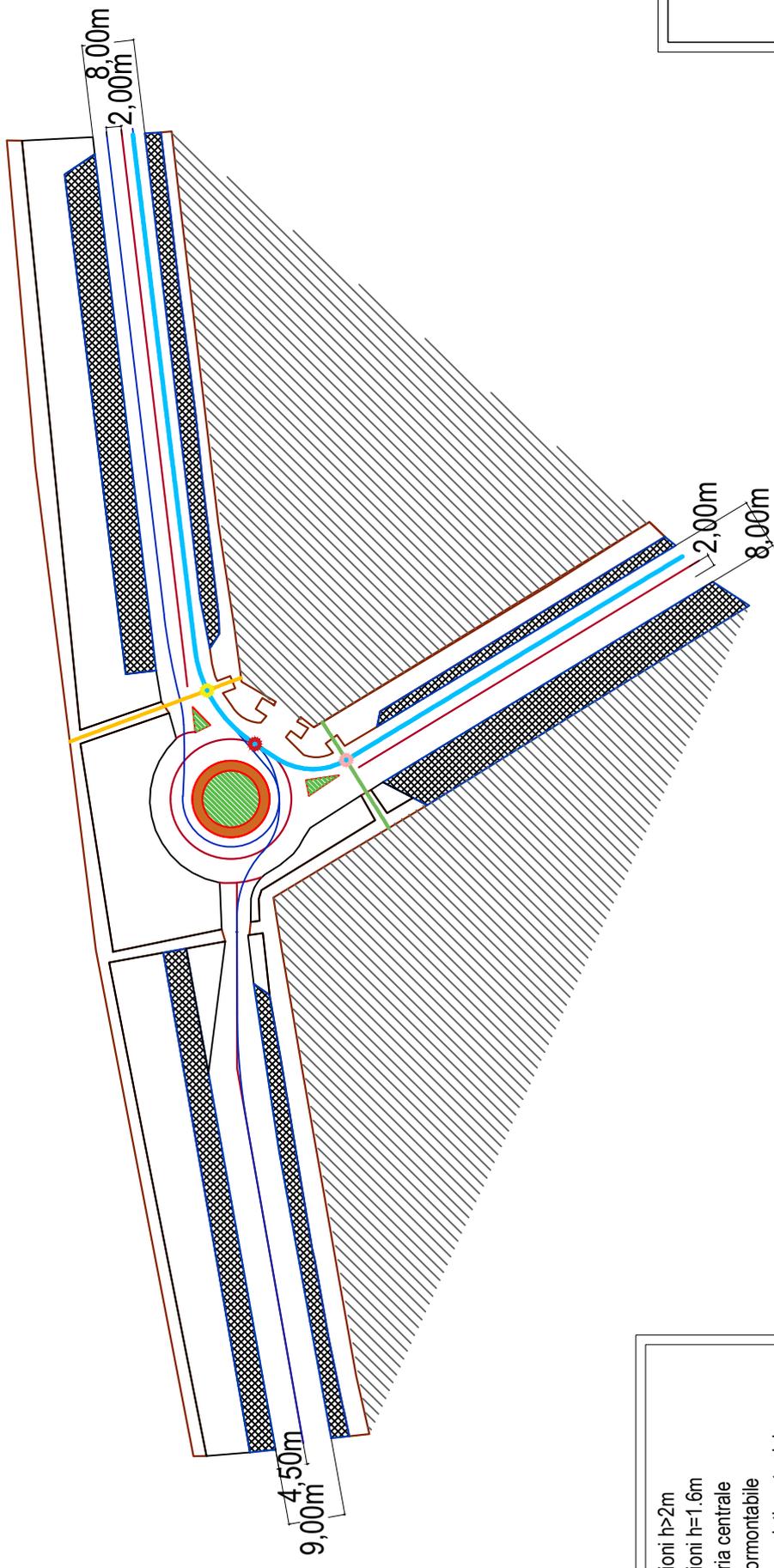


- Ostruzioni $h > 2m$
- Ostruzioni $h = 1.6m$
- Rotatoria centrale
- Area sormontabile
- Segnaletica stradale
- Traittoria 2 (T2)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamento pedonale P7
- Attraversamento pedonale P9
- Punto di conflitto T2 e P7
- Punto di conflitto T2 e P9
- Punto di conflitto T2 e T5

Traitтория 3

Rotatoria Lungo
Dora Siena
Torino

scala :1/1000

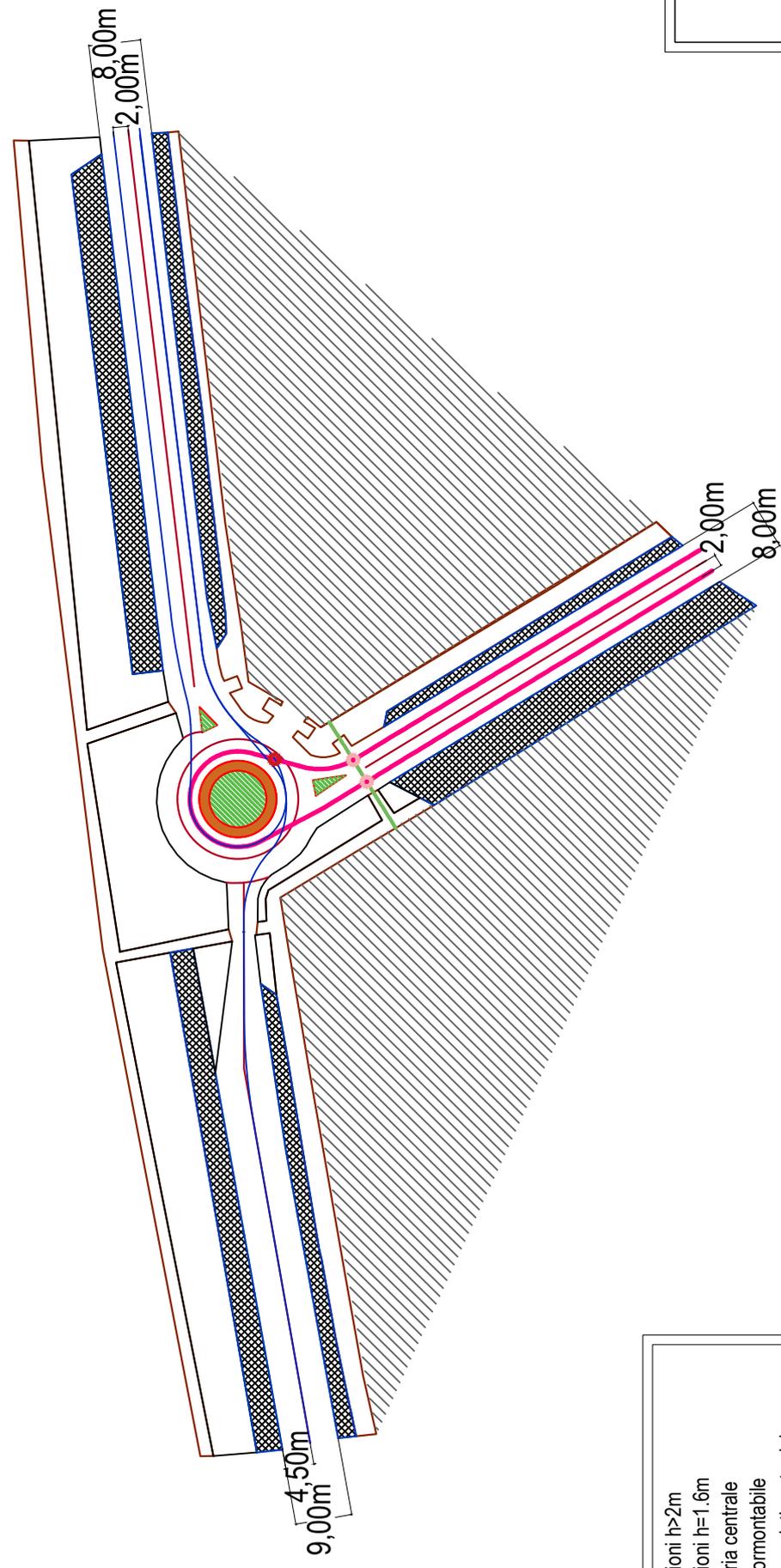


- Ostruzioni h>2m
- Ostruzioni h=1.6m
- Rotatoria centrale
- Area sormontabile
- Segnaletica stradale
- Traitтория 3 (T3)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamento pedonale P8
- Attraversamento pedonale P9
- Punto di conflitto T3 e P8
- Punto di conflitto T3 e P9
- Punto di conflitto T3 e T2

Traittoria 4

Rotatoria Lungo
Dora Siena
Torino

scala :1/1000

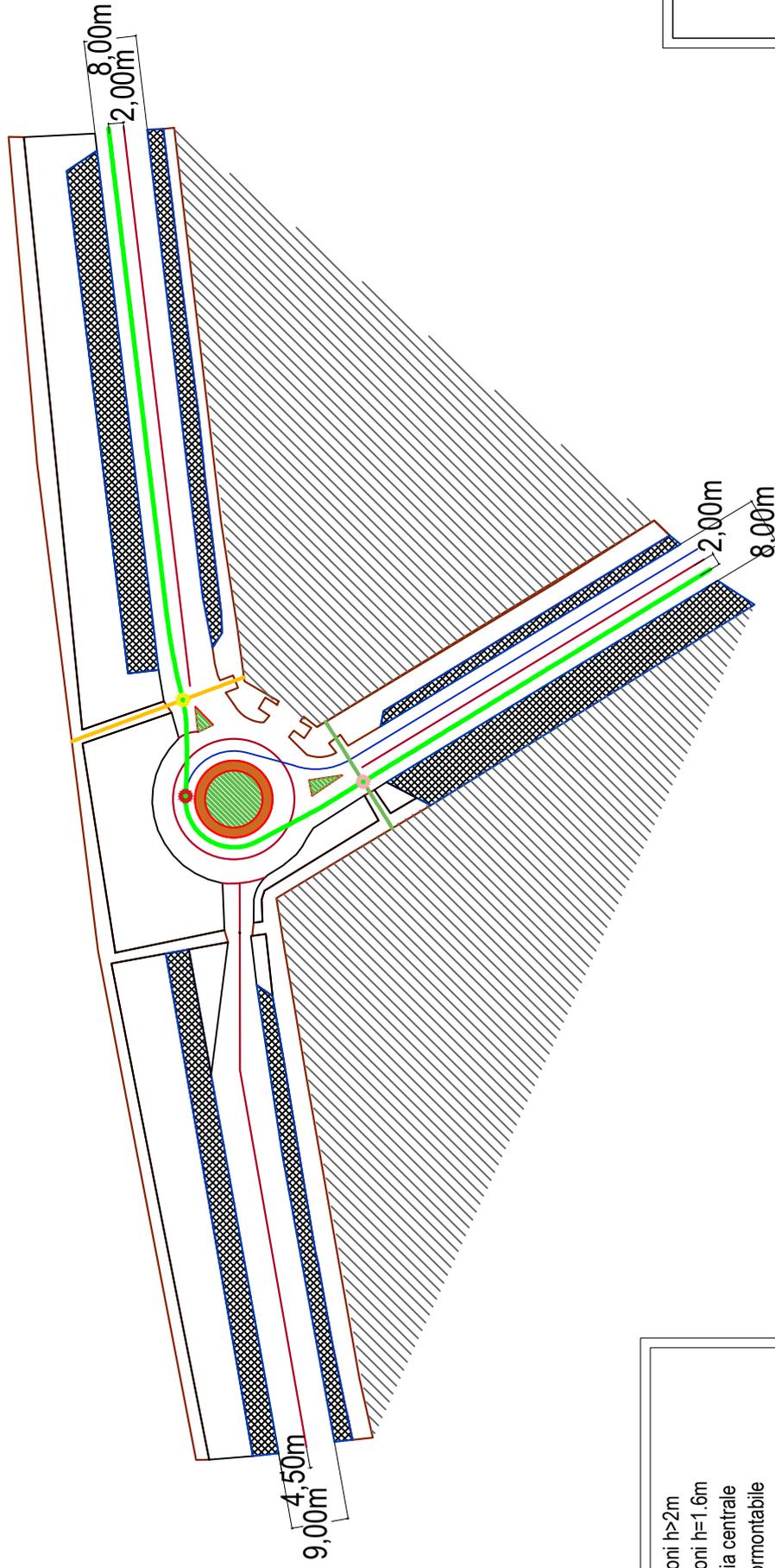


- Ostruzioni $h > 2m$
- Ostruzioni $h = 1.6m$
- Rotatoria centrale
- Area sormontabile
- Segnaletica stradale
- Traittoria 4 (T4)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamento pedonale P8
- Punto di conflitto T4 e P8
- Punto di conflitto T4 e T2

Traittoria 5

Rotatoria Lungo
Dora Siena
Torino

scala :1/1000



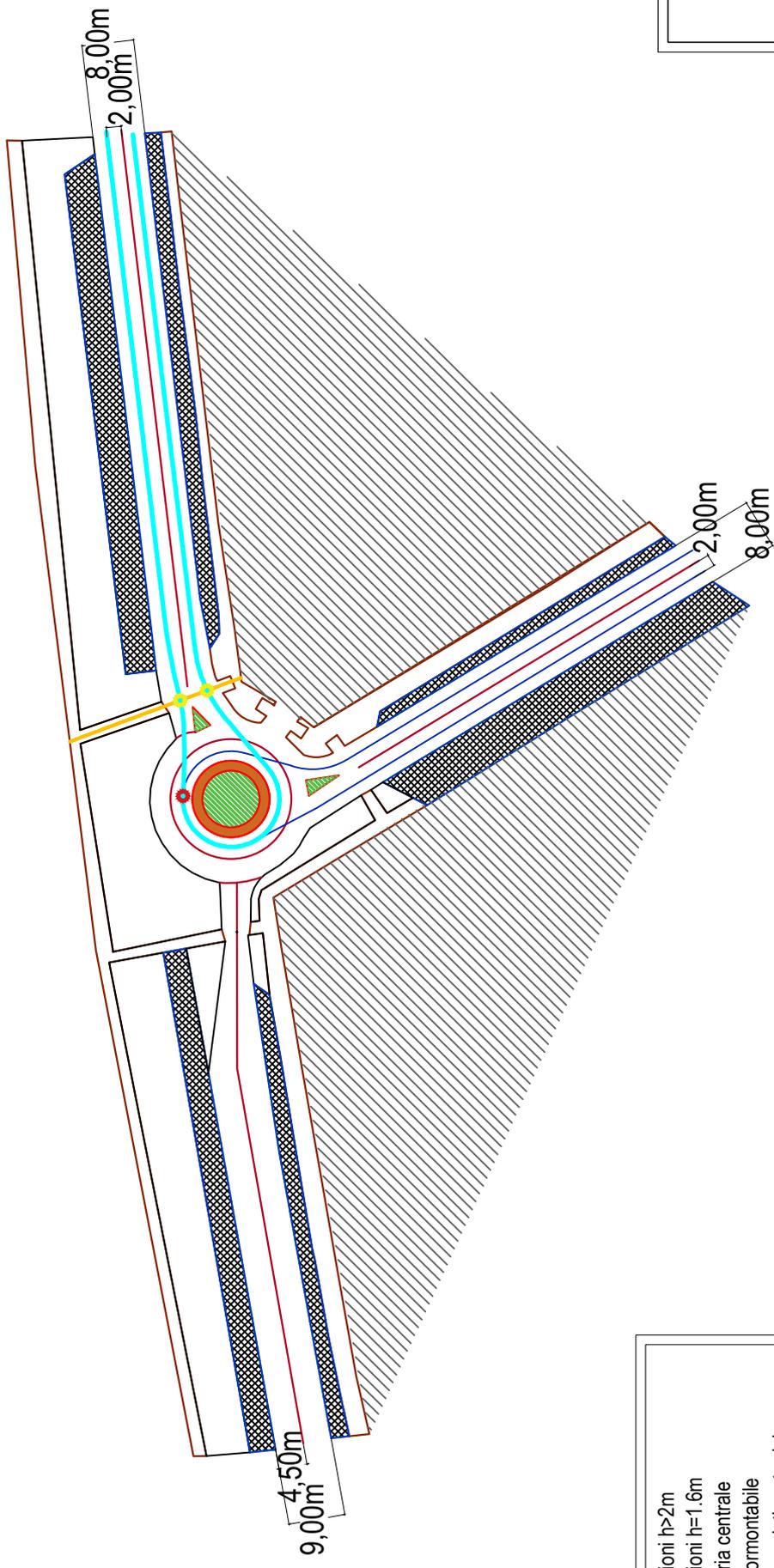
- Ostruzioni $h > 2m$
- Ostruzioni $h = 1.6m$
- Rotatoria centrale
- Area sormontabile
- Segnaletica stradale
- Traittoria 5 (T5)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamento pedonale P9
- Attraversamento pedonale P8
- Punto di conflitto T5 e P8
- Punto di conflitto T5 e P9
- Punto di conflitto T5 e T4

Traittoria 6



Rotatoria Lungo
Dora Siena
Torino

scala : 1/1000



- Ostruzioni $h > 2m$
- Ostruzioni $h = 1.6m$
- Rotatoria centrale
- Area sormontabile
- Segnaletica stradale
- Traittoria 6 (T6)
- Traiettorie di conflitto
- Attraversamento pedonale P9
- Punto di conflitto T6 e P9
- Punto di conflitto T6 e T4