

Alma Mater Studiorum
Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea in Ingegneria Civile
Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti L-S

INTERSEZIONI STRADALI A RASO :
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE,
STRUTTURALI E FUNZIONALI DELLE
ROTATORIE

Tesi di Laurea di:
Chiara Manfredini

Relatore:
Prof. Ing. Giulio Dondi

Correlatori:
Dott. Ing. Cesare Sangiorgi
Dott. Ing. Guido Rossi

Sessione autunnale

Anno Accademico 2008 – 2009

INDICE

CAPITOLO 1

LE INTERSEZIONI STRADALI A RASO: LE ROTATORIE

1.1 Definizione e classificazione delle intersezioni	2
1.2 Cenni storici sull'impiego delle intersezioni a rotatoria	7
1.3 Vantaggi e svantaggi delle intersezioni a rotatoria	10

CAPITOLO 2

LA NORMATIVA IN CAMPO STRADALE

2.1 Introduzione	14
2.2 D.M. 05/11/2001: Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade	15
2.2.1 Distanze di visibilità	16
2.2.2 Andamento planimetrico dell'asse	16
2.2.3 Andamento altimetrico dell'asse	17
2.3 D.M. 19/04/2006: Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali	18
2.3.1 Elementi geometrici caratteristici delle rotatorie	20
2.3.2 La deflessione	25
2.3.3 Isole divisionali	28
2.3.4 Visibilità in rotatoria	31
2.3.5 Elementi altimetrici	34
2.4 Elementi di completamento: segnaletica e illuminazione	35
2.4.1 Segnaletica orizzontale	36
2.4.2 Segnaletica verticale	38
2.4.3 Illuminazione stradale	40

2.5 Itinerari pedonali e ciclabili	42
2.6 Aspetti funzionali delle rotatorie	44
2.6.1 Capacità	46
2.6.2 Ritardi e lunghezze delle code	48

CAPITOLO 3

CASO APPLICATIVO

3.1 Descrizione dell'intervento e inquadramento territoriale	50
3.2 Descrizione dell'intersezione oggetto di studio e analisi dei due progetti	54

CAPITOLO 4

LA MICROSIMULAZIONE

4.1 Il nodo oggetto di studio	63
4.2 I dati : grafi e matrici	65
4.3 La microsimulazione con il software Cube Dynasim	72
4.4 L'analisi dei risultati	84

CAPITOLO 5

NUOVA SOLUZIONE PROGETTUALE

5.1 Premessa	95
5.2 Strumenti urbanistici	96
5.2.1 Strumenti di pianificazione e programmazione a scala regionale, provinciale e comunale	96
5.3 Soluzione progettuale T	97
5.4 Progetto della nuova intersezione a rotatoria	99
5.5 Definizione delle pendenze trasversali	103
5.5.1 Pendenza trasversale della piattaforme nei rettifili	103

5.5.2 Pendenza trasversale della corona giratoria	105
5.6 Profili longitudinali	106
5.7 Indicazioni sulla pavimentazione	108
5.7.1 Pacchetto stradale nuova soluzione	111
5.8 Microsimulazione della nuova soluzione	114
5.8.1 Analisi dei risultati	118

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI	126
BIBLIOGRAFIA	132

ALLEGATI:

Tavola 1: Soluzione T e stato di fatto

Tavola 2: Nuova soluzione

Tavola 3: Sezioni rotatoria

Tavola 4: Quaderno delle sezioni

Tavola 5: Profili longitudinali

Tavola 6: Segnaletica e sistemazione del verde

Capitolo 1

Le intersezioni stradali a raso: le rotatorie

1.1 DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELLE INTERSEZIONI

L'intersezione stradale è quell'area individuata da tre o più tronchi stradali (definiti anche archi) che convergono in uno stesso punto e da tutti quei dispositivi che consentono all'utente di svolgere le manovre per il passaggio da un tronco all'altro.

Un corretto dimensionamento dell'intersezione garantisce anche il funzionamento ottimale del sistema stradale nel quale è inserita; in base alla classificazione delle strade prevista dal Codice della Strada (Tabella 1.1) il D.M. 19/04/2006 decreta fra quali tipologie di strade è possibile la connessione e vengono stabilite le differenti soluzioni geometriche compatibili.

Per le specifiche si rimanda al Capitolo 2 nel quale viene descritta la normativa in campo stradale, quindi il D.M. 19/04/2006 e il D.M. 5/11/2001.

A	Autostrade extraurbane
Au	Autostrade urbane
B	Strade extraurbane principali
C	Strade extraurbane secondarie
D	Strade urbane di scorrimento
E	Strade urbane di quartiere
F	Strade locali extraurbane
Fu	Strade locali urbane

Tabella 1. 1 Classificazione delle tipologie di strade

Le intersezioni, generando interferenza fra i flussi di traffico, non sono altro che i punti critici di un sistema viario e per questo le loro caratteristiche geometriche e funzionali devono essere congruenti con quelle delle reti stradali alle quali appartengono.

Un primo criterio di classifica è quello che suddivide le intersezioni in due categorie:

- **Intersezioni a raso:** si suddividono in intersezioni lineari e a rotatoria, e sono caratterizzate dal fatto che le strade confluenti sono complanari generando interferenze fra le correnti in attraversamento e svolta.

Rientrano in questa categoria anche le intersezioni semaforizzate nelle quali però l'arresto delle correnti di traffico è periodico e alternato.

- **Intersezioni a livelli sfalsati** nelle quali si ha separazione altimetrica fra le correnti di traffico realizzata mediante opere di scavalco e la connessione è realizzata con una o più rampe.

Fra le intersezioni a raso si individua l'intersezioni a rotatoria, definibile come una particolare intersezione caratterizzata dalla presenza di un'area centrale circolare, circondata da un anello, percorribile in una sola direzione dal traffico proveniente da più rami (o bracci) d'ingresso (in senso antiorario nei paesi in cui si guida a destra, in senso orario nei paesi dove si guida a sinistra). Vengono classificate in base alla dimensione, al numero di corsie e all'ambito in cui sono inserite e in funzione di questi parametri vengono definite sei differenti categorie:

- Mini rotatorie: Le mini rotatorie sono utilizzate in ambienti urbani con basse velocità, intorno ai 60 km/h, con raggio esterno massimo di 12 m e isola centrale completamente sormontabile. Il loro utilizzo è riservato ai centri urbani e alle aree residenziali caratterizzate da un basso volume di traffico veicolare e da velocità di transito ridotta.
- Rotatoria urbana a singola corsia: presenta corsie singole sia in ingresso sia in uscita per tutti i rami e corsia singola nella corona giratoria. Il diametro della corona giratoria esterna è maggiore rispetto alla mini rotatoria, così come l'ampiezza delle zone d'ingresso/uscita. Le isole di separazione sono rialzate e l'isola centrale non è sormontabile.
- Rotatoria urbana a doppia corsia: includono tutte le rotatorie urbane che hanno almeno un'entrata a due corsie e richiedono quindi una corona giratoria con più di una corsia per garantire il deflusso dei veicoli che provengono contemporaneamente da uno stesso ramo. Le isole di traffico in genere sono rialzate, l'isola centrale è non sormontabile.
- Rotatoria extraurbana a singola corsia: in genere sono inserite in situazioni di reti stradali caratterizzate da alte velocità di percorrenza variabili fra gli 80 km/h e i 100 km/h. Richiedono dispositivi di controllo del traffico sui rami in modo da indurre gli utenti a rallentare fino a una velocità appropriata per l'immissione in rotatoria. Hanno diametri più grandi delle precedenti e velocità leggermente più elevate in entrata, sulla corona giratoria e in uscita.

- Rotatoria extraurbana a doppia corsia: sono simili alle rotonde extraurbane a singola corsia ma la differenza è nelle due corsie in entrata e quindi nella doppia corsia della corona giratoria.

È necessario rilevare che l'intersezione, in particolare quella a raso, a causa della frequente interferenza nella propria area operativa di diverse correnti di traffico, condiziona l'efficienza del sistema infrastrutturale di trasporto nel suo complesso e rappresenta un punto critico per la sicurezza dei veicoli, sicurezza che dipende da come sono eseguite le manovre e dalle interferenze tra le traiettorie percorse in punti che sono definiti *punti di conflitto* (come illustrato in Figura 1.1 dove è rappresentato il caso di un'intersezione a T) e che si possono suddividere in tre tipologie:

- **Punti di conflitto in immissione**: causati dalla convergenza o separazione di due flussi di traffico. Può comportare un'attesa poiché il veicolo che tende a immettersi potrà farlo solo quando gli si presenta un intervallo sufficiente tra i veicoli del flusso in transito.
- **Punti di conflitto in attraversamento**: causati dall'intersezione di due flussi veicolari. Al pari della precedente può essere eseguita solo quando è sufficientemente ampio il gap, in altre parole l'intervallo temporale, tra due veicoli successivi della corrente da attraversare.
- **Punti di conflitto di diversione**: quando un veicolo rallenta e abbandona la corrente cui fa parte per compiere una svolta a destra o a sinistra. La divergenza a destra è quella più semplice tra le manovre, ma comporta un rallentamento degli eventuali veicoli in transito che seguono.

Per un'intersezione a T i punti di conflitto sono nove mentre, come mostrato in Figura 1.2, i punti di conflitto, per un'intersezione a rotatoria, diminuiscono fino a sei.

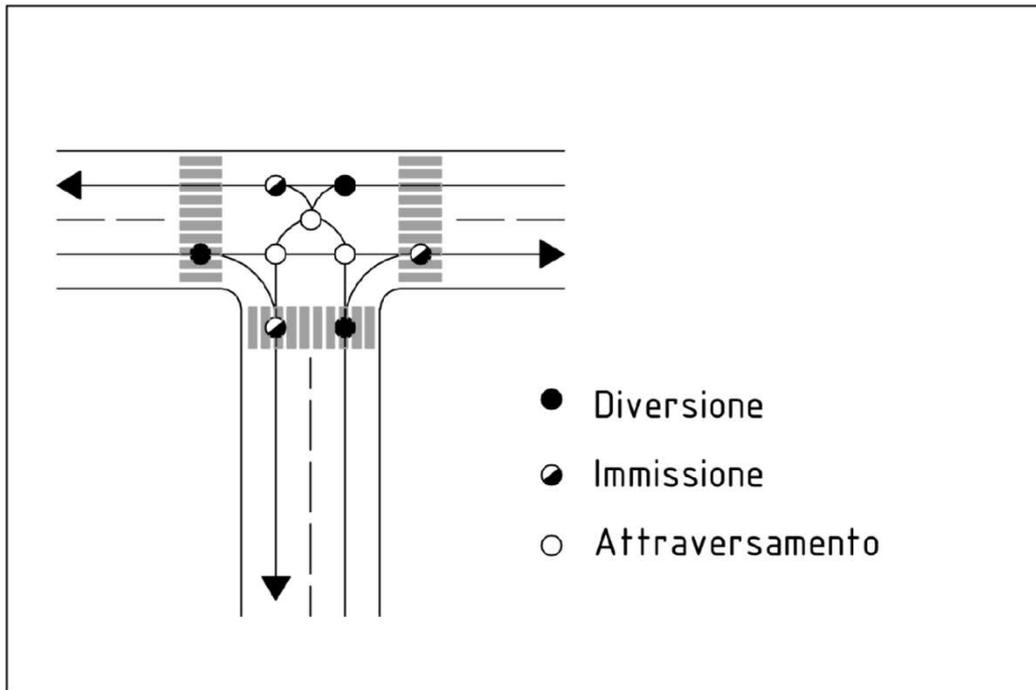


Figura 1. 1 Punti di conflitto di un'intersezione a T

L'efficienza e la sicurezza di un'intersezione si misurano anche in base al numero, alla tipologia e alla localizzazione di questi punti di conflitto, perché è in corrispondenza di questi punti che si rileva la maggiore incidentalità.

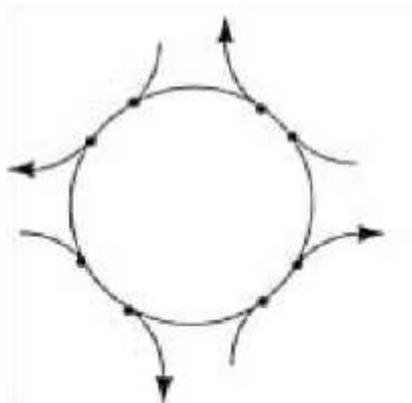


Figura 1. 2 Punti di conflitto intersezione a rotatoria

È facile intuire che la realizzazione di un'intersezione a rotatoria consente il miglioramento delle condizioni di sicurezza poiché esse hanno un numero inferiore di punti di conflitto rispetto alle intersezioni convenzionali. Infatti, sono ridotti gli incidenti che, sulle intersezioni tradizionali, avvengono a causa della mancata precedenza o a seguito di manovre di svolta a sinistra.

Considerazioni differenti vanno svolte per quanto riguarda le rotatorie a doppia corsia perché, la presenza di entrate e uscite svasate, implica un aumento rilevante di conflitti tra le correnti veicolari.

Questo avviene quando gli utenti utilizzano la corsia errata o compiono una manovra di svolta sbagliata; possono avvenire a causa di elementi geometrici mal dimensionati che non permettono ai veicoli di eseguire le traiettorie corrette all'interno della corona giratoria. In questi casi le collisioni riguardano prevalentemente le fiancate dei veicoli, anche se, in genere, non comportano gravi conseguenze per gli utenti dei veicoli coinvolti.

1.2 CENNI STORICI SULL'IMPIEGO DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIA

Il sistema d'intersezione a rotatoria ha avuto ampia diffusione negli ultimi decenni, sia in Italia sia all'estero, purtroppo anche facendone un uso improprio progettando rotatorie laddove non era necessario.

Il sistema di circolazione a rotatoria a senso unico fu introdotto per la prima volta nel 1903, per la Columbus Circle di New York City da William Phelps Eno, “il padre della regolazione del traffico”. (Figura 1.3)



Figura 1. 3 Columbus Circle di New York City

Esistevano già altre piazze circolari ma in esse non era permessa la circolazione a doppio senso attorno all'isola centrale; si può ritenere Eno il promotore degli schemi di percorrenza a senso unico e delle modalità di circolazione rotatoria.

In Europa, negli stessi anni, l'architetto parigino Eugene Henard propose la riqualificazione di alcune intersezioni di Parigi tramite un sistema di circolazione a

senso unico intorno a un'isola centrale. Fu così che nel 1907 la Place de l'Etoile divenne la prima rotatoria francese.(Figura 1.4)



Figura 1. 4 La Place de l'Etoile

Per le prime rotatorie fu utilizzata la regola della “precedenza a destra” quindi i veicoli in circolo sull’anello centrale dovevano dare la precedenza a quelli entranti dai bracci d’ingresso.

Nel 1929 Eno indicò che l’inconveniente principale della regola del dare precedenza ai veicoli in immissione era quello che, alla presenza di elevati volumi di traffico, la circolazione si bloccava e la rotatoria entrava in crisi; egli pertanto propose di invertire la regola della priorità di precedenza, concedendola ai veicoli in circolo sulla corona giratoria, ma la proposta non ebbe subito successo fra gli ingegneri del traffico e il suggerimento non fu messo in pratica.

Ben presto cominciarono a manifestarsi seri problemi d’intasamento delle rotatorie, finché nel 1950, a causa dei problemi di congestione, molte giurisdizioni americane rinunciarono ai vantaggi delle rotatorie e, in molti casi, furono sostituite con intersezioni semaforizzate e in altre situazioni i semafori furono installati sull’anello.

Tra il 1950 e il 1977 otto stati approvarono la legge per cambiare la regola della precedenza a destra (con priorità ai veicoli entranti), con quella della priorità a sinistra (precedenza ai veicoli in circolo sulla corona giratoria); nasce così la “rotatoria moderna”.

In Gran Bretagna negli stessi anni, a causa del manifestarsi con maggiore frequenza dei fenomeni di congestione, furono studiate soluzioni alternative alle rotatorie, come la disposizione di semafori posti sui rami d'ingresso.

Il Road Research Laboratory (oggi denominato Transport Research Laboratory) condusse degli studi a carattere sperimentale su tali rotatorie deducendo che la "priorità all'anello" incrementava la capacità del 10% e riduceva i ritardi del 40% rispetto alle altre possibilità (intersezioni semaforizzate e non, incroci regolati dalla polizia stradale). Altro aspetto evidenziato fu la riduzione del 40% degli incidenti mortali.

Nel 1966 la regola della priorità "off – side" fu adottata in Gran Bretagna e da quel momento in poi il criterio di progettazione delle rotatorie divenne quello dell'attesa: i veicoli in ingresso dovevano attendere, per poi immettersi, un varco libero sul flusso circolante sull'anello.

La prima stesura delle linee guida basate sulla priorità off – side nelle rotatorie fu pubblicato nel 1971 dal Ministero dei Trasporti inglese e a essa seguirono altre versioni, rivedute e corrette, nel 1975, nel 1984 e nel 1993.

A seguito dell'adozione delle linee guida che, tra l'altro, prevedevano numerosi accorgimenti progettuali (avvicinamento verso l'anello della linea di dare precedenza, allargamento degli ingressi, riduzione delle dimensioni dell'isola centrale, ecc ...), le rotatorie di nuova realizzazione presentarono un incremento di capacità compreso tra 10% e il 50% rispetto alle configurazioni a circolazione giratoria, realizzate anteriormente.

Le rotatorie moderne sul modello britannico e americano furono "esportate" in Australia e in alcuni paesi della Francia nel 1970 e, dagli anni '80, a un ampio numero di Stati. Nel 1984, il governo francese adottò la regola della priorità "off – side"; ciò rappresentò un grosso cambiamento nelle norme francesi, impostate, fino allora, sulla regola della precedenza a destra nelle intersezioni. A seguito di ciò nel 1997, in Francia già si contavano circa 15000 rotatorie moderne.

In Italia, il primo comune ad adottare la rotatoria alla francese è stato quello di Lecco nel 1989. Con l'emanazione del Nuovo Codice della Strada, in vigore dal 1993, anche in Italia si possono realizzare rotatorie con la precedenza all'interno dell'anello; difatti, l'art.145 NCS stabilisce che "i conducenti di veicoli su rotatoria devono rispettare i segnali negativi della precedenza".

1. 3 VANTAGGI E SVANTAGGI DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIA

Da indagini sperimentali a livello nazionale e internazionale è emerso come le intersezioni a rotatoria consentano un miglioramento del livello di sicurezza rispetto alle altre tipologie d'intersezione.

Questo è possibile perché le rotatorie hanno un minor numero di punti di conflitto rispetto alle convenzionali intersezioni, infatti, sono eliminati gli incidenti dovuti alla mancata precedenza e a seguito di svolte a sinistra.

Inoltre si ha una riduzione della velocità che permette agli utenti di avere tempi di reazione più lunghi; i veicoli in rotatoria hanno velocità simili e la gravità degli incidenti è notevolmente ridotta perché non sono più presenti i forti squilibri cinematici che si hanno in una classica intersezione. In Figura 1.5 si riportano le velocità tipiche dei veicoli che s'immettono, attraversano e che escono da una rotatoria; per velocità iniziali di 40 km/h, 55 km/h e 70 km/h, la decelerazione ha inizio da 80 m dal centro dell'isola centrale.

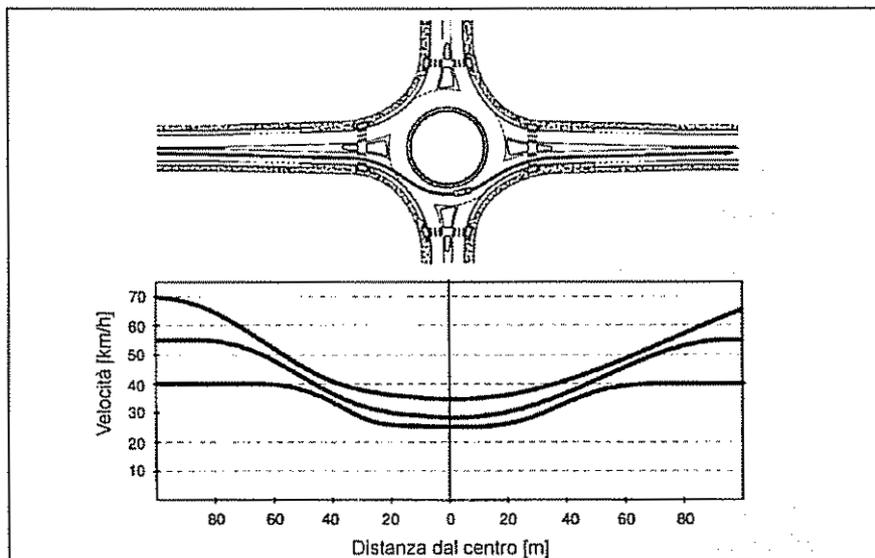


Figura 1. 5 Profili di velocità per rotatoria urbana

Altri vantaggi si riscontrano nella riduzione dei tempi di fermata rispetto a quelli riscontrabili sulle intersezioni regolate semaforicamente, visto che la rotatoria è utilizzata in modo continuo, ciò comporta la diminuzione delle emissioni sonore grazie anche alle velocità ridotte e alla guida meno aggressiva.

Si riscontra pure la diminuzione del consumo di carburante rispetto alle intersezioni a controllo semaforico e quindi il calo delle emissioni d'inquinanti.

Uno dei principali svantaggi delle rotatorie è la non possibilità di favorire una corrente di traffico rispetto a un'altra, problema che assume rilevanza nel caso in cui si volesse favorire il deflusso di mezzi di soccorso o di trasporto pubblico.

Altri svantaggi vanno ricercati nei forti condizionamenti imposti dai siti per il corretto posizionamento, l'adeguato dimensionamento e la regolare funzionalità delle rotatorie, quali la mancanza di spazio o un contesto densamente costruito che non consente sufficiente visibilità e raggi di curvatura congruenti; oppure la vicinanza di poli attrattori/generatori di traffico pesante potrebbe influenzare la fruibilità di una rotatoria a causa degli elevati volumi di mezzi commerciali.

La presenza di uno o più di questi fattori condizionanti non impedisce la realizzazione della rotatoria che va giustificata proponendo interventi per l'eliminazione o la riduzione dei fattori stessi.

Per quanto riguarda invece le situazioni in cui è consigliabile la realizzazione dell'intersezione a rotatoria, facendo riferimento alla classificazione funzionale delle strade definita dal Codice della Strada e recepita dal D.M. "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", essa è ammessa come soluzione dell'incrocio solo fra le seguenti categorie di strade:

- Strade di categoria C (extraurbane secondarie)
- Strade di categoria E (urbane di quartiere)
- Strade di categoria F (locali urbane e locali extraurbane)

Analizzando vantaggi e svantaggi è possibile affermare che la realizzazione di una rotatoria è raccomandata quando:

- Intersezioni in cui i volumi di traffico sono tali per cui la regolamentazione tramite il segnale di "stop" o "dare la precedenza" generano ritardi inaccettabili per la strada secondaria. Si ha riduzione del perditempo sulla strada secondaria, ma aumenta su quella principale.
- Intersezioni in cui è elevato il perditempo causato da regolazione semaforica.
- Intersezioni con elevata percentuale di manovre di svolta a sinistra. Diversamente da altri sistemi d'intersezione, le rotatorie, in questo caso, possono operare efficientemente anche con alti livelli di svolte a sinistra.
- Nelle intersezioni con quattro o più bracci se uno o più di questi non può essere disposto in modo differente.

- Incrocio fra asse principale e strada locale nella quale si verifica un elevato numero d'incidenti nelle fasi di attraversamento e svolta a sinistra.
- Nel caso d'intersezioni fra strade extraurbane caratterizzate da elevate velocità di marcia e da notevoli flussi di svolta a sinistra.
- Aree in cui si vuole ridurre l'inquinamento acustico e atmosferico.
- Aree in cui si prevede un forte incremento del traffico e dove gli scenari futuri non sono ancora ben definiti.

L'intersezione stradale del tipo a raso vede decadere la propria funzionalità quando i ritardi accumulati dagli utenti nell'esecuzione delle possibili manovre diventano intollerabili e i fenomeni di congestione si ripetono in maniera frequente durante la giornata.

L'intervento che in genere si considera, risolutivo del problema consiste nello sfalsamento dell'incrocio cioè di quell'insieme d'infrastrutture sovrappassi, sottopassi e rampe, che consentono lo smistamento delle correnti veicolari fra rami di strade poste a diversi livelli. Con lo sfalsamento si consegue l'eliminazione dei punti di conflitto d'intersecazione tra le correnti di traffico e questo tipo di soluzione è obbligatorio per tutte quelle strade che non ammettono intersezioni a raso come le autostrade.

Questo tipo d'intervento permette di mantenere pressoché invariate le velocità delle correnti in transito, la qualità della circolazione e la capacità di una o di ambedue le strade; inoltre le manovre di svolta avvengono senza arresti o rallentamenti eccessivi e si ha l'eliminazione parziale o totale dei punti di conflitto.

Per contro la realizzazione è molto costosa per la presenza di una o più opere di scavalco, di rampe e di maggior spazio occupato, che richiedono la variazione del profilo altimetrico di almeno una strada e generano quindi un maggiore impatto visivo.

È per questi motivi che, anche alla presenza di flussi di traffico elevati, a volte si preferisce l'intersezione a raso e in particolare, l'intersezione a rotatoria, cercando di dimensionarla tenendo conto dei flussi di traffico futuri e dell'ambiente nel quale viene inserita sia da un punto di vista geometrico che da un punto di vista architettonico.

Capitolo 2

La normativa in campo stradale

2.1 INTRODUZIONE

La progettazione di un'intersezione stradale è un processo iterativo che termina soltanto quando, tramite la caratterizzazione razionale dei singoli elementi geometrici e la verifica della loro compatibilità reciproca, si sia raggiunto il soddisfacimento degli obiettivi generali da parte dell'infrastruttura nel suo complesso.

Lo scopo di questo elaborato è la riprogettazione dell'intersezione a rotatoria e a tal fine si riporta una rassegna dei criteri generali per la progettazione di strade e intersezioni forniti da due Decreti Ministeriali:

- D.M. 5.11.2001 “*Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*”[2]
- D.M. 19.04.2006 “*Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali*”[1]

2.2 D.M. 05/11/2001: NORME FUNZIONALI E GEOMETRICHE PER LA COSTRUZIONE DELLE STRADE

Il decreto definisce i criteri per la progettazione degli aspetti geometrici e funzionali delle strade, in relazione alla loro classificazione data dal Codice della strada, con lo scopo di garantire la sicurezza e regolarità della circolazione degli utenti.

Le norme fanno riferimento a tutti i tipi di strada escludendo casi particolari come le strade di montagna collocate su terreni che per la loro morfologia non consentono il rispetto dei criteri previsti.

Le strade sono classificate in base alle loro caratteristiche costruttive, tecniche e funzionali (Tabella 2.1):

A	Autostrade extraurbane
Au	Autostrade urbane
B	Strade extraurbane principali
C	Strade extraurbane secondarie
D	Strade urbane di scorrimento
E	Strade urbane di quartiere
F	Strade locali extraurbane
Fu	Strade locali urbane

Tabella 2. 1 Classificazione delle strade

La norma riporta, per ogni categoria, la composizione della sezione stradale quindi il numero di corsie per senso di marcia, la loro larghezza minima, le banchine, i margini e lo spartitraffico (vedi Capitolo 1). Inoltre vengono indicati il limite di velocità da rispettare in base al Codice della strada e l'intervallo di velocità di progetto, cioè quell'intervallo di valori in base ai quali si dimensionano i vari elementi del tracciato stradale quali rettili, curve circolari, curve a raggio variabile.

L'altra parte del decreto consiste nella definizione della geometria dell'asse stradale come le distanze di visibilità, l'andamento planimetrico e altimetrico dell'asse.

2.2.1 Distanze di visibilità

La distanza di visuale libera è un'inderogabile condizione di sicurezza della circolazione ed è la lunghezza del tratto di strada che l'utente riesce a vedere davanti a sé senza considerare l'influenza del traffico, delle condizioni atmosferiche e d'illuminazione della strada.

Questo parametro in fase di progettazione è messo in relazione alle distanze di visibilità per l'arresto, per il sorpasso e per la manovra di cambio di corsia.

Nello specifico la distanza di visibilità per l'arresto deve essere assicurata lungo tutto il tracciato; la distanza di visibilità per il sorpasso deve essere garantita per il almeno il 20% del tracciato, la distanza di visibilità per la manovra di cambio corsia deve essere assicurata in presenza di più corsie per senso di marcia e nei punti singolari.

2.2.2 Andamento planimetrico dell'asse

Gli elementi geometrici che costituiscono il tracciato planimetrico quali rettifili, curve circolari e raccordi a raggio variabile combinati tra loro devono soddisfare esigenze di sicurezza.

- Rettifili: si stabiliscono lunghezze massime che evitano la monotonia del tracciato e il superamento dei limiti di velocità imposti, e lunghezze minime facendo sempre riferimento al limite superiore dell'intervallo di velocità di progetto della strada.
- Curve circolari: il loro sviluppo deve consentire un tempo di percorrenza di almeno 2.5 secondi e un valore minimo del raggio in base alla lunghezza del rettifilo al quale sono collegate.
- Pendenza trasversale della piattaforma: sono comprese anche le banchine. In rettifilo la sezione trasversale è a schiena d'asino in modo da consentire l'allontanamento delle acque superficiali e la pendenza minima delle falde della carreggiata è 2.5%. in curva invece la carreggiata è inclinata verso l'interno con pendenza trasversale costante con valori che variano da un minimo di 2.5% e un massimo prescritto in base al tipo di strada. Il valore da adottare è comunque legato al raggio della curva, alla velocità di progetto e alla quota parte del coefficiente di aderenza impegnato trasversalmente.

- Curve a raggio variabile: garantiscono una corretta percezione ottica del tracciato e una variazione accettabile del contraccolpo.
- Pendenze trasversali nelle curve a raggio variabile: lungo le clotoidi, che sono inserite tra due elementi del tracciato aventi curvatura costante, è realizzato il passaggio della pendenza trasversale dal valore di un elemento a quello successivo facendo ruotare la carreggiata attorno al suo asse o alla sua estremità interna.
- Allargamento della carreggiata in curva: garantisce l'iscrizione dei veicoli nei tratti curvilinei del tracciato mantenendo la sicurezza e viene calcolata in base al valore del raggio esterno della corsia. L'allargamento è riportato sul lato interno della curva e le banchine e le eventuali corsie di sosta mantengono la larghezza che avevano in rettilineo.

2.2.3 Andamento altimetrico dell'asse

Il profilo altimetrico è formato da tratti aventi pendenza costante chiamati livellette collegati da raccordi verticali convessi e concavi. Il valore della massima pendenza longitudinale è stabilito dal decreto in base ai diversi tipi di strada.

Se si hanno livellette con diversa pendenza, il raccordo verticale va eseguito con archi di parabola quadratica ad asse verticale. La lunghezza del raccordo dipende da come varia la pendenza e dal raggio del cerchio osculatore.

L'andamento altimetrico dell'asse deve essere coordinato con il profilo longitudinale per evitare fenomeni quali la "perdita di tracciato" che si realizza quando un raccordo concavo segue un raccordo convesso e che può disorientare l'utente.

Uno strumento di controllo è la rappresentazione prospettica del tracciato.

2.3 D.M. 19/04/2006: NORME FUNZIONALI E GEOMETRICHE PER LA COSTRUZIONE DELLE INTERSEZIONI STRADALI

Le intersezioni stradali sono i punti nodali della viabilità e vanno realizzate dove si creano i punti di conflitto tra le traiettorie di due o più strade per cui si possono realizzare diverse soluzioni progettuali che sono classificate come di seguito:

- Intersezioni a livelli sfalsati in cui la separazione altimetrica tra le correnti in transito si realizza mediante opere di scavalco e la connessione fra le due strade è garantita da una o più rampe.
- Intersezioni a raso che si suddividono in intersezioni lineari e a rotatoria, nelle quali le strade confluenti risultano complanari con conseguenti interferenze del traffico in transito e svolta.
- Incroci semaforizzati nei quali è previsto l'arresto periodico e alternato delle correnti di traffico.

La classificazione delle intersezioni fa riferimento alle categorie di strade previste dal Codice della strada nel quale vengono suddivise in otto classi, quattro riferite all'ambito urbano e quattro per l'ambito extraurbano.

I nodi d'interconnessione sono concettualmente rappresentati con una matrice 8x8 come quella riportata in Figura 2.1, dove figurano tutti i possibili nodi d'intersezione fra due strade.

Nella matrice si distinguono nodi omogenei che connettono strade dello stesso tipo e per questo sono sempre consentite le connessioni e nodi disomogenei che connettono strade di tipo diverso e non sempre la realizzazione della connessione è ammessa per questioni di sicurezza e funzionalità.

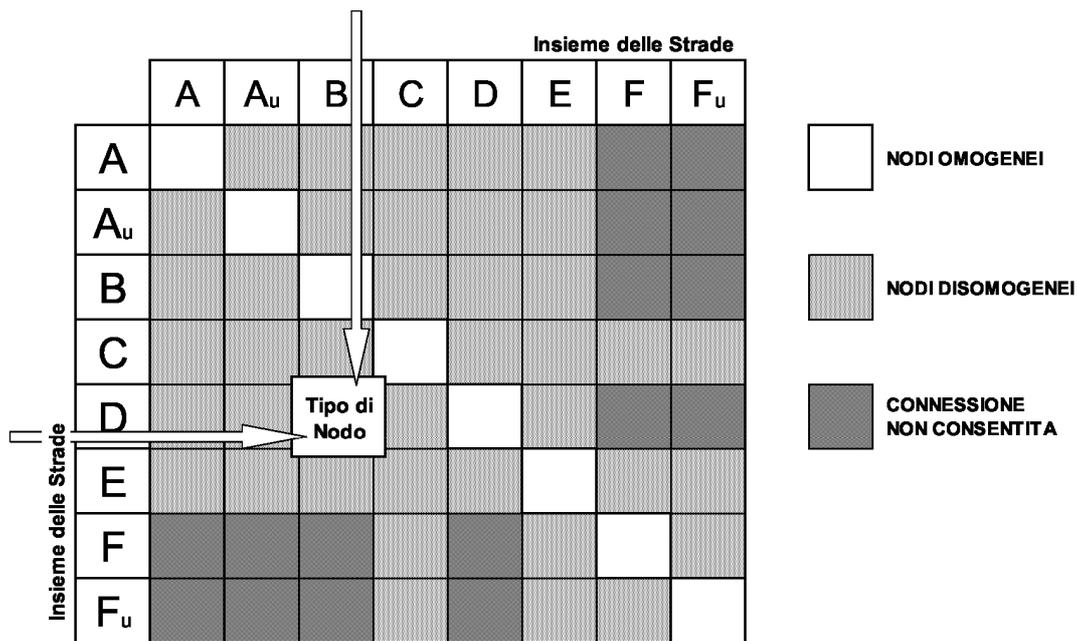


Figura 2. 1 Matrice simbolica di rappresentazione di tutti i possibili nodi d'intersezione. Laddove la connessione è consentita, si distinguono diverse tipologie di nodo in relazione alla possibilità o meno che si verifichino punti di conflitto d'intersezione. (Figura 2.2)

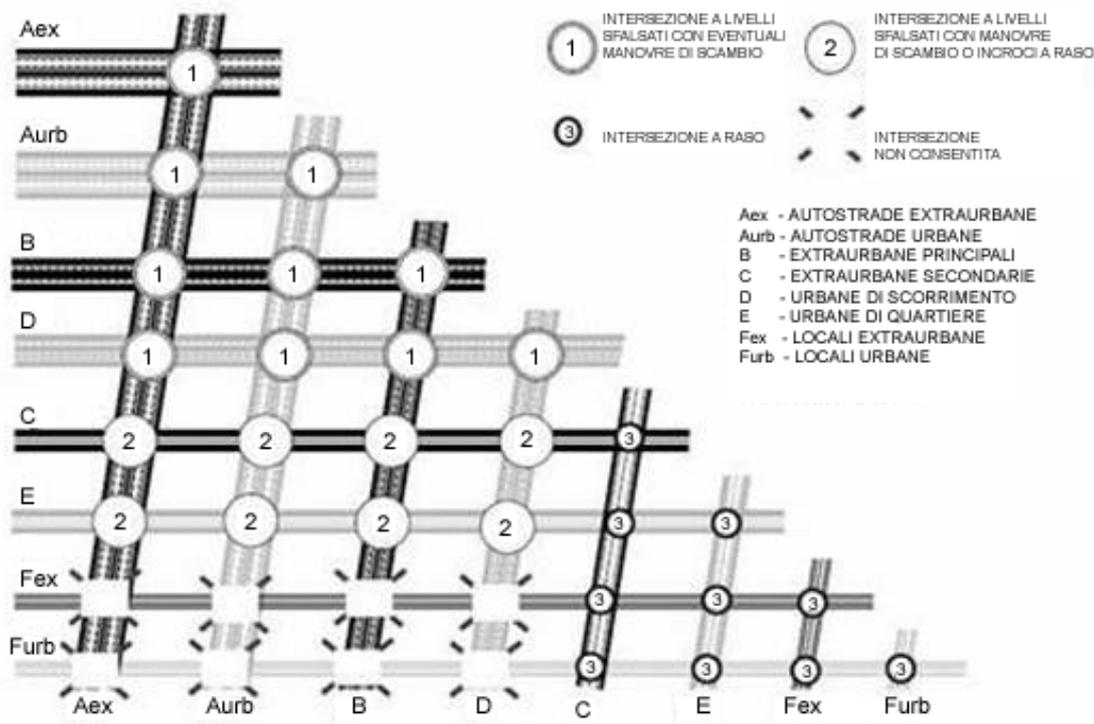


Figura 2. 2 Organizzazione delle reti stradali e definizione delle intersezioni ammesse (come livelli minimi)

Il primo passo fondamentale nella realizzazione di un'intersezione consiste nello studio della corretta posizione che va verificata in base a tre condizioni:

- Eventuali interferenze funzionali con intersezioni adiacenti: vengono fissate distanze minime dalle intersezioni adiacenti in funzione della tipologia di intersezione considerando anche come interferenza una parziale sovrapposizione della segnaletica di preavviso. In linea generale in campo extraurbano si adotta distanziamento minimo di 500 m.
- Compatibilità con le condizioni piano altimetriche degli assi viari: le intersezioni dovrebbero essere realizzate in corrispondenza di tronchi stradali rettilinei, se collocate in tratti curvilinei, devono essere rispettate le distanze di visibilità. Per le intersezioni a raso l'angolazione tra gli assi delle strade non deve essere inferiore a 70° . Inoltre i rami di connessione che realizzano svolte devono avere pendenze aggiuntive longitudinali non superiori al 2% rispetto alle livellette delle strade confluenti.
- Compatibilità con le caratteristiche della sede viaria

Fatto questo, si passa alla caratterizzazione geometrica dell'intersezione stabilendo i valori minimi e massimi che possono assumere i vari elementi, quali la composizione della piattaforma stradale, le pendenze longitudinali e trasversali, i raccordi altimetrici ecc ... per ogni tipologia di nodo sia esso lineare a raso, a rotatoria o a livelli sfalsati.

2.3.1 ELEMENTI GEOMETRICI CARATTERISTICI DELLE ROTATORIE

La rotatoria non è altro che una particolare intersezione a raso caratterizzata da un'area centrale circolare inaccessibile, circondata da un anello percorribile solo in una direzione e in senso antiorario dal traffico proveniente da più rami d'ingresso (Figura 2.3).

Le rotatorie sono suddivise in tre categorie in base al diametro della circonferenza esterna:

- Rotatorie convenzionali: diametro esterno compreso tra 40 e 50 m
- Rotatorie compatte: diametro esterno compreso tra 25 e 40 m
- Mini rotatorie: diametro esterno compreso tra 14 e 25 m

Un'altra distinzione si ha per quanto riguarda la sistemazione dell'isola circolare centrale che può essere resa in parte transitabile per le manovre dei veicoli pesanti nel caso di mini rotatorie con diametro esterno fra 18 e 25 m, mentre lo diventa completamente per quelle con diametro tra 14 e 18 m., le rotatorie compatte presentano invece bordure non sormontabili dell'isola centrale.

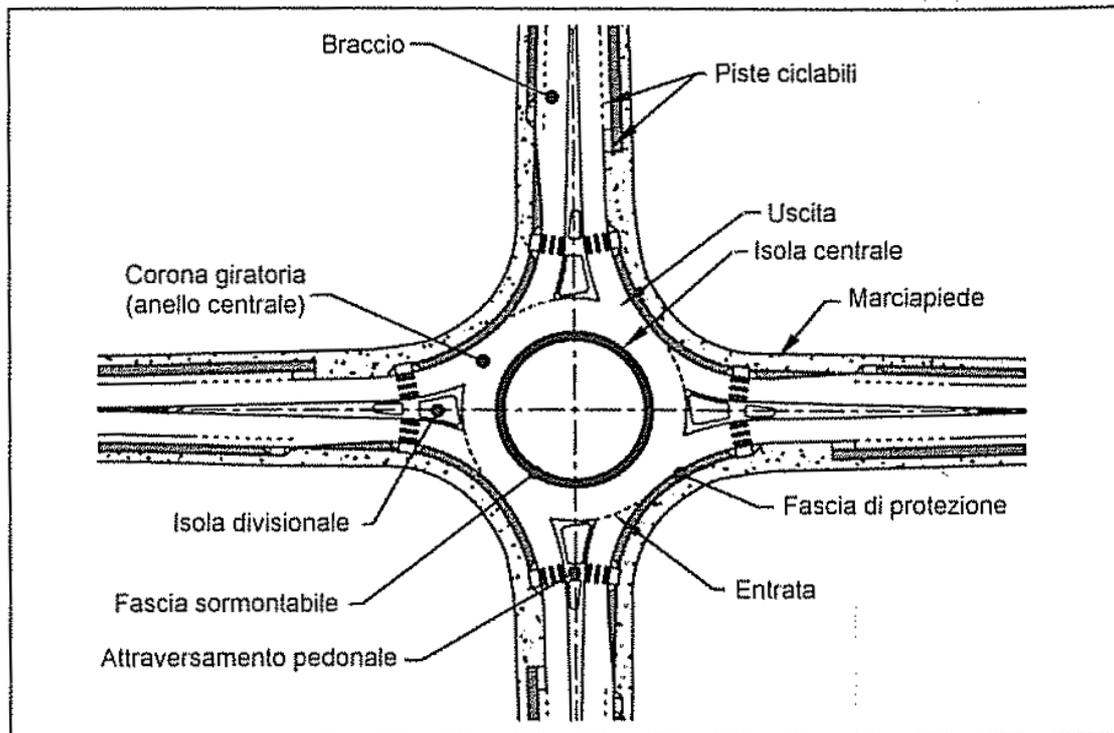


Figura 2. 3 Elementi caratteristici di una rotatoria

Gli elementi che compongono la rotatoria sono:

- **Corona giratoria**: carreggiata che circonda l'isola centrale, a una o più corsie, percorsa da veicoli in senso antiorario.

Il diametro della corona giratoria esterna è il segmento che passa dal centro dell'isola centrale e unisce due punti del bordo esterno dell'anello, ed è la somma del diametro dell'isola centrale e di due volte la larghezza della corona giratoria.

Il diametro della corona giratoria deve garantire un'adeguata deflessione per consentire a tutti i veicoli di affrontare l'intersezione alle velocità compatibili con il grado di sicurezza che si vuole ottenere.

La normativa fornisce valori del diametro della corona giratoria esterna in funzione della tipologia di rotatoria. (Tabella 2.2)

CATEGORIA	DIAMETRO CORONA GIRATORIA ESTERNA
Mini rotatoria	13 ÷ 25 m
Compatta urbana	25 ÷ 30 m
Urbana a singola corsia	30 ÷ 40 m
Urbana a doppia corsia	45 ÷ 55 m
Extraurbana a singola corsia	35 ÷ 45 m
Extraurbana a doppia corsia	55 ÷ 60 m

Tabella 2. 2 Diametro della corona giratoria esterna in funzione della categoria di rotatoria

Tra i principali vincoli imposti dalla nuova normativa, vi è l'obbligo di organizzare la circolazione sempre su una sola corsia impedendo la configurazione a due corsie in parallelo nell'anello. Il Decreto fornisce una tabella in cui sono riportati i valori che devono assumere il diametro esterno e le corsie in base agli elementi modulari di cui si compone la rotatoria (Tabella 2.3):

ELEMENTI MODULARI	DIAMETRO ESTERNO DELLA ROTATORIA (M)	LARGHEZZA CORSIE
CORSIE NELLA CORONA ROTATORIA (*), PER INGRESSI AD UNA CORSIA	≥40	6,00
	Compreso tra 25 e 40	7,00
	Compreso tra 14 e 25	7,00-8,00
CORSIE NELLA CORONA ROTATORIA (*), PER INGRESSI A PIU' CORSIE	≥40	9,00
	<40	8,50-9,00
BRACCI DI INGRESSO (**)		3,50 per una corsia 6,00 per due corsie
BRACCI DI USCITA (*)	<25	4,00
	≥25	4,50

(*) deve essere sempre organizzata su una sola corsia

(**) organizzati al massimo con due corsie

Tabella 2. 3 Larghezza degli elementi modulari delle rotatorie

- Isola centrale: generalmente non valicabile e di forma circolare. La sua dimensione è influenzata dalla necessità di avere una deviazione sufficiente dei veicoli che attraversano diametralmente la rotatoria.
- Fascia sormontabile: corona circolare che circonda l'isola centrale, utile ai mezzi pesanti per compiere le manovre.
- Braccio (Figura 2.4): parte dell'asse stradale che converge verso l'anello. È sempre preferibile una distribuzione regolare dei bracci attorno alla corona giratoria soprattutto per migliorarne la leggibilità. È consigliata una disposizione orientata verso il centro dell'isola centrale formante tra loro angoli di 90° ed è comunque opportuno non scendere sotto i 30° . La disposizione dell'isola centrale è ottimale quando tutti gli assi dei rami intersecano il centro della rotatoria in modo da garantire velocità ridotte nelle fasi di entrata, di attraversamento e di uscita. Non è accettabile che l'allineamento di un braccio sia spostato più a destra del punto centrale della rotatoria perché in tal caso si verrebbe a generare un'inclinazione del ramo con angolo ridotto e la curvatura in entrata non permette più di controllare le velocità degli utenti in entrata.

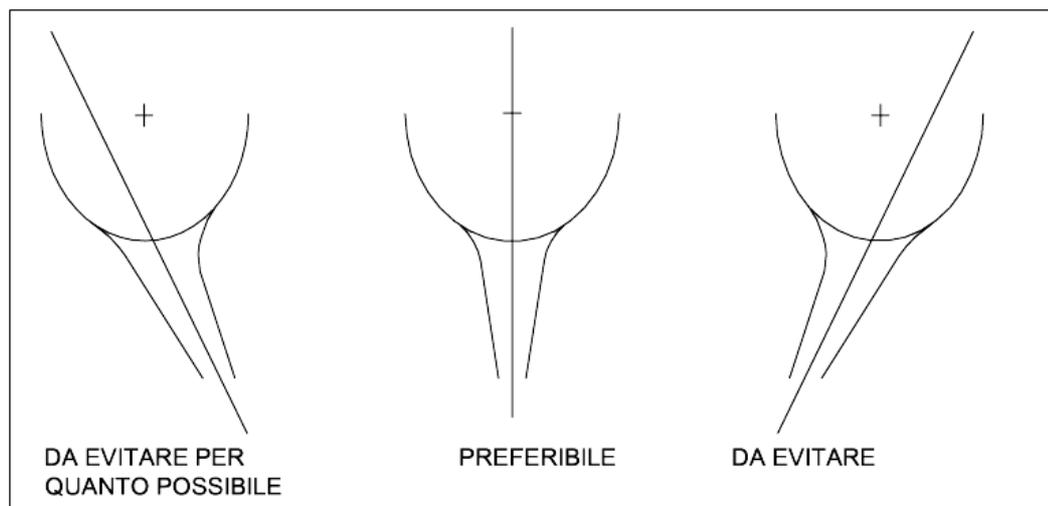


Figura 2. 4 Possibili allineamenti dei rami di una rotatoria

- Entrata: parte terminale di ogni singolo braccio separata dalla corona giratoria dalla segnaletica orizzontale di precedenza. (Figura 2.5)
Per definire la larghezza dell'ingresso s'individua il segmento che partendo dal vertice destro dell'isola divisionale viene condotto ortogonalmente al bordo esterno della corsia di entrata.

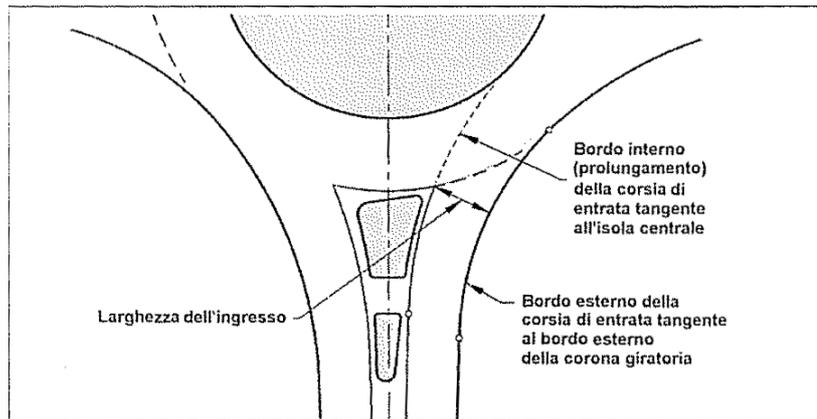


Figura 2. 5 Costruzione geometrica di un ingresso

- Uscita: parte di carreggiata di ogni braccio utilizzata per uscire dalla rotatoria. Non deve mai essere separata dall'anello per mezzo di segnaletica orizzontale (Figura 2.6.)

Viene costruita dal vertice sinistro dell'isola pseudo triangolare, conducendo un segmento perpendicolare al bordo destro della corsia d'uscita.

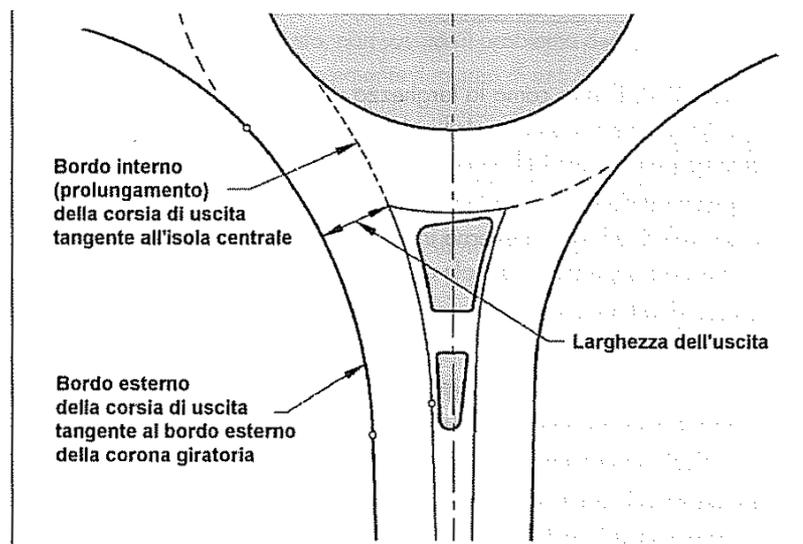


Figura 2. 6 Costruzione geometrica di un'uscita

- Isola divisionale: piattaforma costruita tra la corsia di entrata e quella di uscita. Può servire da rifugio per i pedoni e costringe i veicoli a deflessioni delle loro traiettorie. In ambito urbano, se manca lo spazio, sono limitata a una semplice segnaletica orizzontale.
- Attraversamenti pedonali: vengono posti prima della linea d'ingresso e tagliano l'isola di separazione.

- Marciapiede: parte della strada esterna alla carreggiata rialzata o delimitata e protetta.
- Piste ciclabili: aree laterali riservate alla circolazione dei velocipedi.
- Fascia di protezione: parte della strada destinata alla separazione fra traffico veicolare e pedonale.

Una rotatoria ben progettata deve essere in grado di ridurre le velocità relative fra i flussi veicolari in conflitto. Questo è possibile eseguendo un corretto coordinamento degli elementi geometrici generando opportuni percorsi curvilinei.

2.3.2 LA DEFLESSIONE

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

Per stabilire la velocità caratteristica all'interno della corona giratoria è necessario individuare la "traiettoria percorribile più velocemente" consentita dagli elementi geometrici.

Questa traiettoria si caratterizza per il fatto di essere la più scorrevole, la più schiacciata possibile verso il centro della rotatoria e viene valutata per il singolo veicolo in assenza di traffico e senza considerare la segnaletica orizzontale e verticale presente in entrata e in uscita.

Di solito è la traiettoria di attraversamento ma, in alcuni casi, può essere definita dalla manovra di svolta a destra.

Per il corretto tracciamento occorre fare riferimento alle seguenti distanze dagli elementi geometrici, riportate anche in Figura 2.7:

- 2 m dal ciglio delle corsie di entrata e uscita
- 1.50 m dal bordo dell'isola centrale

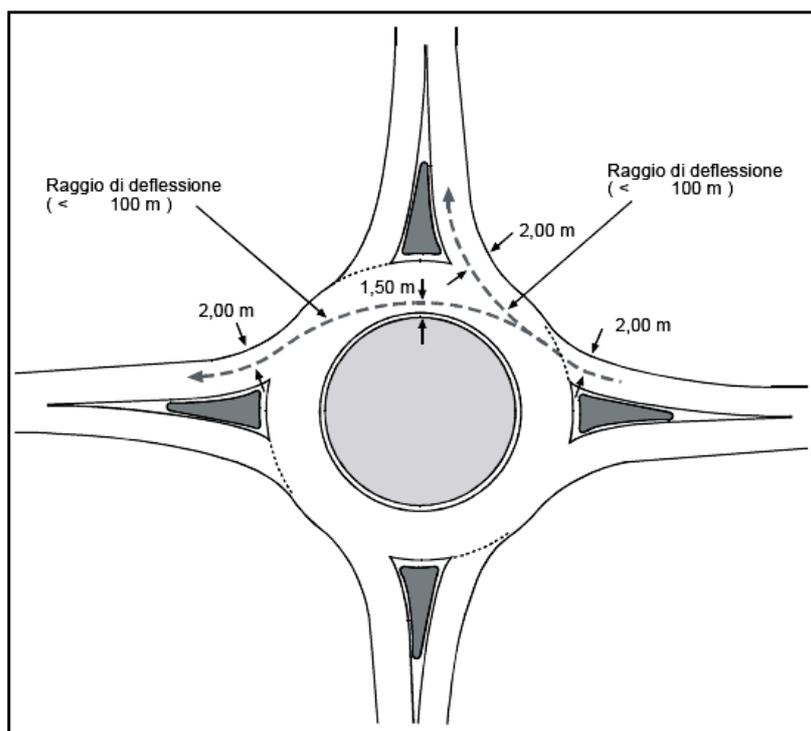


Figura 2. 7 Traiettoria percorribile più velocemente e raggio di deflessione

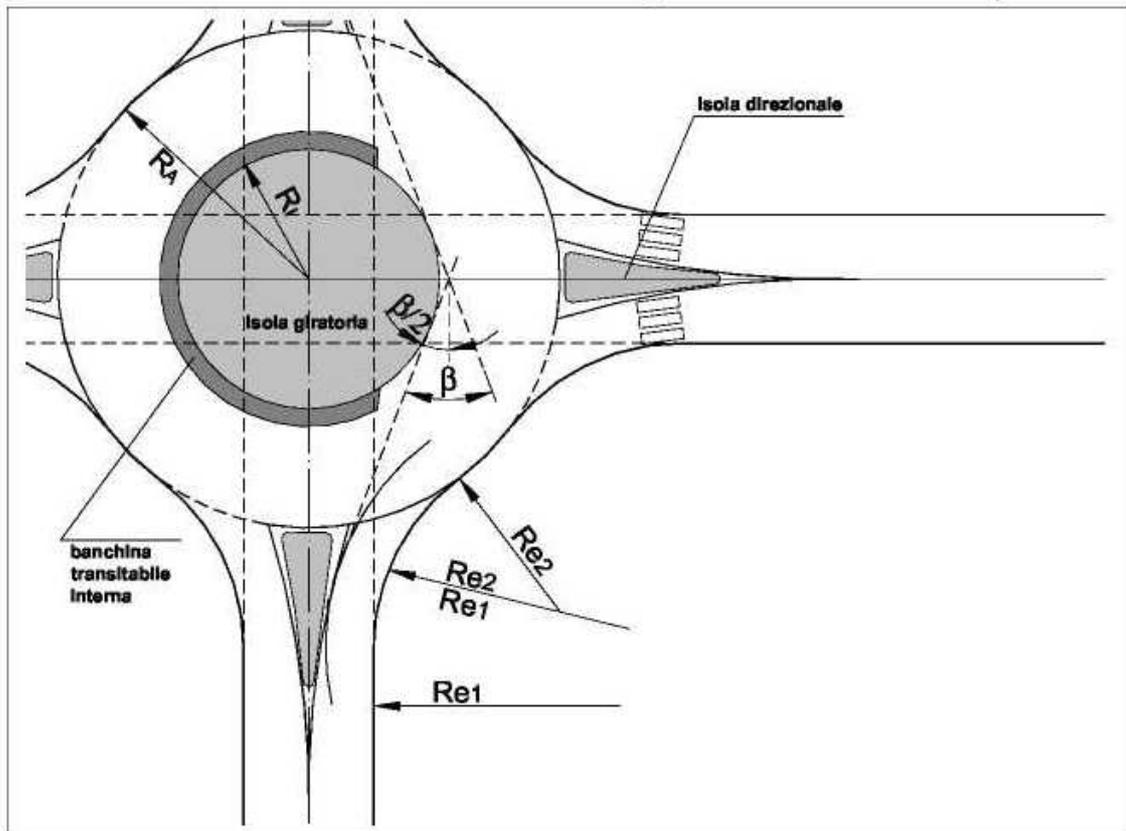
Una volta individuata questa traiettoria, la velocità di progetto della rotatoria deve essere valutata facendo riferimento al raggio più piccolo presente lungo la traiettoria.

La valutazione del valore della deviazione è effettuata per mezzo dell'angolo di deviazione β (Figura 2.8). Per determinare la tangente al ciglio dell'isola centrale corrispondente all'angolo di deviazione, bisogna aggiungere al raggio di entrata $R_{e,2}$ un incremento b pari a 3.50 m .

Per ciascun braccio d'immissione deve esserci un valore dell'angolo β di deviazione di almeno 45° .

Non sempre però è possibile misurare questo parametro, ad esempio in rotatorie che presentano più di quattro rami d'accesso/uscita, è difficile stabilire il valore dell'angolo β .

Gli altri parametri da definire per la costruzione di una rotatoria vengono riportati nella Figura 2.8 :



b_e	larghezza della corsia in entrata	R_A	raggio esterno
b_a	larghezza della corsia in uscita	R_I	raggio interno
b_k	larghezza dell'anello di circolazione	α	angolo d'entrata
$R_{e,1}$ e $R_{e,2}$	raggi di entrata	β	angolo di deviazione
$R_{a,1}$ e $R_{a,2}$	raggi di uscita	b	arretramento di $R_{e,2}$

Figura 2. 8 Elementi di progetto e tipizzazione delle rotatorie

In particolare:

- $Re_{1,2}$: il ciglio destro della carreggiata d'ingresso è raccordato con il ciglio esterno dell'anello di circolazione centrale per mezzo di un raccordo costruito da due archi di cerchio. In genere si utilizzano i valori riportati in Tabella 2.4:

Ambito urbano		Ambito extraurbano	
$R_{e,2}$ [m]	10,00	$R_{e,2}$ [m]	12,00
$R_{e,1}$ [m]	$5 \cdot R_{e,2}$	$R_{e,1}$ [m]	$5 \cdot R_{e,2}$

Tabella 2. 4 Valore del raggio di entrata

- α angolo di entrata. Rappresenta l'angolo tra la direzione d'ingresso (individuata dalla tangente al ciglio sinistro della carreggiata d'ingresso) e alla tangente all'anello di circolazione. Deve assumere valori tra $80^\circ - 90^\circ$.
- $R_{a,1,2}$: il ciglio destro dell'anello di circolazione è raccordato con il ciglio della carreggiata del braccio per mezzo di un raccordo di uscita; la geometria del bordo di connessione è costituita da due archi di cerchio. Per i raggi di uscita si adottano i valori riportati in tabella 2.5:

Ambito urbano		Ambito extraurbano	
$R_{a,2}$ [m]	12,00	$R_{a,2}$ [m]	14,00
$R_{a,1}$ [m]	$4 \cdot R_{a,2}$	$R_{a,1}$ [m]	$4 \cdot R_{a,2}$

Tabella 2. 5 Valore del raggio d'uscita

2.3.3 ISOLE DIVISIONALI

Le isole divisionali devono essere previste su tutti i rami della rotatoria escluse quelle con diametri molto piccoli perché creerebbero ostruzione visiva verso l'isola centrale.

Esse favoriscono l'individuazione della rotatoria, riducono la velocità dei veicoli in ingresso, forniscono lo spazio per una decelerazione graduale, separano fisicamente entrata e uscita, etc.

In genere presenta una forma pseudo triangolare avente lunghezza complessiva di almeno 15 m in modo da offrire protezione adeguata ai pedoni se ne è previsto il passaggio. Dovrebbe estendersi oltre la fine della curva di uscita in modo da evitare conflitti accidentali fra veicoli che escono dall'anello e i veicoli in ingresso.

In Figura 2.9 sono riportati i valori minimi di un'isola per rotatoria a singola corsia:

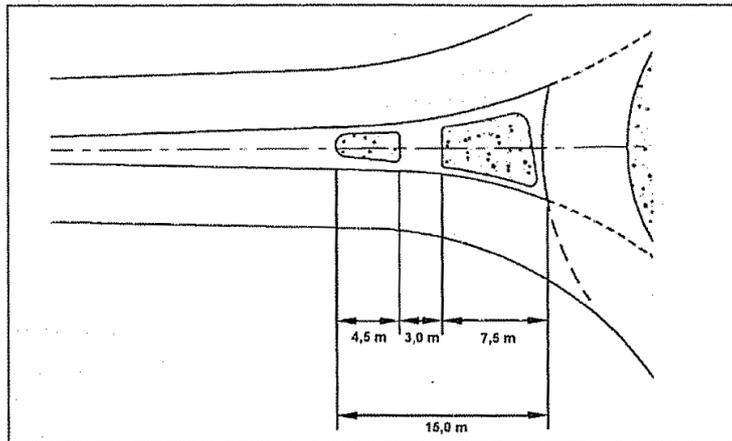


Figura due. 9 Isola divisionale

Per il tracciamento dell'isola divisionale si parte dal posizionamento del triangolo di costruzione avente altezza H pari al raggio della corona giratoria R_g e base B uguale a un quarto del raggio stesso.

Il triangolo di costruzione è posto secondo queste condizioni:

- Se il raggio dell'anello $R_g < 15$ m il triangolo di costruzione sarà isoscele e posto con la base in corrispondenza del bordo della corona giratoria, in modo che l'asse coincida con quello del braccio in cui si deve realizzare l'isola divisionale. (Figura 2.10)

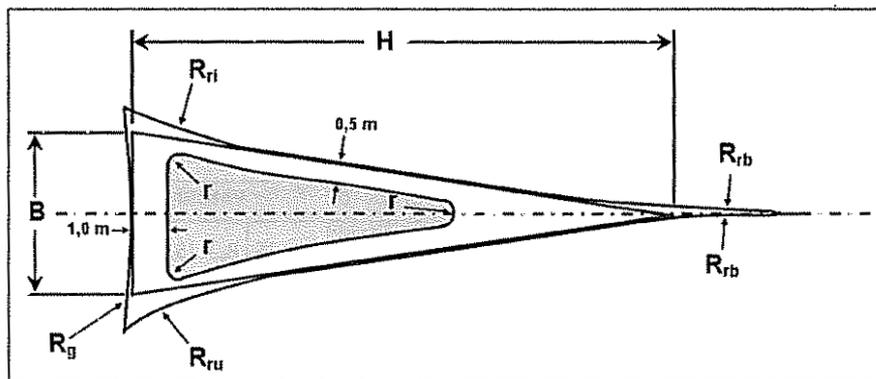


Figura 2. 10 Isola divisionale $R_g < 15$ m

- Se il raggio $R_g > 15$ m il triangolo non è isoscele e il suo asse interseca la base a $\frac{3}{4}$ della stessa (Figura 2.11). L'asse del ramo dovrà disporsi parallelamente all'asse del triangolo di costruzione con uno sfalsamento a sinistra di un valore riportato in Tabella 2.6.

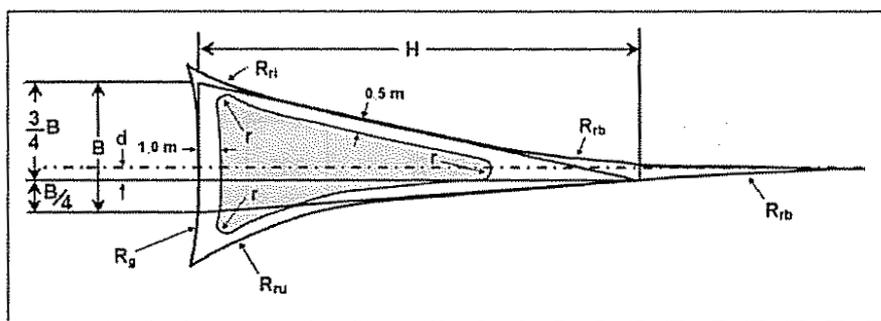


Figura 2. 11 Isola divisionale $R_g > 15$ m

	SIMBOLO	ESPRESSIONE DI CALCOLO	VALORI (METRI)			
Raggio della corona giratoria	R_g		$R_g < 15$	$R_g = 15$	$R_g = 20$	$R_g = 25$
Altezza del triangolo di costruzione	H	$H = R_g$	12,15	15	20	25
Base del triangolo di costruzione	B	$B = R_g / 4$	3,04	3,75	5,00	6,25
Sfalsamento dell'asse del triangolo di costruzione	d	$d = (0,5 + R_g/50)/2$ oppure 0	0	0,40	0,45	0,50
Raggio di raccordo dell'isola materializzata	r	$R = R_g / 50$	0,25	0,30	0,40	0,50
Raggio di raccordo dell'isola con la corona giratoria (in prossimità dell'ingresso)	R_{ri}	$R_{ri} = R_i + L_i$ $R_i =$ raggio d'ingresso $L_i =$ larghezza dell'entrata				
Raggio di raccordo dell'isola con la corona giratoria (in prossimità dell'uscita)	R_{ru}	$R_{ru} = R_u + L_u$ $R_u =$ raggio d'uscita $L_u =$ larghezza dell'uscita				
Raggio di raccordo dell'isola con l'asse del braccio	R_{rb}	$R_{rb} = 4 R_g$				

Tabella 2. 6 Parametri per la definizione geometrica delle isole divisionali

L'ampiezza complessiva dell'isola divisionale in corrispondenza del bordo dell'anello non dovrebbe essere inferiore ai 2 m, ove possibile dovrebbe essere maggiore di 4 m fino a un massimo di 12 m.

Generalmente prevedono una superficie in rilievo rispetto alla pavimentazione stradale, inoltre dovrebbero essere sgombrare da qualsiasi elemento che può costituire ostacolo alla visuale degli utenti.

2.3.4 VISIBILITÀ IN ROTATORIA

Questo è uno dei parametri fondamentali della progettazione di una rotatoria.

L'esistenza di opportune visuali libere costituisce una primaria ed inderogabile condizione di sicurezza della circolazione; per distanza di visuale libera si intende la lunghezza del tratto di strada che il conducente riesce a vedere davanti a sé senza considerare l'influenza del traffico, delle condizioni atmosferiche e di illuminazione della strada.

Innanzitutto è necessario garantire uno spazio adeguato, libero da qualunque impedimento visivo, tra il veicolo in approccio all'intersezione e la linea del "dare precedenza" per consentire l'arresto del veicolo. Tale spazio, definito come distanza di visibilità per l'arresto, è formato dal contributo di due termini: uno legato al tempo di reazione psico-tecnico del guidatore e l'altro allo spazio di frenatura del veicolo; entrambi i termini dipendono dalla velocità di avvicinamento del veicolo. La formula per il calcolo di questa distanza è la seguente:

$$D_A = D_1 + D_2 = \frac{V_0}{3,6} \cdot \tau - \frac{1}{3,6^2} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \cdot \left[f_1(V) \pm \frac{1}{100} \right] + \frac{R_a(V)}{m} + r_0(V)} dV$$

dove:

D_1 = spazio percorso nel tempo t [m]

D_2 = spazio di frenatura [m]

V_0 = velocità del veicolo all'inizio della frenatura [km/h]

V_1 = velocità finale del veicolo, pari a 0 in caso di arresto [km/h]

i = pendenza longitudinale del tracciato [%]

τ = tempo complessivo di reazione (percezione, riflessione, reazione e attuazione) [s]

g = accelerazione di gravità [m/s²]

R_a = resistenza aerodinamica [N]

m = 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 valuta con la seguente espressione:

$$R_a = \frac{1}{2 \cdot 3,6^2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot V^2 \quad [\text{N}]$$

dove:

C_x = coefficiente aerodinamico

S = superficie resistente [m²]

ρ = massa volumica dell'aria in condizioni standard [kg/m³]

Per semplicità, anziché calcolare distanze di visibilità per mezzo della formula si può far riferimento all'abaco riportato dal D.M. 05/11/2001 (Figura 2.12), elaborato per un'autovettura dalle caratteristiche standard.

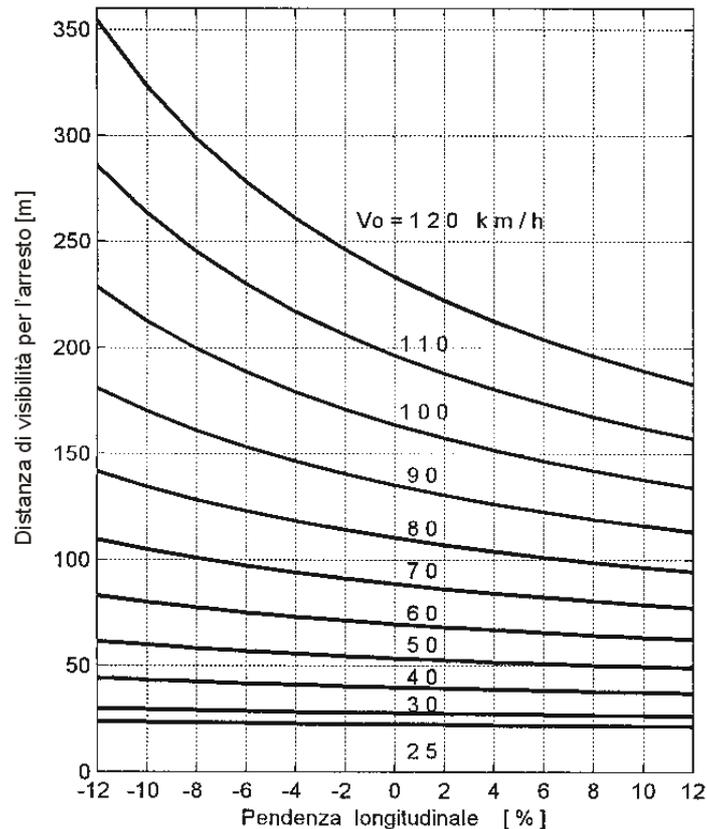


Figura 2. 12 Abaco per il calcolo della distanza di visibilità per l'arresto per le strade di categoria B, C, D, E ed F

Oltre a garantire la visibilità per l'arresto del veicolo prima della linea del "dare precedenza" (o dell'attraversamento pedonale, se presente), è importante che i conducenti prossimi all'immissione in rotatoria abbiano una visibilità sufficiente dei veicoli all'interno della stessa per modificare la propria velocità e quindi cedere il passaggio o immettersi nell'anello.

Con riferimento alla Figura 2.13 si elenca la modalità di verifica di questo criterio:

- Il punto di osservazione dell'utente in ingresso va posto a una distanza di 15 m dalla linea di "dare la precedenza" coincidente con il bordo della circonferenza esterna.
- La posizione planimetrica del veicolo in immissione va posizionata sulla mezzeria della corsia di entrata in rotatoria (a una distanza minima di 1.5 m dal bordo laterale della carreggiata) e l'altezza d'osservazione si colloca a 1.00 m dal piano viabile.

Sotto queste ipotesi s'individua la zona di cui è necessaria la completa visibilità che corrisponde al quarto di corona giratoria posto alla sinistra del ramo d'ingresso, con l'aggiunta dell'area posta al di sotto dello stesso delimitata dalla retta che passa per il punto di osservazione, è tangente al cerchio esterno e interseca il prolungamento del raggio della rotatoria delimitante superiormente il quarto di corona giratoria.

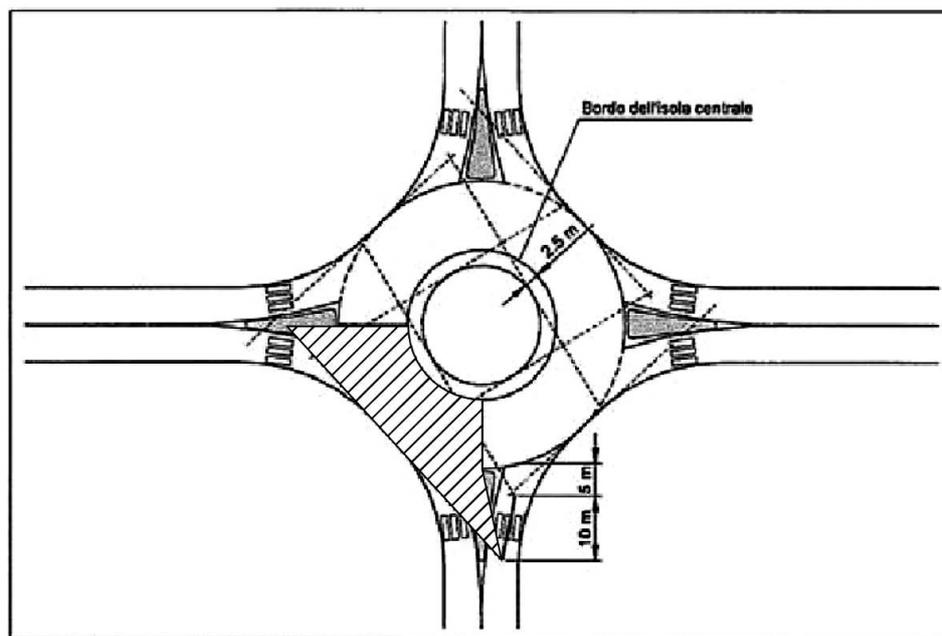


Figura 2. 13 Campi di visibilità in un'intersezione a rotatoria

2.3.5 ELEMENTI ALTIMETRICI

In relazione al tracciamento dei profili altimetrici longitudinale e trasversali, non sono disponibili molte informazioni di carattere normativo quindi nel seguito saranno esposte indicazioni di massima.

La pendenza trasversale della corona giratoria deve essere almeno del 2 % verso il bordo esterno in modo da garantire una corretta visibilità dell'isola centrale e permette il drenaggio delle acque piovane e il loro allontanamento dalla rotatoria.

La realizzazione della pendenza trasversale verso l'esterno può essere pericolosa per i veicoli che compiono una svolta a sinistra nella rotatoria perché percorrono una traiettoria con pendenza sfavorevole, quindi questa pendenza non deve essere eccessiva.

La realizzazione di una rotatoria richiede una pendenza massima del terreno del 4 %, pendenza che deve mantenersi uniforme in tutta l'area dell'incrocio in modo da facilitare la conformazione altimetrica dell'intersezione.

Devono inoltre essere previste opere di drenaggio quali canalette per la raccolta delle acque piovane poste proprio sul bordo che hanno lo scopo di convogliare le acque direttamente alla rete fognaria. Le caditoie si pongono nei punti di attraversamento pedonale o sul bordo dell'isola centrale se la rotatoria è realizzata su terreno con pendenza costante.

2.4 ELEMENTI DI COMPLETAMENTO: SEGNALETICA E ILLUMINAZIONE

La sicurezza della circolazione è strettamente connessa al rapporto che ha il guidatore con la strada e quindi al livello d'informazione che riceve dall'ambiente circostante.

Queste informazioni dipendono dalle funzioni visive, dal senso cromatico necessario per distinguere rapidamente e con certezza i colori in uso nella segnaletica stradale, dalla visione binoculare e dalla sufficiente profondità della visione soprattutto nella condizione notturna.

I segnali stradali orizzontali e verticali devono garantire una buona leggibilità del tracciato in tutte le condizioni climatiche e di visibilità e assicurare fornire informazioni utili per l'attività di guida.

Una segnaletica sicura deve rispondere a determinate caratteristiche quali:

- La congruenza con l'ambito stradale da caratterizzare
- La coerenza
- L'omogeneità

È quindi utile analizzare in modo dettagliato come avviene la percezione di un segnale, che si compone dei processi presentati in Tabella 2.7:

Fase	Descrizione	Fattori rilevanti o correlati
<i>Individuazione del segnale</i>	Riscontro della presenza del segnale lungo la strada.	Dimensioni, colori e contrasto rispetto al fondo.
<i>Riconoscimento</i>	Identificazione del tipo di segnale.	Forme e colori.
<i>Discriminazione del simbolo</i>	Associazione del messaggio con la manovra da compiere.	Familiarità dei simboli, caratteri e dimensioni delle lettere, semplicità del messaggio, abilità alla guida.
<i>Reazione</i>	Manovra effettuata in esito all'analisi mentale del messaggio.	Tempo di attuazione della manovra correlato mediante la velocità di marcia alla distanza minima di leggibilità del segnale.

Tabella 2. 7 Meccanica della percezione di un segnale

Dalla tabella si evince che la segnaletica stradale è tanto più efficace quanto più è lungo l'intervallo di tempo che viene concesso all'automobilista per reagire agli stimoli che si generano durante il processo di percezione.

La segnaletica è regolamentata dal Codice della Strada e dal relativo Regolamento di esecuzione.

2.4.1 SEGNALETICA ORIZZONTALE

La segnaletica orizzontale è strumento indispensabile per la guida ottica degli utenti. È utile da sola ma anche in associazione alla segnaletica verticale.

Viene utilizzata per:

- Delimitare la carreggiata stradale, le corsie di marcia specializzate e non, le corsie di manovra e gli spazi di sosta.
- Delimitare passaggi e attraversamenti pedonali
- Individuare le linee di arresto dei rami di accesso alle intersezioni
- Segnalare simboli e scritte
- Delimitare le parti della superficie stradale vietate alla circolazione
- Delimitare gli stalli di parcheggio
- Delimitare le fermate degli autobus

Essa deve essere visibile sia di giorno sia di notte; per la visibilità diurna è necessario un adeguato contrasto tra cromatico tra la segnaletica e la superficie stradale.

Per quella notturna invece occorre che i prodotti applicati siano rifrangenti a distanze corrispondenti a quelle dei proiettori degli anabbaglianti e abbaglianti dei veicoli (30 – 140 m).

In zone specifiche soggette a condizioni climatiche particolari quali frequenti piogge o nebbie è bene integrare le strisce longitudinali con elementi catarifrangenti che, essendo in rilievo rispetto al piano viabile, assolvono la funzione di guida ottica.

Questi elementi possono essere suddivisi in due tipologie in funzione delle loro caratteristiche funzionali e costruttive:

- Passivi: s'illuminano solo se colpiti dalla luce dei fari dei veicoli. Sono posti all'interno di scatole inserite nella pavimentazione ed hanno la superficie superiore rifrangente opportunamente inclinata verso il senso di marcia dei veicoli.
- Attivi: emettono luce propria e funzionano a energia solare. Costituiti da un microprocessore interno che gestisce la superficie superiore coperta di LED, opportunamente orientata verso il senso di marcia dei veicoli.

Fondamentale è la loro ubicazione che deve essere tale da non costituire elemento di pericolo per le utenze deboli quali biciclette e motocicli.

Inoltre non deve essere scivolosa e la sua aderenza superficiale deve essere compatibile con quella della superficie stradale; è per questo che vengono impiegati prodotti vernicianti, applicati a caldo, applicati a freddo, strisce prefabbricate e inserti.

La nuova normativa per le intersezioni a rotatoria impone la non delimitazione delle corsie all'interno dell'anello a differenza di quanto accadeva prima.

Per ogni ramo d'ingresso è richiesta la striscia trasversale di dare la precedenza, mentre i rami di uscita non richiedono segnaletica.

La linea di arresto (Figura 2.14), in presenza del segnale "dare precedenza", è costituita da una serie di triangoli bianchi tracciati con la punta diretta verso il conducente obbligato a dare precedenza, con base tra 40 e 60 cm e altezza compresa tra 60 e 70 cm e la distanza fra due triangoli è pari a circa la metà della base.



Figura 2. 14 Linea d'arresto

La linea di arresto può essere integrata con il simbolo del triangolo tracciato sulla pavimentazione e deve essere ripetuto per ogni corsia del senso di marcia cui si riferisce e il limite superiore del triangolo non deve distare dai vertici dei triangoli meno di 2 m.

2.4.2 SEGNALETICA VERTICALE

Le funzioni cui deve assolvere la segnaletica verticale ubicata in corrispondenza di un'intersezione stradale sono le seguenti:

- Segnalare prima delle intersezioni le mete raggiungibili, tramite i vari rami, in modo da realizzare la preselezione e la canalizzazione delle correnti veicolari.
- Comunicare la configurazione topografica dell'intersezione con l'evidenziazione degli eventuali rami più importanti.
- Comunicare quale strada l'utente sta percorrendo e quali strade percorrerà seguendo le varie diramazioni per evitare di generare confusione e incertezza.

Per svolgere queste funzioni la segnaletica verticale deve essere avvistabile e leggibile, sia di giorno sia di notte, quindi deve sussistere il corretto posizionamento piano – altimetrico cioè:

- Deve essere verificata in ogni punto la sussistenza delle distanze di avvistamento e di ubicazioni pari rispettivamente alla distanza necessaria al conducente per avvertire la presenza del segnale e alla distanza tra quest'ultimo e il punto in cui i comportamenti richiesti devono essere attuati.
- I segnali collocati sulla carreggiata e sui marciapiedi devono essere installati a delle distanze minime pari rispettivamente a 5.10 m e 2.20 m dal piano viabile.

- I sostegni verticali in presenza di marciapiede sono collocati a 0.30 m dal suo ciglio interno. Se quest'ultimo ha larghezza inferiore a 1.50 m, al fine di non ostacolare la circolazione pedonale, tali sostegni devono essere posti al limite esterno dello stesso, a ridosso di eventuali recinzioni. In assenza di marciapiedi i sostegni verticali devono essere ubicati a 0.50 m dal ciglio della banchina.

Nel caso della rotatoria è indispensabile prevedere il posizionamento di un cartello che ne dia preavviso, comprensivo delle informazioni utili per la guida e l'individuazione di località, servizi ecc ...

Il segnale deve essere posto a una distanza (d) dal punto in cui inizia la manovra di svolta, in funzione della velocità operativa (V) conformemente ai seguenti valori:

- d = 60 m V = 50 km/h
- d = 80 m V = 90 km/h
- d = 100 m V = 110 km/h
- d = 130 m V = 130 km/h

Nell'isola centrale, di fronte all'entrata, in vista agli utenti che si trovano sulla linea del dare precedenza, deve essere posto il segnale di passaggio obbligatorio a destra. Nell'isola di separazione, sul vertice di fronte all'uscita, si dovrà porre un segnale di direzione urbano o extraurbano, con l'apice della freccia sempre a destra, in modo che il conducente possa comprendere che da quell'uscita si raggiunge la località desiderata.

Sulle isole in corrispondenza dell'entrata, deve essere disposto un dispositivo a luce riflessa, accoppiato al segnale verticale di passaggio obbligatorio a destra.

Lungo i rami della rotatoria si pone il segnale di dare precedenza e il segnale di rotatoria che devono trovarsi alla destra del ramo d'entrata.

I segnali di preavviso di circolazione in rotatoria e di preavviso di dare precedenza, in ambito extraurbano, dovranno essere installati a un'adeguata distanza dalla rotatoria in genere 100 m o 150 m; in ambito urbano devono essere installati nelle strade aventi limiti di velocità superiore a 50 km/h oppure quando le condizioni del traffico ne consigliano l'impiego per motivi di sicurezza.

Inoltre è necessario garantire la leggibilità notturna garantita attraverso in appropriato contrasto di luminosità tra l'ambiente circostante e il segnale ma anche tra il suo fondo e le scritte sopra riportate.

Per quanto riguarda invece l'aspetto della visibilità, si devono evitare segnali coperti da ostacoli quali alberi, manufatti, veicoli in sosta; evitare di posizionare più cartelli sullo stesso sostegno poiché forniscono troppe informazioni contemporaneamente; i segnali vecchi o rovinati sono da sostituire attraverso un piano di manutenzione programmata e infine non devono essere posti nelle vicinanze di cartelloni pubblicitari o insegne in quanto ne annullano il potere di richiamo.

Per le forme si raccomanda l'impiego di quelle standard al fine di agevolare l'individuazione del messaggio e sono stabiliti i formati circolari (obblighi e divieti), triangolare (pericolo e precedenza), quadrangolare e freccia (indicazioni).

La scelta invece del tipo di sostegno è fatta in funzione delle dimensioni del cartello da sorreggere, della tipologia di strada, della pericolosità del montante in caso di urto con il veicolo, con particolare attenzione per i veicoli a due ruote, scegliendo di utilizzare sagome protettive o pali a rottura controllata.

2.4.3 ILLUMINAZIONE STRADALE

L'illuminazione ha la funzione di assicurare ai conducenti, senza affaticamento e in tempo utile, la percezione distinta di tutti i dettagli dell'ambiente stradale cioè l'andamento piano – altimetrico del tracciato, l'indicazione della segnaletica stradale orizzontale, verticale e gli eventuali ostacoli e gli altri mezzi presenti sulla carreggiata.

I parametri principali da considerare per progettare un impianto d'illuminazione efficiente sono l'uniformità della sua distribuzione, l'adeguata luminanza media della pavimentazione, il limitato abbagliamento provocato da centri luminosi e l'illuminazione anche degli immediati dintorni della strada.

I tipi di lampade da adottare sono a irradiazione per effetto termico (lampade a incandescenza, normali o alogene) oppure a scarica di gas o a vapori (lampade fluorescenti, a vapori di mercurio o di sodio).

La disposizione delle lampade può avvenire attraverso alloggiamenti sospesi su filo o montati su pali e tralicci. Nel caso di alloggiamenti sospesi il posizionamento può essere centrale, caratterizzato da centri luminosi sospesi al centro della carreggiata su fili di acciaio sottesi da edificio a edificio o tra supporti laterali appositamente predisposti, questa soluzione porta però a una tendenza dei conducenti a circolare al centro della

carreggiata e fenomeni di abbagliamento se il forte porta a ondeggiamento delle lampade.

Si può avere una disposizione laterale che in questo caso sono disposte ai lati della carreggiata e l'illuminazione è centrale rispetto alle due corsie di marcia ed è particolarmente efficace.

Nel caso di alloggiamenti montanti su pali o tralicci le possibili disposizioni sono (Figura 2.15):

- a. Unilaterale: rappresenta la soluzione più economica in termini d'impianto richiedendo una sola linea di alimentazione. È indicata per lunghezza della strada inferiore all'altezza delle lampade e consente una perfetta illuminazione anche nelle curve.
- b. Bilaterale a centri alternati: necessaria quando la larghezza della carreggiata supera la quota d'installazione dei centri luminosi.
- c. Bilaterale a centri opposti: consigliata per strade a più corsie per senso di marcia quando la larghezza pavimentata è notevolmente superiore all'altezza delle lampade.
- d. Doppia centrale: si utilizza su strade con spartitraffico centrale.

In Tabella 2.8 vengono fornite indicazioni sull'altezza di montaggio e sulla disposizione delle lampade in funzione del tipo di strada:

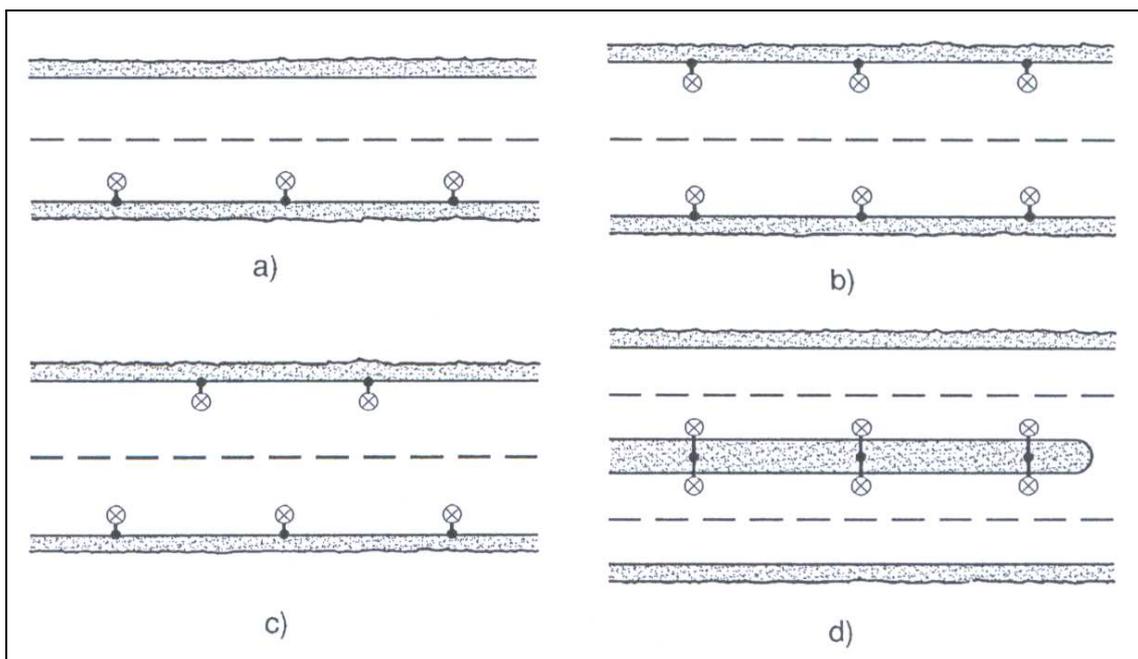


Figura 2. 15 Disposizione dei centri luminosi

Categoria di strada	Larghezza della carreggiata [m]	Altezza di montaggio [m]	Disposizione consigliata*
Strade con traffico motorizzato intenso e veloce, traffico pedonale nullo	8 ÷ 10	10 ÷ 12	1 – 2
	≥ 10	≥ 12	2 – 4
Strade extraurbane a medio traffico, con presenza di pedoni	≤ 10	≥ 10	1
	> 10	10 ÷ 12	2 – 3
Strade urbane con intenso traffico motorizzato e forte traffico pedonale	< 8	≥ 8	1
	8 ÷ 10	8 ÷ 10	1 - 2
	> 10	≥ 10	2 – 3
Strade a scarso traffico motorizzato e di collegamento dell'abitato	≤ 8	> 7.5	1
	> 8	8 ÷ 9	1
Strade residenziali a scarso traffico motorizzato	--	7 ÷ 9	1
Strade pedonali	--	3.5 ÷ 7.5	1

Tipi di disposizione: 1 = Unilaterale, 2 = Bilaterale a centri alternati, 3 = Bilaterale a centri opposti, 4 = Doppia centrale

Tabella 2. 8 Caratteristiche dei centri luminosi

2.5 ITINERARI PEDONALI E CICLABILI

In genere la realizzazione di una rotatoria migliora la sicurezza dei pedoni perché la velocità dei veicoli è ridotta rispetto alla velocità che gli utenti possono avere in altre tipologie d'intersezioni. In particolare nelle grandi rotatorie i percorsi per i pedoni risultano disagiati e generano sensazione d'insicurezza.

I pedoni, infatti, non possono attraversare la corona giratoria ma devono attraversare una direzione del traffico alla volta utilizzando le isole divisionali e accettando di attraversare solo in condizioni di sicurezza perché a differenza dei semafori, nelle rotatorie non hanno la precedenza sulle manovre di traffico.

Come prescritto da Codice della Strada la larghezza di un attraversamento non deve essere inferiore a 2.50 m nelle aree urbane e 4.00 m nelle aree extraurbane.

La migliore soluzione consiste nel collocare l'attraversamento arretrato dello spazio occupato da 1 o 2 vetture quindi da 5 a 10 m, rispetto alla linea di fermata, in modo che i pedoni possano passare dietro alle vetture ferme in attesa di inserirsi nella corona giratoria. La stessa cosa dovrebbe essere realizzata per il ramo di uscita, in modo da consentire al veicolo di fermarsi fuori dalla corona giratoria e non creare ostacolo per gli altri veicoli.

Dove possibile è consigliabile che le due serie di strisce pedonali, quella riguardante il ramo di entrata e quella che si riferisce al ramo di uscita, siano sfalsate di alcuni metri,

in particolare l'attraversamento del ramo di uscita dovrebbe essere più distante dall'anello centrale rispetto a quello del ramo di entrata (3 o 4 vetture ovvero 15 o 20 m) al fine di diminuire il rischio di collisioni tra veicoli e pedoni e contemporaneamente ridurre la probabilità ritardo dei veicoli e quindi la possibile formazione di coda all'interno della rotatoria.

La mobilità ciclistica invece, richiede una particolare attenzione sulle rotatorie con più corsie, quando le portate veicolari in ingresso superano le 10000 unità al giorno oppure se le velocità operative sono maggiori di 50 km/h.

Si può scegliere di pensare ai velocipedi come pedoni oppure come veicoli; nel primo caso si devono realizzare apposite piste ciclabili che dai rami si collegano alle banchine della corona giratoria, in modo da separarli dal traffico veicolare. Questa soluzione prevede un marciapiede allargato e fisicamente separato dalla corona giratoria, condiviso da ciclisti e pedoni.

Oppure si possono realizzare piste ciclabili separate dalla carreggiata stradale nelle quali le biciclette possono percorrere interamente l'anello ciclabile senza fermarsi, poiché hanno diritto di precedenza.

2.6 ASPETTI FUNZIONALI DELLE ROTATORIE

Il D.M. 19/04/2006 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali” stabiliscono, per le rotatorie, di compiere determinazioni di Capacità e Livello di Servizio.[4]

Esse però non danno indicazioni sui criteri di calcolo per pervenire alla caratterizzazione delle condizioni operative delle intersezioni circolari.

Con calcolo delle rotatorie s'intende il conseguimento di misure di efficienza quando questi incroci sono interessati da domanda di traffico nota.

Gli indici prestazionali che di norma si considerano, sono:

- Capacità e altri indicatori connessi
- Lunghezze delle code
- Tempi di attesa

Le determinazioni di capacità riguardano:

- Per gli ingressi, la capacità, il tasso e la riserva di capacità, assoluta e percentuale.
- Per la rotatoria nel suo complesso, la capacità semplice e quella complessiva (o totale) e la media della riserva e del tasso riguardante gli ingressi.

Specificando i vari indici:

Le code sono le file di attesa cui si assoggettano i veicoli agli ingressi e di esse si dà una stima della lunghezza, espressa in numero di veicoli, in media o per percentile.

I tempi di attesa sono il risultato degli accodamenti e contribuiscono alla formazione dei ritardi cioè dei tempi persi nel viaggio per la presenza del nodo lungo il percorso. Essi possono essere riferiti a singoli utenti, come valore puntuale o come media di una variabile aleatoria, o con opportune medie, all'incrocio nel suo insieme.

Quando si calcola la capacità, la lunghezza della coda e i tempi d'attesa si devono specificare, per il periodo di osservazione, la costanza e la variabilità della domanda di traffico e la presenza di uno o più ingressi non sotto saturati.

Una rotatoria si può intendere in stato stazionario se la domanda di traffico al nodo non varia nel tempo ed essa risulta, sistematicamente servita dallo schema senza che s'instaurino fenomeni di congestione veicolare in entrata.

Nella pratica tecnica la verifica funzionale e il progetto geometrico di una rotatoria viene, in genere, condotta sotto ipotesi di costanza nel tempo della domanda di traffico e con riferimento ai traffici di progetto relativi a un'ora opportunamente scelta.

Per un ingresso generico, si suppone che il volume di traffico dei sottoperiodi inclusi nell'ora di riferimento, sia costante e il suo valore complessivo viene amplificato con il fattore dell'ora di punta PHF, per tener conto delle fluttuazioni di traffico che avvengono nella realtà, all'interno dell'ora stessa.

Operando in questo modo il proporzionamento geometrico e le condizioni operative vengono verificati in base ad una portata pari all'equivalente orario del flusso relativo al sottoperiodo di punta.

Questo però è un procedimento non corretto perché si ottengono lunghezze delle code e tempi di attesa sensibilmente superiori a quelli attuati e tende a diventare infinito in condizioni critiche, cioè quando la domanda si approssima, eguaglia o supera la capacità d'ingresso. Tutto questo comporta un sovradimensionamento degli elementi geometrici dello schema e una valutazione non realistica della qualità della circolazione (Livello di Servizio).

Nella realtà le punte di traffico o le condizioni critiche si manifestano per intervalli di tempo più o meno estesi, ma comunque finiti e con effetti limitati. È opportuno quindi porre a base del calcolo l'andamento dei flussi di domanda nel periodo temporale di analisi e l'effettiva durata degli eventuali picchi di traffico presenti.

Sarebbe bene quindi valutare le fasi transitorie di evoluzione del sistema nel passaggio da uno stato stazionario all'altro.

2.6.1 CAPACITÀ

Si definisce capacità di un ingresso C il più piccolo valore del flusso sul braccio che determina la presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi.

Per il calcolo della capacità si analizza la rotatoria come una successione, lungo lo sviluppo del nodo, d'incroci a T, con precedenza ai flussi in circolo, senza alcuna interazione se non quella di contribuire mutuamente a formare i traffici all'anello che interessano ciascun'entrata.

Per un ingresso in rotatoria, la capacità C può esprimersi come:

$$C = C(\vec{G}; Q_d; \vec{\tau}; \vec{S})$$

Dove

- \vec{G} : è un insieme di variabili rappresentative della geometria dello schema (ad esempio la larghezza degli ingressi, raggio dell'isola centrale, ecc ...) o della sua configurazione (numero di corsie all'anello, numero di corsie agli ingressi, ecc ...)
- Q_d : è il traffico di disturbo che ostacola l'immissione in rotatoria; è funzione dei flussi entranti, dei flussi circolanti Q_c e di quelli uscenti Q_u
- $\vec{\tau}$: rappresenta i tempi psicotecnici relativi al comportamento degli utenti.
- \vec{S} : sono costanti numeriche risultanti dalla taratura del modello di calcolo, dallo sviluppo analitico dello stesso, dalle unità di misura delle variabili utilizzate.

Specificando la relazione, le formulazioni di capacità sono classificabili in tre tipi a seconda che:

- a. Lo schema venga caratterizzato dalla sola configurazione, rappresentata con numero di corsie all'anello e ai bracci;
- b. Si tenga conto in modo più o meno dettagliato della geometria della rotatoria;
- c. Si caratterizza unitamente ad aspetti della geometria, anche il comportamento degli utenti con i tempi psicotecnici T_c , intervallo critico, e T_f , tempo di sequenza.

Formule del tipo "a" sono state sviluppate da Brilon e coll. e da Bovy e coll.: la configurazione dello schema è rappresentata attraverso il numero di corsie agli ingressi ed all'anello. Inoltre per una di esse il traffico di disturbo Q_d è rappresentato dal solo

flusso circolante Q_c in corrispondenza degli ingressi. Per l'altra (Bovy) il flusso Q_d è combinazione lineare di Q_c e del traffico uscente Q_u .

La seconda tipologia elaborata da TRRL richiede una caratterizzazione maggiormente dettagliata della geometria della rotatoria, introducendo come dati d'ingresso l'estensione dei principali elementi planimetrici dello schema circolare. Inoltre il traffico di disturbo è fornito dal solo flusso circolante Q_c .

La procedura di Girabase invece richiede la valutazione di alcune grandezze geometriche dello schema e l'introduzione di un prefissato valore del tempo di sequenza T_f .

Si definiscono poi la Capacità Semplice e la Capacità Complessiva o Totale:

- Capacità Semplice (CS): facendo riferimento a una determinata domanda di traffico che interessa l'intersezione, si definisce capacità semplice CS il primo valore di capacità che si registra a un ingresso per un aumento uniforme dei flussi costituenti la domanda medesima; con il calcolo della capacità semplice s'individua, rispetto a una determinata configurazione dello schema, a una data intensità e distribuzione della domanda a un ingresso e sotto un'assegnata ipotesi d'incremento della stessa, il valore del flusso massimo in entrata da ciascun ramo quando per uno di essi si raggiunge la congestione.
- Capacità Complessiva o Totale (CT): per una determinata rotatoria rispetto a un dato scenario di ripartizione percentuale del traffico in ingresso è la somma dei valori dei flussi entranti da ogni ramo quando questi flussi sono simultaneamente quelli di capacità.

La Capacità Totale rappresenta quindi, per una data distribuzione della domanda all'intersezione, una misura sintetica dell'attitudine limite della rotatoria a servire il traffico quando ciascuno dei bracci è in saturazione.

2.6.2 RITARDI E LUNGHEZZE DELLE CODE

I ritardi rappresentano il tempo perso nel viaggio per la presenza di un nodo lungo il tragitto.

In particolare, in corrispondenza di una rotatoria, esso si compone di:

- Tempo di attesa in coda w_c : tempo che ogni singolo veicolo perde dall'accodamento fino a quando si dispone all'ingresso dell'intersezione (cioè alla linea del dare precedenza) per poterla impegnare.
- Tempo di servizio T_s : tempo che trascorre tra quando il veicolo giunge alla testa della coda e l'istante a partire dal quale inizia il suo ingresso nell'anello per effettuare la manovra desiderata.

La lunghezza della coda L_s ad un ingresso si definisce come il numero di veicoli in attesa nel sistema, comprensivo del veicolo di servizio, cioè del veicolo alla testa della fila in attesa di immettersi sull'anello.

La lunghezza della coda L_c invece è il numero di veicoli in fila di attesa alle spalle del veicolo di servizio. Ad esempio nel caso di rotatoria con una corsia agli ingressi,

$$L_c = L_s - 1$$

Capitolo 3

Caso applicativo

3.1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO E INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il caso di studio affrontato riguarda la progettazione della nuova Tangenziale Nord, voluta dal Comune di Verona per chiudere l'anello circonvallatorio delle tangenziali della città.

L'arteria in progetto risulta uno degli interventi più importanti della città di Verona e dei suoi prossimi dintorni; avrà la funzione di decongestionamento del traffico assicurando un maggior servizio alla mobilità locale esistente e futura.

Il Comune ha indetto un bando di gara per la realizzazione dell'opera al quale hanno risposto diverse società con soluzioni progettuali differenti; si è deciso di analizzarne due in particolare che chiameremo Soluzione T e Soluzione G.

Dopo un primo inquadramento territoriale dell'area oggetto di studio, si è passati all'analisi dei due progetti, scegliendo uno svincolo ed esaminando le diverse soluzioni progettuali previste per quella particolare intersezione.

In prima analisi è bene definire l'area nella quale l'opera viene a inserirsi.

Verona anticamente era punto nodale di ogni sistema di trasporto terrestre e acquatico dell'Italia nord orientale e ancora oggi è un importante nodo geografico stradale, ferroviario e autostradale.

Si colloca alle pendici delle colline pedemontane della provincia di Verona posta ad ovest della pianura veneta, lambita e attraversata dal fiume Adige e da alcuni corsi d'acqua minori e canali artificiali.

Il territorio in studio è interamente compreso nel Comune di Verona. Il contesto geologico generale è quello di un'area di pianura delimitata, verso nord, da una serie di dorsali collinari cui si intercalano valli con direzione circa nord – sud. Al limite meridionale dell'area collinare scorre il Fiume Adige con percorso meandriforme.

Il settore nord orientale del tracciato interessa il rilievo montuoso delle Torricelle (da cui l'opera prende il nome), mentre il settore meridionale, dall'attraversamento dell'Adige sino a fine intervento, è pianeggiante. Nell'attraversamento del Fiume Adige, a sud dell'abitato di Parona, il tracciato interferisce, nella sua parte più a sud, con la zona protetta Sito di Interesse Comunitario (SIC) denominato "Fiume Adige tra Belluno Veronese e Verona Ovest".

Dal punto di vista idrogeologico l'area in studio è sede dell'acquifero indifferenziato veronese. Tale acquifero, di tipo freatico, è ospitato nel materasso alluvionale ghiaioso-sabbioso molto permeabile.

Il centro abitato è contornato da un sistema di tangenziali denominate Tangenziale Ovest che consente il collegamento con l'autostrada A22, tangenziale Sud che si connetta all'autostrada Brescia – Padova A4 e Tangenziale Est (Figura 3.1); è raggiunto inoltre dalla Transpolesana, dalla Strada Regionale 11 Padana Superiore che collega Torino a Venezia, e dalla Strada Statale 12 dell'Abetone e del Brennero, che collega Pisa al passo del Brennero.

È in questo scenario che viene a inserirsi l'infrastruttura conosciuta come “traforo delle Torricelle” che avrà funzione di circonvallazione Nord.

Questa soluzione ha lo scopo di spostare importanti volumi di traffico dall'ambito urbano, della situazione attuale, alla periferia meno densamente abitata, migliorandone sensibilmente le condizioni di scorrevolezza e fluidità, apportando benefici sia dal punto di vista delle emissioni di rumore che per il rilascio d'inquinanti in atmosfera.

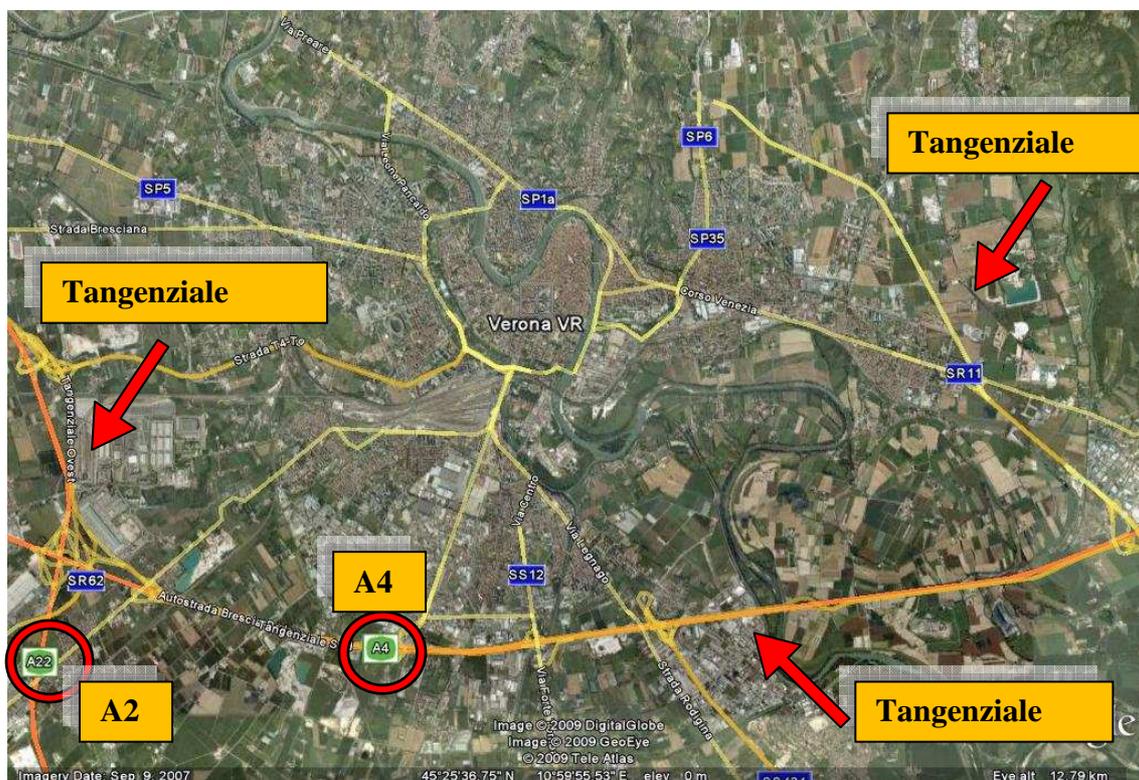


Figura 3. 1 Infrastrutture esistenti: tangenziale Ovest, Est, Sud, autostrada A4 e A22

Il progetto preliminare del Comune di Verona prevede il collegamento viario dallo svincolo della tangenziale Est su via Fincato fino allo svincolo di Verona Nord, nelle vicinanze del casello autostradale della A22 del Brennero.(Figura 3.2)

L'infrastruttura comprende una prima tratta in galleria naturale di lunghezza pari a 2,2 km per sotto attraversare i rilievi delle Torricelle, a seguire una tratta in galleria artificiale lunga circa 2,0 km presso le località Avesa e Quinzano e un'ultima parte in trincea.

Si prevede anche l'attraversamento del fiume Adige in viadotto di lunghezza pari a 220 m in struttura metallica.

Sono previsti cinque svincoli:

- Via Fincato
- Saval – via Preare
- S.P. 5 – via Gardesane
- S.R. 11 – via Bresciana
- Tangenziale Ovest / Verona Nord



Figura 3. 2 Andamento progetto preliminare “tangenziale Torricelle” Comune di Verona

A sud del fiume Adige il tracciato si sviluppa in direzione Sud – Ovest, verso lo svincolo Verona Nord; in questa zona è previsto il collegamento con la Tangenziale Ovest e il casello autostradale, la Bretella di Verona Nord e la tangenziale Sud.

L'intervento in argomento s'inquadra come ipotesi di "galleria lunga", supponendo che il nuovo intervento, possa garantire sia la funzione di circonvallazione nord della città, per i traffici di provenienza extraurbana che oggi percorrono la città, sia una funzione prettamente "urbana", attraverso il collegamento diretto tra Via Fincato e il Saval, ormai indispensabile per risolvere gli attuali problemi di traffico di attraversamento delle aree urbane di Veronetta, Borgo Trento, Valdonega, Via Mameli e Via Cà di Cozzi.

Ed è questo lo svincolo che si è scelto di studiare (Svincolo Saval) perché si connette alla rete periurbana ed è quello che presenta maggiori flussi di traffico in ingresso e in uscita dalla tangenziale, essendo posto in una posizione strategica, a servizio anche della mobilità urbana.

Inoltre lo svincolo sarà a servizio sia degli utenti provenienti da Est che vogliono raggiungere, ad esempio, l'ospedale, il centro storico o la circonvallazione interna e viceversa, sia a servizio dei flussi di traffico in entrata/uscita dalla Valpolicella.

Nel paragrafo seguente si specifica lo stato di fatto dell'intersezione.

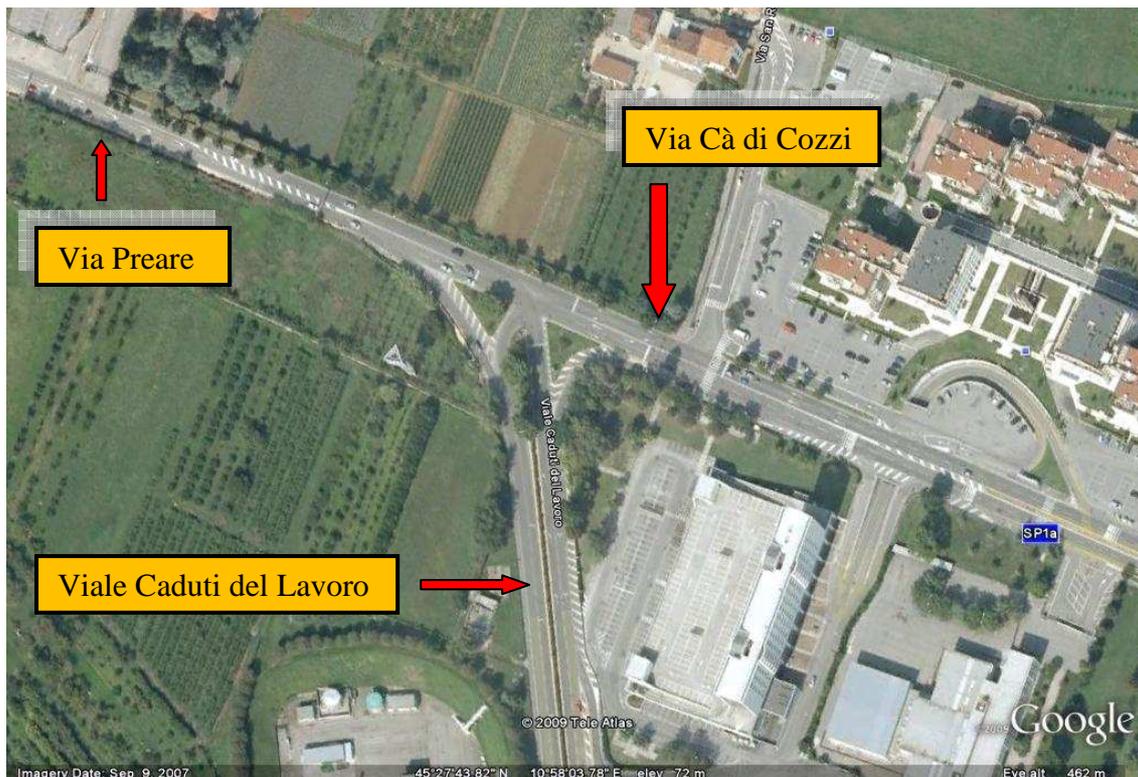


Figura 3. 4 Mappa aerea della zona interessata dai lavori

Con l'inserimento della tangenziale è necessario riorganizzare l'assetto di questo incrocio.

Come detto in precedenza, sono stati studiati due progetti che presentano caratteristiche differenti; la Soluzione T (Figura 3.5) prevede un tracciato simile a quello posto a base di gara dal Comune di Verona, con il primo tratto di tangenziale, da via Fincato, in galleria artificiale, per poi proseguire in galleria naturale e gli svincoli previsti sono i medesimi. La galleria è realizzata a doppia canna con due corsie per senso di marcia.



Figura 3. 5 Soluzione progettuale Società T

L'intersezione tra Via Cà di Cozzi e Viale Caduti del Lavoro è risolta attraverso una rotatoria, dalla quale si diparte un ramo che si connette alla tangenziale (Figura 3.6).



Figura 3. 6 Soluzione Svincolo Saval - Progetto T

In Figura 3.7 è riportato uno schema sintetico della rotatoria presa in esame, unitamente alle caratteristiche geometriche di ogni suo elemento in riferimento al D.M. 19/04/2006 riportato nel Capitolo 2 (Tabella 3.1).[1]

Nella *Tavola 1* allegata si riporta il dettaglio dello svincolo Saval proposto dalla società T.

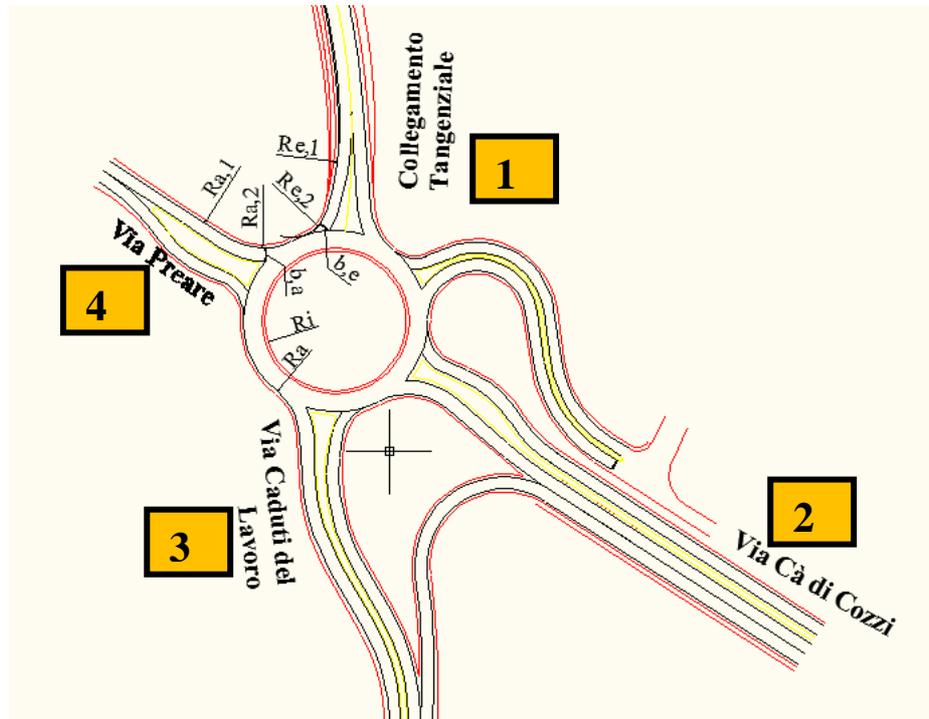


Figura 3. 7 Schema dell'intersezione a rotatoria Progetto T

RAMO		1	2	3	4
b,e	LARGHEZZA CORSIA ENTRATA(m)*	3.5	4	3.5	3.5
b,a	LARGHEZZA CORSIA USCITA (m)*	4.5	4.5	4.5	4.5
Re,1	RAGGIO IN ENTRATA (m)	96.2	39	41	38.7
Re,2	RAGGIO IN ENTRATA (m)	12	12	12	12
Ra,1	RAGGIO IN USCITA (m)	∞	∞	∞	500
Ra,2	RAGGIO IN USCITA (m)	20	16	20	20
Ra	RAGGIO ESTERNO (m)	30			
Ri	RAGGIO INTERNO (m)	23			
b	LARGH.ANELLO DI CIRCOLAZIONE (m)	6			

Tabelle 3. 1 Caratteristiche geometriche della rotatoria in esame

* La larghezza dei bracci di entrata è definita dal segmento che parte dal vertice destro dell'isola divisionale e viene condotto ortogonalmente al bordo destro della corsia di entrata, mentre la larghezza dell'uscita deve essere computata a partire dal vertice sinistro dell'isola divisionale conducendo un segmento perpendicolare al bordo destro della corsia d'uscita.

Rispetto al progetto posto a base di gara dal Comune di Verona, la soluzione G si differenzia nella tratta iniziale, quella orientata sull'asse nord-sud, essendo spostata verso est di circa 2 km e si diversifica anche nella soluzione della tratta in galleria (Figura 3.8).

L'intervento ha inizio in corrispondenza dello svincolo di Verona Nord nel quale si prevedono lavori di adeguamento della sede stradale per renderlo conforme alle caratteristiche geometriche della nuova infrastruttura.

Il percorso prosegue fino allo svincolo San Massimo, dove curva verso sinistra puntando verso nord, sottopassa via Cason con un tratto in galleria artificiale e prosegue in direzione Nord fino allo svincolo Lugagnano realizzato con rotatoria a livelli sfalsati.

Il tracciato prosegue in trincea, come i tratti precedenti, per l'ultimo tratto allo scoperto.

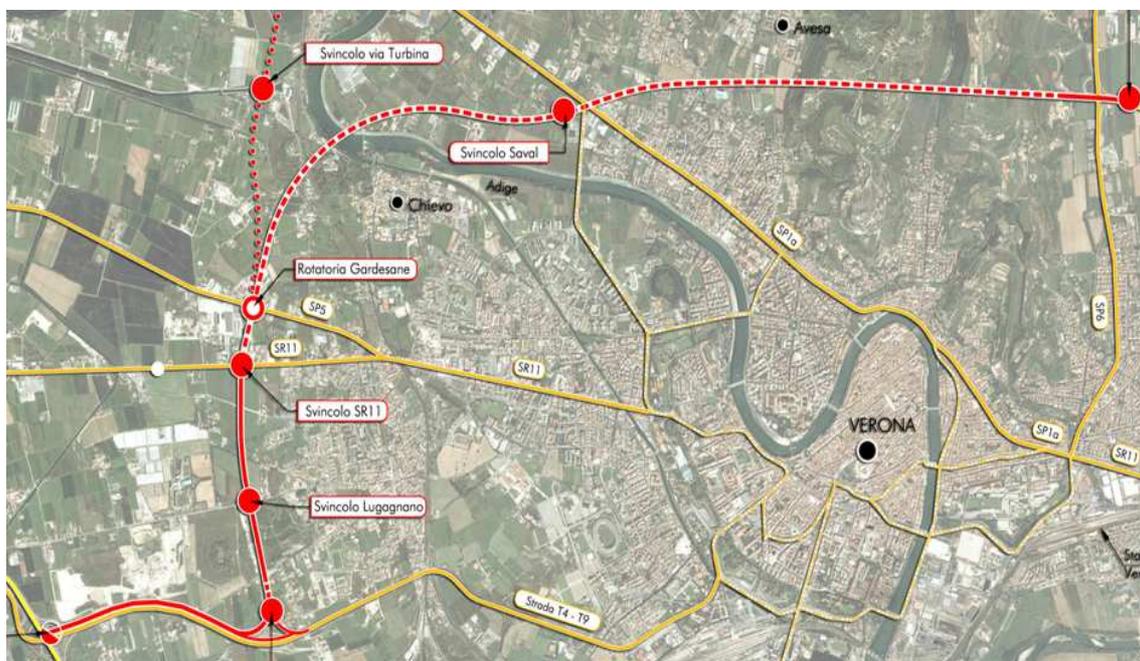


Figura 3. 8 Soluzione progettuale Società G

Le due carreggiate iniziano a scendere in galleria artificiale sotto lo svincolo SR 11 per portarsi su un unico asse longitudinale disposto a livelli sfalsati con carreggiata Nord al livello - 2 e carreggiata Sud a livello - 1, la parte restante è in galleria naturale.

Una volta entrati in galleria si sotto – attraversa il fiume Adige, da cui la galleria prende il nome, e il tracciato svolta verso est con una curva verso destra.

Terminata la salita, il percorso emerge in località Saval nei pressi del quale è previsto uno svincolo con manufatto speciale che prevede quattro rampe, due per ogni carreggiata, con relative corsie di accelerazione/decelerazione che permettono il collegamento tra la Tangenziale Nord di progetto con la viabilità superficiale (Figura 3.9).

Superato anche questo svincolo, la tangenziale torna in sotterraneo con la seconda galleria naturale denominata Torricelle con sviluppo verso Nord pressoché in rettilineo, sotto passando Avesa e Quinzano.

Circa in corrispondenza dell'imbocco Est della galleria Torricelle si ha il disallineamento delle carreggiate in modo da ripristinare il loro normale assetto piano altimetrico proprio della sezione tipo "B", già realizzate tra l'attuale svincolo Fincato e lo svincolo di Verona Est.

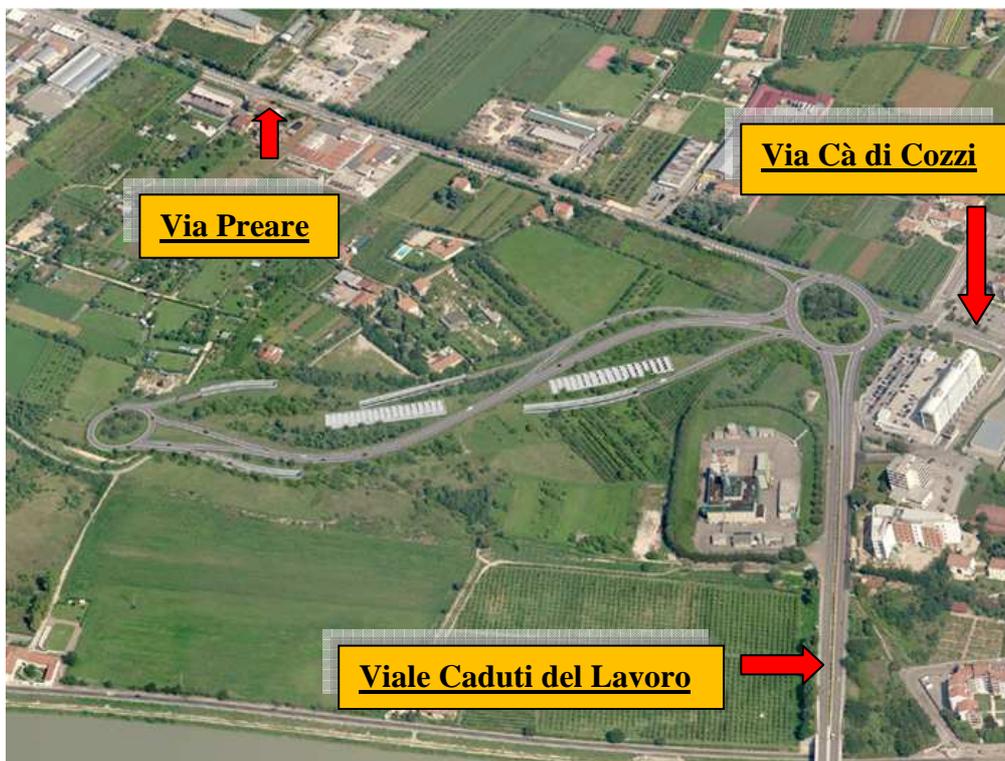


Figura 3. 9 Soluzione svincolo Saval – Progetto G

La particolare sezione della galleria a unica canna e livelli sfalsati, con altezza libera pari a 3.20 m non consente il passaggio dei veicoli pesanti e medi; anche i veicoli di pronto soccorso non possono attraversare la galleria ma devono essere predisposti particolari mezzi da utilizzare in caso di emergenza.

Questo comporta una forte limitazione e un elemento di differenza rilevante rispetto all'altra progettazione che, invece, considera il passaggio dei veicoli pesanti.

Inoltre è previsto il passaggio della tangenziale direttamente sotto le arterie via Cà di Cozzi e viale Caduti del Lavoro, adottando una soluzione con caratteristiche progettuali molto complesse come la realizzazione di rampe di accesso alla tangenziale su diversi livelli, come descritto prima che, sicuramente, avranno un forte impatto sull'ambiente circostante.

Dagli studi trasportistici svolti dalle due società per valutare il traffico sull'intera tangenziale, si rilevano ulteriori parametri differenti; la soluzione T considera grafo e matrice forniti dal Comune di Verona. Il grafo della rete viabilistica considerata è composto di 500 nodi e 1750 archi circa, modellizzando così circa 900 km di rete e sono state individuate due matrici, una rappresentativa degli spostamenti su autovettura e una di veicoli commerciali nella fascia oraria di punta del mattino 8.00-9.00 riferite a tre scenari temporali 2010, 2020 e 2030.

La società G invece si avvale di un livello di scala provinciale comprendente tutti i comuni della provincia e schematizzando in modo opportuno le aree esterne; i nodi totali sono 18.800 con 37.250 archi quindi l'area analizzata è certamente maggiore rispetto a quella svolta dalla società T. Inoltre gli orizzonti temporali considerati sono 2016, 2031 e 2041.

È stato quindi necessario assumere dati di traffico comuni ai due progetti per poterne eseguire un corretto confronto e si è scelto di utilizzare grafo e matrici forniti dal Comune di Verona.

Per quanto riguarda la società G, che non comprende il passaggio dei veicoli pesanti, si è deciso di trasformare i veicoli pesanti e medi in veicoli equivalenti modificandoli con gli opportuni coefficienti.

In questo modo si sono ricavati i sottografi relativi allo svincolo d'interesse e, nel dettaglio, alla rotatoria e le relative matrici per veicoli auto, medi e pesanti per la soluzione T e veicoli auto (veicoli equivalenti) per la soluzione G.

Gli orizzonti temporali considerati sono l'orizzonte attuale al 2010 e l'orizzonte futuro al 2020.

Si è svolta poi la micro simulazione dell'intersezione come descritto nel Capitolo 4 scegliendo di studiare approfonditamente la soluzione T perché più vicina alla realtà.

Capitolo 4

La microsimulazione

4.1 IL NODO OGGETTO DI STUDIO

Dalle analisi trasportistiche condotte è emerso che lo svincolo denominato Saval è quello che presenta maggiori criticità in quanto si collega direttamente alla viabilità esistente, andando ad intersecare un'arteria che conduce al centro storico di Verona e che già ora risulta fortemente trafficata.

Le due società hanno sviluppato progetti differenti, come esposto nei capitoli precedenti e, di conseguenza, anche questo svincolo assume caratteristiche progettuali eterogenee; infatti, la soluzione della società T prevede il collegamento della tangenziale con via Cà di Cozzi che diventa, procedendo verso Ovest, via Preare, attraverso due rotonde distanziate fra loro di pochi chilometri e con caratteristiche geometriche diverse come riportato in Figura 4.1

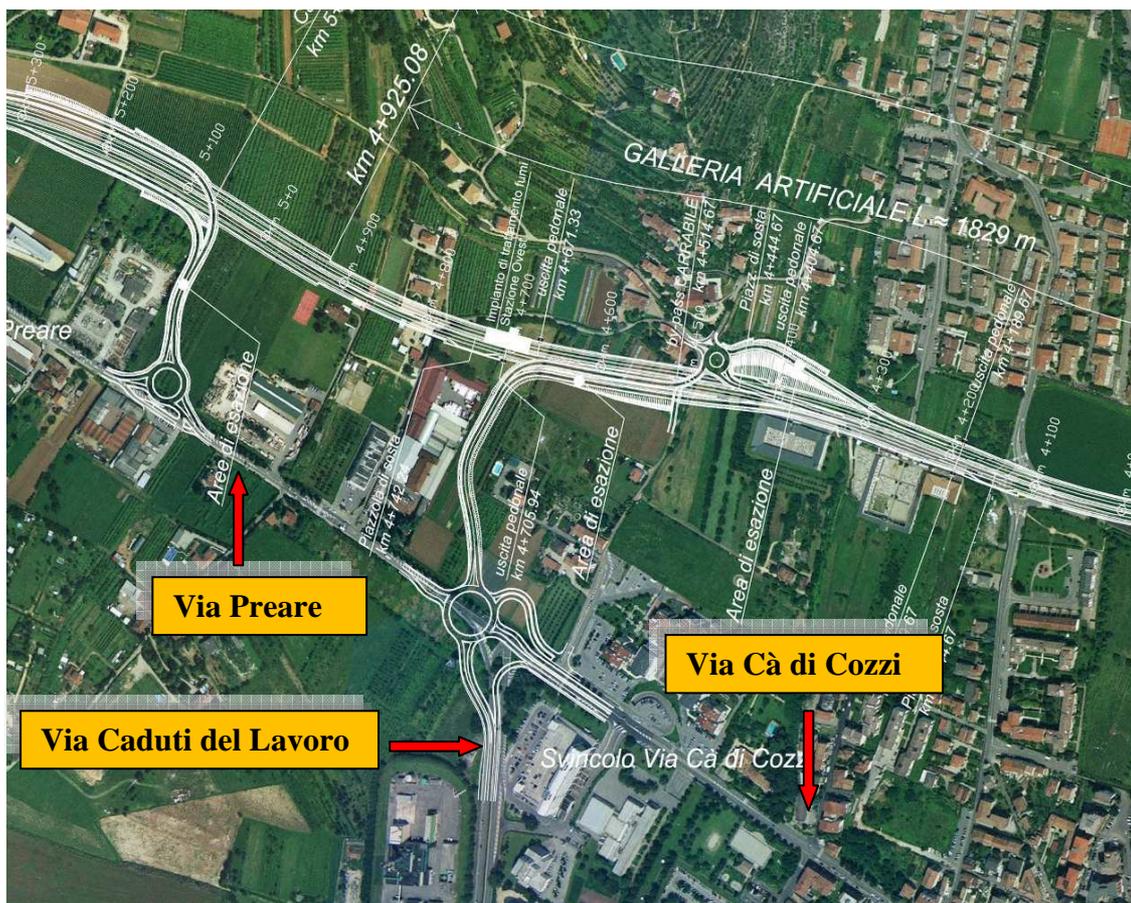


Figura 4. 1 Soluzione progettuale Società T

La soluzione adottata dalla società G prevede invece la realizzazione dello svincolo direttamente nell'arteria denominata Cà di Cozzi - Preare, perché il progetto della tangenziale risulta spostato di circa 2 km rispetto a quello T.

Si ricorda inoltre che il progetto considera un'unica galleria a livelli sfalsati per le due direzioni di marcia, e le rampe di accesso e uscita dalla galleria sono anch'esse a diversi livelli andando a formare uno svincolo a forma di otto con l'utilizzo di due rotonde di cui un'utile solo per il cambio di direzione.

Di seguito si riporta il particolare del progetto (Figura 4.2).

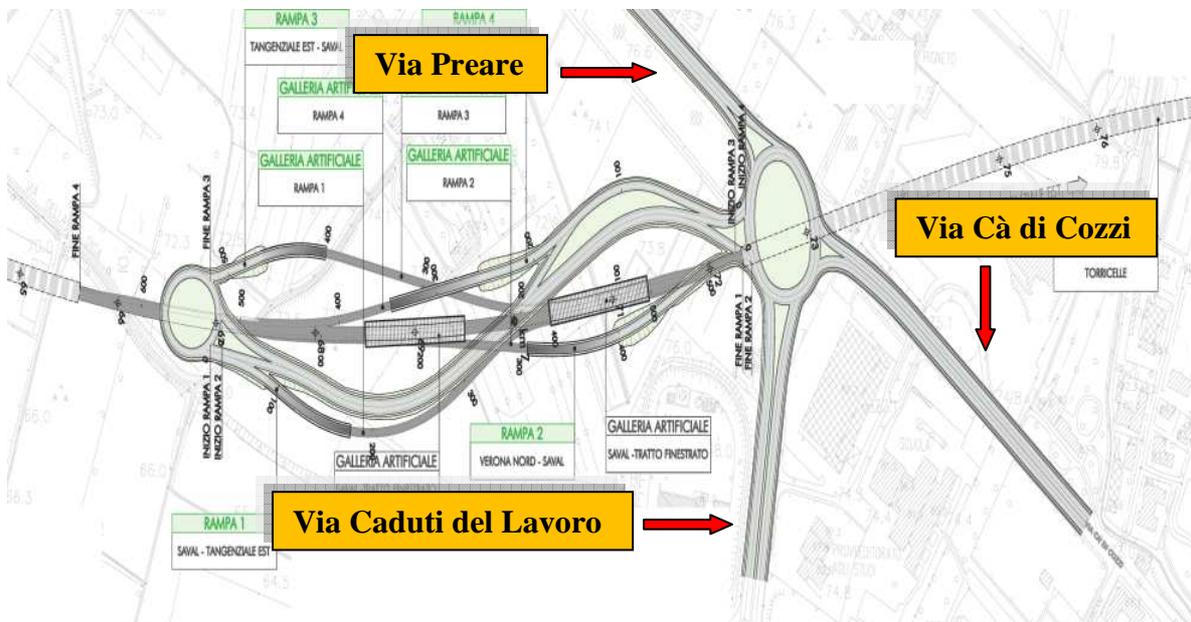


Figura 4. 2 Soluzione progettuale Società G

4.2 I DATI: GRAFI E MATRICI

I dati a disposizione sono quelli concernenti i flussi di veicoli che percorrono l'arteria in un giorno feriale medio nell'ora di punta della mattina 8.00 – 9.00.

Sono stati estrapolati i dati dal grafo originario comprensivo di tutta la rete del comune di Verona, realizzando un sottografo per la soluzione T e uno per la soluzione G, e ottenendo anche le sottomatrici stimate per l'anno 2010 e per la situazione futura al 2020 per i due diversi progetti.

La realizzazione dei sottografi è stata svolta utilizzando il software *Cube5* che permette di creare nodi e traiettorie assegnando a queste le caratteristiche geometriche della rete reale, svolgendo un'analisi macroscopica degli svincoli senza entrare nel dettaglio della geometria delle intersezioni e delle manovre di svolta.

Per ogni traiettoria è possibile indicare:

- la classe della strada
- la larghezza della corsia che indica la larghezza in metri destinata al traffico per tutte le strade tranne la tangenziale
- la velocità a vuoto
- la velocità di carico, che non deve essere inferiore al 10% della velocità a vuoto
- il tempo di carico, che per le strade urbane è definito con le curve BPR (Bureau of Public Roads), mentre per quanto riguarda la tangenziale, in base alla velocità di progetto definita in 70 km/h e la presenza di due corsie si calcola utilizzando la seguente formula:

$$T_{carico} = T_{vuoto} \left[1 + \alpha \left(\frac{V}{I} \right)^\beta \right]$$

Dove $\alpha = 2$

$\beta = 4$

A questo punto sono stati ottenuti i due sottografi in formato *.net* che vengono visualizzati con il software *Cube5*, cliccando su un arco è possibile visualizzare il valore dei flussi di veicoli auto, medi e pesanti che circolano nella sottorete, questo solo per quanto riguarda la soluzione T perché, nella soluzione G, si hanno solo i flussi dei

veicoli auto perché non è previsto il passaggio di veicoli medi e pesanti che sono considerati come veicoli equivalenti.

Si riportano i due sottografi:

Sottografo T (Figura 4.3):

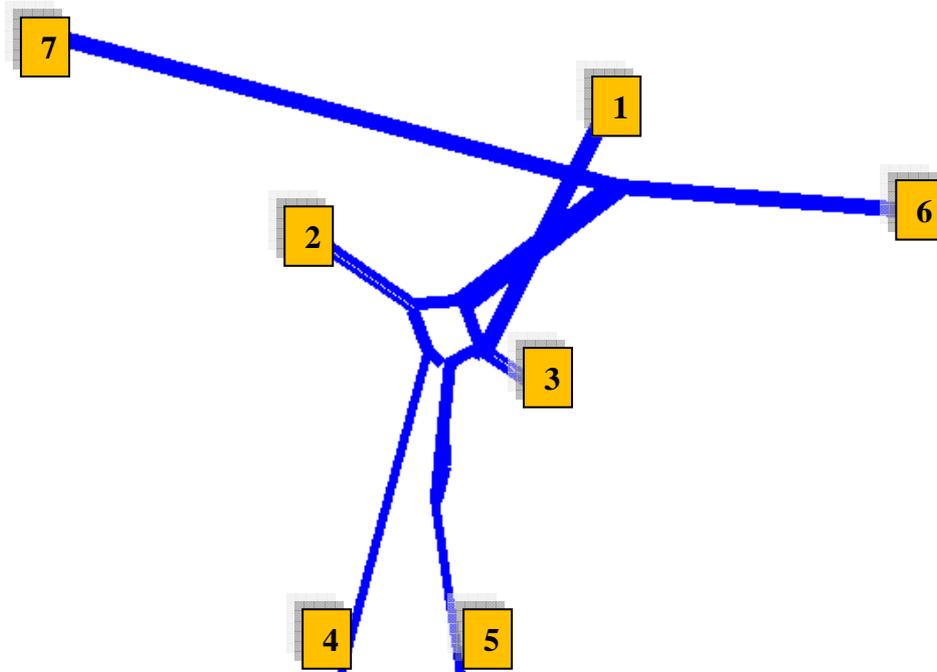


Figura 4. 3 Sottografo soluzione T

Sottografo G (Figura 4.4):

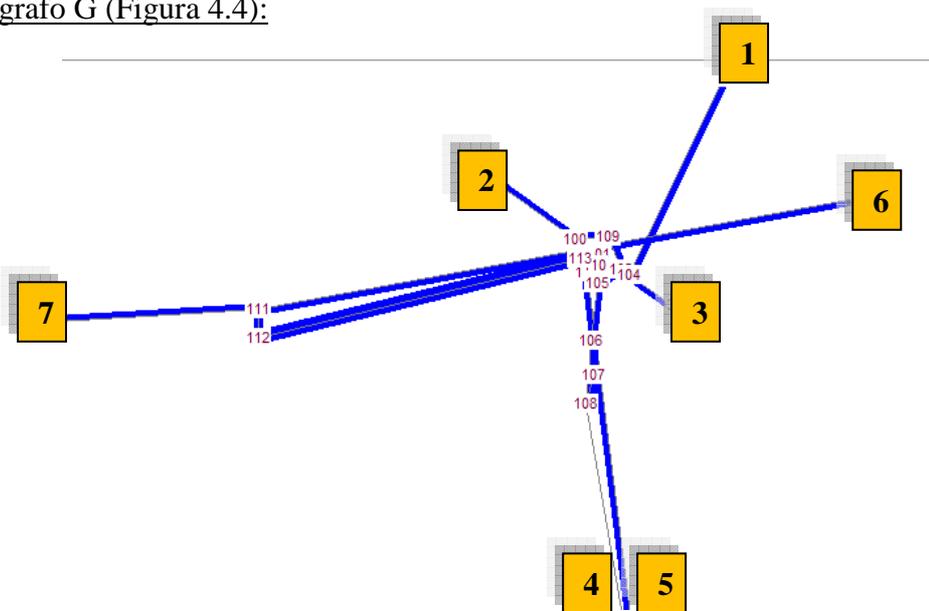


Figura 4. 4 Sottografo soluzione G

Una volta costruiti i sottografi, le sottomatrici si ottengono riducendo la matrice originale comprensiva di tutti i nodi origine destinazione del comune di Verona, fino a ottenere delle sottomatrici cinque per cinque pari al numero di origini e destinazioni utili per la simulazione.

Si hanno tre matrici per la soluzione attuale T, tre matrici per la soluzione futura T comprendenti flussi di veicoli auto, medi e pesanti e due matrici per il progetto G una per la soluzione attuale di veicoli auto e una per la soluzione futura.

I veicoli medi e pesanti, per la soluzione G, sono stati convertiti in veicoli equivalenti, dividendoli per i relativi coefficienti di equivalenza pari a 1,5 per veicoli medi e 2,5 per veicoli pesanti.

Si rileva la scelta di raggruppare parte della viabilità superficiale pertinente al nodo 1 nel grafo, proveniente da nord e ridistribuirli sui vari archi della rete, perché risultava ininfluenza ai fini della trattazione e nella soluzione T non si avevano a disposizione tutti i flussi che si riferiscono alla piccola rotatoria posta a nord.(Figura 4.5)

Inoltre i flussi relativi ai nodi 4 e 5 sono stati uniti perché si riferiscono alla stessa traiettoria, in modo da avere un'unica origine e una sola destinazione.

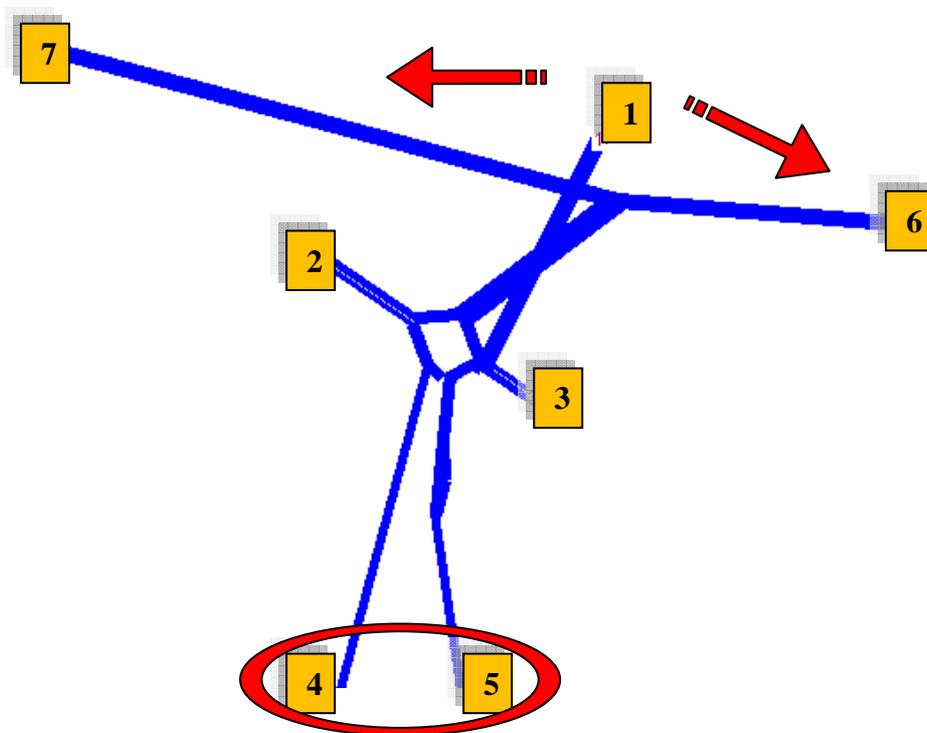


Figura 4. 5 Raggruppamento flussi nodi 4 e 5 e ridistribuzione flussi nodo 1

Per comodità di rappresentazione le matrici sono riportate nelle tabelle che seguono (Tabella 4.1.a,b,c situazione attuale, Tabella 4.2,a,b,c situazione futura per la “soluzione T”, Tabella 4.3,a,b “soluzione G”):

“SOLUZIONE T” ATTUALE 2010 - AUTO

SubAreaVol1	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	31	419	393	141
Via Cà di Cozzi	56	0	186	275	147
Via Caduti del Lavoro	363	95	0	857	21
Tang. Est	211	215	205	0	1289
Tang.Ovest	54	66	8	619	0

“SOLUZIONE T” ATTUALE 2010 - MEDI

SubAreaVol2	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	0	27	65	1
Via Cà di Cozzi	0	0	1	7	0
Via Caduti del Lavoro	16	14	0	13	1
Tang. Est	33	13	18	0	50
Tang.Ovest	2	0	0	8	0

“SOLUZIONE T” ATTUALE 2010 - PESANTI

SubAreaVol3	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	0	26	72	0
Via Cà di Cozzi	1	0	6	4	0
Via Caduti del Lavoro	8	0	0	11	0
Tang. Est	31	10	11	0	74
Tang.Ovest	0	0	0	12	0

Tabella 4. 1,a,b,c “Soluzione T” Attuale 2010 per veicoli auto, medi e pesanti

“SOLUZIONE T” FUTURO 2020 - AUTO

SubAreaVol1	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	25	463	360	328
Via Cà di Cozzi	50	0	110	266	211
Via Caduti del Lavoro	333	108	0	821	56
Tang. Est	208	234	265	0	2027
Tang.Ovest	48	76	10	919	0

“SOLUZIONE T” FUTURO 2020 - MEDI

SubAreaVol2	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	0	26	59	3
Via Cà di Cozzi	0	0	0	7	0
Via Caduti del Lavoro	18	21	4	9	2
Tang. Est	32	15	10	0	68
Tang.Ovest	2	0	0	20	0

“SOLUZIONE T” FUTURO 2020 - PESANTI

SubAreaVol3	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	0	29	71	0
Via Cà di Cozzi	1	0	4	4	0
Via Caduti del Lavoro	7	0	0	19	0
Tang. Est	22	10	11	0	70
Tang.Ovest	0	0	0	16	0

Tabella 4. 2 a,b,c “Soluzione T” Futuro 2020 per veicoli auto, medi e pesanti

“SOLUZIONE G” ATTUALE 2010 - AUTO

SubAreaVol1	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	37	425	547	159
Via Cà di Cozzi	42	0	105	263	268
Via Caduti del Lavoro	380	146	0	838	32
Tang. Est	359	276	384	0	1831
Tang.Ovest	145	66	12	927	0

“SOLUZIONE G” FUTURO 2020 - AUTO

SubAreaVol2	Via Preare	Via Cà di Cozzi	Via Caduti del Lavoro	Tang.Est	Tang.Ovest
Via Preare	0	29	502	458	263
Via Cà di Cozzi	38	0	260	351	411
Via Caduti del Lavoro	313	209	0	806	191
Tang. Est	271	238	563	0	2506
Tang.Ovest	128	45	11	1215	0

Tabella 4. 3,a,b “Soluzione G” Attuale e Futuro veicoli auto

4.3 LA MICROSIMULAZIONE CON IL SOFTWARE CUBE DYNASIM

Cube5 è uno strumento che permette di compiere delle macrosimulazioni cioè un'analisi sui valori medi facenti riferimento ad una corrente veicolare e non a singoli veicoli. Si considerano condizioni stazionarie, ciò vuol dire che per intervalli di tempo successivi il manifestarsi delle variabili è indipendente dai periodi precedenti. Non consente quindi di entrare nel dettaglio delle intersezione definendo le manovre di svolta; i veicoli sono considerati globalmente e si esegue uno studio delle grandezze fondamentali, quale flusso, velocità e densità.

Si è reso quindi necessario l'utilizzo di un altro software *Cube Dynasim*: questo permette di realizzare modelli di simulazione microscopici nei quali i veicoli sono considerati singolarmente ed è possibile eseguire uno studio del comportamento e delle interazioni fra i singoli veicoli. Le variabili si riferiscono ai singoli veicoli e non più alla corrente veicolare.[12]

Inoltre, il modello è di tipo dinamico, cioè rappresenta esplicitamente le dinamiche interne al periodo di simulazione (dinamica intra – periodale).

Attraverso l'utilizzo del software *Cube Dynasim* è stato possibile creare le micro simulazione dei due progetti relativi alle rotatorie di servizio allo svincolo Saval e alle arterie di collegamento.

È stata scelta una corografia o un file .dwg rappresentativa dell'intersezione, leggibile sulla quale è stata tracciata la rete geometrica che sarà utile anche in seguito come sfondo per l'animazione.

Implementando un modello con *Cube Dynasim* occorre definire uno scenario di rete composto di una serie di Layer cioè di livelli ai quali vengono associati diversi elementi quali le traiettorie, le rotatorie, etc. l'unione di questi elementi deve portare alla costruzione di una rete e di un modello coerente.

Allo scenario di rete si associa anche la mappa di sfondo.

I Layer che si è scelto di creare sono (Figura 4.6):

CTRL : layer associato alle traiettorie

Sfondo: layer associato alla mappa

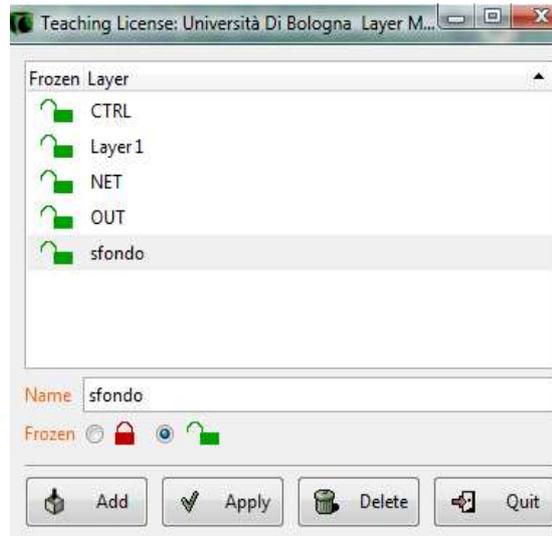


Figura 4. 6 Elenco dei Layer

Occorre definire lo scenario di rete (Figura 4.7), associando un nome che individua il progetto, selezionando i layers utilizzati ed evidenziando la mappa, in precedenza caricata, se si vuole che questa sia visualizzata.

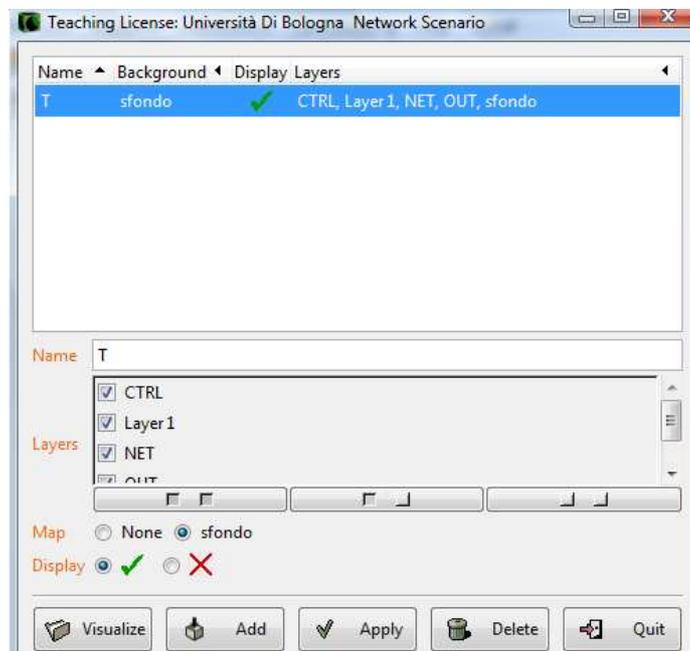


Figura 4. 7 Definizione scenario di rete

Si passa poi alla costruzione della rete geometrica osservando che la rete stradale è costituita da una serie di traiettorie disponibili per il transito dei veicoli, quindi per definire geometricamente una rete stradale si devono creare le traiettorie che identificano le corsie, associando i relativi parametri che descrivono, ad esempio, il comportamento dei guidatori durante il cambio di corsia, la velocità, le precedenza, la geometria, etc.

Per costruire la rete geometrica si utilizzano due strumenti denominati *Support* (supporto) e *Trajectory* (traiettoria); inserendo una sequenza di supporti il software crea automaticamente le traiettorie, impostando i parametri su valori predefiniti che sono stati modificati in base alle reali caratteristiche.

Quando s'inserisce un supporto, si apre la finestra Entry (Figura 4.8) nella quale si specificano i diversi valori caratteristici dello stesso supporto ma anche della traiettoria che da esso partirà, infatti specificando il parametro Simulated Width, si stabilisce che la corsia che avrà origine da quel determinato supporto, avrà una larghezza pari al valore inserito, nel caso riportato in figura, avrà larghezza pari a 3.50 m.

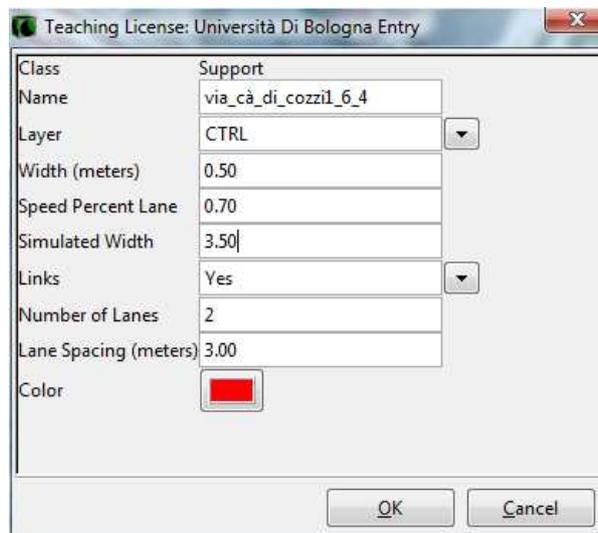


Figura 4. 8 Caratteristiche dei supporti

Nell'esempio si riportano le specifiche di ogni parametro.

Layer : livello associato alla traiettoria

Width (Larghezza): larghezza espressa in metri della linea che rappresenta la traiettoria nell'area del disegno.

Speed Percent Lane : percentuale della velocità di libero deflusso.

Simulated Width: larghezza di una corsia della traiettoria.

Lane Spacing: distanza fra i punti di attacco del supporto.

Per quanto riguarda le traiettorie si riporta l'esempio di una traiettoria a due corsie (Figura 4.9).

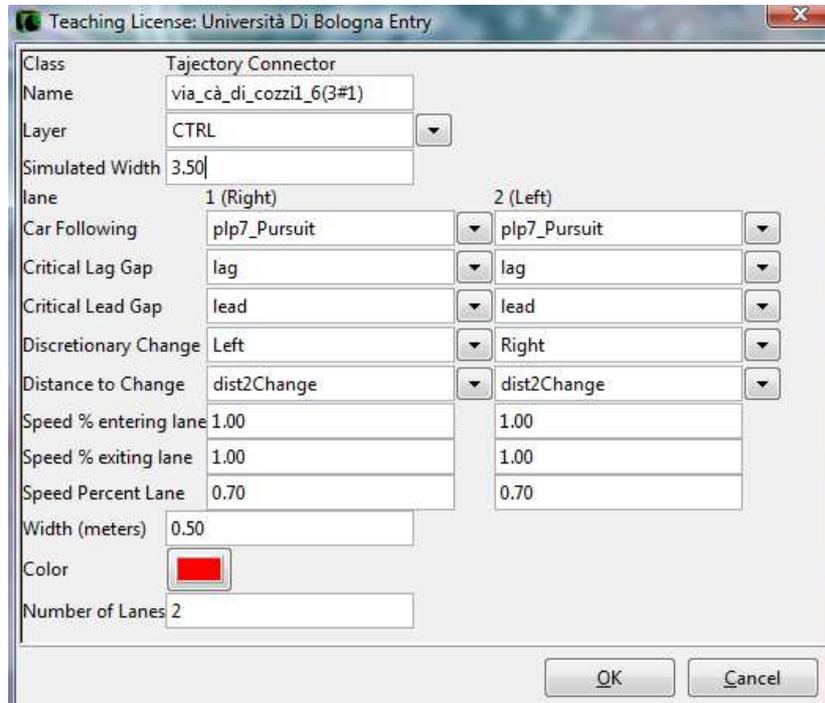


Figura 4. 9 Caratteristiche traiettoria a due corsie

I parametri da definire sono molti di più e riguardano:

Critical Lag Gap e *Critical Lead Gap* si riferiscono al gap critico posteriore e anteriore definiti di default dal programma.

Discretionary Change definisce un set di parametri riferiti al comportamento dei veicoli riguardante il cambio corsia discrezionale.

Distance to Change parametri utili per calcolare il tempo impiegato e la distanza percorsa durante un cambio corsia.

Speed percentual entering lane: percentuale della velocità massima o di libero deflusso dei veicoli all'ingresso della traiettoria.

Speed percentual exiting lane: percentuale della velocità massima o di libero deflusso all'uscita della traiettoria.

Nella soluzione T sono stati utilizzati, per le diverse traiettorie della rete geometrica, i valori riportati in Tabella 4.4 :

CARATTERISTICHE TRAIETTORIE E SUPPORTI SOLUZIONE T	
<i>VIA CADUTI DEL LAVORO</i>	Supporto: 3 Larghezza corsia (Simulated Widht) : 3 m Speed % Lane: 0.70
<i>VIA PREARE</i>	Supporto: 3 Larghezza corsia(Simulated Widht) : 3 m Speed % Lane: 0.60
<i>VIA CÀ DI COZZI</i>	Supporto: 3 Larghezza corsia (Simulated Widht): 3 m Speed % Lane: 0.70
<i>TANGENZIALE</i>	Supporto: 3.75 Larghezza corsia (Simulated Widht) : 3.75 m Speed % Lane : 0.70
<i>ROTATORIA (anello interno)</i>	Supporto: 4 Larghezza corsia (Simulated Widht): 3m Speed % Lane : 0.30

Tabella 4. 4 Caratteristiche delle traiettorie soluzione T

Nei rami di accesso alla rotatoria è necessario modificare la velocità andando ad agire sul parametro Speed Exiting Lane impostando questo valore su 0.30 in modo che i veicoli che percorrono il ramo di accesso alla rotatoria adeguino la loro velocità e in uscita dalla traiettoria abbiamo una velocità compatibile con quella tenuta nell'anello interno.

Invece per i rami di uscita dalla rotatoria il valore deve essere impostato in funzione della velocità che si ha sulla traiettoria che il veicolo andrà a percorrere.

Gli stessi parametri sono stati utilizzati per creare la rete geometrica della soluzione G.

Una volta definite le traiettorie, si passa alla costruzione delle intersezioni, in questo caso delle due rotatorie, creando sempre con i comandi Support e Trajectory l'anello interno e collegandolo in seguito con la rete geometrica esterna.

Dopo aver realizzato la rete geometrica, è necessario costruire anche la rete logica che descrive le origini, le destinazioni dei veicoli e le aree di attesa chiamate *Stage* nelle quali i veicoli aspettano di essere introdotti nella rete e i collegamenti logici tra i diversi elementi della rete.

Questo procedimento è il medesimo per i due progetti perché presentano cinque origini e cinque destinazioni, nello specifico:

- Origine/Destinazione Preare
- Origine/Destinazione Caduti del Lavoro
- Origine/Destinazione Cà di Cozzi
- Origine/Destinazione Tangenziale Est
- Origine/Destinazione Tangenziale Ovest

Per passare in modalità logica si preme il pulsante LG e sulla barra degli strumenti appaiono i pulsanti *Destination* (destinazione), *Stage* (area di attesa), *Origin* (origine), *Speed Link* (collegamento velocità) e *Split Link* (collegamento Separazione), (Figura 4.10).

Inserendo l'origine occorre definirne il nome, la velocità percentuale dei veicoli pari a 1 e il tipo di strada.

Successivamente si definiscono gli *Stage* (collocati fra l'origine e la traiettoria iniziale), uno per ogni corsia, che non sono altro che luoghi di stoccaggio in cui i veicoli attendono di poter entrare nella rete.

Cube Dynasim accoda i veicoli in queste aree nel caso in cui la capacità della rete non sia sufficiente cioè qualora si formassero code che impediscono l'ingresso dei veicoli nella rete, facendoli entrare solo quando le condizioni del traffico lo permettono. Si deve solo definire la superficie di stoccaggio che di default è impostata su 1000.00 m².

I veicoli entrati nella rete si dirigono verso le rispettive destinazioni, che vengono create laddove i veicoli escono dalla rete.

È possibile creare un'unica destinazione anche per più corsie.

Si creano poi i collegamenti che definiscono una relazione logica fra gli oggetti della rete, generando connessione fra origine – area di attesa – traiettoria e fra traiettorie – destinazione, utilizzando il comando *Speed Link*.

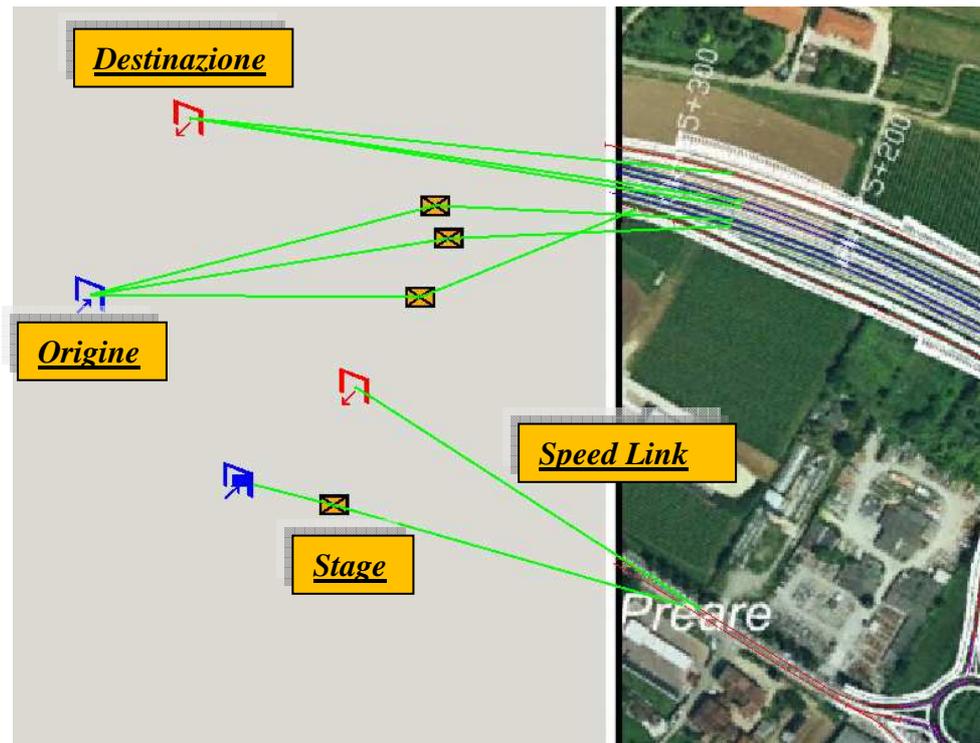


Figura 4. 10 Definizione Origine, Destinazione e Speed Link

Altro parametro importante da definire è il *Cambio – Corsia*.

Sulle traiettorie a più corsie i veicoli possono decidere di cambiare corsia, e possono trovarsi in una delle seguenti condizioni:

- **Discretionary Lane Changing (Cambio di corsia a discrezione) :**
i veicoli eseguono “cambi corsia” per viaggiare su quella che ritengono migliore, valutano continuamente la propria condizione per determinare il livello di servizio della corsia su cui si trovano. Qualora non fossero soddisfatti, possono valutare l'ipotesi di spostarsi su una delle corsie adiacenti.
- **Mandatory Lane Changing (Cambio di corsia obbligatorio) :**
i veicoli sono costretti a cambiare corsia in funzione del percorso che devono seguire per dirigersi verso le proprie destinazioni. Questi cambi di corsia

dipendono dai “punti di rottura” che non è altro che un punto di diversione, risultato di restrizioni geometriche o logiche in funzione delle caratteristiche della rete e dei percorsi.

Nella progettazione T sono stati inseriti 3 cambi di corsia obbligatori, uno in corrispondenza di via Caduti del Lavoro, uno nei pressi dello svincolo sulla tangenziale in direzione Ovest per i veicoli in uscita e l'ultimo sempre sulla tangenziale ma per i veicoli che procedono in direzione Est per i veicoli in entrata.

Per inserire un cambio corsia si devono stabilire le distribuzioni di cambio corsia che forniscono una serie di profili di comportamento del veicolo, che indicano come un guidatore si comporta quando si avvicina a un punto di rottura.

Si definisce un profilo per ogni cambio di corsia possibile sapendo che il numero di cambi di corsie possibili è pari al numero di corsie meno uno.

I profili di cambio corsia è definito da tre valori (Figura 4.11):

- **Restricted – Change Distance (RC distanza di cambio limitato):**
indica lo spazio nel quale il guidatore sa di dover eseguire un cambio corsia obbligatorio e non esegue cambi di corsia a discrezione che potrebbero allontanarlo dalla corsia di destinazione.
- **Mandatory Lane – Change Distance (MLC distanza di cambio corsia obbligatorio):**
spazio in cui i veicoli sono obbligati ad effettuare il cambio corsia
- **Extreme – Change Distance (EC distanza di cambio estremo) :**
rappresenta la distanza minima dal punto di rottura entro cui i veicoli devono eseguire il cambio corsia. A questa distanza se i veicoli non erano stati in grado di eseguire la manovra in precedenza, si fermano aspettando il gap necessario per effettuare la manovra.

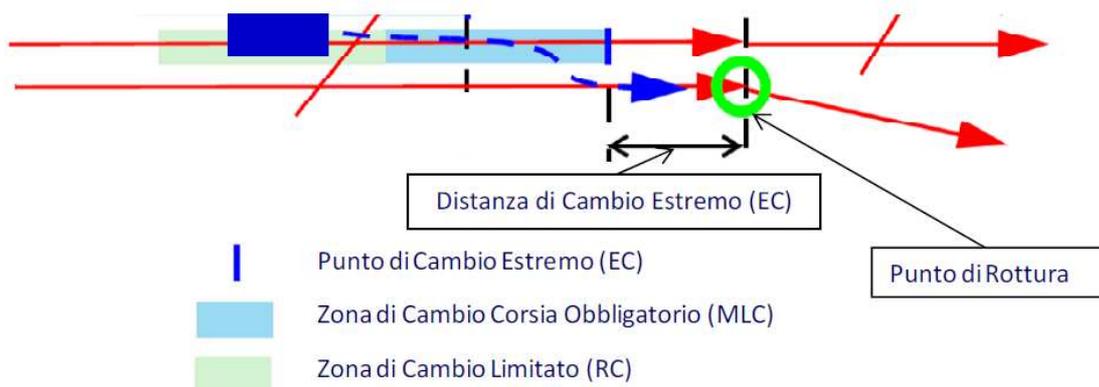


Figura 4. 11 Distanze per il cambio corsia

Per la soluzione B sono stati adottati i seguenti parametri che definiscono le distribuzioni di cambio corsia (Tabella 4.5):

	<i>RC</i>	<i>MLC</i>	<i>EC</i>
<i>Distribuzione 1</i>	50	80	70
<i>Distribuzione 2</i>	70	50	50
<i>Distribuzione 3</i>	200	1000	200

Tabella 4. 5 Parametri distribuzioni di cambio corsia

La distribuzione 1 è relativa al Lane Change Marker posto sulla tangenziale in direzione Est, la distribuzione 2 è relativa sempre alla tangenziale ma nel tratto in direzione Ovest e la distribuzione 3 è posta su via Caduti del Lavoro.

Adesso è possibile postare sulla mappa il *Lane Change Marker* (Figura 4.12) cioè l'indicatore di cambio corsia, associando la relativa distribuzione di cambio corsia.

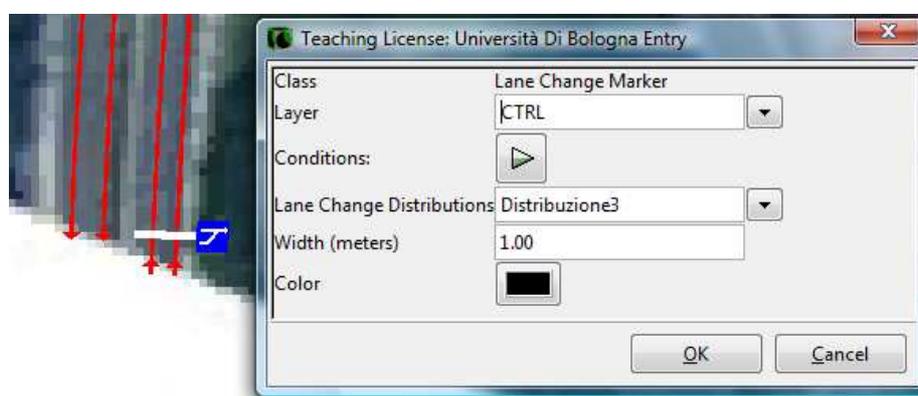


Figura 4. 12 lane Change Marker

Altra valutazione da compiere riguarda il Percorso dei Veicoli in quanto *Cube Dynasim* permette ad ogni veicolo di avere un solo percorso che collega la sua origine con la propria destinazione, se sono presenti più percorsi possibili durante il percorso si rende necessario stabilire quale sia quello giusto.

Questa funzione del programma è stata utilizzata per le rotatorie perché ogni veicolo all'interno di una rotatoria dispone di due possibili percorsi, il primo che permette al veicolo di entrare, percorrere parte della rotatoria ed uscire, il secondo consente al veicolo di effettuare un giro completo della rotatoria e poi uscire.

Utilizzando il comando *Invalid Path* sono stati inseriti i percorsi non validi specificando la destinazione verso la quale i veicoli non possono procedere.

Un parametro di fondamentale importanza per la modellazione del traffico è il “*Dare la Precedenza*” inserito nei rami di approccio alle rotatorie per evitare i conflitti fra i veicoli.

Sono stati utilizzati i parametri sotto riportati per tutti i casi di precedenza inseriti nel modello perché afferenti a rotatorie.

Cliccando sul tasto *Yield* si apre la seguente finestra (Figura 4.13):

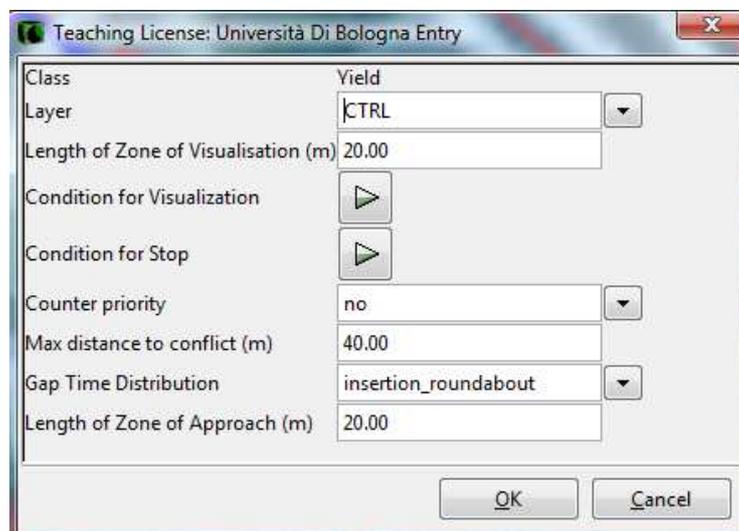


Figura 4. 13 Segnale “Dare la precedenza”

Il significato dei parametri richiesti è il seguente:

Length of Zone visualisation : lunghezza della zona di visualizzazione. 20 m

Counter priority : contro precedenza. NO (i veicoli che percorrono l’anello non devono dare la precedenza ai veicoli che si immettono)

Max distance to conflict : massima distanza dal conflitto. 40 m

Gap Time Distribution : Distribuzione dei tempi di gap.

Lenght of Zone Approach : lunghezza della zona di approccio. 20 m

A questo punto sono stati definiti tutti i parametri necessari per modellizzare la rete, l'ultimo passo riguarda l'analisi degli scenari dei flussi quindi l'inserimento delle matrici O/D per ciascuna categoria veicolare specificando il periodo di simulazione e definendo la fascia oraria.

Per quanto riguarda la soluzione T sono stati inseriti 2 scenari dei flussi, uno attuale (2010) e uno futuro (2020) relativamente alle 3 categorie veicolari, impostando la simulazione per l'ora di punta del mattino 8.00 – 9.00 di un giorno feriale medio.

Inserendo come parametri:

Simulation Start Time : 07:45:00

Simulation End Time : 09:00:00

Measurement Start Time : 08:00:00

Time Sample (min) : 60

La simulazione ha inizio alle 08:00 e termina alle 09:00, è necessario però caricare la rete, e questo avviene nel quarto d'ora che va dalle 07:45 alle 08:00; i veicoli vengono immessi nella rete fino a raggiungere la condizione di equilibrio alle 08:00, in corrispondenza della quale tutti i veicoli sono inseriti.

Per la soluzione G si è scelta la stessa modalità, inserendo però un'unica matrice relativa alle auto considerando medi e pesanti come veicoli equivalenti, sempre impostando la simulazione nell'ora di punta del mattino 8.00 – 9.00 di un giorno feriale medio, quindi i parametri inseriti sono gli stessi sopra riportati.

In questo modo le diverse matrici vengono assegnate alla rete all'interno dell'ora di punta e graficamente è possibile visualizzare la simulazione per i diversi scenari.

Cliccando Simulations (simulazioni), selezionando ad esempio la configurazione attuale e premendo il tasto Multi-Run (simulazioni multiple) si apre la finestra per l'esecuzione della simulazione, dove Number (numero) indica il numero di simulazioni multiple da eseguire. Impostando il parametro sul valore 3, Cube Dynasim esegue la simulazione dello stesso scenario tre volte, utilizzando in ciascuna simulazione valori differenti dei

parametri stocastici e in questo modo si ottengono risultati diversi a ogni esecuzione, simulando le variazioni giornaliere delle reali configurazioni di traffico.

Si ottengono anche risultati numerici e grafici analizzati nel paragrafo seguente.

D'ora in poi verrà studiata solo la soluzione T in quanto si è riscontrato che la soluzione G non rispecchia quello che è l'andamento reale dei flussi di traffico che si avranno sulla nuova infrastruttura, il fatto poi di escludere dalla circolazione i veicoli pesanti e medi è una restrizione troppo forte. Si è preferito procedere analizzando la prima soluzione in quanto più vicino alla realtà e più rappresentativa di quello che avviene nell'intersezione perché considera la presenza dei veicoli pesanti e la soluzione adottata viene ad inserirsi in maniera più corretta nel contesto di riferimento.

4.4 ANALISI DEI RISULTATI

Per poter visualizzare i risultati è necessario creare i “*Raccoglitori di Dati*” nei quali immagazzinare i dati raccolti.

Si è scelto di studiare la rotatoria 1 Figura 4.14:

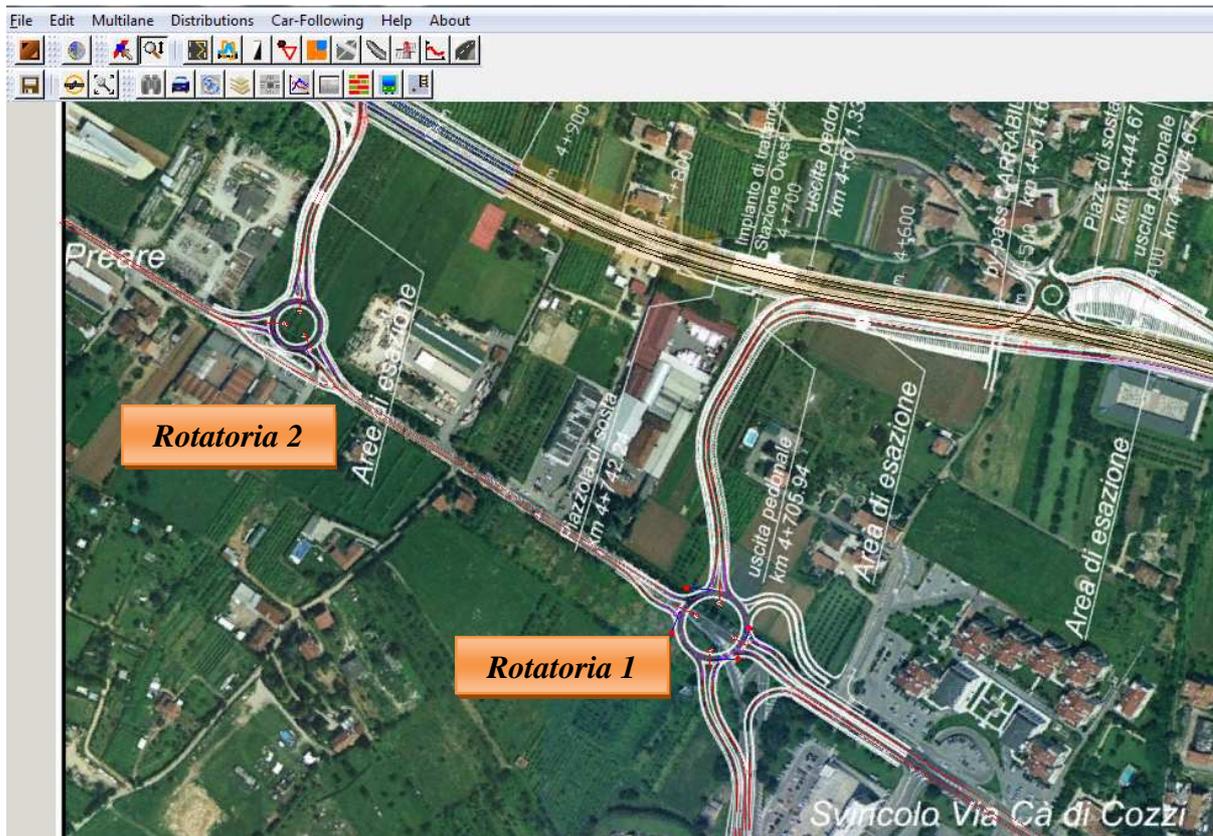


Figura 4. 14 Soluzione progettuale T

Cliccando sul tasto Output si apre la casella *Output Management* (Gestione dei risultati) dove si definisce il gruppo dei risultati contenente i raccoglitori di dati proprio dello scenario di rete attuale e futuro.(Figura 4.15)

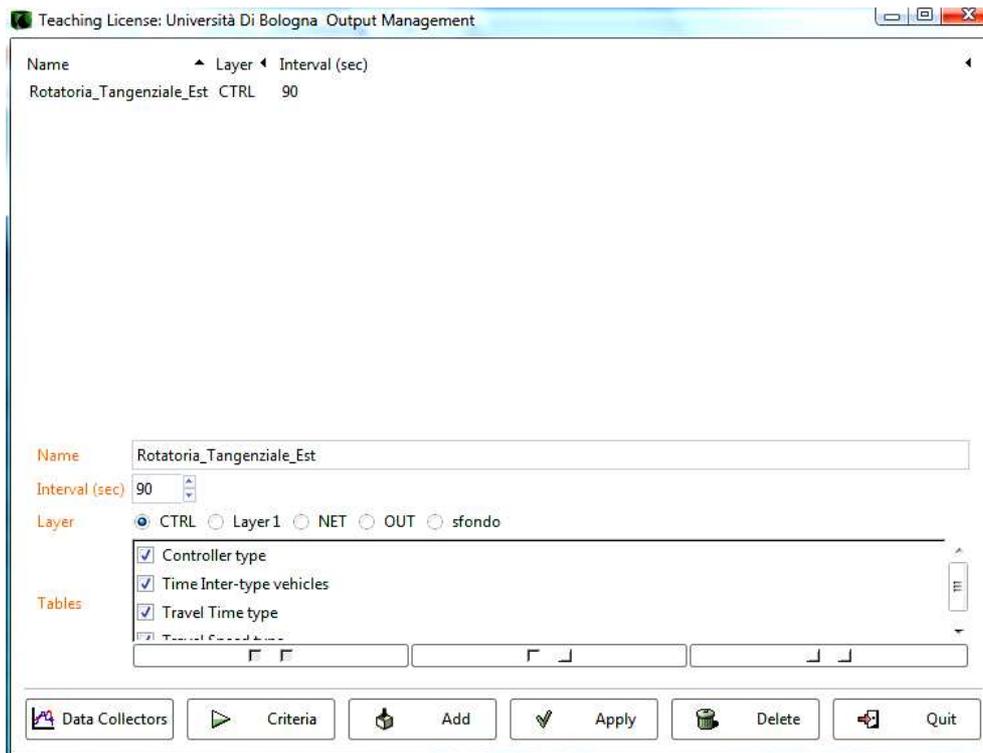


Figura 4. 15 Finestra di gestione dei risultati

Per specificare la tipologia di dati da raccogliere si clicca su *Criteria* e la finestra si aggiorna mostrando le tipologie di risultati disponibili e le relative analisi statistiche.

Dall'elenco che appare si selezionano:

- *Delay* (ritardo) attivando i campi All (tutti), Min (minimo), Max (massimo), Mean (medio)
- *Flow* (flusso) attivando i campi Actual (attuale), Cumulate (cumulato)
- *Travel Speed* (velocità di percorrenza) attivando i campi All, Min, Max, Mean
- *Travel Time* (tempo di percorrenza) attivando i campi All, Min, Max, Mean

La stessa cosa viene ripetuta per lo scenario dei flussi riferiti alla situazione futura.

Ora si devono riportare graficamente i Data Collectors (raccoltore di dati) inserendo la sezione d'ingresso e quella di uscita.(Figura 4.16)

Di solito la sezione di ingresso è posta sull'area di attesa, altrimenti viene posta direttamente sul ramo di interesse.

La sezione d'uscita invece deve intersecare le corsie d'interesse.

Cliccando nuovamente Data Collectors si aggiorna la finestra mostrando il raccogliatore di dati già definiti all'interno del gruppo selezionato.

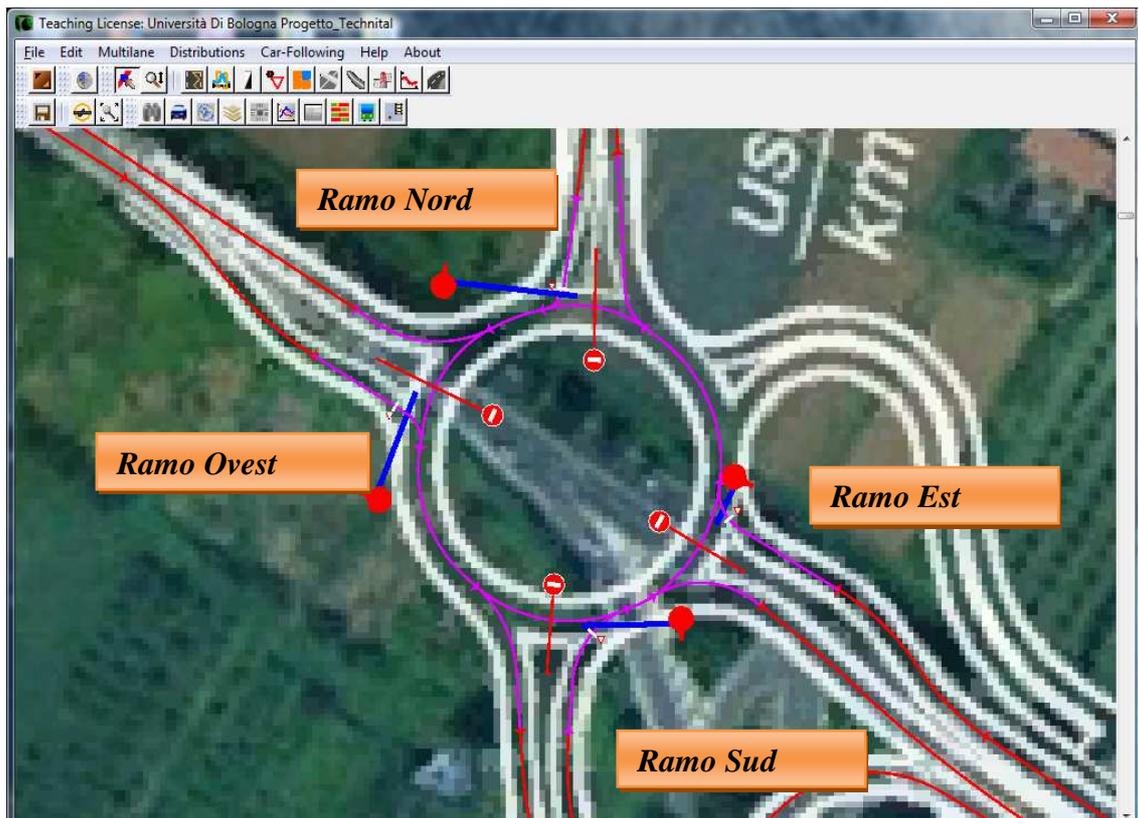


Figura 4. 16 Definizione dei rami e dei Data Collectors

Creando il collegamento fra il software e il programma Excel è possibile visualizzare i risultati in formato tabulare, risultati che si riferiscono ad ogni singolo veicolo che percorre la rete individuando il ritardo, la velocità, la coda, etc.

Il software permette anche, una volta realizzata la simulazione, di visualizzare i grafici relativi al ritardo, all'andamento dei flussi, alla velocità di percorrenza e al tempo di percorrenza nella situazione attuale e futura, definendo i valori massimi, minimi o medi.

Per comprendere meglio il problema si studiano i grafici relativi al ritardo inteso come il tempo speso in coda per immettersi in rotatoria, nelle condizioni medie e si vede come il grafico evidenzi una situazione critica in corrispondenza del ramo di accesso Est, problema che nasce dal passaggio da una carreggiata a due corsie ad una sola corsia in prossimità dell'innesto in rotatoria, generando un fenomeno ad imbuto che costringe i veicoli a fermarsi aumentando il ritardo.

Questo avviene sia nella situazione al 2010 sia, a maggior ragione, nella situazione futura al 2020 (Figura 4.17 e 4.18).

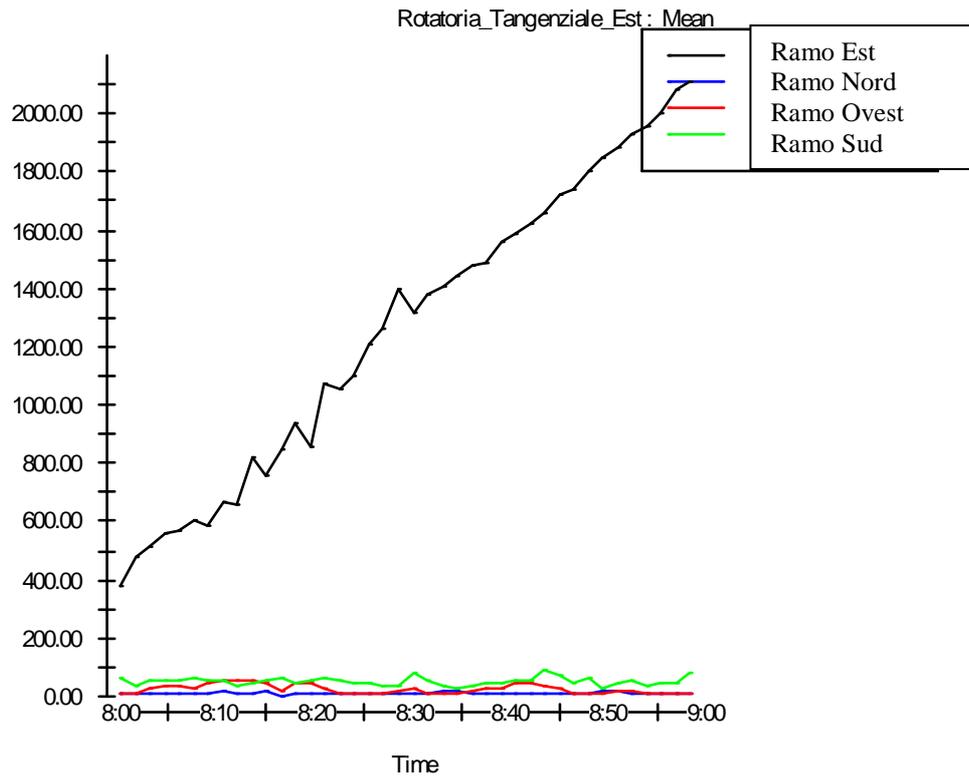


Figura 4. 17 Ritardo medio situazione attuale 2010

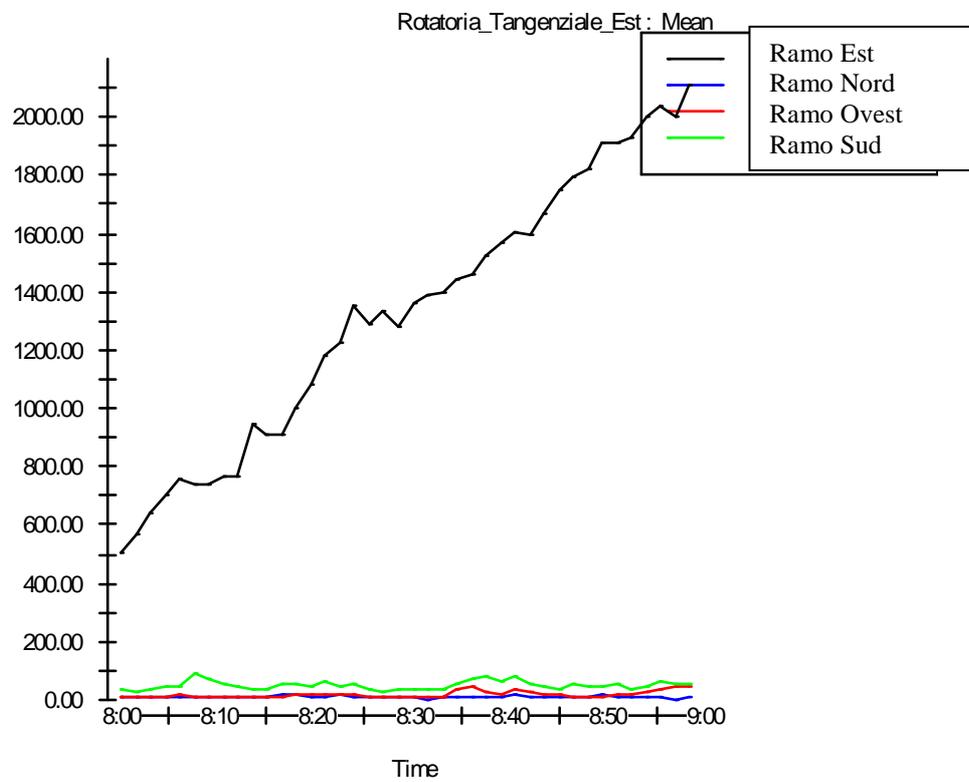


Figura 4. 18 Ritardo medio situazione futura 2020

Da questi risultati è possibile determinare il ritardo medio relativo ad ogni singolo approccio e il ritardo medio dell'intera rotatoria.

Facendo questi semplici calcoli si ottengono i seguenti valori espressi in secondi (Tabella 4.6):

	<i>RITARDO MEDIO SITUAZIONE 2010(sec)</i>	<i>RITARDO MEDIO SITUAZIONE 2020(sec)</i>
<i>RAMO OVEST</i>	23.68	17.99
<i>RAMO EST</i>	1259.61	1314.05
<i>RAMO NORD</i>	10.64	10.49
<i>RAMO SUD</i>	49.62	46.89
	<u>335.89</u>	<u>347.36</u>

Tabella 4. 6 Valori del ritardo medio situazione attuale 2010 e futura 2020

Conoscendo questi valori è possibile determinare il Livello di Servizio di ogni ramo della rotatoria, che non è altro che una misura della qualità della circolazione di una infrastruttura viaria.

Questa definizione è presente nell'Highway Capacity Manual (HCM) e la procedura descritta nel testo di riferimento per le analisi dei sistemi di trasporto stradale, si basa sull'individuazione di sei categorie di LOS ,da LOS A a LOS F.

LOS A è il livello migliore del servizio e identifica una situazione di non congestione.

Da LOS B a LOS E il livello di congestione aumenta senza però arrivare alla saturazione che si raggiunge nel LOS F che si ha quando il volume di traffico supera la capacità dell'infrastruttura, quindi è possibile affermare che la capacità di una infrastruttura o di una intersezione stradale rappresenta il limite tra LOS E e LOS F.

L'HCM (Tabella 4.7) fornisce un range di valori del ritardo medio espresso in secondi per stabilire il passaggio fra le diverse categorie di LOS, valori che vengono riportati nella seguente tabella:

L.d.S	Ritardo medio (secondi)
A	< 10
B	10 ÷ 15
C	15 ÷ 25
D	25 ÷ 35
E	35 ÷ 50
F	> 50

Tabella 4. 7 LOS in funzione del ritardo medio (HCM)

Quindi tornando ai risultati precedenti i vari rami hanno il seguente livello di servizio (Tabella 4.8) nei due fronti temporali:

	<i>L.d.S – ATTUALE 2010</i>	<i>L.d.S. – FUTURO 2020</i>
<i>RAMO OVEST</i>	C	C
<i>RAMO EST</i>	<u>F</u>	<u>F</u>
<i>RAMO NORD</i>	B	B
<i>RAMO SUD</i>	<u>E</u>	<u>E</u>

Tabella 4. 8 LOS situazione attuale 2010 e futura 2020

È possibile vedere anche che la situazione futura migliora in quanto il traffico tende a spostarsi sulla nuova arteria e quindi by passa la zona urbana utilizzando la nuova tangenziale.

I rami di approccio che presentano maggiori criticità sono quello Sud e quello Est.

Sempre per quanto riguarda il ritardo è stata condotta un'analisi anche all'interno dell'ora di punta nei quattro quarti d'ora che la compongono (Tabella 4.9.a, b):

RITARDO MEDIO SITUAZIONE ATTUALE ALL'INTERNO DELL'ORA DI PUNTA(sec)				
	08:00 - 08:15	08:15 - 08.30	08:30 -08:45	08:45 -09:00
RAMO NORD	10.55	9.98	11.34	10.65
RAMO EST	588.19	1021.64	1495.69	1898.15
RAMO SUD	49.64	48.5	49.32	51.01
RAMO OVEST	34.51	22.62	24.59	12.9

Tabella 4. 9.a Ritardo medio situazione attuale 2010 all'interno dell'ora di punta

RITARDO MEDIO SITUAZIONE FUTURA ALL'INTERNO DELL'ORA DI PUNTA(sec)				
	08:00 - 08:15	08:15 - 08.30	08:30 -08:45	08:45 -09:00
RAMO NORD	8.4	12.18	10.87	10.25
RAMO EST	721.15	1131.23	1500.13	1939.39
RAMO SUD	44.96	43.03	52.53	47.53
RAMO OVEST	9.46	13.56	24.37	23.99

Tabella 4. 9.b Ritardo medio situazione futura 2020 all'interno dell'ora di punta

È stato valutato, anche per i quarti d'ora, il relativo livello di servizio (Tabella 4.10.a e 4.10.b):

<i>L.d.S. SITUAZIONE ATTUALE ALL'INTERNO DELL'ORA DI PUNTA(sec)</i>				
	<i>08:00 - 08:15</i>	<i>08:15 - 08.30</i>	<i>08:30 -08:45</i>	<i>08:45 -09:00</i>
<i>RAMO NORD</i>	B	A	B	B
<i>RAMO EST</i>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>
<i>RAMO SUD</i>	E	E	E	<u>F</u>
<i>RAMO OVEST</i>	D	C	C	B

Tabella 4. 10.a LOS situazione attuale 2010 all'interno dell'ora di punta

<i>L.d.S SITUAZIONE FUTURA ALL'INTERNO DELL'ORA DI PUNTA(sec)</i>				
	<i>08:00 - 08:15</i>	<i>08:15 - 08.30</i>	<i>08:30 -08:45</i>	<i>08:45 -09:00</i>
<i>RAMO NORD</i>	A	B	B	B
<i>RAMO EST</i>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>
<i>RAMO SUD</i>	E	E	<u>F</u>	E
<i>RAMO OVEST</i>	A	B	C	C

Tabella 4. 10.b LOS situazione futura 2020 all'interno dell'ora di punta

È evidente come i rami Est e Sud presentano condizioni inaccettabili del livello di servizio, problematiche messe ancora più in evidenza con l'analisi del ritardo nei quarti d'ora.

Sono state condotte valutazioni che riguardano la coda con riferimento ai valori massimi, sempre per ogni approccio nelle due situazioni attuale (2010) e futura (2020).(Tabella 4.11)

	MEDIA DEI VALORI MASSIMI			
	<i>CODA SITUAZIONE ATTUALE (m)</i>	<i>CODA SITUAZIONE FUTURA (m)</i>	MAX ATTUALE (m)	MAX FUTURO (m)
<i>RAMO NORD</i>	35.23	13.2	86.99	45.26
<i>RAMO EST</i>	961.97	920.86	1449.5	1400.27
<i>RAMO SUD</i>	481.99	478.01	488.18	488.14
<i>RAMO OVEST</i>	141.07	48.7	322.34	346.13

Tabella 4. 11 Coda situazione attuale 2010 e futura 2020

Come era prevedibile, visti i risultati del ritardo medio, i rami che presentano maggiori criticità sono sempre il ramo Est e Sud e per entrare nel dettaglio si è condotta un'indagine all'interno dell'ora di punta (Tabella 4.12.a e 4.12.b) suddividendola nei quattro quarti d'ora che la compongono e ottenendo i seguenti risultati:

	<i>CODA MEDIA SITUAZIONE ATTUALE (2010) ALL'INTERNO DELL'ORA (m)</i>			
	<i>08:00 - 08:15</i>	<i>08:15 - 08:30</i>	<i>08:30 -08:45</i>	<i>08:45 -09:00</i>
<i>RAMO NORD</i>	32.15 (MAX = 52.12)	25.67 (MAX = 57.35)	45.96 (MAX = 85.25)	36.68 (MAX = 86.99)
<i>RAMO EST</i>	646.37 (MAX = 672.98)	788.4 (MAX = 913.13)	1042.45 (MAX = 1132.27)	1304.81 (MAX = 1449.5)
<i>RAMO SUD</i>	483.1 (MAX = 488.18)	480.18 (MAX = 486.08)	480.89 (MAX = 487.87)	483.71 (MAX = 487.14)
<i>RAMO OVEST</i>	210.14 (MAX = 322.34)	114.1 (MAX = 222.96)	154 (MAX = 308.62)	97.7 (MAX = 299.14)

Tabella 4. 12.a Coda media situazione attuale 2010 all'interno dell'ora di punta

CODA MEDIA SITUAZIONE FUTURA (2020) ALL'INTERNO DELL'ORA (m)				
	08:00 - 08:15	08:15 - 08:30	08:30 -08:45	08:45 -09:00
APPROCCIO NORD	5.98 (MAX = 27.06)	24.36 (MAX = 45.26)	11.25 (MAX = 35.74)	10.72 (MAX = =34.27)
APPROCCIO EST	647.67 (MAX = = 667.73)	763.33 (MAX = = 817.37)	967.32 (MAX = 1107.88)	1245.33 (MAX = = 1400.27)
APPROCCIO SUD	481.12 (MAX = = 487.99)	480.66 (MAX = = 488.14)	478.80 (MAX = 486.16)	472.36 (MAX = 483.13)
APPROCCIO OVEST	4.01 (MAX = 18.08)	48.45 (MAX = 118.1)	36.06 (MAX = 209.95)	96.96 (MAX = 346.13)

Tabella 4. 12.b Coda media situazione futura 2020 all'interno dell'ora di punta

Il progetto dell'intersezione di svincolo Saval realizzato dalla società T, studiato con il traffico desunto dai dati forniti dal Comune di Verona, presenta delle problematiche relative al ritardo e alla coda direttamente connessa al primo parametro, in corrispondenza dei rami d'accesso Sud ed Est.

È quindi necessario un intervento tecnico strutturale che modifichi la situazione attuale rendendo più efficiente anche la futura che presenta un livello di servizio non accettabile, soprattutto per quanto riguarda i rami Est, Sud e Ovest.

Nei prossimi capitoli verrà descritta la soluzione progettuale alternativa che si è deciso di realizzare, analizzando anche gli aspetti propriamente tecnici della progettazione stradale con riferimento alla normativa vigente.

Capitolo 5

Nuova soluzione progettuale

5.1 PREMESSA

Il percorso seguito per svolgere l'intervento descritto nei capitoli precedenti ha richiesto l'analisi dello stato di fatto della soluzione T, quindi lo studio del territorio e del contesto nel quale l'opera viene ad inserirsi.

Una volta definite queste caratteristiche, si è passati all'individuazione delle criticità, mettendo in luce le problematiche riguardanti lo svincolo d'interesse conducendo un'analisi di micro simulazione con l'utilizzo del software Cube Dynasim.

Sulla base di queste considerazioni, si è pervenuti alla scelta della soluzione progettuale ritenuta più idonea per quanto riguarda la rotatoria di svincolo che permette la connessione con l'arteria direttamente collegata al centro di Verona; nella scelta e nel dimensionamento geometrico degli elementi piano altimetrici che andranno a comporre i tracciati e nella definizione delle possibili soluzioni per realizzare l'intersezione si è fatto riferimento al D.M. 05/11/2001 e al D.M. 19/04/2006, già descritti nel Capitolo 2.

5.2 STRUMENTI URBANISTICI

Nel seguito si elencano i principali strumenti urbanistici vigenti a livello regionale, provinciale e comunale per l'individuazione delle linee guida dell'intervento.

5.2.1 STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE E PROGRAMMAZIONE A SCALA REGIONALE, PROVINCIALE E COMUNALE

La Giunta Regionale del Veneto ha adottato come strumento di pianificazione a livello regionale il Piano Territoriale Regionale di Coordinamento (PTRC) che ha come obiettivo quello di favorire lo sviluppo del sistema sociale ed economico delle varie aree regionali garantendo la salvaguardia del paesaggio, degli elementi storici, etc.

- a) Difesa del suolo e degli insediamenti: la proposta progettuale società T non interferisce in alcun modo con le aree vincolate o sottoposte a prescrizione.
- b) Ambiti naturalistico - ambientali e paesaggistici di rilievo regionale: si rimanda a quanto previsto dai Piani Territoriali Provinciale o dai Piani Regolatori dei Comuni interessati
- c) Integrità del territorio agricolo: il piano non individua alcun tipo di prescrizione di dettaglio.
- d) Sistema insediativo e infrastrutturale storico e archeologico: non sono individuati vincoli particolari
- e) Sistema insediativo: il sistema insediativo racchiude tutta l'area della città di Verona e della periferia nell' area metropolitana.
- f) Valenze storico – culturali e paesaggistico – ambientali: il PTRC non individua alcun tipo di prescrizione di dettaglio.

L'analisi di quanto riportato nel Piano regionale mostra la totale compatibilità tra questo e il progetto in esame.

A scala provinciale il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) individua i corsi d'acqua come vincolati dal punto di vista paesaggistico e nel caso in esame non vi sono particolari obblighi imposti sulle zone d'interesse; la Carta delle Fragilità che riporta le indicazioni concernenti le problematiche idrogeologiche, di fragilità ambientale e di qualità biologica dei corsi d'acqua stabilisce che le aree in esame non presentano problematiche particolari.

Lo stesso risultato si ha analizzando la Carta del Sistema Ambientale e la Carta del Sistema Infrastrutturale.

A scala locale si è verificata la compatibilità urbanistica del tracciato con gli strumenti di pianificazione e programmazione Piano di Assetto Territoriale del Comune di Verona (P.A.T.) E Piani Regolatori Generali.

5.3 SOLUZIONE PROGETTUALE T

Gli svincoli di Via Cà di Cozzi e di via Preare sono posti all'uscita della galleria artificiale, in località San Rocco, e si collegano a Via Mameli e Parona, nonché alla circonvallazione interna (ponte del Saval) e all'Ospedale Maggiore. Questi due svincoli, così ravvicinati, in realtà, costituiscono a livello funzionale un unico sistema di svincolo: Via Preare a servizio delle manovre da e verso Ovest (Verona Nord – Tang. Ovest), mentre Via Cà di Cozzi per le percorrenze da e verso est (Via Fincato – Tangenziale Est.)

Il collegamento fra via Preare e Via Cà di Cozzi con la nuova infrastruttura è indispensabile per risolvere gli attuali problemi di traffico di attraversamento delle aree urbane.

Nella Tavola 1 sono riportate le caratteristiche geometriche dello svincolo, in Figura 5.1 si riporta un estratto dell'intersezione.

La rotatoria ha un diametro esterno (al limite della corona giratoria) pari a 60 m, secondo il D.M. 19/04/2006 non rientra nella classificazione standard e il dimensionamento e la composizione geometrica devono essere definiti con il principio dei tronchi di scambio tra bracci contigui e, in questi casi, le immissioni devono essere organizzate con appositi dispositivi.

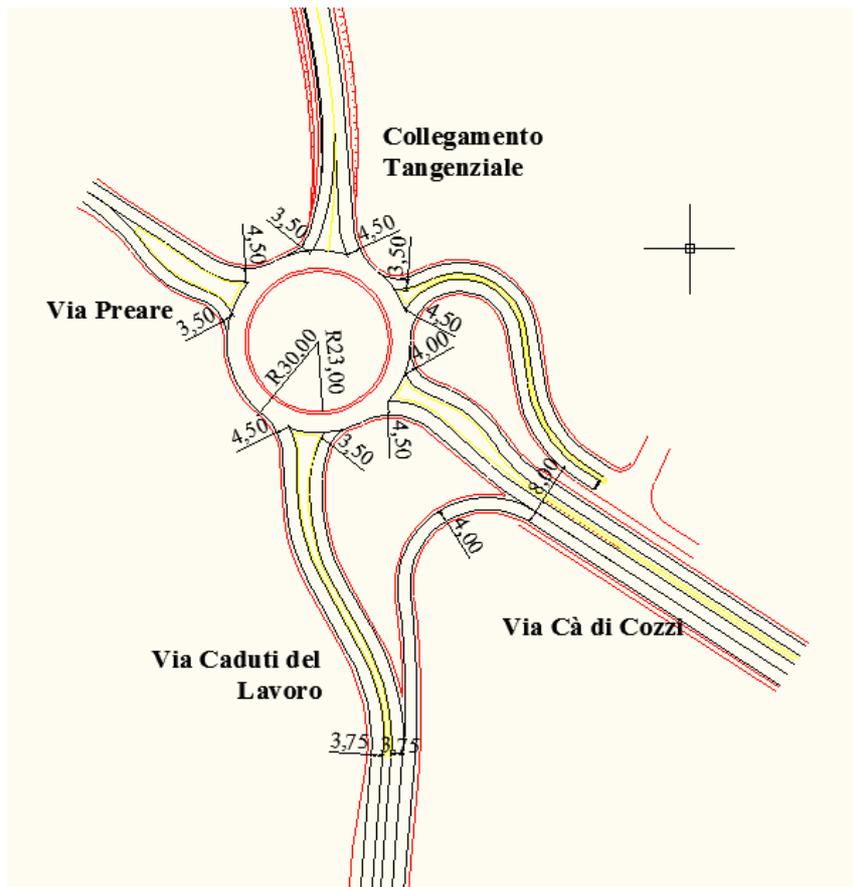


Figura 5. 1 Caratteristiche geometriche intersezione progetto T

La corona giratoria è organizzata su una sola corsia di larghezza 6 m, i bracci d'ingresso hanno tutti una larghezza di 3.50 m tranne che per il ramo d'immissione di via Cà di Cozzi che presenta una larghezza di 4.00 m; i bracci d'uscita hanno una larghezza di 4.50 m.

L'isola centrale, di diametro 23 m, è dotata di una banchina larga 1.00 m.

Non sono disponibili altri parametri geometrici.

Dalle analisi di micro simulazione effettuate nel Capitolo 4 è emerso che la rotatoria così composta, non assolve in modo corretto alle esigenze di mobilità presentando valori del ritardo medio e della coda media troppo elevati in corrispondenza dei rami d'accesso Est e Sud.

Il livello di servizio evidenzia situazioni di congestione per questi rami ed è stato ritenuto opportuno ridimensionare l'intersezione a rotatoria cercando di ottenere una soluzione alternativa che potesse ridurre queste condizioni di criticità.

5.4 PROGETTO DELLA NUOVA INTERSEZIONE A ROTATORIA

Per modificare l'intersezione del progetto T si è scelto di ampliare la corona rotatoria e diminuire il diametro.

La planimetria della nuova rotatoria è riportata nella Tavola 2 in allegato alla presente relazione e viene rappresentata schematicamente in Figura 5.2.

Il centro della rotatoria è il medesimo della precedente, si è scelto, però, di spostare i bracci poiché le nuove dimensioni impongono una posizione differente per garantire le giuste curvature in entrata che consentono di limitare la velocità.



Figura 5. 2 Schema planimetrico nuova soluzione

Si è scelto di modificare l'angolazione del ramo Via Preare perché in quell'area non ci sono interferenze con abitazioni, impossibile sarebbe stato modificare l'andamento di via Cà di Cozzi perché sono presenti edifici nelle vicinanze, come, per lo stesso motivo non è possibile modificare l'andamento del ramo di collegamento alla tangenziale.

La rotatoria ha un diametro esterno (al limite della corona giratoria) pari a 50 m, e secondo il D.M. 19/04/2006 è classificata come “rotatoria convenzionale”, secondo quanto previsto dal D.M. per le rotatorie con diametro esterno compreso tra 40 e 50 m, la corona giratoria è organizzata su una sola corsia di larghezza 9 m.

L'isola centrale di diametro pari a 15 m, non è provvista di una fascia sormontabile, ma è dotata di una banchina di larghezza pari a 1.00 m avente inclinazione verso l'esterno del 4%, l'interno dell'isola forma un rialzo con una pendenza massima del 15%.

La larghezza degli ingressi, individuata dal segmento che parte dal vertice destro dell'isola divisionale e viene condotto ortogonalmente al bordo destro della corsia di entrata, e la larghezza delle uscite assumono valori differenti da quelli riportati nel D.M. 19/04/2006 questo perché, in caso di rotatorie a doppia corsia, la larghezza della zona d'uscita può essere ampliata e studi sulle prestazioni operative delle rotatorie hanno dimostrato che le uscite a doppia corsia sono necessarie soltanto nei due casi seguenti:

- Flussi veicolari in uscita maggiori di 1200 veicoli/h
- Flussi veicolari in uscita maggiori di 900 veicoli/h e pari al triplo della portata veicolare in circolo sull'anello.

Il caso di studio rientra nel primo punto.

La larghezza degli ingressi di Via caduti del Lavoro e via Preare è di 7 m, mentre le rispettive uscite sono di 8 m; il ramo di collegamento della tangenziale ha larghezza d'ingresso di 3.50 m e uscita 4.50 m come previsto da normativa nei casi di sola corsia, via Cà di Cozzi invece presenta un ingresso in doppia corsia di larghezza 7 m e uscita a corsia singola larga 4.50 m perché è previsto il collegamento con via Caduti del Lavoro attraverso un ramo d'accesso.

Le curve d'entrata sono state progettate in modo che il loro bordo esterno risultasse tangente al bordo esterno della corona giratoria.

Trattandosi di una rotatoria a doppia corsia, caratterizzata da un doppio flusso di traffico sia in immissione che in circolo, esiste il problema dei conflitti tra correnti di traffico parallele; conseguentemente è stata posta molta attenzione nella scelta del raggio d'entrata che deve garantire, oltre alle volute prestazioni cinematiche, il flusso libero senza conflitti all'interno della corona giratoria.

Per consentire un'adeguata riduzione della velocità e una corretta immissione dei veicoli sono assunti raggi d'entrata pari a 12 m.

A differenza delle curve in entrata, progettate per rallentare i veicoli, le curve d'uscita devono essere realizzate in modo da favorire il rapido smaltimento del traffico veicolare che intende abbandonare l'anello, per questo si sono adottati raggi d'uscita per tutti i rami pari a 14 m.

Per il tracciamento delle isole divisionali (Figura 5.3) si è partiti dal posizionamento del cosiddetto triangolo di costruzione, avente altezza H pari al raggio della corona giratoria R_g e base B uguale a un quarto del raggio della rotatoria.

In questo caso abbiamo $R_g = 25\text{m} = H$ e $B = 6.25\text{m}$.

Siccome il raggio della corona giratoria è maggiore di 15 m, il triangolo di costruzione non è isoscele e il proprio asse interseca la base a tre quarti della stessa. L'asse del ramo dovrà porsi parallelamente all'asse del triangolo di costruzione con uno sfalsamento a sinistra "d" pari a 0.50 m.

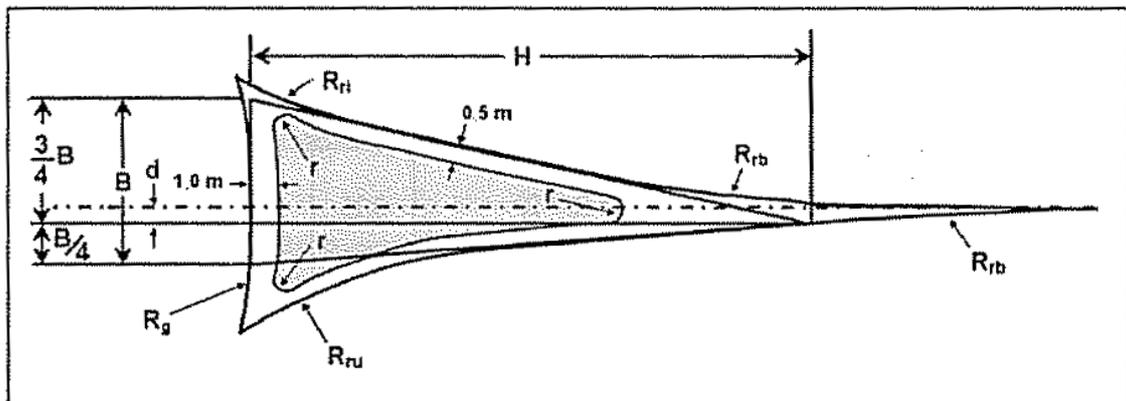


Figura 5.3 Costruzione dell'isola divisionale per $R_g > 15\text{m}$

Il raggio di raccordo dell'isola con la corona giratoria in prossimità dell'ingresso R_{ri} è dato dalla somma del raggio d'ingresso R_i e della larghezza d'entrata L_i quindi è pari a 60 m.

Il raggio di raccordo dell'isola con la corona giratoria in prossimità dell'uscita R_{ru} è dato dalla somma del raggio d'uscita R_u e dalla larghezza dell'uscita L_u quindi pari a 56 m; infine il raggio di raccordo dell'isola con l'asse del braccio R_{rb} è pari a quattro volte il raggio della corona giratoria cioè 100 m.

Le isole divisionali sono materializzate, prevedono cioè una superficie in rilievo rispetto alla pavimentazione stradale. La parte materializzata è la zona individuata dallo scostamento verso l'interno del bordo definito dalle linee di costruzione, scostamento che sarà pari a 1.00 m per il posizionamento della base e pari a 0.50 m per il tracciamento degli altri lati. L'area compresa tra il bordo materializzato e la striscia di contorno viene utilizzato per inserire segnaletica orizzontale costituita dalla zebraature di colore bianco, inclinate a 45° rispetto al senso di marcia.

Il raggio di raccordo dell'isola materializzata è pari a $R_g / 50$ e cioè 0.50 m, la superficie rialzata di 20 cm è di colore chiaro in modo da creare un ottimo contrasto con la superficie stradale.

Inoltre le isole divisionali dovrebbero essere sgombre da qualunque oggetto come elementi d'arredo o segnaletica superficiale che possa costituire un ostacolo alla visuale degli utenti.

5.5 DEFINIZIONE DELLE PENDENZE TRASVERSALI

Per la definizione delle pendenze trasversali in rotatoria ci si è avvalsi delle regole normalmente adottate sulla base dell'esperienza e della principale letteratura sull'argomento in quanto non vi è ancora una specifica normativa in merito.

In particolare si è fatto riferimento al testo *“Progettare le rotatorie. Tecniche per la progettazione e la verifica delle intersezioni a circolazione rotatoria”*, della collana *Quaderni per la progettazione* di EPC libri.

Per quanto riguarda invece le pendenze dei rettifili e delle curve che compongono i vari rami si sono adottate le prescrizioni stabilite dal D.M. 5/11/2001.

5.5.1 PENDENZA TRASVERSALE DELLA PIATTAFORMA NEI RETTIFILI

La pendenza trasversale in rettilineo nasce dall'esigenza di allontanamento dell'acqua superficiale. A seconda del tipo di strada si adottano sistemazioni diverse, ma indipendentemente dal tipo di strada, la pendenza minima delle falde della carreggiata deve essere del 2.5 %, valori inferiori saranno adottati nei tratti di transizione tra elementi di tracciato caratterizzati da opposte pendenze trasversali.

In curva la carreggiata è inclinata verso l'interno e la pendenza trasversale è la stessa per tutta la lunghezza dell'arco di cerchio.

Per strade di categoria B e C, come quelle del progetto, la pendenza massima ammessa è del 7%.

Per determinare la pendenza in funzione del raggio è indispensabile stabilire il legame fra la velocità di progetto V_p e la pendenza trasversale in curva i_c e la quota parte del coefficiente d'aderenza impegnato trasversalmente f_t . Dallo studio dell'equilibrio di un veicolo transitante su una curva circolare si ottiene:

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

V_p = velocità di progetto della curva (km/h)

R = raggio della curva

q = $i_c / 100$

f_t = quota parte del coefficiente d'aderenza impegnato trasversalmente

I valori di f_t sono tabellati in funzione della velocità di progetto che è pari a 60 km/h per le curve in uscita e entrata alla rotonda quindi $f_{t,max} = 0.17$

Inoltre per strada extraurbana principale (via Caduti del Lavoro, via Cà di cozzi) con V_p min pari a 40 km/h si adotta un $q_{,max}$ pari a 0.07, $f_{t, max} = 0.210$, il raggio minimo è di 45 m ; per strade di tipo C extraurbana secondaria con $V_{p, min} = 60$ km/h, $q_{, max} = 0.07$, $f_{t,max} = 0.170$ il raggio minimo è di 118 m come riportato in figura 5.

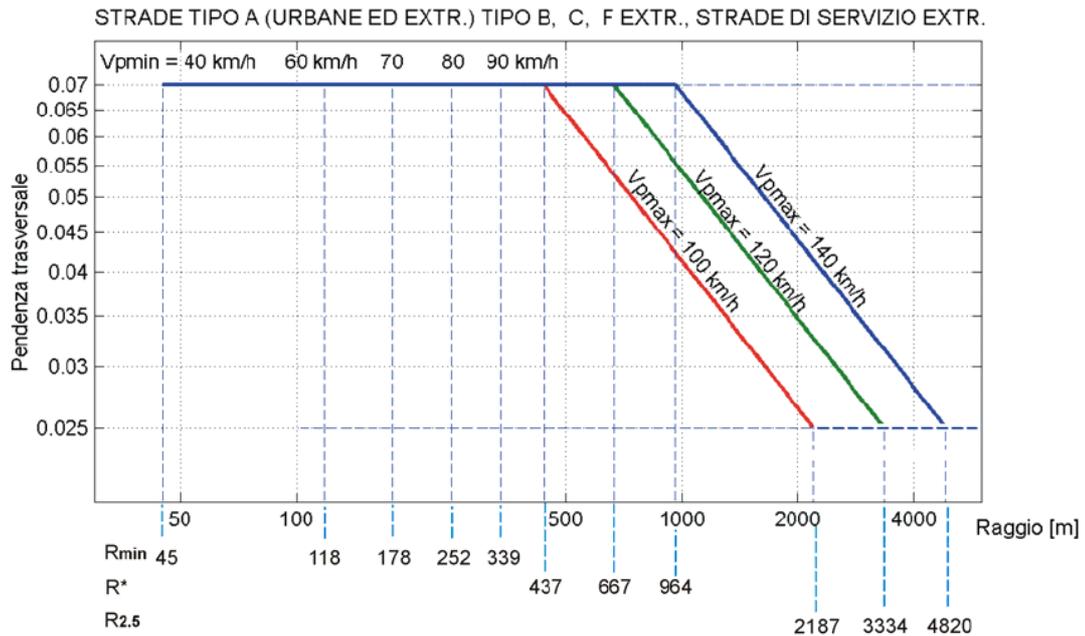


Figura 5. 4 Abaco per raggi maggiori di Rmin

Si sceglie poi di adottare pendenze del 2.5 % per tutti e cinque i rami.

5.6 PROFILI LONGITUDINALI

La descrizione dell'andamento altimetrico di una rotatoria prevede:

- Il tracciamento dei profili longitudinali dei rami d'accesso
- Il profilo longitudinale della corona giratoria
- Lo sviluppo dei profili longitudinali di ogni tratto d'ingresso verso l'isola centrale e di ogni tronco d'uscita a partire dal bordo esterno della corona giratoria.

I profili longitudinali dei rami della rotatoria sono riportati nella Tavola 5.

Lo sviluppo dei profili longitudinali di ogni tratto d'ingresso verso l'isola centrale delle rotatorie e di ogni tronco d'uscita a partire dal bordo esterno della corona giratoria è piuttosto complesso.

In primo luogo è necessario identificare i punti, ubicati sugli assi dei rami d'approccio, oltre i quali la sezione trasversale dei rami comincia ad allargarsi per assumere la conformazione ad invito verso l'anello centrale, queste zone sono state individuate con le sezioni *1*, *10*, *18* e *21* come riportato nella Tavola 5.

Tali punti fungono da collegamento tra l'andamento altimetrico dei rami d'approccio e quello dei tronchi di ingresso e di uscita; questi, a loro volta, devono essere organizzati in modo tale da garantire la convergenza delle loro pendenze ad un'unica quota intorno all'isola centrale.

Si riporta un esempio di un braccio per intuire come vengono realizzati i profili e quali sono i punti di interesse (Figura 5.6).

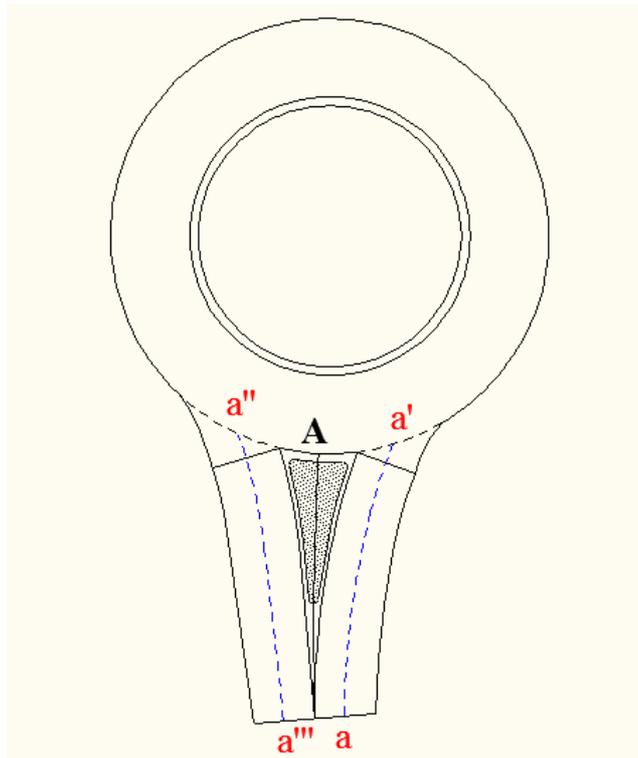


Figura 5. 6: Asse di riferimento per il tracciamento dei profili longitudinali dei rami di ingresso/uscita dalla rotatoria

A questo punto si può procedere con la fase finale della caratterizzazione altimetrica delle rotatorie, ovvero il tracciamento dei profili longitudinali di tutte le corsie d'ingresso e di uscita.

A tal fine sono state svolte le seguenti considerazioni (per semplicità si fa riferimento ad un solo ramo, ma esse sono valide per tutti):

- Le quote dei punti a e a''' sono immediatamente deducibili dalla sagoma della sezione trasversale del ramo d'accesso il cui profilo si interrompe nel punto A
- Le pendenze delle livellette su cui giacciono i punti a ed a''' sono, almeno inizialmente, le stesse di quelle che competono alla livelletta del ramo d'accesso il cui profilo longitudinale si conclude nel punto A;
- Le quote dei punti a' e a'' sono determinate dalla sagoma trasversale dell'anello della rotatoria (realizzato con una pendenza verso l'esterno del 2%);
- Il tratto finale della livelletta a-a'e e il tratto iniziale della livelletta a''-a''', al fine di evitare discontinuità plano-altimetriche con l'area in cui avviene il collegamento tra la corona giratoria e i rami d'approccio, devono avere un andamento dettato dalla pendenza trasversale dell'anello.

5.7 INDICAZIONI SULLA PAVIMENTAZIONE

In corrispondenza delle intersezioni stradali i veicoli subiscono forti accelerazioni anche trasversali per effetto delle traiettorie obbligate, di conseguenza le caratteristiche prestazionali delle pavimentazioni devono essere particolarmente elevate.

Le intersezioni stradali sono caratterizzate da una elevata concentrazione di incidenti. Infatti nella maggior parte delle nazioni il 40 – 60% dell'incidentalità si registra in corrispondenza delle intersezioni e l'Italia, soprattutto in ambito urbano, non si discosta da queste percentuali. La recente emanazione del Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, del 19 aprile 2006, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali" pubblicato sulla GU n. 170 del 24/07/2006, va ad integrare il D.M. 5 novembre 2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade". Tale decreto, oltre a costituire un "riferimento" per l'adeguamento delle intersezioni esistenti, è cogente e si applica a tutte le nuove intersezioni. La nuova norma non comprende esplicitamente le caratteristiche delle pavimentazioni ma, contemplando il "criterio cinematico" per dimensionare le corsie di accelerazione e decelerazione, richiama una accelerazione di progetto e quindi indirettamente le caratteristiche di aderenza della pavimentazione.

Inoltre la norma nell'introduzione specifica che *"... in corrispondenza delle intersezioni stradali i veicoli compiono manovre, abbandonando quindi un regime di marcia caratterizzato da velocità pressoché costanti e da traiettorie a bassa curvatura, per passare rapidamente ad un regime che è essenzialmente di moto vario. Dette manovre sono infatti caratterizzate da velocità variabili e da traiettorie fortemente curve, almeno nella maggioranza dei casi."*

Le intersezioni stradali sono interessate da notevoli accelerazioni e decelerazioni e da traiettorie curvilinee con modesti raggi di curvatura. In queste zone i veicoli, soprattutto quelli pesanti, trasmettono alla pavimentazione forti sollecitazioni tangenziali, longitudinali e trasversali. I tappeti superficiali devono quindi essere caratterizzati da una adeguata resistenza all'usura e da un buon collegamento con gli strati portanti inferiori. La perdita del collegamento tra gli strati in conglomerato bituminoso della pavimentazione stradale può infatti ridurne fino a 3 - 4 volte la vita utile.

Al fine di garantire la sicurezza della circolazione devono inoltre sempre essere assicurate le condizioni di aderenza e regolarità.

Un ulteriore parametro da considerare è il drenaggio delle acque superficiali in quanto le intersezioni sono caratterizzate da lunghi percorsi di deflusso e da ridotte pendenze trasversali (caratteristiche di tutte le zone di transizione) che necessariamente determinano un maggior pericolo di aquaplaning.

La pavimentazione può svolgere un ruolo molto importante al fine di ridurre il “workload” migliorando la leggibilità e la visibilità dell’intersezione e la sua coerenza con il tracciato.

A differenza di fessurazioni superficiali ed ormaiamenti, fenomeni che, pur avendo spesso origine da carenze interne della sovrastruttura, si manifestano sul piano viabile per stadi successivi di ammaloramento, il distacco tra gli strati di conglomerato bituminoso non è direttamente visibile in superficie, se non quando si verifica tra i due strati superficiali con il loro reciproco slittamento e/o l’asportazione di conglomerato bituminoso. Tuttavia, ciò non significa che il fenomeno non sia dannoso o che partecipi in misura minore al deterioramento, anzi, per le pavimentazioni in corrispondenza di intersezioni e di zone di approccio spesso rappresenta il problema principale.

Accanto ai parametri strutturali, ha un’importanza notevole l’aderenza. Soprattutto nell’area di intersezione e nelle zone di approccio, dove sicuramente avvengono modifiche di traiettoria e di velocità, le caratteristiche di aderenza della pavimentazione devono essere adeguatamente verificate. Essa risulta il parametro fondamentale per la sicurezza ed è collegata direttamente alle caratteristiche compositive del conglomerato ed alla tessitura superficiale.

Analizzando il contatto tra pneumatico in movimento e superficie stradale bagnata possiamo suddividere l’area in tre zone (Figura 5.7):

- 1) Zona di Penetrazione (A): in questa zona l’acqua é espulsa progressivamente attraverso le scolpiture del battistrada e la macrotessitura del rivestimento. L’attrito é praticamente nullo.
- 2) Zona di Transizione (B): in questa parte di superficie resta ancora una frazione di acqua da eliminare ed il pneumatico inizia a prendere contatto con le asperità del rivestimento.
- 3) Zona di Contatto (C): in quest’ultima zona c’è un contatto asciutto tra pneumatico e strada. L’aderenza nasce quindi quasi completamente in questa zona.

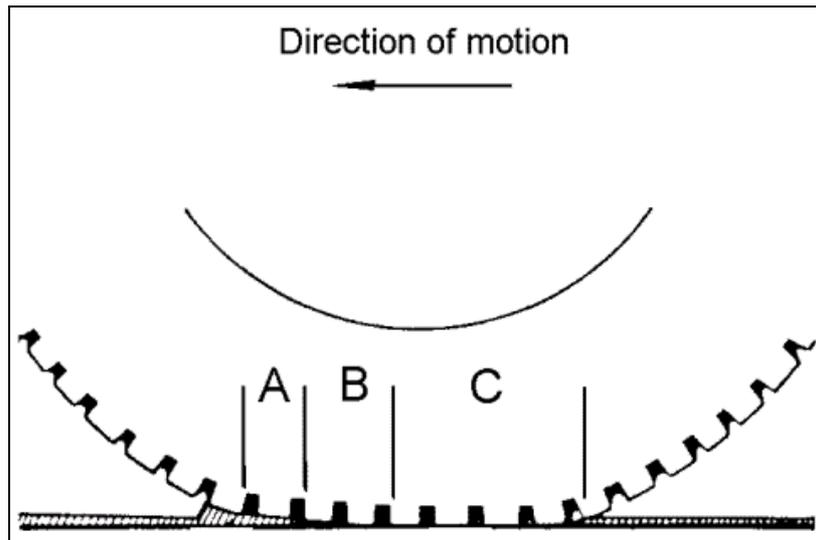


Figura 5. 7- Teoria delle tre zone

Utilizzando questo modello la capacità di aderenza é funzione delle dimensioni relative delle tre zone che formano l'area di contatto. Su strade asciutte la zona C occupa tutta l'area di contatto. All'altro estremo, se la zona di Penetrazione (A) occupa tutta l'area di contatto non é più possibile sviluppare forze di attrito tra strada e pneumatico e si innesca il fenomeno dell'aquaplaning.

In effetti, aumentando la velocità, la zona di Transizione (B) si allarga a discapito della zona di Contatto (C) e l'aderenza decresce.

Nella zona C le sovrappressioni locali sono molto elevate e quindi permettono di “tagliare” il velo idrico per mezzo delle asperità al fine di ottenere la superficie di contatto asciutta necessaria allo sviluppo delle forze di attrito.

Le asperità della superficie si “aggrappano” al battistrada e quindi deformano la gomma che costituisce il pneumatico. Le caratteristiche dell'elastomero determinano la nascita di perdite per isteresi della gomma che “striscia” sulla superficie stradale ruvida. Allo scorrimento relativo ruota – strada corrisponde una data deformazione ed una forza orizzontale di reazione.

Fra le asperità si forma una rete di canali più o meno comunicanti che assicura due funzioni: da un lato può funzionare come un serbatoio per l'acqua piovana e quindi riduce lo spessore efficace del velo idrico, dall'altro fornisce una possibile via di drenaggio per il deflusso superficiale “libero” e per quello “forzato”: con il primo termine si intende lo scorrere dell'acqua sulla superficie stradale in caso di pioggia, con

il secondo si definisce l'espulsione dell'acqua posta sotto l'area di contatto fra battistrada e piano viabile.

Altro parametro da tenere in considerazione è la capacità della sovrastruttura di drenare le acque superficiali. In caso di pioggia l'acqua si accumula sulla superficie stradale quindi inizia a scorrere seguendo la linea di massima pendenza fino a giungere normalmente nelle cunette poste lateralmente.

Su una pavimentazione impermeabile il deflusso dell'acqua é un fatto unicamente superficiale. Se il percorso di drenaggio é lungo, il velo idrico che scorre superficialmente può diventare spesso, dell'ordine dei 2 ÷ 4 mm. Se non è possibile intervenire sulla pendenza trasversale della piattaforma è possibile impiegare altre soluzioni, quali le pavimentazioni drenanti, le pavimentazioni ad elevata macrorugosità, i trattamenti superficiali come la creazione di striature trasversali, le tecniche di captazione dello strato superficiale d'acqua.

5.7.1 PACCHETTO STRADALE NUOVA SOLUZIONE

Per sopperire ai problemi che si possono generare nella pavimentazione, elencati nel paragrafo precedente, si propone di impiegare un unico pacchetto per tutta la rotatoria rendendo uniforme il sottofondo che sarà così formato (Figura 5.8):

- conglomerato bituminoso d'usura tipo SMA (Splitt mastix asphalt) con bitume modificato di spessore 3 cm.
- Conglomerato bituminoso di collegamento di spessore 4 cm
- Conglomerato bituminoso di base di spessore 10 cm
- Misto granulare stabilizzato di spessore 35 cm

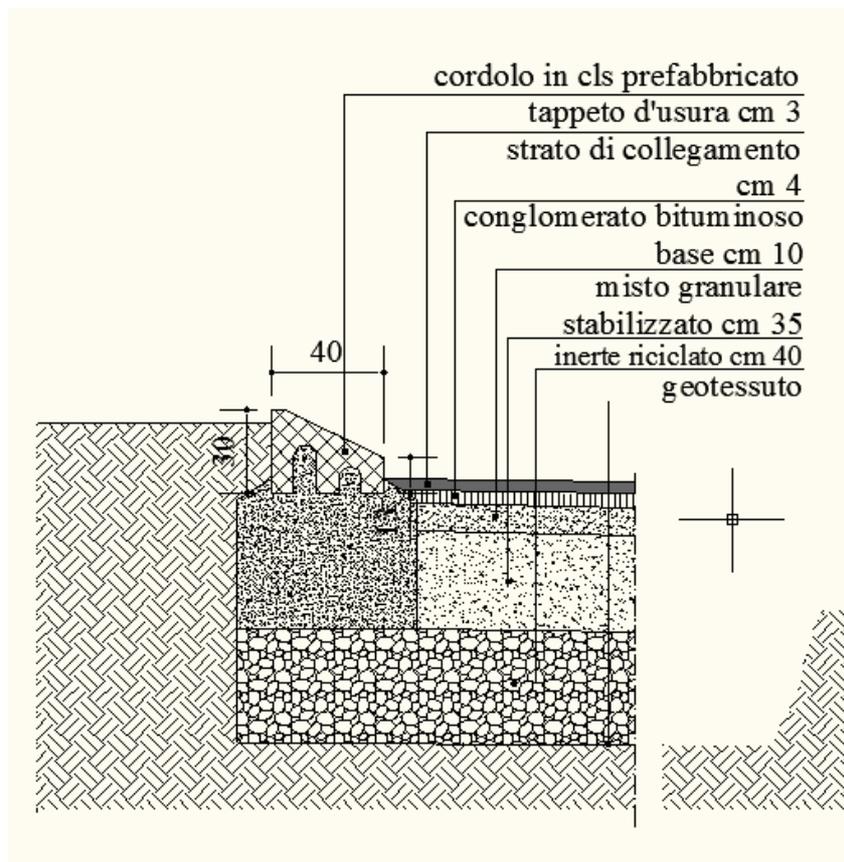


Figura 5. 8 Pacchetto stradale in rotatoria in corrispondenza dell'isola centrale

Il conglomerato bituminoso Splitt mastixasphalt si fonda sul presupposto di poter riempire la quantità di vuoti (18 – 20%) esistente nella massa di graniglia con un mastice di elevata consistenza composto da filler, bitume e agenti stabilizzanti, in modo da arrivare nel tappeto finito ad una quantità di vuoti del 3 – 5 % .

Il conglomerato di usura antisdrucchiolo Splittmastix asphalt è un conglomerato chiuso, impermeabile verso gli strati sottostanti, costituito da una miscela di pietrischetto, graniglia, sabbia (tutti da frantumazione) e filler impastato a caldo con bitume modificato.

I vuoti della miscela, derivanti dalla composizione granulometrica scelta con elementi grossi e povera di sabbia, sono riempiti dalla malta bituminosa realizzata dal bitume modificato e dal filler caratterizzata da elevata consistenza e coesione.

Tale composizione permette di avere una spiccata macrorugosità superficiale che conferisce alla pavimentazione una notevole aderenza con un'ottima resistenza alle azioni tangenziali dei veicoli, specialmente in curva, evitando il fenomeno dello

sgranamento. Inoltre tale tipologia permette la fono assorbenza del rumore di rotolamento.

L'impiego di elevate quantità di legante, necessario per riempire i vuoti della graniglia, non risulta dannoso se adeguatamente stabilizzato con fibre, anzi, a differenza di quanto si verifica con altre miscele si ha un miglioramento delle proprietà meccaniche in particolare nei riguardi del fenomeno dell'inormaiamento.

5.8 MICROSIMULAZIONE DELLA NUOVA SOLUZIONE

Per poter mettere a confronto la nuova soluzione della rotatoria con la soluzione proposta dalla società T, si è ripetuta la micro simulazione estraendo i dati relativi al ritardo e alla coda mettendoli a confronto con quelli ottenuti dall'altra soluzione.

La rotatoria presenta una larghezza dell'anello di 9 m quindi si hanno due corsie come riportato in Figura 5.9:

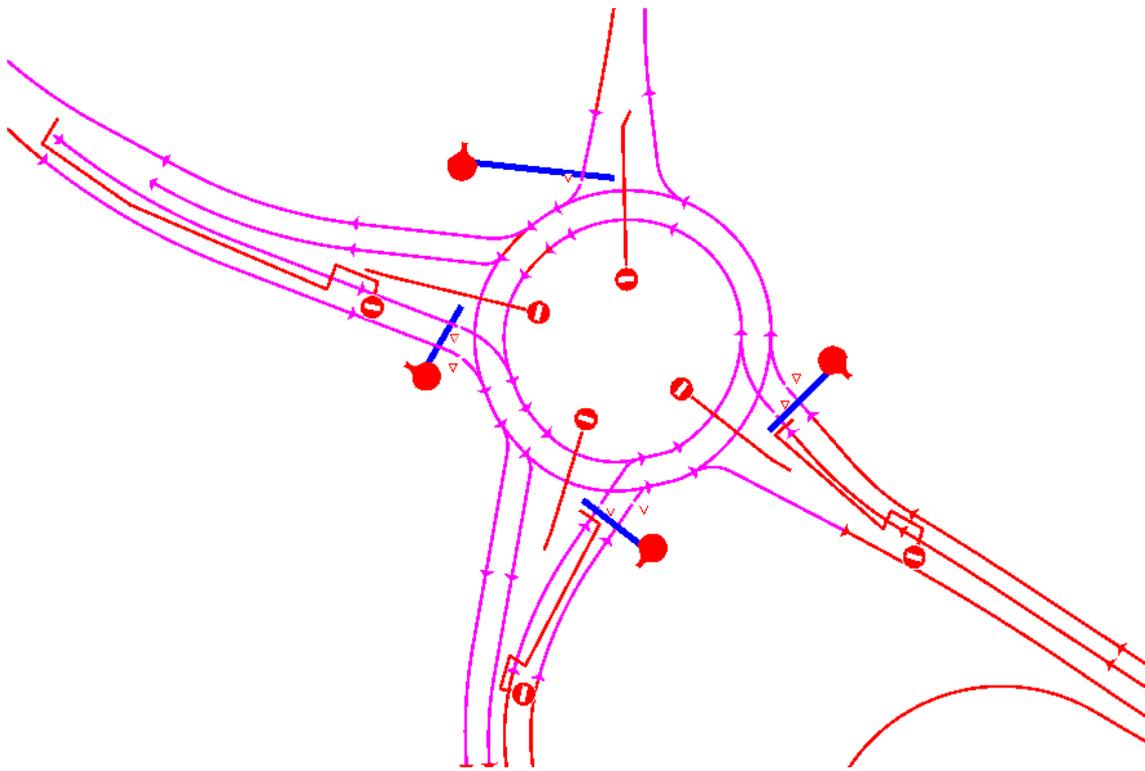


Figura 5. 9 Rete geometrica nuova soluzione

Il procedimento per la costruzione della rete geometrica e logica è identico a quello descritto nel Capitolo 4, il sottografo e le matrici utilizzate sono le medesime, cioè che cambia sono i parametri geometrici inseriti per la caratterizzazione delle traiettorie, esposte nella Tabella 5.1:

CARATTERISTICHE TRAIETTORIE E SUPPORTI NUOVA SOLUZIONE

<i>VIA CADUTI DEL LAVORO</i>	Supporto: 3.50 (ingresso) Supporto: 4.00 (uscita) Larghezza corsia ingresso: 3.50 m Larghezza corsia uscita: 4.00 m Speed % Lane: 0.70
<i>VIA PREARE</i>	Supporto: 3.50 (ingresso) Supporto: 4.00 (uscita) Larghezza corsia ingresso: 3.50 m Larghezza corsia uscita: 4.00 m Speed % Lane: 0.60
<i>VIA CA' DI COZZI</i>	Supporto: 3.50 (ingresso) Supporto: 4.00 (uscita) Larghezza corsia: 3.50 m Speed % Lane: 0.70
<i>TANGENZIALE</i>	Supporto: 3.75 Larghezza corsia: 3.75 m Speed % Lane : 0.70
<i>ROTATORIA (anello interno)</i>	Supporto: 4.50 Larghezza corsia: 4.50m Speed % Lane : 0.30

Tabella 5. 1 Caratteristiche delle traiettorie nuova soluzione

Nei rami di accesso alla rotatoria è necessario modificare la velocità andando ad agire sul parametro Speed Exiting Lane impostando questo valore su 0.30 in modo che i veicoli che percorrono il ramo di accesso alla rotatoria adeguino la loro velocità e in uscita dalla traiettoria abbiano una velocità compatibile con quella tenuta nell'anello interno.

Invece per i rami di uscita dalla rotatoria il valore deve essere impostato in funzione della velocità che si ha sulla traiettoria che il veicolo andrà a percorrere.

Altro parametro da verificare è la distribuzione di cambio corsia, che assume i seguenti valori (Tabella 5.2):

	<i>RC</i>	<i>MLC</i>	<i>EC</i>
<i>Distribuzione 1</i>	10	50	70
<i>Distribuzione 2</i>	90	40	60
<i>Distribuzione 3</i>	200	1000	200

Tabella 5. 2 Parametri distribuzioni di cambio corsia

La distribuzione 1 è relativa al Lane Change Marker posto sulla tangenziale in direzione Est, la distribuzione 2 è relativa sempre alla tangenziale ma nel tratto in direzione Ovest e la distribuzione 3 è posta su via Caduti del Lavoro.

Sono da cambiare anche i valori relativi alle precedenze come in Figura 5.10:

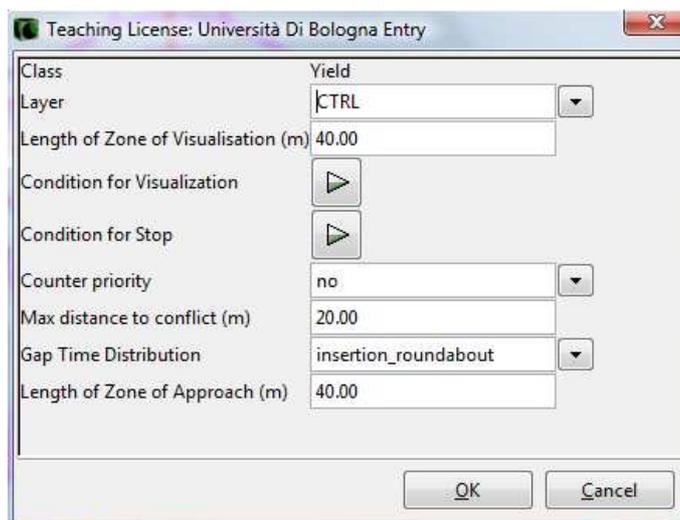


Figura 5. 10 Valori parametro Yield

Il significato dei parametri richiesti è il seguente:

Length of Zone visualisation : lunghezza della zona di visualizzazione. 40 m

Counter priority : contro precedenza. NO

Max distance to conflict : massima distanza dal conflitto. 20 m

Gap Time Distribution : Distribuzione dei tempi di gap.

Length of Zone Approach : lunghezza della zona di approccio. 40 m

Lo scenario dei flussi si riferisce sempre all'ora di punta 08:00 – 09:00 di un giorno feriale medio, per le tre correnti veicolari auto, medi e pesanti, facendo riferimento allo scenario attuale 2010 e futuro 2020.

Inserendo sempre come parametri:

Simulation Start Time : 07:45:00

Simulation End Time : 09:00:00

Measurement Start Time : 08:00:00

Time Sample (min) : 60

5.8.1 ANALISI DEI RISULTATI

Dopo aver determinato i raccoglitori di dati, visibili in Figura 5.8, cliccando sul tasto Output si apre la casella *Output Management* (Gestione dei risultati) dove si definisce il gruppo dei risultati contenente i raccoglitori di dati proprio dello scenario di rete attuale 2010 e futuro 2020.

Si valutano, come per la soluzione T, il ritardo e il valore della coda e si riportano i grafici relativi al ritardo per lo scenario attuale 2010 (Figura 5.11) e per lo scenario futuro 2020 (Figura 5.12):

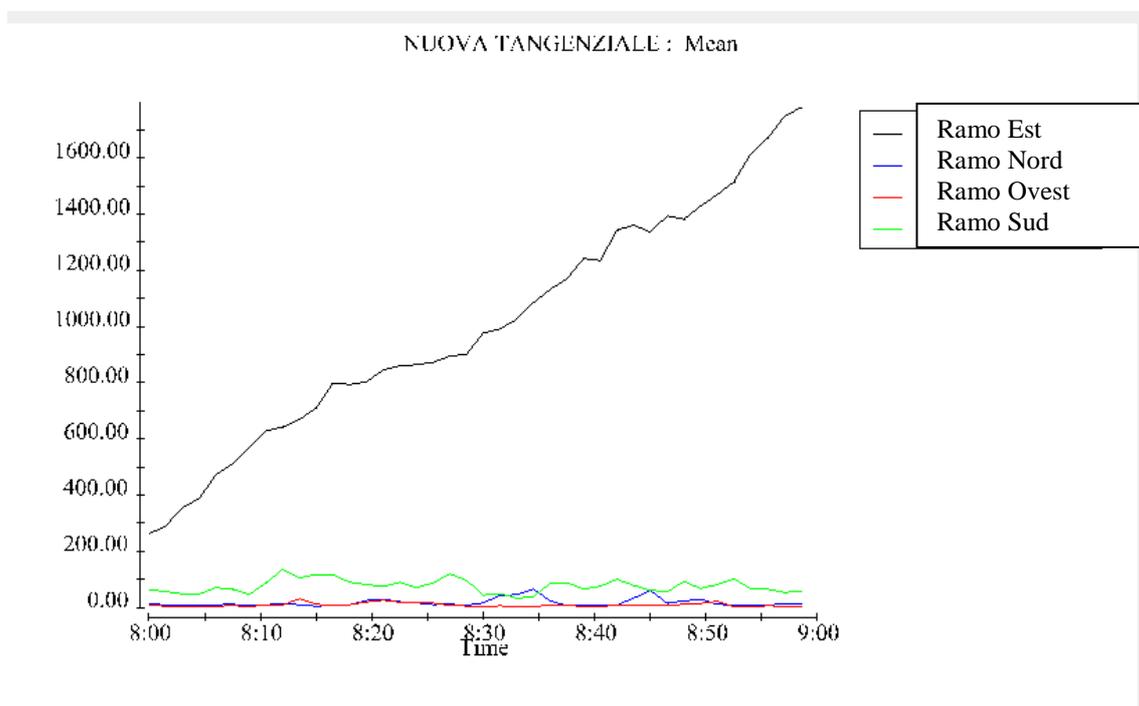


Figura 5. 11 Ritardo medio situazione attuale 2010

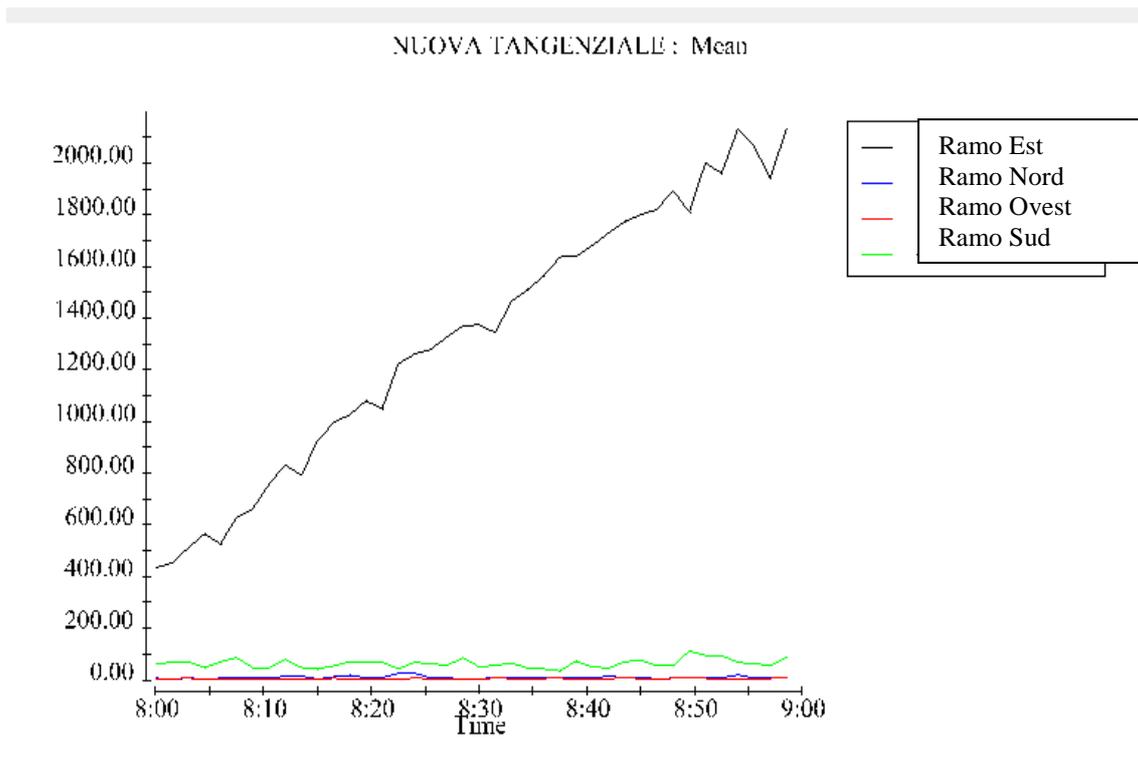


Figura 5. 12 Ritardo medio situazione futura 2020

Da questi risultati è possibile determinare il ritardo medio relativo ad ogni singolo ramo e il ritardo medio dell'intera rotatoria.

Facendo questi semplici calcoli si ottengono i seguenti valori espressi in secondi (Tabella 5.3):

	<i>RITARDO MEDIO SITUAZIONE 2010 (sec)</i>	<i>RITARDO MEDIO SITUAZIONE 2020 (sec)</i>
<i>RAMO NORD</i>	17.4	10.1
<i>RAMO EST</i>	986.8	1392.5
<i>RAMO SUD</i>	70.5	61.3
<i>RAMO OVEST</i>	8.6	4.6

Tabella 5. 3 Valori del ritardo medio situazione attuale 2010 e futura 2020

È possibile allora definire il LOS dei vari rami in base alla tabella HCM(riportata nel Capitolo 4 in Figura 4.7); il valore del livello di servizio per i rami è riportato in Tabella 5.4:

	<i>L.d.S – ATTUALE 2010</i>	<i>L.d.S. – FUTURO 2020</i>
<i>RAMO OVEST</i>	A	A
<i>RAMO EST</i>	<u>F</u>	<u>F</u>
<i>RAMO NORD</i>	C	B
<i>RAMO SUD</i>	<u>F</u>	<u>F</u>

Tabella 5. 4 LOS situazione attuale 2010 e futura 2020

Analizzando questi valori e confrontandoli con quelli della soluzione T (Tabella 4.6, Capitolo 4), è possibile stabilire che la rotatoria di nuova progettazione non modifica e non migliora di molto la situazione; diminuiscono i ritardi sul ramo Ovest ma la nuova progettazione doveva migliorare le condizioni dei rami Sud ed Est, cosa che non avviene.

Si è studiato meglio anche l'andamento del ritardo all'interno dell'ora di punta, analizzando quello che succede nei quattro quarti d'ora che la compongono (Tabella 5.5 a, b):

<i>RITARDO MEDIO SITUAZIONE ATTUALE 2010 ALL'INTERNO DELL'ORA DI PUNTA(sec)</i>				
	<i>08:00 - 08:15</i>	<i>08:15 - 08:30</i>	<i>08:30 -08:45</i>	<i>08:45 -09:00</i>
<i>RAMO NORD</i>	9.64	14.63	26.73	19.95
<i>RAMO EST</i>	519.64	836.74	1170.7	1512.23
<i>RAMO SUD</i>	64.93	91.95	60.9	68.56
<i>RAMO OVEST</i>	8.23	13.24	4.62	7.85

Tabella 5. 5,a Ritardo medio situazione attuale 2010 all'interno dell'ora di punta

**RITARDO MEDIO SITUAZIONE FUTURA 2020 ALL'INTERNO
DELL'ORA DI PUNTA(sec)**

	<i>08:00 - 08:15</i>	<i>08:15 - 08.30</i>	<i>08:30 -08:45</i>	<i>08:45 -09:00</i>
RAMO NORD	8.42	14.76	9.06	8.93
RAMO EST	600.83	1215.31	1595.26	1955.01
RAMO SUD	61.69	60.98	52.74	72.58
RAMO OVEST	3.69	4.01	5.2	5.41

Tabella 5. 5, b Ritardo medio situazione futura 2020 all'interno dell'ora di punta
È stato valutato, anche per i quarti d'ora, il relativo livello di servizio (Tabella 5.6,a e
5.6,b) :

**L.d.S. SITUAZIONE ATTUALE2010 ALL'INTERNO DELL'ORA
DI PUNTA**

	<i>08:00 - 08:15</i>	<i>08:15 - 08.30</i>	<i>08:30 -08:45</i>	<i>08:45 -09:00</i>
RAMO NORD	B	A	B	B
RAMO EST	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>
RAMO SUD	E	E	E	<u>F</u>
RAMO OVEST	D	C	C	B

Tabella 5. 6,a LOS situazione attuale 2010 all'interno dell'ora di punta

L.d.S SITUAZIONE FUTURA 2020 ALL'INTERNO DELL'ORA DI PUNTA

	<i>08:00 - 08:15</i>	<i>08:15 - 08.30</i>	<i>08:30 -08:45</i>	<i>08:45 -09:00</i>
RAMO NORD	A	B	A	A
RAMO EST	F	F	F	F
RAMO SUD	F	F	F	E
RAMO OVEST	A	A	A	A

Tabella 5. 6, b LOS situazione futura 2020 all'interno dell'ora di punta

È evidente come i rami Est e Sud presentano condizioni inaccettabili del livello di servizio, problematiche messe ancora più in evidenza con l'analisi del ritardo nei quarti d'ora.

Sono state condotte valutazioni che riguardano la coda con riferimento ai valori massimi, sempre per ogni ramo nelle due situazioni attuale 2010 e futura 2020; a differenza dell'analisi condotta per la soluzione T, i risultati fanno riferimento alla corsia di destra e alla corsia di sinistra per ogni ramo di accesso a due corsie(Tabella 5.7).

	MEDIA DEI VALORI MASSIMI			
	CODA SITUAZIONE ATTUALE 2010 (m) CORSIA DESTRA	CODA SITUAZIONE ATTUALE 2010 (m) CORSIA SINISTRA	CODA SITUAZIONE FUTURA 2020 (m) CORSIA DESTRA	CODA SITUAZIONE FUTURA 2020 (m) CORSIA SINISTRA
RAMO NORD	36.95		12.77	
RAMO EST	444.82	668.28	462.89	818.44
RAMO SUD	769.65	404.88	390.03	362.52
RAMO OVEST	32.81	27.36	3.54	21.54

Tabella 5. 7 Coda situazione attuale 2010 e futura 2020

Visti i risultati del ritardo medio, i rami che presentano maggiori criticità sono sempre il ramo Est e Sud e come fatto prima si è condotta un'indagine all'interno dell'ora di punta (Tabella 5.8.a e 5.8.b) suddividendola nei quattro quarti d'ora che la compongono ottenendo i seguenti risultati:

	CODA MEDIA SITUAZIONE ATTUALE 2010 ALL'INTERNO DELL'ORA (m) CORSIA DESTRA				CODA MEDIA SITUAZIONE ATTUALE 2010 ALL'INTERNO DELL'ORA (m) CORSIA SINISTRA			
	08:00 - 08:15	08:15 - 08:30	08:30 - 08:45	08:45 - 09:00	08:00 - 08:15	08:15 - 08:30	08:30 - 08:45	08:45 - 09:00
	RAMO NORD(una corsia)	15.33	26.79	56	46.55			
RAMO EST	302.07	467.42	491.91	498.26	305.58	497.63	743.7	1051.61
RAMO SUD	456.07	677.06	909.14	983.57	393.7	405.14	412.96	406.46
RAMO OVEST	8.13	98.22	10.22	14.08	20.43	42.42	20.9	25.2

Tabella 5. 8.a Coda media situazione attuale 2010 all'interno dell'ora di punta per le corsie di destra e sinistra

	CODA MEDIA SITUAZIONE FUTURA 2020 ALL'INTERNO DELL'ORA (m) CORSIA DESTRA				CODA MEDIA SITUAZIONE FUTURA 2020 ALL'INTERNO DELL'ORA (m) CORSIA SINISTRA			
	08:00 - 08:15	08:15 - 08:30	08:30 - 08:45	08:45 - 09:00	08:00 - 08:15	08:15 - 08:30	08:30 - 08:45	08:45 - 09:00
	RAMO NORD	4.91	32.01	10.06	4.16			
RAMO EST	366.02	493.18	494.85	485.56	380.7	715.98	999.46	1105.17
RAMO SUD	301.64	351.32	403.54	485.25	313.07	348.86	379.28	400.17
RAMO OVEST	0	7.71	6.42	0	18.73	17.99	19.93	28.52

Tabella 5. 8.b Coda media situazione futura 2020 all'interno dell'ora di punta per le corsie di destra e sinistra

È evidente che la soluzione ipotizzata non migliora di molto il progetto proposto dalla società T come inizialmente si poteva ipotizzare.

I rami che risultavano critici Est e Sud vengono di seguito confrontati:

- RAMO EST: si evidenzia un miglioramento nel ritardo, passando da un valore di 1259.61 sec per la soluzione T a un valore di 986.86 sec nella nuova soluzione. Anche il valore della coda diminuisce, passando da 961.97 m per la situazione T al 2010 ad un valore di 444.82 m per la nuova soluzione al 2010.
- RAMO SUD: in questo ramo invece si assiste ad un peggioramento delle condizioni di traffico. Il ritardo al 2010 stimato per la soluzione T è pari a 49.62 sec, mentre per la nuova soluzione è di 70.5 m; stessa cosa si avrà per la coda, infatti la soluzione T presenta valori della coda di 481.99 m , mentre per la soluzione nuova si ha un valore di 769.65 m.

Si ha sì un miglioramento per quanto riguarda il ramo Est, ma la condizione rimane comunque critica. Il livello di servizio è inaccettabile, la congestione è comunque elevata.

Questo può essere dovuto a diversi fattori:

- Errata modellazione della rete, in quanto il software Cube Dynasim non consente di tracciare una rete geometrica precisa, possono essere inseriti parametri relativi alla geometria delle traiettorie ma solo per quanto riguarda la velocità, la larghezza delle corsie, etc. non è possibile ad esempio inserire i valori dei raggi di immissione e uscita che condizionano fortemente il flusso in rotatoria. Il software consente solo di tracciare le traiettorie graficamente con una grande aleatorietà per quanto riguarda la loro effettiva posizione.
- La rotatoria a due corsie aumenta i punti di conflitto e l'immissione dei veicoli non è semplice, in quanto l'utente attende il gap fra due veicoli nell'anello per potersi immettere, questo genera rallentamenti e aumento della coda.

Da questa analisi è emerso che le rotatorie, anche se negli ultimi anni largamente utilizzate, non sempre risolvono tutti i problemi di congestione delle intersezioni, sarebbe quindi più opportuno realizzare, in corrispondenza dell'incrocio tra via Cà di Cozzi e Viale Caduti del Lavoro, un'intersezione a livelli sfalsati, mantenendo la continuità di via Cà di Cozzi in quanto è quella che presenta maggiori ritardi e conseguentemente elevati valori della coda. Oppure è possibile pensare ad una

risistemazione della rotatoria, aumentando il raggio e quindi passando ad una rotatoria classificata come non convenzionale perché presenterebbe un diametro maggiore di 50 m. In questo secondo caso si deve fare riferimento al criterio di progettazione basato sulle zone di scambio fondato sull'esecuzione di manovre che richiedono spesso notevoli spazi e che possono comportare la realizzazione di più corsie sulla corona giratoria. In particolare il D.M. 19/04/2006 afferma che *“per le manovre di scambio e immissione, la lunghezza delle corsie specializzate deve essere determinata secondo procedure basate sulla distribuzione probabilistica dei distanziamenti temporali tra i veicoli in marcia, su ciascuna corsia”*; si abbandono quindi il metodo di progettazione classico delle rotatorie secondo il quale i veicoli in immissione devono trovare un varco libero sulla corrente veicolare circolante sull'unica corsia dell'anello giratorio.

È opportuno condurre un'analisi più dettagliata del problema e analizzare quale, fra le due soluzioni, è quella che consente di migliorare l'attuale stato di congestione dell'intersezione.

Capitolo 6

Conclusioni

Nella presente trattazione è emerso, attraverso lo studio di un'intersezione a raso esistente (situata tra via Cà di Cozzi e viale Caduti del Lavoro) e del progetto proposto dalla società T, come non sia facile per il progettista riuscire ad ottenere soluzioni che garantiscano la funzionalità trasportistica dell'insieme e come non ci siano parametri geometrici chiari e definiti per la progettazione di una nuova rotatoria che possa garantire il completo funzionamento dell'intersezione.

La normativa a disposizione del progettista per realizzare una nuova intersezione è stata emanata in forte ritardo rispetto alle indicazioni del Nuovo Codice della Strada, ed esattamente, il decreto ministeriale è stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 24 luglio 2006 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione di intersezioni stradali"; a questo si affianca il Decreto 5 Novembre 2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade.

Il D.M. 19/04/2006 limita il suo valore solo alle nuove intersezioni, in attesa della definizione delle norme sugli adeguamenti delle strade esistenti: quindi, per il momento, nel caso d'interventi di adeguamento delle intersezioni esistenti, le norme citate devono costituire il riferimento principale per il progettista.

In questa trattazione, oltre a illustrare le principali caratteristiche delle rotatorie e le direttive presenti nel decreto, si è affrontato in modo diretto il problema progettuale di massima di tale tipologia d'intersezione, applicandolo a un caso reale di adeguamento di un'intersezione a rotatoria in modifica a quella progettata dalla società T.

Il caso esaminato è una rotatoria a cinque bracci ubicato in ambito extraurbano. Attraverso lo studio del territorio, dei flussi di traffico e l'utilizzo del software di elaborazione Cube Dynasim, si è cercato di mettere a confronto la soluzione della società T con quella nuova progettata, sia da un punto di vista geometrico che funzionale. Si è studiata una soluzione progettuale che ne potesse risolvere le problematiche, tenendo in conto il contesto in cui l'opera viene a inserirsi.

Dalle analisi condotte si è visto come la soluzione proposta migliora di poco il ritardo e la coda ottenuti dalla simulazione del progetto T, questo può essere dovuto a fattori dipendenti dal software, elencati in seguito, ma anche dalla difficoltà avuta nel progettarela.

Per la definizione delle caratteristiche geometriche si è fatto riferimento al D.M. 19/04/2006 che contiene le indicazioni per la progettazione delle intersezioni stradali a

raso, lineari e a rotatoria; purtroppo, tali indicazioni sono limitate e non aiutano il progettista nel processo di progettazione.

In particolare:

- La normativa fa riferimento alla sola carreggiata stradale senza attenzione alla città e al territorio, non specificando le prescrizioni per marciapiedi, alberi, piste ciclabili, parcheggi, concezione dello spazio stradale, etc. Sono quindi inadatte per la riqualificazione delle strade esistenti.
- Vengono elencate le diverse possibilità d'intersezione senza però indicarne diversità, criteri di scelta, convenienza d'uso.
- Nella classificazione tipologica delle intersezioni viene stabilito che non è possibile realizzare intersezioni tra strade confluenti a carreggiate separate governate da semafori, questo, però renderebbe viali e strade di tipo D con incroci semaforizzati già esistenti, obsoleti e illegali.
- La classificazione delle intersezioni è pressoché inutile e artificiosamente rigida, anche perché esistono ottimi esempi d'intersezioni disomogenee e in discontinuità gerarchica che funzionano in maniera corretta.
- Nella definizione tipologica delle intersezioni, non basta la dimensione per classificare e distinguere le tipologie di rotatoria, serve anche il volume di traffico, l'indicazione della possibilità di associare una rotatoria a uno svincolo, non è riportata le condizioni di fattibilità, non è resa comprensibile la convenienza e il confronto con altre tipologie d'intersezione quali semafori, svincoli, intersezioni a precedenza, etc.
- Non sono riportate le indicazioni utili per il trattamento degli apprestamenti pedonali e ciclabili, marciapiedi e isole separatrici accessibili obbligatori in rotatoria anche in assenza di pista ciclabile.
- Una normativa che prescrive sempre una sola corsia per le uscite, e un massimo di 2 corsie per le entrate, rischia di essere un inutile problema per i progettisti.
- Di difficile comprensione è anche la definizione dell'angolo β , è più chiaro il criterio del raggio di deflessione, che deve essere sempre minore di 80 m (rotatorie compatte) o inferiore a 100 m per grandi rotatorie. Non è specificato come valutare la deflessione su due bracci successivi.

- La normativa fa riferimento solo a criteri di visibilità planimetrica non citando invece anche altri criteri di leggibilità, riconoscibilità, percezione formale dell'intersezione.
- La definizione delle geometrie dei rami d'ingresso e uscita, delle transizioni non sono specificate.
- Gli aspetti trasportistici non sono approfonditi. È necessario assumere e acquisire, come supporto, teorie di calcolo trasportistico della capacità della rotatoria ed eventualmente dotarsi di un software di elaborazione dei dati.

Nel caso di studio si è scelto di operare una microsimulazione attraverso il software Cube Dynasim che presenta mancanze di seguito evidenziate:

- Il software Cube Dynasim non consente di tracciare una rete geometrica precisa, possono essere inseriti parametri riguardanti la geometria delle traiettorie ma solo per quanto riguarda la velocità, la larghezza delle corsie, etc. non è possibile ad esempio inserire i valori dei raggi d'immissione e uscita che condizionano fortemente il flusso in rotatoria. Il software consente solo di tracciare le traiettorie graficamente con una grande aleatorietà per quanto riguarda la loro effettiva posizione. Questo è una delle principali carenze che compromette notevolmente tutta la modellazione, soprattutto se non si dispone di una mappa di sfondo in formato autocad, ma si conoscono solo i parametri geometrici.
- A piccole variazioni della geometria e del posizionamento degli elementi identificativi dei Data Collectors per la raccolta dei dati, dei divieti di accesso, dei segnali di "dare la precedenza" si hanno notevoli cambiamenti nei risultati.
- La definizione dei cambi corsia non è chiara, seppur importante ai fini del risultato.
- Gli errori che si ottengono dalla simulazione non sono di facile comprensione e non c'è un buon metodo per risolverli, nel senso che il progettista deve, per tentativi, trovare la soluzione al problema.

Altri problemi sono stati trovati per quanto riguarda la visualizzazione della simulazione, ma non sono rilevanti per gli scopi della trattazione.

È evidente che, l'intersezione a rotatoria non sempre risolve tutti i problemi di congestione delle intersezioni e nel caso oggetto di studio si è dimostrato come una risistemazione a rotatoria non apporta i benefici sperati.

È possibile però optare per due soluzioni alternative scegliendo o di realizzare un'intersezione a livelli sfalsati, oppure aumentare il raggio della rotatoria passando così alla progettazione di una rotatoria non convenzionale che comprende l'analisi delle zone di scambio.

L'intersezione a livelli sfalsati consentirebbe la continuità di Via Cà di Cozzi, riducendone i ritardi e le code poiché i flussi di traffico provenienti dalla tangenziale e da Viale Caduti del Lavoro non interferirebbero con la corrente veicolare presente sul ramo Est.

L'intersezione a rotatoria non convenzionale, potrebbe portare benefici al ritardo e alla coda diminuendo i valori, perché la soluzione prevede l'allargamento della corona giratoria e conseguentemente del raggio esterno, permettendo una migliore immissione ed uscita dei veicoli e un più agevole flusso all'interno della rotatoria. Sono da tenere in considerazione però gli aspetti inerenti ai punti di conflitto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 19.04.2006 “*Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali*”
- [2] D.M. 5.11.2001 “*Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*”
- [3] S. Canale, N. Distefano, S. Leonardi, G. Pappalardo “*Progettare le rotatorie. Tecniche per la valutazione e la verifica delle intersezioni a circolazione a rotatoria*”
- [4] R.Mauro “*Il calcolo delle rotatorie*” , 2007
- [5] D.L. 285-1992 “*Nuovo Codice della Strada*” Gazzetta Ufficiale n.114 del 18/05/1992
- [6] G. Dondi, V. Vignali, M. Marinelli, DISTART Strade, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna “*Dispositivi di sicurezza ed arredi funzionali per le intersezioni stradali a raso*”
- [7] G.Dondi, A. Simone, DISTART Strade, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna “*Le caratteristiche delle pavimentazioni per le intersezioni stradali a raso*”
- [8] S. Leonardi “*Rotatorie stradali contro il rumore*”
- [9] M. C. Crisafulli, S. Leonardi “*Safety Review per rotatorie stradali*”
- [10] S. Canale, S. Leonardi, G. Pappalardo “*Rotatorie stradali come dispositivi di traffic calming*”

- [11] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale “*Studio a carattere prenormativo: Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali*” 10 Settembre 2001.
- [12] Tutorial Guide – Cube Dynasim (Citilabs)
- [13] Report n. FHWA-RD-00-067. “Roundabouts: an informational guide”. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. June 2000.
- [14] AASHTO, “A Policy on Geometric Design of Highways and Street”, USA, 2002.
- [15] G. Maternini, S. Foini “Le intersezioni stradali a raso”.
- [16] L. Quaglia “Critiche di base alla normativa sulle intersezioni urbane”, Le Strade, casa editrice la Fiaccola, pag. 76 del numero di Settembre 2007.

Riferimenti Internet:

- www.googleearth.com
- www.wikipedia.com
- www.highwaysafety.com
- www.webstrade.it
- www.stradelandia.it

GRAZIE ...

*Al Prof.Dondi , per avermi dato la possibilità di svolgere la tesi sotto la
sua supervisione...*

*A Cesare Sangiorgi e Guido Rossi per avermi prima aiutata e poi
sopportata in questi mesi...*

A Romanò per la disponibilità dimostrata...

*A mamma e papà, per avermi permesso di vivere quest'esperienza, senza
mai farmi mancare niente ...*

*A mio fratello, per le risate, per i momenti di svago e per esserci sempre
stato ...*

*Al nonno, perché con le sue buffonate ha distratto le mie giornate di
studio...*

*Ad Aiace, per essere sempre stato al mio fianco,anche quando ero davvero
insopportabile ...*

*Ai miei amici,a Elena, Giorgia, Zaggio, Apu per aver vissuto
quest'esperienza insieme, per aver condiviso momenti di felicità, perché mi
avete aiutata sempre ...*

*Infine ... un grazie a chi non è più con me, ma ho sentito sempre vicino e
mi ha dato la voglia di andare avanti.*