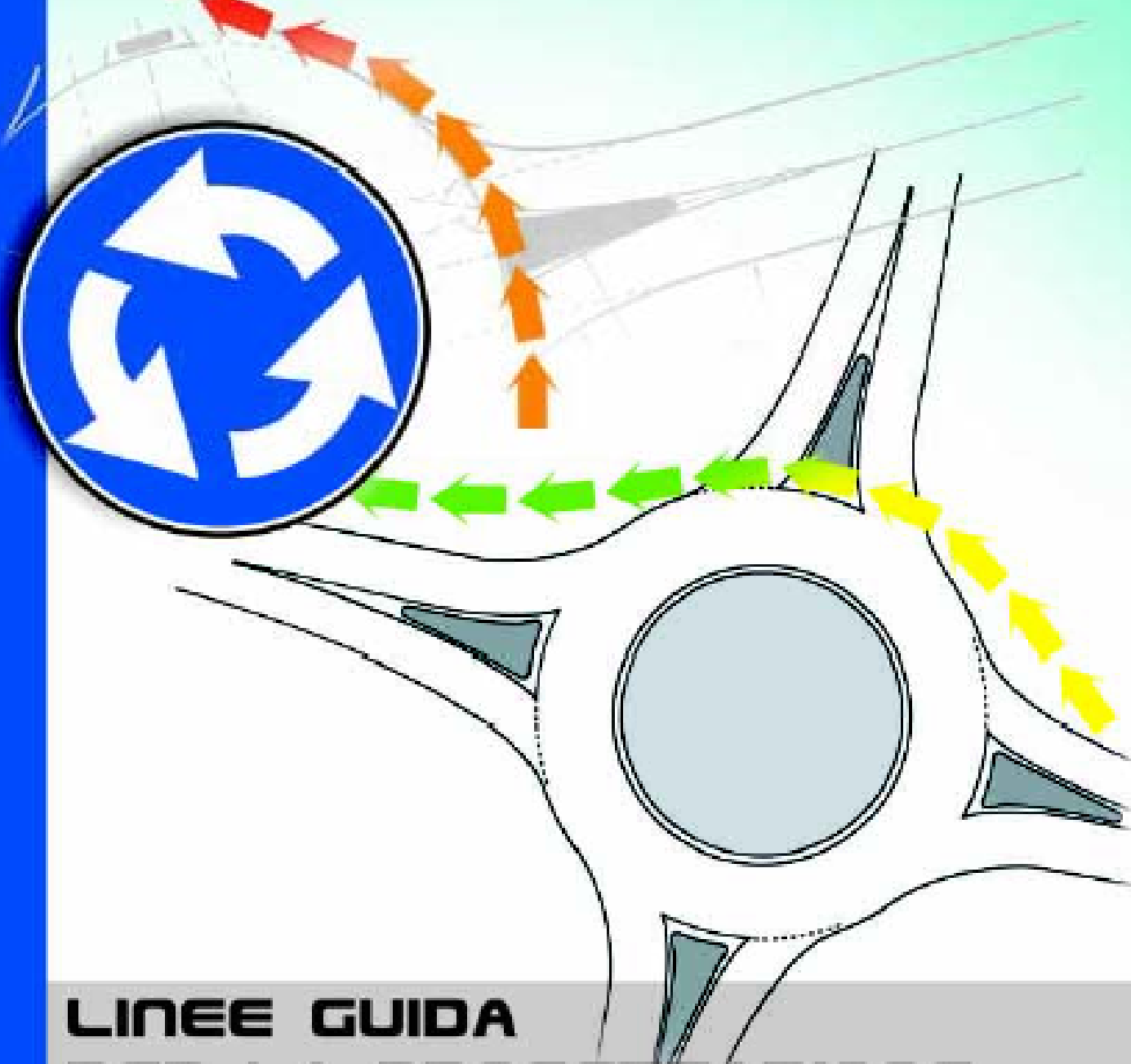


PROVINCIA DI PADOVA  
ASSESSORATO ALLA VIABILITÀ



# LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE E LA VERIFICA DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIE



**Assessorato  
alla Viabilità**

*Coordinamento generale per la Provincia di Padova :*  
**Ing. Pierluigi Corazza**

*Collaboratori :*  
Geom. Lorenzo Biancato  
Geom. Oscar Giacomello

*Autori :*



**Direttore tecnico : Ing. Claudio Rocco**  
**Progettista : Ing. G. B. Furlan**  
**Collaboratori : G. Galasso, M. Menegazzo, Q. Thai, R. Zanon**



## **LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE E LA VERIFICA DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIE**



## PRESENTAZIONE

Con la delibera di Giunta provinciale n. 389 reg. del 28/07/2003 la Provincia di Padova si è dotata di una propria, completa ed organica procedura per la valutazione dei criteri delle linee guida per la progettazione e la verifica delle intersezioni a rotatoria.

La valutazione di cui sopra è un metodo per procedere assumendo decisioni si basi scientifiche ed interdisciplinari ed assicurare il perseguimento di adeguati obbiettivi di tutela della sicurezza stradale, ed anche di miglioramento della qualità della vita umana diminuendo i congestionamenti del traffico e favorendo l'abbellimento architettonico ed urbanistico dei nostri centri.

E' certo che l'applicazione di questa nuova procedura comporta un nuovo e diverso modo di lavorare da parte delle Amministrazioni coinvolte, ma anche da parte dei soggetti, pubblici e privati, che intendono realizzare nuovi interventi o infrastrutture e dei professionisti che provvedono alla redazione dei relativi progetti.

Il Codice della Strada vigente non pone ostacoli alla realizzazione d'incroci a rotatoria con precedenza ai veicoli che percorrono l'anello ma nemmeno chiarisce le regole di realizzazione, demandando ai vari Enti gestori della viabilità l'organizzazione della circolazione. Attualmente sul territorio nazionale vi sono ancora incroci a rotatoria con l'obbligo di dare la precedenza a chi proviene da destra e rotatorie con precedenza alla circolazione sull'anello. le rotatorie di nuova realizzazione dovrebbero prevedere la precedenza all'anello, come previsto dalla direttiva dell'U.E. al fine di eliminare interpretazioni diverse da incrocio ad incrocio.

Si è pertanto resa opportuna la produzione della presente pubblicazione che riporta in modo organico ed aggiornato gli indirizzi allo scopo adottati dalla Provincia di Padova mediante l'individuazione, la raccolta, l'analisi critica di normative, esempi applicativi, prescrizioni tecniche ed operative, metodologie di calcolo e verifica. Inoltre vengono date delle indicazioni per valutare l'idoneità della rotatoria come soluzione di un'intersezione tra strade esistenti oppure anche per nuove viabilità di progetto.

Voglio, pertanto, ringraziare tutti coloro che hanno collaborato alla predisposizione del presente manuale che costituisce utile strumento di consultazione per tutti i soggetti interessati all'applicazione della materia.

*Assessore della Viabilità*  
Ing. Domenico Riolfatto

*Il Presidente*  
Dott. Vittorio Casarin



## INDICE

---

<b>1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>9</b>
<b>2 LE ROTATORIE.....</b>	<b>10</b>
2.1 DEFINIZIONI E CARATTERISTICHE.....	10
2.2 CAMPI DI APPLICAZIONE.....	15
<b>3 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI TRAFFICO.....</b>	<b>17</b>
3.1 LO STUDIO DEL TRAFFICO.....	17
3.1.1 Modalità per il dimensionamento e la verifica.....	17
3.1.2 Ricerca dell'ora di punta del traffico.....	18
3.1.3 Studio di traffico: fase preliminare.....	18
3.1.3.1 Documenti di pianificazione.....	19
3.1.3.2 Studi di traffico eseguiti per altre opere viarie in zone limitrofe.....	19
3.1.3.3 Monitoraggi continui del traffico.....	20
3.1.4 Reperimento dei dati: fase operativa.....	20
3.1.4.1 Tipi di conteggio.....	20
3.1.4.2 Il periodo del conteggio.....	21
3.1.4.3 Definizione dei flussi.....	21
3.1.4.4 Validazione dei dati del conteggio automatico.....	22
3.1.4.5 Matrice Origine – Destinazione.....	23
3.1.5 Tipologia e formato dei dati.....	24
3.1.6 Previsioni per nuove infrastrutture viarie.....	24
3.1.6.1 Stima dei traffici.....	25
3.1.6.2 Stima della matrice O/D.....	26
3.1.6.3 Infrastrutture non locali.....	27
3.2 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ E DEGLI INDICI PRESTAZIONALI.....	28
3.2.1 Capacità di una rotatoria.....	28
3.2.2 Calcolo della "capacità di un'entrata".....	30
3.2.2.1 Il metodo francese.....	30
3.2.2.2 Riserva di capacità.....	35
3.2.2.3 Confronto tra il metodo francese e le formulazioni usate da altri paesi europei per il calcolo della capacità.....	37
3.2.3 Calcolo della "capacità semplice" e della "capacità totale".....	40
3.2.4 Stima della lunghezza delle code e del tempo medio di attesa.....	41
3.3 LA MICROSIMULAZIONE DEL TRAFFICO.....	45
3.3.1 Dati forniti dalla microsimulazione.....	46
3.3.1.1 Dati per valutazioni e confronti.....	47
3.3.2 Casi in cui si rende consigliabile l'uso del microsimulatore.....	49



3.3.2.1 Caso della rotatoria standard.....	49
3.3.2.2 Caso delle rotatorie non standard.....	49
3.3.2.3 Altri campi d'applicazione: il rapporto con i cittadini.....	50
<b>4 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE ELEMENTI DI PROGETTAZIONE.....</b>	<b>51</b>
4.1 SAGOMA LIMITE INSCRIVIBILE IN CURVA.....	51
4.2 CONCETTO DI "DEFLESSIONE" .....	55
4.3 ELEMENTI GEOMETRICI DELLA ROTATORIA.....	56
4.3.1 Centro della rotatoria.....	56
4.3.2 Isola centrale.....	58
4.3.3 Anello di circolazione.....	59
4.3.4 Entrate.....	59
4.3.5 Uscite.....	60
4.3.6 Isola separatrice.....	61
4.3.7 Tabella riassuntiva.....	62
4.4 COMPATIBILITÀ DELLA GEOMETRIA CON I VOLUMI E TIPOLOGIA DI TRAFFICO.....	63
<b>5 SICUREZZA .....</b>	<b>65</b>
5.1 BENEFICI DOVUTI ALL'UTILIZZO DELLE ROTATORIE.....	65
5.2 PROTEZIONE DELL'UTENZA DEBOLE.....	68
5.2.1 Pedoni.....	68
5.2.2 Ciclisti.....	72
5.2.2.1 Piccole rotatorie a traffico misto e velocità moderata.....	73
5.2.2.2 Rotatorie con pista ciclabile separata dalla sola striscia bianca di delimitazione.....	74
5.2.2.3 Rotatorie con pista ciclabile separata dalle corsie veicolari e diritto di precedenza per i ciclisti.....	75
5.2.2.4 Rotatorie con pista ciclabile separata dalle corsie veicolari e senza diritto di precedenza per i ciclisti.....	76
5.3 VISUALI LIBERE DA GARANTIRE.....	77
<b>6 ELEMENTI DI COMPLETAMENTO.....</b>	<b>86</b>
6.1 INDICAZIONI SULLE PAVIMENTAZIONI.....	86
6.2 ELEMENTI DI ARREDO URBANO.....	89
6.3 SEGNALETICA.....	90
6.3.1 Segnaletica orizzontale.....	90



6.3.2 Segnaletica verticale.....	92
6.3.2.1 Segnaletica verticale da collocare nell'isola centrale.....	93
6.3.2.2 Segnaletica verticale da collocare nelle isole di separazione.....	94
6.3.2.3 Segnaletica verticale da collocare lungo i rami della rotatoria.....	96
6.4 IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE.....	99
6.4.1 Generalità sugli impianti di pubblica illuminazione.....	100
6.4.1.1 requisiti di carattere illuminotecnico.....	100
6.4.1.2 Specifiche dell'impianto elettrico.....	103
6.4.2 Illuminazione delle rotatorie.....	104
6.4.2.1 requisiti di carattere illuminotecnico.....	105
6.4.2.2 configurazioni di impianti.....	108
<b>7 STUDIO TIPO DI INTERSEZIONE A ROTATORIA.....</b>	<b>111</b>
7.1 SEQUENZA PROGETTUALE.....	111
7.1.1 Verifica di fattibilità.....	114
7.1.2 Analisi del traffico.....	115
7.1.3 Definizione geometrica della rotatoria.....	118
7.1.3.1 Schede di progetto.....	121
7.1.4 Verifica della capacità e delle prestazioni.....	136
7.1.5 Verifica della visibilità.....	142
7.1.6 Elementi di completamento.....	148
7.1.6.1 Pavimentazione.....	148
7.1.6.2 Segnaletica.....	149
7.1.6.3 Illuminazione.....	151
7.2 ESEMPIO APPLICATIVO.....	152
<b>8 APPENDICE.....</b>	<b>163</b>
8.1 CHECK LIST DI CONTROLLO DA APPLICARE.....	163
8.2 TAVOLE ESEMPLIFICATIVE.....	164
8.3 BIBLIOGRAFIA.....	181



## 1 INTRODUZIONE

La struttura delle “*linee guida per la progettazione di rotatorie*” è suddivisa nelle seguenti parti:

1. La prima parte, composta dai capitoli 2-6, evidenzia in modo descrittivo le varie problematiche attinenti alla progettazione di questo tipo d'intersezione;
2. La seconda parte, composta dal capitolo 7, evidenzia la metodologia di progettazione di rotatorie del tipo moderno, mediante tabelle riassuntive dei concetti espressi nella prima parte, l'individuazione di alcune tipologie di rotatorie progettate in base alla capacità, alle caratteristiche delle strade confluenti e al tipo di traffico. Infine è stato inserito un esempio applicativo per una migliore comprensione dell'iter progettuale indicato.
3. Infine nel capitolo 8 è stata introdotta una check-list utile per il controllo del flusso progettuale e i riferimenti bibliografici.



## 2 LE ROTATORIE

### 2.1 DEFINIZIONI E CARATTERISTICHE

La rotatoria è una particolare intersezione a raso, caratterizzata dalla presenza di un'area centrale circolare e inaccessibile, circondata da un anello, percorribile in una sola direzione ed in senso antiorario dal traffico proveniente da più entrate. Questo termine è stato anche esteso, come si vedrà in seguito, anche a tipi di sistemazione a raso che contemplano una zona centrale completamente, o in parte, fisicamente non interdetta, pur conservando, sostanzialmente, le caratteristiche di circolazione e di disciplina del traffico.

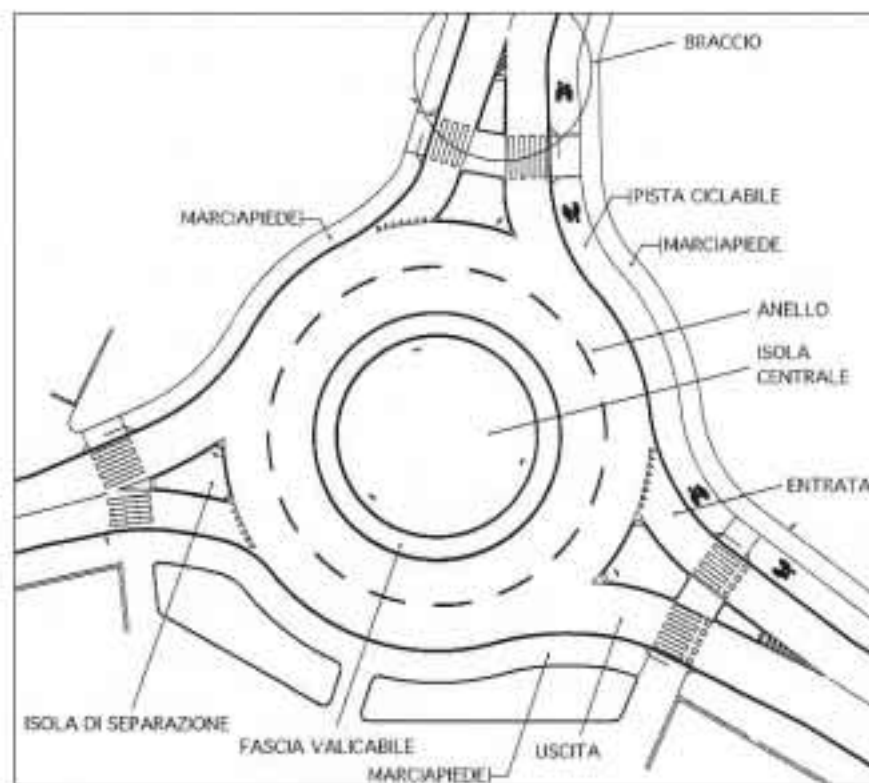


Figura 2-1 - Definizione degli elementi componenti la rotatoria. [6]

Nella Figura 2-1 sono evidenziati gli elementi componenti la rotatoria e per maggiore completezza di seguito riportiamo le definizioni dei singoli elementi:



- **ANELLO:** si intende la carreggiata che circonda l'isola centrale, ad una o più corsie, percorsa dai veicoli in senso antiorario.
- **ISOLA CENTRALE:** è la parte più interna del sistema a rotatoria, generalmente di tipo non valicabile e di forma circolare. La dimensione dell'isola centrale è influenzata dalla necessità di ottenere una sufficiente deviazione per i veicoli che attraversano diametralmente la rotatoria. Dove è possibile limitare la velocità con altri interventi non esiste alcun limite alla dimensione. La forma delle isole più grandi può non essere circolare per adattarsi a particolari casi, in ogni caso le isole di dimensioni minori del raggio di 5 metri dovrebbero essere circolari.
- **FASCIA VALICABILE:** generalmente è presente nelle rotatorie di piccolo diametro ed è una corona circolare che circonda l'isola centrale. Tale fascia serve a facilitare le manovre dei mezzi pesanti lungo l'anello, può essere semplicemente disegnata con segnaletica orizzontale, oppure pavimentata con materiale lapideo, diverso dalla pavimentazione dell'anello.
- **BRACCIO:** rappresenta quella porzione di asse stradale che converge verso l'anello.
- **ENTRATA:** è la parte terminale della carreggiata di ogni singolo braccio che viene utilizzata per entrare nella rotatoria. L'entrata è separata dall'anello dalla segnaletica orizzontale di dare la precedenza.
- **USCITA:** è la parte di carreggiata di ogni singolo braccio che viene utilizzata per uscire dalla rotatoria. L'uscita non risulta mai separata dall'anello con segnaletica orizzontale.
- **ISOLA DI SEPARAZIONE:** è una piattaforma costruita su un ramo d'intersezione tra la corsia in entrata e quella di uscita. In alcuni casi può servire da rifugio ai pedoni e costringe i veicoli ad una deflessione dalla loro traiettoria. In ambito urbano, se manca lo spazio, oppure se si tratta di sbocchi di vie con poco traffico, le isole di separazione talvolta sono limitate ad una semplice segnaletica orizzontale.

Con riferimento alla classificazione funzionale delle strade, definita dal Codice della Strada [4] e recepita dalle “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”[1], la rotatoria, come particolare tipologia d'intersezione a raso, è ammessa come soluzione dell'incrocio solo fra alcune categorie di strade (vedi Figura 2-2) [2], che sono di seguito elencate:

- Strade di categoria C – extraurbane secondarie;
- Strade di categoria E – urbane di quartiere;
- Strade di categoria F locali – ambito urbano ed extraurbano.

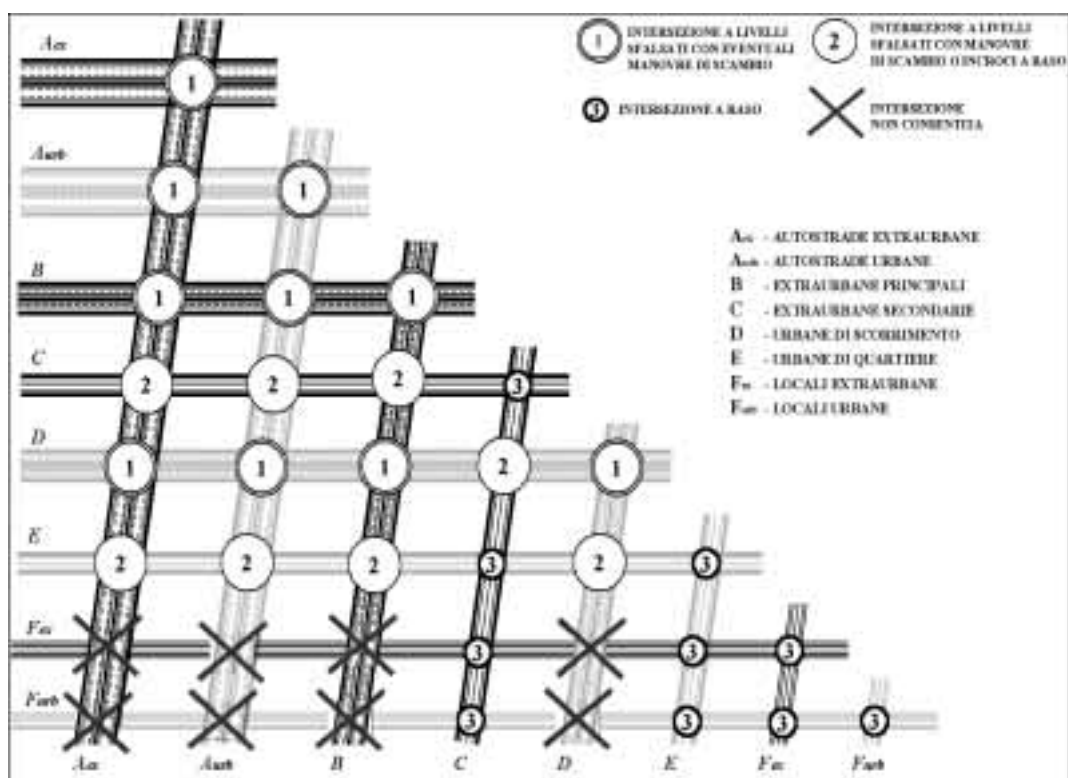


Figura 2-2 – Organizzazione delle reti stradali e definizione delle intersezioni ammesse. [2]

Aspetto fondamentale che caratterizza la rotatoria rispetto ad altri tipi di intersezione è che questa è in grado di controllare la velocità all'interno dell'incrocio, mediante l'introduzione nella geometria del raccordo di una deflessione, che impedisce l'attraversamento con una traiettoria diretta. Si costringe così l'utente a limitare la velocità indipendentemente dalla segnaletica stradale (Figura 2-3).

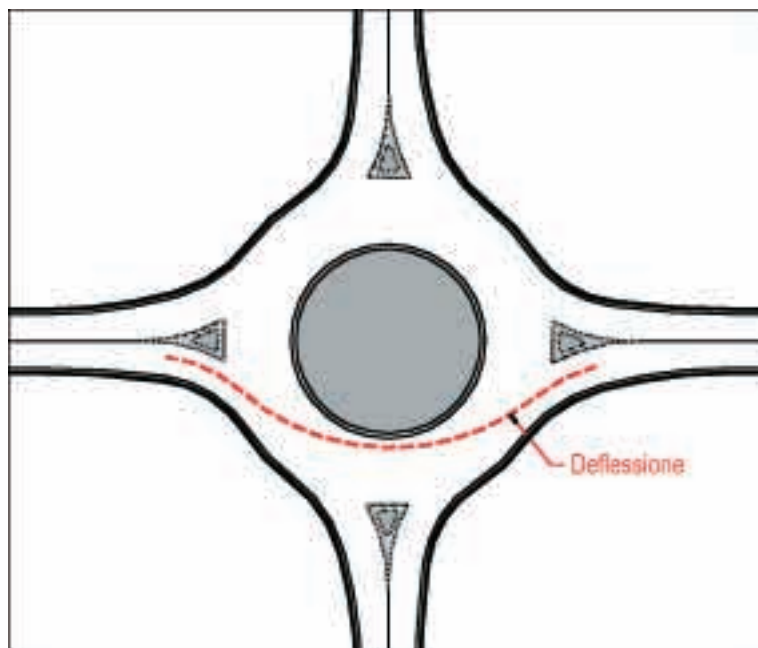


Figura 2-3 – Deflessione della traiettoria di un veicolo in rotatoria.

A seconda delle dimensioni del diametro della circonferenza esterna, le rotatorie si possono suddividere nelle seguenti categorie (Figura 2-4):

- ☐ Mini rotatorie con diametro esterno compreso tra 14 e 26 metri;
- ☐ Rotatorie compatte con diametro esterno compreso tra 26 e 40 metri;
- ☐ Rotatorie medie con diametro esterno compreso tra 40 e 60 metri;
- ☐ Rotatorie grandi con diametro esterno maggiore di 60 metri.

Le mini rotatorie possono ulteriormente suddividersi in:

- ☐ Mini rotonda con isola centrale sormontabile;
- ☐ Mini rotonda con isola centrale semisormontabile.

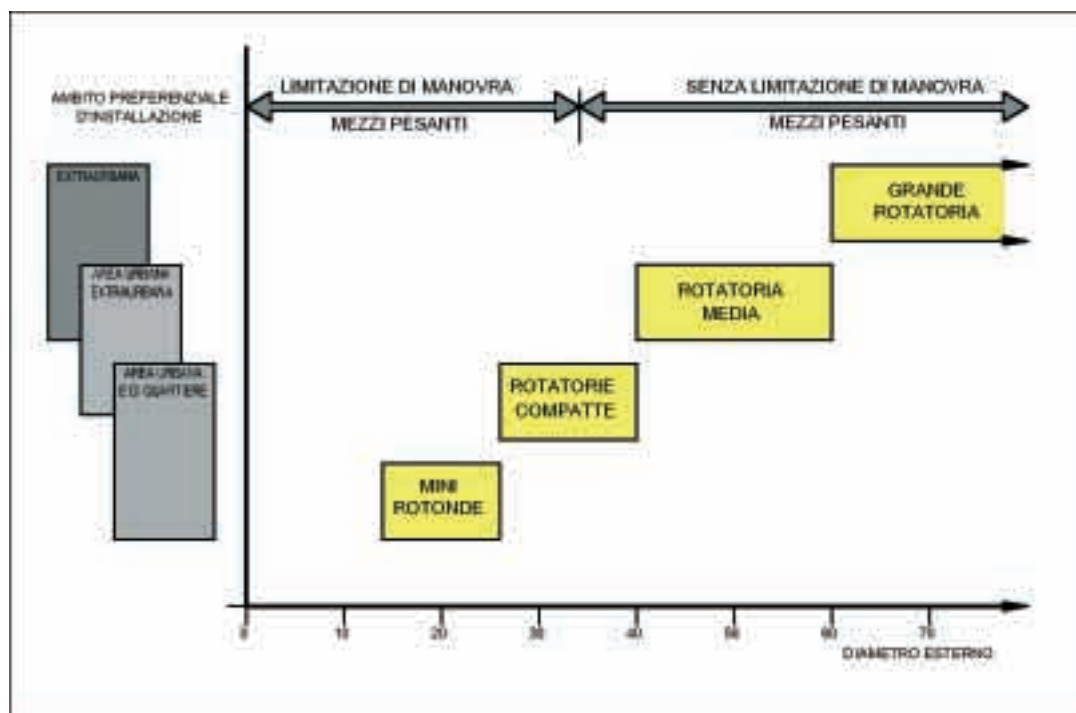


Figura 2-4 – Classificazione delle rotatorie in base al diametro esterno e all'ambito d'impiego.

L'utilizzo della mini-rotonda è generalmente riservato al centro urbano e alle aree residenziali, che sono caratterizzati da un basso volume di traffico veicolare (composto in prevalenza da mezzi leggeri), da una velocità di transito ridotta e da una buona visibilità notturna. Le mini rotonde permettono la trasformazione di incroci tradizionali, utilizzando spazi ridotti, portando così alcuni benefici propri delle rotatorie classiche (ad esempio in primo luogo la riduzione della velocità nell'incrocio).

Le rotatorie compatte vengono prevalentemente utilizzate in ambito urbano; esse sono indicate per una viabilità che non si trovi lungo linee importanti del trasporto pubblico e caratterizzata dalla bassa presenza di traffico pesante (inferiore al 5%). Esse dovranno essere di tipo semi-sormontabili quando il diametro esterno ha un valore al di sotto dei 30 m, per consentire l'inscrivibilità e le manovre dei mezzi pesanti.

Le rotatorie medie vengono usate sia in ambito urbano che extraurbano; esse sono adeguate per le viabilità interessate da un rilevante passaggio di mezzi pesanti.

Le rotatorie di grande diametro vengono adottate prevalentemente quando sono inserite in uno svincolo a più livelli. In questo caso la dimensione del diametro risulta condizionata dalla presenza del sottopassaggio o del soprapassaggio.



## 2.2 CAMPI DI APPLICAZIONE

La decisione di sistemare un incrocio a rotatoria si basa, oltre che su criteri di gestione del traffico (capacità e livello di fluidità dell'intersezione), anche su criteri di sistemazione urbanistica. Infatti la costruzione di una rotonda può risultare conveniente nei seguenti casi:

- quando si vuole evidenziare l'entrata di una località, di un quartiere o di uno spazio di transizione tra tessuti urbani morfologicamente differenti;
- nell'intersezione di tre o quattro rami, quando le portate di svolta a sinistra e di attraversamento della strada secondaria non sono trascurabili rispetto a quelle della strada principale;
- in un incrocio con più di quattro rami;
- quando si vuole ridurre l'inquinamento di origine veicolare attraverso la fluidificazione del traffico e la riduzione delle manovre di "stop and go";
- nella riduzione dell'impatto acustico attraverso la riduzione delle velocità veicolare e l'impostazione di un modello di guida meno aggressivo;
- nella sistemazione di incroci dove gli incidenti si verificano ripetutamente, ad esempio a causa dell'elevata velocità. Vari studi hanno dimostrato che, con l'adozione dello schema circolare, si consegue in genere un miglioramento della sicurezza con un decremento degli incidenti;
- nel caso di intersezioni dove il perditempo causato dal semaforo sarebbe maggiore. In molte situazioni le rotatorie offrono capacità simili a quelle del semaforo ma operano con minor perditempo e con maggior sicurezza, in particolare nei periodi in cui il traffico non è intenso;
- come terminale di arterie a carreggiate separate di assi di viabilità primaria per connessione, rispettivamente, alla viabilità extraurbana ordinaria ed a quella urbana. In queste situazioni di transizione tra arterie di categorie diverse, le rotatorie possono esercitare una funzione di condizionamento sull'utenza, inducendo alla moderazione graduale della velocità ed alla assunzione progressiva di idonee regole di guida.

Non sempre però è possibile usufruire dei vantaggi conseguibili con la realizzazione delle rotatorie. In particolare esistono alcuni casi in cui l'adozione di una rotatoria è tecnicamente difficile se non addirittura controproducente.

Le situazioni di difficoltà più evidenti sono dettate:



- dalla mancanza di spazio per poter sviluppare in modo corretto il dimensionamento della rotatoria per problemi orografici, di espropri o di ricollocazione dei sottoservizi;
- dalla regolazione centralizzata e diretta del traffico che interessa ampie aree e consente la programmazione di precedenza per determinati flussi veicolari ed il trattenimento di altri. La caratteristica di non gerarchicità per i flussi in rotatoria e l'impossibilità di incentivare o disincentivare itinerari o componenti di traffico a partire dall'ingresso nella connessione, rendono la presenza dello schema circolare interposto tra altri tipi di intersezione, non compatibile con questi moderni criteri di gestione centralizzata dei flussi. Ciò si traduce nella inconciliabilità delle rotatorie con successioni di incroci regolati da semafori a onda verde;
- dalla frequente presenza di traffico di veicoli pesanti e carichi eccezionali e la mancanza di spazio per garantire un corretto dimensionamento della struttura;
- dalla presenza, a valle di alcuni rami della rotatoria, di sistemi di controllo del traffico che potrebbero causare una colonna che risale fino ad intasare l'anello;
- dalla presenza di strade con caratteristiche di volumi di traffico molto differenti; in generale è sconsigliato l'utilizzo della rotatoria quando il rapporto tra flusso su arteria secondaria e quello sull'asse principale è inferiore al 20%;
- dall'incremento, oltre il limite della tollerabilità, della lunghezza dei percorsi pedonali in ambito urbano;
- dalla presenza di condizioni topografiche che non permettono di ottenere delle distanze di visibilità sufficienti per la sicurezza dell'utente.



### 3 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI TRAFFICO

#### 3.1 LO STUDIO DEL TRAFFICO

##### 3.1.1 Modalità per il dimensionamento e la verifica

Il dimensionamento della rotatoria e la sua verifica saranno da eseguirsi prendendo in considerazione le condizioni più gravose per la nuova infrastruttura.

La situazione da prendere in esame è la fascia oraria in cui si ha la peggiore combinazione di flussi diretti all'incrocio e di manovre di svolta nell'incrocio. Il funzionamento della rotatoria, infatti, non dipende soltanto dal numero di veicoli che vi accedono, ma anche dalle manovre che eseguono e dalla direzione da cui escono. E' riportato un esempio in Figura 3-1: il flusso di 500 veq/h che impegna la rotatoria solo per 1/4 dell'anello ha meno impatto di quello inferiore – 400 veq/h – che però impegna la rotatoria per 3/4 dell'anello.



Figura 3-1 – Rete di esempio per la valutazione dell'impatto dei flussi di traffico.

La fascia oraria con le condizioni più gravose si definisce ora di punta; le condizioni più sfavorevoli hanno come conseguenza la minore capacità residua per gli accessi. Nell'ora di punta vi saranno quindi i maggiori accodamenti all'accesso ed i perditempo più elevati.





### 3.1.2 Ricerca dell'ora di punta del traffico

In una situazione di viabilità ordinaria la ricerca delle condizioni più gravose di traffico si effettua analizzando le ore di punta del mattino e della sera. Nel caso in cui la rotatoria si trovi in un particolare contesto (per esempio l'accesso di un grande complesso industriale con molti dipendenti, oppure un centro commerciale con elevato numero di clienti) sarà necessario verificare anche altre fasce orarie: l'inizio o fine turno dei dipendenti, oppure l'ora di picco della clientela del centro commerciale. Questi periodi a traffico elevato non coincidono necessariamente con i picchi di maggior traffico sulla viabilità ordinaria. Dato che la punta di traffico sarà determinata dalla massima combinazione di traffico sulla viabilità ordinaria e traffico legato all'insediamento, è possibile che l'ora di punta, in quel particolare contesto, ricada al di fuori delle comuni ore di punta della viabilità.

Lo studio, in ogni caso, si deve svolgere in base ai picchi giornalieri, quindi non è necessario considerare eventi a frequenza più sporadica (mercati settimanali, eventi sportivi, celebrazioni religiose,...), a meno che non sia esplicitamente richiesto da leggi nazionali o regionali. Un esempio è lo studio d'impatto per i centri commerciali, in cui si deve considerare l'effetto del traffico di punta settimanale<sup>2</sup>.

La determinazione dell'ora di punta e la quantificazione dei traffici si svolge mediante l'esecuzione di uno studio di traffico.

### 3.1.3 Studio di traffico: fase preliminare

Prima di iniziare la fase operativa dello studio è necessario acquisire ed analizzare la documentazione esistente. Sono quelle informazioni, anche se non complete, che forniscono gli elementi di partenza.

---

<sup>2</sup>La normativa a cui fare riferimento per la Regione Veneto è la LR n° 37 del 9 agosto 1999 "Norme di programmazione per l'insediamento di attività commerciali produttive nella Regione Veneto", BUR n° 69/1999, la deliberazione della Giunta Regionale n° 4664 del 28 dicembre 1999 "Studi di viabilità per le grandi e medie strutture di vendita. Direttive per la presentazione della documentazione", BUR n° 8/2000 e il regolamento regionale n° 1 dell'11 marzo 2002 "Disciplina degli esercizi polifunzionali", BUR n° 30/2002.



### 3.1.3.1 DOCUMENTI DI PIANIFICAZIONE

I documenti di pianificazione, per esempio il Piano Urbano del Traffico, il Piano Provinciale della Viabilità, il Piano Urbano della Mobilità, contengono studi di traffico.

Nel caso migliore la zona d'intervento è specificamente citata in tali documenti, a volte già con studi ed indagini. Altrimenti i documenti contengono inquadramenti generali, che consentono comunque di estrapolare dati validi anche sull'area in esame. A volte è descritta la fascia oraria in cui sono previsti i maggiori traffici: questo dato può essere molto utile per orientarsi nella ricerca dell'ora di punta.

Va anche tenuto conto che i documenti di pianificazione (Piani Urbani del Traffico, ecc.) sono sempre riferiti all'epoca delle loro pubblicazioni e vanno quindi verificati nelle condizioni attuali. Il materiale potrebbe risultare datato oppure possono essere intervenute nel frattempo nuove opere (apertura di una tangenziale, nuovo cavalcavia, miglioramento dell'offerta di trasporto pubblico, nuove zone commerciali e residenziali...) con modifica dell'assetto dei traffici. In tale caso i dati non sono più utilizzabili; altrimenti, con una situazione infrastrutturale identica all'attuale, si possono riutilizzare applicando opportuni coefficienti. I tassi di crescita annua della mobilità da adottare in via indicativa sono i seguenti:

- 2 % annuo per i traffici extraurbani;
- 1 % annuo per i traffici urbani<sup>3</sup>.

### 3.1.3.2 STUDI DI TRAFFICO ESEGUITI PER ALTRE OPERE VIARIE IN ZONE LIMITROFE

Possono contenere informazioni su alcuni assi viari interessati dalla nuova opera in esame, ma difficilmente potranno fornire tutte le indicazioni necessarie. Sono dati comunque utili per le verifiche.

---

<sup>3</sup>Tali valori sono indicativi e riferiti ad una situazione generale. Si consiglia di fare riferimento a serie storiche a disposizione. Per esempio si possono reperire dati sugli incroci semaforizzati, confrontare documenti di pianificazione di anni diversi oppure fare riferimento a tassi di crescita quando citati nei documenti di pianificazione.



### 3.1.3.3 MONITORAGGI CONTINUI DEL TRAFFICO

In alcuni siti sono permanentemente attive delle apparecchiature contatraffico, ad esempio nei semafori con sistemi di regolazione dei tempi in funzione del traffico: in questo caso vi sono appositi rilevatori che misurano il traffico diretto all'incrocio e permettono ad un elaboratore di gestire in tempo reale i tempi di verde per i vari rami. Se la rotatoria dovesse sorgere in sostituzione di un incrocio semaforizzato con questo tipo di regolazione, sarebbero a disposizione delle serie di dati molto complete.

### 3.1.4 Reperimento dei dati: fase operativa

Molto difficilmente i documenti descritti al precedente paragrafo possono riportare esaurientemente l'entità del traffico veicolare, la composizione del traffico (leggeri/pesanti/due ruote) e i flussi di svolta.

E' quindi in genere necessario ricorrere ad una campagna di conteggi per acquisire i dati mancanti (verificando nel frattempo anche quelli già a disposizione).

#### 3.1.4.1 TIPI DI CONTEGGIO

I conteggi sono di due tipi: manuali o automatici.

In una campagna di conteggio automatico si installano dei rilevatori sulla carreggiata. Si tratta di solito di piastre rettangolari, di dimensioni inferiori al mezzo metro, applicate temporaneamente sull'asfalto: sono sormontabili dai veicoli e resistono a condizioni di umidità, elevata temperatura dell'asfalto o perdita di inquinanti.

All'interno vi è un sensore che registra il passaggio dei veicoli e un microprocessore con memoria, collegabile poi a un PC in fase di recupero dati. Il contatore memorizza ora di passaggio, lunghezza e velocità di ogni veicolo. I dati sono poi presentati per intervalli di tempo: si ottengono quindi somme di veicoli, ripartite per gruppi di lunghezza o di velocità, riferite a periodi di 10 minuti, di mezz'ora, di un'ora o di altri intervalli definibili dall'utente. Il contatore resta attivo in maniera continuativa almeno un paio di giorni; la durata della memoria è in funzione del numero di dati che si vogliono raccogliere e degli intervalli di aggregazione. Ad esempio, il numero e le caratteristiche dei veicoli transitati in 6 intervalli di 10 minuti occupano molta più memoria di un solo dato riferito ai transiti dell'intera ora. È opportuno raccogliere i dati con una



precisione riferita almeno al quarto d'ora.

Un conteggio manuale è fatto di persona dai rilevatori, che a bordo strada contano i veicoli e annotano anche altre informazioni. Le campagne di conteggio manuale permettono di acquisire maggiori dati (come descritto ai capitoli successivi), ma richiedono un impegno economico più gravoso dei conteggi automatici.

#### **3.1.4.2 IL PERIODO DEL CONTEGGIO**

Per conoscere l'entità dei traffici ed individuare l'ora di punta va eseguito un conteggio: si va a monitorare il traffico lungo l'arco dell'intera giornata, raccogliendo dati sia per l'ora di punta del mattino che della sera.

I conteggi si fanno durante l'arco di "giornate medie", nelle quali non si presentano fattori che influenzano i valori normali di traffico. Per esempio:

- ☐ presenza di mercati settimanali (afflusso maggiore della media, eventuali chiusure al traffico di strade interessate dal mercato);
- ☐ giorni di chiusura di esercizi commerciali (afflusso minore della media, assenza di mezzi pesanti per rifornimenti magazzini);
- ☐ giorni antecedenti o successivi a festività, fine settimana, ponti, vacanze lavorative (afflusso maggiore della media).

#### **3.1.4.3 DEFINIZIONE DEI FLUSSI**

L'entità dei flussi di traffico si ricava generalmente con un conteggio automatico, vista la necessità di raccogliere dati in via continuativa per durate elevate. Si porrà un'apparecchiatura contatraffico su ogni corsia delle strade che convergono all'incrocio. Le rilevazioni vanno effettuate per almeno due giorni consecutivi.

Il risultato sarà una serie di andamenti di questo genere:

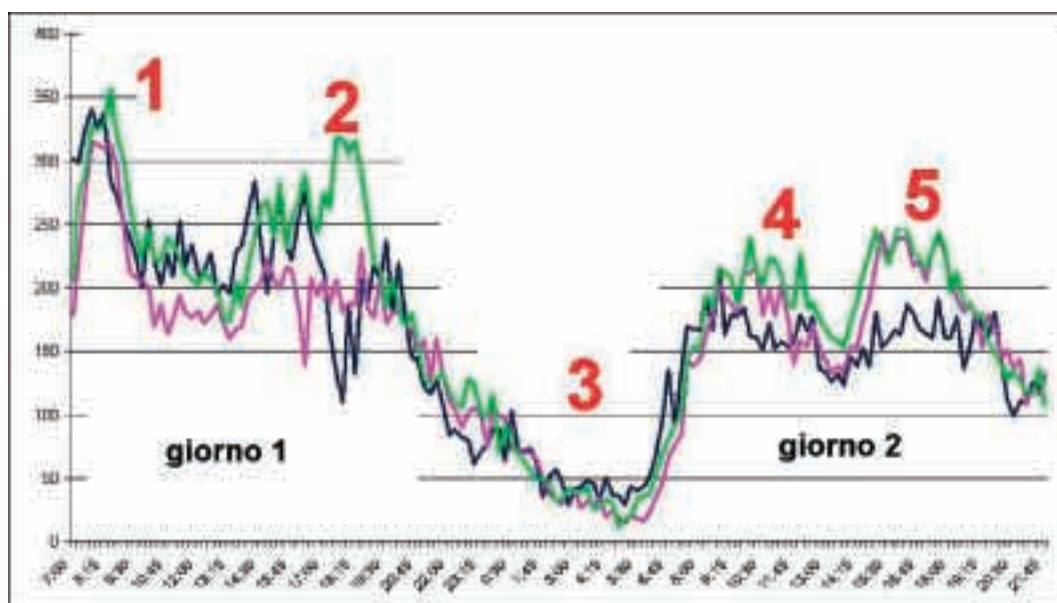


Figura 3-2 –Esempio di andamento dei traffici nell’arco di 2 giorni di rilievo.

I punti 1 e 2 rappresentano le ore di punta del mattino e della sera del primo giorno; il punto 3 rappresenta la fase di morbida serale e notturna e i punti 4 e 5 rappresentano le due ore di punta del giorno successivo. Dall’analisi del grafico, inoltre, si vede che i dati riferiti alla prima giornata sono più elevati degli altri: occorre analizzare se la differenza è frutto di eventi accidentali (incidenti, scioperi, ...), oppure se vi sono delle valide basi per giustificare tale differenza.

Questi dati permettono di identificare le ore di punta, ma non danno alcuna informazione sui flussi di svolta, a meno che non vi siano corsie dedicate per le varie svolte e che non sia stata installata un’apparecchiatura contatraffico per ognuna delle corsie.

#### 3.1.4.4 VALIDAZIONE DEI DATI DEL CONTEGGIO AUTOMATICO

E’ buona norma verificare al termine della campagna di conteggio se per caso vi siano stati eventi che hanno potuto condizionare le letture. Tale ciclo di verifiche prevede i contatti con le Forze dell’Ordine per sincerarsi dell’assenza d’incidenti in luoghi limitrofi (e tanto più soprattutto nell’incrocio in esame); altri contatti con gli Enti di trasporto pubblico per verificare che non vi siano stati scioperi, limitazioni del servizio, guasti tecnici o altri eventi che hanno diminuito l’offerta di trasporto pubblico a favore dell’auto. Attenzione pure a cantieri stradali eccezionali, come per esempio rottura di condutture, riparazioni d’urgenza, black-out o malfunzionamenti di incroci semaforici, ecc. Ultimo aspetto, ma non meno importante, riguarda le condizioni atmosferiche: bisogna



evitare che i conteggi siano eseguiti con condizioni climatiche molto sfavorevoli, per esempio durante precipitazioni di forte entità.

E' anche importante confrontare tra loro i dati dei vari contatori: se in uno dei rami in accesso all'incrocio si riscontra un traffico molto superiore o molto inferiore a quello degli altri rami, e non risulta che in realtà vi siano differenze elevate tra le varie correnti, è possibile che le misurazioni di uno dei contatori siano state falsate.

#### 3.1.4.5 MATRICE ORIGINE – DESTINAZIONE

La matrice origine / destinazione è l'obiettivo della seconda fase di indagine. Al termine della prima fase si ha un'indicazione dei flussi di traffico ma non si conoscono le manovre di svolta una volta impegnato l'incrocio. Possono essere a disposizione solo alcuni dati, nel caso in cui vi siano corsie specifiche per la manovra di svolta e che su di essa sia stato installato un contatore di traffico.

La campagna di conteggio manuale permette di supplire a questa mancanza, in quanto le persone a bordo strada possono annotare il passaggio dei veicoli in transito differenziandoli per la direzione scelta. La durata di una campagna di conteggio manuale, più costoso, è meglio sia limitata alla fascia oraria di punta.

Per individuare la fascia oraria di punta si procede con l'analisi dei risultati dei conteggi automatici, producendo uno schema come nella seguente Figura 3-3.

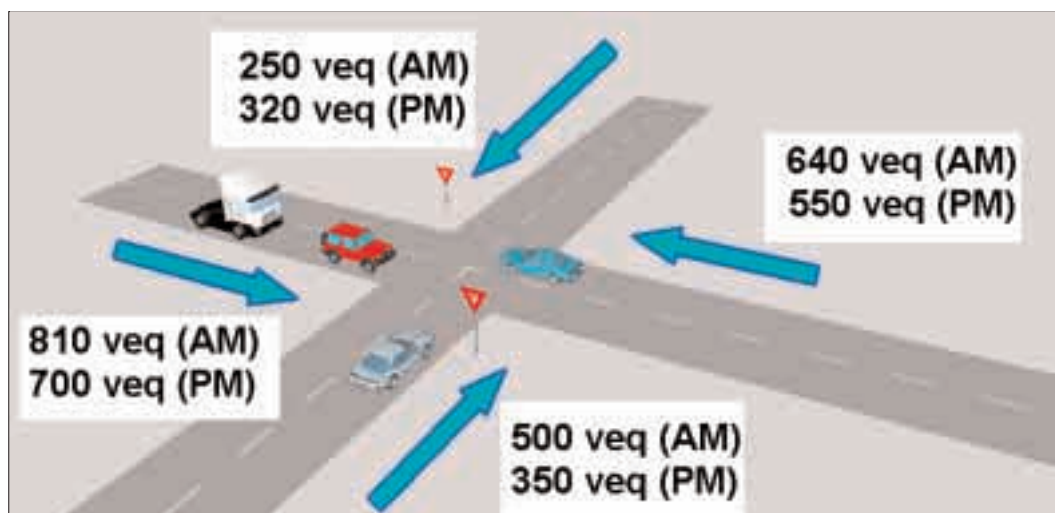


Figura 3-3 –Dati a disposizione prima della stesura della matrice O/D.

A questo punto occorre decidere se il conteggio manuale per l'individuazione delle direzioni di svolta debba essere eseguito al mattino, alla sera o in entrambe le fasce ora-



rie. Si ribadisce, infatti, che le condizioni più gravose non coincidono necessariamente con i periodi di maggior traffico in accesso, ma sono il risultato della combinazione di traffico in accesso e manovre di svolta.

Se l'entità del traffico dell'ora di punta mattutina è di gran lunga superiore a quella del traffico serale (o viceversa) è ragionevole concludere che l'ora di punta del mattino (o della sera) è quella che comporta le condizioni più gravose nel nodo, indipendentemente dalle manovre di svolta. Se i dati sono invece confrontabili, saranno proprio le manovre di svolta il discriminante che permette l'individuazione delle condizioni più gravose. In questo caso, però, è evidente che il conteggio manuale deve essere eseguito in entrambe le fasce orarie.

### **3.1.5 Tipologia e formato dei dati**

I dati di traffico acquisiti con i conteggi automatici sono sempre suddivisi per classi di lunghezza. Per quanto le suddivisioni in classi di lunghezza siano ormai uno standard della maggior parte delle apparecchiature automatiche è sempre meglio sincerarsi prima del conteggio delle modalità in cui verranno restituiti i dati.

I conteggi manuali devono essere svolti in modo da fornire dati compatibili con quelli già a disposizione. In fase di organizzazione della campagna, pertanto. Sarà necessario specificare le diverse tipologie di veicolo che i rilevatori dovranno distinguere.

Una parte importante della progettazione della rotatoria riguarda la protezione delle utenze deboli: pedoni e ciclisti (cfr. paragrafo 5.2). Solo i rilevatori manuali possono contarli, per cui organizzando la campagna di conteggi sarà necessario prevedere il reperimento di queste informazioni.

I dati a disposizione sono quindi disaggregati. In questa forma sono utilizzabili come input per le microsimulazioni, come descritto al paragrafo 3.3: ogni corrente di traffico deve infatti essere descritta secondo la composizione.

Le formule di verifica esposte ai capitoli successivi fanno invece riferimento ai veicoli equivalenti. Il concetto di veicolo equivalente è illustrato al paragrafo 3.2.1, dove sono esposti i coefficienti per ricondurre veicoli di diverse tipologie ai veicoli equivalenti.

### **3.1.6 Previsioni per nuove infrastrutture viarie**

Le considerazioni riportate ai paragrafi precedenti sono dedicate alla trasformazione di un incrocio esistente (con semaforo, stop, ...) in una rotatoria. E' però possibile che la



rotatoria sorga in concomitanza con la costruzione di una nuova strada: in questo caso non si può ricorrere ai conteggi. La procedura prevede la conoscenza dei flussi con le metodologie sopra esposte solo per gli assi viari esistenti; per i traffici che interesseranno la nuova strada occorrono invece delle procedure di stima.

### 3.1.6.1 STIMA DEI TRAFFICI

Vi sono diversi metodi di stima a seconda che la strada sia un'opera di valenza locale (collegamento alla viabilità esistente di nuovi insediamenti commerciali, industriali, ospedali, ...) oppure un'opera d'importanza maggiore.

Nel caso del collegamento di una nuova lottizzazione ad un'area esistente, per gli insediamenti commerciali si devono acquisire dati che permettono di legare la superficie di vendita al numero di clienti attratti. E' perciò necessario eseguire indagini ad hoc presso strutture di analoghe dimensioni e categorie merceologiche. In questi casi è poi opportuno ricordare che gli orari di apertura e di picco dei clienti possono non coincidere con gli orari di punta del traffico nelle strade esistenti. Per gli insediamenti residenziali, un valore indicativo può essere il seguente Tabella 3-1<sup>4</sup>:

	ORA DI PUNTA DEL MATTINO	ORA DI PUNTA DELLA SERA
INGRESSI ALL'AREA	0,2 x n° di abitazioni	0,5 x n° di abitazioni
USCITE DALL'AREA	0,7 x n° di abitazioni	0,35 x n° di abitazioni

Tabella 3-1 – Generazione e attrazione di traffici da insediamenti residenziali.

Un'altra fonte d'informazioni sulle stime di traffico è rappresentata dal materiale dei censimenti ISTAT. Queste informazioni, oltre ad essere facilmente reperibili, possono fornire indicatori riferiti al comportamento medio del Comune in esame: si tratta quindi di dati più affidabili rispetto alle medie generali qui riportate.

<sup>4</sup> Valori desunti dal manuale "Techniques d'exploitation de la Route", Les données de trafics – CETE de l'Est, novembre 1996.





Per ogni comune, sono a disposizione:

- ☐ numero di abitanti;
- ☐ numero di spostamenti generati all'interno del comune nell'ora di punta.

Il numero degli abitanti è aggiornato annualmente; gli spostamenti, invece, sono aggiornati con frequenza decennale mediante i censimenti.

Il coefficiente di emissione  $C_e$  permette di legare – riferendosi alla situazione specifica di ogni comune – il numero di abitanti con il numero di viaggi effettuati. Esso è definito come:

$$C_e = n^{\circ} \text{ spostamenti} / n^{\circ} \text{ abitanti}$$

Questo valore permette di effettuare stime di emissione di nuove zone residenziali, moltiplicando  $C_e$  per il  $n^{\circ}$  di abitanti previsto.

### 3.1.6.2 STIMA DELLA MATRICE O/D

Per la costruzione della matrice O/D si deve considerare il traffico in accesso alla rotatoria dalla nuova opera e ripartirlo per direzione di uscita. Si prendono in considerazione le destinazioni raggiungibili svoltando dalla nuova strada in ognuno dei rami esistenti: le svolte saranno proporzionali al numero di abitanti, ai metri quadri di insediamenti commerciali, al numero di posti di lavoro.

Se l'ora di punta è quella del mattino si deve considerare che la maggior parte degli spostamenti è del tipo “casa-lavoro”: i flussi della nuova infrastruttura usciranno dalla rotatoria proporzionalmente agli insediamenti commerciali e ai posti di lavoro raggiungibili da ogni ramo. Al contrario, l'ora di punta della sera è costituita principalmente da traffico diretto verso le zone residenziali per il ritorno serale. Le proporzioni, quindi, si calcolano in funzione del numero di abitanti degli insediamenti raggiungibili da ognuno dei rami della rotatoria.

Il metodo di calcolo deve tenere conto della distanza dei vari insediamenti commerciali/industriali o abitativi. Il numero di posti di lavoro o di abitanti raggiungibili da ognuno dei rami della rotatoria deve essere quindi mediato secondo la distanza, generalmente posta al quadrato.

Per le svolte verso il nuovo insediamento la procedura è simile, distribuendo il traffico attratto tra i nuovi rami, secondo le stesse modalità sopra descritte.



### *3.1.6.3 INFRASTRUTTURE NON LOCALI*

Se la nuova infrastruttura interessa flussi di traffico diretti ad altri comuni o altri quartieri, è invece necessario fare riferimento a studi trasportistici di più ampio raggio, che tengono conto della domanda e dell'offerta di traffico in una zona più vasta. Questi studi sono sempre effettuati a corredo dei progetti stradali e quindi in questo caso la rotatoria sarà progettata assieme alla nuova infrastruttura viaria.



## 3.2 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ E DEGLI INDICI PRESTAZIONALI

### 3.2.1 Capacità di una rotatoria

La capacità di una rotatoria è stata nel corso degli anni ridefinita in funzione delle regole di precedenza (a destra o all'anello) tra i flussi presenti nell'incrocio. Storicamente le intersezioni a rotatoria erano regolate con la precedenza al flusso entrante, per cui i primi studi (Clayton 1945, Wardrop 1958) si basavano sul concetto di *capacità di scambio* definita dal numero di veicoli che possono intrecciarsi nella zona compresa tra due bracci consecutivi. Con questo tipo di approccio risulta che per ottenere elevati valori di capacità è necessario aumentare quanto più possibile le zone di scambio, da cui l'orientamento verso rotatorie di grande diametro adottato dai progettisti fino alla fine degli anni settanta.

Alla fine degli anni sessanta in Gran Bretagna, in seguito a numerosi studi sperimentali, fu introdotto il principio della precedenza al traffico circolante nell'anello. Questa soluzione fu adottata per ovviare al ricorrente fenomeno di “autosaturazione” della rotatoria anche in presenza di flussi entranti non elevati, e al conseguente blocco dell'intersezione per l'arresto del flusso circolante nel suo insieme. Tale soluzione si rivelò tanto efficace rispetto alla operatività ed alla sicurezza del deflusso che fu presto adottata da altri Paesi, tra i quali Francia, Svizzera e Germania.

Nelle rotatorie progettate con la precedenza all'anello viene adottato come parametro caratteristico la capacità delle entrate.

Si definisce *capacità dell'entrata* il più piccolo valore del flusso sul ramo d'ingresso che determina la presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi [2]. Questo valore del flusso dipende dal flusso che percorre l'anello, e quindi dall'insieme dei flussi in ingresso e in uscita da tutti i bracci della rotatoria. Non è pertanto possibile calcolare la capacità di un braccio se non è nota l'intera matrice  $M$  origine/destinazione della rotatoria, dalla quale si ricava la matrice di distribuzione  $N$ , il cui generico elemento  $p_{i,j}$  fornisce la frazione del flusso entrante da  $i$  che esce in  $j$ .

Per caratterizzare la rotatoria nel suo insieme si fa riferimento alle seguenti definizioni di capacità:

- capacità semplice;
- capacità totale.



Data una matrice  $M$  origine-destinazione, sia  $\delta$  il più piccolo scalare che moltiplicato per  $M$  dia luogo ad un insieme di flussi entranti e uscenti dalla rotatoria tale che la capacità, come precedentemente definita, sia raggiunta su uno dei bracci. Il prodotto di  $\delta$  per il flusso entrante da questo braccio che si ricava dalla matrice  $M$  è la *capacità semplice* della rotatoria. Ossia, data una ripartizione dei flussi di traffico, la capacità semplice è il primo valore del flusso entrante che ha raggiunto la sua capacità (e quindi il primo fenomeno di congestione), per un aumento uniforme di tutti i flussi in ingresso.

Data una matrice di distribuzione  $N$  si definisce *capacità totale* della rotatoria la somma dei flussi in ingresso che, distribuendosi secondo  $N$  fra le diverse uscite, determinano il raggiungimento contemporaneo della capacità su tutti i bracci.

Una prima indicazione sull'ordine di grandezza della capacità di una rotatoria è fornita dal traffico complessivo entrante, infatti, se esso è:

- **minore di 1.500 veq/h**, normalmente la rotatoria non ha problemi a smaltire il traffico circolante, anche nella conformazione geometrica minima prevista dal presente Manuale (vedi paragrafo 7.1.3).
- **da 1500 a 2000 veq/h**, è necessario un esame della ripartizione del traffico. Si deve verificare che la somma delle correnti in entrata e in circolazione non superi i 1000 veq/h su ciascuna entrata.
- **maggiore di 2000 veq/h**, è necessario valutare la capacità delle singole entrate con la metodologia proposta nel paragrafo successivo.

I flussi sono espressi in autovetture equivalenti per ora (veq/h). Per la trasformazione dei flussi di veicoli diversi dalle autovetture in veq si possono adottare i seguenti coefficienti di conversione:

- ciclo o motociclo = 0.5 veq;
- veicolo leggero = 1.0 veq;
- veicolo pesante o autobus = 2.0 veq.

Questi valori sono coefficienti indicativi da utilizzare nel caso in cui le varie metodologie non forniscano valori specifici.



### 3.2.2 Calcolo della “capacità di un’entrata”

Le prime formulazioni per il calcolo della capacità di una rotatoria sono state effettuate da Kimber nel 1980, sulla base delle sperimentazioni del TRRL inglese. Egli ricavò la relazione che correla la capacità di un braccio al flusso che percorre l’anello ed alle caratteristiche geometriche della rotatoria attraverso l’analisi statistica, condotta con tecniche di regressione, di un gran numero di dati raccolti su rotatorie in Gran Bretagna, tutte con priorità sull’anello. Egli dimostrò l’esistenza di una relazione lineare fra la capacità di un ingresso  $Q_e$  e il flusso circolante  $Q_c$  in prossimità del braccio considerato:

$$Q_e = F + f_c \cdot Q_c \quad (3-1)$$

dove  $F$  e  $f_c$  dipendono dalla geometria dello schema.

Dall’analisi dei coefficienti  $F$  e  $f_c$  si evince che, fra le caratteristiche geometriche della rotatoria, quelle che hanno influenza di gran lunga maggiore sulla capacità di un braccio sono la larghezza della sua sezione trasversale corrente e quella della sua sezione allargata in corrispondenza della immissione.

I metodi di calcolo della capacità messi a punto nei diversi Paesi, pur essendo riconducibili tutti ad uno stesso schema fondamentale (tipo quello di Kimber), differiscono in qualche misura fra loro, in parte perché diverse sono le tipologie di rotatoria su cui sono stati misurati i dati sperimentali, ma in misura prevalente per la diversità dei comportamenti degli automobilisti, i quali giocano un ruolo fondamentale nel determinare il modo di funzionare di una rotatoria.

In assenza di una formulazione di capacità per l’Italia, si riporta il metodo messo a punto in Francia nel 1987 dal SETRA, il quale ha il pregio di fornire, oltre al valore della capacità, anche altri elementi utili per la conoscenza del livello di servizio di una rotatoria (tempo medio di attesa e lunghezza massima di una coda all’ingresso). Tale metodo per la valutazione della capacità è utilizzato anche nello “Studio a carattere pre-normativo”, redatto dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti per la progettazione delle intersezioni stradali [2].

#### 3.2.2.1 IL METODO FRANCESE

L’attuale metodo francese di stima della capacità di un’entrata in rotatoria ha alla base le indagini condotte a partire dalla seconda metà degli anni ottanta dai CETE di Nantes, di Metz e di Rouenne ed elaborate dal SETRA [7]. I risultati sperimentali sono stati trat-



tati con strumenti di analisi statistica multivariata.

A differenza del metodo messo a punto da Kimber, il metodo del SETRA fa intervenire nel calcolo della capacità, oltre al traffico che percorre l'anello in corrispondenza di un'immissione, anche il traffico che si allontana all'uscita immediatamente precedente; per cui definisce una relazione lineare, invece che fra capacità e flusso che percorre l'anello, fra capacità e un *traffico complessivo di disturbo*  $Q_d$ , nel quale intervengono sia il flusso che percorre l'anello sia quello in uscita precedentemente definito.

Si consideri la Figura 3-4, dove è rappresentato il particolare di una rotatoria in corrispondenza di un braccio. Sia  $Q_c$  il flusso che percorre l'anello all'altezza dell'immissione,  $Q_e$  il flusso entrante,  $Q_u$  il flusso uscente. Siano ancora: "SEP" la larghezza dell'isola spartitraffico all'estremità del braccio, "ANN" la larghezza dell'anello, "ENT" quella della semicarreggiata del braccio misurata dietro il primo veicolo fermo all'altezza della linea del "dare precedenza". Tutte le lunghezze sono misurate in metri. La capacità e i flussi sono espressi in autovetture equivalenti per ora (veq/h).

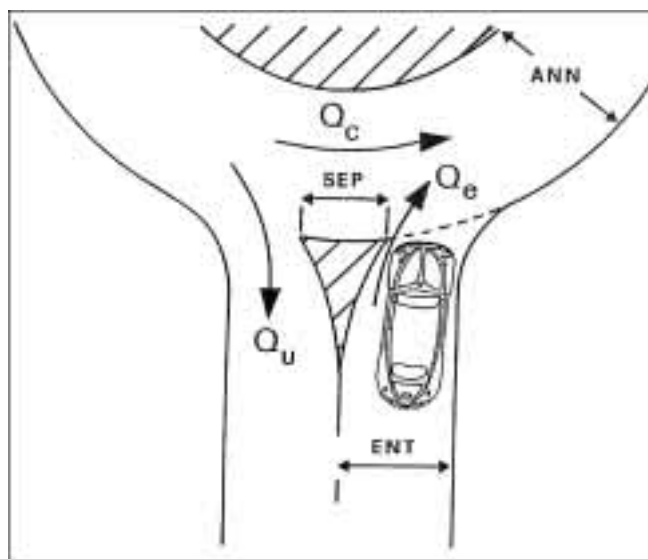


Figura 3-4 – Definizione dei parametri geometrici e dei flussi di traffico [7]

Sia  $C$  la capacità del braccio, ossia il minimo valore di  $Q_e$  che dà luogo alla presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi. Il metodo del SETRA definisce  $C$  come funzione delle caratteristiche geometriche e di traffico innanzi definite:

$$C = f(Q_u, Q_c, SEP, ANN, ENT) \quad (3-2)$$



Nota la matrice M origine/destinazione, la procedura di calcolo della capacità si articola nei tre passi seguenti:

1. Calcolo del traffico uscente equivalente  $Q_u'$  in funzione di  $Q_u$  e di SEP:

$$Q_u' = Q_u \cdot (15 - \text{SEP}) / 15 \quad (3-3)$$

Assumendo  $Q_u' = 0$  se  $\text{SEP} \geq 15\text{m}$ .

2. Determinazione del traffico complessivo di disturbo  $Q_d$  in funzione di  $Q_c$ , di  $Q_u'$  e di ANN:

$$Q_d = (Q_c + 2/3 \cdot Q_u') \cdot [1 - 0.085 \cdot (\text{ANN} - 8)] \quad (3-4)$$

3. Calcolo della capacità dell'entrata C mediante la relazione:

$$C = (1330 - 0.7 \cdot Q_d) \cdot [1 + 0.1 \cdot (\text{ENT} - 3.5)] \quad (3-5)$$

Dalla (3-5) si vede che, come già posto in evidenza da Kimber, il parametro geometrico più rilevante per il calcolo della capacità è la larghezza dell'entrata (ENT), da valutarsi dietro il veicolo fermo alla linea del "dare la precedenza", ed in particolare lo scarto di ENT rispetto ad una larghezza standard di 3.5m. Tenendo conto di ciò, si usa definire un flusso entrante equivalente  $Q_e'$ , il quale eguaglia la capacità di un braccio largo 3.5m quando questa viene raggiunta dal flusso  $Q_e$  su un braccio della rotatoria avente la larghezza effettiva ENT:

$$Q' = Q / [1 + 0.1 \cdot (\text{ENT} - 3.5)] \quad (3-6)$$

Il traffico equivalente  $Q'$  viene utilizzato per valutare alcuni indici prestazionali della rotatoria, come si vedrà più avanti.

Dalle equazioni precedenti si rileva che la larghezza dell'anello (ANN) influisce sul valore della capacità attraverso la relazione che esso ha con l'azione di disturbo prodotta dal traffico che percorre l'anello. L'influenza del traffico in uscita sull'azione di disturbo è invece determinata dalla larghezza SEP dell'isola spartitraffico: tale influenza è nulla quando  $\text{SEP} \geq 15\text{m}$ . Si fa notare a tal punto come la larghezza delle isole spartitraffico e quelle dei bracci all'altezza delle immissioni determinino di fatto lo sviluppo della rotatoria e quindi il diametro dell'anello e siano legati pertanto alla forma della rotatoria.



Il metodo di calcolo della capacità fin qui esposto è stato messo a punto utilizzando i dati raccolti in una estesa campagna di indagini eseguite su rotatorie sia urbane che extraurbane. Per questo motivo si può ritenere che il metodo esposto sia valido per entrambi i tipi di rotatorie.

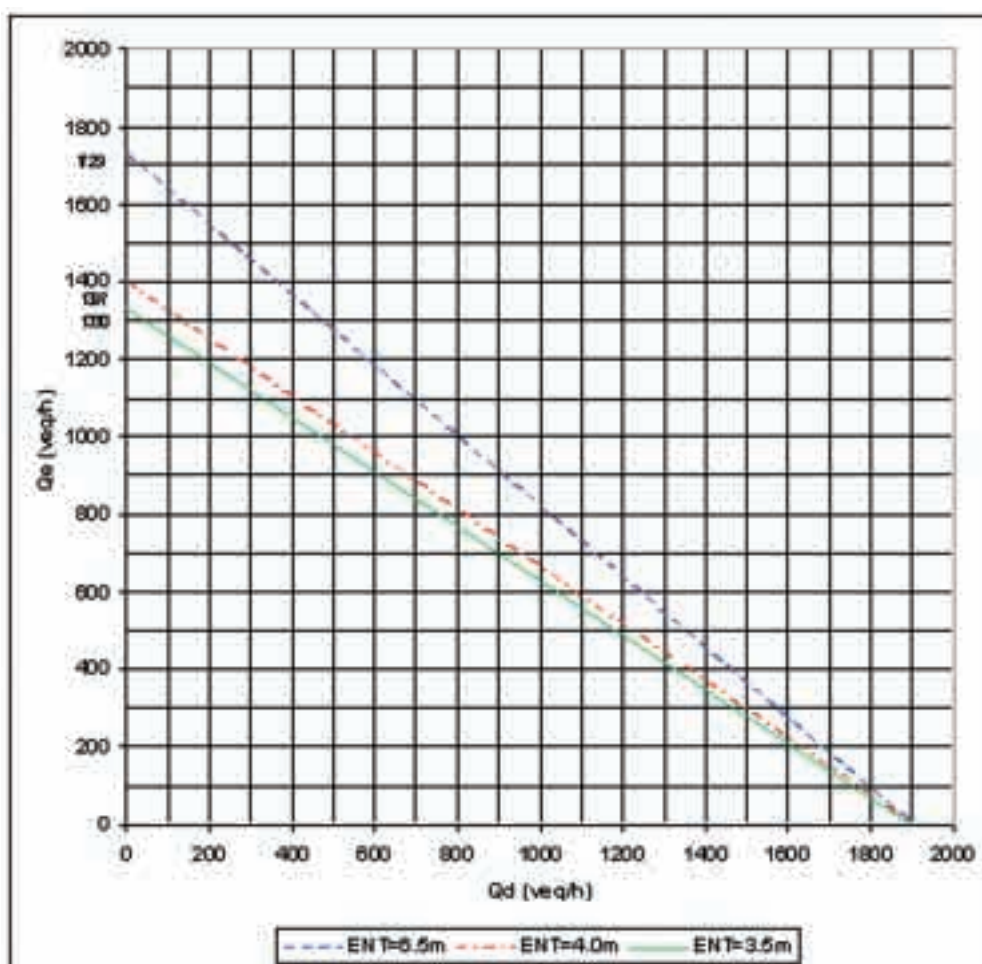


Figura 3-5 – Capacità della rotatoria in funzione di  $Q_d$ , per varie larghezze dell'entrata (SETRA).

Come esplicitamente riportato nelle note informative SETRA sull'argomento, i limiti della (3-5), che pure è stata ricavata dalla più rilevante campagna di misure recentemente effettuate in Francia e che in quel contesto fornisce comunque ordini di grandezza della capacità sicuramente accettabili per la pratica tecnica, risiedono, in sintesi:

- nell'intrinseca non trascurabile dispersione dei dati dovuta alla variabilità del comportamento dell'utenza;





- nei piccoli campi di variazione dei parametri geometrici per la sostanziale omogeneità delle dimensioni delle rotatorie in esercizio nel Paese;
- nella forte correlazione intercorrente tra alcuni parametri (correlazione che ne ha mascherato l'influenza sulla capacità) quali, ad esempio: l'estensione dell'isola centrale spartitraffico, l'angolo di incidenza delle traiettorie dei veicoli in ingresso, l'ampiezza della svasatura delle entrate, il contesto di ubicazione delle intersezioni;
- nella localizzazione prevalentemente urbana delle rotatorie risultate significative per i volumi di traffico in gioco e scelte quindi per l'indagine.

### FORMULA PER IL CALCOLO DELLA CAPACITÀ IN AMBITO URBANO

In ambito urbano, il calcolo della capacità delle rotatorie può anche essere effettuato, utilizzando la seguente formula elaborata dal CETUR (1988) [7] [8]:

$$C = \gamma \cdot (1500 - 5/6 \cdot Q_d) \quad (3-7)$$

dove  $\gamma = 1$  per ingressi a una corsia, e  $\gamma = 1.5$  per ingressi a due o più corsie.  
L'espressione del traffico di disturbo  $Q_d$  è la seguente:

$$Q_d = b \cdot Q_c + 0.2 \cdot Q_u \quad (3-8)$$

Con:

- $b = 1$  per  $ANN < 8$  m;
- $b = 0.9$  per  $ANN \geq 8$  m e  $R_i (= \text{raggio interno}) \leq 20$  m;
- $b = 0.7$  per  $ANN \geq 8$  m e  $R_i \geq 20$  m.

Questa formulazione è valida sotto le seguenti condizioni:

- rotatorie urbane di taglia medio-grande (raggio interno da 10 a 30 m);
- buona disposizione dei bracci;
- ripartizione equilibrata del traffico.



Nella seguente Figura 3-6 è riportato l'andamento della capacità in funzione del traffico di disturbo per i casi di un ingresso con singola e doppia corsia, utilizzando la formula (3-7) e ponendo  $b=1$  nella formula (3-8).

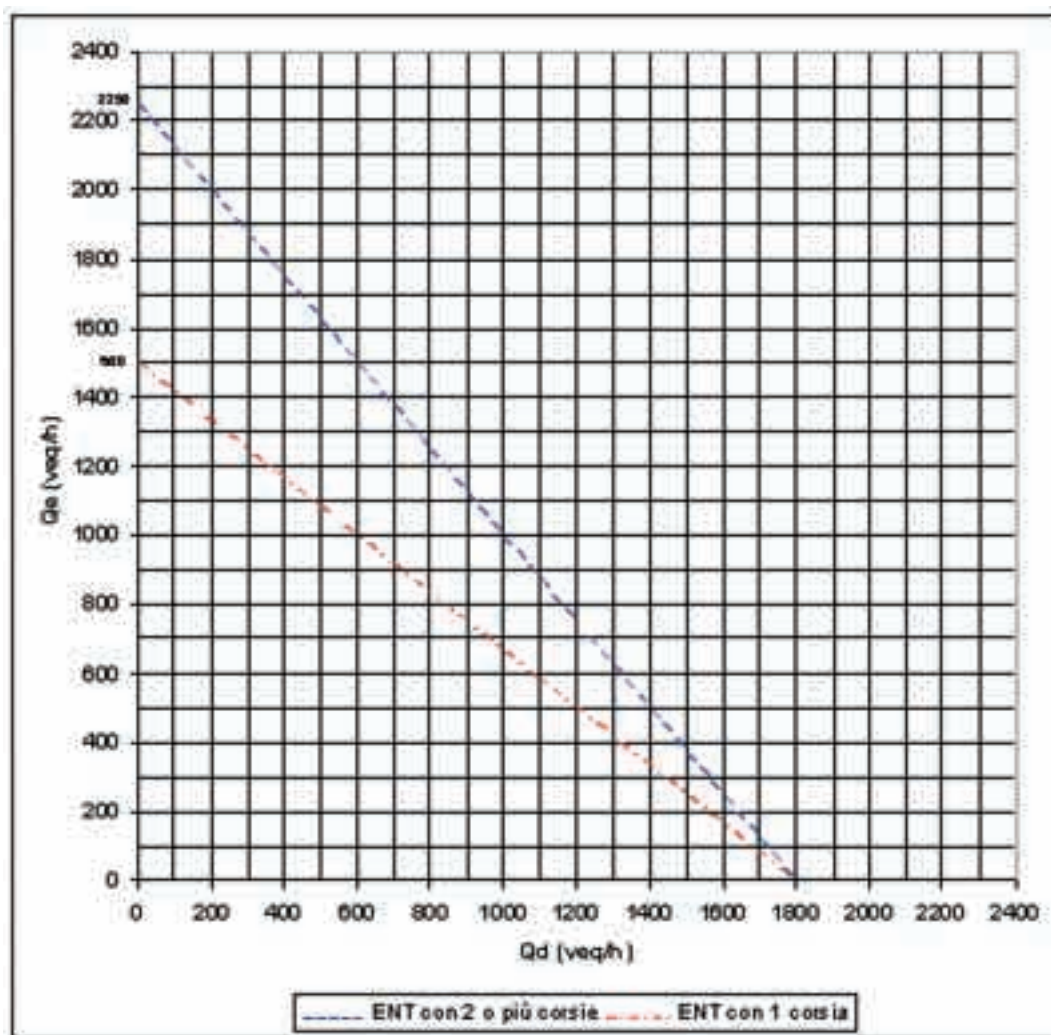


Figura 3-6 – Capacità della rotatoria in funzione di  $Q_d$ , e del numero di corsie dell'entrata (CETUR).

### 3.2.2.2 RISERVA DI CAPACITÀ

La differenza tra la capacità dell'entrata  $C$  e il flusso in ingresso  $Q_e$  è definito riserva di capacità  $RC$  dell'entrata:

$$RC = C - Q_e \quad (3-9)$$

E in termini percentuali:  $RC(\%) = (C - Q_e)/Q_e$



La riserva di capacità permette di fare una valutazione sul funzionamento della rotatoria in termini di livello di servizio e quindi stimare gli effetti che l'intersezione avrà sui flussi veicolari. In Tabella 3-2 è stato riportato la condizione di esercizio della rotatoria in funzione della riserva di capacità  $RC(\%)$ .

Riserva di capacità (%)	Condizione di esercizio
$RC > 30 \%$	FLUIDO
$15 < RC \leq 30 \%$	SODDISFACENTE
$0 < RC \leq 15 \%$	ALEATORIO
$RC \leq 0 \%$	SATURO/CRITICO

Tabella 3-2

Per la progettazione delle rotatorie, le norme francesi indicano come corretta una riserva di capacità tra il 25% e l'80%. Un valore troppo elevato di  $RC$  su un'entrata principale deve indurre a verificare se la sua larghezza (o il numero delle corsie) non sia sovradimensionata.

Se tutte le entrate hanno una riserva di capacità molto ampia, si può arrivare talvolta a ridurre la larghezza dell'anello.

Se la riserva di capacità è esigua (dal 5% al 25%) occorrerà fare attenzione ai tempi di attesa e alla lunghezza delle code che potranno formarsi. In questo caso è auspicabile effettuare un'analisi più approfondita mediante l'ausilio di una microsimulazione del traffico (cfr. paragrafo 3.3).

Se invece  $RC(\%)$  è inferiore al 5% (e a maggior ragione se negativa) sono da temere forti perturbazioni, quindi sarà necessario adottare soluzioni tendenti a migliorare la capacità quali:

- ☐ allargamento delle entrate;
- ☐ allargamento dell'anello;
- ☐ aumento del raggio della rotatoria;
- ☐ creazione di una via diretta di svolta a destra.



Nel caso in cui questi accorgimenti risultassero non praticabili o insufficienti sarà necessario adottare un altro tipo di intersezione, eventualmente a livelli sfalsati.

### 3.2.2.3 CONFRONTO TRA IL METODO FRANCESE E LE FORMULAZIONI USATE DA ALTRI PAESI EUROPEI PER IL CALCOLO DELLA CAPACITÀ

Per completezza di trattazione vengono di seguito riportati brevemente i metodi di calcolo della capacità degli ingressi in rotatoria, adottati da altri Paesi Europei, quali Germania, Svizzera e Gran Bretagna, dove questo tipo di sistemazione a raso si sono diffusi rapidamente a partire dalla fine degli anni ottanta. I risultati di questi metodi sono stati poi confrontati con il metodo francese del CETRA, utilizzato nel presente studio.

Le formule per il calcolo della capacità utilizzate in Germania e in Gran Bretagna (Kimber), a differenza di quella francese, prendono in considerazione i soli flussi di transito  $Q_C$  e non di quelli di uscita  $Q_U$ , quindi sono del tipo:

$$C = f(Q_C) \quad (3-10)$$

In particolare la formula tedesca, dovuta alle esperienze di Brilon e collaboratori, è data da [7]:

$$C = A \cdot \exp[-(B/10000) \cdot Q_C] \quad (3-11)$$

dove A e B sono dei coefficienti dipendenti unicamente dal numero di corsie dell'anello e dell'entrata, e sono ricavabili dalla seguente Tabella 3-3.

Numero di corsie all'anello	Numero di corsie all'entrata	A	B	Numerosità dei campioni
3	2	2018	6.68	295
2	2	1577	6.61	4574
2-3	1	1300	8.60	867
1	1	1226	10.77	1060

Tabella 3-3 – Parametri della relazione di capacità tedesca in funzione del numero di corsie [7]



Tale formula rappresenta il legame che meglio ha interpretato in tutte le indagini sperimentali condotte, la relazione tra le misure di  $Q_e$  e  $Q_c$ , in condizioni di saturazione. Una rappresentazione della formula (3-11) per le diverse configurazioni considerate è riportata in Figura 3-7.

Mediante questo grafico risulta immediato il calcolo di  $Q_e$  una volta noto i flussi circolanti  $Q_c$ .

Si evidenzia che, come esplicitamente espresso dagli autori tedeschi, la formula (3-11) è soddisfacente per i casi con due corsie all'anello ed all'entrata per la numerosità dei campioni e per il grado di significatività delle condizioni di traffico rilevate; invece non lo è per lo schema con tre corsie all'anello, che risulta ancora poco diffuso in Germania.

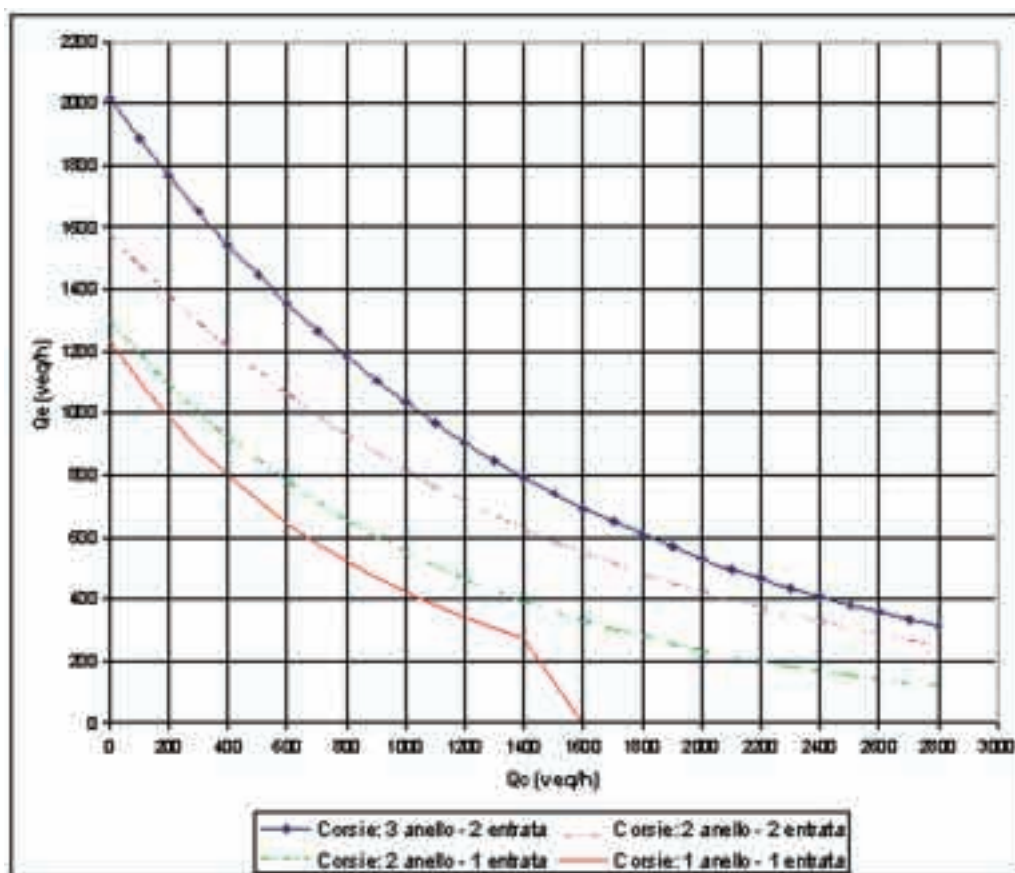


Figura 3-7 – Rappresentazione delle relazioni di capacità tedesche (Brilon e coll.) [7]

La formula per il calcolo della capacità, contenuta nella vigente normativa svizzera è stata ricavata da Bovy e collaboratori sulla base di dati sperimentali [7]. Essa, similmente alla formulazione francese, tiene conto di un traffico generale di disturbo  $Q_d$ :



$$C = k \cdot (1500 - 0.983 \cdot Q_d) \quad (3-12)$$

con:

$$Q_d = a \cdot Q_u + b \cdot Q_c \quad (3-13)$$

dove  $k$  tiene conto del numero di corsie all'entrata, mentre i coefficienti  $a$  e  $b$  tengono conto della geometria della rotatoria; in particolare  $a$  dipende dalla distanza tra i punti di conflitto in uscita ed in entrata di uno stesso ramo, mentre  $b$  è funzione del numero delle corsie all'anello.

Nel grafico di Figura 3-8, sono state riportate come esempio le relazioni tra flusso entrante  $Q_e$  (quando eguaglia la capacità  $C$ ) e il flusso di disturbo  $Q_d$  utilizzando le varie formulazioni analizzate e riferite ad una rotatoria di grande dimensione di tipo extraurbano. Si può notare che, nel tratto di funzionamento stabile dell'intersezione, la procedura tedesca sottostima la capacità a fronte di quanto si ottiene dalle altre formulazioni; la relazione svizzera, al contrario, tende a sovrastimarla.

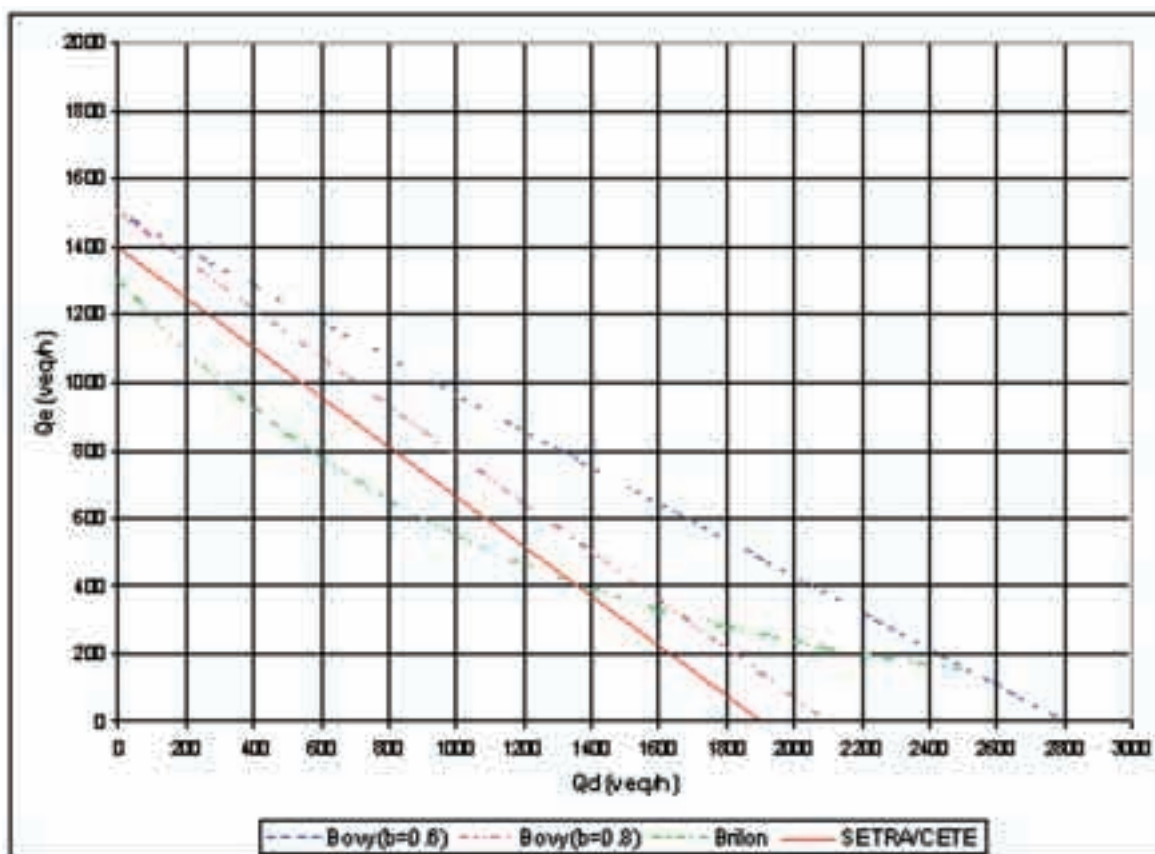


Figura 3-8 – Comparazione tra relazioni di capacità per una rotatoria extraurbana. [7]

Le diversità tra le formulazioni considerate nella stima della capacità possono ascrivere-



si a più fattori, come ad esempio: alla differenza di comportamento all'intersezione dei guidatori dei vari Paesi; alla diversificazione, da nazione a nazione, degli standards geometrici degli schemi circolari; all'elaborazione statistica dei dati operata dai diversi ricercatori, che hanno correlato alcune variabili geometriche, trascurandone invece altri.

### 3.2.3 Calcolo della "capacità semplice" e della "capacità totale"

Le procedure fin qui esaminate consentono, come visto, di valutare generalmente per ciascun ingresso "i" di un dato sistema circolare le capacità  $C_i$  in funzione del relativo traffico di disturbo  $Q_{d,i}$ , che è noto, assegnata che sia una matrice "M" Origine/Destinazione. Con le  $C_i$  possono così valutarsi i due indici prestazionali per la rotatoria nel suo insieme, definiti in precedenza: la "capacità semplice" e quella "complessiva".

Con riferimento ad una matrice O/D, la capacità semplice della rotatoria  $Q_S$  è il primo valore di capacità che può ottenersi ad un ingresso per un aumento uniforme dei flussi di "M". Da  $Q_S$ , in definitiva, si può risalire all'incremento di traffico che produce il primo fenomeno di congestione all'intersezione quando la domanda per ogni entrata cresce dello stesso tasso. Sia di quello scalare tale che, moltiplicato per la matrice M e quindi per il vettore dei flussi entranti nella rotatoria, dà luogo ad un flusso di  $\delta_i \cdot Q_{e,i}$  entrante dal braccio i uguale alla capacità  $C_i$  del braccio quale si ricava dalla (3-5). Il valore di  $\delta_i$  si ricava facilmente in funzione dei flussi entranti e uscenti dagli altri bracci:

$$\delta_i \cdot Q_{e,i} = C_i = f(\delta_i \cdot Q_{c,i}, \delta_i \cdot Q_{u,i}) \quad (3-14)$$

Il calcolo di  $\delta_i$  viene ripetuto per tutti i bracci della rotatoria, e sia  $\delta_j$  il più piccolo dei valori così ottenuti, relativo al braccio j. La capacità semplice della rotatoria è quindi:

$$Q_S = \delta_j \cdot Q_{e,j} \quad (3-15)$$

Essa viene raggiunta sul solo braccio j quando la matrice M, e quindi i flussi in ingresso, sono moltiplicati per  $\delta_j$ , mentre i flussi in ingresso dagli altri bracci della rotatoria si mantengono al di sotto della capacità.

La capacità complessiva o totale è, invece, la quantità:

$$Q_T = \sum C_i \quad (3-16)$$

nell'ipotesi che le  $C_i$  vengano raggiunte contemporaneamente.

Per calcolare  $Q_T$ , assegnata la matrice "N" delle percentuali di traffico tra i rami i e j,





occorre ricercare la distribuzione dei flussi in entrata  $Q_{e,i}$  tali da risultare simultaneamente pari alla capacità dei rispettivi ingressi  $C_i$ . Questi flussi in ingresso si ricavano risolvendo il sistema di  $n$  equazioni lineari nelle  $n$  incognite  $Q_{e,i}$ :

$$Q_{e,i} = C_i = f_i (Q_{c,i}, Q_{u,i}) = g_i (Q_{e,j} \neq i) \quad (3-17)$$

$Q_T$  rappresenta in definitiva, per una data distribuzione percentuale della domanda all'intersezione, una misura sintetica dell'attitudine limite della rotatoria a smaltire il traffico quando ad ognuno dei bracci sono presenti code.

I valori  $C_i$  di capacità dei singoli bracci che concorrono a formare la capacità totale vengono posti a base della progettazione di una rotatoria. Poiché però flussi in ingresso di entità uguale ai valori di capacità così definiti determinerebbero la presenza permanente di veicoli in attesa ai bracci, e quindi code di notevole lunghezza, si fa di solito riferimento ad una *capacità pratica* dei singoli bracci data da:

$$C'_i = Q_{e,i} - 150 \quad (3-18)$$

A partire dagli indici prestazionali  $Q_S$  e  $Q_T$  è immediato risalire alle relative riserve di capacità attribuibili allo schema.

Accanto a tali indici vanno comunque valutati, per una più completa definizione delle condizioni di circolazione, ulteriori indicatori del livello di servizio, come accade per gli altri tipi di incrocio, sotto specifiche condizioni di domanda di traffico, quali il tempo medio di attesa ed la lunghezza della coda nei vari ingressi. Tali indicatori sono trattati nel successivo paragrafo.

### 3.2.4 Stima della lunghezza delle code e del tempo medio di attesa

*Le caratteristiche di livello di servizio a cui si fa riferimento nel progetto delle rotatorie sono quelle stesse che vengono considerate nello studio di una qualsiasi intersezione a raso: il tempo medio di attesa dei veicoli alle immissioni ed un adeguato percentile della lunghezza della coda. Questi elementi possono essere calcolati con lo stesso modello teorico utilizzato per le altre intersezioni a raso, basato sul concetto di intervallo critico, le cui variabili sono il flusso in entrata e quello che percorre l'anello [2]. Si consideri un'automobilista che deve immettersi in una corrente veicolare, egli sta fermo fino a quando non giudica sufficientemente ampio l'intervallo tra due veicoli successivi per eseguire la propria manovra di immissione; per ogni automobilista può essere quindi definito un intervallo critico, tale che tutti gli intervalli ad esso inferiore vengono rifiutati, mentre quelli più grandi vengono accettati.*





Il SETRA, utilizzando un modello basato sull'intervallo critico, ha costruito i diagrammi della Figura 3-9 e Figura 3-10, nei quali sono riportati rispettivamente i tempi medi d'attesa ed il 99° percentile del numero di veicoli in attesa su un ingresso della rotatoria in funzione del traffico di disturbo  $Q_d$  sull'anello e del flusso entrante equivalente  $Q'_e$ . Questi diagrammi consentono in modo semplice e veloce di fornire una valutazione sufficientemente approssimata delle caratteristiche di livello di servizio di una rotatoria.

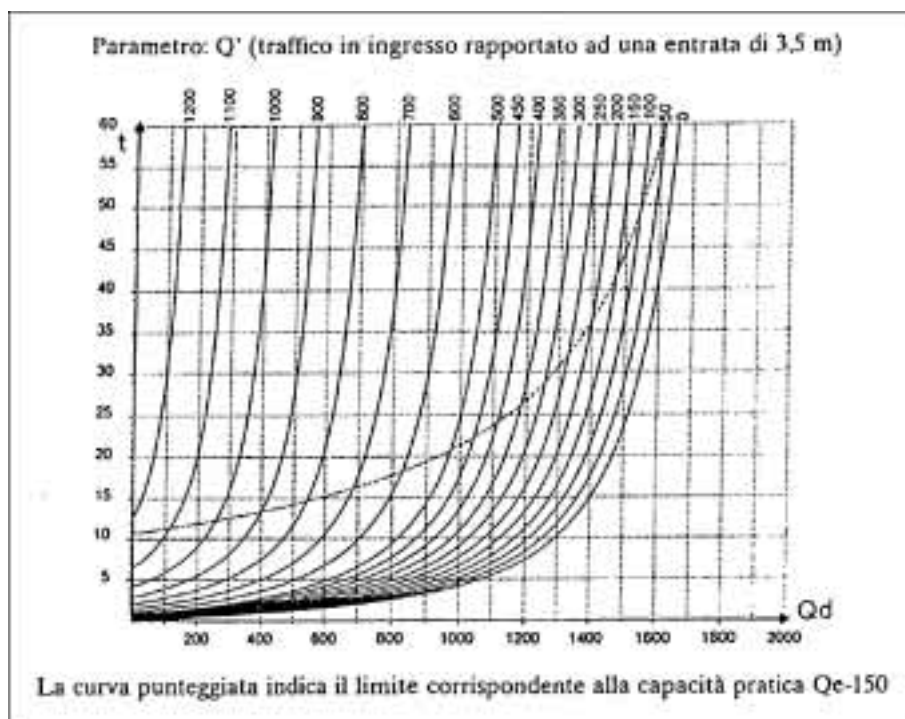


Figura 3-9 – Tempi medi di attesa in ingresso in rotatoria (in sec) [2]

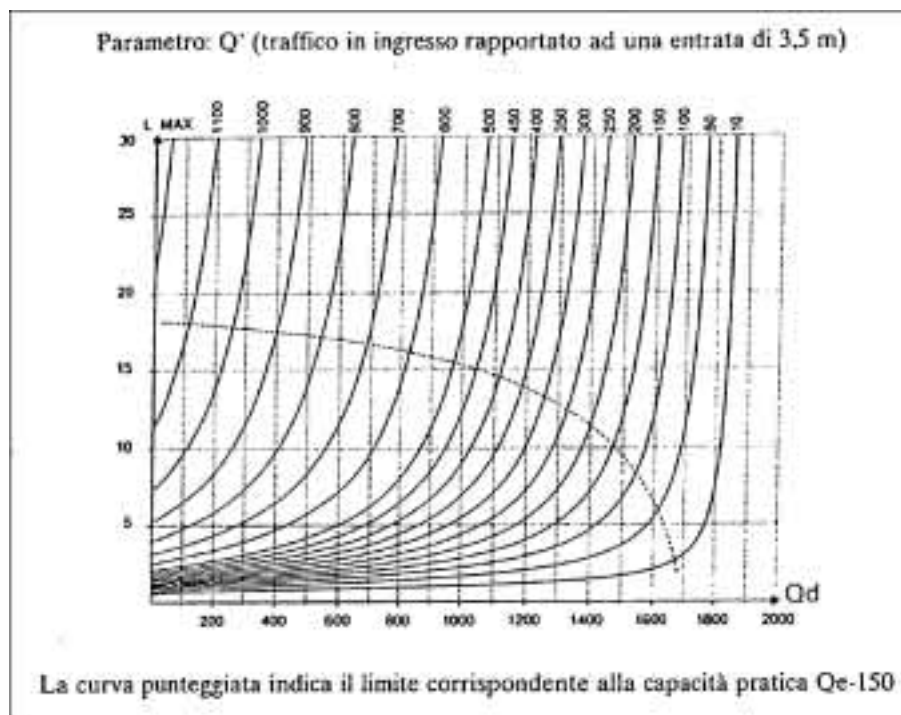


Figura 3-10 – 99° percentile del numero di veicoli in attesa su un ingresso della rotatoria [2]

Per definire il livello di servizio della rotatoria si può fare riferimento alle indicazioni fornite dall’HCM 2000 relative alle intersezioni non semaforizzate. La classificazione presente nell’HCM 2000 è fatta in base al tempo medio di attesa ed è riportata in Tabella 3-4.

Livello di Servizio	Ritardo medio (sec/veicolo)
A	0 ÷ 10
B	10 ÷ 15
C	15 ÷ 25
D	25 ÷ 35
E	35 ÷ 50
F	> 50

Tabella 3-4 – Livello di servizio per un’intersezione non semaforizzata secondo l’HCM 2000 [14]

Per le strade di tipo C ed F (in ambito extraurbano) la normativa [1] consiglia di garantire un livello di servizio medio pari almeno a un livello C; quindi per non creare un



decadimento delle prestazioni della strada progettata, anche l'intersezione a rotatoria deve essere dimensionata per garantire un livello di tipo C, e quindi con un ritardo medio per ciascun veicolo non superiore a 25 secondi.

Per le strade di tipo E ed F (in ambito urbano), la norma non fornisce indicazioni sul livello di servizio da perseguire in quanto esso non dipende solo dagli elementi geometrici ma è fortemente condizionato dalla presenza delle intersezioni. Queste dovrebbero essere dimensionate in modo da non abbassare eccessivamente il livello di servizio complessivo e quindi si consiglia di non scendere al di sotto del livello D.

Nei casi in cui il tempo medio di attesa sia prossimo al livello critico è consigliabile effettuare un'analisi più approfondita del funzionamento nel tempo dell'intersezione con l'ausilio di una microsimulazione del traffico (si confronti il paragrafo 3.3). La microsimulazione è utile anche per valutare il comportamento di una serie di intersezioni ravvicinate, dove il fenomeno di risalita della coda e l'interferenza reciproca devono essere analizzati adeguatamente.

Gli indicatori del livello di servizio permettono inoltre di effettuare un confronto, dal punto di vista prestazionale, tra la soluzione a rotatoria e una diversa sistemazione dell'intersezione (ad esempio dotato di un impianto semaforico).

In generale si ha che, in termini di tempi medi di attesa, la rotatoria è vantaggiosa rispetto all'incrocio con semaforo quando le portate sui diversi bracci sono uniformi e le svolte a sinistra sono numerose, ossia superiori al 15-20% della portata del braccio.

Nel caso invece di flussi notevolmente differenti tra una strada e l'altra, specialmente con tassi di svolta a sinistra limitati (minori di 5%), lo schema semaforizzato si dimostra più efficiente, soprattutto in termini di flussi complessivi quando ad un ingresso (o per una manovra) si raggiunge la capacità. [10]

Tra queste due situazioni, i diversi comportamenti in esercizio delle due tipologie di sistemazione sono variabili con continuità e quindi conviene valutare di volta in volta le possibili alternative per ottenere la soluzione più adeguata dell'incrocio.

Si evidenzia che la scelta di utilizzare una soluzione a rotatoria non deve essere legata soltanto agli indicatori prestazionali, ma va valutata anche in termini di aumento della sicurezza dell'incrocio, come evidenziato nel paragrafo 5.1.



### 3.3 LA MICROSIMULAZIONE DEL TRAFFICO

La microsimulazione del traffico permette di verificare il comportamento di un'infrastruttura viaria studiando in dettaglio il comportamento dei flussi di traffico. Tale procedimento, gestito da un computer con un apposito software, prende in considerazione la presenza di ogni singolo veicolo che transita nella rete, simulando il suo comportamento in funzione dell'infrastruttura, della disciplina di circolazione, degli altri veicoli presenti, delle prestazioni del veicolo e del comportamento medio dell'utente.

Il microsimulatore necessita come input dell'entità dei flussi di traffico, del numero di veicoli leggeri e pesanti, del numero di motociclette, biciclette, pedoni e mezzi pubblici. È poi necessario inserire i dati geometrici dell'infrastruttura, la segnaletica, la disciplina di circolazione e la matrice origine / destinazione.

Il microsimulatore contiene una banca dati con le caratteristiche di ogni singolo veicolo (marca, modello, potenza, accelerazione, spazio di frenata). Ogni volta che si dichiara un traffico (p. es. 400 veicoli in un ramo), il microsimulatore assegna ad ognuno dei 400 veicoli una marca ed un modello, secondo criteri probabilistici che rispettano la composizione del parco circolante (quote percentuali di utilitarie, di automobili medie, automobili sportive, fuoristrada, pick-up, ...) desunta da indagini statistiche o dati di fonte ACI. Le stesse considerazioni valgono anche per la rappresentazione dei veicoli pesanti.

Il programma, inoltre, permette di rappresentare le caratteristiche del comportamento di guida: ad ogni veicolo nella rete, oltre che a marca e modello, è attribuito uno stile di guida più o meno prudente. Questo aspetto influisce sul rispetto della distanza di sicurezza, sulla propensione al rischio nel momento dell'immissione in un asse stradale uscendo da una precedenza, sulla presa in considerazione del traffico sulle corsie adiacenti e su altri aspetti quantificabili dello stile di guida. Anche l'assegnazione dei comportamenti ad ogni utente rispetta le statistiche sul comportamento medio; tali dati possono essere standard oppure si possono acquisire con delle rilevazioni specialistiche da svolgere nel caso in cui la microsimulazione interessi una vasta area e necessiti di analisi approfondite.

Il microsimulatore, pertanto, viste le sue potenzialità di analisi e di rappresentazione può essere applicato con risultati proficui nell'analisi trasportistica di una nuova rotatoria.

La caratteristica fondamentale di una microsimulazione è la descrizione del traffico veicolare nel tempo. Il calcolo rappresenta infatti il comportamento dello scenario in esame nell'arco di un preciso periodo. Per esempio si può scegliere l'ora di punta, oppure l'ora di punta più un intervallo precedente ed uno successivo.



Durante la rappresentazione di questo intervallo il computer genera tutti i veicoli indicati nei flussi orari, fa percorrere loro gli itinerari dichiarati nelle matrici OD, fa rispettare loro le regole della circolazione, i limiti imposti e le distanze di sicurezza.

In una microsimulazione, pertanto, c'è la possibilità di vedere in tempo reale la formazione delle code, i punti in cui le limitazioni di capacità danno origine agli incolonnamenti o ai rallentamenti, il riassorbimento delle code, la propagazione di un plotone di veicoli che si genera quando in un semaforo si accende il verde. Inoltre, si percepisce con immediatezza la sufficienza o l'insufficienza delle corsie di scambio e di svolta, si verifica la funzionalità di tutti gli elementi della rete e si può apprezzare l'aspetto finale della sistemazione in maniera molto più diretta e comprensibile rispetto a planimetrie e sezioni.

E' questa possibilità di verificare l'evoluzione nel tempo che rende la microsimulazione uno strumento unico, che permette non solo di quantificare alcuni parametri del traffico (come del resto è possibile con le formule), ma di vedere anche l'evoluzione nel tempo della situazione.

### *3.3.1 Dati forniti dalla microsimulazione*

La microsimulazione del traffico consiste in tre fasi. La prima è l'implementazione del programma con tutti i dati sopra descritti. La seconda parte è il lancio del calcolo: il simulatore durante l'esecuzione rappresenta in tempo reale a video il movimento dei veicoli, mostrando direttamente il comportamento del traffico nello scenario infrastrutturale. Durante questa fase sono anche prodotti tutti i dati necessari per la valutazione, la cui analisi costituisce la terza fase del lavoro. Una tipica schermata di microsimulazione è la seguente:



Figura 3-11 – Schermata di esempio di microsimulazione di una rotatoria complessa.

Come si vede, è possibile prendere in considerazione il comportamento di mezzi pubblici e privati, inserire precedenza, semafori, regole speciali di priorità ai mezzi pubblici, gestione di traffici a “onda verde” e altre funzionalità. I microsimulatori di traffico hanno raggiunto un grado di dettaglio che permette di verificare la maggior parte delle soluzioni di disciplina della circolazione e nel contempo i risultati – se prodotti professionalmente e con continui controlli sull’input – possono definirsi affidabili.

#### **3.3.1.1 DATI PER VALUTAZIONI E CONFRONTI**

Il microsimulatore, durante l’esecuzione del calcolo e la visualizzazione del filmato, memorizza tutti i dati relativi ad ogni veicolo che transita nella rete. Alcuni di questi dati, aggregati per veicolo, per asse stradale o per manovra, sono le basi per paragonare due diverse soluzioni infrastrutturali o per valutare le condizioni del traffico prima e dopo la sistemazione.

Rispetto all’analisi con le formule, il vantaggio della microsimulazione sta nella possibilità di associare ad ogni scenario – standard e non – degli indicatori comparabili con quelli di altri scenari, in modo da avere dati quantitativi e non qualitativi su cui basare confronti e decisioni. E’ questa la caratteristica che contraddistingue la microsimulazione dall’impiego delle formule standard: con queste ultime, infatti, si possono quantificare con indicatori e paragonare tra loro solo i comportamenti di infrastrutture standard.



## *TEMPI DI PERCORSO ALL'INTERNO DELLA RETE*

E' possibile cronometrare il tempo che ogni veicolo impiega per compiere un percorso. I programmi di microsimulazione offrono infatti la possibilità di fissare alcuni “traguardi” all'interno della rete. E' quindi possibile conoscere il tempo impiegato da ogni veicolo per attraversare una rotatoria; è possibile paragonare il tempo di attraversamento della rotatoria con quello di attraversamento di un semaforo; si possono creare delle tabelle in cui si mette a confronto la dilatazione dei tempi di percorso in funzione dell'entità del traffico presente.

Se si rappresenta con il microsimulatore anche la sistemazione precedente alla rotatoria è possibile mettere a confronto le tabelle dei tempi prima e dopo la sistemazione, in modo da valutare gli effetti positivi o negativi sui tempi di percorso con le due soluzioni.

## *LUNGHEZZA DELLE CODE*

Sulle linee di arresto in corrispondenza di semafori, stop e precedenza il simulatore fissa il punto iniziale di una possibile coda. Apposite tabelle forniscono le statistiche sulla lunghezza della coda, sulla velocità media dei veicoli accodati e sul tempo di permanenza in coda di ogni veicolo.

## *INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI*

Mediante il microsimulatore è possibile confrontare diversi scenari in maniera quantitativa. Tempi, code o comportamento di accessi per uno scenario sono paragonabili con gli stessi dati di altri scenari.

Non bisogna però basare la propria decisione soltanto sui risultati del microsimulatore. E' infatti necessario estendere l'analisi anche all'aspetto qualitativo. Per esempio: se si decide di costruire una rotatoria per rallentare gli utenti di una strada extraurbana all'ingresso in un centro abitato è evidente che i tempi di percorso aumentano e la velocità diminuisce. In questo particolare contesto, quindi, la dilatazione dei tempi di percorso dev'essere interpretata come un fatto positivo, come la riduzione della velocità. Al contrario, in un asse congestionato, in cui la costruzione della rotatoria vuole essere un intervento di fluidificazione, la dilatazione dei tempi si deve considerare come una caratteristica negativa.

Con questi brevi esempi si intende porre in evidenza come la microsimulazione – come del resto anche l'applicazione delle formule – siano soltanto dei processi di supporto alla decisione. I risultati devono sempre essere interpretati per valutare in funzione del contesto quali siano gli scopi prefissati e la soluzione più adatta per raggiungerli.





### **3.3.2 Casi in cui si rende consigliabile l'uso del microsimulatore**

#### **3.3.2.1 CASO DELLA ROTATORIA STANDARD**

E' possibile che una rotatoria risponda a tutte le caratteristiche di questo manuale: dimensioni accettabili della corsia anulare, visibilità ottimale, nessun vincolo spaziale che costringa a utilizzare geometrie particolari o soluzioni fuori standard. In questo caso trovano applicazione le modalità di verifica della capacità precedentemente esposte.

Vi sono però alcuni casi in cui – nonostante la situazione sia riconducibile agli standard qui esposti – è consigliabile ricorrere ad un'ulteriore verifica tramite microsimulazione.

#### **ROTATORIA NON ISOLATA**

Questa situazione si verifica quando in prossimità della rotatoria vi sono altri incroci, precedenza, semafori, attraversamenti pedonali, passaggi a livello. Un altro caso è la presenza di più rotatorie nello stesso asse stradale e la rotatoria in esame è una della serie. In questo caso non si deve valutare il comportamento del traffico nella rotatoria, ma anche le conseguenze di questa sistemazione sugli altri incroci adiacenti. La presenza della rotatoria può condizionare il traffico in altre intersezioni e la presenza di queste ultime, a loro volta, può condizionare la rotatoria. Per esempio è possibile che gli accodamenti che si formano in un'intersezione adiacente alla rotatoria risalgano fino ad interessarla. Oppure – premesso che è sconsigliato associare a poca distanza semafori e rotatorie – si può valutare il comportamento della rotatoria con traffico in arrivo scaglionato in funzione del semaforo e non continuo. Le formule standard, in questo caso, non risultano sufficienti: occorre una valutazione globale dell'intera area e una microsimulazione può essere funzionale allo scopo.

#### **RISULTATI LIMITE DELLE FORMULE STANDARD**

Questa situazione accade quando la rotatoria, verificata con le formule standard, risulta funzionare al limite tra fluidità e congestione. Nel caso in cui si ottenga questo risultato e non si abbia la possibilità di adeguare l'infrastruttura in modo da aumentare le riserve di capacità, è necessario studiare in maniera più dettagliata il comportamento dell'incrocio.

#### **3.3.2.2 CASO DELLE ROTATORIE NON STANDARD**

E' necessario ricorrere alla microsimulazione se vi sono situazioni nelle quali la verifica con le formule non dovesse essere applicabile. Accade spesso, infatti, che le rotato-





rie non possano essere costruite secondo le indicazioni ideali del manuale e – di conseguenza – non possano essere verificate con le formule riferite alle situazioni standard. In alcuni casi l'occupazione territoriale può essere fortemente vincolata dalla presenza di edifici o di altre preesistenze non eliminabili. Questo può comportare la creazione di una rotatoria con caratteristiche uniche, con accessi molto ravvicinati o con una definizione delle corsie che non rispetta gli standard.

In questo caso la rappresentazione al microsimulatore rappresenta l'unica possibilità di verifica di un'opera unica e non standardizzata.

### 3.3.2.3 ALTRI CAMPI D'APPLICAZIONE: IL RAPPORTO CON I CITTADINI

Nella stesura di un progetto stradale è ormai sempre più importante il contatto con l'opinione pubblica. Vi è un interesse sempre crescente nei confronti delle nuove opere pubbliche e molte categorie pretendono e meritano informazioni dettagliate: i cittadini direttamente interessati per primi, eventualmente organizzati in comitati, ma poi anche altri cittadini, i consigli di quartiere, le rappresentanze politiche, le associazioni ecologiste e altri gruppi che operano sul territorio, ecc.. Da parte delle amministrazioni pubbliche c'è la necessità di presentare i progetti nella maniera più completa possibile, facendo apprezzare i pro e i contro, pronti a recepire indicazioni, suggerimenti, proposte di modifiche e migliorie. Questo atteggiamento fa sì che la nuova opera sia frutto di un dialogo costruttivo e non di un'imposizione dall'alto.

La costruzione di una rotatoria è un'opera che non ha effetti soltanto sulla viabilità, ma anche sull'arredo urbano e sull'aspetto della strada e della zona in cui è inserita. Per quanto i progetti di questo tipo siano normalmente ben recepiti dai cittadini, è comunque necessario informarli sui dettagli del progetto, in modo che abbiano la possibilità di avanzare osservazioni. In questo caso la **microsimulazione** è uno dei mezzi più completi e dettagliati per descrivere la futura configurazione dell'incrocio e poterlo presentare ad un pubblico composto anche da non addetti ai lavori. Molto più immediata di planimetrie e progetti, una simulazione può essere corredata anche con una rappresentazione tridimensionale contenente arredi urbani, piante, edifici, veicoli in sosta, segnaletica stradale e ogni altro dettaglio della realtà. Una presentazione di questo tipo ha una duplice funzione: il risultato finale permette di spiegare nel miglior modo possibile i dettagli del progetto, mentre la fase di produzione obbliga a considerare molti particolari dettagliati, dando la possibilità di verificare la completezza della progettazione.

Ultimo dettaglio, ma non meno importante, è che la microsimulazione, anche se utilizzata con finalità di presentazione, è pur sempre un potente e completo metodo di calcolo che consente quindi un'ulteriore verifica del funzionamento dell'incrocio.



## 4 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE – ELEMENTI DI PROGETTAZIONE

### 4.1 SAGOMA LIMITE INSCRIVIBILE IN CURVA

Le rotatorie devono consentire il transito di qualunque veicolo. Nel Nuovo codice della strada oltre alla definizione di *sagoma limite* (art. 61), ossia le dimensioni massime che tutti i veicoli devono rispettare per poter circolare, vi è quella di fascia d'ingombro per l'inscrivibilità in curva dei veicoli; in particolare l'art. 217 del Regolamento di Attuazione definisce che: “ogni veicolo a motore, o complesso di veicoli, compreso il relativo carico, deve potersi inscrivere in una corona circolare (fascia d'ingombro) di raggio esterno 12,50 m e raggio interno 5,30 m”. [4] [5]

Tale articolo determina le condizioni di massimo ingombro dei veicoli che percorrono una curva, e di conseguenza le dimensioni geometriche di riferimento per il calcolo del raggio minimo della rotatoria e della larghezza dell'anello.

È da notare che questi limiti costituiscono dei valori minimi, che comportano una manovra piuttosto difficoltosa da parte dei mezzi pesanti. Di conseguenza per agevolare la svolta di questi mezzi è opportuno adottare raggi interni superiori a 10-12 m.

Per determinare la larghezza della fascia d'ingombro per raggi interni superiori a 5,30 m si prendono in esame due tipologie di veicoli:

- ☐ autobus lungo 12,0 m (lunghezza massima consentita dal Codice della strada per i veicoli isolati, ossia senza rimorchio);
- ☐ autoarticolato.

Con riferimento alla Figura 4-1, l'autobus è caratterizzato dalle seguenti dimensioni geometriche:

$$a = 2,70 \text{ m}; p = 5,90 \text{ m}; b = 2,50 \text{ m}.$$

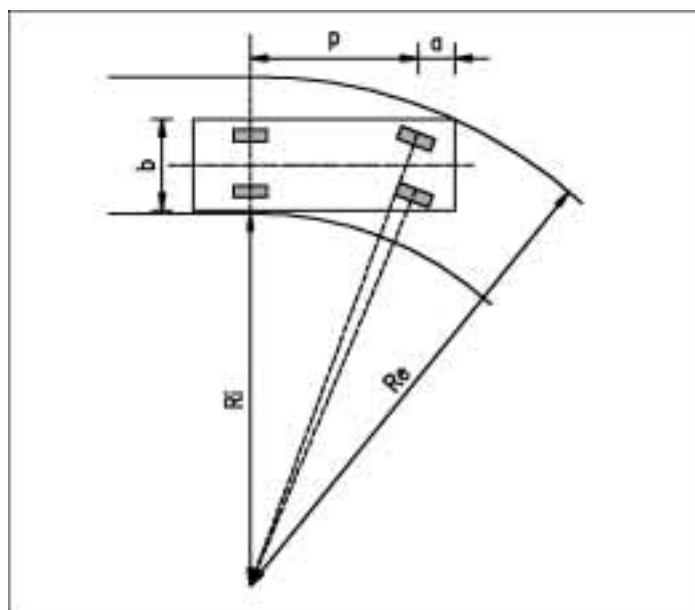


Figura 4-1 – Iscrizione in curva di un veicolo isolato. [13]

Mediante semplici considerazioni geometriche si può calcolare la fascia d'ingombro ( $R_e - R_i$ ) in funzione del raggio interno  $R_i$ . Nella Tabella 4-1 e nel grafico di Figura 4-3 è riportata la larghezza ( $R_e - R_i$ ) al variare di  $R_i$ .

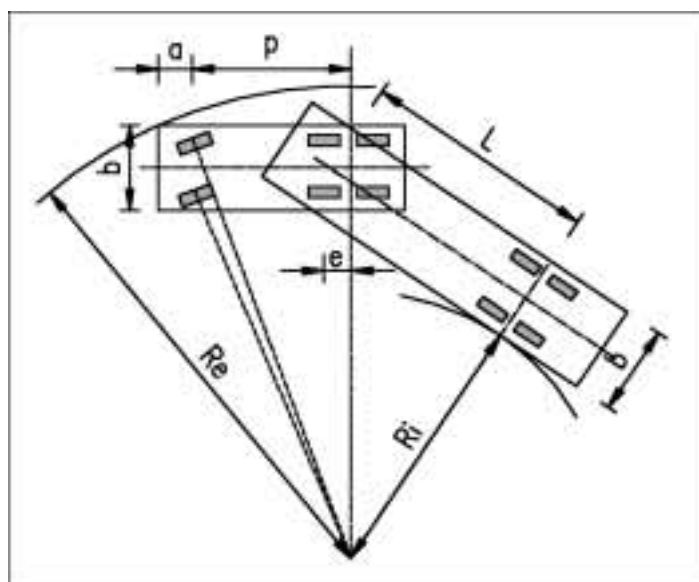


Figura 4-2 - Iscrizione in curva di un autoarticolato. [13]

Nel caso di un autoarticolato si considerino le seguenti caratteristiche geometriche (per i parametri si veda Figura 4-2):

$a = 1,50$  m;  $p = 3,50$  m;  $b = 2,55$  m;  $e = 0,0$  m;  $l_{max} = 7,78$  m



<b>Ri (m)</b>	<b>Autobus Re (m)</b>	<b>Autobus Re-Ri (m)</b>	<b>Autoarticolato Re (m)</b>	<b>Autoarticolato Re-Ri (m)</b>
5.3	11.61	6.31	12.50	7.20
6.0	12.09	6.09	12.93	6.93
7.0	12.81	5.81	13.59	6.59
8.0	13.57	5.57	14.28	6.28
9.0	14.36	5.36	15.02	6.02
10.0	15.17	5.17	15.79	5.79
11.0	16.01	5.01	16.58	5.58
12.0	16.86	4.86	17.40	5.40
13.0	17.73	4.73	18.23	5.23
14.0	18.61	4.61	19.08	5.08
15.0	19.50	4.50	19.95	4.95
16.0	20.40	4.40	20.83	4.83
17.0	21.31	4.31	21.72	4.72
18.0	22.23	4.23	22.62	4.62
19.0	23.16	4.16	23.53	4.53
20.0	24.09	4.09	24.44	4.44
25.0	28.81	3.81	29.11	4.11
30.0	33.62	3.62	33.87	3.87
40.0	43.36	3.36	43.56	3.56
50.0	53.20	3.20	53.37	3.37
60.0	63.09	3.09	63.24	3.24
70.0	73.01	3.01	73.14	3.14
80.0	82.95	2.95	83.07	3.07
90.0	92.90	2.90	93.02	3.02
100.0	102.86	2.86	102.97	2.97

Tabella 4-1 – Larghezza di ingombro per autobus e autoarticolato in funzione del raggio interno.



Con questi dati è stata ricavata la fascia d'ingombro limite (5,30m – 12,50m) indicata dall'art. 217 del Regolamento di Attuazione.

Sono state altresì calcolate per raggi  $R_i$  superiori a 5,30m, le larghezze ( $R_e-R_i$ ) necessarie per l'iscrizione del veicolo in curva (Tabella 4-1 e Figura 4-3).

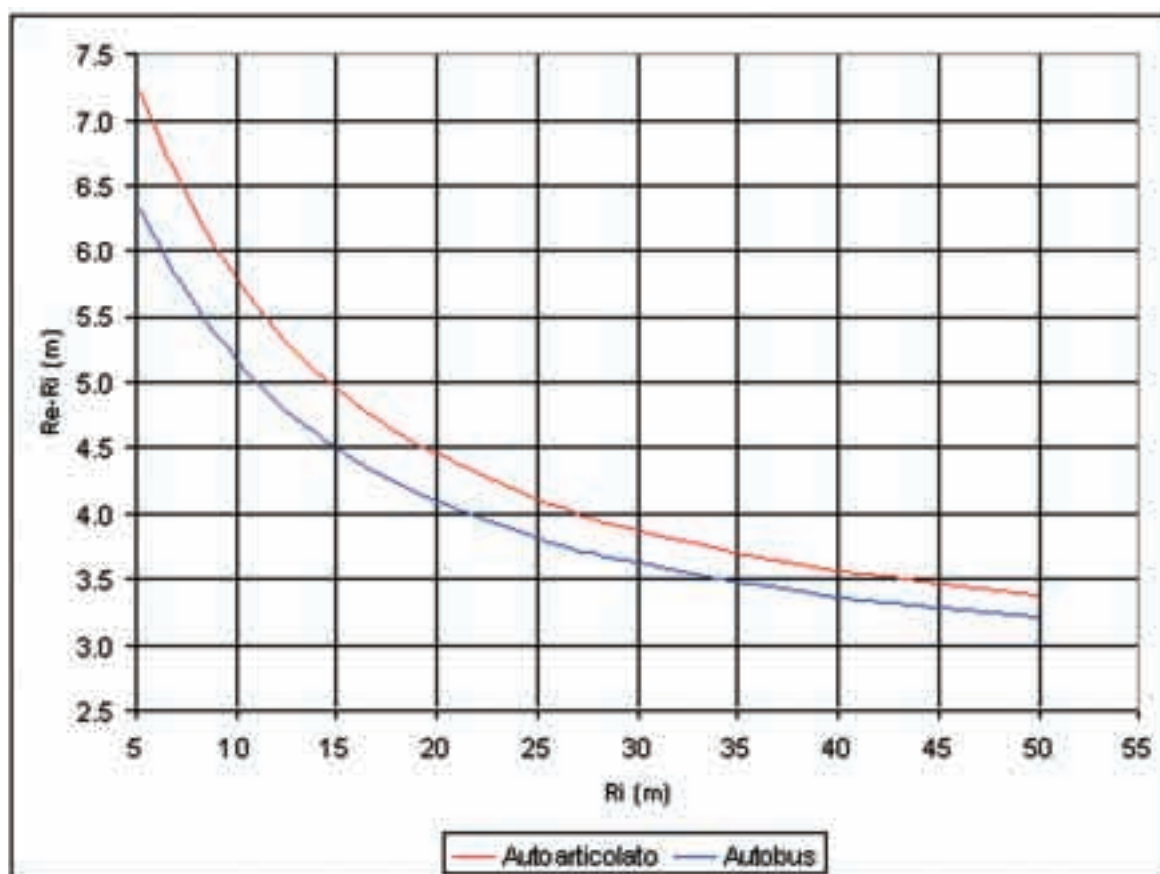


Figura 4-3 – Grafico rappresentante la fascia d'ingombro ( $R_e-R_i$ ) in funzione di raggio interno  $R_i$  nel caso di autoarticolati o autobus.



## 4.2 CONCETTO DI “DEFLESSIONE”

La regola principale per il disegno progettuale delle rotatorie riguarda il controllo della deflessione delle traiettorie in attraversamento del nodo, ed in particolare le traiettorie che interessano due rami opposti o adiacenti rispetto all'isola centrale. Essendo scopo primario delle rotatorie un assoluto controllo delle velocità all'interno dell'incrocio risulta essenziale che la geometria complessiva impedisca valori cinematici superiori ai limiti usualmente assunti a base di progetto, e cioè con velocità massime di 40-50 km/h per le manovre più dirette.

Si definisce in particolare *deflessione* (Figura 4-4) di una traiettoria il raggio dell'arco di cerchio che passa a 1.50 m dal bordo dell'isola centrale e a 2.00 m dal ciglio delle corsie d'entrata e uscita. Tale raggio non deve superare i valori di 80-100 m, cui corrispondono le usuali velocità di sicurezza nella gestione di una circolazione rotatoria.

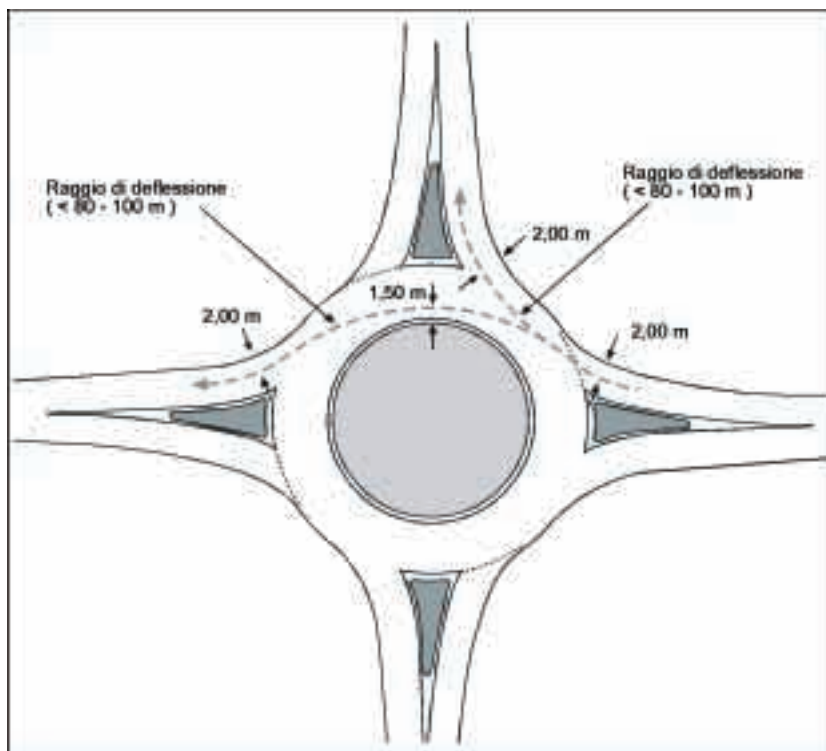


Figura 4-4 – deflessione della rotatoria [2].

Se il valore della deflessione fosse troppo grande, potrebbe essere riportato ai valori sopracitati variando la disposizione di uno o più bracci oppure aumentando il raggio dell'isola centrale.

### 4.3 ELEMENTI GEOMETRICI DELLA ROTATORIA

La tipologia e le caratteristiche geometriche da adottare nella costruzione di una rotatoria dipendono dai flussi veicolari caratteristici dell'intersezione oggetto di studio, pertanto in questo capitolo si cercherà di dare delle indicazioni di massima sugli elementi geometrici delle rotatorie identificandone i valori minimi e massimi da adottare.

Per ottenere il massimo vantaggio dalla realizzazione di un'intersezione a rotatoria, i rami della medesima (Figura 4-5), devono avere una disposizione equilibrata, orientati verso il centro dell'isola centrale, e formanti tra loro angoli prossimi all'angolo retto; nel caso non sia possibile ottenere questo valore angolare è opportuno, in ogni caso, non scendere al di sotto dei  $30^\circ$ .

Nel caso di un angolo inferiore ai  $30^\circ$  tra due rami, sarà opportuno deviare uno dei due rami come evidenziato nella Figura 4-5.

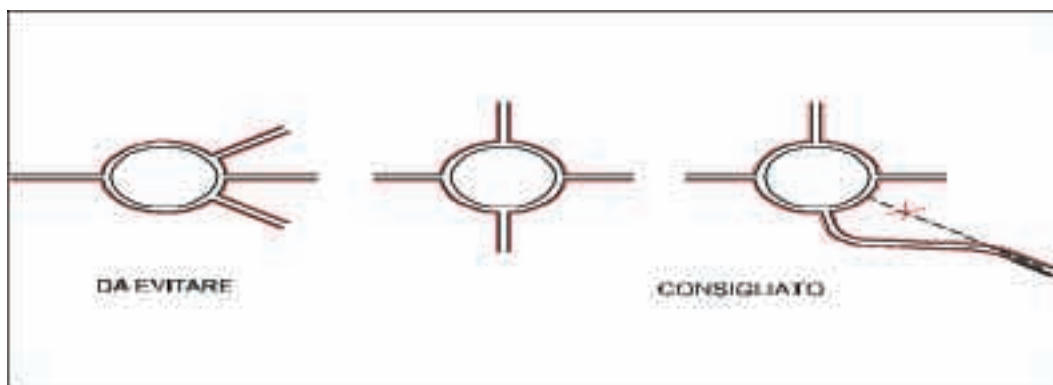


Figura 4-5 – Esempio di disposizione dei rami [8].

#### 4.3.1 Centro della rotatoria

L'elemento geometrico iniziale da esaminare è il posizionamento del centro della rotatoria (Figura 4-6). L'asse dei rami deve essere orientato verso il centro della rotatoria in modo da non consentire percorsi rettilinei e tangenti all'isola centrale. Tuttavia raramente si può ottenere questo unico punto d'intersezione, più spesso i punti d'intersezione sono dispersi a formare un poligono. In questo caso è opportuno che il centro della rotatoria venga scelto all'interno di tale poligono.

Nel caso d'incrocio a T (3 bracci) è consigliabile collocare, il centro della rotatoria sull'asse del percorso rettilineo principale. Qualora, per motivi di spazio questo non fosse possibile, il centro può essere spostato dalla posizione ottimale purché la deflessione delle varie manovre si mantenga entro i limiti consigliati (in tal caso va effettuata una



specifica verifica geometrica secondo le modalità indicate di seguito).

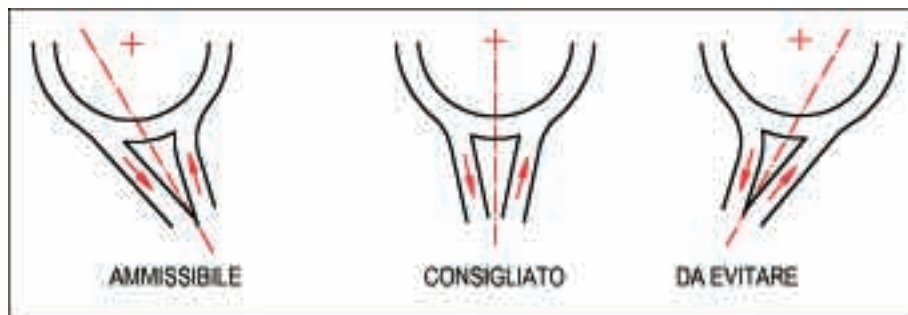


Figura 4-6 –Esempi di posizionamento del centro della rotatoria [8].

Una volta determinata la posizione del centro della rotatoria si dovrà procedere alla determinazione degli altri elementi costituenti la rotonda; tra questi l'isola centrale riveste un ruolo molto importante per la sicurezza dell'intersezione essa dovrà garantire un'adeguata deflessione nei percorsi d'attraversamento.





### 4.3.2 Isola centrale

Per ottimizzare l'intersezione a rotatoria l'isola centrale deve avere una forma circolare. Solo in casi molto particolari si potranno utilizzare forme oblunghe od ovali, in questo caso l'eccentricità, intesa come rapporto fra il raggio minimo ed il raggio massimo, non deve essere inferiore a 0.75. Le esperienze francesi hanno evidenziato infatti che rotatorie con rapporti di eccentricità inferiori hanno tassi di incidentalità più elevati.

L'interno dell'isola (Figura 4-7) può formare un rialzo con una pendenza massima del 15% e dovrà essere circondata da bordi bassi o, nel caso di rotatorie di piccole dimensioni, da una fascia carrabile di 1,5-2,0 m. Bordi alti e sicurvia con ingombri considerevoli sono da evitare, poiché possono limitare la visibilità e di conseguenza la sicurezza.

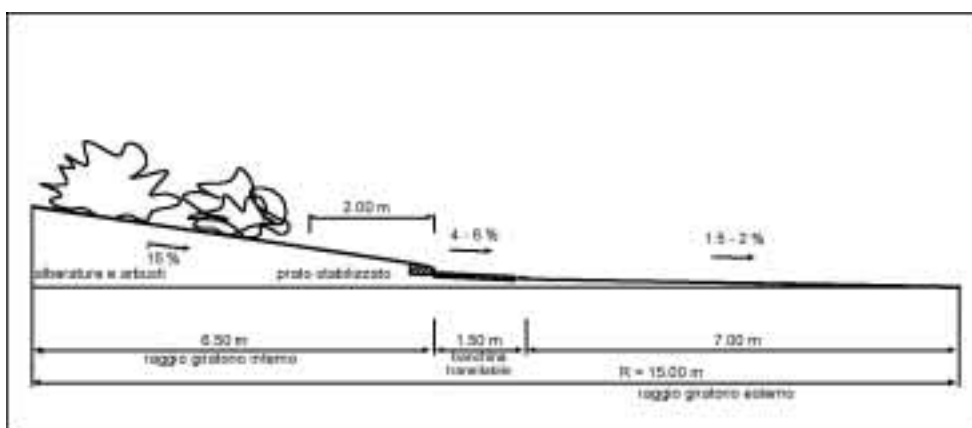


Figura 4-7 – Sezione trasversale tipica per una rotonda compatta [2].

Nella Tabella 4-2 sono riportati i valori dei raggi dell'isola centrale in relazione ai raggi esterni della rotatoria. Questa relazione considera la larghezza dell'anello di circolazione 7 m e per le rotatorie con raggi esterni 12,5 e 15,0 m è considerata anche la realizzazione di una banchina transitabile della larghezza di 1,5 m, mentre per i raggi esterni 20 e 25 è considerata una banchina di 0.50 m.

Raggio esterno	Raggio isola centrale
12,5* m	4 m
15* m	6.5 m
20 m	12.5 m
25 m	17.5 m

Tabella 4-2 – Raggi dell'isola centrale in relazione ai raggi esterni maggiormente usati

\* nella rotatoria è prevista una banchina transitabile



### 4.3.3 Anello di circolazione

La dimensione dell'anello varia in funzione della larghezza e numero di corsie dell'entrata più larga; essa deve essere più larga di questa entrata. Non devono essere ammesse variazioni nella larghezza e non sono ammesse vie supplementari, accessi a proprietà o altri accessi che non siano quelli dei bracci. Questo per non compromettere la leggibilità delle traiettorie dell'intersezione e di conseguenza la sicurezza totale della rotatoria.

In genere la larghezza da adottare per l'anello (escluse banchine) è di 7,00 m; nel caso in cui una o più entrate sia composta da due corsie la larghezza minima dell'anello è di 8,00 m. Nel caso di rotatorie con diametri grandi (superiori a 60-÷70 m) l'ampiezza della corona rotatoria potrà essere pari a 10,00 m.

Per rotatorie con diametro esterno inferiore a 30 m oltre alla dimensione di 7.00 m si dovrà realizzare una banchina transitabile della larghezza di 1.50 m, mentre per rotatorie con diametro superiore a 30 m sarà sufficiente predisporre una banchina interna pavimentata di 50cm. Questo si rende necessario per favorire le manovre dei veicoli più ingombranti all'interno dell'anello.

La pendenza trasversale dell'anello sarà del 1,5-2 % e dovrà essere diretta verso l'esterno della rotatoria, in modo da migliorare la percezione della carreggiata anulare, mantenere l'orientamento della pendenza delle corsie d'entrata ed uscita e migliorare la gestione dello smaltimento delle acque meteoriche.

La massima pendenza tra due punti diametrali esterni della corona giratoria non deve superare il valore di 5,0 %, è consigliabile comunque limitare quanto possibile questa pendenza.

### 4.3.4 Entrate

Normalmente le entrate devono essere ad una sola corsia per motivi di sicurezza dell'intersezione. In alcuni casi, però, potrebbe essere necessario, per aumentare la capacità (strombatura dell'entrata) utilizzare due corsie d'entrata.

Generalmente per la larghezza di un'entrata su un ramo principale si adotta un valore di 3,50÷4,00 m per una corsia misurata a 5 m dalla linea di dare la precedenza.

Nel caso sia necessario aumentare la capacità di un braccio si può adottare un'entrata a due corsie e una larghezza complessiva pari a 6,50 m. In questo caso l'anello di circo-



lazione deve essere larga almeno 8,00 m. La lunghezza del tratto allargato a due corsie (minimo 25÷30 m) deve essere dimensionato mediante la teoria delle code.

Il raggio della traiettoria d'entrata deve essere inferiore al raggio della circonferenza esterna della rotatoria, garantendo in ogni caso un valore minimo non inferiore a 10 m.

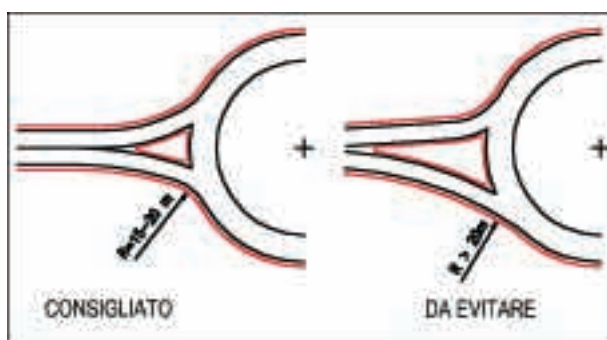


Figura 4-8 – Esempio di raggi di curvatura in entrata [8].

I raggi di curvatura dell'entrata compresi tra i 15 e 20 m (Figura 4-8) rallentano la velocità d'entrata ed inducono i veicoli a dare la precedenza a chi transita sull'anello. Un raggio troppo ampio può portare il valore della deflessione a dei livelli superiori a quelli ottimali (vedi Figura 4-4).

In presenza di notevoli flussi di svolta a destra su qualche approccio è giustificabile realizzare un'apposita corsia riservata per la svolta diretta e fisicamente separata dalla rotatoria. In questo caso occorre verificare la funzionalità dell'immissione sul braccio in uscita. Le condizioni di traffico da considerare determinanti per l'inserimento della rampa diretta si assumono in un volume veicolare di svolta a destra di almeno 300 veq/h nei periodi di punta.[2]

#### 4.3.5 Uscite

Mentre le entrate sono progettate per rallentare i veicoli, le uscite dovrebbero essere disegnate in modo da liberare il più velocemente possibile l'anello di circolazione.

Per questa ragione il raggio della traiettoria d'uscita deve essere superiore sia al raggio dell'entrata sia al raggio della circonferenza dell'isola giratoria interna, garantendo comunque un valore minimo non inferiore a 15 m.

Come per le entrate, anche le uscite dovrebbero essere normalmente ad una sola corsia. La larghezza dell'uscita dalla rotatoria è compresa tra 4,00÷5,00 m onde facilitare la



cinematica della manovra. Le uscite a due corsie sono necessarie solo nel caso di traffico orario uscente superiore a 1.200 veq/h. La larghezza delle uscite a due corsie è normalmente di 7 m. Esse in genere sono pericolose per la sicurezza dei pedoni e delle due ruote.

#### 4.3.6 Isola separatrice

L'isola separatrice favorisce la percezione delle rotatorie nell'avvicinamento a loro, riduce la velocità d'entrata, separa fisicamente l'entrata dall'uscita in modo da evitare manovre errate, controlla la deviazione in entrata ed uscita, permette di costituire un rifugio ai pedoni e permette l'installazione dei segnali stradali.

Generalmente le dimensioni dell'isola separatrice sono proporzionate a quelle dell'isola centrale in modo da ottenere dei parametri soddisfacenti della deflessione.

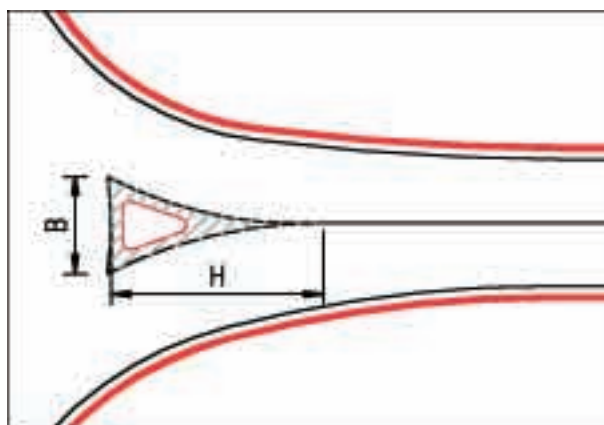


Figura 4-9

Altro fattore che potrà influire sulla larghezza “B” (Figura 4-9) è la necessità di inserire un passaggio pedonale e di predisporre all'interno dell'isola uno spazio destinato al rifugio dei pedoni.

Come prescrizione di massima, sulle vie dove i flussi sono rilevanti (superiore ai 2000 veq/h), la larghezza B e la lunghezza H dell'isola separatrice dovranno essere [6]:

$$6 < B < 20 \text{ m} \quad ; \quad 10 < H < 60 \text{ m}$$

Questi valori variano in funzione del carattere del sito attraversato, delle velocità di progetto, e del traffico, in particolare quando il flusso veicolare d'entrata è prossimo alla saturazione e quello in uscita sul ramo è elevato, aumentando l'ampiezza “B” dell'isola separatrice, si può aumentare la capacità della rotatoria poiché diminuisce il traffico di disturbo sull'entrata (vedi § 3.2.2).



Per poter essere il più possibile visibile, l'isola separatrice dovrà avere un perimetro costituito da una cordonata in materiale cementizio o lapideo e dovrà essere rialzato. Gli spigoli dovranno essere raccordati con un raggio di circa 60 cm.

#### 4.3.7 Tabella riassuntiva

In Tabella 4-3 sono riassunte le caratteristiche geometriche che compongono una rotatoria.

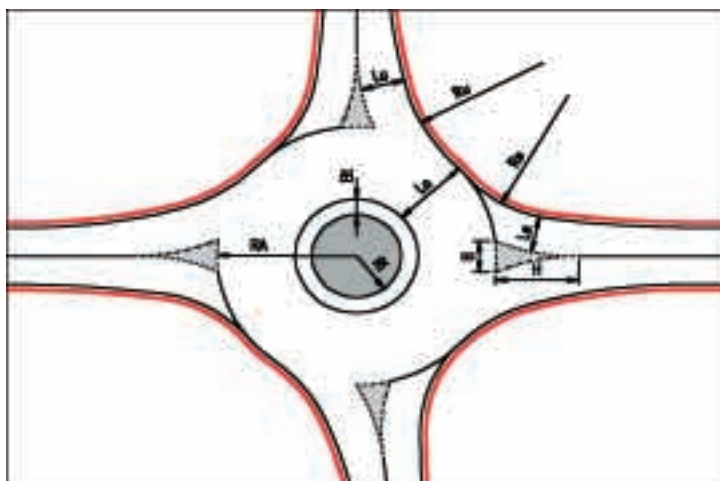


Figura 4-10 – Elementi di progetto delle rotatorie

SIGLA ELEMENTO	DESCRIZIONE	VALORI
$R_A$	Raggio esterno	Mini rotatorie: <b>7÷13 m</b> Rotatorie compatte: <b>13÷20 m</b> Rotatorie medie: <b>20÷30 m</b> Grandi rotatorie: <b>&gt;30 m</b>
$La$	Larghezza anello di circolazione	<b>7-8 m</b> <b>10 m</b> ( 3 corsie virtuali)
$R_i$	Raggio interno isola centrale	$R_i = R_A - La - Bt$
$Bt$	Banchina transitabile	<b>1.5 – 2 m</b>
$Le$	Larghezza della corsia in entrata	<b>3.5-4.0 m</b> per una corsia <b>6.5 m</b> per due corsie
$Re$	Raggio d'entrata	$Re < R_A$ ; Minimo <b>10 m</b>
$Lu$	Larghezza della corsia in uscita	<b>4.00 – 5.00 m</b>
$Ru$	Raggio d'uscita	$Ru > R_i$ ; Minimo <b>15 m</b>
$B$	Larghezza isola separatrice	Minimo <b>3 m</b>
$H$	Lunghezza isola separatrice	Minimo <b>7 m</b>

Tabella 4-3



#### 4.4 COMPATIBILITÀ DELLA GEOMETRIA CON I VOLUMI E TIPOLOGIA DI TRAFFICO

In questo capitolo saranno prese in considerazione le rotonde che potranno in qualche modo porre dei vincoli alla viabilità sia in termini di volume che in termini di tipologia di traffico, mentre per le rotonde di grande diametro sarà opportuno studiare il singolo caso data l'importanza dei volumi di traffico.

La compatibilità della geometria con i volumi e tipologia del traffico è strettamente legata all'ambiente. Una minirotonda, dove il traffico pesante non può transitare è realizzabile se nel contesto in cui dovrà inserirsi è prevista una viabilità alternativa per i mezzi pesanti. Da alcuni studi è emerso che la capacità di una rotatoria non è proporzionale al diametro, infatti oltre ai 70 m di diametro, non si ottengono benefici sensibili da giustificare una maggiore occupazione di territorio. Maggiori diametri si possono giustificare però quando la rotatoria è inserita in uno svincolo a più livelli, perché in tal caso la dimensione del diametro risulta influenzata dalla presenza del viadotto o del sottopassaggio.

Talora potrebbe essere necessario realizzare una fermata dell'autobus in prossimità della rotatoria, in questo caso è opportuno:

- ❑ non realizzarla in prossimità di un'uscita ad una corsia: la sosta del mezzo pubblico potrebbe bloccare il traffico sull'anello della rotatoria procurando così il blocco dell'incrocio. Potrebbe essere realizzabile solo in presenza di un apposito slargo anche se problemi di visibilità nella fase d'immissione, al momento della partenza dell'autobus dalla fermata, ne sconsigliano la realizzazione;
- ❑ non realizzarla in prossimità di un'entrata a due corsie, in questo caso l'attraversamento dei pedoni davanti all'autobus potrebbe causare incidenti;
- ❑ realizzarla in presenza di una uscita a due corsie avendo l'accortezza di posizionarla oltre i 10 m dall'intersezione;
- ❑ realizzarla su entrate ad una sola corsia in prossimità della linea del dare la precedenza, così facendo si faciliterebbe la partenza dell'autobus e non si avrebbe il problema dell'attraversamento dei pedoni davanti all'autobus;

Nella Tabella 4-4 è riassunta la compatibilità di alcuni modelli di rotatorie con i volumi e tipologie di traffico [6]. Sono, inoltre, identificati alcuni campi di applicazione in base al diametro esterno.



	<b>MINI ROTATORIE</b>	<b>URBANE COMPATTE</b>	<b>URBANE A SINGOLA CORSIA</b>	<b>URBANE A DOPPIA CORSIA</b>	<b>EXTRA- URBANE A SINGOLA CORSIA</b>	<b>EXTRA- URBANE A DOPPIA CORSIA</b>
Velocità d'ingresso	25 km/h	25 km/h	35 km/h	40 km/h	40 km/h	50 km/h
Numero di cor- sie in entrata	1	1	1	2	1	2
Diametro esterno	14-26m	26-30m	30-45m	45-55m	35-50m	50-60m
Campo di applicazione	Area urbana viabili- tà di quartiere	Area urbana non su assi principali	Ovunque	Su assi di grossa percorrenza	Ovunque	Su assi di grossa percorrenza
Volume di traf- fico tipico sui 4 rami (veic./g)	10.000	15.000	20.000	E' richiesta una specifico analisi dei flussi di traffico	20.000	E' richiesta una specifico analisi dei flussi di traffico
Accorgimenti per i pedoni	Attraversamenti zebrati	Attraversamenti zebrati con isola spartitraffico	Attraversamenti zebrati con isola spartitraffico	Da valutare il sin- golo caso	Attraversamenti zebrati con isola spartitraffico	Da valutare il sin- golo caso
Accorgimenti per i ciclisti	nessuno	Mantenimento pista ciclabile	Mantenimento pista ciclabile	Realizzazione di un percorso ester- no alla rotatoria	Realizzazione di un percorso ester- no alla rotatoria	Realizzazione di un percorso ester- no alla rotatoria
Trasporto pubblico	Sconsigliato	Sconsigliato	Evitare i raggi minori	OK	OK	OK
Mezzi pesanti	Prevedere viabilità alternativa	Prevedere viabilità alternativa	Evitare i raggi minori	OK	OK	OK

Tabella 4-4 – Compatibilità, in base al diametro esterno, delle rotatorie con i volumi e tipologia di traffico.



## 5 SICUREZZA

### 5.1 BENEFICI DOVUTI ALL'UTILIZZO DELLE ROTATORIE

La rotatoria, concepita come particolare configurazione di incrocio a raso, è una acquisizione degli inizi del novecento. E' infatti in questo periodo, che l'architetto francese Enard, nel sistemare il rond-point dell'Etoile a Parigi, per una migliore organizzazione della circolazione, instaurava la regola del senso unico nel percorrere l'anello.

Durante gli anni 50, le rotatorie, vennero però abbandonate a causa di sempre più frequenti blocchi del traffico e dall'aumento del numero degli incidenti.

La causa di questo insuccesso, secondo alcuni studiosi, è da attribuirsi alla distanza di affiancamento delle correnti di traffico che era spesso troppo breve in relazione alle velocità ed ai volumi di traffico; conseguentemente le alte velocità e gli spazi troppo ristretti causavano delle manovre non eseguibili in sicurezza.

Preceduta da numerose esperienze sperimentali, nel 1966 in Gran Bretagna venne applicata in modo generalizzato la norma di dare la precedenza al traffico rotante già inserito nell'anello.

Il diritto di precedenza all'interno dell'anello, a cui negli anni '70 fecero ricorso numerose città inglesi, dal 1983 è assunto a norma in Francia aprendo in tal modo la strada ad uno sviluppo spettacolare delle rotonde in quel paese ed anche in altri paesi europei fra cui la Svizzera.

Infatti questa gestione delle precedenza previene il blocco della circolazione all'interno dell'anello e permette un funzionamento a flusso ininterrotto, inoltre in conseguenza di ciò è cambiato il modo di guidare, nel senso che si è passati dalle manovre ad alta velocità a quelle a bassa.

Con questa forma di precedenza, l'entrata ora è controllata dall'abilità del conducente di trovare l'intervallo giusto per immettersi nel flusso circolatorio.

Questo fatto previene l'immissione quando non è disponibile alcun spazio nel flusso giratorio, evitando quindi il blocco del sistema ed inoltre la capacità della rotatoria non è più dipendente dalle operazioni di interscambio ma solo dalla disponibilità di tempi e spazi per l'immissione.

Utilizzando questi nuovi concetti, la sicurezza di una rotatoria dipende ora dall'effettiva efficacia che questa ha di ridurre la velocità dei veicoli; condizionando le velocità e responsabilizzando i diversi utenti, siano essi automobilisti, pedoni o ciclisti.

Con la soluzione a rotatoria si ottiene una riduzione sia nella gravità che nel numero degli incidenti.





I motivi di questa riduzione possono essere così riassunti:

- riduzione dei punti di conflitto dovuti alla circolazione a senso unico. Nella Figura 5-1 si può notare come nella rotatoria, rispetto all'intersezione classica a raso, permette una riduzione dei punti di conflitto.

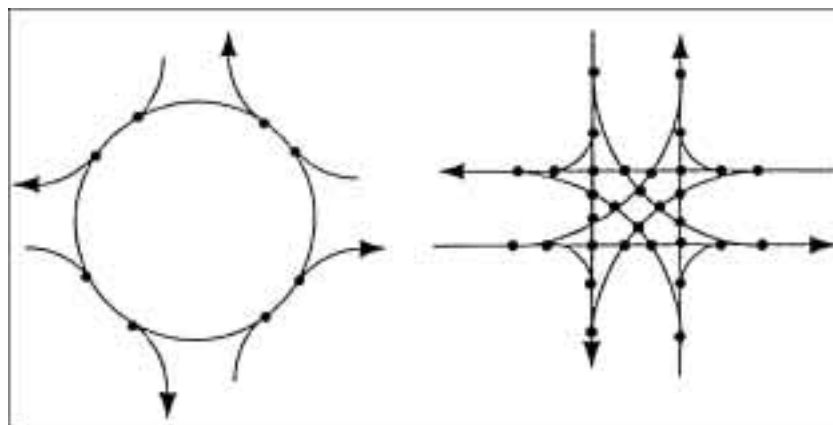


Figura 5-1 Punti di conflitto per una rotatoria e per un incrocio convenzionale [8].

- eliminazione delle manovre di svolta a sinistra che sono causa della maggior parte degli incidenti mortali alle intersezioni;
- bassa velocità relativa tra i veicoli nelle aree di conflitto;
- facilità di decisione (solo svolta a destra) per ogni ramo di entrata;
- azione di responsabilizzazione dell'utenza. La rotatoria, a differenza di un incrocio regolato da semafori costringe il guidatore ad una maggiore attenzione data la mancanza di un sistema automatico di regolazione delle precedenza;
- introduzione nella geometria del raccordo di una deflessione che impedisce l'attraversamento dell'incrocio con una traiettoria diretta e conseguentemente la riduzione della velocità del veicolo;
- le isole direzionali offrono rifugio ai pedoni e permettono di attraversare la strada in più tempi;
- possibilità di effettuare, in sicurezza, una manovra per lo più proibita negli incroci tradizionali: l'inversione di marcia.

In Germania, Birgit Stuwe (1991) dell'università della Ruhr, Bochum, condusse uno studio comparativo tra rotatorie e altri tipi di incroci.



Vennero analizzate 14 rotatorie e 14 incroci in aree tra loro vicine. Questa scelta permise di ottenere un'analisi comparativa equa rispetto ai parametri di traffico, quali il volume veicolare e i comportamenti dell'utenza.

L'analisi indicò che il numero totale degli incidenti che avvenivano sulle rotatorie era maggiore ma con conseguenze nettamente inferiori.

Un'analisi più approfondita di questi risultati fece individuare due tipi distinti di rotatorie.

Il primo raggruppante le grandi rotatorie di vecchia progettazione, con doppie corsie di entrata e con curvatura in ingresso avente un piccolo angolo di incidenza, questo tipo di rotatorie facevano segnalare un elevato numero di incidenti.

Il secondo tipo era costituito dalle rotatorie moderne con entrata quasi radiale e isola centrale interna del diametro di 28-35 metri; queste facevano registrare pochi incidenti e con lievi conseguenze.

Durante il periodo dello studio tre incroci vennero convertiti in rotatorie e questo permise il confronto prima/dopo l'intervento.

Sebbene i risultati non possono avere valore statistico dato il loro esiguo numero, gli incidenti diminuirono da 4 per anno a 2.4, mentre quelli che hanno comportato danno alle persone passò da 3.3 a 0.5 incidenti anno.

Alla fine del 1992, Chris Schoon e Jaap van Minnen analizzarono 201 rotatorie in Olanda.

Nel confronto prima/dopo fu riscontrato che il numero degli incidenti per intersezione si riduceva da 4.9 a 2.4 all'anno, ed anche il numero delle vittime per anno passava da 1.3 a 0.37.

Di conseguenza, fu riscontrato che l'adozione delle rotatorie rispetto agli incroci portava ad una riduzione media nel numero di incidenti gravi del 47% e del 71% degli incidenti lievi.

Con l'introduzione della precedenza ai veicoli in circolazione nella rotatoria e l'abbassamento della velocità si ottenne il risultato di avere, a parità di efficienza, delle rotatorie con l'isola centrale più piccola e di conseguenza delle rotatorie che potevano essere inserite in contesti urbani con ridotte possibilità di spazi.

L'inserimento di questo sistema di incrocio in ambiti urbani ha portato anche ad avere un'utenza caratterizzata, oltre che da veicoli, anche da pedoni e ciclisti.



## 5.2 PROTEZIONE DELL'UTENZA DEBOLE

Le rotatorie, come il resto delle infrastrutture stradali, devono permettere la mobilità in sicurezza a tutti gli utenti della strada indipendentemente dal veicolo utilizzato.

### 5.2.1 Pedoni

Per i pedoni, le rotatorie, non sono più pericolose di altri tipi di intersezioni tuttavia le rotatorie di grandi dimensioni sono disagiati e generano una sensazione di insicurezza e costringono ad allungare i percorsi al punto da ritenere che rotatorie con diametro esterno maggiore di 60 m sono considerate delle vere e proprie barriere.

Nella progettazione si dovrà, pertanto, tenere conto di questo limite ed in ambito urbano si dovranno privilegiare rotatorie le più compatte possibile.

Il pedone è l'utente della strada più vulnerabile. Nelle aree urbane l'80-90% dei pedoni coinvolti in incidenti rimangono feriti, contro un 5-10% degli automobilisti.

La velocità è il fattore determinante della gravità dell'incidente tra pedone e veicolo. Nel diagramma (Figura 5-2) è evidenziato l'effetto di un urto con veicoli, in rapporto alla loro velocità. Per esempio: un urto con un'auto che viaggia a 60 km/h corrisponde all'effetto di una caduta libera da 14.4 m, mentre l'urto con un'auto che viaggia a 30 km/h ha effetti molto meno pesanti, in quanto corrisponde ad una caduta da 3.6 metri di altezza.

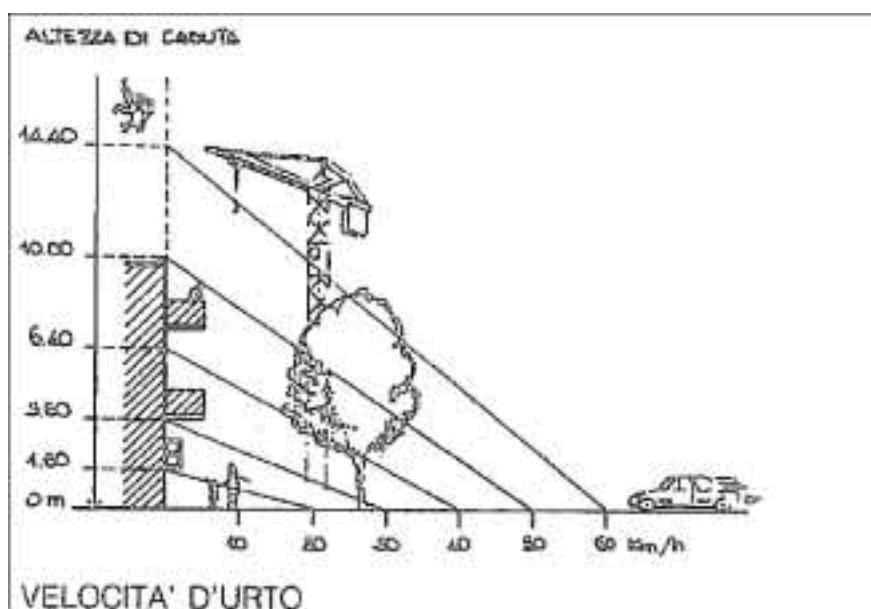


Figura 5-2 [6]

Nelle rotatorie, specie quelle urbane, le basse velocità operative dei veicoli (sono circa 30-40 km/h) favoriscono pertanto la diminuzione di rischio per i pedoni.



L'esperienza francese ha, inoltre, dimostrato che le rotatorie non sono più pericolose per i pedoni. Infatti gli incidenti con i pedoni sono abbastanza rari e la maggior parte dei quali associati a rotatorie con entrate a più corsie.

Altro fattore da tenere in considerazione nella progettazione è la possibilità o meno di separare fisicamente le componenti di traffico.

Se la separazione funziona finché ciascun utente rimane nella propria sede, è causa di grandi problemi quando le diverse componenti di traffico vengono a contatto stimolando comportamenti aggressivi da parte degli utenti più forti.

Di conseguenza si dovrà cercare di perseguire il concetto d'integrazione [6] che, puntando ad una commistione di utenti nell'uso della strada, suggerisce una minore velocità dei flussi veicolari. Tale scelta progettuale, dedicata alle aree a vocazione residenziale, punta ad indebolire la posizione di forza degli automobilisti in favore degli utenti deboli (ciclisti e pedoni), ad aumentare la permeabilità degli spazi stradali ed a facilitare gli attraversamenti.

All'aumento delle possibilità di interazione tra i diversi utenti (e quindi ad una apparente minore sicurezza), dovranno corrispondere delle misure che consentano di ottenere un maggior grado di sicurezza. Tra queste misure si inseriscono anche interventi per la moderazione della velocità del traffico e le rotatorie sono uno strumento efficace per ottenere lo scopo.

Poiché la rotatoria viene, generalmente, caratterizzata nei rami di adduzione, dall'inserimento di isole divisionali tra i due sensi opposti di marcia risulta generalmente ottenibile la separazione dell'attraversamento dei due sensi della corrente veicolare, utilizzando l'isola quale rifugio e di frazionamento dell'itinerario.

Le dimensioni dell'isola di rifugio, in profondità non deve essere, possibilmente inferiore a 1.50 metri [6] (Figura 5-3), in modo da consentire alle persone su carrozzina il cambiamento di direzione. E' consigliabile una misura di 1.80 – 2.00 metri, in modo da garantire un minimo di protezione anche ai ciclisti, qualora esistano attraversamenti ciclabili.

La larghezza dell'attraversamento pedonale va commisurata all'entità del flusso pedonale reale o previsto. Si dovrà tenere in considerazione se il passaggio è ubicato in prossimità di centri commerciali, grandi magazzini, punti di scambio nella rete dei trasporti ecc.

La larghezza dell'attraversamento non deve essere inferiore a 2,50 metri nelle aree urbane e 4 ,00 metri nelle altre strade (art. 145/1 Nuovo Codice della Strada) [4].

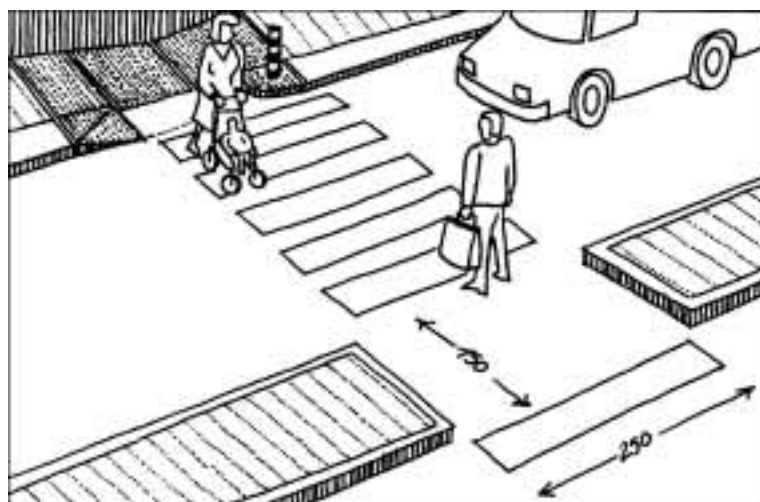


Figura 5-3 – Caratteristiche minime del passaggio pedonale e dell'isola salvagente [6].

Ove possibile, è consigliabile che le due serie di strisce pedonali, quella relativa al ramo d'entrata e quella di uscita, siano sfalsate di alcuni metri tra loro (Figura 5-4). L'attraversamento del ramo d'entrata dovrà essere più distante dall'anello circolatorio rispetto a quello del ramo di uscita in tal modo i pedoni cammineranno lungo l'isola spartitraffico guardando il flusso veicolare che dovranno successivamente attraversare.

Il passaggio pedonale dovrà essere arretrato di 1 a 2 vetture rispetto alla linea di fermata (da 5 a 10 m) in modo che i pedoni possano passare dietro alle vetture ferme in attesa di inserirsi nella corona giratoria. In tale posizione risulta inoltre più semplice migliorare la visibilità reciproca pedone-automobilista.

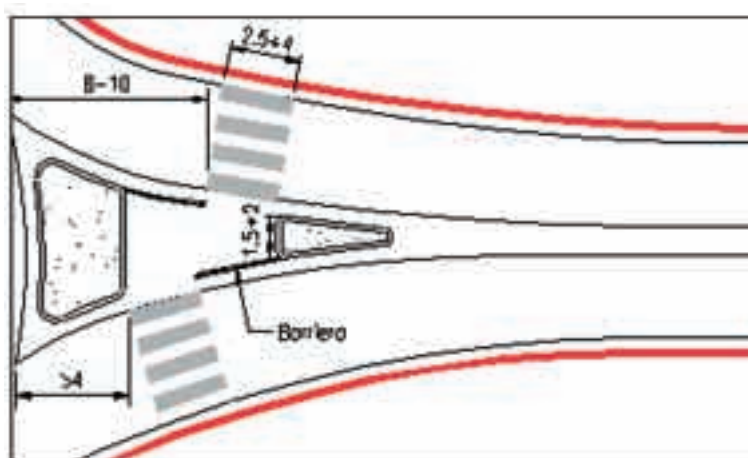


Figura 5-4 -Esempio di attraversamento pedonale sfalsato.

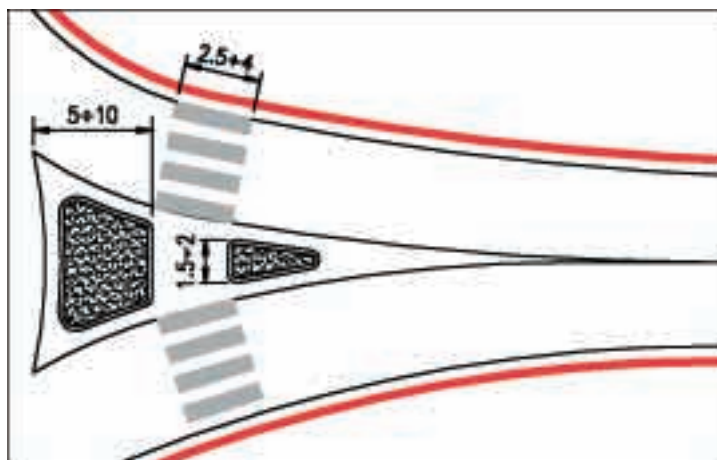


Figura 5-5 -Esempio di attraversamento pedonale in linea.

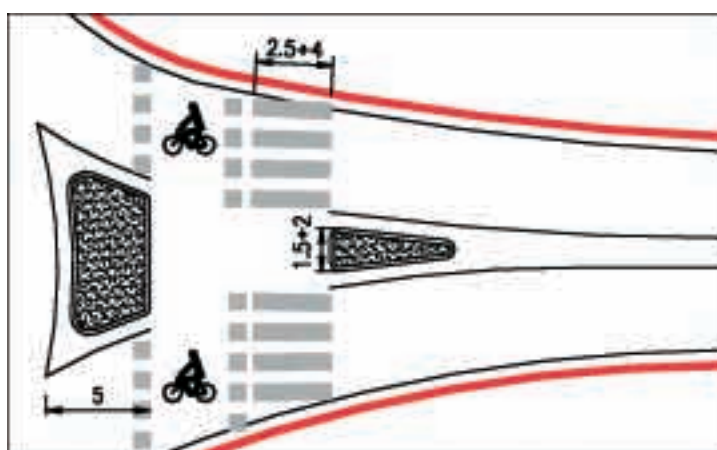


Figura 5-6 -Esempio di passaggio pedonale con pista ciclabile.

E' essenziale, per la regolamentazione dei movimenti dei pedoni, dissuaderli da attraversare o impegnare l'anello. Questo può essere reso possibile adottando un'elevata qualità dei percorsi pedonali lungo la corona in modo da indurre i pedoni a preferire i percorsi a loro dedicati e studiati per la loro sicurezza. Inoltre si potranno utilizzare degli ostacoli appropriati lungo i bordi (archetti, catene ecc.) in modo da dissuadere il pedone da intraprendere percorsi non previsti e potenzialmente pericolosi.

Naturalmente il tentativo di canalizzare i flussi pedonali attraverso l'utilizzo di barriere o piantumazioni, dovrà tener conto del concetto di visibilità dell'intersezione che rappresenta la distanza richiesta al guidatore senza precedenza per percepire e reagire alla presenza di veicoli in conflitto oltre al fatto che alcune barriere portano alla diminuzione della visibilità del pedone, specialmente nel caso di bambini, da parte dell'automobilista. In generale, gli attraversamenti pedonali dal bordo esterno verso l'anello sono da evitare.



Si dovranno, in sede di progettazione, prevedere un'adeguata illuminazione e segnalazione che metta in risalto gli attraversamenti delle utenze deboli.

### 5.2.2 Ciclisti

Come riportato nel C.d.S. le strade di nuova costruzione classificate come C, D, E ed F del D.M. 5 novembre 2001, “devono avere, per l'intero sviluppo, una pista ciclabile adiacente purché realizzata in conformità ai programmi pluriennali degli enti locali, salvo comprovati problemi di sicurezza” (Art. 13, comma 4-bis). Quindi è importante individuare dei criteri per la gestione dei flussi dei ciclisti all'interno delle rotatorie.

Nel caso di viabilità esistenti, la realizzazione di infrastrutture ciclabili generalmente sono attuabile solo attraverso il coordinamento di molteplici interventi collegati tra loro, come ad esempio: le modifiche alla circolazione veicolare (sensi unici, riduzione dei limiti di velocità), la riorganizzazione funzionale della strada, il ridisegno delle intersezioni ecc.

La sicurezza dei ciclisti nelle rotonde è fortemente legata al volume di traffico motorizzato, alle velocità e comunque, rappresenta una condizione delicata, anche per il fatto che generalmente gli automobilisti rifiutano di dover dare la precedenza ai ciclisti.

Le strutture dedicate alle biciclette nelle rotatorie vengono classificate sulla base del diritto di precedenza per i ciclisti, della presenza di una pista contigua o separata e del volume veicolare, in quattro tipi principali [6]:

- ☐ rotatorie con flusso misto quando il volume non è superiore agli 8.000 veic./giorno e le vie di avvicinamento non sono provviste di piste ciclabili;
- ☐ rotatorie con piste ciclabili quando il volume veicolare non è superiore ai 10.000 veic./giorno e le vie di avvicinamento non sono provviste di piste ciclabili;
- ☐ rotatorie con piste ciclabili separate dove i ciclisti hanno il diritto di precedenza, quando il volume veicolare è superiore ai 10.000 veic./giorno;
- ☐ rotatorie con piste ciclabili separate dove i ciclisti non hanno diritto di precedenza, quando il volume veicolare è superiore ai 10.000 veic./giorno.

La scelta delle infrastrutture da dedicare ai ciclisti è funzione dei risultati dei conteggi di traffico. È necessario quindi che vengano raccolti dati sull'utenza due-ruote; dato che i conteggi automatici non rilevano questa categoria di mezzi, è necessario che siano raccolti dai contatori manuali.





### 5.2.2.1 PICCOLE ROTATORIE A TRAFFICO MISTO E VELOCITÀ MODERATA

La rotatoria a piccolo raggio (Figura 5-7), regola effettivamente la circolazione costringendo i veicoli a procedere a velocità moderata ( 30-40 km/h), ma questa condizione non è comunque sufficiente per il passaggio sicuro delle biciclette, data l'assenza di infrastrutture ciclabili. Rimangono, infatti, irrisolti i punti di conflitto, all'ingresso e all'uscita dell'anello [6].

Si consiglia quindi, nel caso in cui si realizzi una rotatoria di questo tipo, di prevedere altre misure atte ad allertare l'attenzione da parte di chi impegna l'anello carrabile, come ad esempio una pavimentazione a contrasto con l'asfalto, per colore e per tipologia di materiale.

Il flusso di biciclette determina inoltre effetti sulla capacità della rotatoria, in quanto parte del traffico motorizzato, in alcuni momenti, deve rimanere dietro le biciclette. Nel caso in cui in un ramo dell'intersezione sia presente una pista ciclabile a senso unico, sarà necessario interromperla 15-20 metri prima della linea di ingresso. Questo permetterà di avere uno spazio di interazione tra i diversi utenti prima dell'intersezione e quindi, un aumento dell'attenzione da parte degli utenti prima della rotatoria.

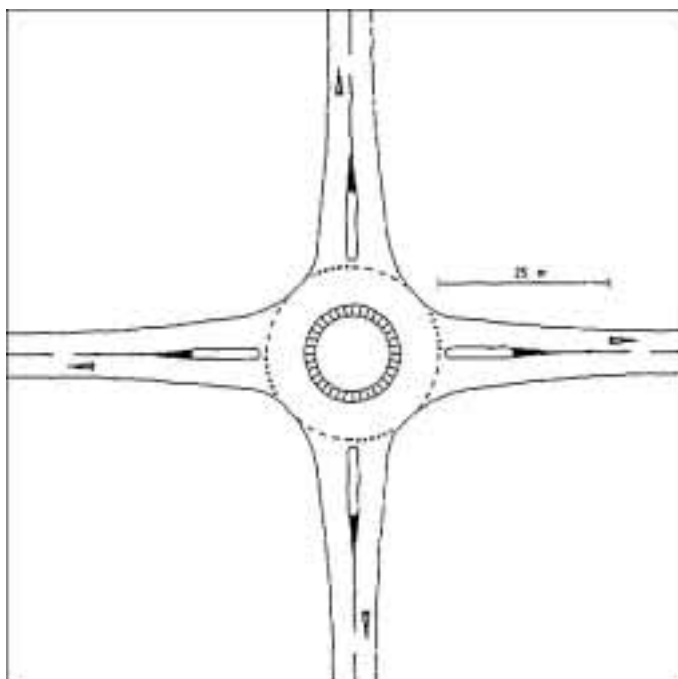


Figura 5-7 -Esempio di rotatoria senza pista ciclabile [6].





### 5.2.2.2 ROTATORIE CON PISTA CICLABILE SEPARATA DALLA SOLA STRISCIA BIANCA DI DELIMITAZIONE

Una rotatoria con striscia bianca (Figura 5-8) di separazione tra il traffico veicolare e il flusso ciclabile è sempre da preferirsi, se non è possibile realizzare una rotatoria a traffico misto e velocità ridotta [6].

Si può pensare di realizzare una corsia ciclabile nell'anello nei seguenti casi:

- come continuazione di una pista monodirezionale in entrambi i lati dell'intersezione;
- nelle rotatorie minori, ma più larghe di 30 metri.

Nelle rotatorie di questo tipo il ciclista ha sempre il diritto di precedenza rispetto agli automezzi che entrano o escono dalla rotatoria ed è in questo momento che si possono generare conflitti. Infatti, il ciclista che è interessato a continuare a percorrere l'anello, molto spesso non è visibile negli specchietti laterali di chi esce dalla rotatoria.

Pertanto questa soluzione è ancora ammissibile per rotatorie interessate da un carico massimo di 8.000 veicoli/giorno.

Anche in questo caso è buona prassi evidenziare il fondo del percorso ciclabile con un colore a contrasto rispetto a quello dell'asfalto.

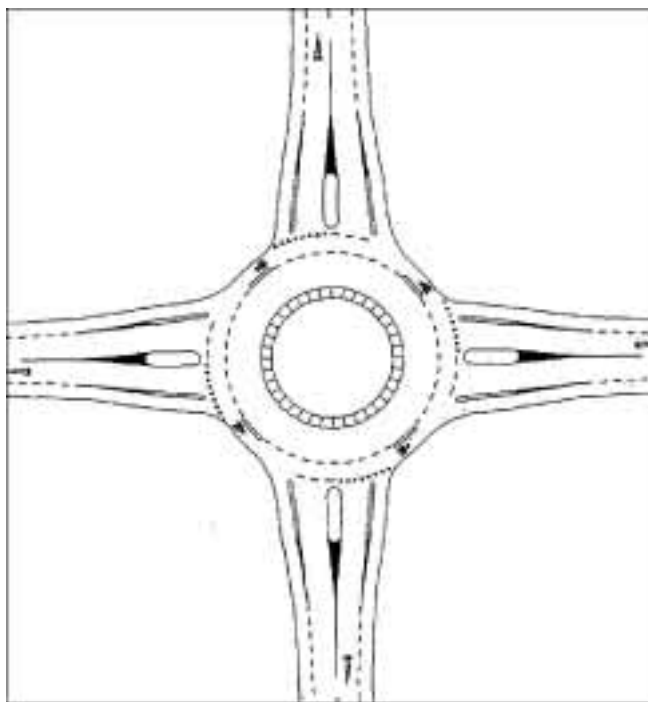


Figura 5-8 Esempio di rotatoria con pista ciclabile separata dalla sola striscia bianca [6].



### 5.2.2.3 ROTATORIE CON PISTA CICLABILE SEPARATA DALLE CORSIE VEICOLARI E DIRITTO DI PRECEDENZA PER I CICLISTI

Questo tipo di soluzione (Figura 5-9) prevede la costruzione di una pista ciclabile attorno ad una circonferenza equidistante dall'anello circolatorio.

Si può pensare di realizzare questo tipo di rotatoria nei seguenti casi:

- ❑ nelle rotatorie di medie dimensioni (con diametri esterni maggiori di 40 metri);
- ❑ come continuazione di piste esistenti su entrambi i rami dell'intersezione;
- ❑ dove non vi siano entrate e uscite con più di due corsie.

Le biciclette possono percorrere interamente l'anello ciclabile senza fermarsi, in quanto hanno diritto di precedenza. E' comunque evidente che esistono alcuni punti di conflitto tra biciclette e veicoli, particolarmente in prossimità delle corsie di accesso e di uscita della rotatoria [6].

In fase di progettazione è consigliabile prevedere uno spazio di almeno 5 m tra l'anello della corsia ciclabile e i momenti di ingresso e uscita.

Tale tipologia di rotatoria prevede il senso unico anche per la pista ciclabile; una soluzione con due sensi di marcia aumenterebbe i punti di conflitto e necessiterebbe l'abolizione del diritto di precedenza per i ciclisti.

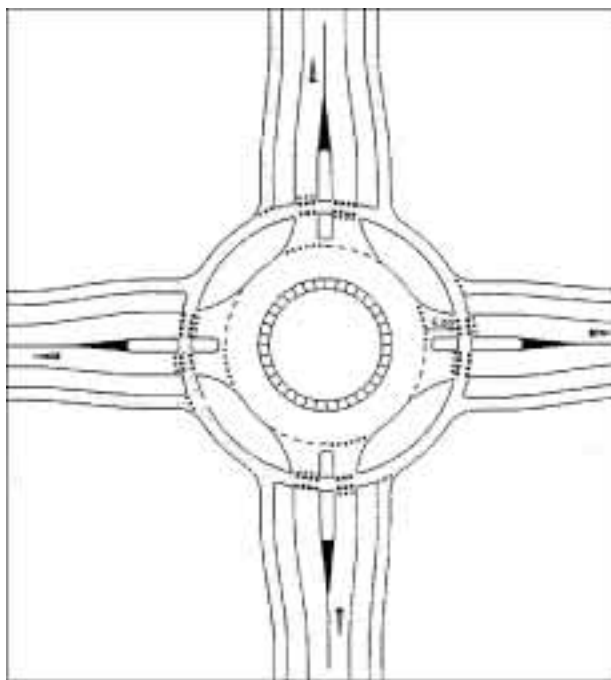


Figura 5-9 esempio di rotatoria con pista ciclabile separata dalle corsie veicolari e diritto di precedenza per i ciclisti [6].



#### 5.2.2.4 ROTATORIE CON PISTA CICLABILE SEPARATA DALLE CORSIE VEICOLARI E SENZA DIRITTO DI PRECEDENZA PER I CICLISTI

Questo tipo di rotatoria presenta (Figura 5-10), dal punto di vista planimetrico, ha molti aspetti in comune alla rotatoria precedente.

In questo caso, però, l'attraversamento ciclabile risulta perfettamente perpendicolare alle corsie veicolari che entrano ed escono dalla rotatoria, ma deve essere segnalato ai ciclisti, in modo inequivocabile, l'obbligo di dare la precedenza ai veicoli [6].

E' inoltre consigliabile, affinché il flusso ciclabile non venga bloccato da parte dei veicoli che attendono di entrare in rotatoria prevedere, tra le corsie carrabili della rotatoria e l'anello ciclabile, un'area di rispetto di 5 metri.

L'attraversamento dei rami dovrà essere eseguito in due fasi, e pertanto sarà necessario realizzare un'isola spartitraffico sufficientemente grande (ovvero in grado di contenere la lunghezza del ciclo  $> 1,80$  m).

Questi attraversamenti, senza diritto di precedenza, potranno essere affiancati a quelli pedonali, ma sempre sul lato interno, cioè verso la rotatoria [8] (Figura 5-6).

In questo tipo di soluzione è possibile rendere l'anello ciclabile utilizzabile nei due sensi di marcia compensando, con la grande libertà di movimento da parte dei ciclisti, gli effetti negativi dovuti alla perdita del diritto di precedenza e all'allungamento del percorso.

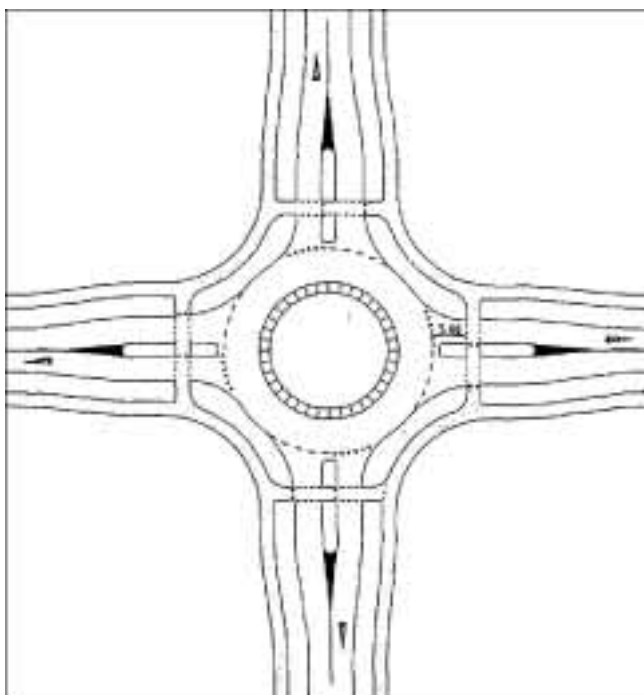


Figura 5-10 Esempio di rotatoria con pista ciclabile separata dalle corsie veicolari e senza diritto di precedenza per i ciclisti [6].



### 5.3 VISUALI LIBERE DA GARANTIRE

L'esistenza di opportune visuali libere costituisce primaria ed inderogabile condizione di sicurezza della circolazione, in particolare nelle zone di intersezione, dove si concentra il maggior numero di punti di conflitto veicolare.

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”. [1]

Nel caso di una rotatoria si deve, innanzitutto, garantire un adeguato spazio, libero da qualunque impedimento visivo, tra il veicolo in approccio all'intersezione e la linea del “dare precedenza” per consentire l'arresto del veicolo (Figura 5-11). 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 [1]:

$$D_A = D_1 + D_2 = \frac{V_0}{3,6} \times \tau + \frac{1}{3,6^2} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \times \left[ f_l(V) + \frac{i}{100} \right] + \frac{Ra(V)}{m} + r_o(V)} dV \quad (5-1)$$

dove:

- $D_1$  = spazio percorso nel tempo  $\tau$  [m]
- $D_2$  = spazio di frenatura [m]
- $V_0$  = velocità del veicolo all'inizio della frenatura [km/h]
- $V_1$  = velocità finale del veicolo, in cui  $V_1 = 0$  in caso di arresto [km/h]
- $i$  = pendenza longitudinale del tracciato [ % ]
- $\tau$  = tempo complessivo di reazione (percezione, riflessione, reazione e attuazione) [s]
- $g$  = accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>]
- $Ra$  = resistenza aerodinamica [ N ]
- $m$  = massa del veicolo [kg]
- $f_l$  = quota limite del coefficiente di aderenza impegnabile longitudinalmente per la frenatura



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

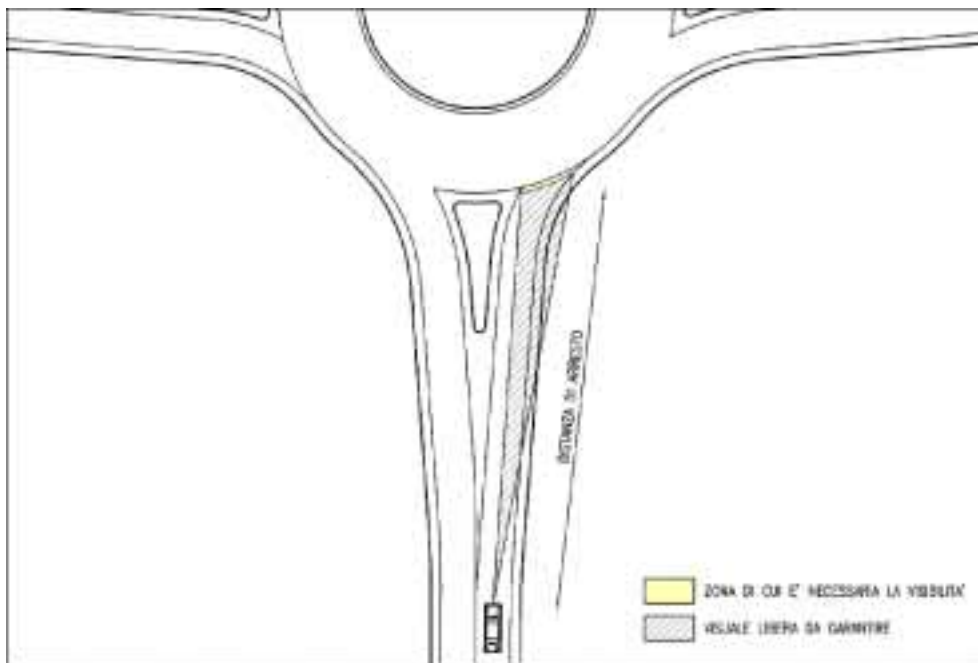


Figura 5-11 – Distanza di visibilità per l'arresto da garantire nel ramo di ingresso in rotatoria.

Nel caso in cui prima della linea d'arresto ci sia un attraversamento pedonale, la distanza di visibilità va calcolata con riferimento a quest'ultimo.

La Tabella 5-1 riporta la distanza di visibilità per l'arresto in funzione della velocità di approccio; essa è stata calcolata con la formula (5-1), utilizzando i valori indicati dalla normativa per i termini  $\tau$ ,  $R_a$ ,  $f_1$ , e per diversi valori della pendenza longitudinale "i".

Velocità (km/h)	Distanza di arresto (m)		
	Pendenza longitudinale "i"		
	-5.0 %	0 %	+5.0 %
25	24	23	23
30	31	30	29
40	43	41	39
50	58	55	52
60	76	71	67
70	97	90	84
80	122	111	103
90	151	136	125

Tabella 5-1 – Distanza d'arresto.



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 gli utenti, che stanno giungendo in rotatoria, riescano a percepire i veicoli con precedenza all'interno della corona in tempo per modificare la propria velocità e quindi cedere il passaggio o eventualmente immettersi nell'anello. Il già citato studio a carattere prenormativo [2] fornisce le seguenti prescrizioni per valutare questo tipo di visuale libera (vedi Figura 5-12 e Figura 5-13):

- il punto di osservazione si pone ad una distanza di 20 m dalla linea di arresto coincidente con il bordo della circonferenza esterna;
- la posizione planimetrica si pone sulla mezzeria della corsia di entrata in rotatoria (a una distanza minima di 1,5 m dal bordo laterale della carreggiata) e l'altezza di osservazione si colloca ad 1,00 m sul piano viabile;
- nel caso di 4 o più bracci, la zona di cui è necessaria la visibilità completa corrisponde al quarto di corona giratoria posta alla sinistra del canale di accesso considerato; nel caso di 3 bracci, la zona si deve estendere fino all'innesto viario più prossimo in sinistra.

In situazioni di particolare condizionamento, soprattutto in ambito urbano, è possibile ridurre la distanza tra punto di osservazione e la linea di arresto da 20 m a 3 m, utilizzando il segnale di "stop" al posto del segnale di "dare precedenza".

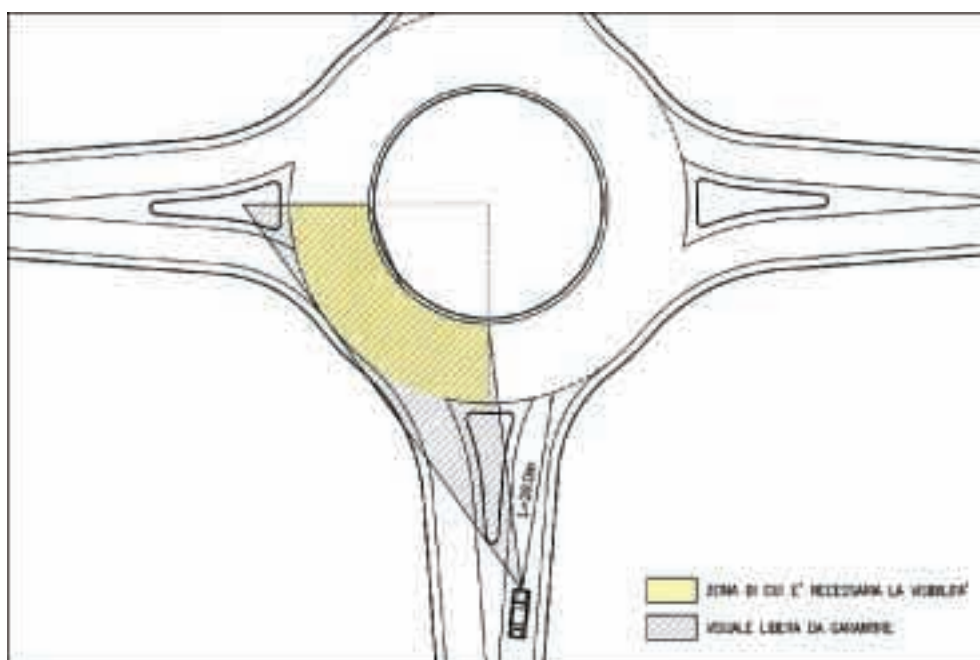


Figura 5-12 –Visibilità dell'intersezione (caso rotatoria con 4 o più bracci)

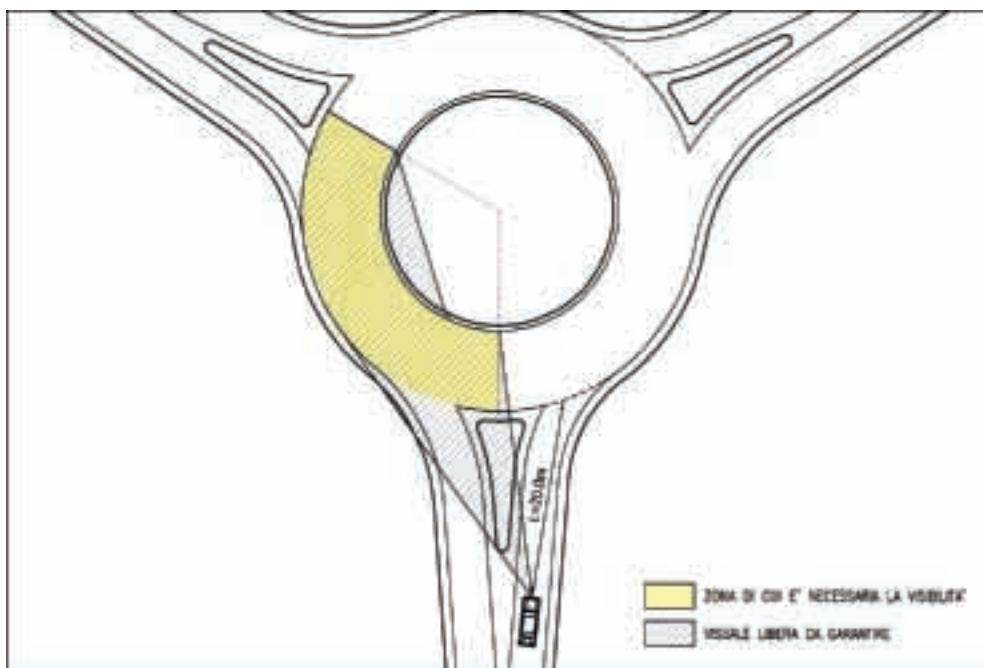


Figura 5-13 - Visibilità dell'intersezione (caso rotatoria con 3 bracci)

Lo studio prenormativo [2] suggerisce di non considerare come ostacoli visivi gli elementi discontinui (come pali per l'illuminazione, segnaletica, alberi) aventi larghezza in orizzontale inferiore a 0.80 m.

Nel caso di rotatorie interessate da attraversamenti pedonali è necessario verificare che essi siano visibili dai veicoli circolanti nell'anello e/o da coloro che si devono immettere in rotatoria e provengono dal ramo immediatamente a sinistra dell'attraversamento. Per le rotatorie senza attraversamenti pedonali bisognerebbe prevedere comunque una verifica di transitabilità dei pedoni. Va notato che per migliorare la sicurezza dell'attraversamento è opportuno garantire una reciproca visione del pedone con il guidatore del veicolo. Potrebbe essere necessario valutare la distanza di visibilità, non solo per il veicolo (Figura 5-14) ma anche una visibilità del veicolo da parte del pedone (Figura 5-15) poiché hanno velocità, accelerazioni e tempi di reazione differenti. [9]

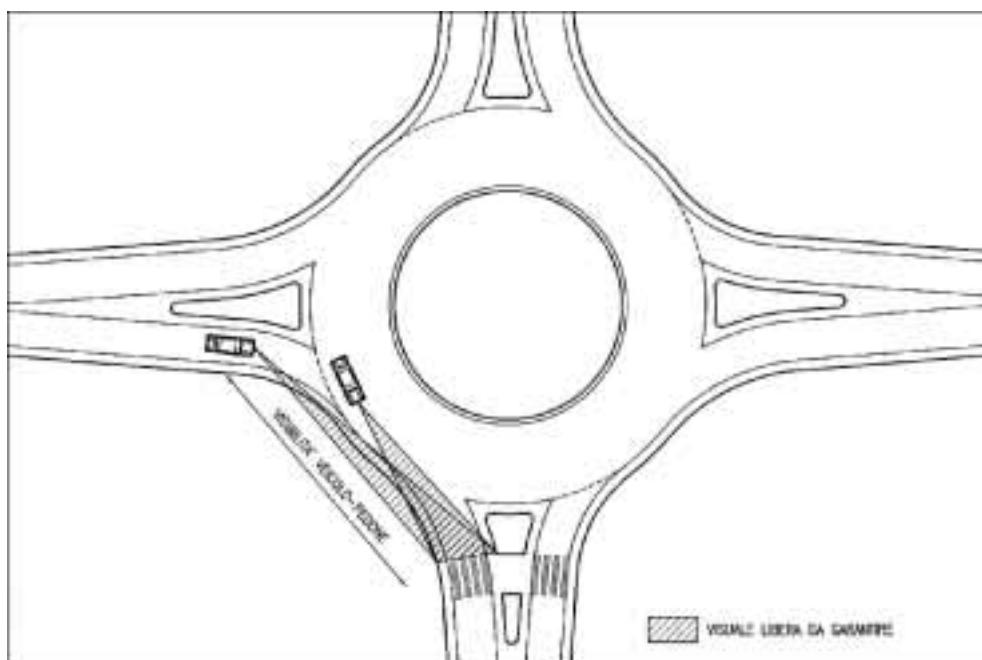


Figura 5-14 – Visibilità di un attraversamento pedonale da parte di un veicolo in uscita.

Nel calcolo della distanza di visibilità per l'arresto si utilizza la Tabella 5-1. Dal punto di potenziale conflitto con il pedone si risale all'indietro lungo i possibili percorsi (sia sull'anello che sui bracci di ingresso) per determinare i punti estremi in cui va verificata la visibilità.

Nel caso del pedone si può assumere una velocità di 1,1 m/s. Per fare un esempio si supponga che l'attraversamento sia di 3,5 m. Si ottiene un tempo di attraversamento di 3.2 s. Se i veicoli viaggiano a 30 km/h si ottiene una distanza di circa 27 m, a 50 km/h è circa 55 m.

La quota del punto di vista del guidatore è a 1,10 m e l'oggetto da rilevare ad una quota compresa tra 0,10 e 0,20 m, viceversa per il pedone, il punto di vista varia da 1,10 m per bambini e ragazzi, a 1,70 m per gli adulti.



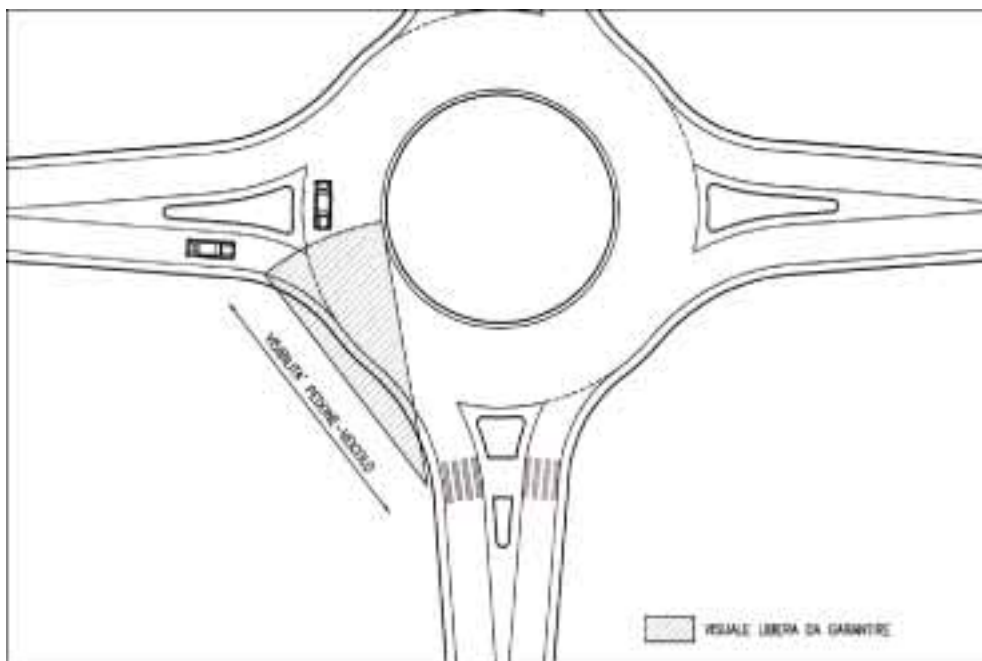


Figura 5-15 – Visibilità per il pedone in prossimità di un attraversamento pedonale.

Un'ulteriore visuale libera da garantire è quella relativa ai veicoli che percorrono la rotatoria [9]; essa si riferisce sia alla distanza di arresto per la presenza di oggetti o altri veicoli presenti nell'anello sia alla distanza di visibilità per prevedere l'ingresso di altri veicoli (Figura 5-16). Questa fascia di visibilità incide sull'arredo dell'isola centrale, in particolare nelle rotatorie di piccole dimensioni. In ogni caso non devono essere posti ostacoli visivi (come alberi) a meno di 2 m dal bordo dell'isola centrale o, in assenza di bordura sormontabile, a 2,50 m dalla linea di demarcazione dell'isola centrale).

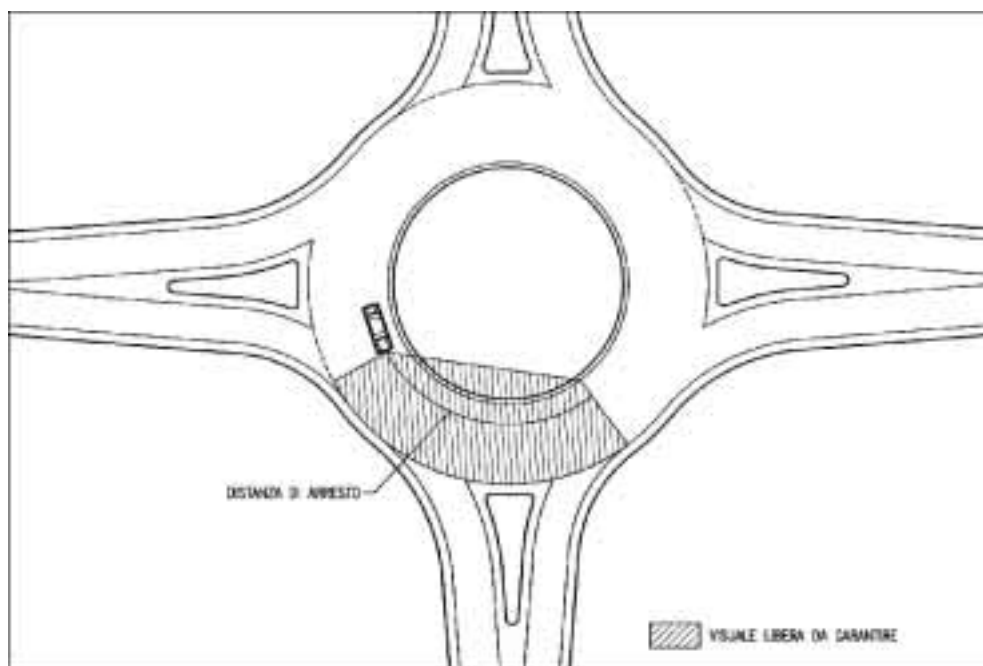


Figura 5-16 – Distanza di visibilità nella circolazione lungo l’anello.

Per il calcolo della distanza d’arresto si può far riferimento alla Tabella 5-1 considerando la velocità di circolazione nell’anello. La posizione planimetrica del veicolo è posto a 2 m dal bordo interno dell’isola centrale.

La quota del punto di vista è a 1,10 m e l’oggetto da rilevare a una quota di 0,10 m poiché, in questo caso, è necessario rilevare qualsiasi ostacolo presente sull’anello.

Per valutare l’esistenza di opportune distanze di visibilità, prima analizzate, è necessario determinare la velocità che i flussi assumono nella fase di ingresso, di uscita e nella circolazione nell’anello. La scelta di tali velocità deve essere basata sui raggi di curvatura per le manovre veicolari. La Tabella 5-2 fornisce le velocità in funzione del raggio della curva ( $R$ ), della pendenza trasversale ( $q$ ) e della quota parte del coefficiente di aderenza impegnato trasversalmente ( $f_t$ ). I valori di  $f_t$  sono stati ricavati dalla tabella contenuta nel già citato D.M. 5 novembre 2001 [1].



Velocità (km/h)	Raggio della curva (m)			Coefficiente di aderenza (f <sub>t</sub> )
	Pendenza trasversale			
	-2.0 %	0 %	+2.0 %	
15	8	8	7	0.23
20	15	14	13	0.23
25	25	22	21	0.22
30	35	32	30	0.22
40	66	60	55	0.21
50	109	98	89	0.20
60	157	142	129	0.20

Tabella 5-2 – Relazione tra velocità di progetto e raggio della curva.

Oltre alle distanze di visibilità prima analizzate, è necessario garantire, come previsto dal Nuovo Codice della Strada [4], delle idonee aree di visibilità (art. 16 in ambito urbano ed art. 18 in ambito extraurbano), le quali individuano un triangolo di visibilità che deve aggiungersi a quello individuato dalle fasce di rispetto, che non sono da sottoporre ad esproprio (vedi Tabella 5-3). I lati del triangolo, posto sul limite esterno della fascia di rispetto, sono il doppio della stessa fascia di rispetto, così come indicato nel regolamento (vedi Figura 5-17). Se la visibilità dell'intersezione così definita è garantita allora, per la strada secondaria, è possibile utilizzare il segnale di “dare precedenza” (cioè quello utilizzato in genere agli ingressi delle rotatorie) altrimenti deve essere usato quello di “fermarsi e dare la precedenza” (art. 106 e 107 del regolamento).



TIPOLOGIA STRADALE	FASCIA DI RISPETTO (m) Fuori dai centri abitati		FASCIA DI RISPETTO (m) Nei centri abitati	
	Nuovi edifici oppure ricostruzioni	Zone edificabili (Progetto attuativo)	Senza strumento urbanistico	Con strumento urbanistico
C – Strada extraurbana secondaria	30	10	-	-
E – Strada urbana di quartiere	-	-	20	Strumento urbanistico
F – Strada locale	20	Strumento urbanistico	10	Strumento urbanistico
F – Strada vicinale	10	Strumento urbanistico	10	Strumento urbanistico

Tabella 5-3 – Fasce di rispetto per i tipi di strada dove sono consentite le intersezioni a raso. [4] [5]

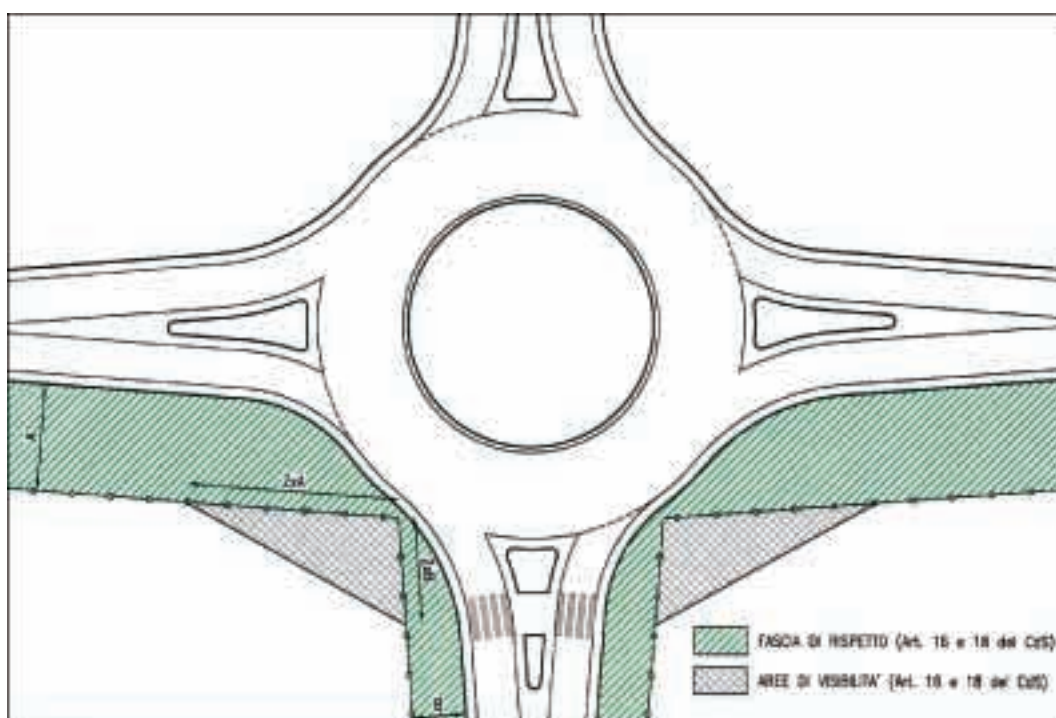


Figura 5-17 – Triangolo di visibilità da garantire in corrispondenza di intersezioni stradali a raso come prescritto dal Nuovo Codice della Strada.



## 6 ELEMENTI DI COMPLETAMENTO

### 6.1 INDICAZIONI SULLE PAVIMENTAZIONI

In molti paesi europei, soprattutto in Francia, si è sviluppata in questi ultimi anni, la ricerca del contrasto cromatico sulla pavimentazione per evidenziare passaggi pedonali, limiti di velocità, strettoie ecc.

Generalmente, in Italia, la differenziazione delle pavimentazioni avviene quasi esclusivamente nelle rotonde di piccole dimensioni dove l'anello centrale invalicabile è contornato da un'area concentrica transitabile di larghezza variabile da 1.5 a 2 metri e pendenza trasversale più accentuata, pari a circa 4÷6% (Figura 6-1), questo per permettere la manovra anche ad automezzi pesanti.

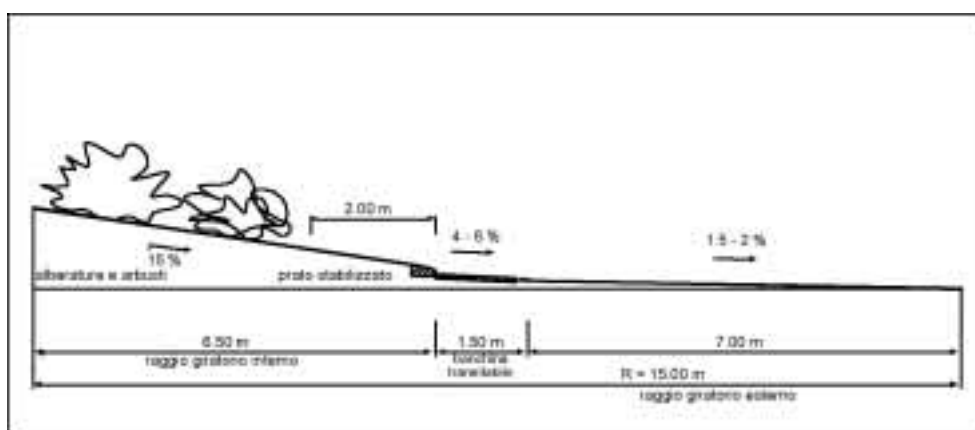


Figura 6-1 – Sezione trasversale tipica di una rotonda con banchina transitabile [2].

E' consigliabile, inoltre, in caso di percorso ciclabile, segnalarlo con una tipologia di pavimentazione differente rispetto a quella dei veicoli.

Per quanto riguarda il dimensionamento della pavimentazione stradale da utilizzare all'interno dell'anello di circolazione si devono considerare oltre agli usuali parametri (il tipo di strada, i carichi veicolari, la portanza del sottofondo, le condizioni climatiche, ecc.) anche il fatto che nelle intersezioni:

- le velocità ridotte danneggiano maggiormente la pavimentazione;
- la maggiore presenza di arresti e partenze consigliano l'adozione di tappeti di usura più resistenti (bitumi modificati).



A titolo di esempio, nella Figura 6-2, riportiamo un pacchetto di pavimentazione normalmente usato nelle strade provinciali.



Figura 6-2 – Esempio di pavimentazione tipo.

Per le pavimentazioni ciclabili e per l’anello centrale transitabile si potrà utilizzare un materiale che valorizzi esteticamente il raccordo viario, armonizzandosi con l’ambiente circostante. Si potranno utilizzare dei porfidi o altri materiali quali marmi o mattonelle di graniglia ma si dovrà porre particolare attenzione al tipo di sottofondo in modo che un traffico d’automezzi pesanti non possa degradare la pavimentazione con crepe od avvallamenti.

La scelta dei materiali dovrà tener conto anche delle caratteristiche di aderenza e non solo di quelle estetiche, in modo da non pregiudicare la sicurezza in caso di pioggia o d’altri eventi atmosferici sfavorevoli.

Altro fattore, molto importante, da tenere in considerazione nella progettazione delle rotatorie è il drenaggio delle acque meteoriche.

In alcuni casi la dimensione trasversale può assumere un’importanza rilevante e pertanto costituire una modifica sostanziale d’impostazione rispetto alla sezione stradale corrente.

In linea generale, nell’impostazione progettuale si dovranno seguire i seguenti criteri [2]:

- ☐ cercare di eliminare le zone piane all’interno dell’intersezione;
- ☐ individuare i punti di recapito dei compluvi mediante caditoie o mediante scarico laterale, in modo da delimitare sia le singole superfici scolanti sia i percorsi delle acque meteoriche sulla pavimentazione;



- nel caso di anelli centrali pavimentati di dimensione considerevole si dovrà creare un sistema di drenaggio indipendente in modo da non dover gravare sul sistema di scolo della pavimentazione stradale;
- utilizzare canalette continue di recapito nei casi di difficile displuvio o di condizioni meteo favorevoli alla formazione di ghiaccio.



## 6.2 ELEMENTI DI ARREDO URBANO

Le rotatorie possono offrire dei vantaggi rispetto altri sistemi di canalizzazione del traffico in riferimento al loro inserimento ambientale ed all'impatto che possono avere sul paesaggio. Infatti, durante il XIX secolo, ben prima dell'introduzione considerevole dell'automobile, nella pianificazione urbana delle grandi città europee e nelle capitali d'oltre oceano, le rotatorie identificavano, congiuntamente a monumenti o maestose fontane, dei punti qualificanti dello spazio urbano.

Una rotatoria progettata correttamente può migliorare l'aspetto estetico dell'area e nel contempo incrementare la sicurezza stradale. Uno degli elementi che portano alla scelta della sistemazione di un incrocio a rotatoria è la volontà, da parte del progettista, di segnare volutamente, l'entrata di una località, di un quartiere o di uno spazio di transizione tra tessuti morfologicamente differenti.

In generale gli interventi per il miglioramento dell'inserimento ambientale delle rotatorie devono:

- ☐ aumentare e non interferire con la visibilità progettata per la rotatoria;
- ☐ non introdurre elementi di pericolo nella rotatoria;
- ☐ mantenere uno spazio di visibilità utile per lo stop e per le svolte;
- ☐ non oscurare la vista dei segnali stradali e degli altri veicoli nella rotatoria;
- ☐ non incoraggiare l'attraversamento dei pedoni nell'isola centrale;
- ☐ canalizzare i pedoni ed i ciclisti sui percorsi di loro competenza.





## 6.3 SEGNALETICA

La convenienza di generalizzare, per tutte le rotatorie, la priorità di circolazione nell'anello rispetto ai bracci, porta a prevedere una attrezzatura segnaletica sia orizzontale sia verticale che elimini ogni possibile dubbio sul diritto di precedenza. Inoltre bisognerà eliminare, a monte della rotatoria, tutti quei dubbi sulla direzione da prendere in modo che il traffico all'interno dell'anello circolatorio sia il più possibile fluido.

### 6.3.1 Segnaletica orizzontale

Qualora si realizzino anelli con carreggiata superiore a 9 m, è consigliabile introdurre strisce longitudinali discontinue di separazione delle eventuali corsie lungo l'anello. Viceversa se la larghezza dell'anello è inferiore a 9 m, la marcatura delle corsie è inutile e disturbante per il traffico in quanto i veicoli descrivono normalmente dei percorsi tangenti sull'anello, in relazione al punto di entrata. Questo inconveniente aumenta al diminuire delle dimensioni della rotatoria.

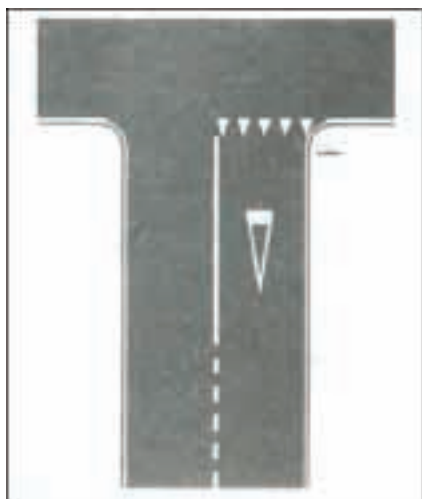


Figura 6-3 – Figura II 433 Art.144 del Nuovo Codice della Strada ed un esempio di realizzazione

Per ogni ramo d'entrata è richiesta la striscia trasversale (Figura 6-3) di dare la precedenza mentre non deve essere eseguito nessun tipo di segnaletica orizzontale per indicare i rami d'uscita.



L'approssimarsi delle isole di separazione deve essere evidenziato mediante zebraure poste entro le strisce di raccordo per l'incanalamento dei veicoli.

Le isole di separazione possono essere:

- **isole a raso** (Figura 6-4), realizzate mediante strisce di colore bianco. Nell'interno delle isole a raso devono essere inserite zebraure di colore bianco, inclinate a 45° rispetto al senso di marcia, gli intervalli fra le strisce hanno larghezza doppia rispetto alle strisce;
- **isole delimitate da elementi verticali**, realizzate con paletti, birilli ecc. disposti lungo il perimetro dell'isola. La distanza tra un elemento e l'altro deve essere tale da definire perfettamente i margini dell'isola;
- **isole permanenti**, realizzate mediante cordoli in calcestruzzo o pietra da taglio (o altro materiale simile), e sistemazione interna a prato o con pavimentazione differente da quella veicolare. I cigli possono essere del tipo a barriera o del tipo sormontabile, le testate delle isole rialzate devono essere arrotondate e precedute da cuspidi zebraure di preavviso (Figura 6-4). Quando l'isola venga interessata da un attraversamento pedonale o ciclabile e costituisce zona di rifugio, è opportuno utilizzare un cordolo di altezza non inferiore a 25 cm e dovrà essere interrotto per una larghezza pari a quella del passaggio pedonale onde permettere ai pedoni l'attraversamento a raso della pavimentazione stradale.

Sarà opportuno, in fase di sperimentazione della rotatoria, utilizzare isole di separazione a raso o con elementi provvisori in modo da poterle eventualmente modificare in base alle osservazioni rilevate in questa fase.

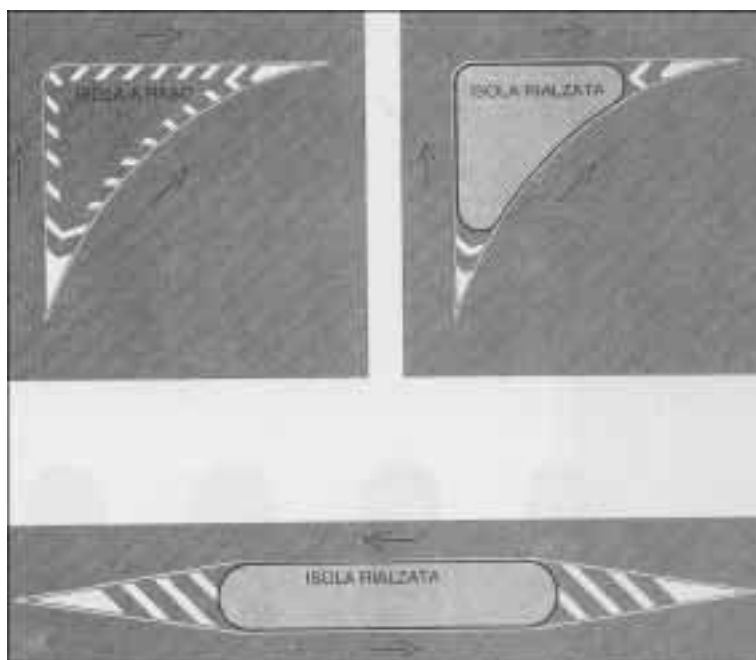


Figura 6-4 – Figura II 446 Art. 150 del Nuovo Codice della Strada.

Per evitare di dover dipingere i cordoli a margine dell'anello e delle isole di separazione, sarebbe più utile ricorrere sempre alle strisce di margine di carreggiata, continue o tratteggiate a seconda dei casi, di larghezza di cm 15 o cm 12 nelle strade locali. In questo modo, per valorizzare l'arredo urbano, sarà possibile utilizzare cordoli in materiale pregiato.

### 6.3.2 Segnaletica verticale

La segnaletica deve essere utilizzata in modo che l'utenza, già prima dell'ingresso nell'area di manovra, sappia dove dovrà uscire dalla rotatoria. Pertanto sarà necessario provvedere all'installazione di una opportuna segnaletica indicatrice (Figura 6-5) in modo che non si generi confusione di interpretazione all'interno della rotatoria.



Figura 6-5 – Figura II 238 Art. 127 del Nuovo Codice della Strada.



### 6.3.2.1 SEGNALETICA VERTICALE DA COLLOCARE NELL'ISOLA CENTRALE

Nell'isola centrale, di fronte a ciascuna entrata deve essere posto, in vista per i conducenti che si trovano sulla linea del “dare la precedenza”, il seguito cartello di svolta obbligatoria a destra:



Figura 6-6 - Figura II 80 art. 122 del Nuovo Codice della Strada.



Figura 6-7 – Figura II 466 Art. 174 del Nuovo Codice della Strada.

Nelle rotatorie di medie e grandi dimensioni, per evidenziare il senso di percorrenza, è possibile associare alla segnaletica della Figura 6-6 il delineatore di curva rappresentato nella Figura 6-7.

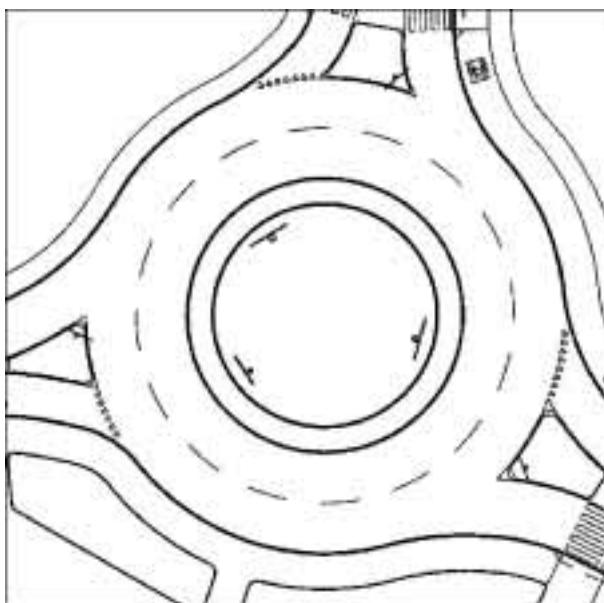


Figura 6-8 – Esempio di posizionamento dei segnali nell'isola centrale [6].



### 6.3.2.2 SEGNALETICA VERTICALE DA COLLOCARE NELLE ISOLE DI SEPARAZIONE

Nelle isole di separazione andranno collocati cartelli con le indicazioni delle direzioni ed i delineatori speciali di ostacolo accoppiati a segnali indicanti i passaggi obbligati.

Nel caso si utilizzino delle isole di separazione a raso è consigliabile non posizionare la segnaletica verticale all'interno della stessa .

#### SEGNALETICA DI DIREZIONE

Questo tipo di segnaletica si dovrà porre sul vertice di ogni isola a sinistra dell'uscita, in modo che il conducente possa comprendere inequivocabilmente la direzione da prendere. Dovranno essere indicate solo le località che si possono raggiungere utilizzando l'uscita alla quale sono associati.

Figura 6-9 – Figura II 248 e 249 Art.128 del Nuovo Codice della Strada.

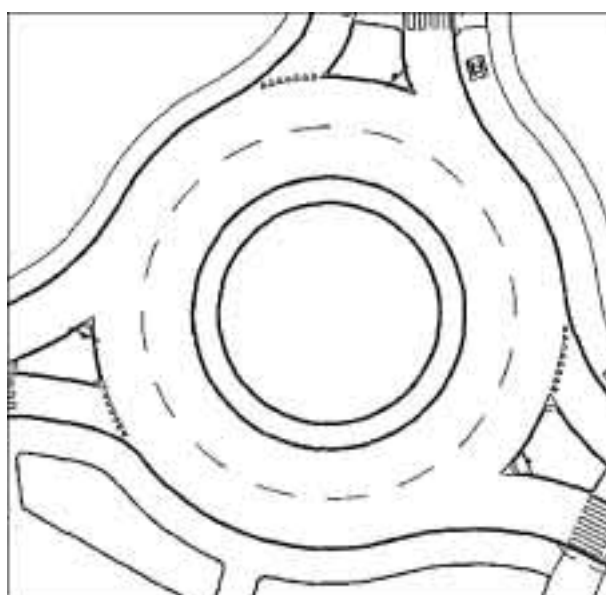


Figura 6-10 – Esempio di posizionamento dei segnali di direzione da collocare nelle isole di separazione [6].



### *DELINEATORI SPECIALI DI OSTACOLO*

Questo tipo di segnalazione è da porsi sempre sulle testate delle isole di separazione in corrispondenza dell'entrata, accoppiato al segnale verticale di passaggio obbligatorio a destra.

E' consentito sostituire la parte gialla a luce riflessa con una colonnina luminosa a luce gialla.

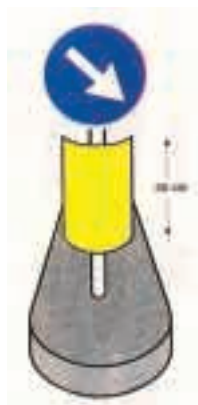


Figura 6-11 – Figura II 472 Art. 177 del Nuovo Codice della Strada

Lo stesso tipo di segnalazione sarà posto sulla testata dell'isola di separazione in corrispondenza dell'uscita e sarà accoppiato con il segnale di passaggio sia a destra che a sinistra (Figura 6-12).



Figura 6-12 – Figura II 82/A Art. 122 del Nuovo Codice della Strada)

Nel caso ci sia la possibilità che in ingresso l'automobilista possa entrare in rotatoria accedendo da una uscita è consigliato associare alle segnalazioni di passaggio obbligato a destra (Figura II 82/b Art. 122 del Nuovo Codice della Strada) la segnalazione di Senso vietato (Figura II 47 Art 116 del Nuovo Codice della Strada):



Figura 6-13 – Figura II 47 Art. 116 del Nuovo Codice della Strada

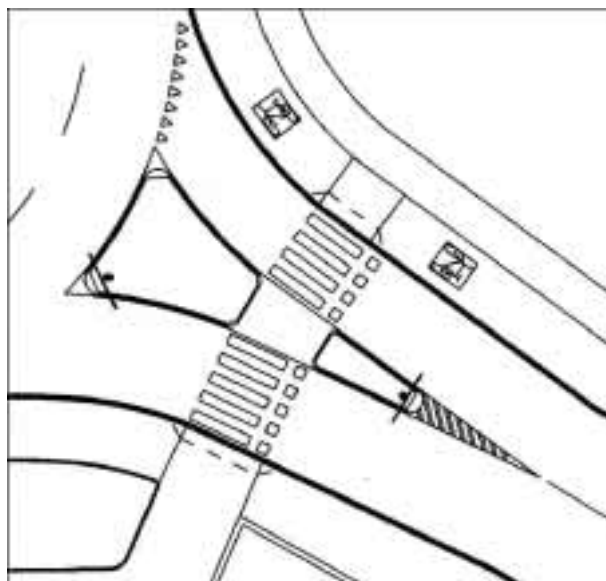


Figura 6-14 – Esempio di posizionamento del delineatore speciale di ostacolo [6].

### 6.3.2.3 SEGNALETICA VERTICALE DA COLLOCARE LUNGO I RAMI DELLA ROTATORIA

La segnaletica da porre lungo i rami della rotatoria si possono suddividere nelle seguenti tipologie:

- Segnale di dare la precedenza.



Figura 6-15 – Figura II 36 Art. 106 del Nuovo Codice della Strada.

- Segnale di rotatoria.



Figura 6-16 – Figura II 84 Art. 122 del Nuovo Codice della Strada.



- Preavviso di circolazione in rotatoria e preavviso di dare la precedenza.

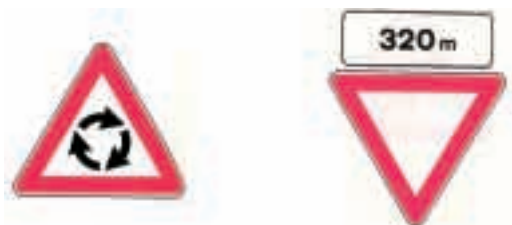


Figura 6-17 – Figura II 27 Art.96, Circolazione rotatoria e Figura II 38 Art.108, preavviso di dare la precedenza

I cartelli di segnale di dare la precedenza e di segnale di rotatoria (Figura 6-15 e Figura 6-16) devono essere posizionati alla destra del ramo d'entrata in prossimità dell'anello; nel caso di isola separatrice non sormontabile è consigliabile installare anche su tale isola, i suddetti cartelli (Figura 6-18). I segnali di preavviso di circolazione in rotatoria e di preavviso di dare la precedenza (Figura 6-17), in ambito extraurbano, dovranno essere installati ad una adeguata distanza dalla rotatoria (in genere 100 o 150 m); in ambito urbano, invece, dovranno essere installati nelle strade aventi limite di velocità superiore a 50 km/h ovvero quando le condizioni del traffico ne consigliano l'impiego per motivi di sicurezza (Art. 108 D.P.R. 16 dicembre 1992, n. 495, "Regolamento di esecuzione ed attuazione del Codice della strada").





Figura 6-18 – Esempio di posizionamento della segnaletica verticale ed orizzontale [6].



## 6.4 IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE

*Il numero degli incidenti notturni è quasi prossimo a quelli che avvengono di giorno, nonostante i chilometri percorsi di notte siano ben minori; inoltre, le loro conseguenze sono generalmente più gravi in termini di morti e feriti, e ciò vale non solo per il traffico urbano ma anche per le strade rurali e per le strade e superstrade extraurbane. [2]*

L'oscurità fa diminuire la qualità e la quantità delle informazioni visive che servono al conducente per guidare. Diminuiscono, infatti, prestazione visiva, acuità visiva, sensibilità al contrasto, capacità di valutare le distanze, velocità della percezione, distinzione dei colori e tolleranza all'abbagliamento. I fari dei veicoli non bastano a fornire al conducente le informazioni visive necessarie a guidare con sicurezza ed efficienza, specialmente quando le strade sono trafficate e a geometria complessa (curve, intersezioni, ecc).

Numerosi studi condotti in vari paesi dimostrano che il miglioramento della visibilità dovuta ad un'illuminazione adeguatamente progettata e mantenuta è un'efficace contromisura contro gli incidenti, comportando una riduzione nel numero e nella gravità degli stessi.

In particolare, tali studi riportano una riduzione media degli incidenti nelle intersezioni e simili almeno del 40 %. Questo valore, in assenza di dati locali specifici, può essere utilizzato per analisi costi/benefici e studi di fattibilità.

Nel seguito si richiameranno solo alcuni criteri generali di progettazione degli impianti di illuminazione utili ai fini dell'interfacciamento del progettista dell'intersezione con lo specialista progettista degli impianti e per la concezione dei requisiti fondamentali per una corretta progettazione integrata.



## 6.4.1 Generalità sugli impianti di pubblica illuminazione

### 6.4.1.1 REQUISITI DI CARATTERE ILLUMINOTECNICO

La Norma UNI 10439 “Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato” (Seconda Edizione Luglio 2001) indica i requisiti illuminotecnici qualitativi e quantitativi da considerare nel progetto degli impianti d’illuminazione stradale, ed è applicabile a tutte le strade rettilinee o in curva<sup>6</sup>, siano esse urbane o extraurbane, con traffico esclusivamente motorizzato o misto. Le grandezze fotometriche cui fare riferimento per garantire un corretto compito visivo agli utenti delle strade sono, secondo la Norma:

- la luminanza<sup>7</sup> media mantenuta del manto stradale ( $L_m$  [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]);
- l’uniformità generale<sup>8</sup> ( $U_0$ ) e longitudinale<sup>9</sup> ( $U_1$ ) di detta luminanza;
- l’indice d’abbagliamento debilitante causato dall’installazione (TI [%]).

I relativi valori sono riportati in funzione dell’indice della categoria illuminotecnica di appartenenza della strada, a sua volta dipendente dalla classificazione della strada in funzione del tipo di traffico (Tabella 6-1 e Tabella 6-2).

La Norma raccomanda inoltre che sia evitata ogni discontinuità ad eccezione dei punti singolari intenzionalmente introdotti per attirare l’attenzione dei conducenti. La successione dei centri luminosi, l’intensità ed il colore della luce emessa devono cioè garantire la cosiddetta “guida ottica” (o visiva) cioè dare all’utente un’immagine immediatamente riconoscibile del percorso da seguire.

---

<sup>6</sup>Con raggio di curvatura non minore di 200 m, e con fondo stradale asciutto.

<sup>7</sup>Rapporto tra l’intensità proveniente da una superficie luminosa in una data direzione e l’area apparente di quella superficie. Luminanza media mantenuta: valore che assume la luminanza media del manto stradale nelle migliori condizioni d’invecchiamento e insudiciamento dell’impianto.

<sup>8</sup>Rapporto fra luminanza minima e media su tutta la strada.

<sup>9</sup>Rapporto fra luminanza minima e massima lungo la mezziera di ciascuna corsia.



<b>Classe <sup>1)</sup></b>	<b>Tipo di strada e ambito territoriale</b>	<b>Indice della categoria illuminotecnica <sup>3)</sup></b>
<b>A</b>	Autostrade extraurbane	6
<b>A</b>	Autostrade urbane	6
<b>B</b>	Strade extraurbane principali	6
<b>C</b>	Strade extraurbane secondarie	5
<b>D<sup>2)</sup></b>	Strade urbane di scorrimento veloce	6
<b>D</b>	Strade urbane di scorrimento	4
<b>E<sup>2)</sup></b>	Strade urbane interquartiere	5
<b>E</b>	Strade urbane di quartiere	4
<b>F</b>	Strade extraurbane locali	4
<b>F<sup>2)</sup></b>	Strade urbane locali interzonali	3
<b>F</b>	Strade urbane locali	2
<p>1. La presente classificazione è in sintonia con quella riportata nel “Testo aggiornato del Decreto Legislativo 30 aprile 1992, n°285 recante il nuovo codice della strada” pubblicato sul supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale Serie generale – n°67 del 22 marzo 1994.</p> <p>2. La presente classificazione è in sintonia con quella riportata nel Decreto Ministeriale LL. PP del 12 aprile 1995 “Direttive per la redazione, adozione ed attuazione dei piani urbani del traffico”, pubblicato sul supplemento ordinario n°77, Gazzetta Ufficiale n°145 del 24 aprile 1995.</p> <p>3. Le presentazioni relative all'indice della categoria illuminotecnica sono indicate nella tabella che segue.</p>		

Tabella 6-1 - Indice della categoria illuminotecnica in funzione del tipo di strada [15]

Le prescrizioni illuminotecniche riportate nella Tabella 6-2 sono riferite al valore massimo del flusso orario di traffico. Qualora si verificano in orari particolari, soprattutto durante la notte, riduzioni consistenti del traffico (superiori al 50 ovvero al 75 % di quello massimo) e le condizioni di sicurezza generali lo permettano, è possibile ridurre il valore minimo della luminanza media mantenuta. Ciò si ottiene con notevoli van-



taggi sia in termini di risparmio energetico che di durata della lampade, dotando gli impianti di regolatori di flusso luminoso il cui funzionamento si fonda sulla variazione della tensione di alimentazione.

Indice della categoria illuminotecnica	Valore minimo della luminanza media mantenuta $L_m$	Uniformità minima		Valore massimo dell'indice di abbagliamento debilitante TI
		$U_0^{1)}$	$U_1^{2)}$	
	[cd/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
6	2,0	40	70	10
5	1,5	40	70	10
4	1,0	40	50	10
3	0,75	40	50	15
2	0,5	35	40	15
1	0,3	35	40	15
1. $U_0 = L_{min} / L_{med}$ 2. $U_1 = L_{min} / L_{max}$				

Tabella 6-2 - Prescrizioni illuminotecniche in funzione dell'Indice della categoria [15]

Oltre a soddisfare i requisiti sopraindicati, un impianto di pubblica illuminazione progettato correttamente deve:

- ☐ rispettare la legislazione sul contenimento dell'inquinamento luminoso, in particolare per gli impianti realizzati in Veneto la Legge Regionale n. 22 del 27 giugno 1997 "Norme per la prevenzione dell'inquinamento luminoso";
- ☐ minimizzare l'intralcio alla circolazione pedonale e veicolare;
- ☐ integrarsi con gli elementi d'arredo urbano e soddisfare requisiti di carattere estetico.



Per quanto attiene la distanza dei sostegni dal bordo della carreggiata, nel caso di strade con limite di velocità minore di 70 km/h (Strade urbane e tratti di strade extraurbane secondarie e locali), i limiti sono stabiliti dalla Norma CEI 64-7, “Impianti elettrici di illuminazione pubblica e similari”, mentre per strade con limite di velocità superiore (Strade extraurbane in genere ed autostrade) le distanze dal bordo della carreggiata sono stabilite dal Decrero del Ministrero dei Lavori Pubblici del 03/06/1998.

Il soddisfacimento dei requisiti estetici si ottiene anche attraverso l’accurata scelta del tipo di sorgente luminosa e della caratteristica resa cromatica, in funzione della destinazione d’uso dell’area illuminata.

#### 6.4.1.2 SPECIFICHE DELL’IMPIANTO ELETTRICO

Per l’alimentazione degli apparecchi di un impianto di pubblica illuminazione è adottata, nella quasi totalità delle applicazioni esistenti, la soluzione a tensione impressa (o in derivazione) in bassa tensione. Impianti a tensione impressa in media tensione ovvero a corrente impressa vengono considerati come alternativi ai primi nel caso di grandi installazioni, non trattate nel presente documento.

La distribuzione avviene con sistema TT, fase-neutro o fase-fase 230 V 50 Hz oppure trifase con neutro 230/400 V 50 Hz: l’alimentazione monofase è economicamente conveniente in impianti di potenza modesta (fino a 6 kW).

Il dimensionamento elettrico delle linee di alimentazione deve soddisfare ai seguenti requisiti:

- garantire l’alimentazione dei centri luminosi con una caduta di tensione totale inferiore al 5%, secondo la Norma CEI 64-7 (*dimensionamento in relazione alla caduta di tensione*);
- garantire la protezione contro i cortocircuiti e contro i contatti indiretti in tutti i punti dell’impianto secondo la Norma CEI 64-8, “Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V c.a. e 1500 V c.c.” (*dimensionamento in relazione alle correnti di cortocircuito*);

I criteri di verifica sono quelli tradizionali degli impianti in bassa tensione con le precisazioni che seguono.

Le lampade a scarica, quelle maggiormente utilizzate negli impianti in esame, costitui-



scono carichi di tipo non lineare, soggetti quindi all'assorbimento di correnti armoniche; la caduta di tensione di 3° armonica non è trascurabile per cui è necessario nell'esecuzione dei calcoli di dimensionamento considerare come caduta di tensione limite un valore inferiore al 5% (solitamente pari a 3.4 %).

Gli apparecchi d'illuminazione non sono soggetti a sovraccarico per cui non sarebbe necessario proteggere i circuiti che li alimentano contro questo evento. Tuttavia la Norma CEI 64-8 consiglia di proteggere ugualmente i circuiti per ottenere una maggiore sicurezza contro il cortocircuito a fine linea, che il dispositivo di protezione dal cortocircuito potrebbe non "riconoscere".

La protezione contro i contatti indiretti è ottenuta generalmente, con i criteri e le metodologie esposti nella normativa generale per gli impianti di bassa tensione, mediante i seguenti sistemi:

- ☐ interruzione automatica dell'alimentazione (messa a terra);
- ☐ utilizzo di componenti in classe d'isolamento II.

#### 6.4.2 Illuminazione delle rotatorie

Le intersezioni, siano esse a più livelli o a raso come le rotatorie, sono i punti maggiormente critici di una rete stradale e perciò possono avvantaggiarsi dei benefici indotti da una corretta illuminazione più ancora dei tronchi stradali rettilinei.

L'illuminazione deve infatti rivelare ai conducenti dei veicoli l'esistenza della intersezione stessa, le direzioni delle strade che vi confluiscono e si dipartono da essa, la posizione dei marciapiedi, la presenza di pedoni e altri utenti, le ostruzioni, il movimento di veicoli nelle vicinanze dell'area della intersezione.

Si descrivono nel seguito i requisiti e le caratteristiche che devono possedere gli impianti d'illuminazione delle intersezioni stradali, evidenziando ove possibile le particolarità relative al caso delle rotatorie. Per quanto attiene gli aspetti generali degli impianti di pubblica illuminazione, la validità dei concetti presentati nelle pagine precedenti, è sottintesa anche se non espressamente evidenziato.



#### 6.4.2.1 REQUISITI DI CARATTERE ILLUMINOTECNICO

Come già anticipato, l'unica norma tecnica vigente in materia di pubblica illuminazione (UNI 10439) tratta solo le strade rettilinee e con raggio di curvatura non minore di 200 m, non è quindi applicabile ad aree critiche come le intersezioni.

Indicazioni in merito ai requisiti illuminotecnici per le intersezioni sono fornite nello studio a carattere prenormativo “Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali” [2] che si rifà alle indicazioni della pubblicazione numero 115/1995 della Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), “Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic” [16].

Anche nel caso delle intersezioni, il criterio posto alla base del dimensionamento degli impianti di illuminazione è comunque quello della luminanza.

Secondo la pubblicazione CIE 115/95, il livello di luminanza delle intersezioni dovrebbe essere di un grado più elevato di quello previsto per la strada più importante afferente. La Tabella 6-3 riporta un'ipotesi di requisiti illuminotecnici per le intersezioni elaborata secondo tale criterio, coerente con la suddivisione in categorie illuminotecniche della Norma UNI 10439.

Strada più importante dell'intersezione	Requisiti illuminotecnici dell'intersezione		
	$L_m$ (cd/m <sup>2</sup> )	$U_0$ [%]	TI [%]
Autostrade extraurbane o urbane	2	0.4	10
Strade extraurbane principali	2	0.4	10
Strade extraurbane secondarie	2	0.4	10
Strade urbane di scorrimento veloce	2	0.4	10
Strade urbane di scorrimento	1.5	0.4	10
Strade urbane interquartiere	2	0.4	10
Strade urbane di quartiere	1.5	0.4	10
Strade extraurbane locali	1.5	0.4	10
Strade urbane locali interzonali	1	0.4	10
Strade urbane locali	0.75	0.4	15

Tabella 6-3 - Requisiti illuminotecnici per le intersezioni in funzione della strada afferente più importante [2]





Ove non sia applicabile il criterio della luminanza, ad esempio a causa delle ridotte distanze di osservazione, per l'impossibilità di definire i punti di osservazione o per difficoltà di calcolo, può essere utilizzato un criterio basato sull'illuminamento.

La pubblicazione CIE 115/95 propone una suddivisione delle intersezioni in cinque classi e definisce i relativi requisiti secondo quanto riportato nella Tabella 6-4, dove:

**E (lx):** minimo illuminamento medio mantenuto sull'intera superficie dell'intersezione;

**$U_o$  [%]:** minimo rapporto di uniformità  $E_{min}/E_{med}$  sull'intera superficie dell'intersezione;

**$C_i$ :** classi dell'illuminazione del tipo di intersezione.

Classe dell'intersezione	Requisiti illuminotecnici dell'intersezione	
	E (lx)	$U_o$ [%]
$C_0$	50	0.40
$C_1$	30	0.40
$C_2$	20	0.40
$C_3$	15	0.40
$C_4$	10	0.40
$C_5$	7.5	0.40

Tabella 6-4 - Requisiti illuminotecnici in termini di illuminamento per le classi di intersezioni stradali [16]

L'attribuzione di una tipologia d'intersezione alle diverse classi può essere stabilita in funzione della strada più importante afferente all'intersezione stessa (Tabella 6-5), ovvero, per il caso delle rotatorie, secondo la classificazione della Tabella 6-6.

Strada più importante dell'intersezione	Classe
Strade ad alta velocità a due carreggiate	$C_0 - C_1$
Strade urbane di scorrimento	$C_1 - C_2$
Strade locali	$C_3 - C_4 - C_5$

Tabella 6-5 – Classi di intersezioni in funzione della strada afferente più importante



Tipo intersezione	Classe
Rotatoria complessa o grande	C <sub>1</sub>
Rotatoria di medie dimensioni e complessità	C <sub>2</sub>
Rotatoria semplice o piccola	C <sub>3</sub>

Tabella 6-6 – Classi di intersezioni stradali in funzione del tipo di rotatoria

Come già detto, il tipo è la disposizione dei centri luminosi devono essere scelti in modo da garantire ai conducenti la “guida visiva”, ossia dare un’immagine immediatamente riconoscibile del percorso da seguire.

Nelle intersezioni è quindi opportuno introdurre una discontinuità nella disposizione o altezza dei centri luminosi, nel livello della luminanza media o nel colore della luce, per attirare maggiormente l’attenzione dei conducenti.

Nel caso delle rotatorie, la presenza di un’illuminazione a geometria “centrale”, con torre a faro, segnala in modo efficace l’esistenza dell’intersezione e costituisce un elemento di discontinuità rispetto all’illuminazione dei bracci.

Un’ulteriore tecnica per creare una efficace guida visiva sulle intersezioni a rotatoria, utile anche di giorno, è quella di cambiare la disposizione dei sostegni nella parte terminale dei bracci, ad esempio passare dall’installazione unilaterale a quella centrale a doppio sbraccio o viceversa.

Nel caso di intersezioni tra strade illuminate e non, è opportuno estendere l’illuminazione oltre le aree critiche dell’intersezione stessa anche per le strade prive di illuminazione. Ciò per tenere conto del fatto che il tempo di adattamento visivo nella transizione da zone illuminate e zone buie, durante il quale la visibilità si riduce, è molto superiore rispetto a quello della transizione inversa.

Affinché l’adattamento visivo abbia luogo, è quindi necessario prolungare l’impianto di illuminazione oltre l’intersezione per un tratto della strada uscente la cui lunghezza dipende dalla velocità dell’autoveicolo. Ad esempio se un’intersezione è illuminata a 2 cd/m<sup>2</sup> e se il livello di luminanza del tratto uscente è di 0.3 cd/m<sup>2</sup>, il tempo di transizione è di circa 10 s. La lunghezza di tale tratto dovrà essere di circa 140 m, se la velocità di progetto della strada è di 50 km/h.

In presenza di intersezioni interessate da traffico misto occorre tenere conto della prescrizione della Norma UNI 10439 che indica nella misura di 5 m la fascia di pertinenza destinata al traffico pedonale, nella quale deve essere garantito un livello d’illumi-



namento medio non minore della metà di quello della fascia adiacente di 5 m, appartenente alla carreggiata, ed in generale curare la progettazione dell'impianto in modo da illuminare – con particolare attenzione alle superfici verticali – veicoli e pedoni nell'area dell'intersezione ed in quelle adiacenti.

#### 6.4.2.2 CONFIGURAZIONI DI IMPIANTI

La disposizione dei centri luminosi di un impianto di pubblica illuminazione deve essere studiata in modo da soddisfare i relativi requisiti illuminotecnici, e allo stesso tempo non influire negativamente sulla leggibilità delle segnalazioni. Le variabili su cui il progettista può agire sono: la geometria d'installazione, l'altezza dei centri luminosi ed eventualmente lo sbraccio, l'interdistanza tra i centri, la potenza e tipo delle lampade, gli angoli di puntamento, ecc.

Le geometrie d'installazione per l'impianto a servizio di una rotatoria, con riferimento all'anello, possono essere classificate in due tipi:

- disposizione centrale con torre/i faro (Figura 6-19);
- disposizione periferica con punti luce su palo (Figura 6-20).

In genere entrambe le soluzioni sono ugualmente accettabili per ogni tipologia di rotatoria; la scelta va fatta in base ad esigenze economiche, energetiche, di semplicità di funzionamento e di esercizio dell'impianto.

Per le rotatorie complesse, può essere preferita la disposizione centrale, che presenta il vantaggio di lasciare l'area illuminata libera, o quasi, da sostegni, e consente all'utente una visione migliore dell'intersezione e delle sue uscite. Anche il problema dell'abbagliamento è ridotto rispetto alla soluzione su pali, poiché gli apparecchi d'illuminazione sono posizionati ad un'altezza elevata (solitamente maggiore di 15 m).

Per contro questa soluzione presenta l'inconveniente di una maggiore rigidità nella disposizione dei centri luminosi che si traduce in un minore fattore di utilizzazione dell'impianto rispetto alla soluzione con punti luce su palo.

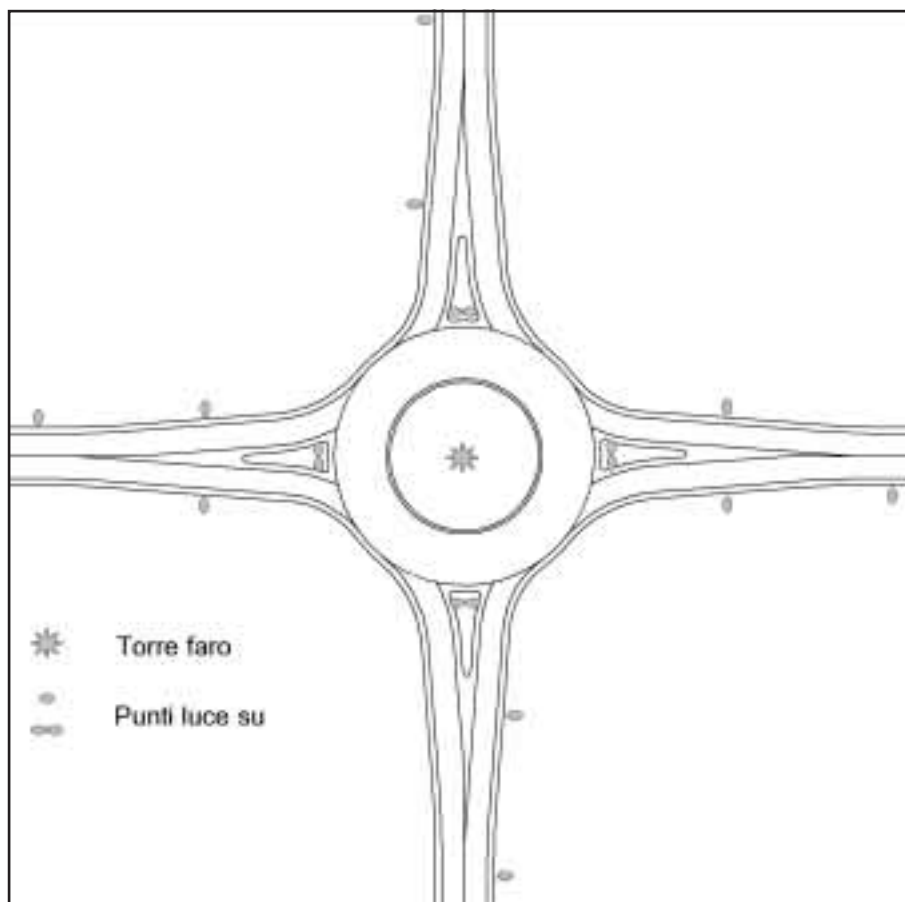


Figura 6-19 – Rotatoria illuminata con disposizione centrale

Per quanto attiene la disposizione dei centri luminosi nei bracci della rotatoria, va osservato il criterio valido per i tratti in curva, secondo il quale l'interdistanza deve essere diminuita rispetto alla carreggiata rettilinea. Un valore comunemente adottato è:

$$dc = 0.75 \cdot d$$

dove “d” è l'interdistanza dei tratti in rettilineo e “dc” quella dei tratti in curva.

Per quanto attiene la parte più propriamente impiantistica, l'illuminazione delle rotatorie ed in generale delle intersezioni non presenta problematiche particolari per cui valgono le considerazioni già esposte nelle pagine precedenti al paragrafo sulle specifiche dell'impianto elettrico.

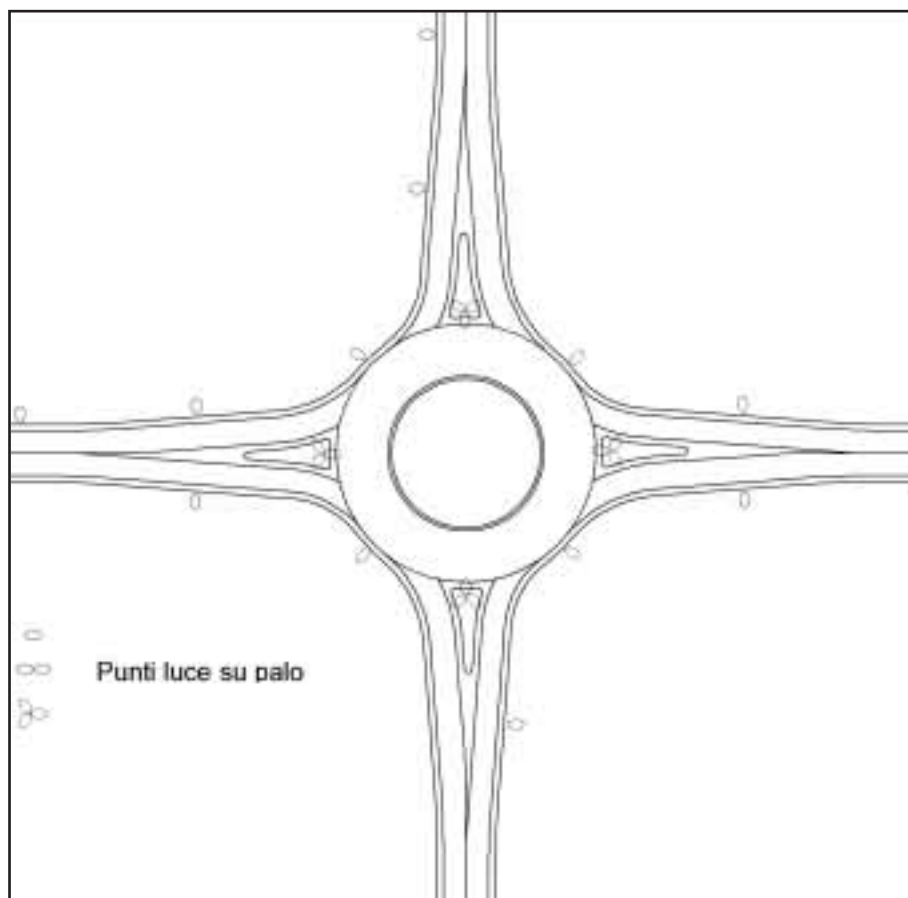


Figura 6-20 – Rotatoria illuminata con disposizione periferica



## 7 STUDIO TIPO DI INTERSEZIONE A ROTATORIA

### 7.1 SEQUENZA PROGETTUALE

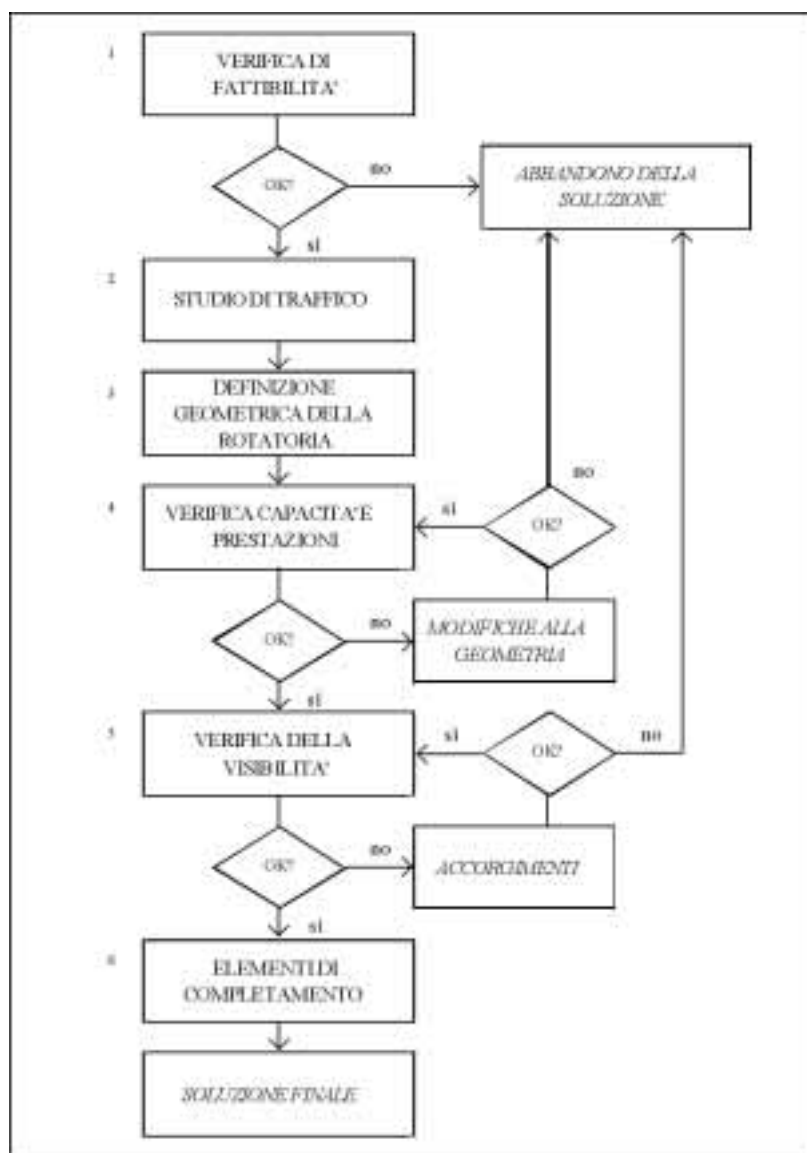


Figura 7-1 – Diagramma di flusso per la progettazione di una rotatoria.

Nel diagramma di flusso di Figura 7-1 è stata riportata schematicamente l’iter progettuale individuato dalle presenti “Linee guida” per lo studio di un’intersezione a rotatoria. Le macro-attività da svolgere (numerate da 1 a 6) sono di seguito elencate:



*1. Verifica di fattibilità.* Questa prima attività, che può essere considerata propedeutica, permette di valutare se la realizzazione di una rotatoria può essere considerata una soluzione fattibile e/o idonea per l'intersezione. Se i requisiti di fattibilità vengono soddisfatti allora si procederà con le altre attività di progettazione, altrimenti sarà opportuno prevedere una soluzione differente. Tuttavia anche se tutte le condizioni di fattibilità vengono soddisfatte, risulta comunque opportuno non scartare a priori altre possibili soluzioni per l'intersezione in oggetto (es. semaforo) e mettere a confronto gli indicatori del livello di servizio, quali riserva di capacità, lunghezza delle code e tempi medi di attesa e valutare la soluzione più idonea dal punto di vista prestazionale.

*2. Studio di traffico.* Da questo studio verranno desunti i dati di traffico, che serviranno per la verifica della capacità della rotatoria e il suo comportamento dal punto di vista prestazionale. In particolare verranno forniti: i flussi di traffico nell'ora di punta per ciascuna manovra consentita dall'intersezione, la presenza di mezzi pesanti e la necessità di prevedere passaggi pedonali e/o attraversamenti ciclabili.

*3. Definizione geometrica della rotatoria.* Dai dati forniti dallo studio del traffico si può effettuare un primo dimensionamento geometrico della rotatoria avvalendosi delle schede tipologiche di progetto, qui riportate.

*4. Verifica capacità e prestazioni.* Dall'analisi della capacità delle entrate e degli indici prestazionali, quali la lunghezza delle code e il tempo medio di attesa, eventualmente con l'ausilio di una microsimulazione del traffico, si verificherà se la rotatoria progettata risulta idonea a smaltire efficacemente i flussi veicolari. Nel caso la rotatoria risultasse insufficiente in termini di capacità, sarà necessario apportare delle modifiche geometriche (aggiunta di una seconda corsia in entrata, aumento delle dimensioni della rotatoria, ecc.).

*5. Verifica della visibilità.* Questa verifica risulta particolarmente importante in quanto rappresenta un elemento di sicurezza irrinunciabile. Le verifiche da effettuare sono riportate nel paragrafo 7.1.5. Se una o più di queste verifiche non dovessero essere soddisfatte, sarà necessario provvedere a rimuovere gli ostacoli alla visuale libera oppure, nel caso questo non fosse possibile, apportare modifiche alla configurazione geometrica, garantendo allo stesso tempo i requisiti minimi emersi dallo studio dei punti precedenti.



*6. Elementi di completamento.* In questa fase progettuale ricadono altri due elementi fondamentali per la sicurezza della rotatoria: la segnaletica verticale e orizzontale, e gli impianti d'illuminazione.

I dettagli sulle modalità operative di svolgimento di queste attività sono esposti nei successivi paragrafi. Per ulteriori approfondimenti si rimanda ai capitoli generali.

Come propedeuticità al progetto di una rotatoria, così come di ogni altra infrastruttura, è il reperimento di una adeguata base cartografica di supporto, che può essere costituito, ad esempio, da un rilievo di dettaglio dell'area oggetto dell'intervento.





### 7.1.1 Verifica di fattibilità

La rotatoria non è sempre la soluzione migliore per un'intersezione. Occorre che essa risponda a determinati *requisiti di fattibilità*.

REQUISITI DI FATTIBILITÀ DI UNA ROTATORIA
<b>Integrazione con l'ambiente</b> e valorizzazione del sito.
<b>Spazi disponibili sufficienti.</b> Deve essere inseribile un cerchio di almeno 26 m di diametro (ingombro minimo della rotatoria, che consente l'iscrizione di tutti i veicoli). In presenza di traffico di veicoli pesanti e carichi eccezionali si devono prevedere rotatorie con dimensioni maggiori, in modo da garantire tutte le manovre.
<b>Topografia regolare e piana.</b> È sconsigliato inserire una rotatoria in presenza di una pendenza tra due punti diametrali esterni della corona giratoria maggiore del 5%
<b>Adeguatezza al traffico e alla sua gestione.</b> La rotatoria non è adeguata in presenza di una regolazione centralizzata e diretta del traffico che interessa ampie aree e consente la programmazione della precedenza per determinati flussi (onda verde).
<b>Volumi di traffico tra le varie arterie non eccessivamente differenti.</b> In termini prestazionali (ritardi e code) la rotatoria è in genere una soluzione peggiore rispetto a quella semaforica quando il rapporto tra flusso su arteria secondaria e quello sull'asse principale è inferiore al 20%.
Non influenzare negativamente le linee del <b>Trasporto Pubblico</b> . I mezzi pubblici non possono usufruire di fasi di precedenza.
Non influisce negativamente il transito di <b>pedoni e ciclisti</b> .



### 7.1.2 Analisi del traffico

Per lo studio del traffico si può seguire il seguente iter schematico, che evidenzia le fasi necessarie per ottenere la matrice O/D nell'ora di punta giornaliero, che rappresenta il dato essenziale per il dimensionamento e la verifica di una rotatoria. Per approfondimenti si rimanda al paragrafo 3.1 "Lo studio del traffico".

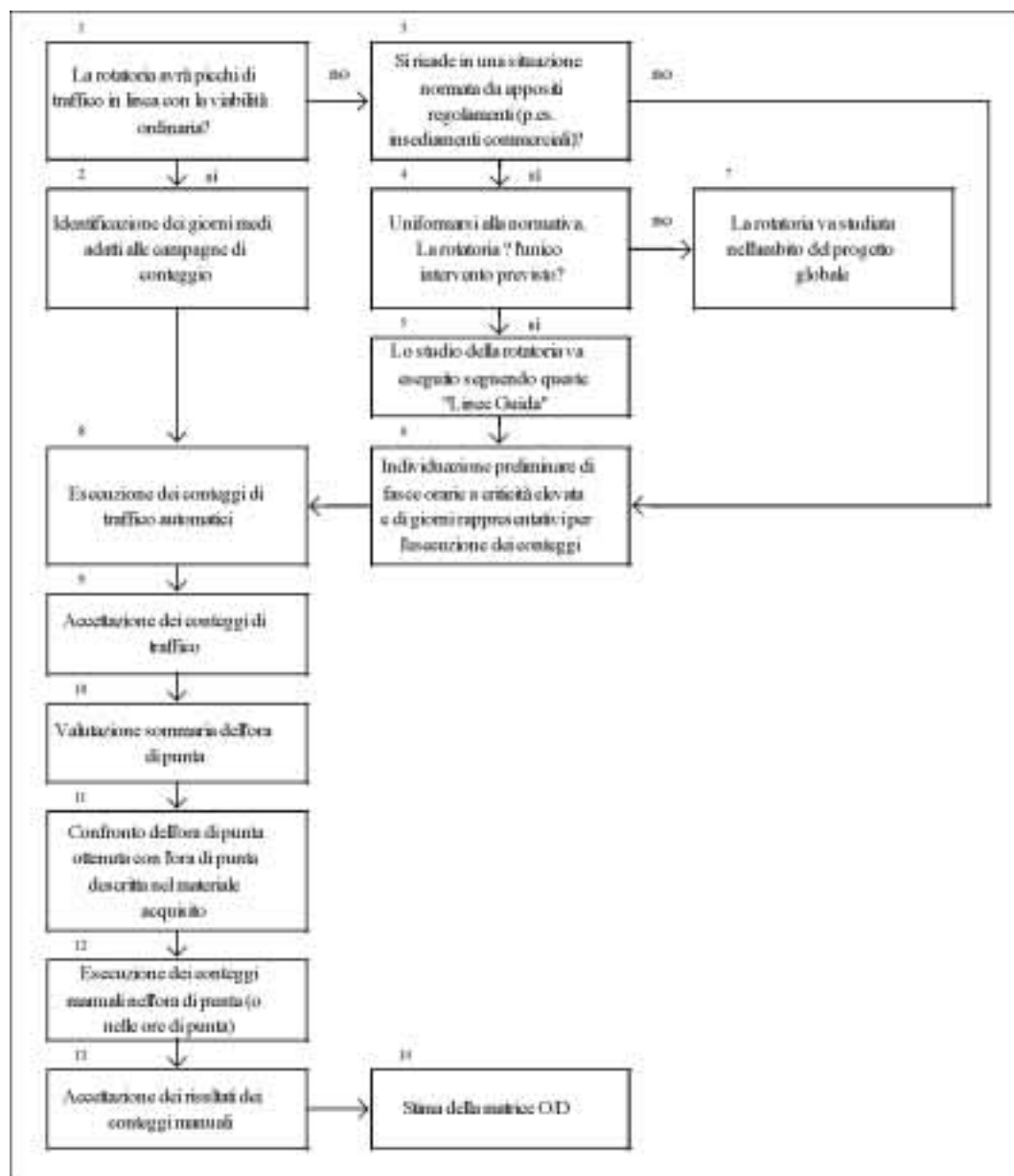


Figura 7-2 – Iter schematico per lo studio di traffico



Oltre alla matrice O/D disaggregata nelle varie componenti di traffico (mezzi pesanti, veicoli leggeri, ecc.), lo studio del traffico dovrebbe fornire indicazioni sulla necessità o meno di prevedere passaggi pedonali e/o piste ciclabili in corrispondenza dell'intersezione.

Particolare attenzione si deve porre nella verifica dei dati ottenuti con i conteggi (vedi paragrafo 3.1.4.4). Dato che su di essi si basano tutti i successivi passi della progettazione, è necessario che la loro affidabilità sia garantita e che si possano considerare escluse tutte le cause che possono influenzare i valori.

Nel caso sia necessario effettuare un conteggio del traffico circolante su un'intersezione esistente, può essere utilizzato un fax-simile di scheda per la rilevazione manuale dei veicoli (disaggregati nelle diverse tipologie) come quello di Figura 7-3. Per ogni direzione di provenienza, deve essere conteggiato il traffico distinto nelle varie manovre di svolta consentite.



**CONTEGGIO CLASSIFICATO DEL TRAFFICO  
RILEVAZIONE DIREZIONALE**

DATA	DALLE ORE	ALLE ORE	Strada	Verso	Rilevatore
------	-----------	----------	--------	-------	------------

Direzione 1  
(diritto)

↑

↶

Direzione 2  
(sinistra)

	Autoveicoli	Commerciali leggeri	Commerciali pesanti	Motociclette e scooter	Veicoli pesanti	Autobus
0						
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						
110						
120						
130						
140						
150						
160						
170						
180						
190						
200						
210						
220						
230						
240						
250						
260						
270						
280						
290						
300						

↷

Direzione 3  
(destra)

	Autoveicoli	Commerciali leggeri	Commerciali pesanti	Motociclette e scooter	Veicoli pesanti	Autobus
0						
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						
110						
120						
130						
140						
150						
160						
170						
180						
190						
200						
210						
220						
230						
240						
250						
260						
270						
280						
290						
300						

	Autoveicoli	Commerciali leggeri	Commerciali pesanti	Motociclette e scooter	Veicoli pesanti	Autobus
0						
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						
110						
120						
130						
140						
150						
160						
170						
180						
190						
200						
210						
220						
230						
240						
250						
260						
270						
280						
290						
300						

NOTE

**CONDIZIONI METEOROLOGICHE**  
Pioggia lieve ☐ Pioggia intensa ☐ Sereno ☐  
Nebbia ☐ Nebbia/Ghiaccio ☐

Figura 7-3



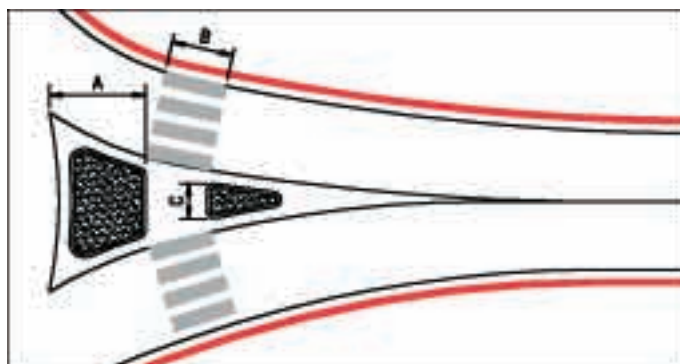
### 7.1.3 Definizione geometrica della rotatoria

Per la definizione delle caratteristiche geometriche da adottare si può utilizzare il seguente iter progettuale:

- **Individuare l'ambito progettuale.** Individuare se il progetto si sviluppa in ambito urbano oppure extraurbano.
- **Determinare la presenza o meno di mezzi pesanti.** Dallo studio del traffico si valuta l'intensità del traffico pesante e di mezzi pubblici, che attraversa l'incrocio.
- **Scelta della geometrica minima.** Con l'ausilio delle schede allegate (vedi paragrafo 7.1.3.1) si procederà alla scelta delle caratteristiche geometriche minime da adottare.
- **Prevedere eventuali passaggi pedonali o piste ciclabili.** In caso si debbano inserire dei passaggi pedonali o piste ciclabili è consigliabile realizzare delle isole separatrici rialzate mediante cordoli di altezza non inferiore a 25 cm, da interrompere per una larghezza pari a quella del passaggio e aventi le caratteristiche minime riportate nelle successive tabelle. Nel caso sia presente, oltre all'attraversamento della pista ciclabile, un passaggio pedonale, sarà necessario porre l'attraversamento ciclabile sul lato della rotatoria.

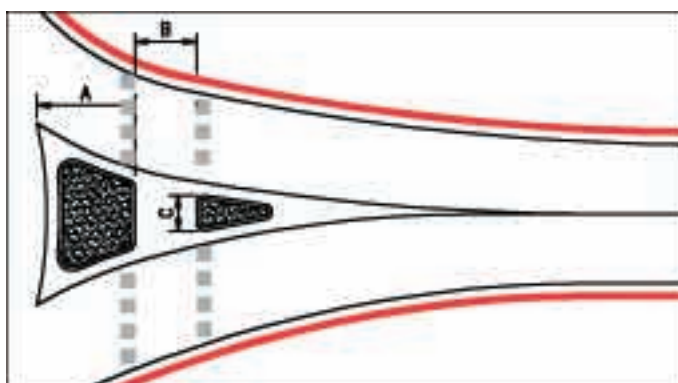


- Attraversamento pedonale.



TIPO DI STRADE CONFLUENTI	A	B <sup>10</sup>	C
Strade locali e strade urbane di quartiere	5.00 m	2.50 m	1.50 m
TIPO DI STRADE CONFLUENTI	5.00 m	4.00 m	1.50 m

- Pista ciclabile.



TIPO DI STRADE CONFLUENTI	A	B	C
Urbane/Extraurbane	5.00 m	2.50 m	1.80 m

<sup>10</sup> Le larghezze del passaggio pedonale sono desunti dall'articolo 145/1 del Nuovo Codice della Strada.



- **Inserimento della rotatoria nel contesto territoriale.** Una volta individuata la tipologia di rotatoria, essa dovrà essere inserita nel territorio, evidenziando eventuali interferenze che possano comportare modifiche alla geometria di massima presa in considerazione.
- **Modifica della geometria a seguito delle eventuali interferenze con l'ambiente.** Nel caso si rendessero necessarie delle modifiche alla geometria, esse dovranno essere effettuate nel rispetto dei parametri geometrici riportati nella scheda 4.
- **Verifica della deflessione.** È essenziale verificare che la geometria garantisca le caratteristiche necessarie per mantenere i valori della deflessione sempre entro limiti accettabili. La deflessione delle traiettorie in attraversamento del nodo, ed in particolare le traiettorie che interessano due rami opposti o adiacenti rispetto all'isola centrale, dovrà essere verificata per ogni ingresso mediante la costruzione di una sequenza di archi di cerchio tangenti, che passa a 1.50 m dal bordo dell'isola centrale e a 2.00 m dal ciglio delle corsie d'entrata e uscita, come riportato nella successiva Figura 7-4. Il valore del raggio non dovrà superare i valori di 80-100 m, cui corrispondono le usuali velocità di sicurezza nella gestione di una circolazione a rotatoria. Se il valore della deflessione fosse troppo grande, sarà necessario variare la disposizione di uno o più bracci oppure aumentare il raggio dell'isola centrale.

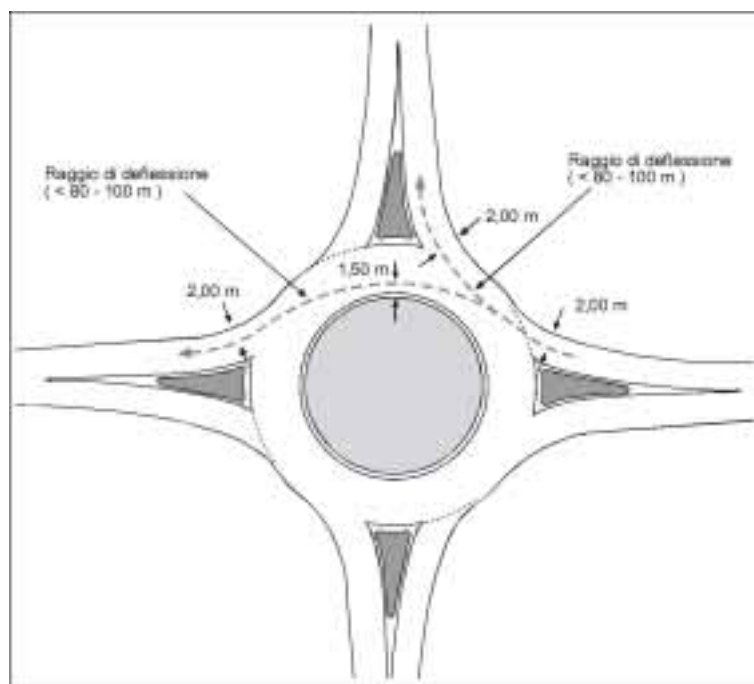


Figura 7-4 – deflessione della rotatoria [2].



### 7.1.3.1 SCHEDE DI PROGETTO

Le presenti schede permettono di definire compiutamente la geometria di una rotatoria. Esse sono state suddivise in 4 gruppi (numerati 1÷4, e ulteriormente suddivisi in A o B nel caso rispettivamente di 3 o 4 bracci confluenti nella rotonda – soluzioni maggiormente utilizzate) in funzione dell'ambito in cui si colloca l'intersezione (urbano o extraurbano), della presenza di mezzi pesanti e del numero di bracci confluenti in rotatoria (vedi Tabella 7-1).

SCHEDA	AMBITO	MEZZI PESANTI	N° STRADE CONFLUENTI
1-A	Urbano	< 5 %	3
1-B	Urbano	< 5 %	4
2-A	Urbano	≥ 5 %	3
2-B	Urbano	≥ 5 %	4
3-A	Extraurbano	Si	3
3-B	Extraurbano	Si	4
4	Urbano /Extraurbano	Si	3÷6

Tabella 7-1 – Campi di applicazione delle schede.

I valori della capacità totale riportati nelle schede sono stati determinati considerando diverse situazioni di traffico. Questi valori devono essere considerati solo come riferimento orientativo; per considerazioni più accurate inerenti casi specifici, sarà necessario effettuare il calcolo della capacità con le modalità riportate nel paragrafo 7.1.4.

Queste schede non prevedono l'utilizzo di rotatorie con diametro esterno inferiore a 25 m per garantire l'inscrivibilità di tutti i veicoli (vedi paragrafo 4.1) all'interno di questo tipo di intersezione a raso.





## SCHEDA 1-A

CARATTERISTICHE GENERALI	
Ambito	Urbano
Traffico pesante	Volumi bassi
Capacità totale	2100 ÷ 2300 veq/h
N° di bracci confluenti	3

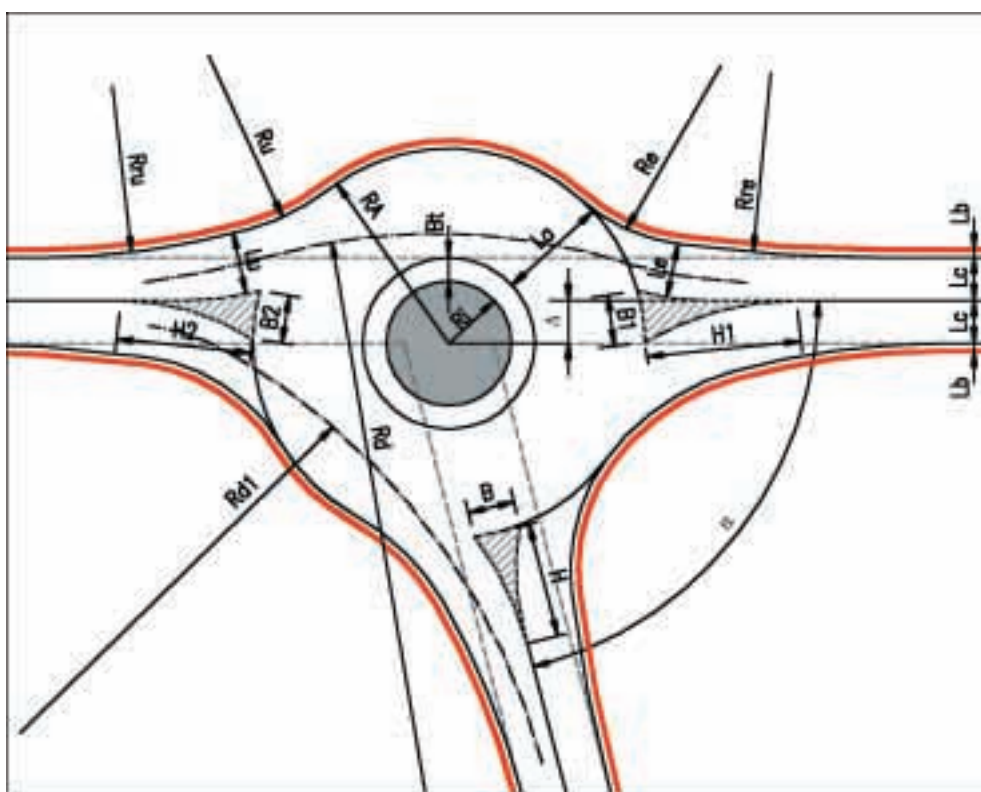


Figura 7-5

D = Massimo spostamento del centro della rotatoria rispetto posizione ideale (sull'asse principale) nel caso di intersezione a T: **2.80 m**



CARATTERISTICHE DELLE STRADE CONFLUENTI		
	Categoria E Urbane di quartiere	Categoria F Locali
Larghezza corsia (Lc)	3.00 m	2.75 m
Larghezza banchina (Lb)	0.50 m	0.50 m
Angolo minimo tra 2 bracci successivi ( $\alpha$ )	75°	75°
VALORI GEOMETRICI MINIMI DELLA ROTATORIA		
Sigla elemento	Definizione	Valore minimo
ANELLO		
RA	Raggio esterno	12.50 m
La	Larghezza anello	7.00 m
Bt	Banchina transitabile	1.50 m
Ri	Raggio isola centrale	4.00 m
ENTRATA		
Le	Larghezza entrata	3.50 m
Re	Raggio entrata	12.00 m
ISOLA SEPARATRICE		
B, B1, B2	Larghezza isola separatrice	3.00 m
H, H1, H2	Lunghezza isola separatrice	7.00 m
USCITA		
Lu	Larghezza uscita	4.00 m
Ru	Raggio uscita	15.00 m
DEFLESSIONE		
Sigla elemento	Definizione	Valore orientativo
Rd	Deflessione su ramo opposto	40 m (caso D = 2.8 m)
Rd1	Deflessione su ramo adiacente	43 m (caso D = 2.8 m)
RAGGI DI RACCORDO		
Rre	Raggio di raccordo entrata	50÷100 m
Rru	Raggio di raccordo uscita	50÷100 m



*SCHEDA I-B*

CARATTERISTICHE GENERALI	
Ambito	Urbano
Traffico pesante	Volumi bassi
Capacità totale	2250 ÷ 2400 veq/h
N° di bracci confluenti	4

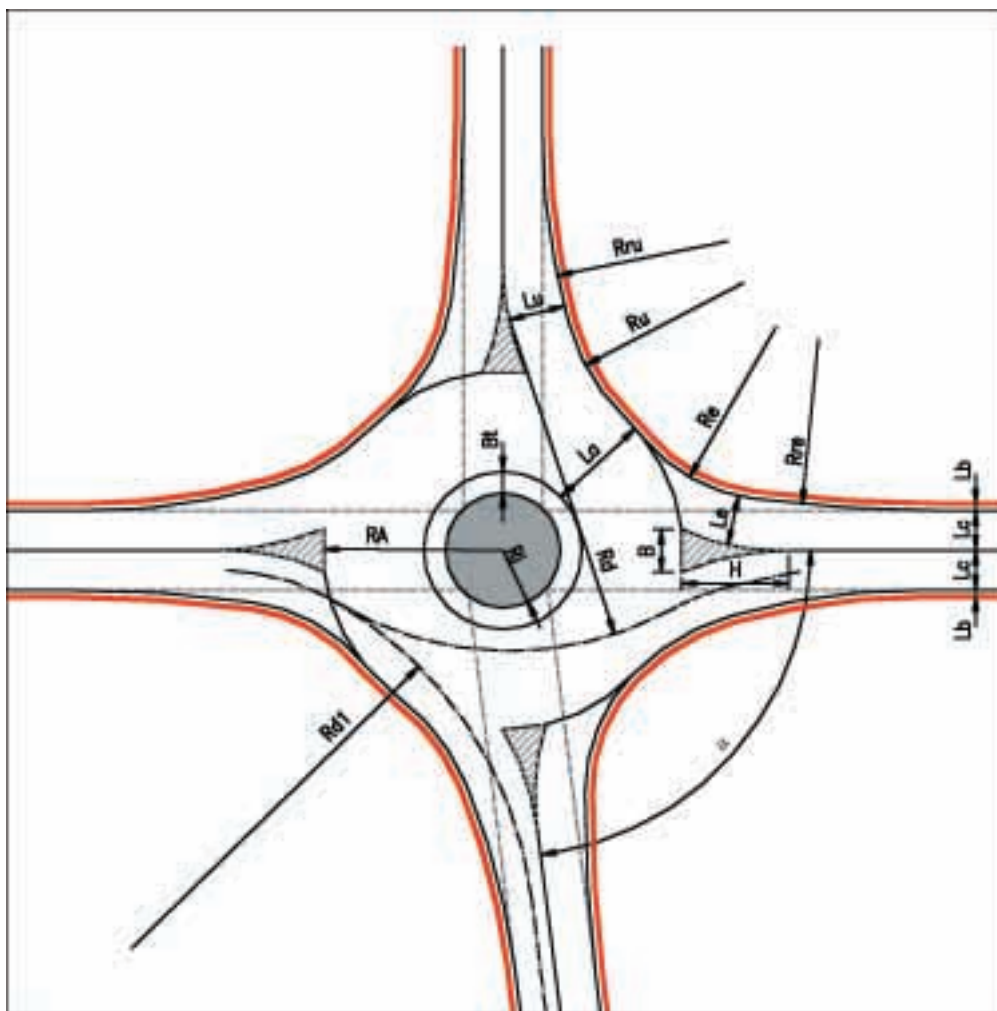


Figura 7-6



CARATTERISTICHE DELLE STRADE CONFLUENTI		
	Categoria E Urbane di quartiere	Categoria F Locali
Larghezza corsia (Lc)	3.00 m	2.75 m
Larghezza banchina (Lb)	0.50 m	0.50 m
Angolo minimo tra 2 bracci successivi ( $\alpha$ )	83°	83°
VALORI GEOMETRICI MINIMI DELLA ROTATORIA		
Sigla elemento	Definizione	Valore minimo
ANELLO		
RA	Raggio esterno	12.50 m
La	Larghezza anello	7.00 m
Lb	Banchina transitabile	1.50 m
Ri	Raggio isola centrale	4.00 m
ENTRATA		
Le	Larghezza entrata	3.50 m
Re	Raggio entrata	12.00 m
ISOLA SEPARATRICE		
B	Larghezza isola separatrice	3.00 m
H	Lunghezza isola separatrice	7.00 m
USCITA		
Lu	Larghezza uscita	4.00 m
Ru	Raggio uscita	15.00 m
DEFLESSIONE		
Sigla elemento	Definizione	Valore orientativo
Rd	Deflessione su ramo opposto	23 m
Rd1	Deflessione su ramo adiacente	28 m
RAGGI DI RACCORDO		
Rre	Raggio di raccordo entrata	50÷100 m
Rru	Raggio di raccordo uscita	50÷100 m

*SCHEDA 2-A*

CARATTERISTICHE GENERALI	
Ambito	Urbano
Traffico pesante	Si
Capacità totale	2200 ÷ 2400 veq/h
N° di bracci confluenti	3

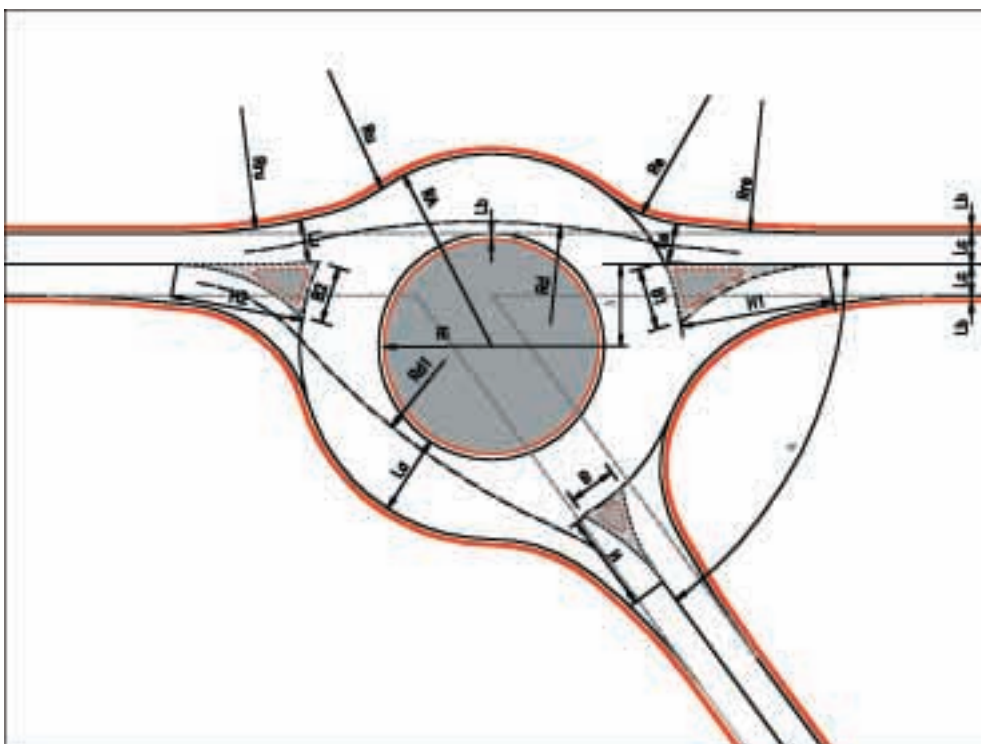


Figura 7-7

D = Massimo spostamento del centro della rotatoria rispetto posizione ideale (sull'asse principale) nel caso di intersezione a T: **7.00 m**



CARATTERISTICHE DELLE STRADE CONFLUENTI		
	Categoria E Urbane di quartiere	Categoria F Locali
Larghezza corsia (Lc)	3.00 m, 3.50 m	2.75 m
Larghezza banchina (Lb)	0.50 m	0.50 m
Angolo minimo tra 2 bracci successivi ( $\alpha$ )	54°	54°
VALORI GEOMETRICI MINIMI DELLA ROTATORIA		
Sigla elemento	Definizione	Valore minimo
ANELLO		
RA	Raggio esterno	17.00 m
La	Larghezza anello	7.00 m
Lb	Banchina	0.50 m
Ri	Raggio isola centrale	9.50 m
ENTRATA		
Le	Larghezza entrata	3.50 m
Re	Raggio entrata	12.00 m
ISOLA SEPARATRICE		
B, B1, B2	Larghezza isola separatrice	4.00 m
H, H1, H2	Lunghezza isola separatrice	8.50 m
USCITA		
Lu	Larghezza uscita	4.00 m
Ru	Raggio uscita	15.00 m
DEFLESSIONE		
Sigla elemento	Definizione	Valore orientativo
Rd	Deflessione su ramo opposto	67 m (caso D = 7.0 m)
Rd1	Deflessione su ramo adiacente	67 m (caso D = 7.0 m)
RAGGI DI RACCORDO		
Rre	Raggio di raccordo entrata	50÷100 m
Rru	Raggio di raccordo uscita	50÷100 m



*SCHEMA 2-B*

CARATTERISTICHE GENERALI	
Ambito	Urbano
Traffico pesante	Sì
Capacità totale	2350 ÷ 2500 veq/h
N° di bracci confluenti	4

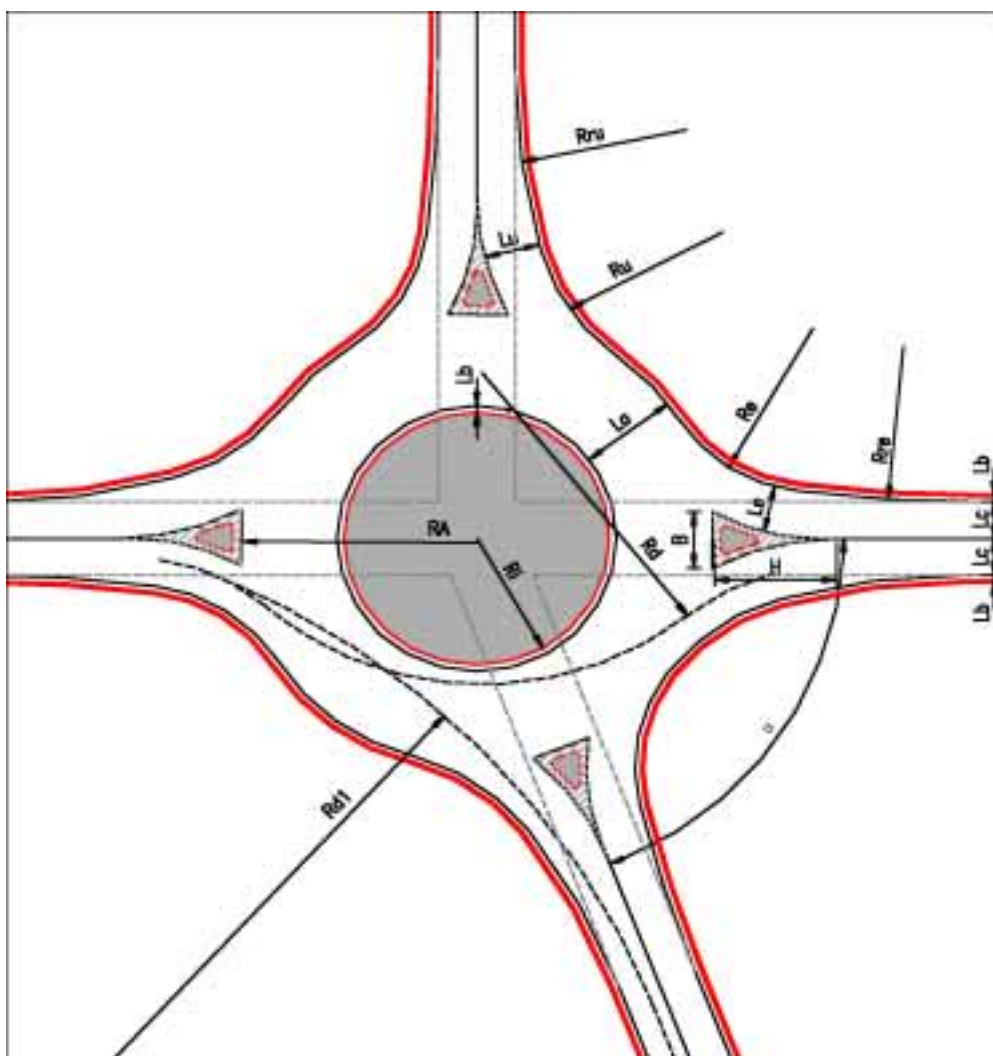


Figura 7-8



CARATTERISTICHE DELLE STRADE CONFLUENTI		
	Categoria E Urbane di quartiere	Categoria F Locali
Larghezza corsia (Lc)	3.00 m, 3.50 m	2.75 m
Larghezza banchina (Lb)	0.50 m	0.50 m
Angolo minimo tra 2 bracci successivi ( $\alpha$ )	69°	69°
VALORI GEOMETRICI MINIMI DELLA ROTATORIA		
Sigla elemento	Definizione	Valore minimo
ANELLO		
RA	Raggio esterno	17.00 m
La	Larghezza anello	7.00 m
Lb	Banchina	0.50 m
Ri	Raggio isola centrale	9.50 m
ENTRATA		
Le	Larghezza entrata	3.50 m
Re	Raggio entrata	12.00 m
ISOLA SEPARATRICE		
B	Larghezza isola separatrice	4.00 m
H	Lunghezza isola separatrice	8.50 m
USCITA		
Lu	Larghezza uscita	4.00 m
Ru	Raggio uscita	15.00 m
DEFLESSIONE		
Sigla elemento	Definizione	Valore orientativo
Rd	Deflessione su ramo opposto	24 m
Rd1	Deflessione su ramo adiacente	47 m
RAGGI DI RACCORDO		
Rre	Raggio di raccordo entrata	50÷100 m
Rru	Raggio di raccordo uscita	50÷100 m



**SCHEDA 3-A**

CARATTERISTICHE GENERALI	
Ambito	Extraurbano
Traffico pesante	Si
Capacità totale	2300 ÷ 2500 veq/h
N° di bracci confluenti	3

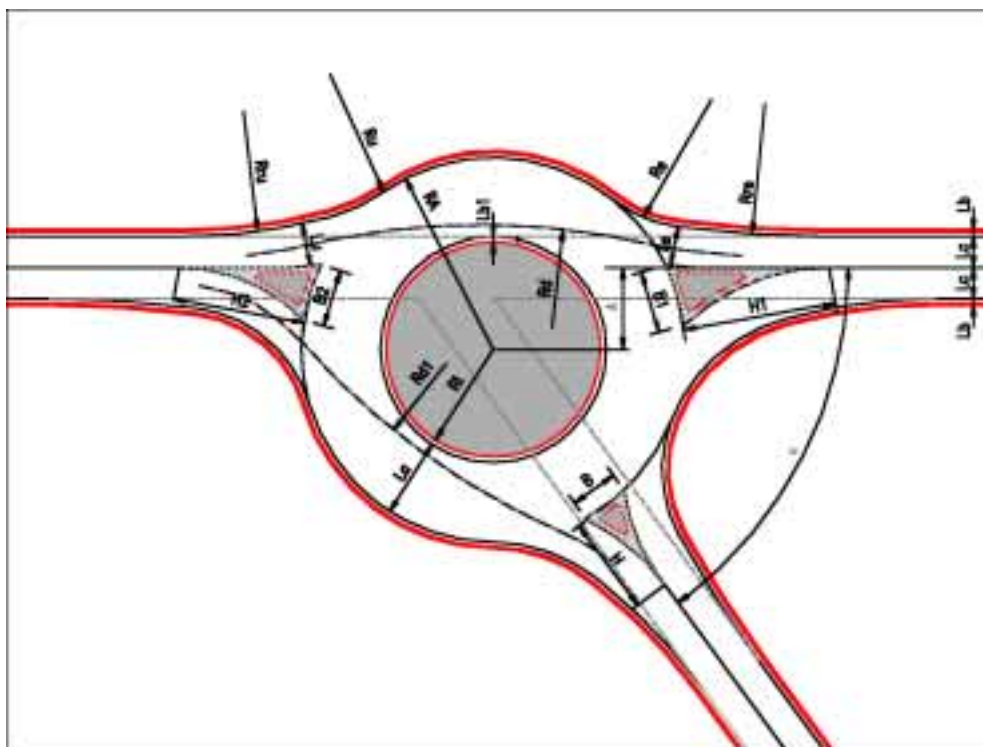


Figura 7-9

D = Massimo spostamento del centro della rotatoria rispetto posizione ideale (sull'asse principale) nel caso di intersezione a T: **9.00 m**



CARATTERISTICHE DELLE STRADE CONFLUENTI		
	Categoria C Extraurbane secondarie	Categoria F1, F2 Locali Ambito extraurbano
Larghezza corsia (Lc)	3.50 m, 3.75 m	3.25 m, 3.50 m
Larghezza banchina (Lb)	1.25 m, 1.50 m	1.00 m
Angolo minimo tra 2 bracci successivi ( $\alpha$ )	56°	56°
VALORI GEOMETRICI MINIMI DELLA ROTATORIA		
Sigla elemento	Definizione	Valore minimo
ANELLO		
RA	Raggio esterno	20.00 m
La	Larghezza anello	7.00 m
Lb1	Banchina	0.50 m
Ri	Raggio isola centrale	12.50 m
ENTRATA		
Le	Larghezza entrata	4.00 m
Re	Raggio entrata	16.00 m
ISOLA SEPARATRICE		
B, B1, B2	Larghezza isola separatrice	5.50 m
H, H1, H2	Lunghezza isola separatrice	11.50 m
USCITA		
Lu	Larghezza uscita	4.00 m
Ru	Raggio uscita	20.00 m
DEFLESSIONE		
Sigla elemento	Definizione	Valore orientativo
Rd	Deflessione su ramo opposto	70 m (caso D = 9.0 m)
Rd1	Deflessione su ramo adiacente	70 m (caso D = 9.0 m)
RAGGI DI RACCORDO		
Rre	Raggio di raccordo entrata	50÷100 m
Rru	Raggio di raccordo uscita	50÷100 m



*SCHEDA 3-B*

CARATTERISTICHE GENERALI	
Ambito	Extraurbano
Traffico pesante	Si
Capacità totale	2400 ÷ 2600 veq/h
N° di bracci confluenti	4

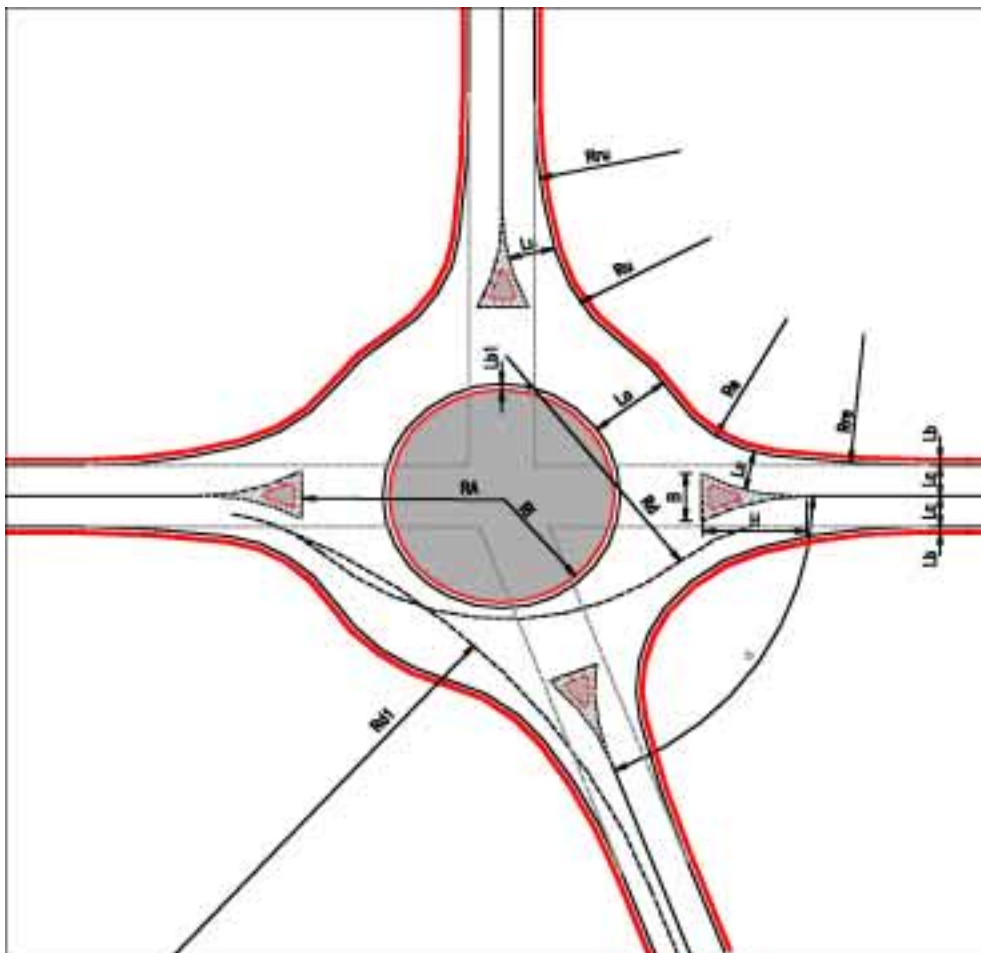


Figura 7-10



CARATTERISTICHE DELLE STRADE CONFLUENTI		
	Categoria C Extraurbane secondarie	Categoria F1, F2 Locali Ambito extraurbano
Larghezza corsia (Lc)	3.50 m, 3.75 m	3.25 m, 3.50 m
Larghezza banchina (Lb)	1.25 m, 1.50 m	1.00 m
Angolo minimo tra 2 bracci successivi ( $\alpha$ )	72°	72°
VALORI GEOMETRICI MINIMI DELLA ROTATORIA		
Sigla elemento	Definizione	Valore minimo
ANELLO		
RA	Raggio esterno	20.00 m
La	Larghezza anello	7.00 m
Lb1	Banchina	0.50 m
Ri	Raggio isola centrale	12.50 m
ENTRATA		
Le	Larghezza entrata	4.00 m
Re	Raggio entrata	16.00 m
ISOLA SEPARATRICE		
B	Larghezza isola separatrice	5.50 m
H	Lunghezza isola separatrice	11.50 m
USCITA		
Lu	Larghezza uscita	4.50 m
Ru	Raggio uscita	20.00 m
DEFLESSIONE		
Sigla elemento	Definizione	Valore orientativo
Rd	Deflessione su ramo opposto	26 m
Rd1	Deflessione su ramo adiacente	67 m
RAGGI DI RACCORDO		
Rre	Raggio di raccordo entrata	50÷100 m
Rru	Raggio di raccordo uscita	50÷100 m



SCHEMA 4

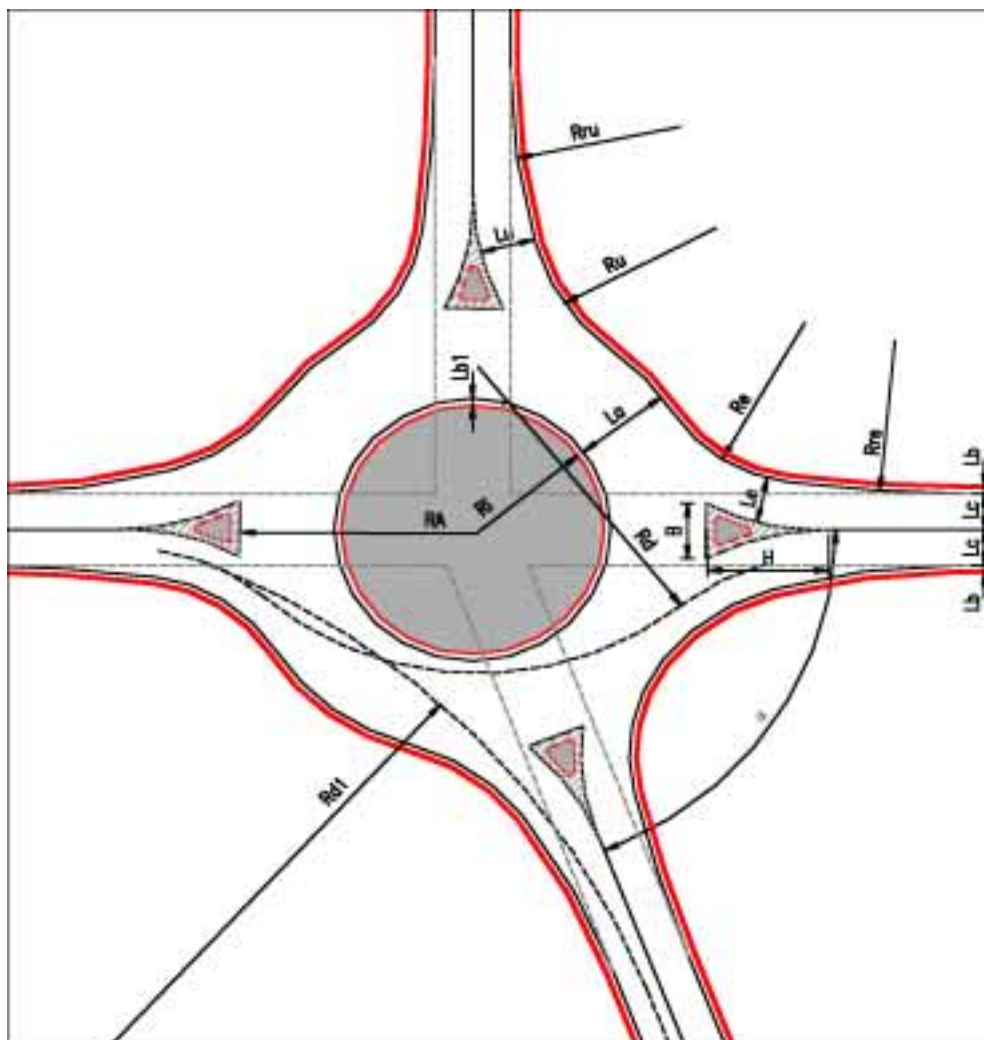


Figura 7-11

- La deflessione delle traiettorie di ciascun ingresso deve essere inferiore a  $80 \div 100$  m
- Valori orientativi per raggi dei raccordi di entrata ( $R_{re}$ ) ed uscita ( $R_{ru}$ ):  $50 \div 100$  m.



	AMBITO URBANO			AMBITO EXTRAURBANO	
AMBITO URBANO					
Numero di corsie in entrata	1	1	2	1	2
Categoria strade	E-Urbane di quartiere e F-urbane locali	E-Urbane di quartiere e F-urbane locali	E-Urbane di quartiere	C-Extraurbane secondarie e F-extraurbane locali	C-Extraurbane secondarie
Larghezza corsia (Lc)	2.75-3.00 m	2.75-3.50 m	3.00-3.50 m	3.25-3.75 m	3.50-3.75 m
Larghezza banchina (Lb)	0.50 m	0.50 m	0.50 m	1.00-1.50 m	1.25-1.50 m
TIPO DI TRAFFICO CONSENTITO					
Trasporto pubblico	Per volumi trascurabili	SI	SI	SI	SI
Mezzi pesanti	Per volumi trascurabili	SI	SI	SI	SI
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA ROTATORIA					
Raggio esterno (RA)	12.50÷15.00m	> 17.00 m	> 22.00 m	> 20.00 m	A> 25.00 m
Larghezza anello (La)	7.00 m	7.00 m	8.00 m	7.00 m	8.00 m – 10.00 m (3 c.)
Banchina (Lb1)	1.50 m - Semi-sormontabile	0.50	0.50	0.50	0.50
Raggio isola centrale (Ri)	4.00÷6.50 m	> 9.50 m	> 13.50 m	> 12.50 m	> 16.50 m
Larghezza entrata (Le)	3.50 m	3.50-4.00 m	6.50 m	4.00	6.50 m
Raggio entrata (Re)	Re < RA minimo 12 m	Re < RA minimo 12 m	Re < RA minimo 16 m	Re < RA minimo 16 m	Re < RA minimo 16 m
Larghezza minima isola separatr. (B)	3.00 m	4.00 m	6.00 m	6.00 m	6.00 m
Larghezza uscita (Lu)	4.00 m	4.00-4.50 m	5.00 m	4.50-5.00 m	5.00 m
Raggio di uscita (Ru)	Ru > Ri Ru > Re minimo 15 m	Ru > Ri Ru > Re minimo 15 m	Ru > Ri Ru > Re minimo 20 m	Ru > Ri Ru > Re minimo 20 m	Ru > Ri Ru > Re minimo 23 m



#### 7.1.4 Verifica della capacità e delle prestazioni

Una volta noti i flussi circolanti nell'intersezione e quindi la matrice Origine/Destinazione e la geometria della rotatoria, è possibile valutare per ogni entrata la capacità necessaria a soddisfare la domanda di traffico. Per utilizzare le formule semplificate di calcolo della capacità si devono trasformare i dati disaggregati di traffico in flussi di autovetture equivalenti; a tal fine si possono utilizzare (in assenza di altri dati) i coefficienti forniti nella seguente Tabella 7-2.

Tipo veicolo	Coefficiente di equivalenza (veq)
Ciclo e motociclo	0.5
Veicolo leggero	1
Veicolo pesante	2
Autobus	2

Tabella 7-2

Da una prima analisi della matrice O/D, ed in particolare dei flussi entranti  $Q_e$  e dei flussi circolanti  $Q_c$ , si evince la necessità o meno di verificare la capacità dei singoli ingressi, come evidenziato in Tabella 7-3.

Caso	Traffico entrante complessivo (veq/h)	Verifiche da effettuare
1	< 1500	Nessuna verifica della capacità
2	1500 ÷ 2000	Non serve verifica della capacità se per ogni ingresso: $Q_{e,i} + Q_{c,i} < 1000$ veq/h
3	> 2000	Verifica della capacità delle singole entrate

Tabella 7-3

In generale, se l'entità dei flussi è contenuto (Caso 1 della Tabella 7-3) si possono adottare le geometrie "di minimo", viste nel capitolo precedente senza effettuare ulteriori controlli sulla capacità. Se invece il traffico entrante complessivo è superiore a 1500÷2000 veq/h, è necessario verificare la riserva di capacità di ciascun ingresso, evidenziando eventuali criticità.



## CAPACITÀ DELLE ENTRATE E RISERVA DI CAPACITÀ

Per il calcolo della capacità di un'entrata sono necessari i parametri geometrici e di traffico della rotatoria di progetto, riportati in Tabella 7-2 e schematizzati nella Figura 7-12:

Parametri geometrici			Parametri di traffico	
Nome	Descrizione	Valori usuali (m)	Nome	Descrizione
SEP	Larghezza dell'isola separatrice	0÷15 (ininfluyente sulla capacità se maggiore di 15)	$Q_e$	Flusso entrante
ANN	Larghezza anello di circolazione	7 ; 8 ; 10	$Q_u$	Flusso uscente
ENT	Larghezza dell'entrata	3.5 ; 4.0 ; 6.5	$Q_c$	Flusso circolante

Tabella 7-4

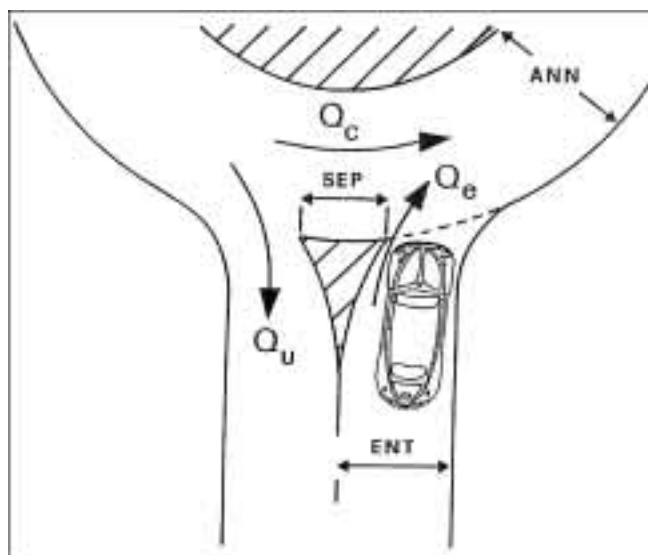


Figura 7-12





La procedura di calcolo si articola in 3 punti e va eseguito per ciascun braccio della rotatoria:

□ Calcolo del traffico uscente equivalente  $Q_u'$ :

$$Q_u' = \alpha \cdot Q_u \text{ se } SEP < 15 \text{ m} ; \quad Q_u' = 0 \text{ se } SEP \geq 15 \text{ m.}$$

SEP (m)	$\alpha = (15-SEP)/15$	SEP (m)	$\alpha = (15-SEP)/15$
0	1.00	8	0.47
1	0.93	9	0.40
2	0.87	10	0.33
3	0.80	11	0.27
4	0.73	12	0.20
5	0.67	13	0.13
6	0.60	14	0.07
7	0.53	$\geq 15$	0.00

□ Calcolo del traffico complessivo di disturbo  $Q_d$ :

$$Q_d = \beta \cdot (Q_c + 2/3 \cdot Q_u')$$

ANN (m)	$\beta = 1 - 0.085 \cdot (ANN - 8)$
7	1.085
8	1.00
10	0.83

□ Calcolo della capacità dell'entrata C:

$$C = y \cdot (1330 - 0.7 \cdot Q_d)$$

ENT (m)	$y = 1 + 0.1 \cdot (ENT - 3.5)$
3.5	1.00
4.0	1.05
6.5	1.30



La relazione (C-Qd) può essere determinata anche utilizzando il seguente grafico di Figura 7-13

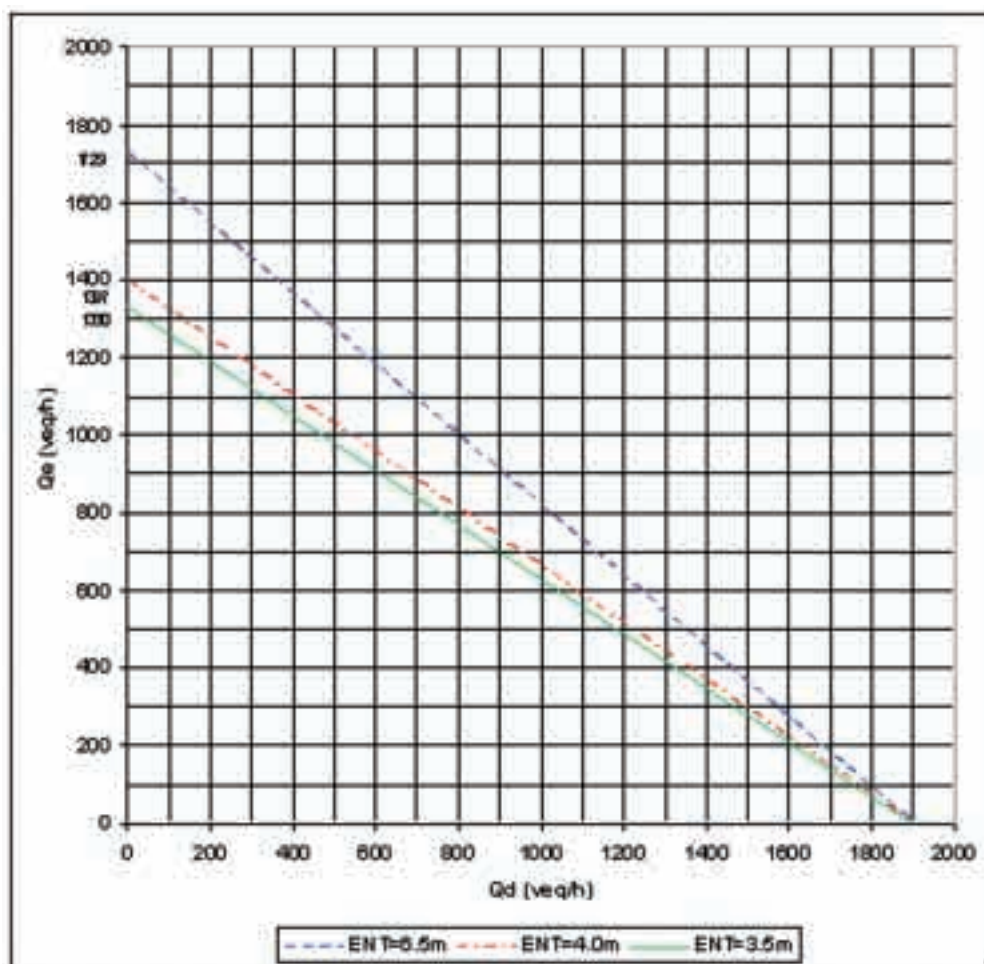


Figura 7-13

La riserva di capacità va calcolata come:  $RC(\%) = (C - Q_e)/Q_e$

Una rotatoria progettata adeguatamente dovrebbe garantire sulla direttrice principale una riserva di capacità superiore al 30%. Nel caso in cui la  $RC(\%)$  risultasse inferiore al 30% è opportuno adottare delle variazioni geometriche (aumento del numero di corsie in entrata, aumento della larghezza dell'isola separatrice e conseguente aumento del diametro della rotatoria, introduzione di una via diretta di svolta a destra) che la riportino ad un valore accettabile. Se questi accorgimenti non fossero praticabili, si dovrà valutare il tempo medio di attesa, la lunghezza della coda e l'influenza della propagazione di questa ultima su eventuali intersezioni limitrofe. Per una valutazione approssimata di questi due indici prestazionali e del livello di servizio dell'intersezione si faccia riferimento ai grafici e alle tabelle contenute nel paragrafo 3.2.4. Per un'analisi più



approfondita del comportamento globale dell'intersezione si può ricorrere all'ausilio di una microsimulazione del traffico con le modalità esposte nel paragrafo 3.3.

Con questi indici si può altresì, effettuare un confronto dal punto di vista prestazionale con una diversa sistemazione dell'intersezione, ad esempio con l'introduzione di un impianto semaforico.

In particolare, dal punto di vista dei tempi medi di attesa si ha che:

- la rotatoria è vantaggiosa rispetto all'incrocio semaforizzato quando le portate sui diversi bracci sono uniformi e le svolte a sinistra sono superiori al 15-20% della portata del braccio;
- lo schema semaforizzato si dimostra più efficiente nel caso di flussi notevolmente differenti tra una strada e l'altra, e con tassi di svolta a sinistra limitati (minori di 5%).

### CAPACITÀ SEMPLICE DELLA ROTATORIA

È un indicatore di crescita del traffico ammissibile nella rotatoria. Per ogni ingresso  $i$  si calcola:

$$\delta_i = (y \cdot 1330) / (Q_{e,i} + y \cdot 0.7 \cdot Q_{d,i})$$

ENT (m)	$y=1+0.1 \cdot (ENT-3.5)$
3.5	1.00
4.0	1.05
6.5	1.30

Sia  $\delta_i = \min (\delta_i)$ , il valore  $(\delta_i - 1)\%$  fornisce il tasso di crescita massimo del traffico su tutti gli ingressi, prima che si inneschi il primo fenomeno di congestione nella rotatoria. Il flusso del braccio  $j$  è quello che ha raggiunto la sua massima capacità.

### CAPACITÀ TOTALE DELLA ROTATORIA

Sia  $[M]$  la matrice O/D, dividendo ciascun elemento della riga  $i$  della matrice per il traffico entrante  $Q_{e,i}$  del ramo  $i$ , si ottiene la matrice  $[N]$  delle percentuali di traffico tra i rami  $i$  e  $j$ . Assegnata  $[N]$ , la capacità complessiva o totale  $Q_T$  è:

$$Q_T = \sum C_i$$



nell'ipotesi che le capacità  $C_i$  delle singole entrate vengano raggiunte contemporaneamente. Per calcolare  $Q_T$ , occorre ricercare la distribuzione dei flussi in entrata  $Q_{e,i}$  tali da risultare simultaneamente pari alla capacità dei rispettivi ingressi  $C_i$ . Questi flussi in ingresso si ricavano risolvendo il sistema di  $n$  equazioni lineari nelle  $n$  incognite  $Q_{e,i}$ :

$$Q_{e,i} = C_i = f_i(Q_{c,i}, Q_{u,i}) = g_i(Q_{e,j \neq i})$$

Si dimostra che questo sistema può risolversi agevolmente con un metodo iterativo e convergente. In pratica i passi da iterare sono i seguenti (sia  $k$  l'iterazione corrente):

1. A partire dai flussi  $Q_{e,i}^{(k)}$  si calcolano, secondo la distribuzione della matrice  $[N]$ , i flussi  $Q_{u,i}^{(k)}$ ,  $Q_{c,i}^{(k)}$  e  $Q_{d,i}^{(k)}$  e quindi le capacità  $C_i^{(k)}$ , con le formule esposte in precedenza per il calcolo della capacità dell'entrata;
2. Detti  $\mathbf{Q}^{(k)}$  il vettore dei flussi  $Q_{e,i}^{(k)}$  e  $\mathbf{C}^{(k)}$  il vettore delle capacità  $C_i^{(k)}$  e scelto un  $\epsilon$  opportunamente piccolo, il test di convergenza consiste nel verificare che:  $\|\mathbf{Q}^{(k)} - \mathbf{C}^{(k)}\| < \epsilon$ ;
3. Se il test è verificato allora  $Q_T = \sum C_i^{(k)}$ , altrimenti si pone  $Q_{e,i}^{(k+1)} = C_i^{(k)}$  e si torna al punto 1.

La soluzione converge rapidamente e in genere sono sufficienti 5-6 iterazioni.

Per agevolare il calcolo delle  $C_i^{(k)}$  si può implementare un semplice programma informatico.

### SCHEDA TIPO PER L'ANALISI DELLA CAPACITÀ

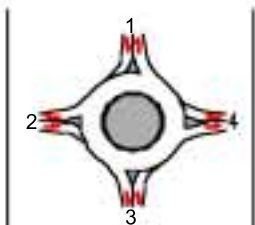
In Figura 7-14 è riportato una scheda che può essere utilizzata come fax-simile per raccogliere tutti i dati necessari per l'analisi della capacità di una rotatoria.



### ANALISI DELLA CAPACITA' DI UNA ROTATORIA A 4 BRACCI - SCHEDA TIPO

**MATRICE FLUSSI DI TRAFFICO (VEICOLI EQUIVALENTI/ORA)**

Dir.	Usc. 1	Usc. 2	Usc. 3	Usc. 4	Totale
Ingr. 1					
Ingr. 2					
Ingr. 3					
Ingr. 4					
Totale					



**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE**

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	Ramo 4
SEP (m)				
AMN (m)				
ENT (m)				

Lunghezza dell'isola di scollamento in corrispondenza dei rami

Lunghezza della carreggiata dell'anello circolare dopo l'intersezione

Lunghezza della carreggiata del ramo d'ingresso

**CAPACITA' DEI SINGOLI RAMI**

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	Ramo 4
Q <sub>a</sub> (veq/h)				
Q <sub>s</sub> (veq/h)				
Q <sub>c</sub> (veq/h)				
Q <sub>d</sub> (veq/h)				
C (veq/h)				
RC (veq/h)				
RC (%)				

Flusso entrante

Flusso scorte

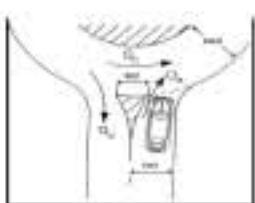
Flusso circolare

Flusso di debito

Capacità del ramo

Reserva di capacità

Reserva di capacità



**CAPACITA' SEMPLICE DELLA ROTATORIA**  
(Capacità del ramo che per primo giunge alla rotatoria con formazione di coda in ingresso alla rotatoria)

Ramo saturato:	Capacità semplice:	veq/h	% capacità traffico:
----------------	--------------------	-------	----------------------

**CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DOPO LA SATURAZIONE DEL PRIMO RAMO**

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	Ramo 4
Q <sub>s</sub> (veq/h)				
Q <sub>d</sub> (veq/h)				
RC (veq/h)				
RC (%)				

**CAPACITA' TOTALE DELLA ROTATORIA**  
(Capacità della rotatoria quando tutti i rami sono giunti a saturazione con formazione di coda in ingresso)

Capacità totale ideale Q <sub>T</sub>	veq/h	Capacità totale pratica Q <sub>T</sub>	veq/h
---------------------------------------	-------	--	-------

**FLUSSI DI CAPACITA' AGGIUNTI (TUTTI I RAMI SONO SATURI)**

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	Ramo 4
Q <sub>a</sub> (veq/h)				
C (veq/h)				
C* (veq/h)				

Figura 7-14

### 7.1.5 Verifica della visibilità

Le verifiche di opportune visuali libere da garantire sono riassunte nella seguente tabella (per ulteriori indicazioni e approfondimenti si rimanda al contenuto del capitolo 5.3).



Per il calcolo delle distanze di arresto e per la velocità di percorrenza in funzione del raggio della traiettoria si adottano le successive Tabella 7-5 e Tabella 7-6.

VERIFICHE DA EFFETTUARE		
N	Descrizione	Schema di verifica
1	<p><b>Verifica della distanza di visibilità per l'arresto nel ramo di ingresso in rotatoria</b></p> <p>Nel caso in cui la prima della linea d'arresto ci sia un attraversamento pedonale, la distanza di visibilità va calcolata con riferimento a quest'ultimo.</p>	<p>Il diagramma illustra la geometria di una rotatoria con un ramo di ingresso. Una linea gialla indica la "ZONA DI CUI E' NECESSARIA LA VISIBILITA'", mentre una linea grigia indica la "ZONA DI CUI E' NECESSARIO L'ARRESTO".</p>



VERIFICHE DA EFFETTUARE		
N	Descrizione	Schema di verifica
2	<p><b>Verifica della visibilità dell'intersezione.</b></p> <p>Nel caso di una intersezione a 4 o più bracci, la zona necessaria per la visibilità corrisponde al quarto di corona giratoria. Nel caso di 3 bracci la zona si deve estendere fino all'innesto viario più prossimo a sinistra.</p>	
3	<p><b>Verifica della visibilità nella circolazione lungo l'anello.</b></p> <p>La visuale si riferisce sia alla distanza di arresto per la presenza di oggetti o altri veicoli presenti nell'anello, sia alla distanza di visibilità per prevedere l'ingresso di altri veicoli. Questa fascia di visibilità incide sull'arredo dell'isola centrale, in particolare nelle rotatorie di piccole dimensioni. In ogni caso non devono essere posti ostacoli visivi (come alberi) a meno di 2 m dal bordo dell'isola centrale o, in assenza di bordura sormontabile, a 2,50 m dalla linea di demarcazione dell'isola centrale).</p>	



VERIFICHE DA EFFETTUARE		
N	Descrizione	Schema di verifica
4	<p><b>Verifica del triangolo da garantire in corrispondenza di intersezioni stradali a raso (C.d.S.)</b></p> <p>Oltre alle distanze di visibilità prima analizzate, è necessario garantire, come previsto dal Nuovo Codice della Strada, delle idonee aree di visibilità (art. 16 in ambito urbano ed art. 18 in ambito extraurbano), le quali individuano un triangolo di visibilità che deve aggiungersi a quello individuato dalle fasce di rispetto.</p>	
5	<p><b>Verifica della visibilità di un attraversamento pedonale da parte di un veicolo in uscita<sup>11</sup>.</b></p> <p>Nel caso di rotatorie interessate da attraversamenti pedonali è necessario verificare che essi siano visibili dai veicoli circolanti nell'anello e/o da coloro che si devono immettere in rotatoria e provengono dal ramo immediatamente a sinistra dell'attraversamento. Per le rotatorie senza attraversamenti pedonali bisognerebbe prevedere comunque una verifica di transitabilità dei pedoni.</p>	

<sup>11</sup> Verifica da effettuare solo per i bracci che ospitano l'attraversamento pedonale o ciclabile.





VERIFICHE DA EFFETTUARE		
N	Descrizione	Schema di verifica
6	<p><b>Verifica della visibilità per il pedone in prossimità di un attraversamento pedonale<sup>7</sup>.</b></p> <p>Per migliorare la sicurezza dell'attraversamento è opportuno garantire una reciproca visione del pedone con il guidatore del veicolo. E' consigliabile, pertanto verificare la visibilità del veicolo da parte del pedone.</p>	



Velocità (km/h)	Distanza di arresto (m)		
	Pendenza longitudinale "i"		
	-5.0%	0%	+5.0%
25	24	23	23
30	31	30	29
40	43	41	39
50	58	55	52
60	76	71	67
70	97	90	84
80	122	111	103
90	151	136	125

Tabella 7-5 – Distanza d’arresto.

Velocità (km/h)	Raggio della curva (m)			Coefficiente di aderenza (ft))
	Pendenza trasversale”			
	-2.0 %	0 %	+2.0 %	
15	8	8	7	0.23
20	15	14	13	0.23
25	25	22	21	0.22
30	35	32	30	0.22
40	66	60	55	0.21
50	109	98	89	0.20
60	157	142	129	0.20

Tabella 7-6 – Relazione tra velocità di progetto e raggio della curva.



## 7.1.6 Elementi di completamento

### 7.1.6.1 PAVIMENTAZIONE

La pendenza trasversale dell'anello sarà del 1,5-2 % e dovrà essere diretta verso l'esterno della rotatoria. La massima pendenza tra due punti diametrali esterni della corona giratoria non deve superare il valore di 5,0 %, è consigliabile comunque limitare quanto possibile questa pendenza.

Nel caso sia presente sul perimetro dell'isola centrale una banchina transitabile la pendenza della banchina dovrà essere di circa 4-6%

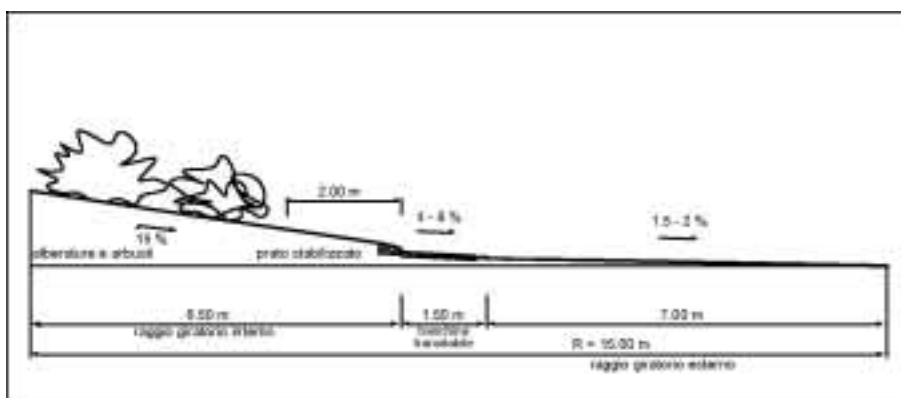


Figura 7-15 [2]

Come indicazione di massima nella Figura 7-16 riportiamo un pacchetto di pavimentazione normalmente usato per le strade provinciali

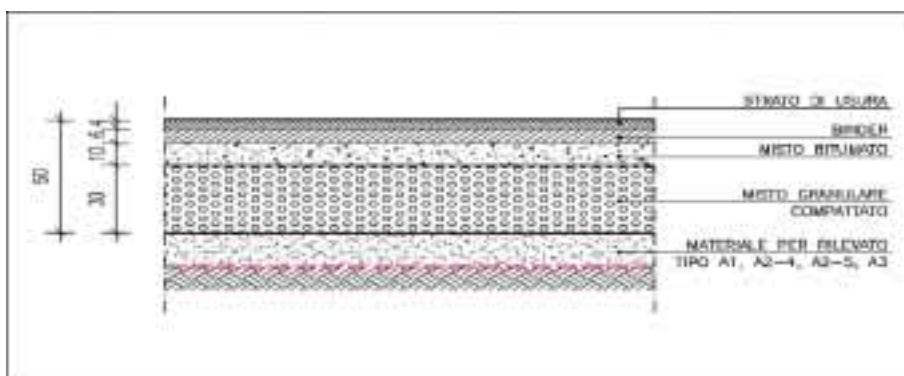


Figura 7-16 – Pavimentazione tipo



### 7.1.6.2 SEGNALETICA

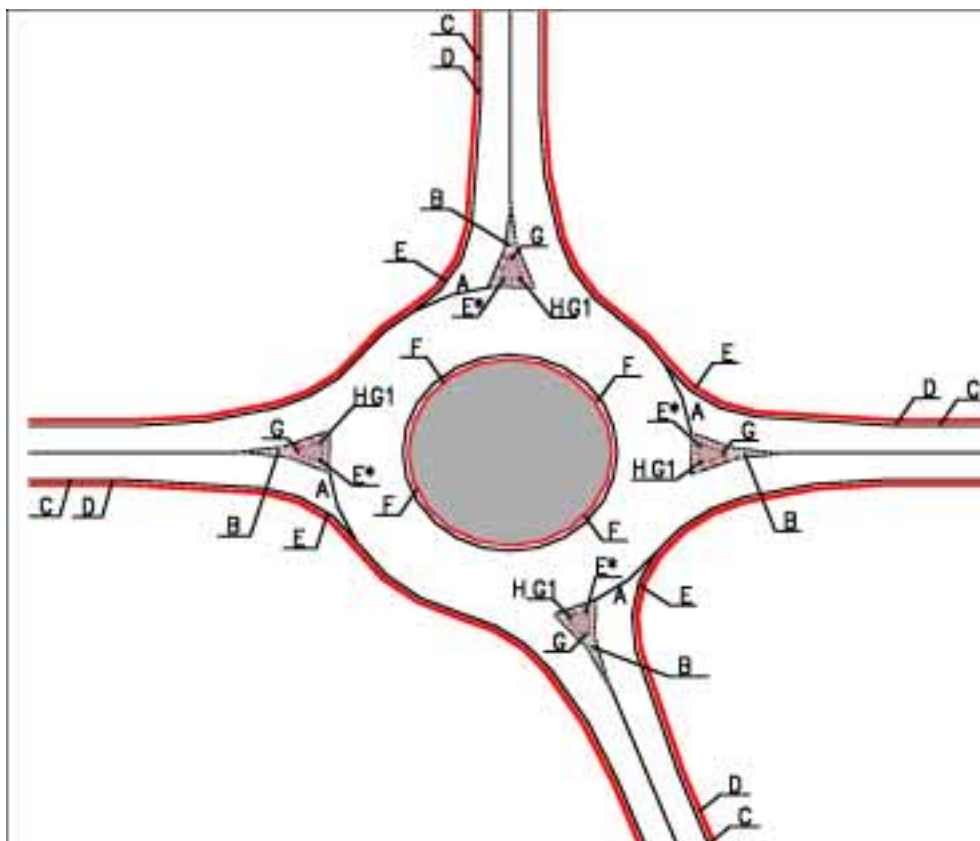


Figura 7-17 – Posizionamento segnaletica.

Sigla elemento	Posizione	Descrizione	Segnale
A	Rami d'entrata	Segnaletica orizzontale Figura II 433 Art.144 D.P.R.16/12/92 n.495	
B	Isole di separazione	Segnaletica orizzontale Figura II 446 Art.150 D.P.R.16/12/92 n.495	



Sigla elemento	Posizione	Descrizione	Segnale
<b>C</b>	Rami d'entrata	Segnaletica verticale Figura II 238 Art.127 D.P.R.16/12/92 n.495	
<b>D</b>	Rami d'entrata	Segnaletica verticale Figura II 27 Art.96 e Figura II 38 Art.108 D.P.R.16/12/92 n.495	
<b>E, E*</b>	Rami d'entrata	Segnaletica verticale Figura II 36 Art.106 e Figura II 84 Art.122 D.P.R.16/12/92 n.495	
<b>F</b>	Isola centrale	Segnaletica verticale Figura II 80 Art.122 e Figura II 466 Art.174 D.P.R.16/12/92 n.495	
<b>G, G1</b>	Isole di separazione	Segnaletica verticale delineatori speciali di ostacolo Figura II 472 Art.177 D.P.R.16/12/92 n.495	
<b>H</b>	Isole di separazione	Segnaletica verticale Figura II 248 e 249 Art.128 D.P.R.16/12/92 n.495	



### 7.1.6.3 ILLUMINAZIONE

Nella tabella seguente si elencano le fasi da seguire per la redazione del progetto dell'impianto di pubblica illuminazione; per il calcolo si rimanda al capitolo 6.4.

FASI PER LA PROGETTAZIONE DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	
Fase	Descrizione
1	Classificazione delle strade afferenti secondo la Norma UNI 10439 e determinazione delle prestazioni illuminotecniche da conseguire nei bracci.
2	Scelta del criterio base per l'illuminazione della rotatoria (della "luminanza" o dell'"illuminamento").
3	Classificazione della rotatoria e determinazione delle prestazioni illuminotecniche da conseguire nella stessa.
4	Individuazione delle caratteristiche dimensionali, studio delle eventuali singolarità (incroci, passaggi pedonali, ecc) e determinazione delle caratteristiche geometriche di massima dell'impianto.
5	Analisi del contesto architettonico nel quale si colloca l'impianto; scelta dei sostegni (pali, torri faro, funi, ecc) e degli apparecchi illuminanti (armature, proiettori, ecc); determinazione della temperatura di colore e dell'indice di resa cromatica delle sorgenti luminose.
6	Calcolo illuminotecnico di massima e determinazione della potenza delle lampade (ad esempio tramite il metodo del flusso globale).
7	Verifica illuminotecnica di dettaglio, mediante l'utilizzo di software dedicati; calcolo dei livelli di luminanza e/o illuminamento, uniformità e indici di abbagliamento sull'anello e sui bracci.
8	Determinazione definitiva degli apparecchi illuminanti utilizzati (curve fotometriche) e dei parametri geometrici dell'impianto.
9	Definizione del sistema e dell'architettura delle alimentazioni (quadri elettrici e linee).
10	Scelta delle condutture (tipo e condizioni di posa) e dei dispositivi di protezione.
11	Dimensionamenti elettrici, calcolo delle portate dei cavi, cadute di tensione, correnti di cortocircuito e determinazione delle caratteristiche delle protezioni.

Figura 7-7



## 7.2 ESEMPIO APPLICATIVO

Si supponga di voler progettare una rotatoria come soluzione di una pericolosa intersezione a raso esistente (vedi Tavola 1). L'incrocio è a "T" ed è situato tra la S.P. "A" e la S.P. "B". L'ambito in cui si inserisce l'intervento è extraurbano.

Per lo studio della rotatoria viene seguito l'iter schematico esposto nel paragrafo precedente.

### VERIFICA DI FATTIBILITÀ

Tutti i requisiti di fattibilità elencati nel paragrafo 7.1.1 vengono soddisfatti, quindi la rotatoria può essere considerata come potenziale soluzione dell'intersezione.

### ANALISI DEL TRAFFICO

Si supponga che dal Piano Provinciale della Viabilità si possano desumere l'entità dei flussi (ma non le manovre) che interessano le due strade provinciali e l'ora di punta (7.30-8.30). Da questa documentazione risulta che i flussi che interessano l'intersezione sono abbastanza elevati (con significativa componente di traffico pesante), sarà quindi necessario organizzare una campagna di rilievo del traffico (conteggi manuali) al fine di valutare l'entità delle varie manovre consentite. Per semplicità, nei conteggi vengono distinti solamente i mezzi pesanti, le autovetture e i mezzi a due ruote.

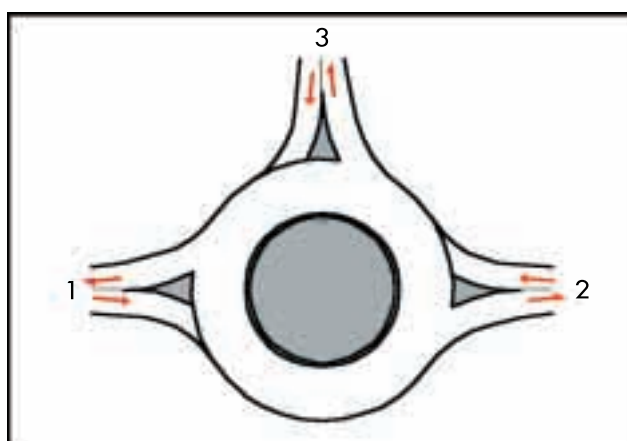


Figura 7-18

Con riferimento alla numerazione dei bracci riportata nello schema di Figura 7-18, il risultato dei conteggi può essere riassunto in una matrice (3x3) dei flussi nell'ora di punta, ed espresso in veicoli equivalenti all'ora (veq/h), adottando i coefficienti di equi-



valenza riportati nella Tabella 7-2:

Orig.\Dest.	1	2	3
1	-	534	125
2	519	-	183
3	159	195	-

Tabella 7-8 – Matrice O/D espressa in veq/h

Si supponga inoltre che dai vari studi sia emerso che non è necessario prevedere dei passaggi pedonali in corrispondenza dei vari bracci della rotatoria.

### DEFINIZIONE GEOMETRICA DELLA ROTATORIA

La S.P. “A” è una strada di categoria F2 mentre la S.P. “B” è di categoria F1.

La geometria (di minima) adottata è stata ricavata dalla scheda 3-B (ambito extraurbano; 3 rami). Il raggio esterno della rotatoria è pari a 20 m e consente ai mezzi pesanti manovre agevoli in tutte le direzioni. La larghezza della carreggiata dell’anello è di 7.00 m, affiancata in sinistra da una banchina larga 0.50 m e in destra da una banchina larga 1.00 m. (vedi tavole allegate)

In questa situazione la posizione del centro della rotatoria non è stata collocata in corrispondenza dell’intersezione dei due assi (posizione ideale), ma è stato scelto di spostarlo in direzione della S.P.”B” al fine di utilizzare quanto più possibile l’area occupata dall’attuale incrocio e ridurre in tal modo l’esproprio di nuove aree. Lo spostamento del centro rispetto l’asse della S.P. “A” è di 4.35 m (al di sotto del massimo consentito: 9.00 m, indicato nella scheda). La deflessione della traiettoria lungo la S.P. “A” ha comunque un valore sufficientemente basso, pari a 33 m (minore di 80 m), e obbliga l’automobilista a percorrere la rotatoria a velocità bassa.

La larghezza delle entrate è pari a 4.00 m, mentre quelle delle uscite è di 4.50 m. I rami d’ingresso e di uscita sono stati costruiti adottando i valori minimi dei raggi (16 m per il raggio delle entrate e 20 m per i raggi delle uscite).

La rotatoria di progetto, con tutte le caratteristiche geometriche, è riportata nella tavola 3.





## VERIFICA CAPACITÀ E PRESTAZIONI

Il primo controllo da effettuare è quello relativo ai flussi entranti; in particolare si deve verificare se la somma dei flussi entranti nell'ora di punta sia maggiore o minore di 1500 veq/h. Nel nostro caso con riferimento alla matrice O/D della Tabella 7-8:

$$Q_{e,1} + Q_{e,2} + Q_{e,3} = 659 + 702 + 354 = \mathbf{1715 \text{ veq/h}} > 1500 \text{ veq/h}$$

In questo caso, essendo  $< 2000 \text{ veq/h}$ , è necessario un esame della ripartizione del traffico, ossia si deve verificare che per ciascun braccio  $i$ :

$$Q_{e,i} + Q_{c,i} < 1000 \text{ veq/h}$$

Ossia:

□ Braccio 1:  $659 + 195 = \mathbf{854 \text{ veq/h}} < 1000 \text{ veq/h}$

□ Braccio 2:  $702 + 125 = \mathbf{827 \text{ veq/h}} < 1000 \text{ veq/h}$

□ Braccio 3:  $354 + 519 = \mathbf{873 \text{ veq/h}} < 1000 \text{ veq/h}$

A questo punto non sarebbe necessario effettuare il calcolo della capacità delle singole entrate, in quanto la verifica delle precedenti condizioni implica una sufficiente riserva di capacità su tutti i bracci della rotatoria. Tuttavia per completezza e verifica di quanto appena detto viene riportato il calcolo della capacità delle entrate; verranno infine calcolate anche la capacità semplice e quella totale per esaminare le caratteristiche prestazionali della rotatoria nel suo complesso.

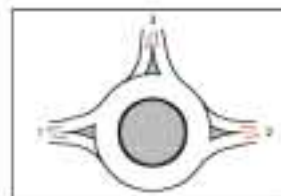
Nella seguente Figura 7-19, sulla base del modello di scheda della Figura 7-14 adattato al caso di rotatoria a 3 bracci, sono stati riportati i dati per il calcolo delle varie capacità nonché i risultati ottenuti.



### ANALISI DELLA CAPACITA' DI UNA ROTATORIA A 3 BRACCI

#### MATRICE FLUSSI DI TRAFFICO (VEICOLI EQUIVALENTI/ORA)

Usc	Usc. 1	Usc. 2	Usc. 3	Totale
Ingr. 1	-	534	125	659
Ingr. 2	519	-	183	702
Ingr. 3	196	196	-	392
Totale	679	728	308	1715



#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	
SEP (m)	6.25	5.85	5.8	Longhezza dell'isola di separazione in corrispondenza dei rami
AMN (m)	7	7	7	Longhezza della carreggiata dell'anello circolare dopo l'intersezione
ENT (m)	4	4	4	Longhezza della carreggiata del ramo d'ingresso

#### CAPACITA' DEI SINGOLI RAMI

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	
Q <sub>e</sub> (veq/h)	659	702	354	Flusso entrante
Q <sub>u</sub> (veq/h)	679	728	308	Flusso uscente
Q <sub>c</sub> (veq/h)	196	125	519	Flusso circolante
Q <sub>d</sub> (veq/h)	456	454	700	Flusso di debito
C (veq/h)	1031	1063	882	Capacità del ramo
RC (veq/h)	372	381	528	Riserva di capacità
RC (%)	56%	51%	149%	Riserva di capacità



#### CAPACITA' SEMPLICE DELLA ROTATORIA

(Capacità del ramo che per primo raggiunge la saturazione con formazione di coda in ingresso alla rotatoria)

Ramo attivo:	2	Capacità semplice:	947 veq/h	% crescita traffico:	35%
--------------	---	--------------------	-----------	----------------------	-----

#### CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DOPO LA SATURAZIONE DEL PRIMO RAMO

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	
Q <sub>e,s</sub> (veq/h)	659	947	477	2113
Q <sub>s</sub> (veq/h)	903	947	703	
RC (veq/h)	16	0	225	
RC (%)	2%	0%	47%	

#### CAPACITA' TOTALE DELLA ROTATORIA

(Capacità della rotatoria quando tutti i rami sono giunti a saturazione con formazione di coda in ingresso)

Capacità totale ideale Q <sub>p</sub> :	2430 veq/h	Capacità totale pratica Q <sub>p</sub> :	2169 veq/h
---	------------	--	------------

#### FLUSSI DI CAPACITA' AGLI INGRESSI (TUTTI I RAMI SONO SATURI)

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	
Q <sub>e</sub> (veq/h)	659	702	354	2430
C (veq/h)	770	956	704	
C <sup>*</sup> (veq/h)	688	853	626	

Figura 7-19 – Esempio di compilazione della scheda per l'analisi della capacità.



La scheda è organizzata in 5 parti:

1. *Matrice flussi di traffico*, nella quale viene riportata la matrice Origine-Destinazione, calcolata in precedenza.
2. *Caratteristiche geometriche*, dove sono state riportate per ciascun braccio le variabili geometriche che influenzano la capacità dell'entrata (SEP: larghezza dell'isola separatrice; ANN: larghezza della carreggiata dell'anello circolare dopo l'ingresso; ENT: larghezza della carreggiata del ramo d'ingresso).
3. *Capacità dei singoli rami*. Le prime 3 righe della tabella riportano per ciascun ramo il flusso entrante  $Q_e$ , il flusso uscente  $Q_u$ , e il flusso circolante  $Q_c$ , che si ricavano direttamente dalla matrice O/D. Le righe 4 e 5 riportano rispettivamente i valori del flusso di disturbo  $Q_d$  e della capacità  $C_i$ , che devono essere calcolati con le modalità spiegate nel paragrafo 7.1.4. Determinati i coefficienti  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  il calcolo di  $Q_d$  e quindi di  $C_i$  risulta piuttosto semplice.

Coeff.\Braccio	1	2	3
	0.58	0.60	0.61
	1.085	1.085	1.085
	1.05	1.05	1.05

Confrontando i valori di  $C_i$  con i rispettivi flussi di entrata  $Q_{e,i}$  si calcola la riserva di capacità di ciascun ingresso (righe 6 e 7). Nel nostro esempio le RC(%) sono tutte al di sopra del 50% e quindi la rotatoria è in grado di smaltire egregiamente il traffico, senza formazione di code, anche nelle ore di punta.

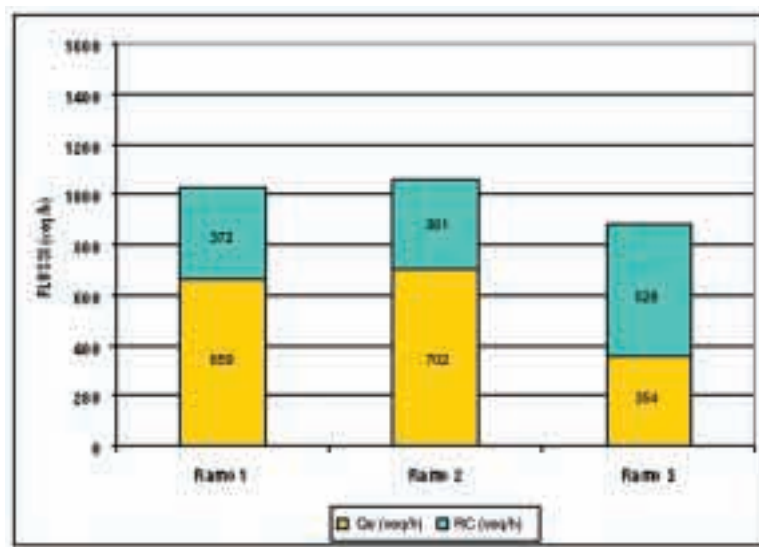


Figura 7-20 – Riserva di capacità delle 3 entrate.

4. *Capacità semplice della rotatoria.* Per ciascun braccio si calcola il moltiplicatore  $\partial$  con la formula riportata nel paragrafo 7.1.4.

Moltipl.\Braccio	1	2	3
$\partial$	1.36	1.35	1.61

Il valore più piccolo di  $\partial_i$  è 1.35 e corrisponde a quello relativo al ramo 2. Quindi l'incremento (contemporaneo su tutti i rami) massimo del traffico prima che si verifichi il primo fenomeno di congestione della rotatoria (in corrispondenza del braccio 2) è pari a  $(\partial_2 - 1) = 35\%$ . Risulta quindi che con questa distribuzione delle manovre, la rotatoria progettata consente un idoneo smaltimento del traffico senza formazioni di code anche nel medio-lungo periodo.

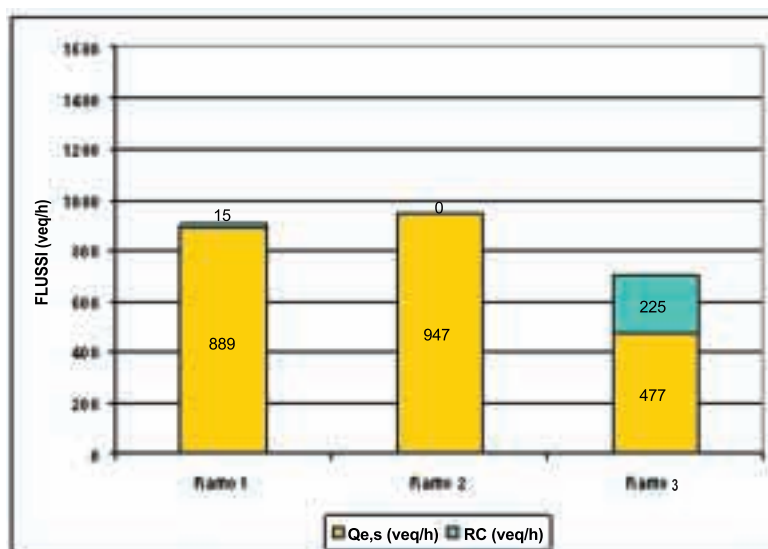


Figura 7-21 - Riserva di capacità delle 3 entrate, dopo la saturazione del ramo 2.

5. *Capacità totale della rotatoria.* Innanzitutto è necessario calcolare la matrice [N], dividendo ciascuna riga i-esima della matrice O/D per il rispettivo flusso  $Q_{e,i}$ ; si ottiene:

Coeff.\Braccio	1	2	3
1	-	0.81	0.19
2	0.74	-	0.26
3	0.45	0.55	-

Tabella 7-9 – Matrice O/D con le percentuali di svolta di ciascuna entrata.

Seguendo i passi indicati nel paragrafo 7.1.4, nella prima iterazione, a partire dai flussi entranti effettivi, si calcola con le consuete formule la capacità di ciascun ingresso; si ottiene:

Braccio n°	1	2	3
$Q_e^1$ (veq/h)	659	702	354
C (veq/h)	1031	1063	882
$ Q_e^1 - C^1 $ (veq/h)	372	361	528

Il test di convergenza è:  $\|Q^{(k)} - C^{(k)}\| < \varepsilon$  (dove  $\varepsilon$  può essere posto pari a 0.1, valo-



re sufficientemente piccolo!). Dopo la prima iterazione:

$\| Q^{(1)} - C^{(1)} \| = 372 + 361 + 528 = \mathbf{1261} > \mathbf{0.1}$  = quindi il test di convergenza non è soddisfatto e si dovrà reiterare ponendo  $Q_{e,i}^2 = C_i^1$ ; e calcolare le nuove  $C_i^2$ ; si ottiene:

Braccio n°	1	2	3
$Q_e^2$ (veq/h)	1031	1063	882
$C^2$ (veq/h)	643	817	615
$ Q_e^2 - C^2 $ (veq/h)	388	246	267

Test di convergenza è:

$$\| Q^{(2)} - C^{(2)} \| = 388 + 246 + 267 = \mathbf{901} > \mathbf{0.1}$$

quindi si dovrà procedere ad un'altra iterazione ponendo  $Q_{e,i}^3 = C_i^2$ ; e calcolare le nuove  $C_i^3$ ; e così via fino a quando non viene soddisfatto il test di convergenza. Nel nostro esempio si ottiene che dopo la 4° iterazione il test viene soddisfatto e si ottiene:

Braccio n°	1	2	3
$Q_e^4$ (veq/h)	770.2	955.5	703.9
$C^4$ (veq/h)	770.2	955.5	703.9
$ Q_e^4 - C^4 $ (veq/h)	0.04	0.03	0.00

Test di convergenza è:

$$\| Q^{(4)} - C^{(4)} \| = 0.04 + 0.03 + 0.00 = \mathbf{0.07} < \mathbf{0.1}$$

Quindi si ricava che la capacità totale è:

$$Q_T = \sum C_i^{(4)} = 770 + 956 + 704 = \mathbf{2430} \text{ veq/h}$$

Questo è il flusso massimo smaltibile dalla rotatoria, considerando immutata la distribuzione percentuale delle varie manovre di svolta (matrice [N] costante). Confrontando il valore delle capacità così ottenute con i flussi in ingresso si può capire quanto il funzionamento reale della rotatoria sia lontano dalla situazione ideale, che consente di ottenere la capacità massima.



## VERIFICA DELLA VISIBILITÀ

La verifica delle opportune visuali libere da assicurare a coloro che provengono dai bracci e a chi percorre l'anello è stata rappresentata graficamente nelle tavole 4 di 8 e 5 di 8.

La visibilità da garantire ai veicoli in avvicinamento alla rotatoria è stata valutata considerando una distanza di arresto prima della linea del “dare precedenza” pari a 90 m, corrispondente a una velocità di approccio di 70 km/h (vedi Tabella 7-5).

La visibilità per i veicoli che percorrono l'anello è stata valutata considerando una velocità di 30 km/h (velocità consentita dalla deflessione massima, pari a  $R = 33$  m; per il legame raggio di curvatura e velocità di percorrenza è stata utilizzata la Tabella 7-6). A questa velocità corrisponde una distanza di arresto pari a 30 m.

Per il calcolo del triangolo di visibilità prescritto dal Codice della Strada si è considerato per entrambe le strade provinciali una fascia di rispetto pari a 10m (vedi tavola 6 di 8).

Non avendo previsto attraversamenti pedonali o ciclabili in corrispondenza dei 3 bracci, non ci sono le verifiche di visuale libera corrispondenti ai punti 5 e 6 esposti nel paragrafo 7.1.5.

## ELEMENTI DI COMPLETAMENTO

La pavimentazione e la segnaletica sono riportate nelle tavole grafiche allegate, mentre di seguito è illustrato la verifica illuminotecnica eseguita sull'impianto a torre faro centrale, che è stato scelto come soluzione progettuale.

La verifica illuminotecnica è condotta per il solo anello della rotatoria (categoria strade F locali, indice della categoria illuminotecnica secondo UNI 10439 pari a “4”), che ha un diametro esterno di 42 m e una piattaforma stradale di 8.50 m (anello da 7 m di larghezza e 2 banchine, una da 1.00 m e una da 0.50 m). Non è previsto nel presente esempio l'illuminazione dei bracci.

- ☐ Criterio adottato: illuminamento;
- ☐ Classe dell'intersezione:

- C<sub>3</sub> secondo Tabella 6-5;
- C<sub>3</sub> secondo la Tabella 6-6.

- ☐ Tuttavia data l'importanza di questa intersezione e la sua nuova configurazione geo-



metrica a rotatoria si è ritenuto più idoneo adottare una classe  $C_1$ . I requisiti illuminotecnici da perseguire secondo la classe  $C_1$  (con fattore di manutenzione dell'impianto pari a 0.80):

- Illuminamento medio:  $\bar{E} = 30$  lux;
- Uniformità generale:  $U_0 = 0.40$ .

□ Scelta installazione e lampade: geometria di tipo centrale con torre faro di altezza pari a 18 m; n. 6 proiettori asimmetrici, con lampada al sodio ad alta pressione di tipo tubolare con potenza pari a 250 W (32000 lm).

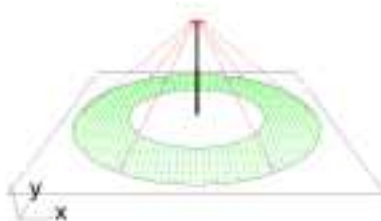


Figura 7-22 – Vista 3-D della torre faro con indicazione dei puntamenti dei proiettori

□ Risultati della verifica:

- Illuminamento medio:  $\bar{E} = 35.4$  lux;
- Uniformità generale:  $U_0 = 0.65$

□ Distribuzione illuminamento:

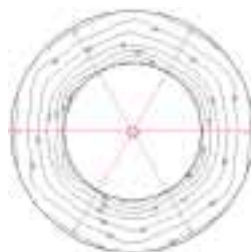


Figura 7-23 - Illuminamento sulla superficie – Curve isolux (lux)

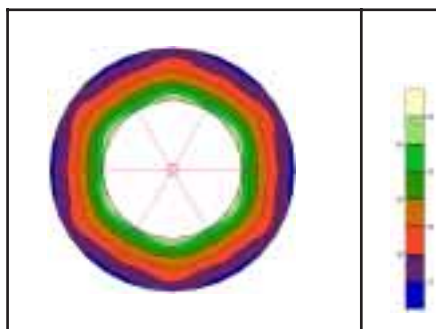


Figura 7-24 - Illuminamento sulla superficie – Bande isocolor (lux)



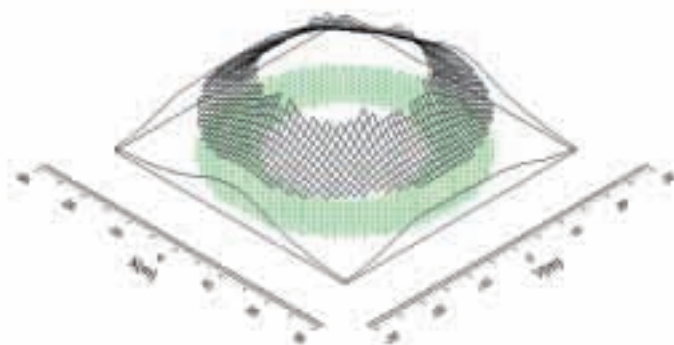


Figura 7-25 - Illuminamento sulla superficie – Grafico 3-D

A conclusione si segnala che modificando solo il tipo di lampada, ossia adottando proiettori con lampada da 400 W (55000 lm), si ottiene:

- Illuminamento medio:  $\bar{E} = 60.1 \text{ lux}$
- Uniformità generale:  $U_0 = 0.66$

Questi valori rispettano i requisiti illuminotecnici per rotatorie appartenenti alla classe  $C_0$ .

### **TAVOLE ALLEGATE**

Di seguito vengono elencate le tavole prodotte per l'esempio:

- ☐ Tavola 1: Planimetria dello stato di fatto;
- ☐ Tavola 2: Planimetria di progetto;
- ☐ Tavola 3: Caratteristiche geometriche;
- ☐ Tavola 4: Visibilità – Distanza d'arresto;
- ☐ Tavola 5: Visibilità dell'intersezione;
- ☐ Tavola 6: Visibilità – Fasce di rispetto;
- ☐ Tavola 7: Sezione tipologica;
- ☐ Tavola 8: Segnaletica.



## 8 APPENDICE

### 8.1 CHECK LIST DI CONTROLLO DA APPLICARE

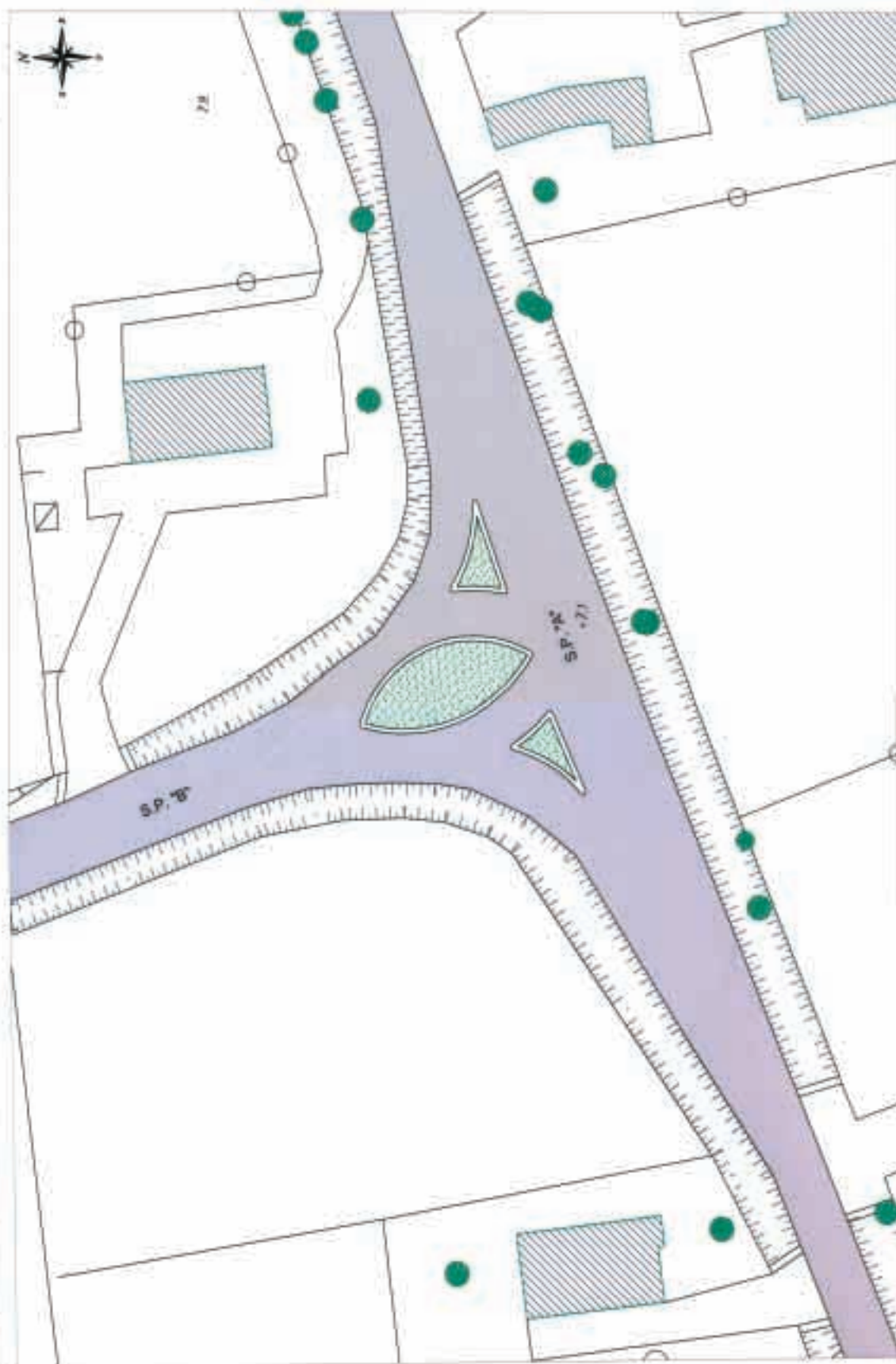
CHECK LIST DI CONTROLLO			
DESCRIZIONE		SI	NO
1	La soluzione a rotatoria risponde ai requisiti di fattibilità?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	È stata determinata l'ora di punta dell'area interessata dall'incrocio?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Sono stati stimati l'entità dei flussi e la distribuzione delle manovre di svolta per la costruzione della matrice O/D, riferita all'ora di punta?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Sono state eseguite tutte le verifiche sull'affidabilità dei flussi di traffico rilevati?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Le caratteristiche geometriche rispettano i valori minimi indicati?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	È necessario prevedere passaggi pedonali o attraversamenti ciclabili?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	È stata verificata per ogni entrata la deflessione delle traiettorie imposte dalla rotatoria?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	È stata verificata la capacità dei singoli ingressi? Le riserve di capacità ottenute sono sufficienti?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Il tasso di crescita del traffico sopportabile dalla rotatoria prima di raggiungere la congestione, è compatibile con la vita utile prevista per l'intervento?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Sono state effettuate tutte le verifiche di visuale libera da garantire?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	La pavimentazione adottata è idonea?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	La pendenza trasversale consente un adeguato smaltimento delle acque meteoriche?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	La segnaletica verticale e orizzontale è completa e adeguata?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	La rotatoria è sufficientemente illuminata e quindi facilmente riconoscibile da parte degli automobilisti in avvicinamento?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



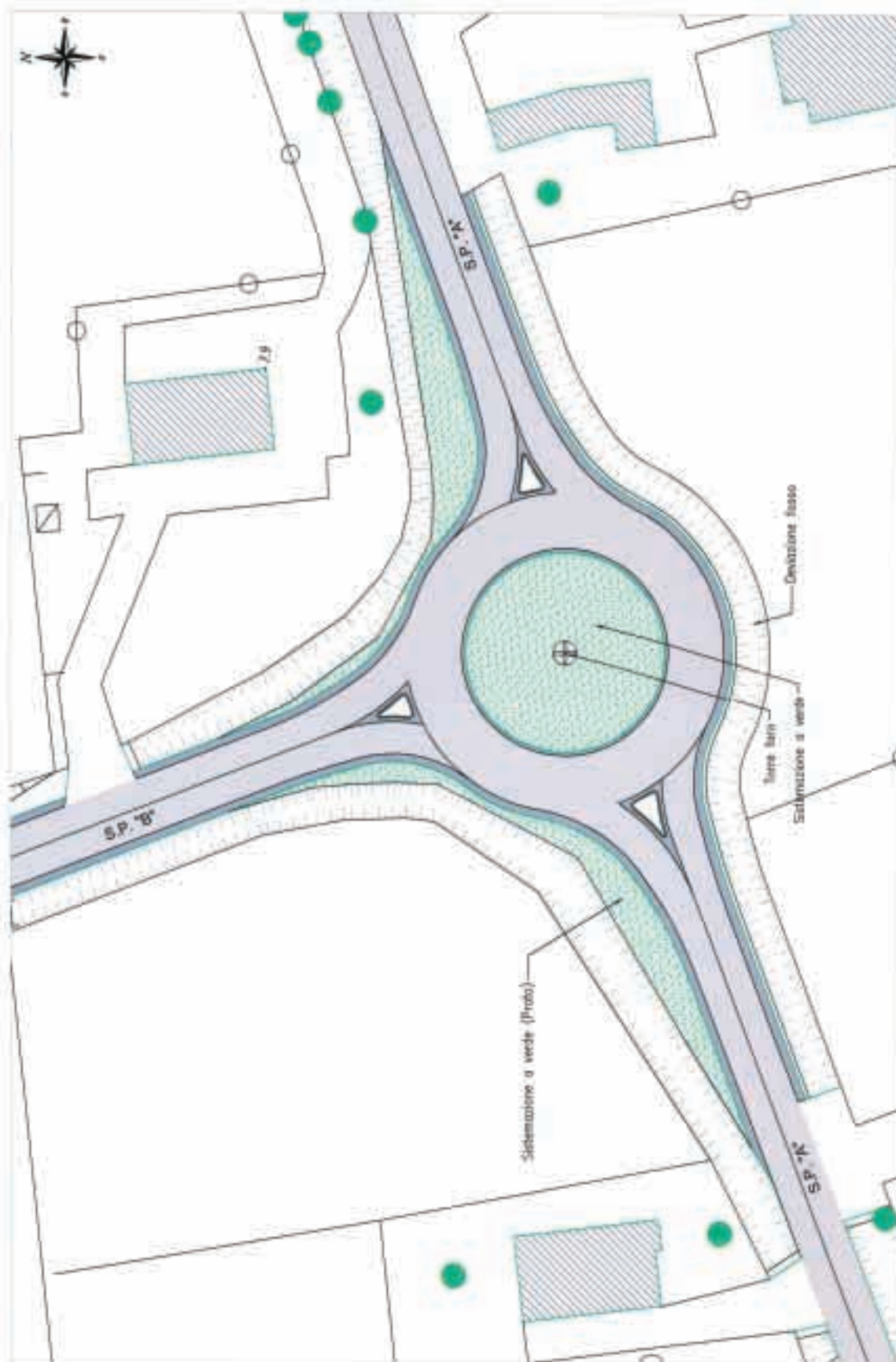
## 8.2 TAVOLE ESEMPLIFICATIVE



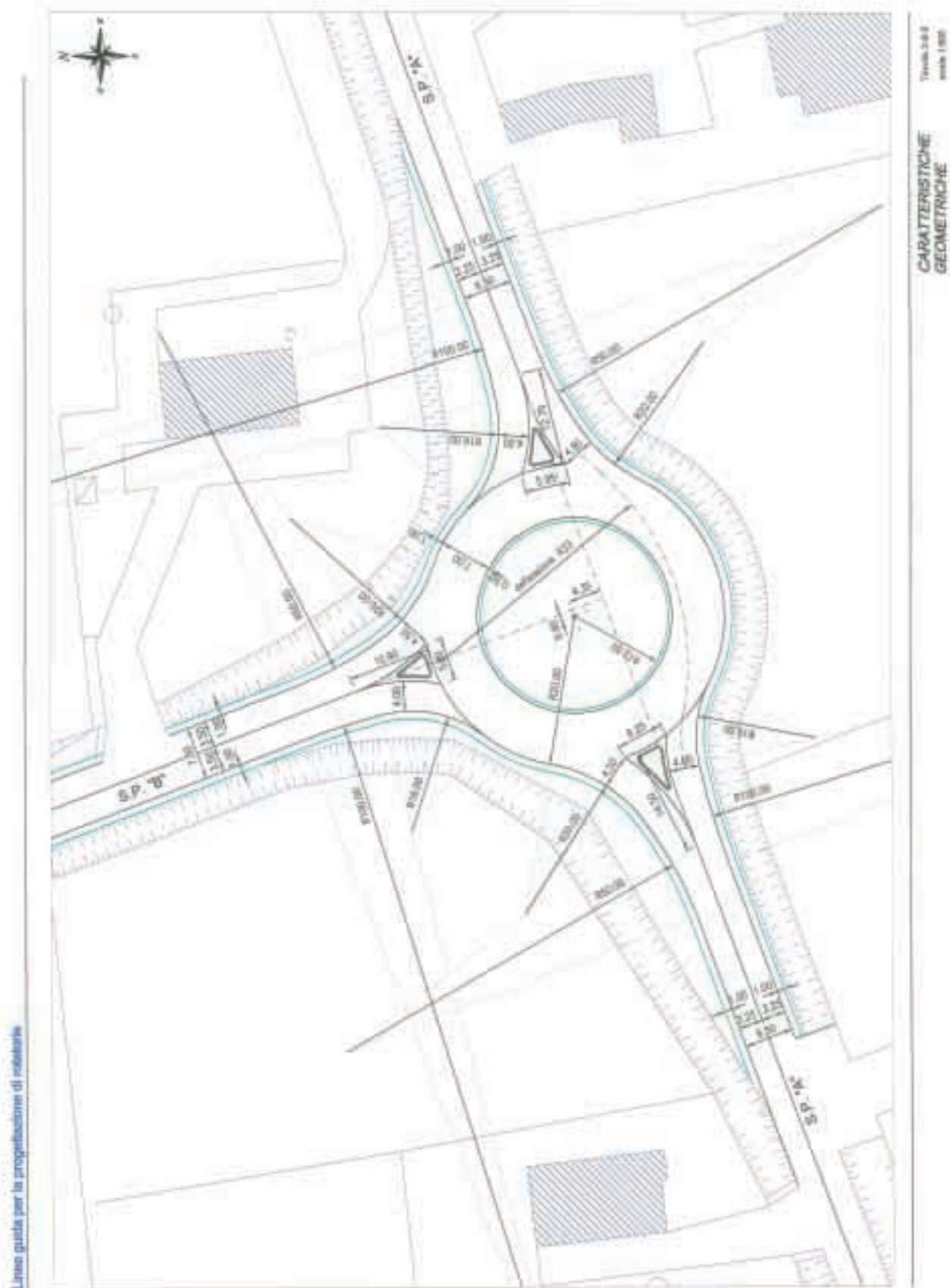
Linee guida per la progettazione di rotatorie



PLANIMETRIA  
DELLO STATO DI FATTO  
Tavola 1 di 1  
scala 1:500







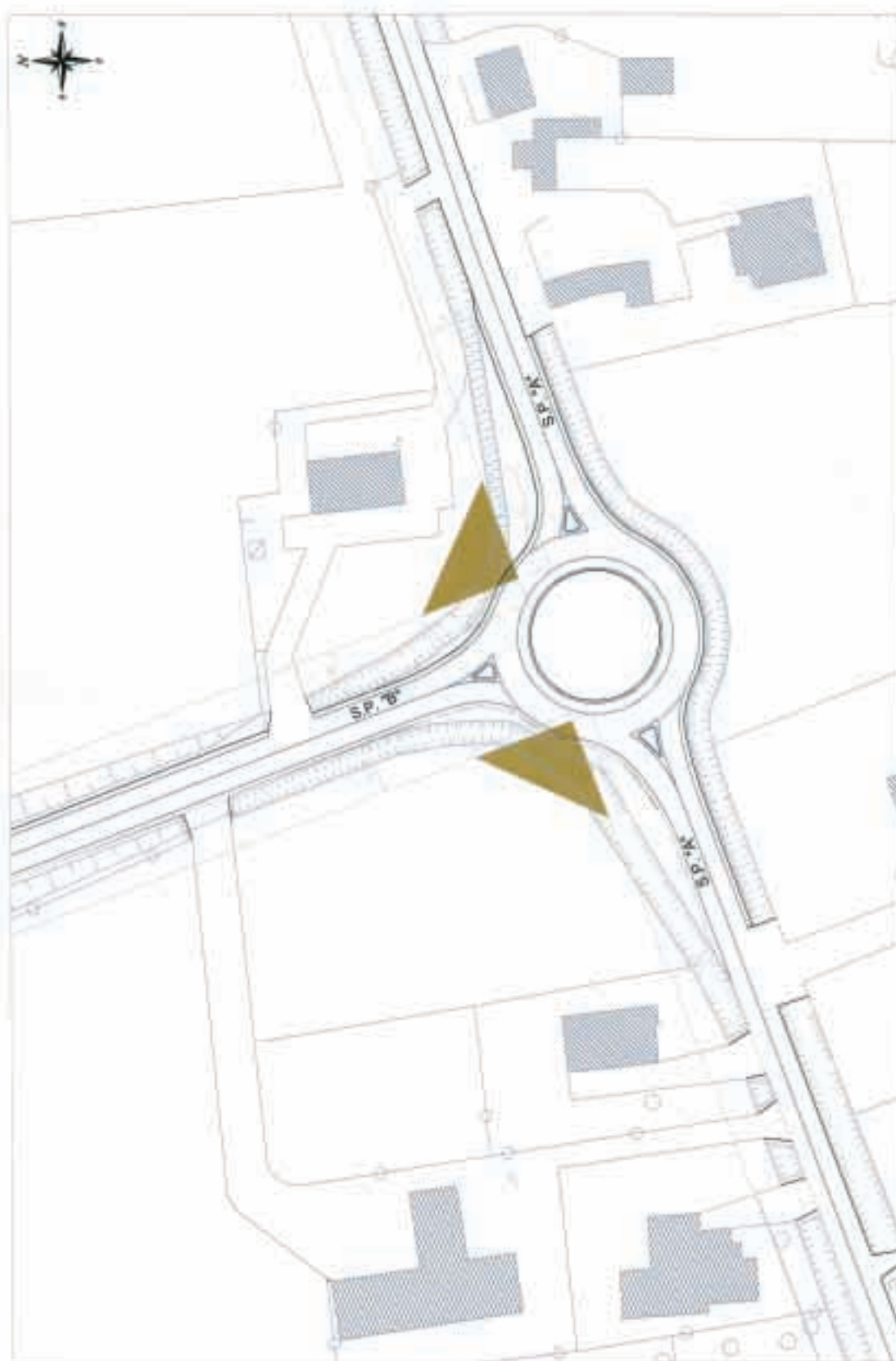








Linee guida per la progettazione di rotonde

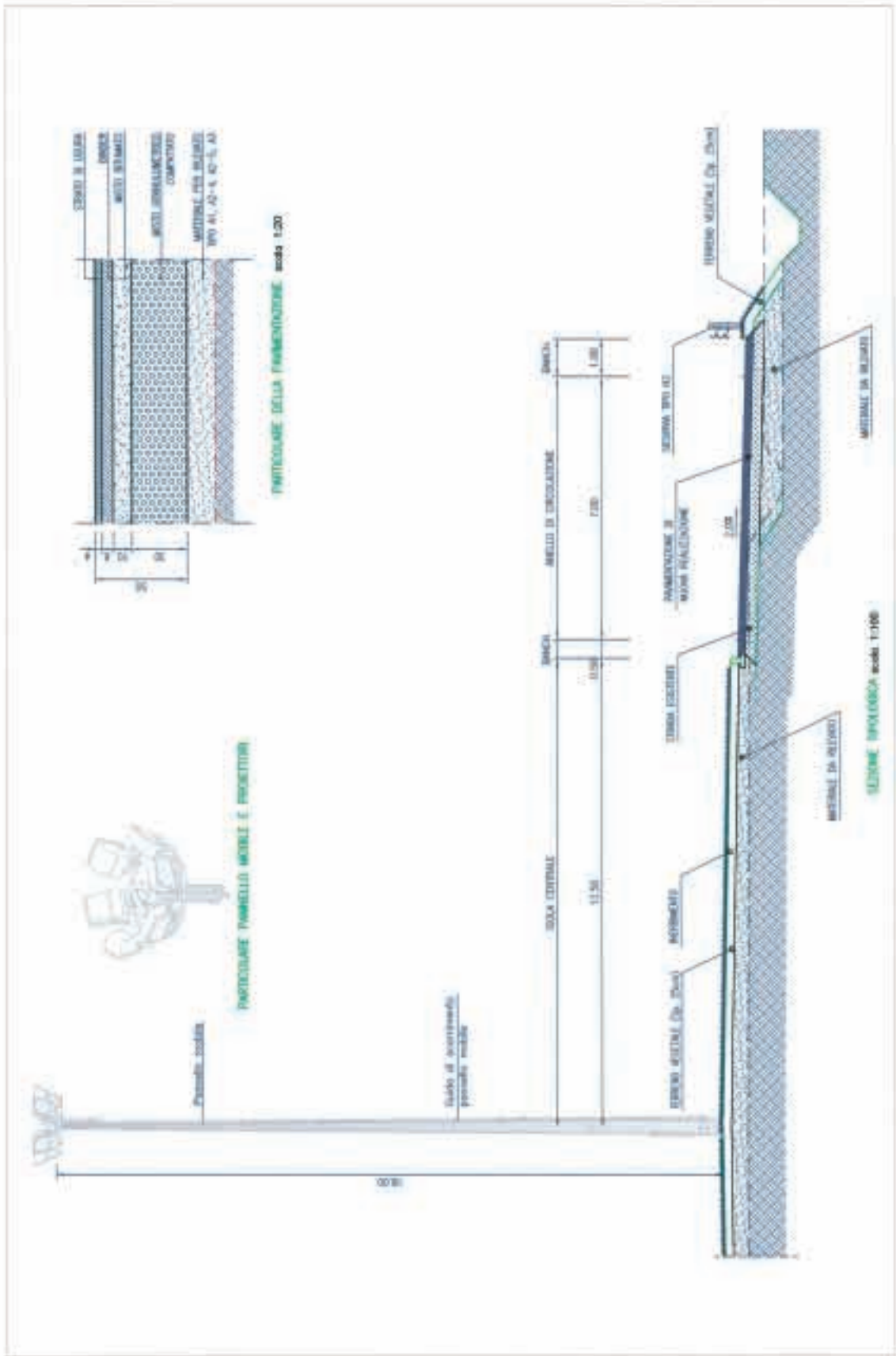


Scala 1:500

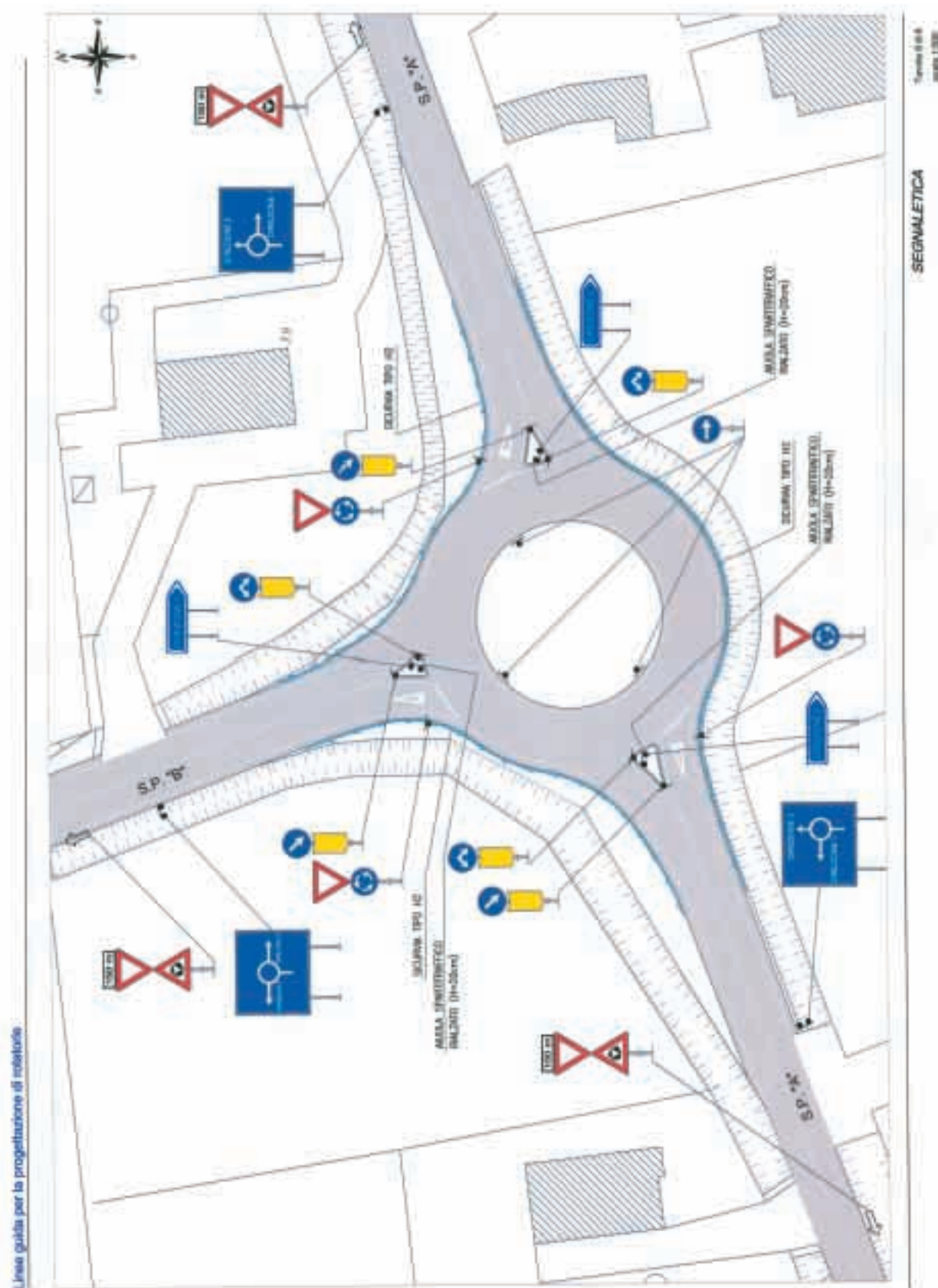
VISIBILITÀ  
FASCE DI RISPETTO



Linee guida per la progettazione di rotatorie



SEZIONE TIPOLOGICA Tavola 1 a 8





### 8.3 BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, D.M. 5 Novembre 2001 - *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade, 2001.*
- [2] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale (2001) - Studio a carattere prenormativo: *Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali, 10 Settembre 2001.*
- [3] CNR, (B.U. 90-1983), *Norme sulle caratteristiche geometriche e di traffico delle intersezioni stradali urbane*, Consiglio nazionale delle ricerche, B.U n. 90 / 1983.
- [4] D.L. 285-1992 (1992), *Nuovo Codice della strada*, Gazzetta ufficiale del 18/5/1992 e successive modifiche.
- [5] DPR 16 Dicembre 1992 n. 495, *Regolamento di esecuzione ed attuazione del Codice della strada*, Gazzetta ufficiale del 28/12/1992 e successive modifiche.
- [6] L. Polo, F. Bertan, V. Giambruni, *Manuale per la progettazione dei sistemi di sicurezza stradale e di moderazione del traffico*, Regione del Veneto, 2000.
- [7] R. Mauro, *Su alcune recenti acquisizioni in tema di incroci a rotatoria*, Trasporti e Trazione, 1995 (1<sup>a</sup> parte; 2<sup>a</sup> parte).
- [8] G. Di Giampietro, *La progettazione delle rotonde e delle intersezioni, con attenzione a sicurezza, efficienza e rispetto ambientale* – Dossier n. 7, 2001, Politecnico di Milano, DITec, 2001.
- [9] L. Mussone, *La distanza di visibilità nella progettazione delle intersezioni a rotatoria*, Strade & Autostrade 1-2003.
- [10] T. Esposito, R. Mauro, M. Cattani, *Un'analisi comparativa tra incroci semaforizzati e schemi a rotatoria*, Sistemi di Trasporto 4/2000.



- [11] T. Taekratok, *Modern roundabouts for Oregon*, June 1998, Oregon Department of Transportation.
- [12] U.S. Department of Transportation, *Roundabouts: an informational guide*, June 2000.
- [13] G. Tesoriere, *Strade Ferrovie Aeroporti Vol.1* UTET, Torino.
- [14] Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual 2000*, Washington, D.C. 2000.
- [15] Norma UNI 10439, *Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato*, (Seconda Edizione Luglio 2001).
- [16] Pubblicazione numero 115/1995 della Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic*.
- [17] AIDI (Associazione Italiana di Illuminazione), *Raccomandazioni per l'illuminazione pubblica* (1993).
- [18] Quaderno AIDI, *Corso base d'illuminazione per esterni* (1996).
- [19] TuttoNormel, *Impianti a Norme CEI – Illuminazione esterna* (1999).