



COMUNE DI SELARGIUS

PROVINCIA DI CAGLIARI

PROGETTO:

ADEGUAMENTO VIABILITA' VEICOLARE PER IL MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA DELLA CIRCOLAZIONE STRADALE, NEL TRATTO DELLA VIA NENNI COMPRESO TRA LA SS554 E LA VIA DELLE AZALEE

Progetto Definitivo

OGGETTO:

**RELAZIONE TECNICA
PER IL DIMENSIONAMENTO DELLA ROTATORIA**

COMMITTENTE:

**MD Immobiliare S.p.A.
Zona Industriale A.S.I. - Capannone 18 - Gricignano di Aversa (CE)**



Aerofoto Google Maps

TAVOLA

SCALA

B.01

DATA

Dicembre 2017

REV.	DATA	COMMENTO
REV.00	17.10.2017	PRIMA EMISSIONE
REV.01	28.12.2017	Rif. Richiesta Integrazioni Prot. A00.c.i580.17/11/2017.0041794

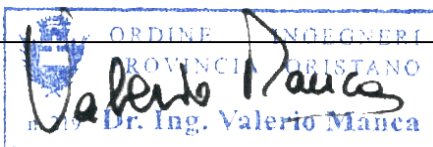
COD. DOCUMENTO: 116-16_REL_TEC_Rotatoria_Rev.06_28.12.2017.docx

IL PROGETTISTA

Ing. Valerio Manca

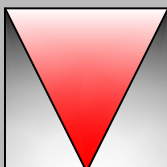
COLLABORATORI

Ing. Francesco Contini
Ing. Andrea Carta
Ing. Ilaria Firinu
Geom. Pierluigi Orrù



IL COMMITTENTE

MD IMMOBILIARE S.p.A.



**PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA E IMPIANTISTICA
STUDIO TECNICO ING. VALERIO MANCA**

Sede: VIA UMBRIA, 229 - 09170 - ORISTANO

Tel / Fax. +39 0783 359114 - Cell. +39 329 0522924

e-mail: valmanca@tiscali.it - g.mail: ing.v.manca@gmail.com

INDICE

1. Premessa.....	3
2. Introduzione sulle rotatorie	4
3. Riferimenti normativi e bibliografici per la progettazione stradale.....	6
4. Descrizione dell'intervento	7
5. Problematiche e obiettivi.....	9
5.1. <i>La deflessione della traiettoria</i>	9
5.2. <i>Fattori di esercizio</i>	10
5.3. <i>Fattori umani</i>	10
5.4. <i>Studi Prima-e-Dopo (B&A)</i>	11
5.5. <i>Incidentalità</i>	12
5.6. <i>Evidenza sperimentale</i>	12
6. I metodi disponibili per il calcolo della capacità delle rotatorie	13
7. Capacità semplice e totale	15
8. Il livello di servizio – LOS (Level Of Service) e la stima del 90° percentile della lunghezza media della coda.....	16
9. Dati di traffico	18
10. Calcolo di capacità e prestazioni secondo il metodo SETRA	20
11. Riserva di capacità	23
12. Conclusioni.....	24
13. Verifica di percorrenza della Rotatoria	25

1. Premessa

Durante lo svolgimento dei lavori di realizzazione di due Medie Strutture di Vendita lungo la via Nenni a Selargius, lavori autorizzati con provv. unico n.7 del 03.10.2016, prot. n.37438, in un lotto di terreno di proprietà della MD Immobiliare S.r.l., si è potuto osservare come le direttrici di traffico 554-Selargius e viceversa possano trovare intralcio a causa delle manovre di ingresso/uscita degli automezzi da/per il lotto MD.

Per evitare problemi alla circolazione stradale in un punto nevralgico della rete stradale dell'hinterland cagliaritano, l'Ufficio Tecnico – Area 5 - del Comune di Selargius, in una nota datata 05.10.2017 inviata alla MD Immobiliare S.p.A., invita la titolare dell'intervento edilizio a riesaminare la situazione del traffico in quell'area, mettendo in conto anche una possibile una variazione della sede stradale per consentire lo smaltimento dei maggiori flussi veicolari in piena sicurezza.

In conseguenza di ciò, il sottoscritto ing. VALERIO MANCA, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Oristano al n.219, titolare dell'incarico per la progettazione e la direzione lavori dell'intervento edilizio sopra citato, ha studiato le possibili modifiche da introdurre nella circolazione stradale ed ha ritenuto che la più idonea ed ottimale preveda la realizzazione di una **rotatoria** all'intersezione della via Nenni con la via delle Azalee - che porta al centro abitato di Monserrato – e con uno stradello in terra battuta che porta ad alcune attività artigianali.

La presente relazione tecnica, redatta in base ai flussi di traffico rilevati sul posto, definisce le dimensioni che deve avere tale rotatoria per assolvere al compito di indirizzamento e smaltimento in piena sicurezza del traffico veicolare.

2. Introduzione sulle rotatorie

La rotatoria è un tipo di sistemazione delle intersezioni a raso, costituita da un anello nel quale confluiscono i bracci dell'intersezione; l'anello viene percorso dal flusso proveniente da ciascun braccio nel tratto compreso tra la sezione di immissione di quest'ultimo e quella del braccio di uscita.



Figura 1 : esempio di progetto rotatoria (fonte: <http://www.paradisola.it>)

I veicoli circolanti nell'anello hanno la precedenza rispetto a quelli che devono ancora impegnare l'intersezione: in questo modo, nessuna strada ha la priorità sulle altre e tutti i veicoli sono costretti a rallentare in prossimità dell'intersezione. La rotatoria è pertanto particolarmente idonea in quelle situazioni in cui le strade sono dello stesso livello gerarchico.

Le rotatorie possono essere adottate nei casi in cui vi siano spazi sufficienti per il loro inserimento e i flussi di traffico non risultino così elevati da produrre inaccettabili code di ingresso.

Va precisato che le rotatorie sono misure che interessano la viabilità principale e, al più, quella di quartiere; dunque esse riguardano soprattutto la viabilità esterna agli ambiti residenziali delle "zone 30". Tuttavia esse, ormai, sono entrate a far parte della manualistica che si occupa di moderazione del traffico in ragione della loro efficacia in termini sia di sicurezza, sia di fluidificazione del traffico.

Le rotatorie hanno molteplici finalità:

- aumentare la sicurezza alle intersezioni, costringendo tutti i veicoli a rallentare e, all'occorrenza, a fermarsi in prossimità della rotatoria, e forzandoli a percorrere una traiettoria non rettilinea;
- rendere la circolazione veicolare più fluida, in particolare fra strade dello stesso livello gerarchico, permettendo di eliminare i semafori alle intersezioni;
- evidenziare la presenza di un'intersezione, interrompendo la linearità visiva delle strade rettilinee.

In particolare l'obiettivo della fluidificazione del traffico ha finito per risultare prevalente, specie là dove la rotatoria consente di eliminare la regolazione semaforica. Va tuttavia subito osservato che spesso questo

obiettivo, specie in Italia, ha messo in ombra la finalità di agevolare la mobilità debole costituita da pedoni e da ciclisti. Infatti, se la rotatoria non viene progettata con grande attenzione agli attraversamenti pedonali e ciclabili, rischia di dimostrarsi più rischiosa dell'attraversamento semaforico proprio per l'utenza debole: questo errore va assolutamente evitato in generale e, a maggior ragione, negli ambiti residenziali interessati dalla strategia delle "zone 30".

3. Riferimenti normativi e bibliografici per la progettazione stradale

- ✓ D.M. 19.04.2006 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali”
- ✓ D.M. 05.11.2001 n. 5 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”
- ✓ Studio prenormativo (settembre 2001) “Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali”
- ✓ “Direttiva sulla corretta ed uniforme applicazione delle norme del codice della strada in materia di segnaletica e criteri per l'installazione e la manutenzione” 24.10.2000
- ✓ D.M. 30.11.1999, n. 557 “Regolamento recante norme per la definizione delle caratteristiche tecniche delle piste ciclabili”
- ✓ D.P.R. 24-7-1996 n. 503 “Regolamento recante norme per l'eliminazione delle barriere architettoniche negli edifici, spazi e servizi pubblici”
- ✓ D.L.vo 30.04.1992 n. 285 “Nuovo codice della strada”
- ✓ D.P.R. 16.12.1992 n. 495 “Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo Codice della Strada”
- ✓ D.M. 14.06.1989 n. 236 "Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l'accessibilità, l'adattabilità e la visitabilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica sovvenzionata e agevolata, ai fini del superamento e dell'eliminazione delle barriere architettoniche"
- ✓ Pratelli A. (2013) “WIT Series on Transport Systems & Traffic Engineering”, WIT Press
- ✓ Pratelli A. (2007) "Ingegneria dei Sistemi di Trasporto. (II ed.)", Pitagora Editrice
- ✓ Maternini prof. ing. Giulio, Foini ing. Silvia, Bonometti ing. Vincenzo, Cappelli prof. ing. Agostino, Caracoglia prof. ing. Sergio, Crisman prof. ing. Bruno, Custer arch. Lorenzo, Dondi prof. ing. Giulio, Ignaccolo prof. ing. Matteo, Maja prof. ing. Roberto, Pratelli prof. ing. Antonio (2006) *L"e intersezioni stradali a raso - Linee guida per la progettazione e la gestione ai sensi del DM 19.4.2006, n. 1699"* Egaf edizioni
- ✓ Linee guida NISS 2.14 “Le rotatorie” - Regione Piemonte – Piano regionale della Sicurezza Stradale
- ✓ Canale S., Distefano N., Leonardi S., Pappalardo G. (2011) “ Progettare le rotatorie. Tecniche per la progettazione e la verifica delle intersezioni a circolazione rotatoria secondo il D.M. 19/04/2006 ” EPC Editrice

4. Descrizione dell'intervento

L'intervento in oggetto è finalizzato a migliorare la sicurezza e la transitabilità, in termini di fluidità del traffico e di riduzione dei fenomeni di congestione, all'intersezione tra:

- **Via Nenni (provenienze dalla S.S. 554)**
- **Via Delle Azalee**
- **Via Nenni (provenienze da Selargius)**
- **Stradello in terra battuta**

attraverso una ridefinizione dell'intersezione presente.

Le caratteristiche della nuova rotatoria di progetto sono quelle definite dal Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 05.11.2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" e quelle definite dal D.M. 19.04.2006.

In progetto viene prevista una rotatoria con **diametro esterno di 24 m**, che è classificata tra le **MINI ROTATORIE**, ovvero **rotatorie con diametro esterno compreso tra 14 e 25 m**.

Il Decreto Ministeriale 19.04.2006 considera infatti tre tipologie fondamentali di rotatorie in base al diametro della circonferenza esterna (limite della corona rotatoria):

- rotatorie convenzionali con diametro esterno compreso tra 40 e 50 m;
- rotatorie compatte con diametro esterno compreso tra 25 e 40 m;
- mini rotatorie con diametro esterno compreso tra 14 e 25 m.

Per sistemazioni con "circolazione rotatoria" che non rientrano nelle tipologie su esposte, il dimensionamento e la composizione geometrica debbono essere definiti con il principio dei tronchi di scambio tra due bracci contigui. In questi casi le immissioni devono essere organizzate con appositi dispositivi. Un ulteriore elemento distintivo tra le tre tipologie fondamentali di attrezzatura rotatoria è rappresentato dalla sistemazione dell'isola circolare centrale, che può essere resa in parte transitabile per le manovre dei veicoli pesanti, nel caso di mini-rotatorie con diametro esterno compreso fra 25 e 18 m, mentre lo diventa completamente per quelle con diametro compreso fra 18 e 14 m; le rotatorie compatte sono invece caratterizzate da bordure non sormontabili dell'isola centrale.

In base alla classificazione delle intersezioni riportata nel capitolo 3, in ambito extraurbano l'adozione di mini rotatorie viene limitata agli incroci tipo F/F tra strade locali, mentre le rotatorie compatte sono consentite per gli incroci tipo C/C, C/F, F/C.

Un'intersezione stradale risolta a rotatoria va accompagnata da strumenti di regolazione della velocità nei rami di approccio, ipotizzando l'arresto del veicolo nei punti di ingresso, e sviluppando tutte le conseguenti verifiche di visibilità.

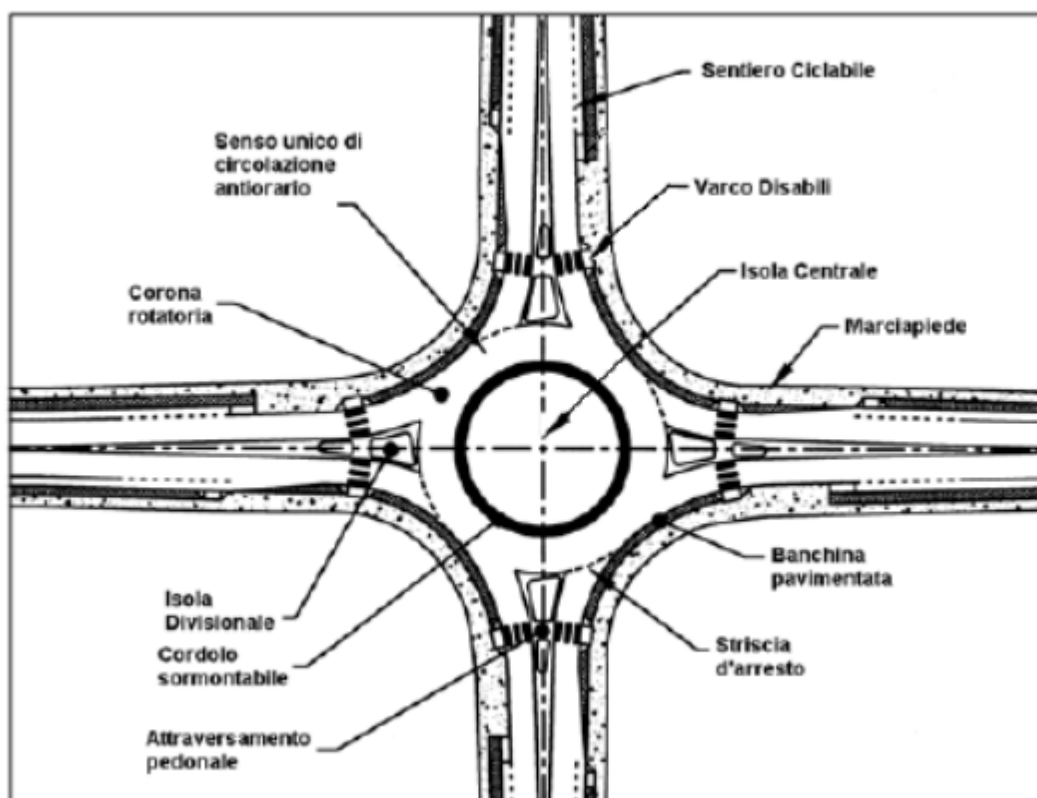


Figura 2 : Figura 10 di cui al DM 19/04/2006

Con riferimento alla Figura 10 di cui al DM 19/04/2006 sopra riportata, si definiscono le larghezze degli elementi modulari delle rotonde, secondo quanto indicato nella Tabella 9, sempre del DM 19/04/2006, sotto riportata.

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

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

(**) organizzati al massimo con due corsie.

Figura 3 – Tabella 9 del DM 19/04/2006

5. Problematiche e obiettivi

La generale riconosciuta maggiore sicurezza delle rotatorie, comprovata da numerosi studi statistici, può essere messa in relazione ad una serie di fattori di progettazione, di esercizio e al comportamento dei conducenti, ovvero a fattori umani, spesso correlati.

Con l'inserimento di una regolazione a rotatoria per l'intersezione delle correnti veicolari in questione è possibile facilitare le manovre di svolta e ridurre nel complesso i tempi di attesa, da cui ne deriva la possibilità di garantire una sostanziale riduzione del livello di inquinamento atmosferico ed acustico.

I vantaggi derivanti dal trasformare un preesistente incrocio lineare a raso con una rotatoria possono schematicamente riassumersi in:

- miglioramento della sicurezza grazie all'eliminazione dei punti di conflitto secanti ed alla riduzione delle velocità in transito,
- aumento della capacità in generale in quanto un incrocio a rotatoria con precedenza all'anello offre una maggiore capacità rispetto allo stesso incrocio con obbligo di Stop grazie alla riduzione dei punti di conflitto e alla riduzione di velocità,
- riduzione dei tempi di attesa in quanto l'intersezione viene utilizzata in modo continuo senza interruzione dei flussi di transito,
- riduzione delle emissioni sonore grazie alla continuità delle manovre di scambio tra anello e accesso, per cui il passaggio sull'incrocio è caratterizzato da velocità inferiori con limitate ed occasionali frenate brusche e accelerazioni tempestive,
- riduzione delle emissioni inquinanti con riduzioni dei gas di scarico e di consumo di benzina poiché di fatto vengono limitate le forti accelerazione ed i tempi di attesa propri di una intersezione a "T".

5.1. La deflessione della traiettoria

La deflessione delle traiettorie costringe i veicoli a ridurre la loro velocità, determinando sia una minore probabilità degli incidenti sia una minore gravità degli stessi.

Il fatto che in rotatoria i veicoli marcano a basse velocità relative rende la guida più semplice e meno rischiosa.

La circolazione in rotatoria riduce il numero dei punti di conflitto. Le isole spartitraffico alle entrate allontanano i punti di conflitto tra le correnti veicolari in manovra.

Nel caso di intersezione a T di tipo lineare si hanno 9 punti di conflitto, mentre per una rotatoria a quattro rami si contano 8 punti di conflitto, che scendono a 6 soltanto per una a tre rami.

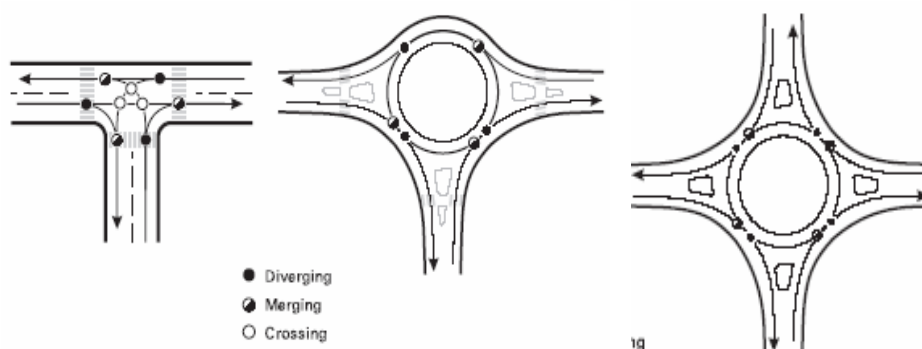


Figura 4 : Punti di conflitto veicolare in un incrocio a T a raso lineare (9 punti), in una rotatoria a tre rami (6 punti) ed in una rotatoria a quattro rami (8 punti).

5.2. Fattori di esercizio

La circolazione a senso unico nell'anello, l'obbligo di dare la precedenza imposto ai veicoli in entrata ed il minor numero di punti di conflitto rende più semplice il controllo della guida per i conducenti. Il conducente che sta per entrare in rotatoria deve guardare a sinistra per controllare soltanto di avere un gap accettabile a disposizione nel flusso che percorre l'anello. Le manovre di intreccio avvengono solamente in caso di rotatorie molto grandi e con anelli a più corsie, comunque semplificate dalle ridotte velocità relative.

5.3. Fattori umani

I minori tempi di attesa ad una rotatoria rispetto a quelli di una intersezione a raso o controllata da semaforo, diminuiscono lo stress di guida del conducente. Le basse velocità relative e la conduzione del veicolo su traiettorie curve, portano il conducente ad una maggiore attenzione alla guida. In una situazione di induzione alla moderazione della velocità e di attenzione alle precedenze i conducenti risultano meno aggressivi e più responsabili delle loro azioni che non in un semaforo, dove già l'aver il verde che assicura la via libera induce un senso di potere ed una sorta di autorizzazione all'essere veloci per prendersi un qualcosa che "spetta di diritto".¹

<i>Intersection Type</i>	<i>Change in Total Crashes after Conversion</i>	<i>Change in Severe Injury after Conversion</i>
All four-way intersections	- 35%	- 76%
Two-Way Stop Controlled Urban	- 72%	- 87%
Two-Way Stop Controlled Suburban	- 32%	- 71%
Two-Way Stop Controlled Rural	- 29%	- 81%

Tabella 1 : Variazioni percentuali di incidentalità in intersezioni a raso in ambito urbano, suburbano ed extraurbano dopo la loro trasformazione a rotatoria registrate negli Stati Uniti su 55 siti diversi (da NCHRP, "Roundabouts in the United States", Report n.572, 2006).

¹Vedi anche "Guide Suisse des Giratoires", VSS, Lausanne 1991.

<i>Intersection Type</i>	<i>Accident rate per year</i>
Ordinary four-way intersections	0,24
Signalized junctions	0,16
Roundabouts	0,04

Tabella 2 : Tassi annuali di incidentalità registrati nelle intersezioni della Norvegia (da Blakstad F., “Accident rates on road and junctions in Norway”, 1987, citato in NCHRP Synthesis 264, 1998).

5.4. Studi Prima-e-Dopo (B&A)

Gli studi di tipo Prima-e-Dopo, o B&A, riguardano l’osservazione sperimentale dell’incidentalità in casi in cui una intersezione a raso, con Stop ovvero con semaforo, è stata convertita in una rotatoria.

Nella letteratura tecnica corrente sono disponibili molti studi di questo tipo e qui ci si limita necessariamente a fare riferimento solo ad alcuni di essi, per quanto comunque significativi perché relativi all’Europa.²

Danimarca : uno studio sulla conversione a rotatoria di intersezioni libere a precedenza, tanto in ambito urbano quanto extraurbano, ha rilevato:

- una riduzione dell’85% degli incidenti con feriti;
- il numero medio dei feriti per incidente è passato da 2,1 ad 1,25;
- la percentuale media di incidenti gravi, anche con morti, passa dal 9,2÷7,8% dei semafori a due o tre fasi al 4,2% delle rotatorie a due corsie.

Francia : dati statistici raccolti su 83 siti rilevano che la conversione a rotatoria dell’intersezione ha determinato:

- 78% di riduzione degli incidenti con feriti;
- 82% di riduzione degli incidenti con morti.

Germania : una ricerca condotta dal prof. Brilon dell’Università di Bochum su 32 casi di conversione a rotatoria di intersezioni controllate da Stop o precedenza ha registrato:

- il 40% in meno nella frequenza degli incidenti;
- il 90% in meno degli incidenti con feriti gravi;
- l’88% in meno degli incidenti con feriti leggeri;
- l’87% in meno di incidenti con solo danni alle cose.

Olanda : nel 1990 il SWOV, un istituto di ricerca olandese, pubblica i risultati di una indagine su 201 rotatorie costruite al posto di intersezioni libere a precedenza:

- 47% in meno di incidenti in generale;
- 71% in meno di incidenti con morti.

²per gli Stati Uniti maggiori riferimenti si trovano in NCHRP web-only Document 94: “ *Appendixes to NCHRP Report 572: Roundabouts in the United States* ”, 2006).

5.5. Incidentalità

Esistono molte analisi di incidentalità che rilevano i tassi di incidentalità su intersezioni libere o semaforizzate e su rotatorie. Tutte queste analisi pervengono al risultato che i valori del numero di incidenti per anno registrati sulle rotatorie sono i più bassi. Si riportano qui di seguito alcune evidenze sperimentali.

Danimarca: il numero di incidenti per anno statisticamente registrato sulle rotatorie è di 0,04 contro un valore di 0,16 incidenti per anno - quattro volte di più - delle intersezioni controllate da semaforo.

Australia: una ricerca condotta nella regione di Victoria negli anni '80 trova un tasso di 0,57 incidenti gravi per anno per rotatoria, contro il maggior valore trovato di 0,90 di incidenti gravi per anno per intersezione semaforizzata.

Regno Unito: già nel 1982³ la Road Construction Authority perveniva alle seguenti valutazioni:

- trasformare una intersezione libera in una controllata da semaforo riduce il tasso medio di incidenti da 3,4 a 1,5 incidenti ogni 10 milioni di veicoli entranti, con un decremento del 55%;
- trasformare una intersezione libera in una rotatoria riduce il tasso medio di incidenti da 3,4 a 0,8 per ogni 10 milioni di veicoli entranti, con un decremento del 76%.

5.6. Evidenza sperimentale

Dai paragrafi precedenti risulta evidente che, nella generalità dei casi e per realizzazioni conformi alle Normative, le rotatorie mostrano requisiti di sicurezza della circolazione superiori alle intersezioni semaforizzate ed ancor più alti rispetto a quelle libere con stop o precedenza.

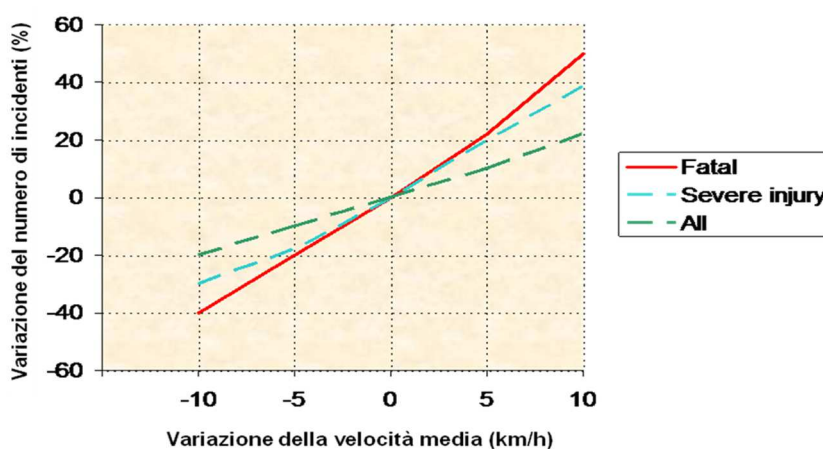


Figura 5 : Grafico della variazione della tipologia di incidenti al variare della velocità (tratto dal Progetto Europeo “Master”, Rapporto Finale, 1998)

Questo non vuol dire che le altre tipologie di intersezione non devono essere realizzate, ma semmai che ogni caso specifico va attentamente valutato all'interno del sistema viario in cui è inserito ed alla luce di requisiti tecnici di giustificata fattibilità.

³Si ricorda che nel Regno Unito la regola di precedenza nell'anello caratteristica delle moderne rotatorie è stata adottata a partire dalla metà degli anni Sessanta.

6. I metodi disponibili per il calcolo della capacità delle rotatorie

Per il calcolo della capacità delle rotatorie con precedenza ai veicoli circolanti nell'anello sono disponibili vari metodi, sia empirici che teorici.

I metodi **empirici** consistono nell'osservazione di rotatorie in esercizio, o appositamente costruite per effettuare tali studi, e nella conseguente deduzione di correlazioni tra flussi di traffico, elementi geometrici e quindi capacità delle rotatorie stesse, utilizzando tecniche di regressione.

I metodi **teorici** invece si basano sul cosiddetto intervallo critico; ogni guidatore infatti, prima di effettuare la manovra di immissione in rotatoria, attende di avere un GAP, ovvero un distanziamento temporale (intervallo critico) che considera sufficiente tra due successivi veicoli che circolano nell'anello. Analizzando il comportamento degli utenti e la distribuzione dei distanziamenti tra i veicoli circolanti sull'anello si calcola l'intervallo critico.

Tra i metodi **EMPIRICI** più utilizzati e conosciuti ricordiamo:

- il metodo di **Kimber**, sviluppato in Gran Bretagna negli anni '70 da un gruppo di ricercatori del TRR Laboratory guidati appunto da Kimber, considera ogni ingresso in rotatoria come un'intersezione a T i cui rami sono percorsi a senso unico e calcola la capacità dell'entrata C_e utilizzando per il calcolo il solo flusso circolante Q_c in corrispondenza dell'entrata stessa ed alcune caratteristiche geometriche;

SIMBOLO	SIGNIFICATO	VALORI OSSERVATI	VALORI RACCOMANDATI
e	Larghezza entrata	3.6 - 16.5 m	4 - 15 m
v	Larghezza corsia	1.9 - 12.5 m	2 - 7.3 m
L'	Lunghezza svasatura	> 1 m	1 - 100 m
S	Snellezza svasatura	0 - 2.9 m	
D	Diametro cerchio inscritto	13.5 - 171 m	15 - 100 m
Φ	Angolo entrata	0 - 77°	10 - 60°
r	Raggio curvatura entrata	> 3.4 m	6 - 100 m

- il metodo proposto dalla **Normativa Svizzera** nella "Guide Suisse des Giratoires" del 1991 per le rotatorie compatte (diametro D tra i 25 e i 40 m) tiene conto invece dei seguenti parametri:

- γ in funzione del numero di corsie in ingresso,

γ	corsie in ingresso
1	1
0,6 - 0,7	2

- Q_d flusso di disturbo per il calcolo del quale entra in gioco sia il flusso in uscita Q_s che quello Q_c circolante nell'anello,

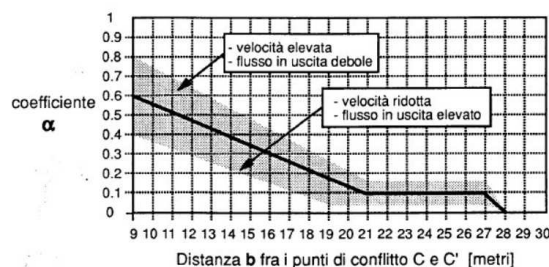
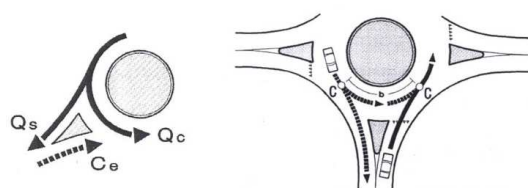


Figura 6 : parametri del metodo Svizzero

- parametro di impedenza α per il flusso in uscita che dipende dalla distanza b tra i punti di conflitto C e C' delle traiettorie in uscita e in entrata (e quindi dalla dimensione dell'isola spartitraffico) e dalla velocità di transito nell'anello,
- β che tiene conto del numero di corsie nell'anello;

β	Corsie nell'anello
0,9 - 1,0	1
0,6 - 0,8	2
0,5 - 0,6	3

- il metodo francese del **SETRA** (Service d'Études Techniques des Route et Autoroutes), messo a punto nel 1987 in base ad una campagna di indagine su 17 **rotatorie extraurbane**, che per il calcolo della capacità tiene conto non solo del flusso circolante Q_c in corrispondenza dell'entrata e del flusso entrante Q_e , ma anche del flusso Q_u che esce dall'uscita immediatamente precedente, oltre ai seguenti parametri geometrici:

- SEP = larghezza dell'isola spartitraffico all'estremità del braccio,
- ANN = larghezza dell'anello in m,
- ENT = larghezza in m della corsia di ingresso, misurata dietro il primo veicolo fermo all'altezza della linea del "dare precedenza", cioè a circa 6 metri dalla linea stessa;

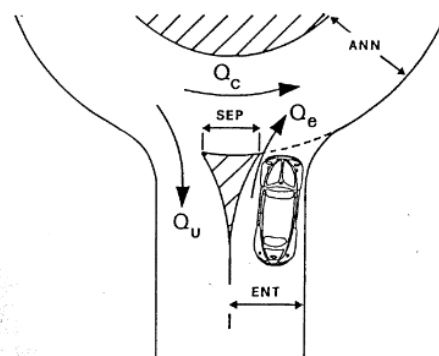


Figura 7 : parametri geometrici del metodo SETRA

- il metodo francese del **CETUR**, proposto a fine anni '90 dal Centre d'Études sur les Réseaux, les Transport, l'Urbanisme et les constructions publiques, è basato sullo studio di alcune **rotatorie urbane compatte** con diametri compresi tra i 30 e i 70 metri, tiene conto, nel calcolo della capacità, del flusso di disturbo Q_d (funzione del flusso circolante Q_c e del flusso uscente Q_u) e dei seguenti parametri:

- γ che varia in funzione del numero di corsie in ingresso,

γ	Corsie in ingresso
1	1
1,5	≥ 2

- b che varia in funzione del diametro della rotatoria D e della larghezza dell'anello ANN,

b	larghezza anello ANN	diametro D
1	< 8 m	
0,9	>= 8 m	< 40 m
0,7	>= 8 m	>= 40 m

Il metodo **TEORICO** più noto è senza dubbio quello dell' **HCM** (Highway Capacity Manual), nella versione prima del 2000 e poi del **2010**, che non si basa sui parametri geometrici della rotatoria, ma sul cosiddetto intervallo critico; ogni conducente infatti, prima di effettuare la manovra di immissione in rotatoria, attende di avere un GAP, ovvero un distanziamento temporale (intervallo critico) che considera sufficiente tra due successivi veicoli che circolano nell'anello. Analizzando il comportamento degli utenti e la distribuzione dei distanziamenti tra i veicoli circolanti sull'anello si calcola l'intervallo critico.

HCM2010 fornisce le indicazioni per il calcolo sia della capacità della rotatoria che del Livello di Servizio (LOS) che della lunghezza della coda. Trattandosi però di un metodo basato sull'osservazione del gap minimo accettato dagli utenti, per utilizzarlo in aree geografiche diverse sarebbe necessario rimodularlo sulle abitudini e sui comportamenti dei conducenti locali. Ricordiamo in tal senso il lavoro condotto in collaborazione tra Università di Pisa e 'Università del Kentucky “ **Gap acceptance parameters for HCM 2010 roundabout capacity model applications in Italy** ” di A. Gazzarri, M.T. Martello, A. Pratelli, R.R. Souleyrette. Tale studio ha permesso di ricalibrare sulla Toscana del Nord il modello HCM per il calcolo della capacità della rotatoria.

7. Capacità semplice e totale

La **capacità dell'entrata Ci** si riferisce al singolo ramo ed è il diretto output dei modelli di calcolo della capacità; fornisce il più piccolo valore del flusso sul ramo di ingresso i che determina la presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi.

A partire da tali valori di capacità possono valutarsi due indici prestazionali della rotatoria nel suo insieme:

- la capacità semplice,
- la capacità totale.

La **capacità semplice** è la somma della capacità d'entrata dei rami afferenti la rotatoria, allorché, per un **aumento uniforme** dei flussi della matrice O/D, **uno** dei rami risulta in condizioni di saturazione. Individua quindi quel valore di flusso massimo che si può avere in entrata da ciascun ramo nell'istante in cui **uno** di essi si satura.

La **capacità totale** è la somma delle capacità d'entrata dei rami afferenti la rotatoria, allorché, per un **aumento uniforme** dei flussi della matrice O/D, **tutti** i rami risultano in condizioni di saturazione. Rispetto ad un dato scenario di ripartizione del traffico, rappresenta la somma dei valori dei flussi entranti da ogni ramo e che **simultaneamente** determinano la saturazione dei rami stessi (capacità semplice di ogni ramo). Quindi è la sommatoria dei valori di capacità semplice nell'ipotesi che questi vengano raggiunti contemporaneamente ed è una misura sintetica delle condizioni limite della rotatoria a smaltire il traffico quando ad ognuno degli accessi sono presenti code.

8. Il livello di servizio – LOS (Level Of Service) e la stima del 90° percentile della lunghezza media della coda

La definizione operativa di livello di servizio LOS per le rotatorie è associata al **ritardo** (delay), ovvero ai tempi di attesa in ingresso. I livelli sono distinti da sei lettere, da A a F, in ordine decrescente di qualità di circolazione. I limiti di separazione tra i livelli A e B, D ed E, E ed F segnano, rispettivamente, il passaggio del deflusso da **libero** a stabile, da **stabile** ad instabile e da **instabile** a **forzato**.

In generale le condizioni di marcia dei veicoli ai vari LOS sono definibili come segue:

- A - gli utenti non subiscono interferenze alla propria marcia, hanno elevate possibilità di scelta delle velocità desiderate (*libere*); il comfort è notevole.
- B - la più alta densità rispetto a quella del livello A comincia ad essere avvertita dai conducenti che subiscono lievi condizionamenti alle libertà di manovra ed al mantenimento delle velocità desiderate; il comfort è discreto.
- C - le libertà di marcia dei singoli veicoli sono significativamente influenzate dalle mutue interferenze che limitano la scelta delle velocità e le manovre all'interno della corrente; il comfort è definibile modesto.
- D - è caratterizzato da alte densità ma ancora da stabilità di deflusso; velocità e libertà di manovra sono fortemente condizionate; modesti incrementi di domanda possono creare problemi di regolarità di marcia; il comfort è basso.
- E - rappresenta condizioni di deflusso che comprendono, come limite inferiore, la capacità; le velocità medie dei singoli veicoli sono modeste (circa metà di quelle del livello A) e pressoché uniformi; non c'è praticamente possibilità di manovra entro la corrente; il moto è instabile perché piccoli incrementi di domanda o modesti disturbi (rallentamenti, ad esempio) non possono più essere facilmente riassorbiti da decrementi di velocità e si innesca così la congestione; il comfort è bassissimo.
- F - il flusso è forzato: tale condizione si verifica allorché la domanda di traffico supera la capacità di smaltimento della sezione stradale utile (ad es. per temporanei restringimenti dovuti ad incidenti o manutenzioni) per cui si hanno code di lunghezza crescente, bassissime velocità di deflusso, frequenti arresti del moto, in un processo ciclico di stop-and-go caratteristico della marcia in colonna in condizioni di instabilità; non esiste comfort.

Confrontando i tempi di attesa in ingresso (delay) coi valori della tabella 17.2 del Manuale HCM2000 per le intersezioni non semaforizzate, ovvero la tabella 21-1 del manuale HCM 2010, si ottengono i corrispondenti livelli di servizio.

EXHIBIT 17-2. LEVEL-OF-SERVICE CRITERIA FOR TWSC INTERSECTIONS

Level of Service	Average Control Delay (s/veh)
A	0-10
B	> 10-15
C	> 15-25
D	> 25-35
E	> 35-50
F	> 50

Figura 8 : LOS secondo il Manuale HCM2000 e HCM 2010 per flussi in ingresso inferiori alla capacità, altrimenti LoS = F

Servendosi del tempo di attesa medio, determinato separatamente per ciascuna entrata, si può determinare il livello di servizio facendo riferimento anche alla tabella sottostante (estratta dalla Norma Svizzera SNV 640022) in cui sono riportati dei valori limite; il livello di servizio F non si determina servendosi del tempo d'attesa medio, bensì si ha tale livello quando il flusso in ingresso supera la capacità. Il braccio che presenta il livello di servizio più basso è determinante per l'intera rotatoria.

Livello di servizio	Tempo d'attesa medio
A	≤ 10 s
B	≤ 15 s
C	≤ 25 s
D	≤ 45 s
E	> 45 s
F	flusso in ingresso superiore alla capacità

Figura 9 : LOS secondo la Norma Svizzera SNV 640022

In funzione del ritardo d (delay) calcolato, per le rotatorie, come indicato nell'equazione 21-17 del manuale HCM 2010, è possibile ricavare il 95° percentile L_{95} della lunghezza della coda (espresso in numero di veicoli), come indicato, sempre nel manuale HCM 2010, nell'equazione 21-20. Moltiplicando tale valore per 6 si ottiene il corrispondente valore in metri.

La lunghezza media in metri della coda per ciascun ramo di ingresso invece è ricavabile in funzione non solo del delay d ma anche dei flussi entranti Q_e nella rotatoria:

$$L_{med} (m) = 6 * Q_e * d / 3600$$

Per ottenere lo stesso dato in numero di veicoli sarà necessario dividere per 6, quindi avremo che:

$$L_{med} (veic) = L_{med}(m) / 6$$

Alternativamente, sono stati ricavati dal SETRA i diagrammi seguenti, nei quali sono riportati rispettivamente i tempi medi di attesa e il 90° percentile della lunghezza della coda su un braccio di rotatoria in funzione del traffico di disturbo Q_d sull'anello e per diversi valori del flusso entrante equivalente Q'_e .

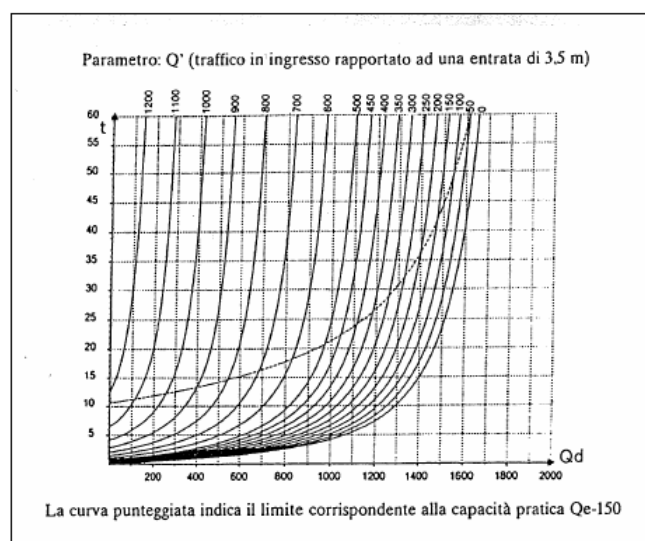


Figura 10 : Tempi medi di attesa su un braccio di rotatoria (in sec)

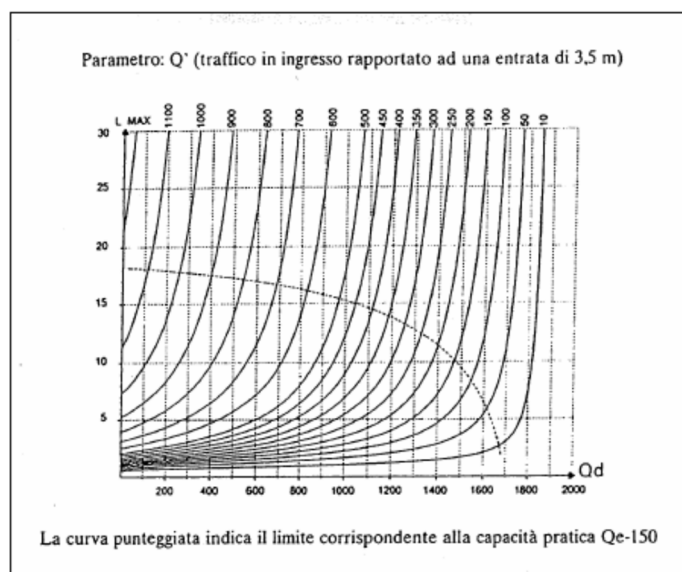


Figura 11 : Percentuale del numero di veicoli in attesa su un braccio di rotatoria

9. Dati di traffico

Il calcolo di verifica delle caratteristiche di capacità e di prestazione della rotatoria proposta in progetto è stato condotto sulla base di uno scenario di traffico risultante dai dati misurati in un giorno feriale tipo.

L'ora più critica risulta individuata nel periodo Agosto/Settembre 2017 del giorno 20 Agosto 2017.

La capacità e i flussi sono misurati in autovetture equivalenti per ora (eph), valutati per periodi di rilevazione di 15 minuti (quindi $T=0,25$ per il calcolo di L95 secondo HCM 2010), tramite i coefficienti di conversione proposti dalle Norme Svizzere.

Tipo di veicolo	Coefficiente di conversione
1 ciclo o motociclo sull'anello	0.8 autovetture
1 ciclo o motociclo in ingresso	0.2 autovetture
1 veicolo pesante	2.0 autovetture
1 autobus	2.0 autovetture

Figura 12 : Coefficienti di conversione in eph

I flussi orari rilevati allo stato attuale (in riferimento al periodo di punta) sono così distribuiti:

SCHEMA FLUSSI NUOVA ROTATORIA - SELARGIUS (CA)

PV MD e PV Risp. Casa

Rilevazioni del 2012 maggiorate del 25%		INGRESSO		Uscita su Ramo 1	Uscita su Ramo 2	Uscita su Ramo 3	Uscita su Ramo 4		USCITA
Via Nenni da SS554	Ramo 1	685		120	1	563	1		685
Via Delle Azalee	Ramo 2	120		60	20	39	1		120
Via Nenni da SELARGIUS	Ramo 3	735		719	15	0	1		735
Stradello	Ramo 4	230		0	20	210	0		230
		1770							1770

N.B. Flussi veicolari (espressi in Veicoli Equivalenti) da SS554 a Via NENNI e da Via NENNI a SS554, rilevati nell'Ottobre 2012 e maggiorati del 25%, più Nr. 150 vei/h MD e Nr. 200 vei/h Risp.Casa.

Sono stati utilizzati i flussi maggiori incrociando differenti orari al fine di analizzare la situazione maggiormente critica.

I 150 vei/h MD sono stati distribuiti: 40 da SS554, 100 da Selargius e 10 da Via Delle Azalee

I 200 vei/h Risp.Casa sono stati distribuiti: 80 da SS554, 110 da Selargius e 10 da Via Delle Azalee

Autoveicoli 1 Veicolo Equivalente
Mezzi Pesanti (> 3,5 tonn) 2 Veicoli Equivalenti

10. Calcolo di capacità e prestazioni secondo il metodo SETRA

L'algoritmo inizia con l'inserimento della matrice di distribuzione dei flussi di traffico:

Ramo 1	120	1	563	1
Ramo 2	60	20	39	1
Ramo 3	735	15	0	1
Ramo 4	0	20	210	0

A partire dalla matrice di distribuzione del traffico otteniamo due vettori:

- quello dei flussi circolanti davanti ad ogni ramo

R.1	265
R.2	894
R.3	202
R.4	950

- e quello dei flussi uscenti, sempre da ogni ramo:

R.1	915
R.2	56
R.3	812
R.4	3

A questo punto entrano in gioco i parametri geometrici richiesti dal modello, ovvero:

- la larghezza ANN dell'anello in metri: 7,00
- la larghezza SEP in m di ciascuna delle isole spartitraffico poste all'estremità dei bracci di ingresso:

R.1	4,46
R.2	3,95
R.3	3,49
R.4	4,42

- la larghezza ENT in m delle semicarreggiate dei bracci, misurate dietro il primo veicolo fermo all'altezza della linea del "dare precedenza":

R.1	5,85
R.2	3,50
R.3	3,50
R.4	3,50

Si può adesso introdurre la formula della capacità entrante suggerita dal metodo SETRA

$$\text{Centr} = (1330 - 0,7 Q_d) [1 + 0,1 * (\text{ENT} - 3,5)] \quad (\text{veic/h})$$

dove **Qd** è il flusso di disturbo, che dipende da **SEP**, da **ANN**, dal flusso uscente **Qu** e dal flusso circolante **Qc**,

ottenendo il vettore delle **capacità entranti** da ogni ramo:

R.1	991,940
R.2	630,119
R.3	861,098
R.4	607,404

Si passa adesso al calcolo della **capacità semplice della rotatoria**. Si premette la definizione che è la seguente: si definisce capacità semplice di una rotatoria, rispetto ad un dato scenario di ripartizione dei flussi di traffico, quel valore di flusso massimo che si può avere in entrata da ciascun ramo al momento che per uno di questi si ha l'inizio della congestione.

Dalla formula $\delta Q_{entr} = (1330 - 0,7 \delta Q_d) [1 + 0,1 * (ENT - 3,5)]$ si ricava il valore di δ per ognuno dei rami della rotatoria,

R.1	1,38399
R.2	1,57366
R.3	1,14572
R.4	1,37585

il più piccolo dei δ trovati, ovvero il δ minimo che individua la capacità semplice, è: 1.14572

La **capacità semplice** della rotatoria si calcola come prodotto di δ per il vettore dei flussi entranti:

R.1	784,82
R.2	137,487
R.3	860,438
R.4	263,516

Il passo successivo è il calcolo della **capacità totale della rotatoria**, la cui definizione è la seguente: si definisce capacità totale della rotatoria, rispetto ad un dato scenario di ripartizione dei flussi di traffico, la somma dei valori dei flussi entranti da ogni ramo che simultaneamente determinano la congestione dei rami stessi.

Il calcolo viene svolto iterativamente (metodo di Gauss-Seidel) calcolando la capacità con la formula

$$Centr = (1330 - 0,7 Q_d) [1 + 0,1 * (ENT - 3,5)]$$

e inizializzando l'algoritmo ponendo il vettore capacità uguale a quello dei flussi entranti.

Per il calcolo iterativo sviluppato con il metodo di *Gauss-Seidel* va inoltre imposto un test di arresto.

$$\text{Test di arresto:} \quad \frac{1}{4} \sum (|C_{k+1} - C_k| / C_k) < \varepsilon \text{ con } \varepsilon = 1\%$$

Alla fine del calcolo iterativo, ovvero dopo 5 iterazioni, abbiamo ottenuto il **vettore capacità totale** corrispondente all'ultima iterazione effettuata:

R.1	618,585
R.2	393,443
R.3	583,910
R.4	603,823

e sommando gli elementi del vettore si ottiene il valore della **Capacità totale della rotatoria**

2200,76

La prima entrata ad andare in congestione è Via Nenni da Selargius ed i tempi di attesa per l'ingresso in rotonda dai singoli rami sono (valori espressi in sec):

R.1	14,7583
R.2	8,00446
R.3	29,4562
R.4	11,3867

che confrontati coi valori della tabella 17.2 del Manuale HCM2000 o HCM2010 per le intersezioni non semaforizzate, forniscono i seguenti livelli di servizio:

Livello di servizio: B

Livello di servizio: A

Livello di servizio: D

Livello di servizio: B

Il vettore del 95° percentile della distribuzione della lunghezza delle coda è, in veicoli, per i vari rami di ingresso (**calcolato secondo il metodo HCM 2010**) :

R.1	5,81407
R.2	0,698075
R.3	11,2566
R.4	1,76244

e quindi il vettore del 95° percentile della distribuzione della lunghezza delle coda in metri risulta essere:

R.1	2,80818
R.2	0,266815
R.3	6,1449
R.4	0,727482

mentre il vettore della lunghezza media della coda è, in veicoli, per i vari rami di ingresso:

R.1	34,8844
R.2	4,18845
R.3	67,5393
R.4	10,5746

e in metri:

R.1	16,8491
R.2	1,60089
R.3	36,8694
R.4	4,36489

11. Riserva di capacità

La differenza tra la Capacità dell'entrata **Ce** e il flusso in ingresso **Qe** è definita **RISERVA DI CAPACITA' Rc** dell'entrata.

Il valore di **Rc** dovrebbe essere compreso tra il 20% e l'80%.

Se $5\% < Rc < 25\%$ occorre fare attenzione ai tempi di attesa e alla lunghezza delle code, se $Rc < 5\%$ allora sono da temere gravi malfunzionamenti.

Viceversa un valore troppo elevato di **Rc** su un'entrata principale deve indurre a pensare se la sua larghezza non sia sovradimensionata o se il numero delle corsie non sia maggiore del necessario. Se **Rc** è elevata su tutte le entrate si può arrivare a ridurre la larghezza dell'anello.

Rc (%)	Condizione di esercizio
> 30%	Fluida
compresa tra il 15% e il 30%	Soddisfacente
compresa tra il 0% e il 15%	Aleatoria
< 0%	Critica

Figura 13 : Riserva di capacità e condizione di esercizio

Nel caso specifico si hanno i seguenti valori di **Riserva di capacità Rc** e le seguenti condizioni di esercizio:

Rami	Riserva di capacità'	Condizione
Via Nenni da SS554	30.9%	Fluida
Via Delle Azalee	81%	Fluida
Via Nenni da Selargius	12.8%	Aleatoria
Stradello	62.1%	Fluida

12. Conclusioni

Gli scenari di traffico individuati a base della simulazione hanno permesso di verificare la soddisfazione o meno dei requisiti di capacità e prestazione rispetto a situazioni tipiche dei periodi di punta del traffico.

Il risultato finale è una rotatoria avente le seguenti caratteristiche:

- diametro del cerchio inscritto: 24 m;
- larghezza dell'anello: 7 m;
- numero di corsie nell'anello: 2 ;
- numero di corsie in ingresso:

Ramo della rotatoria	Numero di corsie
Via Nenni da SS554	2
Via Delle Azalee	1
Via Nenni da Selargius	1
Stradello	1

La verifica della rotatoria, effettuata con il metodo Metodo SETRA è

completamente soddisfatta in quanto la capacità semplice è sempre maggiore dei flussi entranti:

CAPACITA' SEMPLICE		FLUSSI ENTRANTI
784.82	>	685
137.487	>	120
860.438	>	751
263.516	>	230

e la capacità totale è maggiore della somma dei flussi entranti in rotatoria:

CAPACITA' TOTALE		SOMMA FLUSSI ENTRANTI
2199.76	>	1786

13. Verifica di percorrenza della Rotatoria

Per quanto riguarda la verifica di percorrenza della Rotatoria, si rimanda agli Schemi Grafici riportati nella Tav. 13 e riportiamo sotto lo schema di calcolo che restituisce gli Elementi di verifica della Traiettoria di un mezzo pesante articolato e della sua Fascia di Ingombro (spazzata).

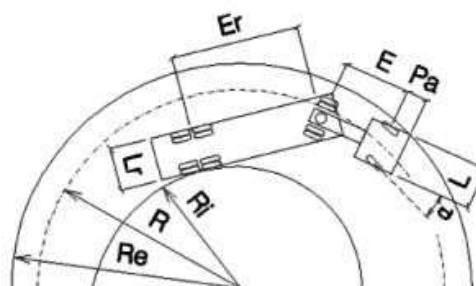
VERIFICA TRAIETTORIA CIRCOLARE AUTOARTICOLATO

GEOMETRIA DEL VEICOLO

Pa = Sbalzo anteriore (m)	1.41
E = Interasse Ruota/Raila (m)	3.13
Er = Interasse Ralla/Semirimorchio (m)	7.66
L = Larghezza Trattore (m)	2.50
L = Larghezza Semirimorchio (m)	2.60

VARIABILE

Raggio Esterno	12.00
----------------	-------



RISULTATI

Raggio Interno	$R_i = \sqrt{\left(\sqrt{R_e^2 - (E + Pa)^2} - \frac{L}{2}\right)^2 - E^2 + E^2 - \frac{L}{2}} = 4.905$
Raggio di sterzata	$R = \sqrt{\left(\sqrt{R_e^2 - (E + Pa)^2} - \frac{L}{2}\right)^2 + E^2} = 10.343$
Angolo di sterzata	$\alpha = \arcsin\left(\frac{E}{R}\right) = 17.615$
Angolo Trattore-Rimorchio	$\beta = \arctan\left(\frac{E_r}{R_i + L_r/2}\right) + \arctan\left(\frac{P_r}{\sqrt{R^2 - E^2}}\right) = 50.989$
Larghezza spazzata	Re-Ri = 7.094

Figura 13 : Traiettoria dell'Autoarticolato e Fascia di Ingombro (spazzata)

Oristano, li 28/12/2017

Il Tecnico

