

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA CALABRIA

Dipartimento di Pianificazione territoriale

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



Dipartimento di PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

Vincenzo Gallelli

INTERSEZIONI STRADALI A RASO IN AMBITO URBANO ED
EXTRAURBANO: IMPIEGO DELLO SCHEMA A ROTATORIA.
RICERCA E DEFINIZIONE DI MODELLI INTERPRETATIVI DELLA
CAPACITÀ NELLA REALTÀ LOCALE

Dottorato di Ricerca in:

Tecnologie e Pianificazione Ambientale (XX Ciclo)

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE ICAR/04

Tutor

Prof. Gian Franco Capiluppi

Coordinatore

Prof. Sergio d'Elia

Anno Accademico 2007/2008

Dedico questo lavoro alla persona che mi è stata più vicina
in questi tre anni, il mio amore *Josephine*,
ringraziandola di tutte le volte che ha dovuto sopportare i miei problemi.

Ringrazio tanto anche i miei tutor, il *Prof. Capiluppi* e l'*Ing. Vaiana*
perché mi hanno saputo guidare nei momenti più difficili.

Ringrazio anche *Alessandro* e *Piero*
perché sono stati per me degli amici sinceri.

E ringrazio infine tutti coloro che mi hanno dato una mano e conforto
in questi ultimi anni, in particolare la mia famiglia,
i miei genitori, mia sorella, ma anche Totò e Teresa.

INDICE

INDICE	I
INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1.	
INTERSEZIONI STRADALI CON SOLUZIONE A ROTATORIA: PANORAMICA INTERNAZIONALE SUGLI STANDARD GEOMETRICI	
1.1. Generalità	5
1.2. Classificazione secondo le norme italiane	7
1.2.1. Elementi planimetrici di una rotatoria	10
1.2.2. Posizionamento dei bracci	10
1.2.3. Diametro esterno e corona giratoria	12
1.2.4. Velocità di progetto di una rotatoria e raggi di deflessione	14
1.2.5. Isola centrale	17
1.2.6. Entrate	19
1.2.7. Uscite	21
1.2.8. Isole divisionali	22
1.2.9. Tabella riassuntiva	24
1.2.10. Coerenza cinematica delle traiettorie curvilinee e raggi critici	25
1.3. Classificazione secondo le norme americane	28
1.3.1. Mini rotatorie	29
1.3.2. Rotatorie urbane compatte	30
1.3.3. Rotatorie urbane a singola corsia	31
1.3.4. Rotatorie urbane a doppia corsia	32
1.3.5. Rotatorie extraurbane a singola corsia	33
1.3.6. Rotatorie extraurbane a doppia corsia	34
1.4. Classificazione secondo le norme svizzere	35
1.5. Classificazione secondo le norme francesi	40
1.5.1. Le grandi rotatorie	42
1.5.2. Le rotatorie compatte	43
1.5.3. Le mini rotatorie	45
1.6. Classificazione secondo le norme inglesi	46
1.7. Classificazione secondo le norme tedesche	46
1.7.1. Le mini rotatorie	50
1.7.2. Le rotatorie compatte a singola corsia	52
1.7.3. Le rotatorie compatte a doppia corsia	54

1.7.4. Le grandi rotatorie	55
1.8. Bibliografia specifica del Capitolo 1.	57

CAPITOLO 2.

LE ROTATORIE COME STRUMENTO DI MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA INTRINSECA DI UNA INTERSEZIONE

2.1. Introduzione	59
2.1.1. I conflitti tra i veicoli	60
2.1.2. I conflitti tra i veicoli ed i pedoni	64
2.1.3. I conflitti tra i veicoli ed i ciclisti	65
2.2. Confronto tra incidentalità in rotatoria ed intersezioni classiche	68
2.2.1. Statistiche d'incidentalità negli Stati Uniti	69
2.2.2. Statistiche d'incidentalità in Olanda	71
2.2.3. Statistiche d'incidentalità in Australia	72
2.2.4. Statistiche d'incidentalità in Germania	73
2.2.5. Statistiche d'incidentalità in Inghilterra	74
2.2.6. Statistiche d'incidentalità in Francia	75
2.2.7. Statistiche d'incidentalità in Svizzera	77
2.2.8. Statistiche d'incidentalità in Italia	78
2.2.9. Altre statistiche d'incidentalità	79
2.3. I modelli di stima dell'incidentalità in rotatoria	80
2.3.1. Il modello di Maycock ed Hall	80
2.3.1.1. Urti tra veicoli entranti e circolanti	81
2.3.1.2. Urti in entrata	81
2.3.1.3. Urti relativi ai veicoli isolati	82
2.3.1.4. Altre tipologie di urti veicolari	82
2.3.1.5. Urti tra veicoli e pedoni	83
2.3.1.6. Definizione dei parametri geometrici del modello	83
2.3.2. Il modello di Arndt e Troutbeck	86
2.3.2.1. Incidenti relativi al veicolo isolato	89
2.3.2.2. Tamponamenti in corrispondenza degli accessi	89
2.3.2.3. Incidenti tra veicoli entranti e circolanti	90
2.3.2.4. Incidenti tra veicoli circolanti ed uscenti	91
2.3.2.5. Incidenti dovuti ad urti laterali	92
2.3.2.6. Altri incidenti veicolari	93
2.3.3. Il modello di Harper	93
2.3.3.1. Modelli con flussi di conflitto	95
2.3.3.2. Modelli con flussi di conflitto e variabili geometriche	96
2.3.3.2.a. Incidenti totali	97
2.3.3.2.b. Incidenti tra veicoli entranti e circolanti	97
2.3.3.2.c. Incidenti per strisciamento laterale	98
2.3.3.2.d. Incidenti con coinvolgimento di pedoni	98
2.3.3.3. Modelli basati sul prodotto dei flussi sui rami	99
2.3.3.3.a. Rotatorie a quattro bracci	100

2.3.3.3.b. Rotatorie a tre bracci	100
2.4. La rotatoria come strumento di “traffic calming”	100
2.5. Altri aspetti dell’uso dello schema a rotatoria	108
2.6. Bibliografia specifica del Capitolo 2.	113

CAPITOLO 3.

GLI STANDARD PRESTAZIONALI DI UNA ROTATORIA: STIMA DELLE CAPACITÀ, DELLE CODE E DEI RITARDI SECONDO LE PRINCIPALI NORMATIVE INTERNAZIONALI

3.1. Introduzione	116
3.2. La metodologia francesi	123
3.2.1. La metodologia del SETRA	123
3.2.2. La metodologia del CETUR	129
3.2.3. La metodologia del Girabase	130
3.3. La metodologia tedesca dell’HBS 2001	132
3.4. La metodologia americana dell’HCM 2000	138
3.5. La metodologia inglese del TRRL	145
3.6. La metodologia svizzera del Guide Suisse	151
3.7. La metodologia australiana dell’AUSTROADS	155
3.8. La metodologia svedese del CAPCAL	166
3.9. Influenza del transito pedonale sulla capacità degli ingressi	170
3.9.1. La formulazione di Marlow e Maycock	171
3.9.2. La formulazione di Brilon, Stuwe e Drews	175
3.9.3. La formulazione del CETE dell’Ouest	177
3.10. Confronto fra le varie metodologie di calcolo della capacità	178
3.11. Fenomeni d’attesa in stato stazionario ed in stato transitorio	182
3.11.1. Alcuni richiami sull’analisi probabilistica delle file d’attesa	183
3.11.1.1. Alcuni risultati per le intersezioni non semaforizzate	185
3.11.1.2. Arrivi al braccio poissoniani e tempi di servizio esponenziali	187
3.11.1.3. Arrivi al braccio poissoniani e tempi di servizio deterministici	188
3.11.1.4. Considerazioni conclusive	189
3.11.2. Analisi deterministica delle file d’attesa	190
3.11.2.1. Considerazioni conclusive	193
3.11.3. Soluzioni tempo-dipendenti e fenomeni d’attesa	194
3.11.3.1. Soluzioni tempo-dipendenti generalizzate	197
3.11.3.2. Considerazioni conclusive	198
3.12. Bibliografia specifica del Capitolo 3.	199

CAPITOLO 4.

GLI STANDARD PRESTAZIONALI DI UNA ROTATORIA: APPLICAZIONE DELLE PRINCIPALI FORMULAZIONI INTERNAZIONALI DI CAPACITÀ A CASI DI STUDIO

4.1. Introduzione	202
-------------------	-----

4.2. Il caso di studio: la rotatoria di Cosenza Nord	203
4.2.1. La metodologia di rilievo	206
4.2.2. Analisi dei dati di capacità ottenuti	209
4.2.3. Studio dei tempi medi di servizio e dei ritardi	214
4.2.4. Analisi della lunghezza delle code	220
4.3. Il caso di studio: la rotatoria di Mottola	224
4.3.1. La metodologia di rilievo	226
4.3.2. Analisi dei dati di capacità ottenuti	229
4.3.3. Studio dei tempi medi di servizio e dei ritardi	234
4.3.4. Analisi della lunghezza delle code	240
4.4. Conclusioni	244
4.5. Bibliografia specifica del Capitolo 4.	246
CAPITOLO 5.	
LA MICROSIMULAZIONE COME STRUMENTO PER L'ANALISI PRESTAZIONALE DI UNA ROTATORIA	
5.1. Introduzione	249
5.2. Il software di microsimulazione VISSIM	253
5.2.1. Il modello comportamentale di Wiedemann	255
5.2.2. Velocità d'approccio, velocità sull'anello e zone di riduzione della velocità	257
5.2.3. Regole di precedenza	259
5.2.4. Assegnazione dinamica del traffico	261
5.3. Definizione dei parametri per la campagna di simulazione	262
5.3.1. La distribuzione e l'assegnazione dinamica dei flussi di traffico	263
5.3.2. L'implementazione delle regole di circolazione	268
5.3.2.1. Velocità d'approccio agli ingressi	269
5.3.2.2. Zone di riduzione della velocità	271
5.3.2.3. Velocità di percorrenza della corona giratoria	274
5.3.2.4. Definizione delle regole di precedenza	275
5.3.2.5. Comportamento del "veicolo successivo"	278
5.3.3. La classificazione degli scenari adoperati per la simulazione	280
5.4. Analisi dei dati sperimentali	283
5.4.1. Analisi dei dati degli scenari R_i	284
5.4.1.1. Risultati degli scenari R_i con $F_1=350$ veic/h	289
5.4.1.2. Risultati degli scenari R_i con $F_2=500$ veic/h	291
5.4.1.3. Risultati degli scenari R_i con $F_3=600$ veic/h	293
5.4.1.4. Risultati degli scenari R_i con $F_4=650$ veic/h	295
5.4.1.5. Risultati degli scenari R_i in termini di livelli di servizio	297
5.4.2. Analisi dei dati degli scenari I_i	305
5.4.2.1. Risultati degli scenari I_i con $F_1=350$ veic/h	310
5.4.2.2. Risultati degli scenari I_i con $F_2=500$ veic/h	312
5.4.2.3. Risultati degli scenari I_i con $F_3=600$ veic/h	314
5.4.2.4. Risultati degli scenari I_i con $F_4=650$ veic/h	316

5.4.2.5. Risultati degli scenari I_i in termini di livelli di servizio	318
5.4.3. Analisi dei dati degli scenari C_i	326
5.4.3.1. Risultati degli scenari C_i con $F_1=350$ veic/h	331
5.4.3.2. Risultati degli scenari C_i con $F_2=500$ veic/h	333
5.4.3.3. Risultati degli scenari C_i con $F_3=600$ veic/h	335
5.4.3.4. Risultati degli scenari C_i con $F_4=650$ veic/h	337
5.4.3.5. Risultati degli scenari C_i in termini di livelli di servizio	340
5.5. Considerazioni conclusive	348
5.6. Bibliografia specifica del Capitolo 5.	350
CAPITOLO 6.	
CONFRONTO TRA LE FORMULAZIONI INTERNAZIONALI E LA	
MICROSIMULAZIONE: APPLICAZIONE AI CASI DI STUDIO	
6.1. Introduzione	354
6.2. Il caso di studio: la rotatoria di Cosenza Nord	355
6.2.1. Definizione dei parametri per la simulazione	356
6.2.1.1. La distribuzione dei flussi di traffico	357
6.2.1.2. Velocità d'approccio, velocità all'anello e zone di rallentamento	357
6.2.1.3. Comportamento dell'utente e regole di precedenza	362
6.2.2. Analisi dei ritardi medi e delle lunghezze delle code	366
6.3. Il caso di studio: la rotatoria di Mottola	375
6.3.1. Definizione dei parametri per la simulazione	377
6.3.1.1. La distribuzione dei flussi di traffico	377
6.3.1.2. Velocità d'approccio, velocità all'anello e zone di rallentamento	378
6.3.1.3. Comportamento dell'utente e regole di precedenza	382
6.3.2. Analisi dei ritardi medi e delle lunghezze delle code	384
6.4. Conclusioni	392
6.5. Bibliografia specifica del Capitolo 6.	395
CAPITOLO 7.	
L'EVOLUZIONE GEOMETRICO-FUNZIONALE DELLO SCHEMA A ROTATORIA	
7.1. Introduzione	399
7.2. Le rotatorie "semaforizzate"	400
7.3. Le rotatorie a spirale o "Turborotatorie"	409
7.4. Bibliografia specifica del Capitolo 7.	420
CONCLUSIONI	422
BIBLIOGRAFIA	425

INTRODUZIONE

La sistemazione degli incroci a raso con lo schema a rotatoria ha conosciuto negli ultimi anni, in Italia ed in molti altri Paesi, un notevole sviluppo, in quanto considerata idonea a garantire benefici effetti sia alla circolazione stradale che alla sicurezza.

La diffusione di tale tipo di intersezione, sia in ambito urbano che extraurbano, ha, da un lato, portato i conducenti ad apprezzarne i vantaggi, mentre dall'altro, ha indotto i progettisti a realizzare delle soluzioni progettuali spesso basate su criteri non coerenti con le effettive aspettative degli utenti e soprattutto con i canoni di sicurezza.

Ed in tal senso, ciò è stato sicuramente prodotto dall'attuale carenza, in Italia, di una normativa in grado di definire una metodologia di progetto e di verifica delle rotatorie.

Infatti, mentre il panorama normativo internazionale (Francia, USA, Australia, Regno Unito, Germania, Svezia, ecc.) offre da oltre un ventennio numerosi schemi di approccio a tale problema (calcolo della capacità, dei ritardi, delle code, ecc.), nel nostro Paese invece, nel 2001, sono state presentate, da parte di una commissione nominata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, delle linee guida a carattere prenormativo dal titolo "Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali". In essa il tema della rotatoria veniva affrontato, sia in termini di progettazione geometrica degli elementi che lo compongono che in termini prestazionali, facendo cioè riferimento, per quanto riguarda il calcolo della capacità alla metodologia francese del SETRA ("*Service d'études techniques des routes et autoroutes*").

Oggi tale documento è divenuto norma con il Decreto Ministeriale del 19/04/2006 dal titolo “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali”, perdendo però di fatto, la parte relativa allo studio delle capacità e delle *performance* delle rotatorie, fornendo esclusivamente delle indicazioni puntuali sugli aspetti geometrici di tali soluzioni.

In ogni caso, come già accennato in precedenza, il vuoto normativo lasciato dal D. M. del 19/04/2006, non ha frenato il vertiginoso aumento dell’uso della soluzione a rotatoria per le intersezioni. Ciò è probabilmente legato alla semplicità di realizzazione di tale schema, ai bassi costi di manutenzione ed all’evidente miglioramento dei livelli di sicurezza. Tutto questo ha in pratica condotto in alcuni casi però alla realizzazione di rotonde contraddistinte da numerose forzature e grossolani errori di progettazione.

Sulla base di queste considerazioni, uno degli obiettivi che il progetto di ricerca, oggetto della presente tesi di dottorato, si era proposto, era quello di individuare, sulla scorta di un’attenta e diffusa ricerca bibliografica internazionale, una formulazione di capacità che fosse in grado di interpretare al meglio il comportamento degli utenti in funzione di differenti condizioni al contorno.

Questo obiettivo è stato perseguito analizzando, a partire da rilievi sul campo, due rotatorie caratterizzate rispettivamente una da una configurazione geometrica conforme ai canoni classici di simmetria (quattro bracci ortogonali tra di loro) e l’altra contraddistinta da un’evidente dissimmetria.

L’applicazione delle più rappresentative formulazioni di capacità individuate e catalogate ha permesso di inquadrare, per i casi di studio qui enunciati, i limiti di significatività di ogni singolo metodo implementato in relazione alle grandezze osservate in sito.

Inoltre, un’analisi esaustiva, atta a definire modelli interpretativi delle prestazioni offerte dall’uso dello schema a rotatoria, non poteva non avvalersi di strumenti di microsimulazione per lo studio dei fenomeni di deflusso veicolare, in quanto tale approccio offre una migliore versatilità ed un minore dispendio di risorse (umane ed economiche) rispetto ad una sperimentazione sul campo.

La microsimulazione garantisce infatti la possibilità di implementare n-ple di scenari caratterizzati dalla variabilità sistematica sia di grandezze geometriche intrinseche che di grandezze riconducibili al traffico veicolare, nell'intento di valutare la loro influenza in termini di *performance* offerte.

In questa direzione, sono stati implementati un totale di 432 scenari, considerando variabili geometriche (raggio esterno della circonferenza inscritta, larghezza dell'isola divisionale, larghezza della corona girettoria), variabili di velocità (velocità d'approccio ai rami compresa tra 30 – 40 Km/h, 40 – 50 Km/h e 50 – 60 Km/h), variabili di flusso (quattro classi di portate entranti dai nodi: 350 veic/h, 500 veic/h, 600 veic/h e 650 veic/h) e variabili legate al comportamento degli utenti (intervallo critico variabile tra 3.0 s, 3.5 e 4.0 s). I risultati ottenuti sono stati rappresentati in termini di tempi medi d'attesa e di livelli di servizio offerti dall'ennesimo scenario.

In fase preliminare, la taratura degli input dello strumento informatico di micro simulazione è stata effettuata eseguendo alcune applicazioni ai casi di studio precedentemente indicati, estendendo la già citata analisi comparata, di fatto, anche al caso "simulato".

Oggi, lo schema a rotatoria è soggetto ad evoluzioni funzionali atte ad esaltare particolari aspetti rispetto ad altri. E' così che, ancora in tema di "*performance offerte*", nel presente lavoro è stata esposta un'attenta analisi bibliografica riguardante lo studio della possibilità di integrare un'intersezione a rotatoria con cicli semaforici razionalmente concepiti nell'intento di meglio gestire i parametri di disagio dell'utente (lunghezza delle code, tempi medi d'attesa, tempi di servizio, ecc.), nonché l'eventuale trasformazione di schemi "classici" in rotatorie "a spirale": le cosiddette "turborotatorie".

In relazione a quanto tuttora riferito ed in estrema sintesi, il presente lavoro può quindi essere strutturato in tre parti:

- Parte Prima (Capitoli 1, 2 e 3): a partire da un'estesa analisi bibliografica, rinvenimento e catalogazione delle metodologie internazionali per il calcolo delle caratteristiche prestazionali di una rotatoria;

- Parte Seconda (Capitolo 4): applicazione delle formulazioni rinvenute a casi di studio ed analisi comparata dei risultati;
- Parte Terza (Capitoli 5 e 6): utilizzo della microsimulazione per l'implementazione e lo studio di n-ple di scenari costruiti “*ad hoc*”.

INTERSEZIONI STRADALI CON SOLUZIONE A ROTATORIA: PANORAMICA INTERNAZIONALE SUGLI STANDARD GEOMETRICI

1.1. Generalità

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. Caratteristica distintiva delle rotatorie rispetto ad altri tipi di intersezioni a raso è quella di non attribuire priorità ad alcuna delle strade che si intersecano: essa è pertanto particolarmente idonea in quelle situazioni in cui tali strade sono dello stesso livello gerarchico.

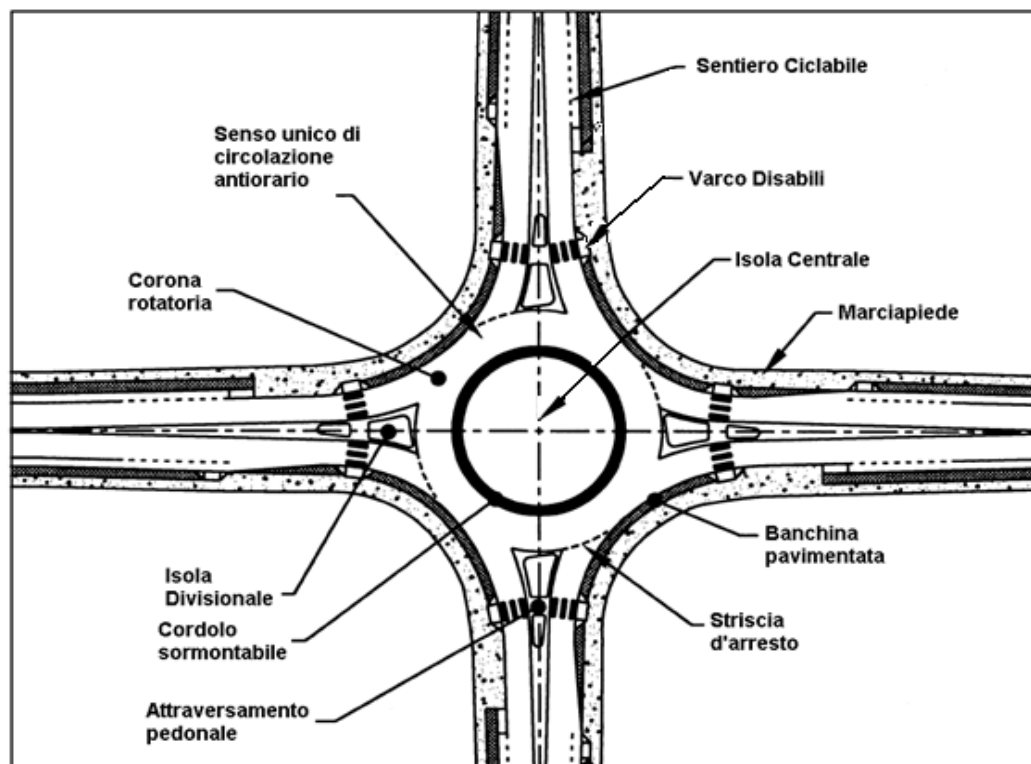


Figura 1.1: Elementi caratteristici di una rotatoria

Nella Figura 1.1 sono evidenziati gli elementi caratteristici di una rotatoria e per maggiore completezza qui di seguito vengono riportate le definizioni dei singoli elementi:

- Anello (Corona Giratoria): carreggiata che circonda l'isola centrale, ad una o più corsie, percorsa dai veicoli in senso antiorario.
- Isola Centrale: 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.
- Cordolo Sormontabile: 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 (Ramo): porzione di asse stradale che converge verso l'anello.
- Entrata: 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: 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: 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 divisionali talvolta sono limitate ad una semplice segnaletica orizzontale.

- Marciapiede: parte della strada, esterna alla carreggiata, rialzata o altrimenti delimitata e protetta, destinata alla mobilità pedonale.
- Pista Ciclabile: area disposta lateralmente sui rami d'ingresso, opportunamente delimitate, riservate alla circolazione delle biciclette. Tali corsie permettono ai ciclisti di scegliere se viaggiare come “pedoni” o come “veicoli”, in funzione del livello di comfort prescelto.
- Attraversamenti Pedonali: essi sono posti prima della linea d'ingresso e tagliano l'isola di separazione garantendo una zona di rifugio per pedoni e ciclisti. Dovrebbero essere sempre presenti nei contesti urbani ed in presenza di intensi flussi pedonali.
- Fascia di Protezione: parte della strada, non carrabile, utilizzata per separare il traffico veicolare da quello pedonale. La sua presenza obbliga i pedoni ad attraversare la carreggiata solo in alcuni punti specifici.

Nei paragrafi successivi verranno riportate le classificazioni geometriche delle rotatorie secondo le seguenti normative internazionali:

- norme italiane;
- norme americane;
- norme svizzere;
- norme francesi;
- norme inglesi;
- norme tedesche.

1.2. Classificazione secondo le norme italiane [1.9]

Con riferimento alla classificazione funzionale delle strade, definita dal “Codice della Strada” [1.8] e recepita dalle “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali” [1.3], la rotatoria, come particolare tipologia

d'intersezione a raso, è ammessa come soluzione dell'incrocio solo fra alcune categorie di strade 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.

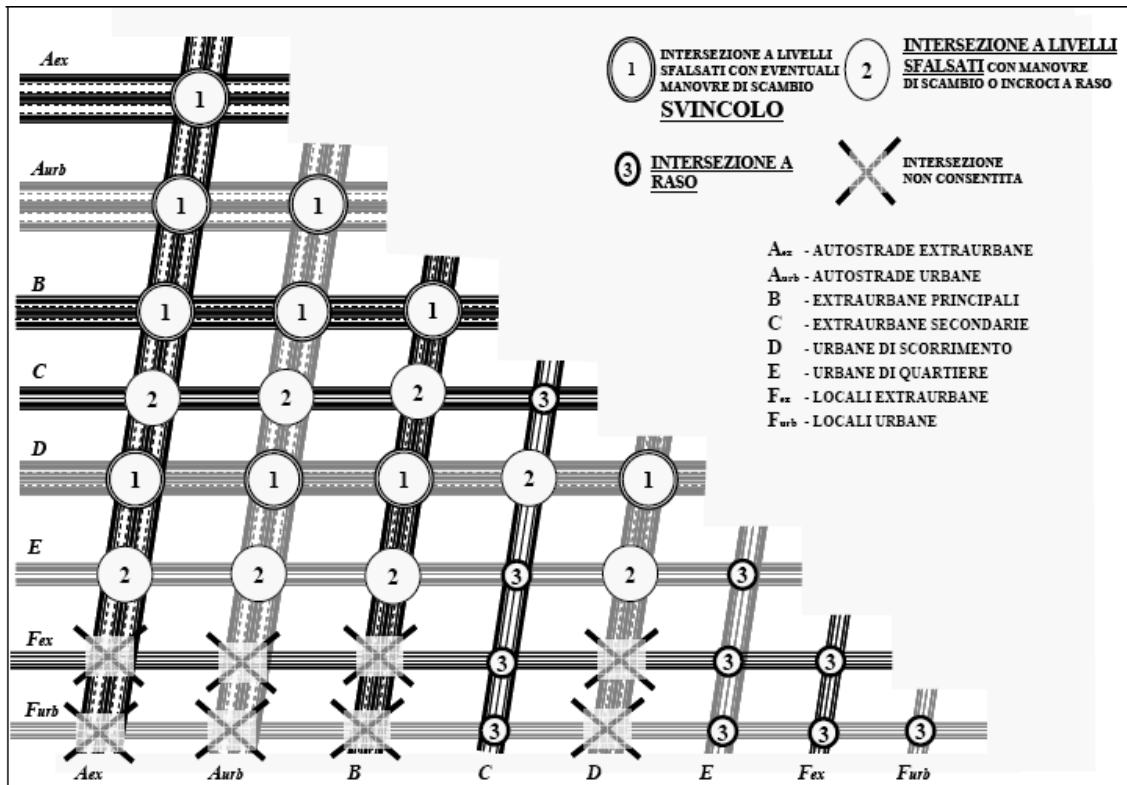


Figura 1.2: Organizzazione delle reti stradali e definizione delle intersezioni ammesse

Si considerano tre tipologie fondamentali di rotatorie in base al diametro della circonferenza esterna:

- Grandi Rotatorie con diametro esterno maggiore di 50 m;
- 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 a 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 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.

	D_{ext} (m)
MINIROTATORIE	14 ÷ 25
ROTATORIE COMPATTE	25 ÷ 40
ROTATORIE CONVENZIONALI	> 40 ÷ 50
GRANDI ROTATORIE	> 50

Tabella 1.1: Classificazione italiana delle rotatorie

In base alla classificazione delle intersezioni riportata in Figura 1.2, 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 e F/C.

Con riferimento alla Figura 1.1, la normativa italiana per la progettazione delle intersezioni stradali [1.3] definisce le larghezze degli elementi modulari delle rotatorie, secondo quanto indicato nella Tabella 1.2.

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

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

(**) organizzati al massimo con due corsie.

Tabella 1.2: Dimensioni degli elementi caratteristici di una rotatoria [1.3]

1.2.1. Elementi planimetrici di una rotatoria

La tipologia e le caratteristiche geometriche da adottare nella costruzione di una rotatoria dipendono principalmente dai flussi veicolari caratteristici dell'intersezione oggetto di studio.

E' necessario, ora, analizzare i criteri progettuali relativi agli elementi geometrici che caratterizzano la conformazione planimetrica di una rotatoria (Fig. 1.3), identificandone i valori minimi e massimi da adottare.

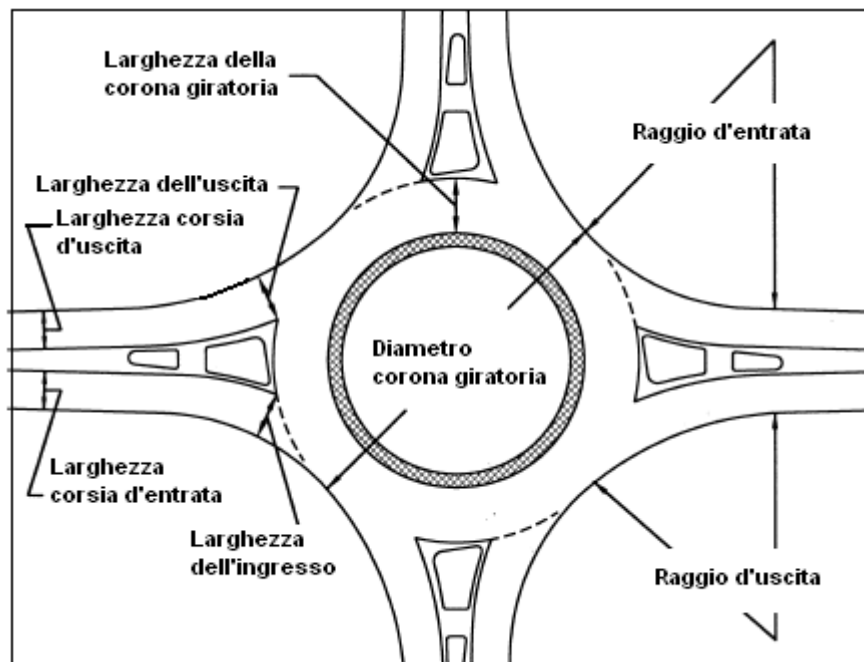


Figura 1.3: Elementi planimetrici di una rotatoria

1.2.2. Posizionamento dei bracci

Bisogna tener presente che per avere il massimo vantaggio dalla realizzazione di una intersezione a rotatoria, e al fine di migliorare la leggibilità complessiva dell'area di intersezione, i rami devono avere una disposizione regolare, orientati verso il centro dell'isola centrale, e formanti tra loro angoli prossimi all'angolo retto; è opportuno in ogni caso non scendere al di sotto dei 30°. Nel caso di angolo inferiore ai 30° tra due rami consecutivi, è opportuno deviare uno dei due.

Nel caso di rotatorie a singola corsia, il numero ideale di rami è quattro. Si possono adottare soluzioni poli-ramo, ma non si dovrebbero superare i sei bracci in quanto si verrebbe a creare confusione negli utenti, soprattutto nelle manovre di uscita.

Lo stesso discorso vale per le rotatorie a doppia corsia: i bracci dovrebbero essere limitati ad un massimo di quattro approssimativamente a 90°.

La disposizione dell'isola centrale è ottimale quando tutti gli assi dei rami intersecano il centro della rotatoria. In questo modo vengono garantite velocità ridotte nelle fasi di entrata, di attraversamento e di uscita. L'allineamento radiale rende l'isola centrale maggiormente predisposta all'avvicinamento da parte dei conducenti. Se tale allineamento non fosse possibile, i rami dovrebbero essere spostati leggermente a sinistra; in questo modo si ottiene una curvatura maggiore in entrata, adeguata a limitare la velocità. Tuttavia, si deve sempre fare attenzione che un tale spostamento del ramo non produca un'uscita eccessivamente tangente, che verrebbe affrontata a velocità elevate (Fig. 1.4).

Non è accettabile che l'allineamento di un braccio sia spostato più a destra del punto centrale della rotatoria. In tal caso si avrebbe un'inclinazione del ramo con angolo ridotto; la curvatura in entrata, non sarebbe più adeguata a controllare la velocità degli utenti e si incrementerebbe il rischio di incidenti causati dalla perdita di controllo del veicolo.

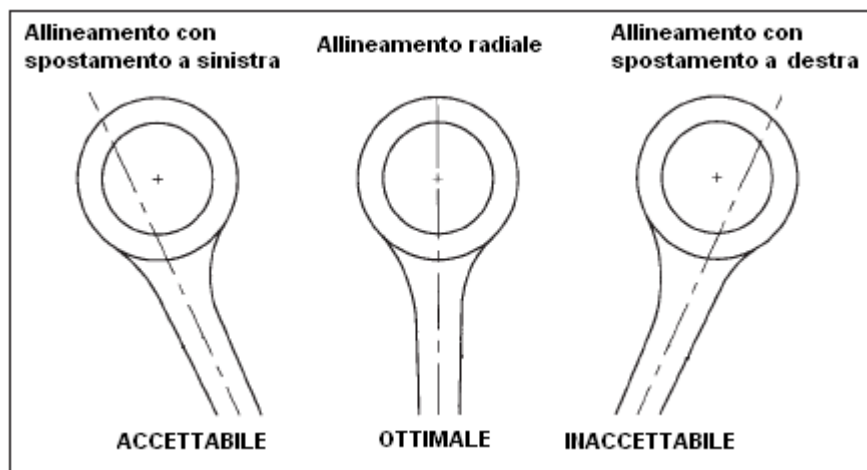


Figura 1.4: Disposizione dei bracci di una rotatoria

Nel caso di incrocio a T (a tre 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).

1.2.3. Diametro esterno e corona giratoria

Il diametro della corona giratoria esterna è il segmento che passa dal centro dell'isola centrale, ed unisce due punti del bordo esterno dell'anello: è la somma del diametro dell'isola centrale e di due volte la larghezza della corona giratoria (Fig. 1.3).

Per quantificare numericamente tale parametro bisogna fare riferimento al valore del raggio minimo di sterzata che compete ai veicoli la cui circolazione è ammessa sulla rotatoria di progetto. La verifica dell'adeguatezza del diametro dell'anello viene eseguita valutando le traiettorie percorse dal cosiddetto "veicolo di progetto" (Fig. 1.5 e 1.6), cioè il veicolo ritenuto più rappresentativo delle categorie veicolari ammissibili sulle strade che confluiscono all'intersezione (caratterizzato dai massimi ingombri longitudinale e trasversale).

Nel nuovo codice della strada [1.8] 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".

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.

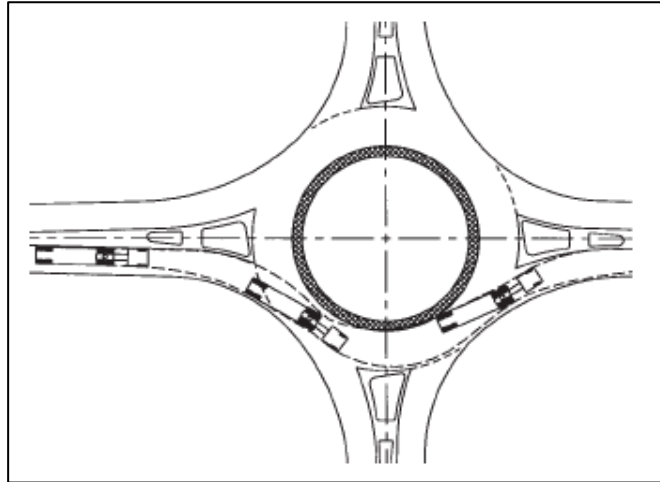


Figura 1.5: Simulazione della manovra di attraversamento

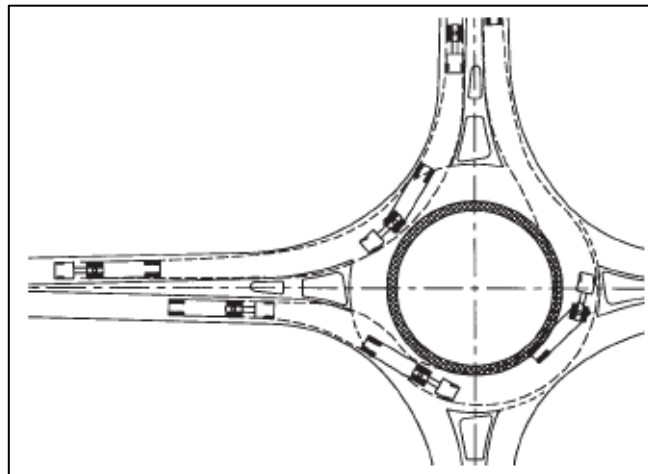


Figura 1.6: Simulazione delle manovre di svolta a destra e a sinistra

Il diametro della corona, inoltre, deve garantire un'adeguata deflessione al fine di consentire a tutti i veicoli di affrontare l'incrocio alle velocità compatibili con il grado di sicurezza che si intende ottenere. Per le rotatorie a singola corsia si consiglia un diametro minimo della corona giratoria pari a 30 m; nel caso di rotatorie a doppia corsia bisogna far riferimento ad un diametro minimo di 45 m.

In generale, i diametri più piccoli, poiché inducono gli utenti a viaggiare a bassa velocità, costituiscono soluzioni progettuali a favore di sicurezza; bisogna però osservare che nei contesti in cui sono richieste maggiori velocità d'approccio (ambiti extraurbani) è inevitabile adottare diametri più grandi per la corona giratoria.

La dimensione dell'anello centrale varia in funzione della larghezza e numero di corsie dell'entrata più larga. 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.

Per la corretta deduzione dei valori minimi della larghezza della corona giratoria, è utile fare riferimento alla fascia d'ingombro occupata dai veicoli durante la manovra di aggiramento dell'isola centrale.

In genere la larghezza minima da adottare per l'anello (escluse banchine) per le rotatorie a doppia corsia 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 50 cm. Questo è 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%.

1.2.4. Velocità di progetto di una rotatoria e raggi di deflessione

La determinazione della velocità caratteristica all'interno della corona giratoria avviene tramite l'individuazione della cosiddetta "traiettoria percorribile più velocemente" consentita dagli elementi geometrici. Questa traiettoria è quella più scorrevole e più schiacciata possibile valutata in assenza di traffico e non considerando la segnaletica orizzontale e verticale: di solito è quella relativa alla

manovra di attraversamento, ma in alcuni casi può essere definita dalla manovra di svolta a destra.

Per il corretto tracciamento della traiettoria percorsa da un veicolo in attraversamento occorre riferirsi alle distanze dagli elementi geometrici evidenziate nelle Figure 1.7, 1.8 e 1.9. Individuata la traiettoria percorribile più velocemente, la velocità di progetto della rotatoria è valutata facendo riferimento al raggio più piccolo di tale traiettoria che coincide generalmente con il cosiddetto raggio di deflessione.

La velocità di progetto può essere quantificata tramite l'equazione generale sull'aderenza trasversale:

$$V = \sqrt{127 \cdot R \cdot (i_t + f_t)} \quad [\text{Eq. 1.1}]$$

Dove:

- V = velocità di progetto (km/h);
- R = raggio più piccolo associato alla traiettoria percorribile a velocità maggiore (m). In molti casi coincide con il raggio di deflessione;
- i_t = pendenza trasversale (m/m);
- f_t = coefficiente di aderenza trasversale.

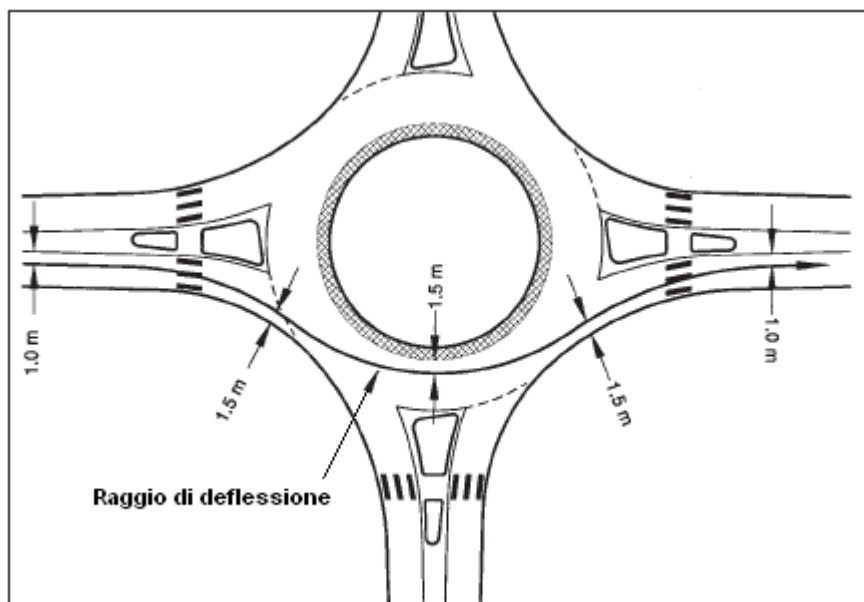


Figura 1.7: Traiettoria d'attraversamento e raggio di deflessione per rotatoria a singola corsia

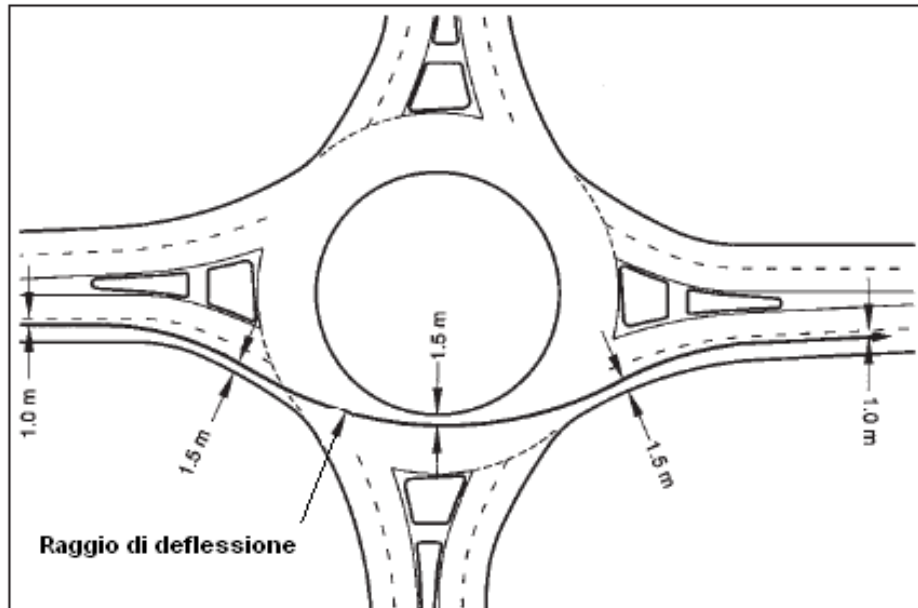


Figura 1.8: Traiettoria d'attraversamento e raggio di deflessione per rotatoria a doppia corsia

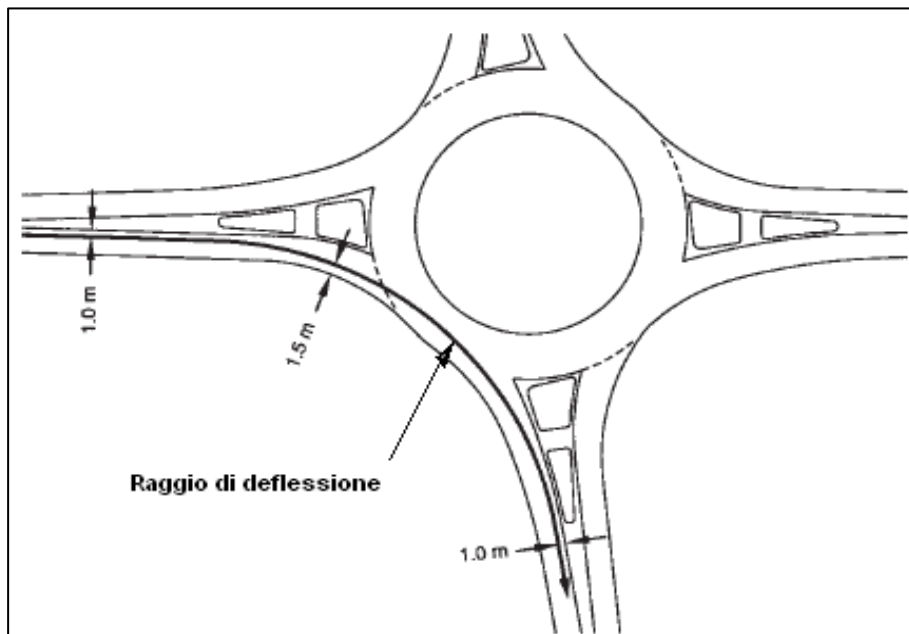


Figura 1.9: Esempio di svolta a destra maggiormente vincolante

Il raggio di deflessione non deve superare i valori di 80÷100 m, cui corrispondono le usuali velocità di sicurezza nella gestione di una circolazione rotatoria (minori di 50 km/h).

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

1.2.5. Isola centrale

L'isola centrale di una rotatoria è l'area rialzata non percorribile racchiusa dalla corona giratoria; tale area può anche includere, in corrispondenza del bordo, una fascia sormontabile (Fig. 1.10).

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. In particolare un'isola centrale di forma ovale non presenta problemi se la rotatoria è di piccole dimensioni e la velocità è ridotta; isole centrali a forma di goccia possono essere utilizzate nelle rotatorie in cui non avvengono alcuni tipi di manovre come gli scambi.

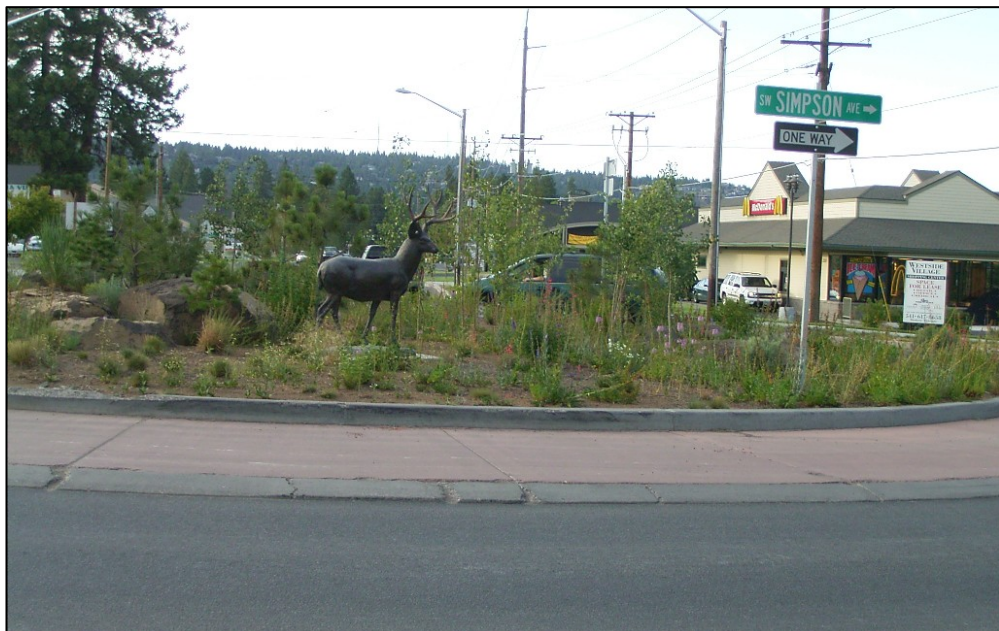


Figura 1.10: Esempio di isola centrale con fascia sormontabile

Le rotatorie con isole centrali rialzate sono meglio percepite dal guidatore rispetto a quelle ribassate: su terreno pianeggiante basta un'altezza di 0,6 m. Questa altezza è misurata dal bordo più alto della corona giratoria fino alla parte superiore dell'isola centrale. Sulle rotatorie di piccole dimensioni (con diametro dell'isola centrale inferiore a 20÷25 m), a causa delle limitazioni dovute alla visibilità, non è possibile avere un'isola centrale rialzata. La vegetazione interna all'isola centrale deve ricadere al di fuori dei triangoli di visibilità e, per meglio garantire la corretta percezione dell'isola centrale, dovrebbe essere diversa dalla vegetazione esterna alla rotatoria.

L'utilizzo di una fascia sormontabile, posta sul bordo dell'isola centrale, fornisce un'area pavimentata supplementare che garantisce il transito dei veicoli con rimorchio senza intralciare le manovre dei veicoli più piccoli (Fig. 1.11).



Figura 1.11: Veicolo con rimorchio mentre attraversa una rotatoria

Le fasce sormontabili hanno dimensioni che vanno da 1 m a 4 m di larghezza e sono realizzate con una pendenza trasversale compresa tra il 3% e il 4%, tale da permettere il deflusso delle acque piovane e limitare gli eventuali spostamenti dei carichi posti sui rimorchi dei mezzi pesanti; dovrebbero essere realizzate con una pavimentazione colorata o con materiale differente da quello della corona giratoria.

Il bordo esterno della fascia deve essere rialzato di almeno 3 cm rispetto alla superficie della corona giratoria per limitarne l'uso da parte degli autoveicoli.

L'interno dell'isola può formare un rialzo con una pendenza massima del 15% e dovrà essere circondata da bordi bassi o da una fascia carrabile di 1,5÷2,0 m.

Le dimensioni dell'isola centrale hanno un ruolo molto importante nella determinazione della deflessione imposta alla traiettoria dei veicoli; nel caso di isola circolare il diametro della stessa dipende dalla larghezza e dal diametro dell'anello centrale.

1.2.6. Entrate

La larghezza di un ingresso è individuata dal segmento che congiunge il vertice destro dell'isola divisionale al bordo destro della corsia d'entrata e ortogonale al bordo stesso (Fig. 1.3). 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, utilizzare due corsie d'entrata.

Per la larghezza di un'entrata a singola corsia si adottano valori compresi tra 3,50 m e 4,00 m.

Qualora fosse necessario un allargamento dell'ingresso, al fine di incrementare le prestazioni offerte dalla rotatoria, si può intervenire in due modi:

- aggiungendo una corsia completa a monte della rotatoria. Si avrebbe una configurazione dell'entrata caratterizzata dalla presenza di due corsie parallele di uguale ampiezza, per una larghezza complessiva variabile tra 7,00 m e 8,00 m;
- creando una svasatura che si sviluppa gradualmente nell'ingresso. L'estensione longitudinale della zona "svasata" dovrebbe essere valutata con la teoria delle code; si consigliano lunghezze minime di 25 m e di 40 m, rispettivamente per le rotatorie urbane e per quelle extraurbane.

La curva d'entrata è formata da una o più curve di ciglio, utili a raccordare i rami d'ingresso con la corona giratoria.

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. I raggi di curvatura dell'entrata compresi tra i 15 e 20 m rallentano la

velocità d'entrata ed inducono i veicoli a dare la precedenza a chi transita sull'anello. Un raggio elevato, pur migliorando le prestazioni operative dell'intersezione, può portare il valore della deflessione a dei livelli superiori a quelli ottimali.

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 veic/h nei periodi di punta.

La curva d'entrata deve essere progettata in modo che il suo bordo esterno risulti tangente al bordo esterno della corona giratoria; il bordo interno, invece, dovrebbe essere tangente all'isola centrale (Fig. 1.12).

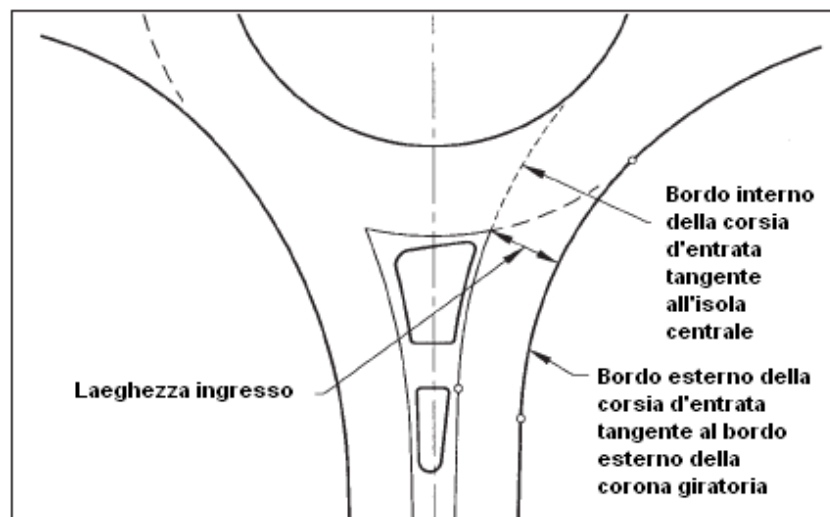


Figura 1.12: Costruzione geometrica della curva d'ingresso

Per le rotatorie a singola corsia non sussiste il problema dei conflitti tra correnti di traffico parallele; conseguentemente il raggio d'entrata può essere ridotto o aumentato al fine di garantire le volute prestazioni cinematiche per i veicoli in ingresso. Per le rotatorie presenti nei contesti urbani sono adottati raggi di immissione tra i 10 m ed i 30 m. Per le strade urbane locali in cui non è ammessa la circolazione di mezzi pesanti, si possono utilizzare raggi minori di 10 m. Per le rotatorie a singola

corsia in ambito extraurbano, si consigliano raggi minimi d'entrata compresi tra i 15 m ed i 20 m.

Nelle rotatorie a doppia corsia, la progettazione della curva d'entrata presenta complessità maggiori rispetto alla configurazione a singola corsia. I raggi d'entrata eccessivamente piccoli possono innescare pericolosi conflitti tra le correnti veicolari disposte su file parallele, comportando, allo stesso tempo, una riduzione significativa della capacità dell'ingresso.

1.2.7. Uscite

La larghezza dell'uscita viene calcolata a partire dal vertice sinistro dell'isola pseudo-triangolare, conducendo un segmento perpendicolare al bordo destro della corsia d'uscita (Fig. 1.3).

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 m (per valori del raggio esterno inferiori a 25 m) e 5,00 m (per corone giratorie di raggio superiore o uguale a 25 m) per facilitare la cinematica della manovra.

La larghezza delle uscite a due corsie è normalmente di 7 m. Esse in genere sono, però, pericolose per la sicurezza dei pedoni e delle due ruote.

Le uscite a doppia corsia sono necessarie solo nei seguenti casi:

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

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 in ogni caso un valore minimo non inferiore a 15 m.

E' necessario, poi, che le velocità d'uscita non siano eccessive (raggi troppo ampi), al fine di preservare il flusso pedonale che utilizza gli attraversamenti eventualmente presenti a valle della zona d'uscita.

Dal punto di vista del corretto tracciamento geometrico, la curva d'uscita deve essere realizzata tangente al bordo esterno della corona giratoria; il prolungamento del bordo interno deve essere tangente all'isola centrale (Fig. 1.13).

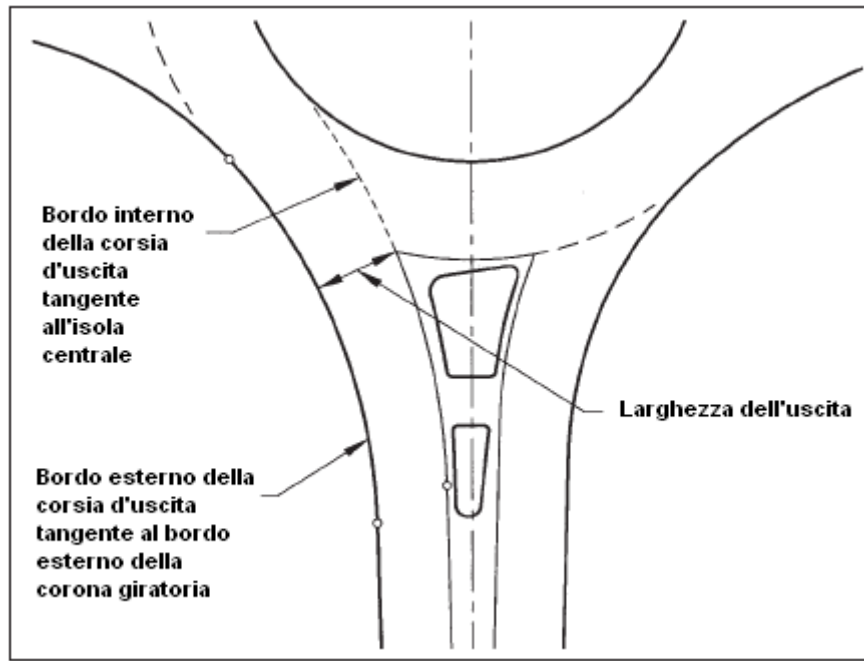


Figura 1.13 Costruzione geometrica della curva d'uscita

In ambito urbano, le curve d'uscita dovrebbero imporre l'esecuzione di traiettorie con una velocità di progetto inferiore ai 40 km/h.

In ambienti extraurbani, dove la presenza del traffico pedonale è scarsa, la curva d'uscita può essere progettata con raggi più elevati (25÷30 m).

1.2.8. Isole divisionali

Le isole divisionali devono essere realizzate su tutti i rami delle rotatorie, escluse quelle con diametri molto piccoli perché si creerebbe un'ostruzione visiva verso l'isola centrale.

L'isola separatrice favorisce l'individuazione delle rotatorie nell'avvicinamento, riduce la velocità d'entrata, separa fisicamente l'entrata dall'uscita in modo da evitare manovre errate, controlla la deviazione in entrata ed uscita, costituisce un rifugio per i pedoni e permette l'installazione della segnaletica verticale.

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

Un'isola divisionale ha solitamente forma pseudo-triangolare; la sua lunghezza complessiva dovrebbe essere almeno 15 m, in modo da offrire un'adeguata protezione ai pedoni ed essere percepibile per gli utenti che si avvicinano alla rotatoria.

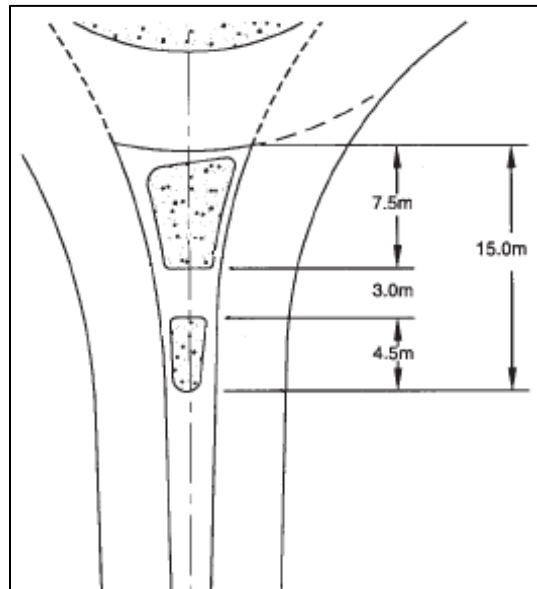


Figura 1.14: Dimensioni minime di un'isola divisionale

Nella Figura 1.14 sono evidenziate le dimensioni minime di un'isola divisionale per una rotatoria a corsia singola.

Generalmente le isole divisionali sono materializzate, prevedono cioè una superficie in rilievo rispetto alla pavimentazione stradale. Per poter essere il più possibile visibile, l'isola separatrice dovrà avere un perimetro costituito da una cordona in materiale cementizio o lapideo. Gli spigoli dovranno essere raccordati con un raggio di circa 60 cm.

Le isole dovrebbero essere sgombre da qualunque oggetto (elementi di arredo o segnaletica superflua) che possa costituire un ostacolo alla visuale degli utenti.

Le superfici delle isole spartitraffico dovrebbero essere, preferibilmente, di colore chiaro e dovrebbero creare un ottimo contrasto (di giorno come di notte) con la superficie stradale. I bordi delle isole materializzate dovrebbero essere resi ancor più visibili tramite l'inserzione di elementi catarifrangenti.



Figura 1.15: Tipica isola divisionale

1.2.9. Tabella riassuntiva

Nella Tabella 1.3 sono riassunte le caratteristiche degli elementi geometrici che compongono una rotatoria.

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

Tabella 1.3: Dimensionamento degli elementi geometrici di una rotatoria [1.3]

1.2.10. Coerenza cinematica delle traiettorie curvilinee e raggi critici

Un aspetto molto importante che bisogna considerare in relazione alla velocità che un utente può assumere durante la percorribilità degli elementi geometrici delle rotatorie, è quello della coerenza cinematica di tutte le manovre possibili.

Il controllo della velocità indotto dagli elementi geometrici di una rotatoria deve esplicitarsi attraverso il raggiungimento di due obiettivi:

- uniformità delle velocità relative tra gli elementi geometrici consecutivi;
- omogeneità delle velocità relative tra flussi di traffico opposti.

Per perseguire tali obiettivi occorre che il progettista ponga particolare attenzione alla verifica dei cosiddetti raggi critici (Fig. 1.16), cioè:

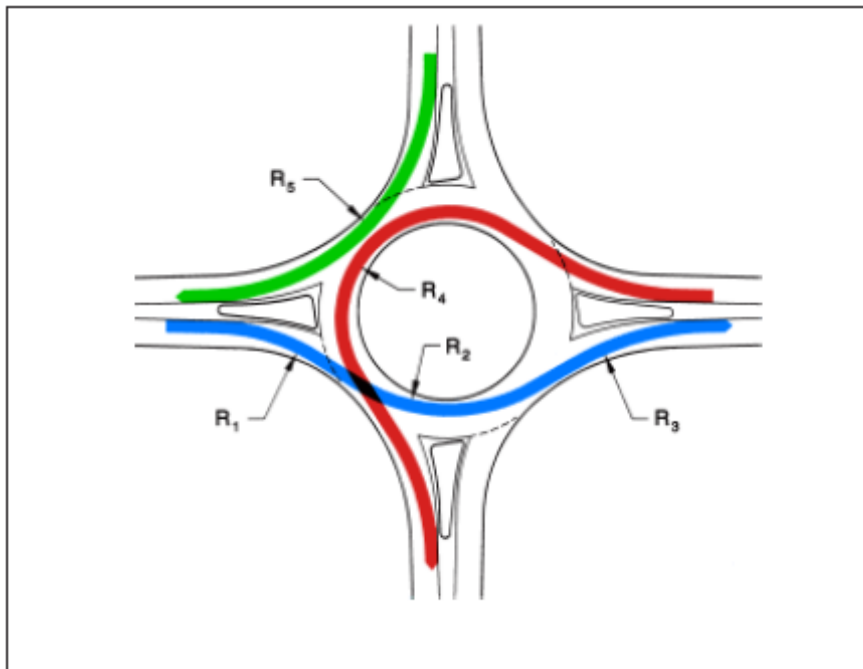


Figura 1.16: Raggi critici delle traiettorie veicolari

- R1 (raggio d'entrata): raggio minimo della traiettoria di immissione nella corona giratoria, prima della linea d'entrata;
- R2 (raggio della corona giratoria): raggio minimo della traiettoria percorsa attorno all'isola centrale;
- R3 (raggio d'uscita): raggio minimo in fase di uscita dalla corona giratoria;

- R4 (raggio della curva a sinistra): raggio minimo per l'esecuzione della manovra di svolta a sinistra;
- R5 (raggio della curva a destra): raggio minimo per l'effettuazione della svolta a destra.

E' importante tener presente che i raggi sopra definiti sono riferiti alle traiettorie veicolari e, perciò, sono diversi da quelli usati per la progettazione geometrica delle rotatorie. Le considerazioni da fare inerenti ai raggi critici sono le seguenti:

- a. E' opportuno che tra i raggi R1, R2 ed R3, sussista la seguente relazione: $R1 < R2 < R3$; ciò comporterebbe velocità ridotte in ingresso e, conseguentemente, la drastica riduzione della probabilità che si verifichino incidenti causati dalla perdita di controllo da parte del veicolo isolato e tra veicoli entranti e veicoli uscenti. Nelle situazioni in cui non è possibile ottenere un valore $R1 < R2$, occorre limitare la conseguente differenza di velocità al massimo a 20 km/h (sarebbero preferibili differenze di velocità inferiori a 10 km/h).
- b. Il raggio d'uscita R3 non deve mai essere minore di R1 o di R2, in modo da ridurre gli incidenti dovuti alla perdita di controllo del veicolo.
- c. Il raggio R4 relativo alla traiettoria di svolta a sinistra, deve essere scelto in modo da assicurare una differenza di velocità, tra un veicolo che si immette e uno che circola, non superiore a 20 km/h. Il flusso veicolare che esegue la manovra di svolta a sinistra è considerato quello maggiormente critico in quanto caratterizzato da velocità di circolazione più bassa. R4 può essere determinato aggiungendo 1,5 m al raggio dell'isola centrale.
- d. Il raggio R5 corrispondente alla manovra di svolta a destra, può essere valutato in modo simile al raggio R1, ma con riferimento ad una velocità di progetto minore di quella della rotatoria e non eccedente più di 20 km/h quella associata al raggio R4.

In una rotatoria a singola corsia, per ridurre il valore di R1 si può intervenire diminuendo il raggio del ciglio d'ingresso o inclinando più a sinistra il ramo di entrata;

se si riscontra una forte presenza pedonale, inoltre, il raggio R3 (raggio d'uscita) può essere ridotto al minimo (uguale o leggermente più grande di R2) in modo da limitare le velocità dei veicoli che escono dalla corona giratoria.

In una rotatoria a doppia corsia, questi tipi di intervento potrebbero essere dannosi per gli utenti, in quanto i veicoli sarebbero naturalmente indirizzati verso traiettorie tendenti a sovrapporsi pericolosamente.

Nel caso delle rotatorie a doppia corsia, esistono degli accorgimenti che possono essere adottati al fine di garantire la coerenza cinematica delle traiettorie d'entrata, evitando il verificarsi della sovrapposizione delle traiettorie:

- Realizzare una prima curva d'ingresso in cui il prolungamento del bordo sinistro sia tangente all'isola centrale. A partire da questa curva si tracciano poi gli allineamenti paralleli al fine di individuare la posizione del bordo destro di ogni corsia (Fig. 1.17). Queste curve, dallo sviluppo minimo di 30 m, devono avere un raggio compreso tra 30 m e 60 m in ambito urbano, e tra 40 m ed 80 m nei contesti extraurbani.

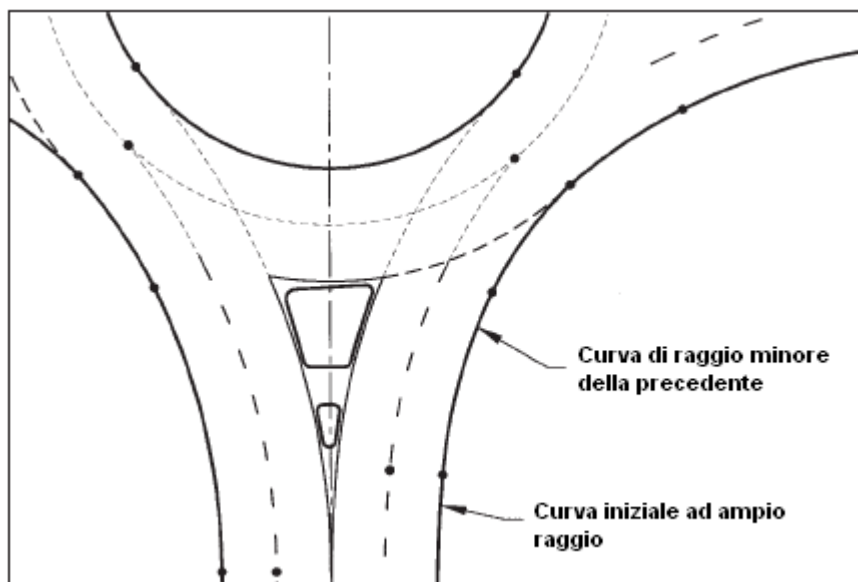


Figura 1.17: Primo criterio per la coerenza cinematica

- Dimensionare la prima curva di entrata con un raggio piccolo (15÷30 m) posizionandola a circa 10-15 m dalla linea di “dare precedenza”. Una

seconda curva, con raggio più grande si pone tra la precedente e il bordo della corona giratoria (Fig. 1.18). In questo modo, i veicoli saranno rallentati dalla curva d'entrata a raggio piccolo e, raggiunta la linea d'entrata, saranno indirizzati verso un percorso tangente all'isola centrale.

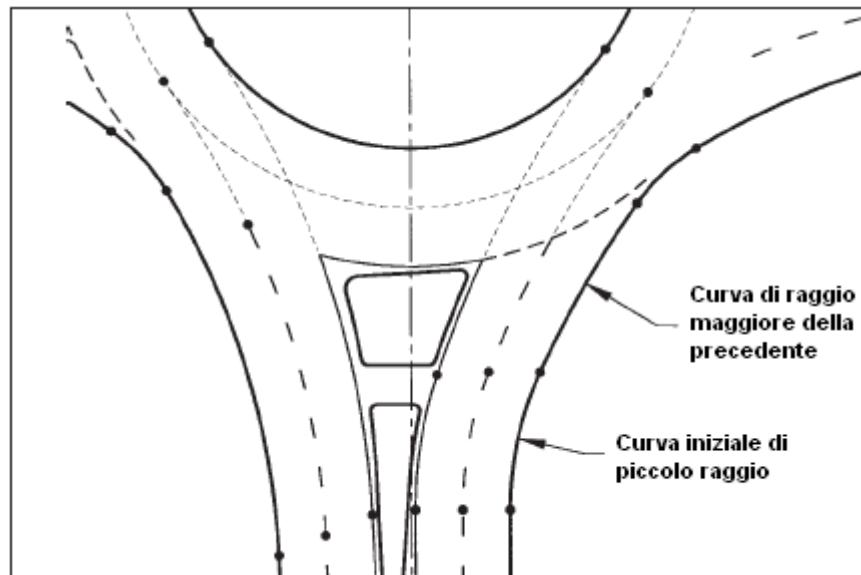


Figura 1.18.: Secondo criterio per la coerenza cinematica

1.3. Classificazione secondo le norme americane [1.4]

In base a quanto riportato dal FHWA nel testo “Roundabouts: an informational guide” [1.4], le rotatorie, a seconda delle dimensioni del diametro della circonferenza esterna, del numero di corsie e dell’ambito urbanistico in cui vengono realizzate, si possono suddividere nelle seguenti sei categorie:

- mini rotatorie;
- rotatorie compatte urbane;
- rotatorie urbane a singola corsia;
- rotatorie urbane a doppia corsia;
- rotatorie extraurbane a singola corsia;
- rotatorie extraurbane a doppia corsia.

Nella Tabella 1.4 vengono riassunte e confrontate alcune importanti caratteristiche, progettuali e funzionali, di ognuna delle sei categorie di rotatorie appena citate e che saranno analizzate nei successivi paragrafi.

	CATEGORIE					
	Mini rotatoria	Urbana compatta	Urbana singola corsia	Urbana doppia corsia	Extraurbana Singola corsia	Extraurbana doppia corsia
Velocità di ingresso di progetto	25 Km/h	25 Km/h	35 Km/h	40 Km/h	40 Km/h	50 Km/h
Diametro cerchio inscritto (m)	13/25	25/30	30/40	45/55	30/40	55/60
larghezza anello (due corsie in m)				9,8/9,1		9,1/8,7
Diametro isola centrale (m)				25,4/36,8		36,8/52,6
Tipico volume giornaliero di servizio nei 4 bracci (veicoli al giorno)	10.000	15.000	20.000	verifica	20.000	verifica

Tabella 1.4: Classificazione delle rotatorie negli USA

1.3.1. Mini rotatorie

Le mini rotatorie sono delle rotatorie con diametro esterno compreso tra i 13 m e i 25 m, il loro utilizzo è riservato all'ambito urbano caratterizzato da un basso volume di traffico veicolare (composto in prevalenza da mezzi leggeri) e velocità ridotte (inferiori ai 60 km/h). Questa tipologia è caratterizzata da corsie singole sia in ingresso che in uscita per tutti i rami, e da una corsia singola nella corona giratoria. L'isola centrale, dal diametro inferiore ai 4 metri, spesso viene semplicemente dipinta sulla pavimentazione; in altri casi viene evidenziata differenziandone la pavimentazione da quella dell'anello: in tal modo la rotatoria diventa percorribile anche per i mezzi pesanti. Inoltre anche le isole divisionali sono tracciate a terra o sormontabili.

Le mini rotatorie consentono la trasformazione di incroci tradizionali utilizzando spazi ridotti e sono abbastanza economiche: richiedono solo un incremento della superficie pavimentata e la realizzazione di un'opportuna segnaletica orizzontale. Grazie alle loro piccole dimensioni esse sono percepite abbastanza bene dagli utenti.



Figura 1.19: Mini rotatoria in Germania

1.3.2. Rotatorie urbane compatte

Questa tipologia di rotatorie è caratterizzata da diametri esterni compresi tra i 25 m ed i 30 m; esse presentano una sola corsia sia in entrata che in uscita su tutti i rami ed un'unica corsia sulla corona giratoria. Esse vengono prevalentemente utilizzate in ambito urbano e sono indicate per una viabilità caratterizzata da bassa presenza di traffico pesante.

La progettazione geometrica delle rotatorie urbane compatte prevede isole di separazione rialzate comprendenti aree di sosta pedonali ed un'isola centrale non sormontabile. Di solito quest'ultima è contornata da una fascia sormontabile che facilita il passaggio dei mezzi pesanti.



Figura 1.20: Rotatoria urbana compatta in Germania

1.3.3. Rotatorie urbane a singola corsia

Le rotatorie urbane a singola corsia hanno diametro esterno compreso tra i 30 m ed i 40 m e sono anch'esse caratterizzate da corsie singole sia in ingresso che in uscita per tutti i rami, e da una corsia singola sull'anello.

Esse si distinguono dalle rotatorie compatte urbane per un diametro della corona giratoria esterna più grande e per la maggiore ampiezza delle zone di ingresso ed uscita. Ciò permette di garantire velocità di percorrenza simili a quelle d'ingresso e lo smaltimento di un volume di traffico maggiore sempre rispetto alle compatte urbane.

Dal punto di vista geometrico queste rotatorie presentano isole di separazione rialzate, un'isola centrale non sormontabile e preferibilmente nessuna fascia sormontabile.



Figura 1.21: Rotatoria urbana a singola corsia in Germania

1.3.4. Rotatorie urbane a doppia corsia

Questa tipologia di rotatorie è caratterizzata da diametri esterni compresi tra i 45 m ed i 55 m, ed include tutte le rotatorie in area urbana che hanno almeno un'entrata con due corsie. La corona giratoria deve avere più di una corsia per garantire il deflusso dei veicoli provenienti da uno stesso ramo.

Sono previste isole di separazione rialzate, un'isola centrale non sormontabile (senza nessuna fascia sormontabile) ed un'opportuna deflessione.

Le velocità dei veicoli all'entrata, sulla corona giratoria e all'uscita sono simili a quelle delle rotatorie urbane a singola corsia.



Figura 1.22: Rotatoria urbana a doppia corsia in Florida

1.3.5. Rotatorie extraurbane a singola corsia

Le rotatorie extraurbane a singola corsia hanno diametro esterno compreso tra i 35 m ed i 40 m, esse sono inserite in reti stradali caratterizzate da alte velocità di percorrenza (tra 80 km/h e 100 km/h) e pertanto richiedono elementi geometrici supplementari e dispositivi di controllo del traffico sui rami, in modo da indurre i conducenti a rallentare fino ad una velocità appropriata prima di immettersi nella rotatoria.

Gli elementi geometrici supplementari includono estese isole di separazione rialzate, un'isola centrale non sormontabile ed un'opportuna deflessione, non è in genere necessaria la presenza di fasce sormontabili per i mezzi pesanti.



Figura 1.23: Rotatoria extraurbana a singola corsia negli USA

1.3.6. Rotatorie extraurbane a doppia corsia

Le rotatorie extraurbane a doppia corsia hanno diametri esterni compresi tra i 55 m e i 60 m e presentano caratteristiche simili alle rotatorie extraurbane a singola corsia visto che anch'esse si inseriscono lungo direttrici percorse a velocità comprese tra gli 80 km/h e i 100 km/h; si differenziano dunque solamente per avere due corsie in entrata e due corsie all'anello.

Di conseguenza molte caratteristiche di progettazione devono rispecchiare quelle delle rotatorie urbane a doppia corsia.



Figura 1.24: Rotatoria extraurbana a doppia corsia in Olanda

1.4. Classificazione secondo le norme svizzere [1.6]

La normativa svizzera [1.6] individua quattro tipologie di rotatoria:

- mini rotatorie con isola centrale sormontabile tracciata al suolo o sopraelevata;
- mini rotatorie (o piccole rotatorie) con isola centrale semisormontabile;
- rotatorie compatte con isola centrale non sormontabile oppure semisormontabile;
- grandi rotatorie con isola centrale non sormontabile (con diametro esterno variabile fra 32 m e 40 m).

Dal punto di vista strettamente tecnico in Svizzera viene usata la norma SN 640 263 [1.10], che si applica alle rotatorie con una sola corsia ed isola centrale invalicabile. Tale norma, per analogia, si applica anche a quelle con anello a più corsie.

In base a questa normativa le rotatorie vengono classificate in due categorie in funzione della loro sistemazione e del diametro esterno: rotatorie compatte e mini rotatorie.

DENOMINAZIONE	MINIROTATORIE	PICCOLE ROTATORIE	ROTATORIE COMPATTE	GRANDI ROTATORIE
CAMPO DI APPLICAZIONE	Centri abitati Quartieri residenziali Zone urbane	Centri abitati Quartieri residenziali Zone urbane	Zone urbane e suburbane	Aperta campagna
GEOMETRIA (m): • diametro esterno (cerchio inscritto)	14/20	18/24	22/35	>32/40
caratteristiche	Isola centrale transitabile	Isola centrale semitransitabile	Corona esterna dell'isola centrale eventualmente transitabile	

Tabella 1.5: Classificazione delle rotatorie in Svizzera

Le rotatorie compatte si hanno sulle strade con prevalente funzione di traffico, l'isola centrale non è valicabile e hanno un diametro esterno compreso tra 22 m e 35 m; le mini rotatorie si trovano sulle strade locali, hanno l'isola centrale sormontabile o parzialmente sormontabile e possiedono un diametro esterno compreso tra 14 m e 24 m.

In base a tali norme conviene rinunciare alle rotatorie nelle seguenti circostanze:

- quando bisogna privilegiare una particolare corrente di traffico;
- quando esiste una certa gerarchia tra le strade che si intersecano;
- quando sulle vie principali non è possibile garantire lo smaltimento del traffico, come nel caso di rotatorie vicine.

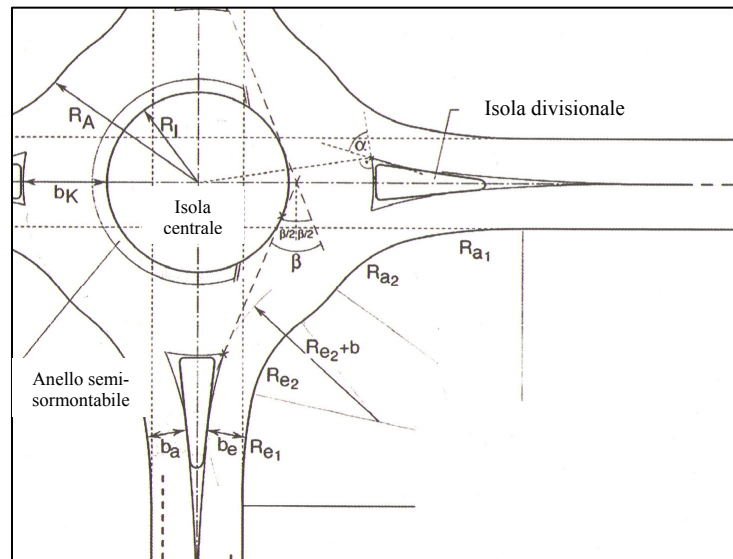


Figura 1.25: Schema di rotatoria secondo la norma svizzera

La normativa svizzera [1.6] dà delle precise indicazioni progettuali a cui attenersi nel dimensionamento di ciascun elemento della rotatoria. Facendo riferimento alla Figura 1.25, la larghezza (b_e) dell'entrata deve essere misurata in corrispondenza del passaggio pedonale, a circa 7 m dal bordo dell'anello stesso. Per il dimensionamento si ammette una velocità di ingresso minore di 30 Km/h. Per assicurare lo scorrimento del traffico, le larghezze delle entrate saranno scelte in modo tale che davanti al punto di conflitto le velocità siano convenientemente ridotte e che i veicoli a motore e su due ruote circolino in fila. Dal punto di vista della sicurezza si consiglia una larghezza fra 3 m e 3,50 m; nel caso di due corsie la larghezza totale non deve superare i 6 m.

Per quanto riguarda l'isola di separazione, è necessario che la sua larghezza sia sufficientemente grande in modo tale da garantire una distinta separazione delle correnti in ingresso ed in uscita: non dovrà quindi essere inferiore a 3 m circa. La superficie interdetta al traffico e che precede l'isola spartitraffico si deve estendere per una lunghezza circa una-due volte superiore a quella dell'isola stessa. Se il traffico totale è inferiore a 150 veic/h allora non è necessario prevedere alcun passaggio pedonale.

Il diametro esterno minimo della rotatoria è delimitato sul piano costruttivo dalla direzione dei bracci e dai loro angoli, e dalla visibilità dei veicoli pesanti. Vengono consigliati i seguenti diametri esterni in modo da permettere il transito di tutte le categorie di veicoli: 26÷35 m per le strade urbane, 30÷40 m per le strade extraurbane; si applicano diametri maggiori solo per rotatorie a più corsie. Per diametri esterni ≤ 28 m bisogna controllare la percorribilità dei veicoli pesanti.

La larghezza (b_k) dell'anello dipende dal diametro esterno e dalla superficie usata dai veicoli di progetto nel caso di inversione di marcia. Il grafico riportato in Figura 1.26 definisce i valori minimi per la larghezza dell'anello in funzione del diametro esterno per camion con rimorchio e senza considerare ulteriori spazi di manovra.

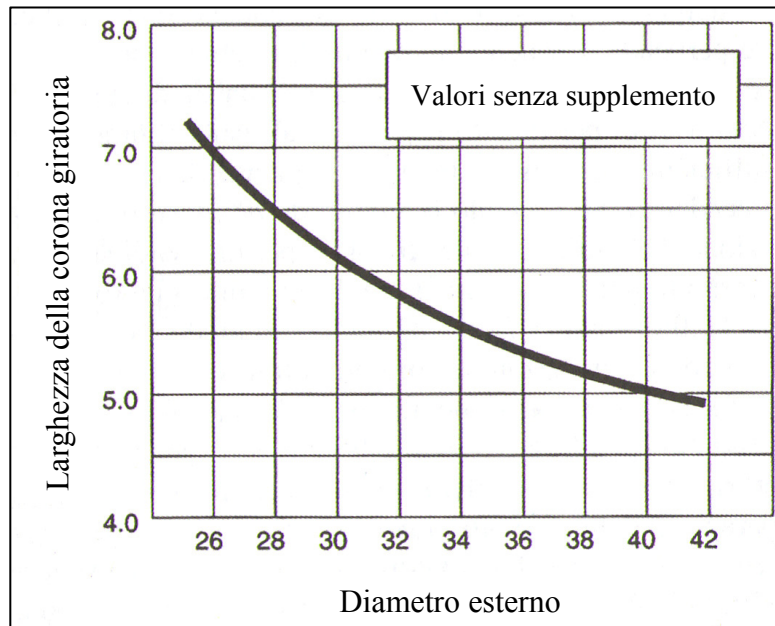


Figura 1.26: Larghezza dell'anello secondo le norme svizzere [1.10]

Per ragioni di sicurezza è meglio evitare anelli troppo grandi, in modo tale da non ridurre l'effetto di limitazione della velocità. E' infatti raccomandato, per larghezze superiori a 5,5 m, di rivestire la fascia sormontabile eventuale con materiali irregolari in modo da migliorare la percezione della rotatoria; in questo caso tale anello avrà un gradino di 4 cm rispetto al conglomerato bituminoso.

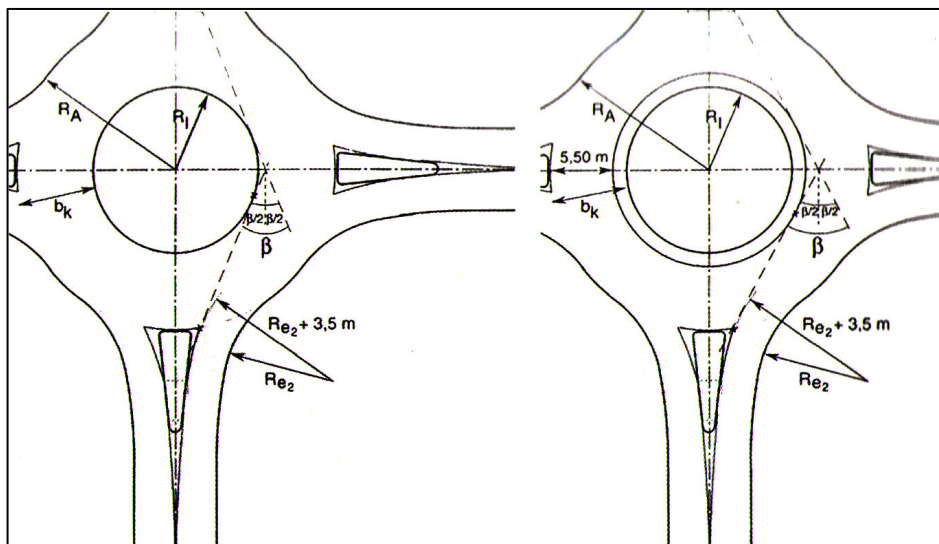


Figura 1.27: Angolo di deviazione β

Per evitare che la rotatoria venga percorsa a velocità elevate, è necessario che i veicoli in ingresso vengano deviati dall'isola centrale: tale deviazione viene valutata attraverso il calcolo dell'Angolo di Deviazione β , così come riportato in Figura 1.27. Per ogni accesso è raccomandato un angolo di deviazione pari almeno a 45° . In generale un angolo $\beta \geq 45^\circ$ è adatto nelle rotatorie a quattro bracci con grandi diametri esterni (>32 m). Nei casi invece di rotatorie a quattro bracci con piccoli diametri, tale esigenza per l'angolo di deviazione può essere soddisfatta se il raggio interno dell'isola centrale è almeno il doppio della larghezza della corsia in ingresso.

La larghezza (b_a) della corsia in uscita è misurata in corrispondenza dell'attraversamento pedonale, a circa 7 m dal bordo dell'anello. Per il dimensionamento si ammette una velocità di uscita minore di 30 Km/h; per la sicurezza conviene adoperare larghezze pari a 3,5÷4 m per le corsie senza piste ciclabili, e 4÷4,5 m per quelle con piste ciclabili. Sempre per motivi di sicurezza vanno evitate le uscite a due corsie.

Per quanto riguarda gli attraversamenti pedonali, essi devono essere disposti ad una distanza di 4÷5 m dal bordo dell'anello.

La norma svizzera [1.6] inoltre si occupa delle mini rotatorie affermando che bisogna rinunciare a quest'ultime nei seguenti casi:

- quando non è possibile rispettare i parametri geometrici imposti dalla norma;
- quando lo spazio consente la realizzazione delle rotatorie compatte;
- quando il traffico pedonale è consistente;
- quando il traffico giornaliero supera i 15.000 veicoli;
- quando la somma del traffico su un'entrata e sulla rotatoria supera i 1.200 veic/h.

Le mini rotatorie devono avere mediamente un diametro esterno compreso tra 18÷26 m con un minimo di 14 m. E' bene che il centro dell'isola si trovi all'intersezione dei bracci della rotatoria. Tali bracci devono essere disposti in maniera tale da impedire l'attraversamento diretto della rotatoria. L'angolo d'incidenza dei bracci deve essere almeno 30° e bisogna evitare le entrate tangenziali all'anello.

La larghezza dell'anello deve essere pari a $7\div 8$ m, compresa l'eventuale corona sormontabile dell'isola centrale. Per le entrate, le uscite e le eventuali isole direzionali bisogna rifarsi alle norme esposte per le rotatorie compatte.

1.5. Classificazione secondo le norme francesi [1.5]

Anche in Francia, come in altri paesi in Europa, non esiste una vera e propria classificazione delle rotatorie, ma è possibile distinguerle in base al loro contesto d'applicazione ed al loro diametro esterno. In particolare si hanno:

- grandi rotatorie, realizzate in ambito extraurbano e con diametri maggiori a 34 m;
- rotatorie compatte, presenti in zone urbane e suburbane con corone giratorie semisormontabili e con diametri compresi tra 24 e 34 m;
- piccole rotatorie, previste solo in ambito urbano e con diametri variabili tra 19 e 25 m;
- mini rotatorie, realizzate in ambito urbano e con diametri variabili tra 14 e 20 m.

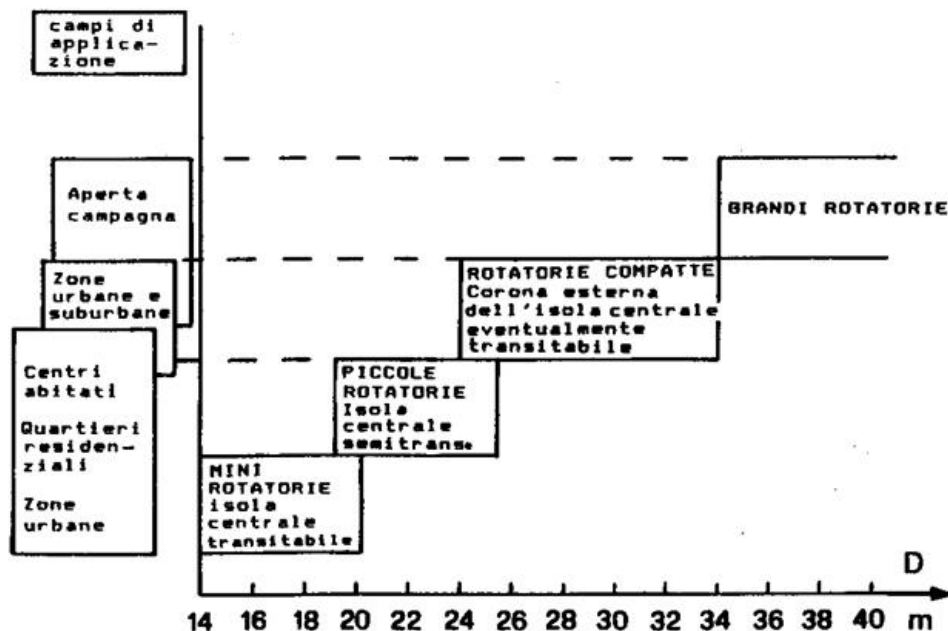


Figura 1.28: Classificazione delle rotatorie secondo le norme francesi

La normativa francese [1.5] stabilisce alcune indicazioni generali per tutte le tipologie di rotatorie. Il numero di bracci è variabile tra tre ed otto per l'area urbana, mentre conviene non superare i sei rami per le aree extraurbane. Il raggio esterno minimo necessario per permettere le manovre dei mezzi pesanti è di 15 m senza la necessità di fasce valicabili.

Tale normativa impone inoltre che l'isola centrale deve garantire una sufficiente deflessione nei percorsi d'attraversamento ai fini della sicurezza: il raggio di deflessione deve essere inferiore a 100 m. La forma dell'isola deve essere circolare: conviene non adoperare forme oblunghe o ovali, in quanto incrementano il tasso d'incidentalità. L'isola deve essere inoltre circondata da bordi bassi o da una fascia carreggiabile di 1,5÷2 m: bordi consistenti sono sconsigliabili per motivi di sicurezza.

La larghezza dell'anello è variabile in funzione della larghezza complessiva dell'ingombro di un veicolo pesante che contorna l'ostacolo centrale non valicabile e della larghezza e del numero di corsie dell'entrata più larga: essa deve essere più larga del 20% dell'entrata più estesa e deve essere uniforme. La larghezza minima dell'anello è posta pari a 7 m, tuttavia si può accettare una larghezza di 6 m se esiste una corona semicarreggiabile per i mezzi pesanti: quella massima non dovrebbe superare i 9 m, anche nel caso di entrate a due corsie:

Solitamente le entrate devono essere ad una sola corsia per motivi di sicurezza: si possono giustificare entrate a due corsie solo per poter aumentare la capacità. La larghezza di un'entrata su una strada principale deve essere compresa tra i 3÷4 m, misurata a 5 m dalla linea del dare precedenza; una larghezza minore, con un minimo di 2,5 m, è accettabile solo su bracci secondari. Le entrate possono essere realizzate a due corsie per poter aumentare la capacità, con una larghezza complessiva di 6÷7 m ed una lunghezza minima del tratto a due corsie di 25÷30 m; in questa situazione conviene portare una larghezza minima dell'anello a 8 m. Nel caso di tre corsie si adottano larghezze comprese tra 9÷10 m.

Il raggio di entrata è consigliabile realizzarlo tra gli 8 ed i 15 m, senza superare i 20 m ed il raggio esterno della rotatoria.

Anche le uscite, così come è stato già detto per le entrate, dovrebbero essere ad una sola corsia, in quanto le uscite a due corsie di larghezza pari a 7 m, sono pericolose per la sicurezza dei pedoni e dei veicoli a due ruote. La larghezza dell'uscita ad una sola corsia è compresa tra 4÷5 m. Il raggio di curvatura dell'uscita deve essere superiore al raggio interno della rotatoria, con un minimo di 15 m.

Conviene inoltre costruire fisicamente le isole di separazione, in quanto sono poco efficaci le isole solo demarcate sulla pavimentazione; un'isola deve essere abbastanza larga da proteggere un pedone su sedia a rotelle, perciò si raccomanda una larghezza di 2 m in corrispondenza del passaggio. In particolare, sulle vie importanti, dove la circolazione avviene a velocità elevata, si potrà avere una larghezza dell'isola compresa tra 6 e 20 m ed una lunghezza variabile tra 10 e 60 m.

Per quanto riguarda la pendenza del terreno su cui vengono realizzate le rotatorie, la norma francese dimostra che per pendenze inferiori al 3% non è difficile realizzare una rotatoria; per pendenze superiori al 6% la rotatoria non risulta molto funzionale; tra il 3 ed il 6% occorre invece verificare le velocità d'approccio e le manovre dei mezzi pesanti per motivi di sicurezza.

1.5.1. Le grandi rotatorie

Per quanto riguarda le grandi rotatorie, la normativa francese [1.5] impone le seguenti indicazioni:

- il raggio dell'isola centrale, in genere variabile tra 15 e 30 m, non deve superare i 40 m;
- il raggio esterno non deve essere maggiore di 40÷50 m ed è legato alla larghezza dall'anello;
- di solito l'anello è dotato di due corsie da 4 m, però poiché l'anello deve essere più ampio di almeno il 20% rispetto alla dimensione dell'entrata più ampia, si possono avere larghezze di 11÷12 m;
- per volumi di traffico compresi tra 1.200 e 2.400 veic/h si adottano due corsie all'ingresso, mentre per flussi maggiori di 2.400 veic/h si

utilizzano tre corsie. Per motivi di sicurezza conviene evitare entrate con più di tre corsie;

- per volumi di traffico inferiori a 1.200 veic/h si adotta una sola corsia d'uscita,
- si adottano raggi di curvatura compresi tra 15 e 20 m in ingresso, mentre tra 25 e 40 m per le uscite;
- la distanza tra ingresso ed uscita successivi deve essere variabile tra 20 e 30 m;
- la pendenza longitudinale del terreno su cui sorge la rotatoria non deve essere superiore al 3%;
- è conveniente che i rami d'ingresso alla rotatoria convergano il più possibile al centro dell'isola centrale;
- nelle grandi rotatorie extraurbane, caratterizzate da velocità d'approccio assai elevate (60÷120 Km/h), conviene che l'immissione sia preceduta da una serie di curve e controcurve di raggio decrescente per indurre una certa diminuzione della velocità;
- in caso di forti correnti di traffico che svoltano alla prima uscita a destra è possibile realizzare un "bypass" in modo che tale corrente non entri in rotatoria.

1.5.2. Le rotatorie compatte

Per le rotatorie piccole, medie o compatte le caratteristiche geometriche variano a volte anche notevolmente. E' molto frequente l'impiego di rotatorie con isola centrale semi-controllata o semi-sormontabile, in cui l'anello centrale, invalicabile, è contornato da un'area concentrica transitabile solo occasionalmente, a bordi smussati, di larghezza variabile tra 1,5 e 2 m e pendenza trasversale accentuata e pari al 4%. Tale fascia sormontabile è solitamente pavimentata in modo differente dall'anello.

E' possibile realizzare rotatorie compatte con diametro esterno compreso tra 24 e 30 m nei casi in cui esse non siano posizionate lungo la viabilità principale di

un'area urbana o su linee importanti del trasporto pubblico. Per permettere anche le manovre occasionali dei mezzi pesanti è richiesto un raggio minimo di almeno 12 m: per tali rotatorie con raggi inferiori a 15 m, la norma francese impone la verifica delle sagome d'ingombro dei mezzi pesanti attraverso il software "Giration".

Parametri	Annotazioni	Parametri	Valori costanti [m]			
Raggio della rotatoria	R_g	$12m \leq R_g \leq 25m$	$R_g = 12$	$R_g = 15$	$R_g = 20$	$R_g = 25$
Larghezza dell'anello	L_a	$6m \leq L_a \leq 9m$	7	7	7	7
Fascia valicabile	B_f	$B_f = 1,50$ se $R_g = 15m$ $0 \leq B_f \leq 2m$ se $R_g \geq 15m$	1.5	1.5		
Raggio interno	R_i	$R_i = R_g - L_a - B_f$	3.5	6.5	13	18
Raggio di entrata	R_e	$8m \leq R_e \leq 15m \leq R_g$	10	12	12	12
Larghezza via in entrata	L_e	$3 \leq L_e \leq 4m$	3.5	3.5	3.5	3.5
Raggio di uscita	R_s	$15m \leq R_s$ $R_s > R_i$	15	20	20	20
Larghezza via in uscita	L_s	$4m \leq L_s \leq 5m$	4	4	4.5	4.5
Raggio di allacciamento	R_r	$R_r = 4 R_g$	48	60	80	100

Tabella 1.6: Riepilogo dei parametri per le strade in ingresso ed in uscita in Francia [1.1]

Per una deflessione sufficientemente buona occorre inoltre che il diametro dell'isola centrale non sia inferiore ai 7 m, con entrate variabili tra 3÷3,5 m ed uscite comprese invece tra 3,5÷4 m.

Tipo di rotatoria	r	R	Larghezza anello	Larghezza aiuola spartitraffico	Livello ottimale di traffico ⁽¹⁾	Attraversamenti pedonali	Corsie
	[m]	[m]	[m]	[m]	[uvp/h]		
Suburbana	10-40	≥ 18	≥ 8	0-2 m	≤ 3000 ⁽²⁾	≥ 4	1-3
Urbana	7-20	15 - 30	7 - 12	0-2 m	≤ 2500 ⁽³⁾	$\geq 2,5$	1-3
Con isola semisormontabile	3.5-5 (+1,5 di fascia valicabile)	12 - 15	6 - 8	1.5 -2	≤ 2000	$\geq 1,5$	1
Mini-rotatoria	1.5-2.5 (sormontabile)	7,5 - 12	6 - 9	0.75-2 m	≤ 1500	0 - 2,5	1

⁽¹⁾ Unità di veicoli passeggeri/ora
⁽²⁾ e ⁽³⁾ Maggiore in presenza di entrata a due corsie

Tabella 1.7: Elementi geometrici delle rotatorie secondo le norme francesi [1.1]

1.5.3. Le mini rotatorie

In Francia così come in molte altre realtà europee e ed extraeuropee sono particolarmente diffuse le mini-rotatorie, ossia delle rotonde con diametri esterni compresi tra 7,5 e 12 m. Il Ministero dei Trasporti francese, in uno studio [1.14], ha definito le mini rotatorie come delle “intersezioni a raso a senso rotatorio con priorità all’anello, nel quale lo spazio a disposizione permette la manovra dei mezzi pesanti solamente valicando il centro dell’incrocio. Così l’isola centrale di una mini-rotatoria diventa interamente valicabile, anche se tuttavia deve essere aggirata da destra dai veicoli poco ingombranti”. Infatti un raggio inferiore ai 12 m rende impossibile il transito ai mezzi pesanti che possono compiere la svolta diretta a sinistra valicando completamente l’isola.

Sempre in uno studio condotto dal Ministero dei Trasporti francese [1.14], vengono definiti gli ambiti d’intervento per le mini rotatorie:

- è possibile realizzarle nel caso di intersezioni secondarie con velocità d’approccio inferiori a 50 Km/h oppure per intersezioni principali ma con velocità d’avvicinamento inferiori a 30 Km/h. Il numero massimo di bracci consentito è pari a 4 e devono essere disposti in maniera regolare;
- sono da evitare in città per intersezioni tra strade di diversa importanza o per flussi di traffico superiori a 1.800 veic/h. Sono inoltre sconsigliate: nel caso di strade con più di due corsie, quando l’angolo fra due rami successivi è inferiore a 70° ed in presenza di notevoli flussi di mezzi pesanti o di trasporti collettivi;
- bisogna adoperarle con cautela per volumi di traffico compresi tra 1500 e 1.800 veic/h, in presenza di significativi flussi di traffico pesante e di mezzi di trasporto pubblico e per angoli fra due bracci consecutivi compresi tra 70° ed 80°.

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche di una mini rotatoria, è necessario che il diametro della carreggiata tra i limiti del marciapiede non debba superare i 24 m, con un’isola centrale a forma di calotta sferica la cui sommità non deve superare i 15 cm (12 cm in presenza di autobus circolanti sull’isola).

I bracci d'ingresso, in un'intersezione a T, dovranno essere disposti in modo tale che l'isola centrale cada centrata sull'asse principale: tutto ciò consente di garantire una maggiore deflessione alle traiettorie dei veicoli. Per gli incroci a quattro bracci la disposizione dovrà essere il più ortogonale possibile.

Per separare invece l'entrata dall'uscita è conveniente inserire delle isole di separazione di larghezza variabile tra 0,85 e 2 m. E' inoltre importante un buon contrasto tra la carreggiata e l'isola centrale, sia di giorno che di notte, da realizzare attraverso l'utilizzo di colori o di materiali diversi. Per tale motivo sono da preferire le isole bianche catarifrangenti, le isole pavimentate o di altro colore chiaro ben contrastato.

Le mini rotatorie devono essere dotate di una buona illuminazione di tipo periferico (di solito mediante quattro pali) oppure sospesa. Si cercherà di differenziare l'intersezione dalla strada vera e propria mediante un'illuminazione più intensa.

1.6. Classificazione secondo le norme inglesi [1.16]

La Gran Bretagna è stata il primo Paese al mondo che ha introdotto nel lontano 1966 il criterio della precedenza all'anello nelle rotatorie. Anche gli inglesi hanno individuato una serie di tipologie di rotatorie:

- rotatorie normali, con isola centrale, non valicabile, avente diametro maggiore o uguale a 4 m. Esse sono dotate di entrate con svasatura in modo tale da permettere la creazione di più corsie per l'ingresso. Vengono realizzate in zone di nuova costruzione ed in corrispondenza di punti per l'inversione di marcia;
- mini rotatorie, con isola centrale di diametro inferiore ai 4 m e leggermente rialzata (o a raso). Si adottano di solito per migliorare le prestazioni di intersezioni urbane esistenti quando lo spazio è assai ristretto, ma mai in incroci di nuova costruzione;
- doppie rotatorie, poste sulla stessa intersezione in posizione adiacente oppure su livelli sfalsati connesse da un breve raccordo. Esse sono utili

per regolare entrate asimmetriche, disassate o con flussi opposti ed elevati flussi di svolta a sinistra (a destra in Inghilterra);

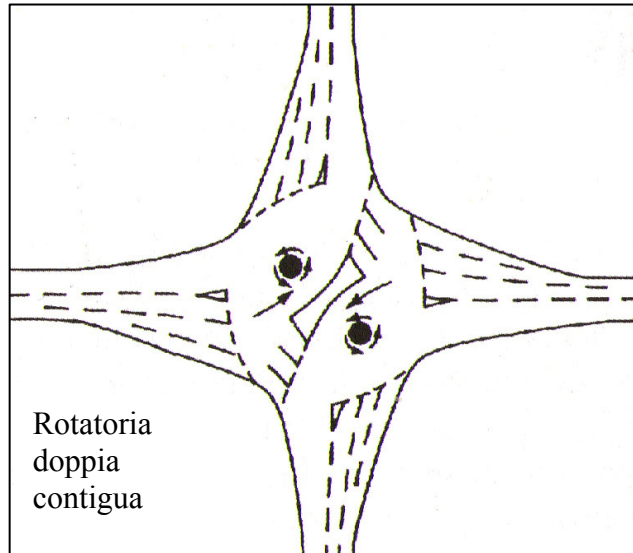


Figura 1.29: Rotatoria doppia secondo le norme inglesi

- rotatorie a livelli sfalsati, in cui una corrente di traffico attraversa l'intersezione senza interruzione, mentre la rimanente parte viene dirottata su una o più rotatorie poste a livello differente. Si usano di solito per le autostrade urbane o su strade ad alta capacità con traffico ad alta velocità d'uscita;
- rotatorie semaforizzate, in cui il traffico è controllato dai semafori per tutto il giorno o per parte di esso (nelle ore di punta). In particolari condizioni di flussi non bilanciati, possono migliorare la capacità dell'intersezione;
- anello di raccordo, costituito da un ampio sistema di circolazione rotatoria a due sensi di marcia in cui ogni entrata è dotata di una rotatoria a tre bracci (di solito mini-rotatoria o rotatoria semaforizzata). Sono utili per risolvere il problema di rotatorie eccessivamente grandi già esistenti, ma sono fortemente sconsigliate per nuove realizzazioni.



Figura 1.30: Anello di Raccordo in Gran Bretagna

Per quanto riguarda invece le dimensioni da attribuire agli elementi geometrici di una rotatoria secondo le norme inglesi si ha (Fig. 1.31):

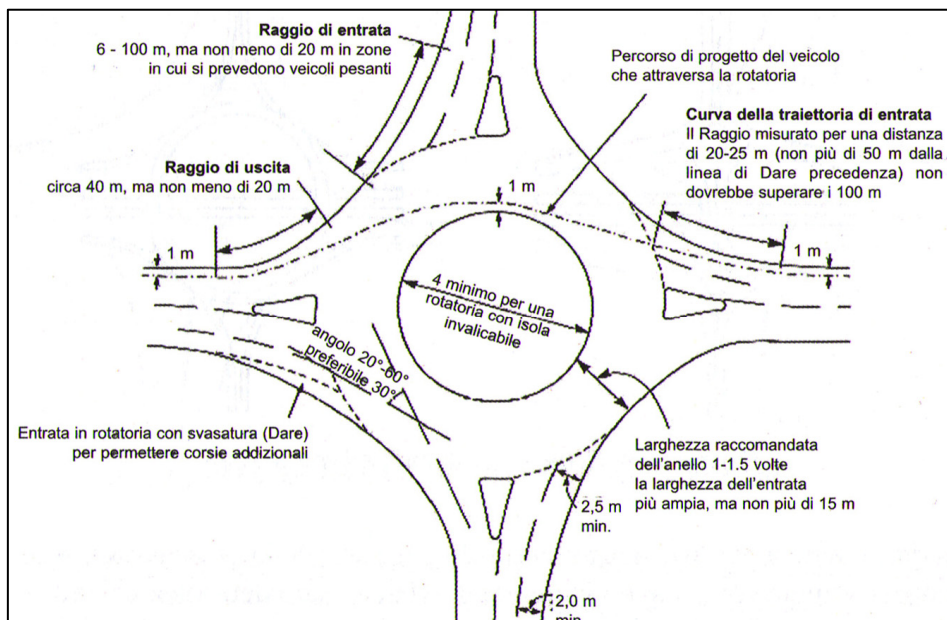


Figura 1.31: Elementi geometrici delle rotatorie secondo le norme inglesi

- raggio d'entrata compreso tra 6 e 100 m, ma non meno di 20 m in presenza di passaggio di veicoli pesanti;
- raggio d'uscita di circa 40 m, ma non meno di 20 m sempre in presenza di mezzi pesanti;
- diametro dell'isola interna non inferiore a 4 m per isole invalicabili;
- larghezza dell'anello almeno pari a $1\div 1,5$ volte la larghezza dell'entrata più ampia, ma mai più grande di 15 m;
- raggio della traiettoria d'entrata non superiore a 100 m;
- numero massimo di bracci pari a 4, sebbene se le rotatorie funzionino bene anche in presenza di più rami.

1.7. Classificazione secondo le norme tedesche [1.15]

In Germania, così come in altri paesi europei, esiste una tradizione lunga diverse decenni per quanto riguarda la realizzazione di rotatorie. Le prime cominciarono a nascere tra gli anni '30 e gli anni '60 ed erano tutte di grande diametro e con diverse corsie all'anello. Addirittura, cinquant'anni fa, la città di Hannover era famosa per le tante grandi rotatorie nate sul suo territorio. Però nel corso degli anni tali rotatorie assunsero una cattiva reputazione a causa del loro scarso livello di sicurezza e molte di loro vennero trasformate, intorno agli anni '60, in intersezioni semaforizzate.

Fu durante i primi anni '80 che ebbero grande successo gli esperimenti condotti su rotatorie di tipo moderno, ispirate dal grande successo avute da quest'ultime nel Regno Unito. Così nacquero soprattutto rotatorie compatte a singola corsia, ma nel corso degli anni divennero sempre più frequenti anche altri tipi di rotonda.

Per quanto riguarda la classificazione geometrica e quindi la progettazione delle rotatorie, in Germania esistono tre linee guida:

- la prima fu pubblicata nel 1993 e fu sviluppata in seguito dal Dipartimento dei Trasporti del Northrhine-Westfalia;
- una simile fu edita nel 1994 dal Dipartimento dei Trasporti della Sassonia;

- la terza ed ultima fu invece realizzata nel 1995 dal Ministero Federale dei Trasporti

In ogni caso il diagramma in Figura 1.32 riassume al meglio, sia in termini di dimensione che di traffico, la classificazione tedesca delle rotatorie.

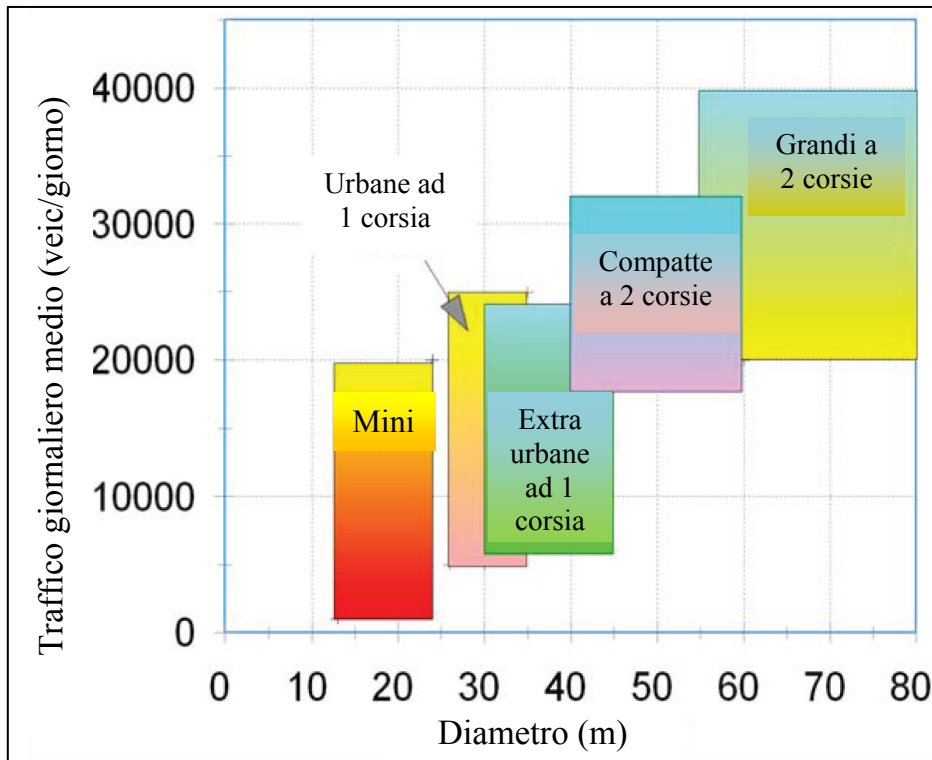


Figura 1.32: Classificazione delle rotatorie secondo le norme tedesche [1.7]

Quindi le tipologie di rotatoria previste dalle norme tedesche sono sostanzialmente quattro:

- mini rotatorie;
- rotatorie compatte ad una corsia (che si distinguono a loro volta in Urbane ed Extraurbane);
- rotatorie compatte a due corsie;
- grandi rotatorie a due corsie.

Nei paragrafi successivi verranno analizzate in dettaglio tutte e quattro le categorie che sono state appena riportate.

1.7.1. Le mini rotatorie

Le mini rotatorie hanno un diametro compreso tra 13 e 24 m e la loro isola centrale può essere attraversata dai mezzi pesanti qualora il loro percorso lo renda necessario.

Il loro successo è dovuto al fatto che riescono a sopportare un TGM di 17.000 veic/giorno senza generare grossi ritardi per i veicoli. Sono inoltre molto facili da realizzare, oltre ad essere poco costose, e garantiscono un buon livello di sicurezza.

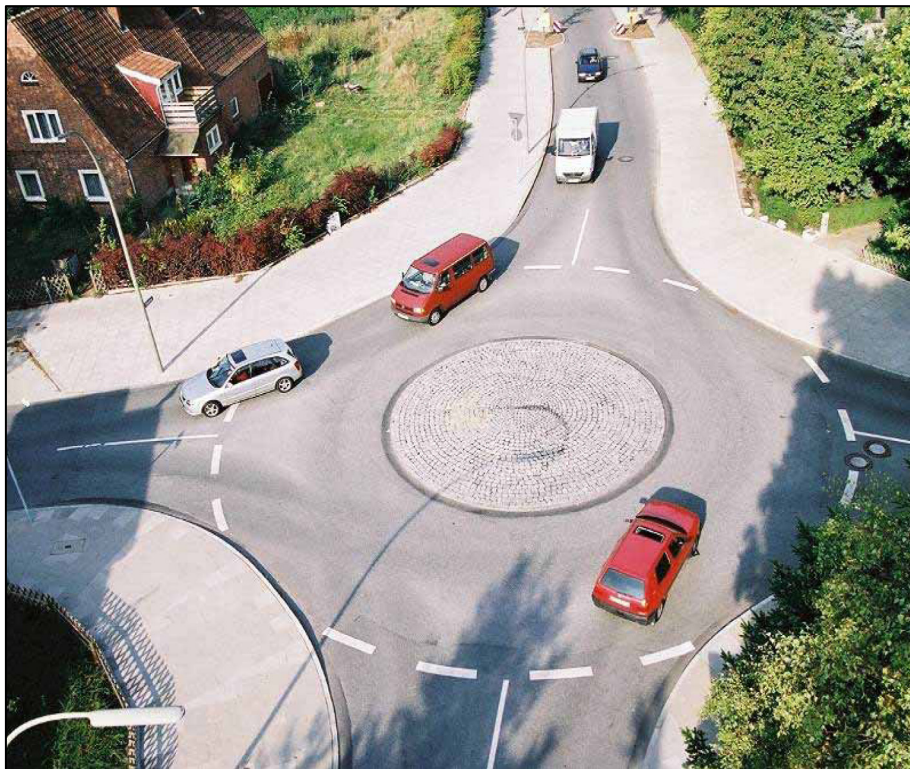


Figura 1.33: Esempio di minirotatoria in Germania

Le linee guida tedesche raccomandano le seguenti regole per una corretta progettazione delle mini rotatorie:

- applicazione solo in area urbana (velocità massima consentita = 50 Km/h);
- diametro esterno compreso tra 13 e 24 m;
- corona giratoria compresa tra 4,5 e 5 m;
- pendenza trasversale dell'anello pari al 2,5% verso l'esterno;

- isola centrale con altezza massima di 12 cm nel suo centro e minima di 3 cm sul bordo;
- capacità massima di 20.000 veic/giorno;
- nessuna svasatura delle corsie d'ingresso;
- solo corsie singole sia in entrata che in uscita.

1.7.2. Le rotatorie compatte a singola corsia

La geometria standard prevista dalla normativa tedesca di questo tipo di rotonde prevede un diametro esterno compreso tra 26 m (come minimo, però sarebbe meglio 30 m) e 45 m. Esse posseggono una sola corsia all'ingresso, in uscita ed all'anello. L'isola centrale non è sormontabile nemmeno dai veicoli pesanti, però per poter permettere loro di compiere qualunque manovra si utilizzano delle corone giratorie più larghe: ad esempio, per un diametro esterno di 26 m è necessario realizzare un anello largo almeno 8 m. A volte è anche consigliabile realizzare un tratto di corona semisormontabile caratterizzato da una pavimentazione differente rispetto a quella dell'anello.



Figura 1.34: Esempio di rotatoria compatta urbana a singola corsia in Germania

Per una corretta progettazione delle rotatorie compatte a singola corsia sia dal punto di vista geometrico che di sicurezza, le norme tedesche consigliano alcune semplici indicazioni:

- i bracci d'ingresso devono convergere il più possibile verso il centro della rotatoria in maniera ortogonale tra di loro. Non sono permesse delle entrate tangenziali. Tutto questo serve per migliorare il grado di sicurezza dell'intersezione riducendo le velocità dei veicoli;
- i raggi d'ingresso e d'uscita devono essere abbastanza piccoli (12÷16 m per gli ingressi e 14÷18 m per le uscite). Naturalmente tali valori vanno aggiustati per permettere le manovre d'attraversamento dei mezzi pesanti;
- la pendenza trasversale dell'anello deve essere del 2,5% verso l'esterno: essa non garantisce un ottimo smaltimento delle acque, ma induce i conducenti a ridurre la propria velocità;
- la larghezza della corona giratoria deve essere variabile tra 6 e 8 m;
- gli ingressi e le uscite devono avere una sola corsia;
- le entrate non devono presentare alcun tipo di svasatura;
- il diametro esterno deve essere variabile tra 26 e 45 m;
- la fascia d'isola semisormontabile deve presentare una pavimentazione diversa da quella dell'anello ed un'altezza massima di 3 cm;
- possono essere realizzate sia in ambito urbano che extraurbano;
- una capacità massima di 25.000 veic/giorno.

Per quanto riguarda i pedoni, le rotatorie compatte sono il tipo d'intersezione per loro più sicuro. Gli attraversamenti pedonali sia in entrata che in uscita devono essere posti ad una distanza di 4÷5 metri dal margine esterno dell'anello. Le zebraure in molti casi non sono necessarie.

I tedeschi dedicano grande cura anche agli attraversamenti ed alle corsie dedicate ai ciclisti. Infatti non sono consentite corsie preferenziali ai margini della corona giratoria perché considerate estremamente pericolose. Fino a 15.000 veic/giorno, i ciclisti possono utilizzare in tranquillità l'anello senza alcuna

installazione addizionale, però al di sopra di questo livello di traffico è necessario realizzare una corsia apposita posta a circa 4÷5 m dall'anello.

1.7.3. Le rotatorie compatte a doppia corsia

In Germania c'è sempre stata una certa diffidenza nei confronti delle rotatorie di grandi dimensioni a causa del loro scarso livello di sicurezza. Ecco perché accanto alla realizzazione di rotatorie compatte a due corsie, si sta sempre più sviluppando un nuovo schema d'intersezione a rotatorie: il *semi-two-lane circle* [1.7], ossia una rotonda con un anello largo quanto due corsie, ma senza demarcazione a terra.

Quindi il *design* delle *semi-two-lane roundabout* è assai simile a quello delle rotatorie compatte a singola corsia: l'unica differenza è dovuta alla larghezza della corona giratoria. Essa è infatti abbastanza larga da permettere a due veicoli di affiancarsi, sebbene a terra non ci sia alcun tipo di demarcazione per le corsie. I mezzi pesanti e gli autobus sono invece costretti ad utilizzare per intero la larghezza dell'anello durante le loro manovre di percorrenza all'interno della rotatoria.



Figura 1.35: Esempio di rotatoria compatta con due semi-corsie in Germania [1.7]

Per quanto riguarda i parametri fondamentali previsti dalla normativa tedesca sulle rotatorie compatte con due semi-corsie si ha:

- diametro esterno compreso tra 40 e 60 m;
- corona giratoria larga $8 \div 10$ m senza lacuna demarcazione a terra;
- ingressi a singola oppure a doppia corsia;
- uscite a corsia singola;
- ai ciclisti non è consentito viaggiare sull'anello.

In ogni caso la realizzazione di rotatorie compatte a due corsie è legata alle seguenti regole:

- se la capacità lo consente, devono essere costruite solo rotatorie a singola corsia all'anello;
- se in vece la capacità è tale da richiedere un allargamento dell'intersezione, allora bisogna compiere i seguenti passi progettuali:
 1. corsie separate per le svolte a destra (Bypass);
 2. rotatorie compatte con due semi-corsie all'anello e con entrate a singola corsia;
 3. ingressi a due corsie dove sia necessario.

Qualunque altro tipo di allargamento della rotatoria è sconsigliato.

Recenti studi condotti in terra tedesca sulle *semi-two-lane roundabout* [1.7] hanno dimostrato come i loro tassi d'incidentalità siano leggermente più alti di quelli delle rotatorie a singola corsia e quindi nettamente migliori di quelli delle rotonde a doppia corsia. In particolare il livello di sicurezza dell'intersezione aumenta se tutti gli ingressi rimangono a singola corsia e se i volumi di pedoni e ciclisti sono bassi.

1.7.4. Le grandi rotatorie

Oltre alle rotatorie compatte con due semi-corsie, che in Francia vengono semplicemente indicate come normali rotonde a singola corsia, in Germania esistono anche le rotatorie di grandi dimensioni a due corsie con diametro esterno compreso tra 55 ed 80 m. L'aumento di capacità di questo tipo di rotatorie rispetto a quelle singola corsia è tanto più sensibile se le uscite sono dotate di due corsie. Ciò però comporta un

serio aumento del livello di pericolosità del sito, il che di fatto sconsiglia, dove sia possibile, la realizzazione di grandi rotatorie. Ed infatti sono assolutamente vietate le uscite a due corsie in Germania.



Figura 1.36: Esempio di rotatoria compatta con due corsie all'anello

Recentemente si stanno conducendo degli studi per sostituire le rotatorie compatte a due corsie con degli schemi di rotatorie a spirale, che verranno trattate in dettaglio nel paragrafo 7.3.

1.8. Bibliografia specifica del Capitolo 1.

- [1.1] Annunziata F., Cecere E., Coni M., Maltinti F., Pinna F., Portas S. (2007)-
Progettazione stradale. Dalla ricerca al disegno delle strade - *Dario Flaccovio Editore*, Palermo.
- [1.2] Canale S., Distefano N., Leonardi S., Pappalardo G. (2005) - Progettare le
rotatorie - *EPC Libri*, Roma.
- [1.3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – D. M. 19/04/2006: Norme
funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali - Roma.
- [1.4] FHWA (2000) – Roundabouts: an informational guide – Report n. FHWA-
RD-00-067 – Federal Highway Administration, U.S. Department Of
Transportation, Washington (USA).
- [1.5] SETRA (1997) – Carrefours giratoires: evolution des caracteristiques
geometriques – Documentation Technique 44 – Ministere de l’equipement du
logement, de l’amenagement du territoire et des transports, Parigi (Francia).
- [1.6] Bovy P., Dietrich K., Harmann A. et AA.VV. (1991) – Guide Suisse des
giratoires – FVS/FSS-EPFL – Ecole Polytechnique Federale de Lausanne,
Losanna (Svizzera).
- [1.7] Brilon W. (2005) – Roundabouts: a state of the art in Germany – Atti del
National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [1.8] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2005) - D.L. 285/1992: Nuovo
Codice della strada - Gazzetta ufficiale n.114 del 18/05/1992 e successive
modifiche.
- [1.9] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Ispettorato Generale per la
circolazione e la sicurezza stradale (2001) - Norme sulle caratteristiche
funzionali e geometriche delle intersezioni stradali - *Rapporto di Sintesi a
Carattere Prenormativo*.
- [1.10] COMMISSIONE VSS 2 (1999) – Norme Svizzere SN 640-263 –
Intersezioni: le rotatorie – Unione dei professionisti svizzeri della strada,
Losanna (Svizzera).

- [1.11] NAASRA (1986) – Roundabouts: A Design Guide – National Association of Australian State Road Authorities, Sydney (Australia).
- [1.12] Provincia di Padova: Assessorato alla Viabilità (2002) - Linee guida per la progettazione e la verifica delle intersezioni a rotatorie - Provincia di Padova.
- [1.13] Curti V., Marescotti L., Mussone L. (2001) – Rotonde. Progetto e valutazione per la sistemazione a rotonda delle intersezioni – Libreria CLUP, Milano.
- [1.14] CETUR (1994) - Les mini-giratoires - Lione (Francia).
- [1.15] Brilon W., Wu N., Bondzio L. (1997) - Unsignalized intersections in Germany: A state of the art 1997 - in Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals, Bochum (Germania).
- [1.16] Kimber R. M. (1980) – The traffic capacity of roundabouts – TRRL Laboratory, Report 942, Crowthorne (Regno Unito).

Capitolo 2.

LE ROTATORIE COME STRUMENTO DI MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA INTRINSECA DI UNA INTERSEZIONE

2.1. Introduzione

Una delle principali caratteristiche che contraddistinguono la rotatoria da un qualunque altro tipo di intersezione a raso è il miglioramento del livello di sicurezza, che consiste in una minore frequenza degli incidenti e, soprattutto, in una minore pericolosità degli stessi. In particolare, tale livello di sicurezza è sensibilmente maggiore per le rotatorie di piccole e medie dimensioni rispetto a quelle più grandi e multicorsia, le quali, oltre ad avere un tasso d'incidentalità più alto, presentano anche seri problemi per quanto riguarda l'attraversamento dell'intersezione da parte dei pedoni e dei ciclisti (utenti deboli).

I motivi principali del miglioramento del livello di sicurezza nelle rotatorie sono i seguenti [2.1]:

- Le rotatorie presentano un minor numero di punti di conflitto rispetto alle intersezioni ordinarie a raso. Infatti attraverso l'uso di rotonde si eliminano tutti i possibili conflitti legati alle manovre di svolta a sinistra e quelli dovuti a causa della mancata precedenza. Le rotatorie con ingressi a singola corsia garantiscono inoltre livelli di sicurezza più elevati rispetto a quelle con approcci multicorsia in quanto riducono notevolmente il numero di punti di conflitto e diminuiscono le distanze che devono percorrere i pedoni durante l'attraversamento.
- Le basse velocità di percorrenza che impongono le rotatorie consentono ai conducenti di avere tempi di reazione, in caso di pericolo d'incidente, più lunghi, migliorando così il grado di sicurezza dell'intersezione.

- La rotatoria, proprio per la sua conformazione geometrica, costringe gli utenti a percorrerla più o meno alla stessa velocità, riducendo così la gravità degli incidenti rispetto alle altre intersezioni a raso, le quali spesso invece sono caratterizzate da forti squilibri cinematici.
- Nelle rotatorie i pedoni, ad ogni ramo, attraversano solo una corrente di traffico. Infatti nelle rotonde, i punti di conflitto non dipendono dalle caratteristiche della circolazione, in quanto i veicoli seguono percorsi ben definiti ed inoltre la loro velocità è notevolmente ridotta a causa della deflessione dell'intersezione stessa.

La frequenza degli incidenti in un incrocio è strettamente correlata al numero dei punti di conflitto ed alla tipologia ed intensità dei flussi che in essa si intersecano. In sostanza, un punto di conflitto non è altro che il luogo dove i percorsi di due veicoli, o di un veicolo ed un ciclista o un pedone, convergono, divergono o si attraversano l'un l'altro.

2.1.1. I conflitti tra i veicoli

I conflitti tra i veicoli che si possono presentare negli incroci a raso possono essere suddivisi nelle seguenti tre macrocategorie [2.3]:

- Conflitti in coda: tali scontri sono causati dai veicoli che si trovano in coda all'ingresso di una rotatoria o di un'intersezione convenzionale; in genere queste collisioni sono le meno pericolose perché coinvolgono le parti più protette dei veicoli (anteriore e posteriore) e perché la differenza di velocità tra i veicoli è relativamente bassa.
- Conflitti d'immissione e di diversione: questi sono causati dalla congiunzione o dalla separazione di due flussi di traffico. Le tipologie più comuni d'incidente dovute a manovre d'immissione sono i tamponamenti e gli scontri laterali. I conflitti dovuti all'immissione sono di solito più gravi di quelli provocati dalle manovre di diversione in quanto coinvolgono parti del veicolo che solitamente sono meno protette.

- Conflitti d'attraversamento: quest'ultimi invece sono causati dall'intersezione di flussi di traffico. Sono sicuramente i più pericolosi perché spesso avvengono a velocità sostenute e con angoli d'impatto molto elevati (scontri frontali o fronto-laterali).

Nella Figura 2.1 vengono messi a confronto i punti di conflitto di un'intersezione a T con quelli di una rotatoria a tre bracci: si può facilmente notare come i punti di conflitto diminuiscono da nove a sei nel passare da uno schema d'intersezione tradizionale ad uno schema a rotatoria.

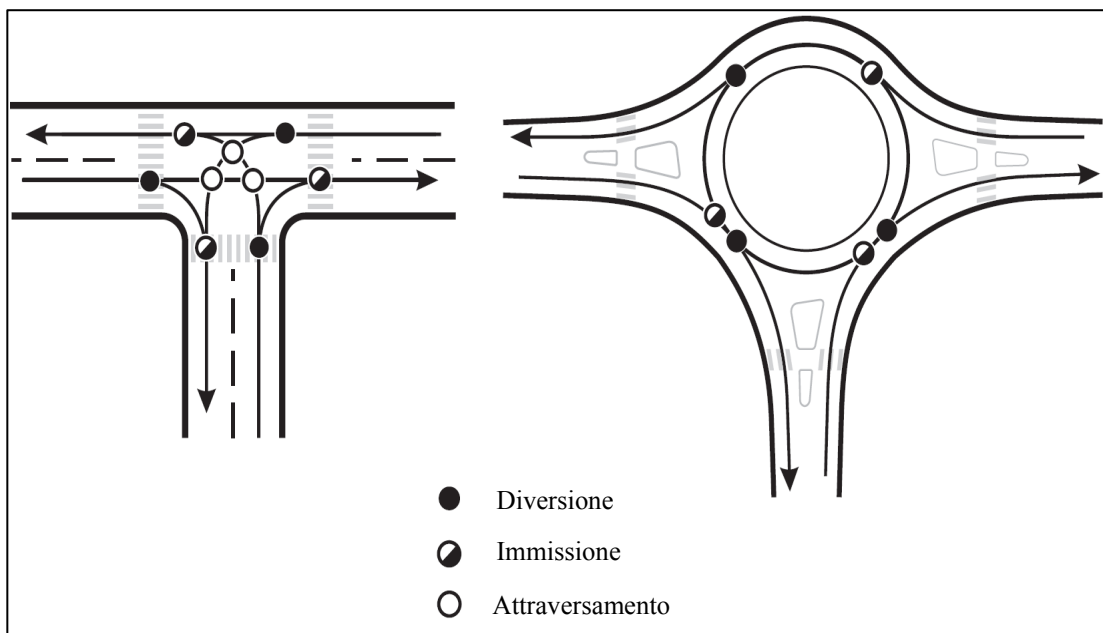


Figura 2.1: Punti di conflitto in un incrocio a T ed in una rotatoria a tre rami [2.3]

Nella Figura 2.2 è ancora più evidente il vantaggio in termini di riduzione di punti di conflitto nel passare da un classico quadrivio ad una rotatoria con quattro rami: infatti i conflitti da 32 diventano solo 8, con una riduzione del 75%.

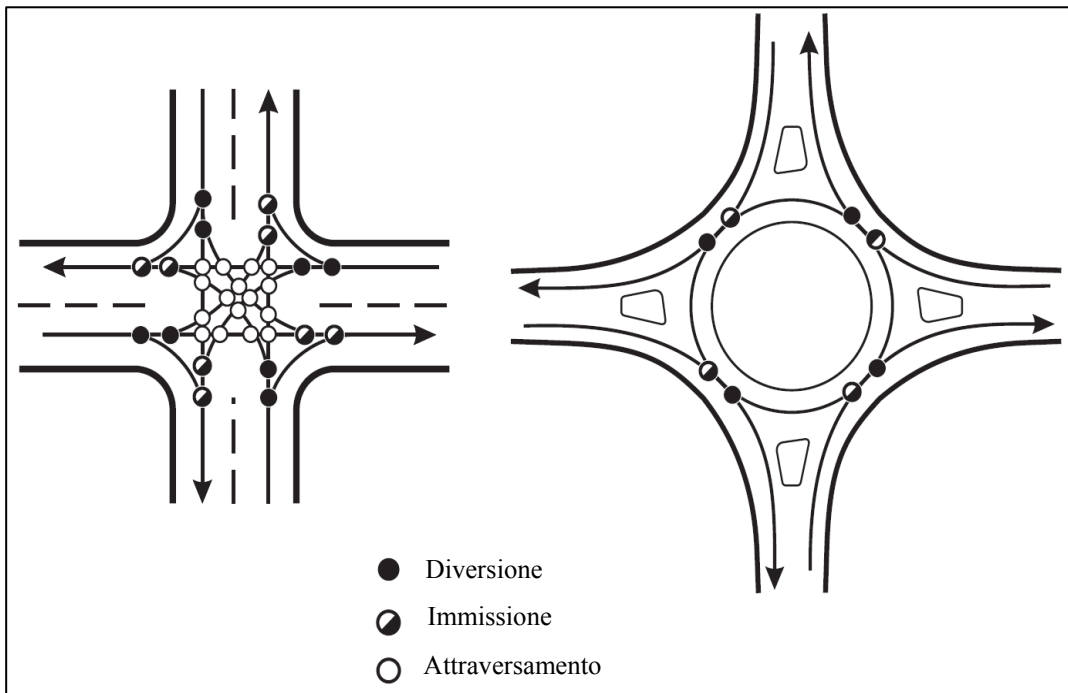


Figura 2.2: Punti di conflitto in un quadrivio ed in una rotatoria a quattro rami [2.3]

Si nota facilmente come l'abbattimento dei punti di conflitto nelle rotatorie a singola corsia rispetto alle corrispondenti intersezioni classiche sia dovuta essenzialmente all'eliminazione delle manovre d'attraversamento ed alla trasformazione delle svolte a sinistra in svolte a destra.

Considerazioni un po' diverse vanno fatte per le rotatorie a due corsie all'anello: infatti la presenza di entrate e di uscite a più corsie aumenta notevolmente il numero dei punti di conflitto.

I conflitti che si possono verificare nelle rotatorie a due (o più) corsie non esistono nelle rotatorie a corsia singola. Essi infatti avvengono quando i conducenti utilizzano in maniera scorretta le corsie oppure quando compiono delle svolte errate.

Nelle Figure 2.3 e 2.4 sono rappresentati questi tipi di conflitto in una rotatoria due corsie.

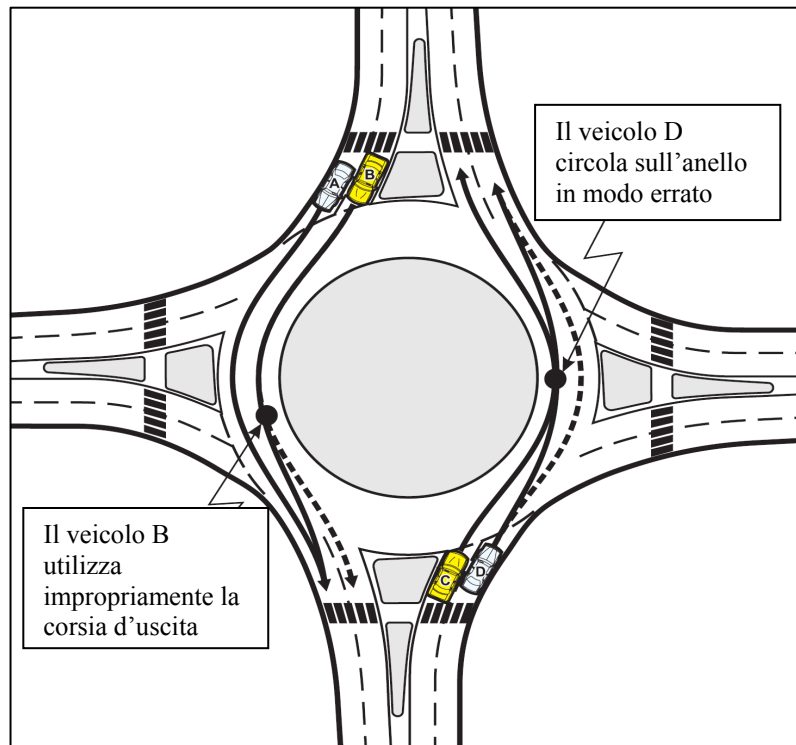


Figura 2.3: Conflitti generati dall'uso errato delle corsie in una rotonda a due corsie [2.3]

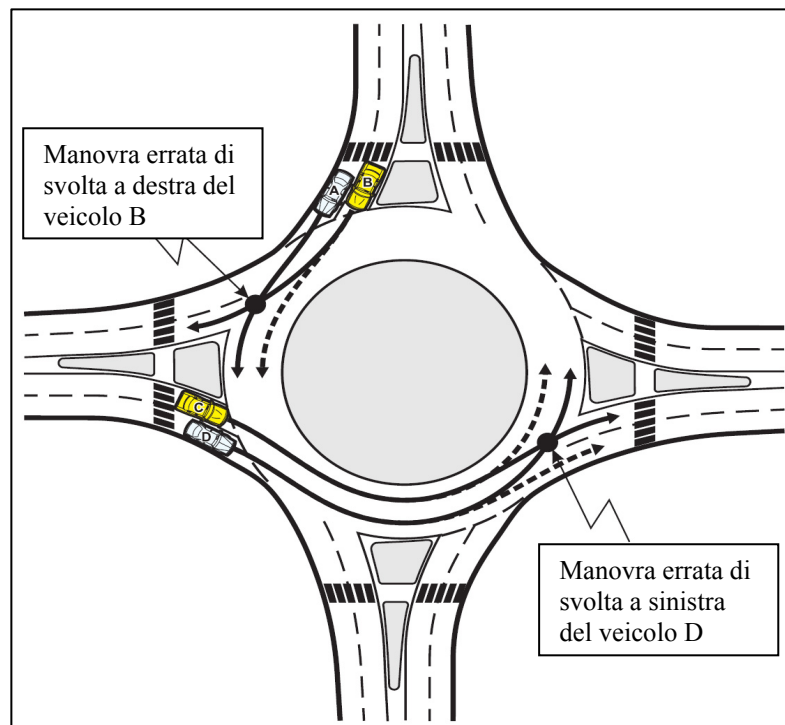


Figura 2.4: Conflitti generati da errate manovre di svolta in una rotonda a due corsie [2.3]

In particolare, in Figura 2.4, si nota come questo tipo d'incidenti possano essere provocati da elementi geometrici mal realizzati che non permettono agli utenti di eseguire le traiettorie corrette all'interno dell'anello.

2.1.2. I conflitti tra i veicoli ed i pedoni

I conflitti tra veicoli e pedoni avvengono in qualunque tipo d'intersezione, anche in presenza di flussi pedonali minimi.

Nel caso di intersezioni semaforizzate, una buona regolazione delle fasi semaforiche può ridurre i punti di conflitto. In ogni caso, come si può notare dalla Figura 2.5, un'intersezione a quattro braccia semaforizzata genera 16 punti di conflitto tra veicoli e pedoni. Infatti per ogni attraversamento pedonale ci sono ben quattro potenziali punti di conflitto con i veicoli provenienti dalle seguenti direzioni [2.3]:

- attraversamenti con il rosso (ad alta velocità, illegali);
- svolte a destra con il verde (legali);
- svolte a sinistra con il verde (solitamente legali);
- svolte a destra con il rosso (spesso consentite).

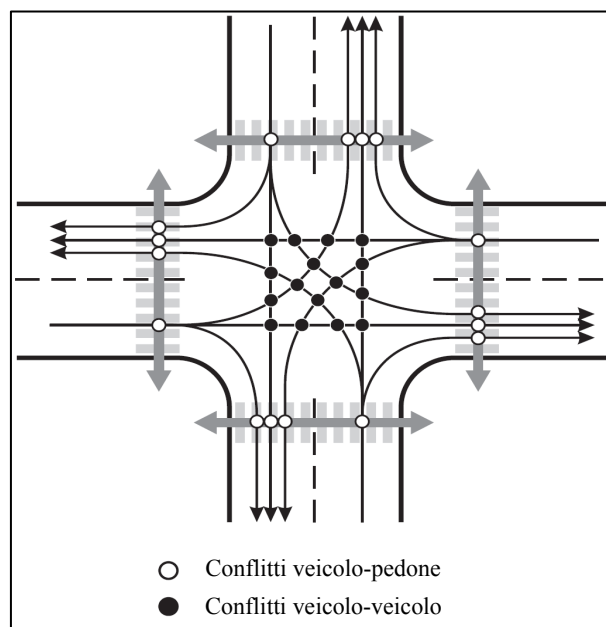


Figura 2.5: Conflitti veicoli-pedoni in un'intersezione semaforizzata [2.3]

Nel caso di intersezioni a rotatoria, come si può ben notare dalla Figura 2.6, i conflitti veicoli-pedoni si riducono ad 8, due per ogni ingresso, di cui uno in entrata ed uno in uscita.

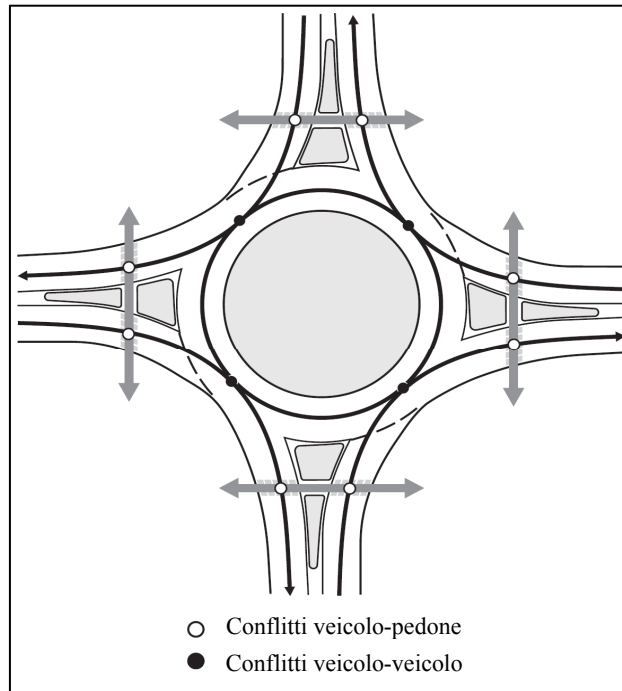


Figura 2.6: Conflitti veicoli-pedoni in una rotatoria a singola corsia [2.3]

Comunque sia nel caso di intersezioni tradizionali che di rotatorie a più corsie il numero di punti di conflitto pedone-veicolo aumenta per ogni corsia che il pedone deve attraversare.

2.1.1. I conflitti tra i veicoli ed i ciclisti

I conflitti tra veicoli e ciclisti sono del tutto analoghi a quelli che sorgono tra i veicoli stessi. Però, poiché i ciclisti di solito viaggiano sul lato destro della corsia, bisogna considerare degli ulteriori punti di conflitto dovuti all'intersezione dei loro percorsi con quelli dei veicoli a motore che nel compiere le loro manovre utilizzano delle fasce d'ingombro più ampie.

In Figura 2.7 sono riportati i punti di conflitto tra veicoli e ciclisti che sorgono in un incrocio semaforizzato a quattro bracci (distinti a seconda che il ciclista compia la manovra di svolta a sinistra come un veicolo a motore o come un pedone).

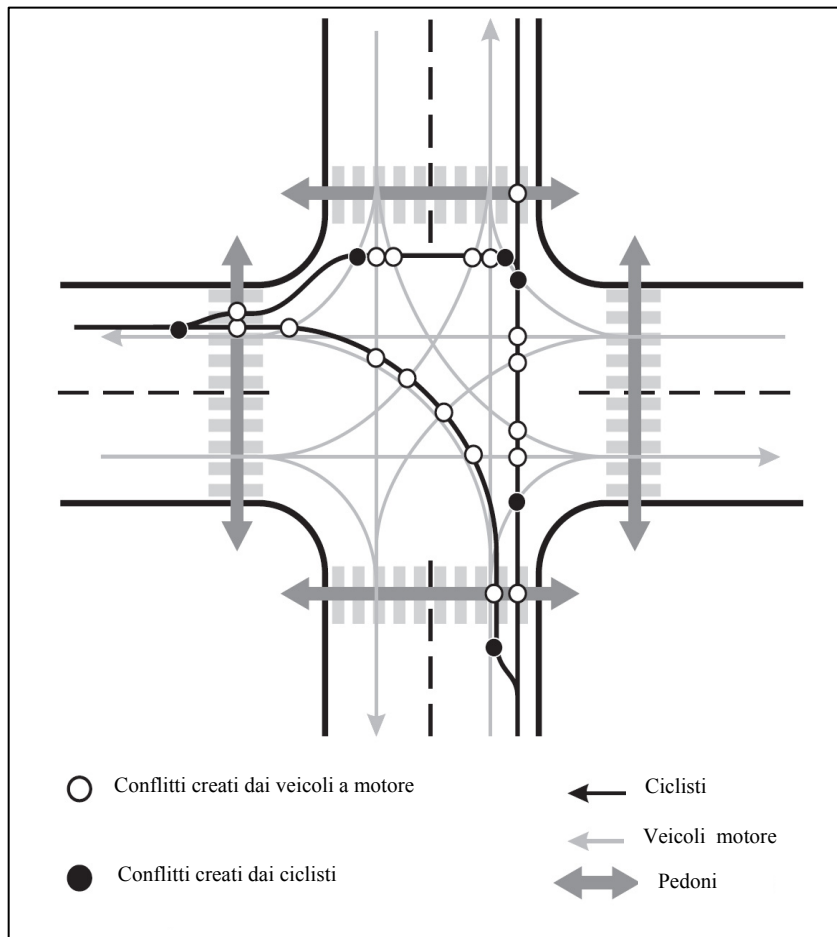


Figura 2.7: Conflitti veicoli-ciclisti in un'intersezione semaforizzata [2.3]

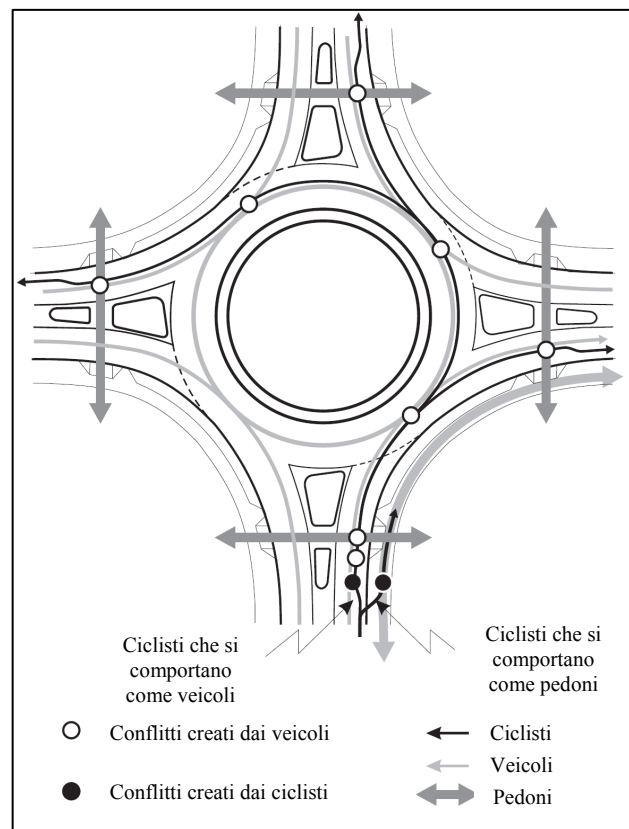


Figura 2.8: Conflitti veicoli-ciclisti in una rotatoria [2.3]

Nelle rotatorie, i ciclisti possono decidere di viaggiare come veicoli o come pedoni. In Figura 2.8 sono riportati i potenziali punti di conflitto a seconda delle scelte che un ciclista può compiere. Quando un ciclista viaggia come un veicolo in una rotatoria a singola corsia, genera un punto di conflitto aggiuntivo nel momento in cui si immette nel traffico veicolare; i conflitti rimanenti sono del tutto analoghi a quelli visti tra i veicoli. Nel caso invece di rotatorie a due corsie o di grandi dimensioni, i ciclisti viaggiano all'esterno della corona giratoria: ciò genera un potenziale punto di conflitto in prossimità dell'uscita perché essi sono meno visibili ai veicoli.

Quando invece i ciclisti si comportano come i pedoni, i conflitti si generano in maniera più frequente nei punti in cui essi escono dalla carreggiata per immettersi sul marciapiede. Inoltre la condivisione del marciapiede con i pedoni crea ulteriori conflitti che possono produrre estreme difficoltà specialmente ai pedoni disabili.

2.2. Confronto tra incidentalità in rotatoria ed intersezioni classiche

Sebbene le rotatorie abbattano notevolmente il numero di punti di conflitto rispetto alle intersezioni tradizionali, ciò non vuol dire che in queste particolari forme d'incrocio non avvengano incidenti. Anzi, è molto utile conoscere le varie tipologie d'incidente che possono avvenire in rotatoria al fine di prevedere eventuali interventi d'adeguamento su rotonde esistenti.

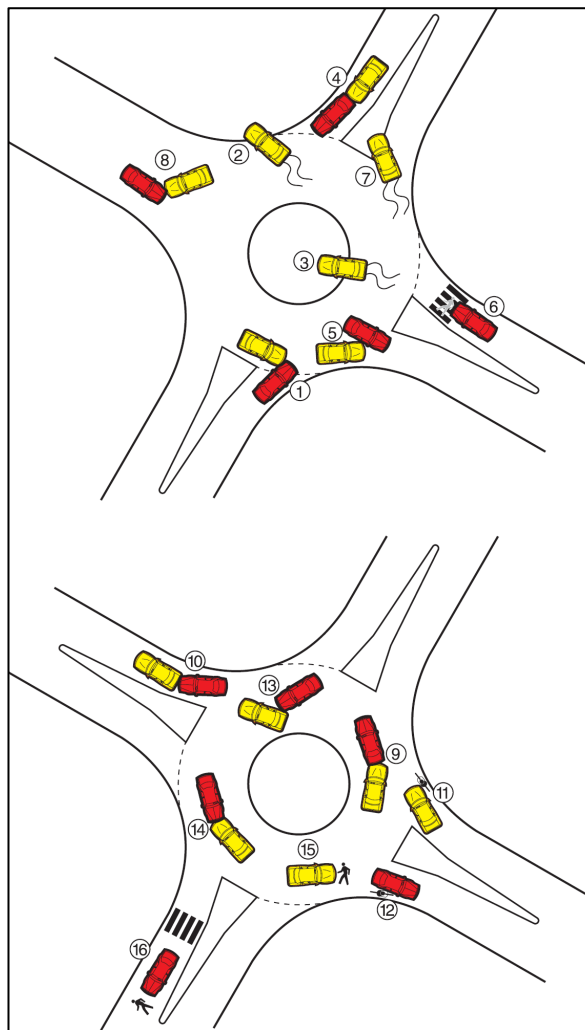


Figura 2.9: Posizione e tipologie d'incidente in rotatoria [2.3]

Da uno studio internazionale condotto in Francia, Australia e Regno Unito [2.3] su degli incidenti accaduti in rotatoria, sono stati individuati 16 diverse tipologie

d'incidente (Fig. 2.9): in Tabella 2.1 vengono riportati i risultati delle analisi statistiche.

N°	Tipologia d'incidente	Francia	Australia	Regno Unito
1	Rifiuto della concessione del dare precedenza (urto tra veicoli in entrata e veicoli in circolo)	36,6%	50,8%	71,1%
2	Fuoriuscita del veicolo isolato	16,3%	10,4%	8,2%
3	Perdita di controllo in entrata del veicolo stesso	11,4%	5,2%	-
4	Tamponamento in entrata	7,4%	16,9%	7,0%
5	Collisione tra veicolo circolante e veicolo in uscita	5,9%	6,5%	-
6	Collisione con il pedone in attraversamento in ingresso	5,9%	-	3,5%
7	Perdita di controllo in uscita da parte del veicolo isolato	2,5%	2,6%	-
8	Collisione tra veicolo in uscita e veicolo in ingresso	2,5%	-	-
9	Tamponamento nella corona giratoria	0,5%	1,2%	-
10	Tamponamento in uscita	1,0%	0,2%	-
11	Collisione tra veicolo e ciclista (in entrata)	1,0%	-	-
12	Collisione tra veicolo e ciclista (in uscita)	1,0%	-	-
13	Collisione durante la manovra di scambio sull'anello	2,5%	2,0%	-
14	Errata direzione sulla corona giratoria	1,0%	-	-
15	Collisione con pedone nella corona giratoria	3,5%	-	-
16	Urto con pedone in attraversamento sul tratto d'uscita	1,0%	-	-
	Altri tipi di collisione	-	2,4%	10,2%
	Altri tipi di scontri laterali	-	1,6%	-

Tabella 2.1: Tipologie d'incidente in rotatoria e percentuali d'accadimento [2.3]

Da una rapida analisi dei dati riportati nella Tabella 2.1 si nota come le tipologie d'incidente predominanti siano essenzialmente tre:

- un veicolo in ingresso si scontra con uno circolante sull'anello;
- un veicolo isolato fuoriesce dalla corona giratoria;
- un veicolo isolato perde il controllo urtando contro l'isola centrale.

Nei paragrafi successivi verranno espone le principali esperienze nazionali ed internazionali [2.1] in merito alla sicurezza offerta dallo schema a rotatoria rispetto alle intersezioni tradizionali mediante delle analisi “before-after” condotte sui dati d'incidentalità (ossia prima e dopo l'installazione delle rotonde).

2.2.1. Statistiche d'incidentalità negli Stati Uniti [2.1] [2.3]

Nel 1997 furono resi noti i dati sull'incidentalità derivanti da un'analisi condotta su 11 rotatorie situate negli USA, prima e dopo la loro costruzione [2.3]. Furono calcolate le frequenze medie annuali d'incidente su tali rotatorie sia prima (per un

periodo temporale abbastanza ampio) che dopo la loro costruzione (per un arco temporale più breve), distinguendo gli incidenti solamente in due categorie:

- incidenti con morti e/o feriti;
- incidenti con soli danni materiali.

In generale si è notato che i sinistri più gravi avvenivano prima della realizzazione delle rotatorie.

Nella Tabella 2.2 sono riportati i risultati derivanti da questa campagna d'indagine tenendo conto che con il termine “piccole rotatorie” s'intende quelle con una sola corsia all'anello e con diametro esterno compreso tra 30 e 35 m, mentre con “grandi rotatorie” quelle con almeno due corsie e con diametro esterno maggiore di 50 m.

Tipi di rotatorie	Siti	Incidenti medi annui						Variazione percentuale		
		Prima			Dopo			Totale	Con feriti e/o morti	Con solo danni materiali
		Totale	Con feriti e/o morti	Con solo danni materiali	Totale	Con feriti e/o morti	Con solo danni materiali			
Piccole	8	4,8	2,0	2,4	2,4	0,5	1,6	-51%	-73%	-32%
Grandi	3	21,5	5,8	15,7	15,3	4,0	11,3	-29%	-31%	-10%
Totale	11	9,3	3,0	6,0	5,9	1,5	4,2	-37%	-51%	-29%

Tabella 2.2: Frequenze medie annue degli incidenti before-after su 11 rotatorie negli USA

Come si vede dai dati della tabella, le rotatorie analizzate sono 8 di piccole dimensioni e 3 grandi.

Per le rotatorie piccole si è avuto un abbattimento medio della frequenza d'incidentalità totale pari al 51%, con un picco del 73% per quanto riguarda gli incidenti con morti e/o feriti.

Il miglioramento del livello di sicurezza è assai sensibile anche per le rotatorie grandi, dove ad una diminuzione del 31% della frequenza degli incidenti con morti e/o feriti, corrisponde un abbattimento medio del 29%.

Per quanto riguarda invece il confronto delle frequenze degli incidenti con soli danni materiali, si evince che, sia per le piccole che per le grandi rotatorie, si è avuta una riduzione anche se più contenuta rispetto all'altro tipo di sinistri.

Anche il numero d'incidenti con pedoni e ciclisti coinvolti ha subito un drastico decremento passando da una frequenza annuale di 2,3 a 0,6: però questo è un dato che statisticamente non è da ritenersi attendibile.

Comunque, altri studi condotti negli USA negli ultimi anni hanno evidenziato risultati concordanti con quelli appena esposti. Infatti un recente documento, in cui sono riportati i dati di un'analisi *before-after* condotta su 6 rotatorie ubicate negli Stati Uniti, ha mostrato un abbattimento degli incidenti compreso tra il 60% ed il 70%.

2.2.2. Statistiche d'incidentalità in Olanda [2.1]

Verso la fine del 1992 in Olanda fu pubblicato uno studio *before-after* condotto su 181 rotatorie distribuite su tutto il territorio [2.30].

Tali rotatorie, tutte ad una corsia e con diametro prossimo ai 30 m, sono state realizzate in sostituzione di intersezioni regolate da segnale di stop o di dare precedenza.

In Tabella 2.3 vengono riportati i tassi medi annuali d'incidentalità ottenuti da questa campagna d'indagine.

	Incidenti medi annui		Variazione percentuale
	Prima	Dopo	
Incidenti totali	4,9	2,4	-51%
Incidenti con feriti	1,3	0,37	-72%
Incidenti coinvolgenti motocicli e biciclette	0,55	0,31	-44%

Tabella 2.3: Tassi d'incidentalità medi annui *before-after* su 181 rotatorie in Olanda

In particolare si è avuto una riduzione dell'81% degli incidenti gravi rispetto alle tradizionali intersezioni a raso.

Per quanto riguarda invece la riduzione dei danni gravi associati alle diverse categorie d'utenti si è riscontrato:

- una riduzione del 95% per i passeggeri dei veicoli;
- una riduzione del 63% per i passeggeri dei motocicli;
- una riduzione del 30% per i ciclisti;
- una riduzione del 89% per i pedoni.

In alcuni casi i vantaggi maggiori si sono manifestati nel primo anno e mezzo dopo l'introduzione delle rotatorie.

2.2.3. Statistiche d'incidentalità in Australia [2.1]

In Australia, un primo studio *before-after* condotto nel 1981 su 73 rotatorie situate nello stato di Victoria ha messo in evidenza una riduzione del 74% della frequenza d'incidentalità. Tale riduzione è risultata maggiormente evidente per quelle rotatorie caratterizzate da volumi medio-bassi.

A questa analisi si è aggiunto un documento presentato nel 1990 dal titolo "Accidents at roundabouts in New South Wales" in cui vengono riportati i dati di una campagna prima-dopo effettuata su 230 siti. Nella Tabella 2.4 sono sintetizzati i risultati di tale indagine.

	Incidenti medi annui		Variazione percentuale
	Prima	Dopo	
Incidenti totali	3,910	2,289	-41%
Incidenti con morti	0,024	0,009	-63%
Incidenti con feriti	1,045	0,571	-45%
Incidenti con solo danni materiali	2,841	1,709	-40%

Tabella 2.4: Frequenze medie annuali d'incidente *before-after* su 230 rotatorie in Australia

Nel periodo d'analisi è stata osservata una notevole riduzione degli incidenti nei siti caratterizzati dall'introduzione di rotatorie.

Dall'analisi dei dati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- le rotatorie determinano un elevato rapporto benefici/costi;
- il miglior rapporto benefici/costi si ha per diametri dell'isola centrale compresi tra 10 e 20 m;
- la sostituzione di un incrocio tradizionale con una rotatoria comporta una netta diminuzione del numero d'incidenti;
- le rotatorie realizzate per diminuire la frequenza degli incidenti sono più efficaci di quelle progettate per ridurre la velocità o per smaltire flussi veicolari;
- il rapporto benefici/costi è più vantaggioso per le rotatorie situate su strade locali rispetto a quelle poste su strade extraurbane;
- è necessario realizzare ulteriori studi per poter determinare quali siano le caratteristiche realmente efficaci per un concreto miglioramento del grado di sicurezza delle rotatorie.

2.2.4. Statistiche d'incidentalità in Germania [2.1]

Nel 1991 Stuwe [2.25] condusse uno studio sui tassi d'incidentalità su 14 rotatorie e su 14 incroci classici a raso collocati in aree vicine tra di loro. Ciò ha consentito di mettere in confronto parametri di traffico confrontabili, come i flussi veicolari ed il comportamento degli utenti.

Questa indagine ha condotto ai seguenti risultati:

- le rotatorie di grande diametro di vecchia progettazione, caratterizzate da due corsie agli ingressi e con bassi angoli d'incidenza, presentano un elevato numero d'incidenti;
- le rotatorie moderne, con isola centrale dal diametro variabile tra 28 e 35 m e con una sola corsia all'anello, fanno invece registrare pochi incidenti e con lievi danni.

Inoltre, durante il periodo di studio, tre incroci a raso sono stati sostituiti da rotatorie ed è stato così possibile effettuare uno studio *before-after*. Nelle nuove installazioni a rotatoria (con diametri dell'isola interna compresi tra 28 e 35 m) si è avuto un drastico abbattimento degli incidenti totali che sono passati da 4 all'anno a 2,4; gli incidenti che hanno invece comportato danni alle persone sono passati da 3,3 a 0,5 per anno.

In un'altra indagine prima-dopo condotta da Brilon nel 1996 su 34 rotatorie a corsia singola e con diametro di circa 30 m, i risultati hanno messo in evidenza una riduzione totale degli incidenti del 40%. Tale riduzione diventa ancora più evidente se si parla di incidenti con feriti gravi.

In particolare il grado di sicurezza aumenta in maniera considerevole per le rotatorie poste fuori dall'area urbana: qui si ha una diminuzione del 84% del costo totale degli incidenti, rispetto al "solo" 36% dell'area urbana.

Anche da questo studio è stato possibile trarre delle particolari conclusioni:

- la misura ideale del diametro delle rotatorie a corsia singola sembra essere 30 m;
- rotatorie circolari sono da preferire a quelle ellittiche;

- la zona dell'isola centrale semisormontabile e pavimentata deve garantire una larghezza dell'anello pari almeno a 4 – 4,5 m;
- la corona giratoria deve possedere una pendenza trasversale verso l'esterno della rotatoria stessa in modo da migliorare la visibilità dei veicoli agli ingressi e da ridurre la velocità di percorrenza dei veicoli sull'anello;
- i pali dell'illuminazione devono essere posti all'esterno della rotatoria in modo che la luce sia diretta verso il centro della rotonda stessa;
- per la sicurezza dei pedoni, un ruolo importante è assunto dalle isole divisionali, che devono avere una larghezza compresa tra 1,6 e 2,5 m, con gli attraversamenti posti 4 – 5 m prima dell'ingresso sull'anello.

2.2.5. Statistiche d'incidentalità in Inghilterra [2.1]

Uno dei più importanti studi sulla sicurezza condotti in Gran Bretagna risale al 1984 e porta il titolo “*Accidents at 4-arm roundabout*” di Maycoch e Hall [2.21]. In tale indagine sono riportati i dati d'incidentalità rilevati su 84 rotatorie extraurbane a quattro bracci situate in Inghilterra.

Gli obiettivi principali dello studio erano quelli di determinare le peculiarità degli incidenti in rotatoria e di dedurre le correlazioni che legano i flussi veicolari e le caratteristiche geometriche delle rotonde con i tassi d'incidentalità.

Alcune delle conclusioni più importanti derivate da questa indagine sono riportate qua di seguito:

- le piccole rotatorie situate in aree con limite di velocità compreso tra 50 e 70 Km/h sono quelle caratterizzate dal più alto tasso d'incidente;
- nelle piccole rotatorie più di due terzi degli incidenti che avvengono sono del tipo “in entrata” ed “in circolazione”; al contrario nelle grandi rotatorie gli incidenti si dividono equamente tra i casi di entrata-circolazione, in avvicinamento e del veicolo isolato;
- la frequenza media degli incidenti, per tutte le rotonde analizzate, è pari a 3,31 incidenti a persona per anno (il 16% di essi sono classificati come

mortali o gravi). In rapporto ai flussi, si è calcolato un valore medio di 27,5 incidenti per 100 milioni di veicoli che impegnano la rotatoria;

- gli incidenti in cui sono coinvolti i ciclisti sono compresi tra il 13% ed il 16% del numero complessivo dei sinistri avvenuti sulle rotatorie esaminate; gli incidenti che hanno visto coinvolti i motociclisti variano tra il 30% ed il 40%; quelli che invece vedono coinvolti i pedoni variano tra il 4% ed il 6%.

2.2.6. Statistiche d'incidentalità in Francia [2.1]

Il “*Centre d'Etudes Techniques de L'Equipemnt de l'Ouest*” ha realizzato uno studio nel 1986 su 83 rotatorie site in Francia [2.26].

Da questa indagine è emerso che il miglioramento del grado di sicurezza delle rotatorie rispetto alle altre intersezioni a raso è dovuto essenzialmente al livellamento delle priorità in ingresso. Inoltre è stato messo in evidenza come si verificano meno incidenti sulle rotatorie più piccole rispetto a quelle più grandi e con corona ovale, e come sia preferibile imporre una pendenza dell'anello verso l'esterno per poter migliorare la visibilità in entrata.

Le Tabelle 2.5, 2.6 e 2.7 riportano i dati ricavati da questo studio.

	Incidenti medi annui		Variazione percentuale
	Prima	Dopo	
Incidenti con morti	0,16	0,02	-88%
Incidenti con feriti	1,42	0,31	-78%
Numero di feriti	2,78	0,49	-82%

Tabella 2.5: Frequenze medie annuali d'incidente before-after su 83 rotatorie in Francia

Diametro interno	Numero di rotatorie	Incidenti (per singola rotatoria)
< 30 m	13	0,69
30 – 50 m	11	1,54
50 -70 m	26	1,58
70 – 90 m	16	1,81
> 90 m	8	3,80
Corona Ovale	9	4,40

Tabella 2.6: Statistiche d'incidentalità legate al diametro interno delle rotatorie in Francia

	Pendenza verso l'interno (42 rotatorie)	Pendenza verso l'esterno (21 rotatorie)
Incidenti totali (per anno, per rotatoria)	0,50	0,28
Incidenti causati dalla perdita di controllo in ingresso	0,12	0,06
Incidenti causati dalla perdita di controllo sull'anello	0,09	0,00
Incidenti dovuti al rifiuto di dare precedenza in ingresso	0,14	0,09

Tabella 2.7: Statistiche d'incidentalità legate alla pendenza dell'anello delle rotatorie in Francia

Si può notare, dai dati riportati nelle precedenti tabelle, come in questo studio non si sia tenuto conto dei volumi di traffico smaltiti rispettivamente dai diversi tipi di rotatoria (considerando che su rotatorie più grandi circolano flussi più elevati, allora le statistiche d'incidentalità si potrebbero ribaltare a favore delle rotatorie con diametri maggiori) e come non siano stati acquisiti i dati relativi ai sinistri con soli danni materiali.

Un'indagine analogo, condotta questa volta su 522 rotatorie francesi e pubblicata nel 1991 da Alphan, Noelle e Guichet [2.22] mette in evidenza come il 90% di queste rotonde non abbia manifestato alcun incidente grave. In particolare si hanno i seguenti tassi d'incidentalità:

- 0,15 incidenti gravi totali per rotatoria;
- 0,01 morti per rotatoria;
- 0,20 feriti per rotatoria.

Il 75% di questi feriti è stato reputato lieve, mentre solo il 25% come grave. Il TGM medio su tutte le rotatorie analizzate è stato pari a circa 12.500 veic/giorno.

Per quanto riguarda il tasso d'incidentalità dei ciclisti e dei motociclisti, esso è sempre migliore di quello delle intersezioni semaforizzate anche se non è significativo. In ogni caso è stato possibile attribuire oltre metà degli incidenti in cui sono stati coinvolti utenti in bicicletta o in motocicletta al rifiuto di concedere la precedenza da parte delle vetture in entrata dai rami della rotatoria. La maggior parte di questi incidenti si è inoltre verificata negli ingressi a due corsie.

2.2.7. Statistiche d'incidentalità in Svizzera [2.1]

Un'analisi d'incidentalità condotta in Svizzera sulle prime due rotatorie realizzate (con diametro rispettivamente pari a 30 e 32 m) verso la fine degli anni '70 ha mostrato una riduzione totale degli scontri pari al 75% mentre un abbattimento del 90% del numero dei feriti.

Un ulteriore studio realizzato nel 1988 sul grado di sicurezza delle utenze deboli (basato su delle interviste condotte su 250 tra ciclisti e conducenti di motocicli e su osservazioni video) ha estrapolato i seguenti risultati:

- il 93% degli intervistati affermò di preferire la rotatorie alle intersezioni regolate da segnale di stop;
- l'81% dei ciclisti e dei motociclisti si è dimostrato soddisfatto dell'utilizzo delle rotatorie;
- il 74% dei ciclisti ha ammesso di sentirsi sicuro in rotatoria.

L'analisi delle riprese video invece ha fatto notare che:

- il 53% dei ciclisti e dei motociclisti si mantiene sul lato destro dell'anello;
- il 20% guida in mezzo alla corsia;
- il 21% viaggia sul lato sinistro;
- il 6% si sposta da un lato all'altro della corona;
- tutti i ciclisti o motociclisti che viaggiano sul lato sinistro dell'anello compiono almeno mezzo giro o tre quarti di giro attorno all'isola centrale.

Riguardo invece ai problemi di sicurezza legati all'attraversamento dei pedoni, sempre in questa indagine, si è notata una diminuzione dei ritardi d'attraversamento in rotatoria rispetto alle normali intersezioni regolate da semafori.

La distanza consigliata per gli attraversamenti è di 5 m dall'ingresso sulla corona giratoria. Sono inoltre raccomandate isole spartitraffico, che possono fungere da zone di sicurezza per i pedoni, nelle rotatorie con più di 300 veic/h in ingresso.

Alla fine di questo studio è comunque emerso che, con la realizzazione delle rotatorie, sono diminuite sia la frequenza degli incidenti che la loro gravità.

2.2.8. Statistiche d'incidentalità in Italia [2.1]

In Italia, vista la più recente tradizione di trasformazione degli incroci classici in rotatoria, non esiste un gran numero d'informazioni circa i tassi d'incidentalità *before-after*.

Infatti verranno riportati i dati d'incidentalità ottenuti da due distinte indagini condotte, una dal Comune di Reggio Emilia e l'altra da un gruppo di ricerca dell'Università di Catania.

N°	Tipo d'incrocio preesistente	Diametro Esterno (m)	Incidenti medi annui (con feriti e/o morti)		Periodi di indagine	
			Prima	Dopo	Prima	Dopo
1	Incrocio a T non semaforizzato	35	3,75	0,33	1995-1998	1999-2001
2	Incrocio a doppia T non semaforizzato	45	4,4	1,33	1995-1998	1999-2001
3	Incrocio a doppia T non semaforizzato	24	3	0,5	1995-1999	2000-2001
4	Incrocio a T non semaforizzato	55	2,6	0	1995-1999	2000-2001
5	Incrocio a T non semaforizzato	55	5,67	0	1995-2000	2001
6	Incrocio a T non semaforizzato	45	2,33	0	1995-2000	2001

Tabella 2.8: Statistiche d'incidentalità before-after su rotatorie situate a Reggio Emilia

La Tabella 2.8 riassume i dati raccolti dai tecnici del Comune di Reggio Emilia [2.27] su sei rotatorie situate nel loro territorio che avevano sostituito altrettante intersezioni a raso. Anche se il campione è estremamente ridotto, sembra comunque confermata la tendenza verso una netta riduzione del numero d'incidenti.

Un'indagine analoga è stata condotta nel 2005 da un gruppo di lavoro del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania su sei mini rotatorie classiche e due di raggio ridotto (4 m), situate nel Comune di Caltanissetta [2.6].

I ricercatori hanno potuto reperire dati d'incidentalità solo su cinque di queste otto mini-rotatorie prima della loro trasformazione.

In Tabella 2.9 vengono riassunte le informazioni relative a queste cinque rotatorie prima e dopo la loro realizzazione.

N°	Raggio (m)	Larghezza anello (m)	N° bracci	Incidenti medi annui (con feriti e/o morti)		Periodi di indagine	
				Prima	Dopo	Prima	Dopo
1	12	5,00	4	1,17	1,00	1989-2000	2001-2004
2	4	5,00	3	1,00	0,00	1989-1999	2000-2004
3	10	5,00	4	1,00	0,00	1989-1995	1996-2004
4	9	5,50	4	0,86	0,00	1989-2002	2003-2004
5	4	5,50	5	0,60	0,00	1989-2002	2003-2004

Tabella 2.9: Statistiche d'incidentalità before-after su 5 mini-rotatorie situate a Caltanissetta

Dai dati riportati nella precedente tabella è facile notare il completo abbattimento dei tassi d'incidente più gravi con morti e feriti

N°	Raggio (m)	Larghezza anello (m)	N° bracci	Incidenti medi annui (con feriti e/o morti)	Incidenti medi annui (con solo danni materiali)	Periodi di indagine
6	14	6,50	5	0,63	1,07	1989-2004
7	10	6,50	4	0,75	1,75	1989-2004
8	8	6,00	4	0,86	0,43	1998-2004

Tabella 2.10: Statistiche d'incidentalità "solo dopo" su 3 mini-rotatorie situate a Caltanissetta

Nella Tabella 2.10 sono stati riportate invece le statistiche d'incidente delle altre 3 mini rotatorie di cui però non si avevano dati prima della loro realizzazione. Comunque l'ampio periodo d'indagine (15 anni) correlato ai bassi tassi d'incidentalità dimostra in ogni caso la sicurezza intrinseca prodotta dall'introduzione delle rotatorie.

2.2.9. Altre statistiche d'incidentalità [2.1]

Gli studi sulla sicurezza condotti in altri Paesi al di là di quelli analizzati nei paragrafi precedenti hanno portato comunque a delle conclusioni analoghe a quelle già esposte.

Da uno studio condotto dal Ministero dei Trasporti della Nuova Zelanda [2.19] è venuto fuori che le rotatorie offrono generalmente benefici, in termini di sicurezza, più elevati rispetto alle intersezioni semaforizzate.

In Norvegia invece, nel 1987, l'Istituto della Tecnologia ha tirato fuori i seguenti tassi d'incidente in funzione della tipologia d'intersezione [2.29]:

- 0,24 incidenti/anno per le intersezioni a raso a quattro bracci;

- 0,16 incidenti/anno per gli incroci semaforizzati;
- 0,04 incidenti/anno per le rotatorie.

2.3. I modelli di stima dell'incidentalità in rotatoria

Mentre in letteratura esiste una vasta gamma di modelli previsionali per la stima degli incidenti sulle intersezioni stradali a raso, sia semaforizzate e sia non, invece risultano ancora pochi i modelli tarati appositamente per le rotatorie.

Nei paragrafi seguenti verranno riportati tre modelli specifici d'incidentalità per le rotonde:

- il modello di Maycock ed Hall [2.21];
- il modello di Arndt e Troutbeck [2.9];
- il modello di Harper [2.18].

Tutti e tre i modelli, seppur di diversa impostazione (il primo ed il terzo sono sperimentali, mentre il secondo è teorico) hanno dato risultati attendibili ogni qual volta sono stati applicati.

2.3.1. Il modello di Maycock ed Hall

Un modello "storico" per valutare il numero degli incidenti in una rotatoria è quello proposto da Maycock ed Hall nel 1985 [2.21].

Si tratta di un modello sperimentale dedotto da un campione statistico formato da 84 rotatorie a quattro rami caratterizzate da diverse configurazioni geometriche e da differenti velocità di immissione; in particolare, le velocità in ingresso tipiche delle rotatorie di diametro medio-piccolo erano comprese tra 48 e 64 km/h, le velocità di immissione per le rotatorie di grande diametro, invece, rientravano nell'intervallo 80 e 113 km/h. I dati di incidentalità utilizzati per la deduzione delle formulazioni analitiche si riferiscono a periodi di analisi variabili tra 4 e 6 anni, per un totale di 1427 sinistri (con morti, feriti gravi e lievi).

I modelli previsionali, che si basano su una distribuzione Poissoniana degli incidenti, si esplicitano attraverso regressioni lineari generalizzate di forma esponenziale con un coefficiente di determinazione (R^2) molto elevato.

Le equazioni, di seguito riportate, sono state sviluppate per 5 diverse tipologie di urti, e sono valide solo per rotatorie a quattro bracci.

2.3.1.1. Urti tra veicoli entranti e circolanti

La formulazione del modello è la seguente:

$$A = 0,052 \cdot Q_e^{0,7} \cdot Q_c^{0,4} \cdot \exp \left[-40 \cdot C_e + 0,14 \cdot e - 0,007 \cdot e \cdot v - \frac{1}{1 + \exp(4 \cdot R - 7)} + 0,2 \cdot P_m - 0,01 \cdot \theta \right] \quad [\text{Eq. 2.1}]$$

Con:

A = incidenti annui (con feriti e/o morti) per ramo della rotatoria;

Q_e = flusso entrante (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno);

Q_c = flusso circolante (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno);

C_e = curvatura del percorso in ingresso ($=1/R_e$);

R_e = raggio della traiettoria più breve percorsa dai veicoli in ingresso (m);

e = larghezza dell'entrata (m);

v = larghezza della porzione di ramo utilizzata per l'immissione (m);

R = rapporto tra il diametro della corona giratoria e il diametro dell'isola centrale;

P_m = percentuale di motocicli (%);

θ = angolo formato con il ramo successivo, misurato da asse ad asse (gradi);

2.3.1.2. Urti in entrata

L'equazione per il calcolo di questa tipologia d'incidenti è la seguente:

$$A = 0,0057 \cdot Q_e^{1,7} \cdot \exp(20 \cdot C_e - 0,1 \cdot e) \quad [\text{Eq. 2.2}]$$

Dove:

A = incidenti annui (con feriti e/o morti) per ramo della rotatoria;

Q_e = flusso entrante (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno);

C_e = curvatura del percorso in ingresso ($=1/R_e$);

R_e = raggio della traiettoria più breve percorsa dai veicoli in ingresso (m);

e = larghezza dell'entrata (m);

2.3.1.3. Urti relativi ai veicoli isolati

Il modello previsionale specifico è il seguente:

$$A = 0,0064 \cdot Q_e^{0,8} \cdot \exp(25 \cdot C_e + 0,2 \cdot v - 45 \cdot C_a) \quad [\text{Eq. 2.3}]$$

Con:

A = incidenti annui (con feriti e/o morti) per ramo della rotatoria;

Q_e = flusso entrante (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno);

C_e = curvatura del percorso in ingresso ($=1/R_e$);

R_e = raggio della traiettoria più breve percorsa dai veicoli in ingresso (m);

e = larghezza dell'entrata (m);

C_a = curvatura del ramo d'ingresso ($=1/R_a$);

R_a = raggio del ramo d'ingresso (m) (definito come il raggio della curva più vicina all'intersezione all'interno dello spazio compreso tra 50 m e 500 m dalla linea del "dare precedenza");

2.3.1.4. Altre tipologie di urti veicolari

La formulazione è qui di seguito riportata:

$$A = 0,0026 \cdot Q_{ec}^{0,8} \cdot \exp(0,2 \cdot P_m) \quad [\text{Eq. 2.4}]$$

A = incidenti annui (con feriti e/o morti) per ramo della rotatoria;

$Q_{ec} = (Q_e \cdot Q_c)$;

Q_e = flusso entrante (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno);

Q_c = flusso circolante (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno);

P_m = percentuale di motocicli (%);

2.3.1.5. Urti tra veicoli e pedoni

La formulazione è la seguente:

$$A = 0,029 \cdot Q_{ep}^{0,5} \quad [\text{Eq. 2.5}]$$

Dove:

A = incidenti annui (con feriti e/o morti) per ramo della rotatoria;

$Q_{ep} = (Q_e + Q_{ex}) \cdot Q_p$;

Q_e = flusso entrante (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno);

Q_{ex} = flusso uscente (TGM espresso in migliaia di veicoli al giorno).

Q_p = flusso pedonale (migliaia di pedoni al giorno);

2.3.1.6. Definizione dei parametri geometrici del modello

Per poter rendere più comprensibili i cinque modelli appena esposti, è necessario soffermarsi sulla definizione di tutti gli elementi geometrici presenti nelle formulazioni, facendo riferimento alla Figura 2.10.

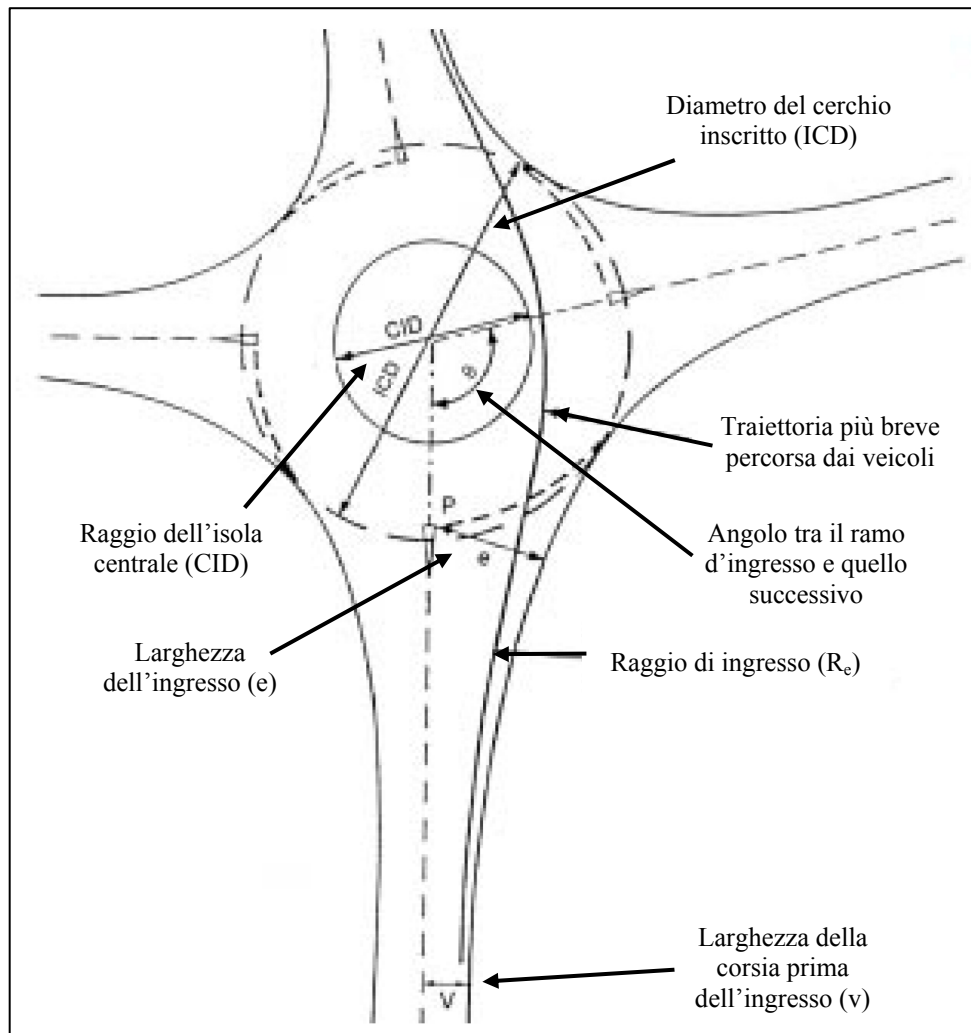


Figura 2.10: Elementi geometrici utilizzati nel modello di Maycock ed Hall [2.21]

Quindi in dettaglio gli elementi sono:

- La curvatura del percorso d'ingresso (C_e) è definita come il percorso più breve compiuto dai veicoli nella manovra d'attraversamento (espressa in metri). C_e diventa quindi il valore della massima curvatura ($1/R_e$) su questo tragitto nell'area di entrata. Il segno della curvatura è preso convenzionalmente positivo se la deflessione è verso sinistra; negativo viceversa.
- La larghezza dell'entrata (e) è misurata ortogonalmente dal punto P al bordo esterno ed è espressa in metri.

- La larghezza della corsia d'ingresso prima dell'immissione (v), espressa in metri, è la metà della larghezza totale del ramo d'ingresso (semicarreggiata) prima di ogni possibile allargamento.
- L'angolo tra il ramo in ingresso ed il ramo successivo (θ), preso in senso orario e misurato in gradi, rappresenta l'angolo sotteso tra la proiezione delle linee d'intersezione tra gli assi d'ingresso. Se gli ingressi sono curvi, si utilizzano le tangenti alle linee dal punto P.
- La curvatura del ramo d'ingresso (C_a), misurata in metri, è valutata sul braccio d'avvicinamento alla rotatoria in un intervallo compreso tra 50 e 500 m. Essa è la massima curvatura (ossia il reciproco del raggio minimo in metri) della curva più vicina all'intersezione all'interno dell'intervallo appena riportato. In Figura 2.11 questo parametro viene mostrato in due circostanze diverse. Il segno convenzionale di questo parametro è positivo se la curva è a destra, mentre è negativo se la curva è a sinistra.

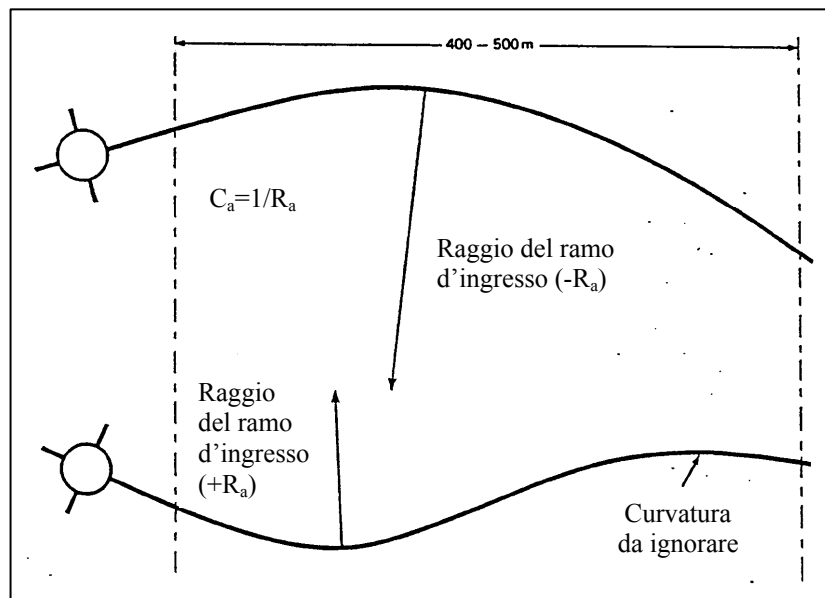


Figura 2.11: Valutazione della curvatura del ramo d'ingresso secondo il modello di Maycock ed Hall

Quindi in definitiva, secondo il modello di Maycock ed Hall, i fattori che influenzano maggiormente il livello di pericolosità di una rotatoria sono la larghezza degli ingressi, la forma della corona giratoria, il raggio d'entrata, la curvatura e l'angolo formato tra due rami consecutivi.

2.3.2. Il modello di Arndt e Troutbeck

Un altro modello analitico per la stima degli incidenti sulle rotatorie è quello di Arndt e Troutbeck (1995) [2.9] ed affinato successivamente dallo stesso Arndt (1998) [2.31]. Esso, a differenza dei precedenti, non è sperimentale ma teorico.

Questo modello, oltre ad essere differente per concezione, lo è anche per le modalità applicative. Risulta, infatti, alquanto articolato già a partire dall'impostazione dei parametri di input, i quali possono essere così sintetizzati:

- schema della rotatoria, inclusa la geometria dei rami di accesso;
- velocità su ogni ramo di accesso;
- volumi di traffico per tutte le manovre.

L'applicabilità del modello richiede comunque la corretta definizione dei parametri che lo compongono e che verranno di seguito esporsi.

Un fattore fondamentale per il modello è la velocità. Essa è essenzialmente legata a due fattori:

- le condizioni di velocità prevalenti sugli elementi geometrici della carreggiata;
- il raggio del particolare elemento geometrico orizzontale affrontato dall'utente.

Solitamente il parametro statisticamente più affidabile per caratterizzare la velocità dei conducenti è il valore dell'85° percentile.

Arndt, nel suo modello, prende in considerazione proprio l'85° percentile delle velocità sia per le immissioni che per l'anello e consente di valutarle attraverso l'abaco sperimentale riportato in Figura 2.12.

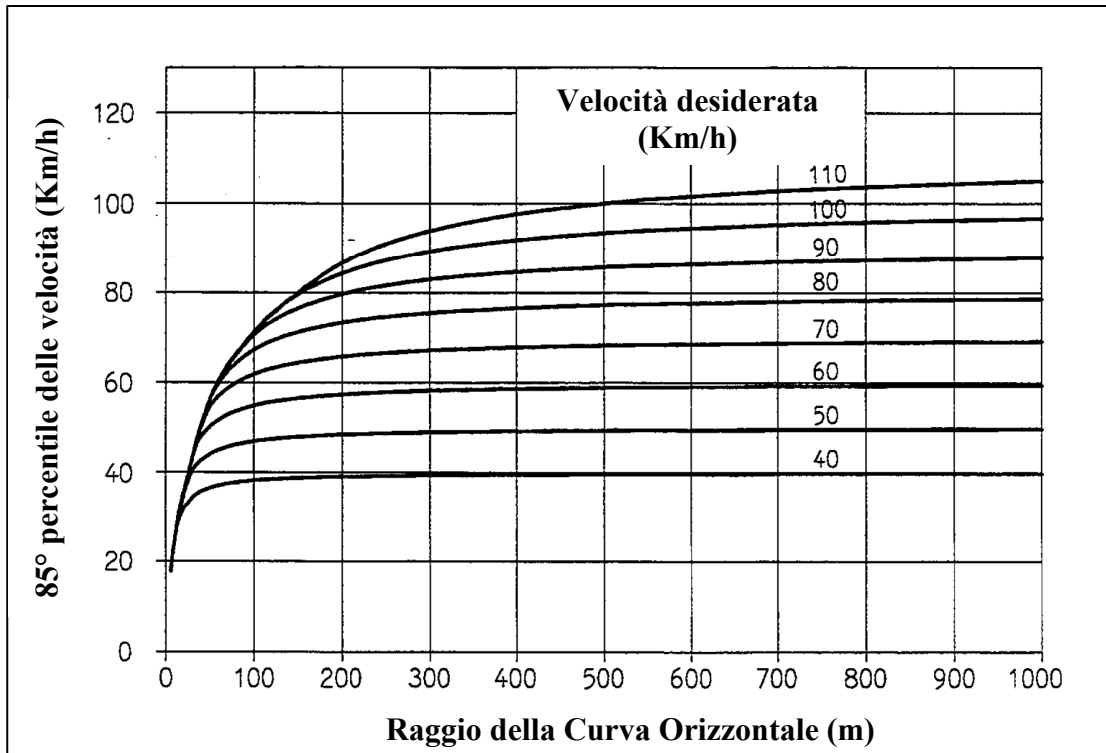


Figura 2.12: Abaco di Arndt per il calcolo della V_{85} [2.9]

L'abaco va utilizzato nel seguente modo:

- si entra sulle ascisse con il valore del raggio del tratto curvilineo preso in esame espresso in metri;
- si intercetta la curva dell'abaco associata alla velocità desiderata del braccio da cui proviene il veicolo,
- si legge sulle ordinate il valore della V_{85} dell'elemento curvilineo considerato.

Per quanto concerne poi la schematizzazione delle traiettorie veicolari adottata da Arndt e Troutbeck, bisogna dire che i rilievi, condotti in situ, mostrano come i veicoli non seguano necessariamente la linea centrale o la linea di margine della carreggiata. In particolare, nel caso di rotatorie a singola corsia, questo modello adotta uno schema di percorribilità nel quale gli utenti mantengono le seguenti distanze tra il centro del veicolo ed i vari elementi geometrici:

- 1.5 m dalla linea centrale della strada,

- 1.5 m dal bordo rialzato del marciapiede;
- 1.0 m dalla linea di margine continua o tratteggiata.

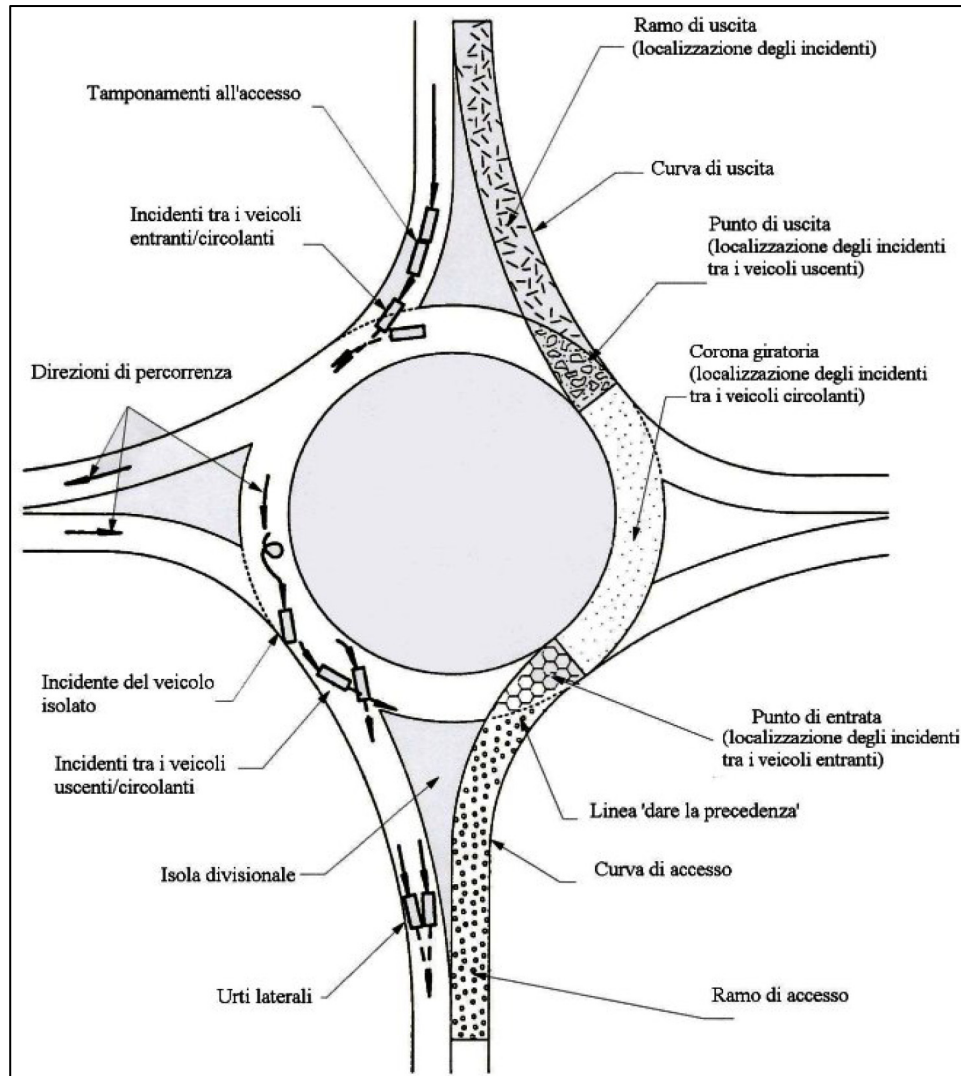


Figura 2.13: Localizzazione degli incidenti in rotatoria secondo Arndt [2.9]

Dopo aver definito questi parametri è possibile passare in rassegna, facendo riferimento alla Figura 2.13, le diverse relazioni analitiche presenti nel modello per la previsione degli incidenti

2.3.2.1. Incidenti relativi al veicolo isolato

$$A_{sp} = \frac{1,64 \cdot 10^{-2} \cdot Q^{1,17} \cdot L \cdot (S + \Delta S)^{4,12}}{R^{1,91}} \quad [\text{Eq. 2.6}]$$

$$A_{sa} = \frac{1,79 \cdot 10^{-9} \cdot Q^{0,91} \cdot L \cdot (S + \Delta S)^{1,93}}{R^{0,65}} \quad [\text{Eq. 2.7}]$$

Dove:

A_{sp} = Numero d'incidenti del veicolo isolato in un anno per ogni ramo, nelle sezioni che precedono la linea del "dare precedenza";

A_{sa} = Numero d'incidenti del veicolo isolato in un anno per ogni ramo, nelle sezioni che seguono la linea del "dare precedenza";

Q = Traffico medio giornaliero annuo in ognuna delle sezioni considerate (veic/g);

L = Sviluppo di ognuno dei tratti curvilinei in cui è suddivisa l'intera traiettoria veicolare (m);

S = V_{85} sull'elemento curvilineo che definisce la singola sezione di riferimento (Km/h);

ΔS = Diminuzione della V_{85} valutata all'inizio della sezione curvilinea seguente quella in esame (Km/h);

R = Raggio della curvatura che definisce il tratto di traiettoria veicolare al quale si sta facendo riferimento (m);

2.3.2.2. Tamponamenti in corrispondenza degli accessi

$$A_r = 1,81 \cdot 10^{-18} \cdot Q_a^{1,39} \cdot \left(\sum Q_{ci}\right)^{0,65} \cdot S_a^{4,77} \cdot N_a^{2,31} \quad [\text{Eq. 2.8}]$$

Dove:

A_r = Numero di tamponamenti in un anno su un dato accesso;

Q_a = Traffico medio giornaliero annuo sull'accesso (veic/g);

ΣQ_{ci} = Flusso di traffico complessivamente circolante nelle sezioni di corona giratoria adiacenti all'accesso (veic/g);

$S_a = V_{85}$ sulla curva d'accesso (Km/h);

N_a = Numero delle corsie presenti sull'accesso in esame.

2.3.2.3. Incidenti tra veicoli entranti e circolanti

$$A_e = \frac{7,31 \cdot 10^{-7} \cdot Q_a^{0,47} \cdot N_c^{0,9} \cdot (\Sigma Q_{ci})^{0,41} \cdot S_{ra}^{1,38}}{t_{Ga}^{0,21}} \quad [\text{Eq. 2.9}]$$

Dove:

A_e = Numero di incidenti tra veicoli entranti e veicoli circolanti all'anno per ogni ramo d'ingresso;

Q_a = Traffico medio giornaliero annuo sull'accesso (veic/g);

N_c = Numero delle corsie sulla corona giratoria;

ΣQ_{ci} = Flusso di traffico complessivamente circolante nelle sezioni di corona giratoria adiacenti all'accesso considerato (veic/g);

$S_{ra} = V_{85}$ mediata tra quella dei veicoli sulla curva di accesso e quelli sulla corona giratoria; essa è pari a:

$$S_{ra} = \frac{\Sigma (Q_{ci} \cdot S_{ri})}{\Sigma Q_{ci}} \quad [\text{Eq. 2.10}]$$

dove S_{ri} è la V_{85} dei veicoli sulla curva di accesso calcolata come valore relativo rispetto alla velocità dei veicoli sull'anello provenienti da ogni direzione (Km/h), mentre Q_{ci} è il traffico medio giornaliero annuo sul tratto di corona giratoria adiacente all'accesso;

t_{Ga} = Valore medio dei tempi di viaggio calcolati a partire dalle linee del "dare precedenza" appartenenti agli accessi che precedono quello preso in considerazione, fino al punto d'intersezione tra le traiettorie dei veicoli entranti e quelle dei veicoli circolanti; esso è dato dalla seguente espressione:

$$t_{Ga} = \frac{\Sigma (Q_{ci} \cdot t_{Gi})}{\Sigma Q_{ci}} \quad [\text{Eq. 2.11}]$$

I tempi di viaggio t_{Gi} che compaiono nella relazione precedente si valutano così:

$$t_{Gi} = \frac{3,6 \cdot d_{Gi}}{S_{ci}} \quad [\text{Eq. 2.12}]$$

Con:

- D_{Gi} = Distanza tra la linea del “dare precedenza” appartenente all’accesso che precede quello preso in esame, ed il punto di intersezione tra le traiettorie dei veicoli entranti e quelle dei veicoli circolanti (m);
- S_{ci} = V_{85} della corrente veicolare proveniente dal ramo d’ingresso che precede quello considerato, valutata in corrispondenza del tronco di corona giratoria adiacente all’accesso in esame (Km/h)

2.3.2.4. Incidenti tra veicoli circolanti ed uscenti

Questo tipo d’incidenti avviene solo nelle rotatorie a più corsie attraverso questa formulazione:

$$Ad = 1,33 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\sum Q_{ci}\right) \cdot \left(\sum Q_{ei}\right)^{0,68} \cdot S_{ra}^{4,13} \quad [\text{Eq. 2.13}]$$

Dove:

A_e = Numero di incidenti tra veicoli circolanti e veicoli uscenti all’anno per ogni ramo di uscita;

Q_{ci} = Traffico medio giornaliero annuo in circolazione sulle sezioni di anello adiacenti al ramo d’uscita (veic/g);

Q_{ei} = Traffico medio giornaliero annuo riferito ai veicoli che fuoriescono dal ramo d’uscita preso in considerazione (veic/g);

S_{ra} = V_{85} mediata tra quella dei veicoli sulla curva di uscita e quella dei veicoli in circolo sulla corona giratoria; essa è pari a:

$$S_{ra} = \frac{\sum (Q_{ei} \cdot S_{ri})}{\sum Q_{ci}} \quad [\text{Eq. 2.14}]$$

dove S_{ri} è la V_{85} dei veicoli sulla curva di uscita calcolata come valore relativo rispetto alla velocità dei veicoli sull’anello provenienti da ogni direzione (Km/h).

2.3.2.5. Incidenti dovuti ad urti laterali

Per questo tipo d'incidenti, Arndt propone l'utilizzo di una procedura, applicabile solo per rotatorie aventi almeno due corsie all'anello, e basata sul tracciamento di due traiettorie per ognuna delle manovre (di attraversamento e di svolta a sinistra) ritenute pericolose (la svolta a destra non viene considerata).

Le due traiettorie in questione sono rispettivamente quelle che tagliano le corsie e quelle che non le tagliano.

La relazione prevista dal modello di Arndt per la valutazione degli urti laterali in rotatoria è la seguente:

$$A_{ss} = 6,49 \cdot 10^{-8} \cdot (Q \cdot Q_t)^{0,27} \cdot \Delta f_1^{0,59} \quad [\text{Eq. 2.15}]$$

Dove:

A_{ss} = Numero di incidenti per urto laterale all'anno per ogni ramo di uscita nelle singole sezioni in cui possono essere suddivise le traiettorie di svolta a sinistra e di attraversamento generate a partire dal ramo preso in considerazione;

Q = Traffico medio giornaliero annuo associato ad ognuna delle sezioni in cui possono essere suddivise le traiettorie di svolta a sinistra e di attraversamento generate a partire dal ramo preso in considerazione (veic/g);

Q_t = Traffico medio giornaliero annuo relativo alla totalità delle manovre veicolari entranti lateralmente in conflitto con ognuna delle sezioni in cui vengono suddivise le traiettorie generate a partire dal ramo preso in considerazione (veic/g);

Δf_1 = Variazione dell'aderenza trasversale potenziale su ognuna delle sezioni in vengono suddivise le traiettorie generate a partire dal ramo preso in considerazione ($\text{Km/h}^2/\text{m}$). La quantità Δf_1 può essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$\Delta f_1 = \left| \frac{(S_c + \Delta S_c)^2}{127 \cdot R} - \frac{(S_c + \Delta S_c)^2}{127 \cdot R_c} \right| \quad [\text{Eq. 2.16}]$$

Dove:

$S_c = V_{85}$ sull'elemento curvilineo che definisce la sezione di traiettoria (che "taglia" le corsie) esaminata (Km/h);

$\Delta S_c =$ Diminuzione della V_{85} (S_c) valutata all'inizio della sezione curvilinea seguente quella in esame (Km/h);

$R =$ Raggio della curva che definisce la sezione della traiettoria veicolare (non tagliante le corsie) alla quale si sta facendo riferimento (m);

$R_c =$ Raggio del tratto di curva che individua la sezione della traiettoria veicolare (tagliante le corsie) alla quale si sta facendo riferimento (m).

2.3.2.6. Altri incidenti veicolari

$$A_I = 4,29 \cdot 10^{-6} Q_a \quad [\text{Eq. 2.17}]$$

Dove:

$A_I =$ Numero degli "altri" incidenti in un anno per ogni ramo preso in esame;

$Q_a =$ Traffico medio giornaliero annuo che transita sul ramo d'accesso considerato (veic/g).

2.3.3. Il modello di Harper

Un terzo modello, anche questo di tipo sperimentale, per la stima degli incidenti sulle rotatorie è quello di Harper [2.18] [2.19]: esso si basa sull'applicazione, attraverso delle opportune modifiche, di alcuni modelli di previsione d'incidentalità per le intersezioni urbane sviluppati da Turner in Australia tra il 1995 ed il 2001 [2.17].

Il database utilizzato per la realizzazione del modello si basa su tre tipologie di dati:

- dati veicolari;
- dati geometrici;
- dati d'incidente.

Sono stati infatti estrapolati i dati dei 242 incidenti (mortalità, gravi e lievi) rilevati in cinque anni, tra il 1998 ed il 2002, su 95 rotatorie urbane situate in Nuova Zelanda ed i relativi parametri geometrici dei 372 approcci delle rotatorie stesse.

Tutte queste informazioni sono state inserite in un unico database che ha permesso ad Harper di trarre le seguenti considerazioni:

- In media ci sono 0,51 incidenti con feriti all'anno per rotatoria urbana, con un tasso di gravità del 12%.
- Gli incidenti tra i veicoli entranti e quelli circolanti sono quelli più comuni (45%) e sono maggiori della somma di tutti gli altri tipi d'incidente tra veicoli: perdita di controllo (19%), tamponamenti (16%) e strisciate laterali (5%).
- I pedoni sono coinvolti nel 15% degli incidenti rilevati.
- I ciclisti corrono grossi rischi in rotatoria in quanto sono coinvolti nel 24% degli incidenti con feriti e nel 50% degli incidenti tra il flusso entrante e quello circolante.
- I motociclisti vengono implicati nel 10% degli incidenti con feriti. Questo valore sembra essere sproporzionato rispetto all'attuale volume di motocicli.
- Ciclisti e motociclisti sono coinvolti nel 64% degli incidenti tra veicoli entranti e circolanti.
- I mezzi pesanti sono implicati nel 6% degli incidenti con feriti.
- La pavimentazione bagnata, la pioggia ed il buio presentano rispettivamente le seguenti percentuali d'incidente: 24%, 20% e 25%.
- Le frequenze d'incidente sui singoli rami d'ingresso si mostrano sostanzialmente costanti intorno ad un valore di 0,13 incidenti per anno, per ramo, e supportano l'ipotesi sull'utilizzo di modelli previsionali del tipo "*approach-by-approach*".

Harper, attraverso un'analisi statistica di questi dati, ha dato vita alle seguenti tre diverse tipologie di modelli di previsione degli incidenti:

- modelli con flussi di conflitto;

- modelli con flussi di conflitto e variabili geometriche;
- modelli basati sul prodotto dei flussi sui rami.

2.3.3.1. Modelli con flussi di conflitto

Inizialmente i modelli previsionali d'incidente furono settati mettendo in correlazione con ciascuna tipologia d'incidente esclusivamente delle variabili di traffico. Questi ultimi però furono utilizzati come base per modelli più avanzati che combinavano alla variabili di traffico anche quelle geometriche. In ogni caso tutte queste formulazioni sia che considerino o meno i parametri geometrici presentano una forma simile a quella proposta da Maycock ed Hall [2.21]:

$$A = k \cdot Q_e^\alpha \cdot Q_c^\beta \cdot \exp(\sum [G_i \cdot b_i]) \quad [\text{Eq. 2.18}]$$

Dove:

A = incidenti annui (con feriti e/o morti) per ramo della rotatoria;

k , α , β e b_i = coefficienti;

G_i = variabili geometriche.

In Figura 2.14 sono riassunte delle buone formulazioni che mettono in correlazione i flussi veicolari con le diverse tipologie d'incidente secondo Harper. Il fattore di forma k è stato fornito come riferimento.

Come previsto, in Figura 2.14 si nota come i modelli previsionali per gli incidenti tra i veicoli entranti e quelli uscenti, per i tamponamenti e per i pedoni, presentino delle funzioni simili a quelle introdotte da Turner [2.17]. Per quanto riguarda invece gli incidenti dovuti a perdita di controllo ed agli strisciamenti laterali, Harper utilizza una formulazione dipendente dal flusso circolante anziché dal flusso veicolare in ingresso come previsto da Turner.

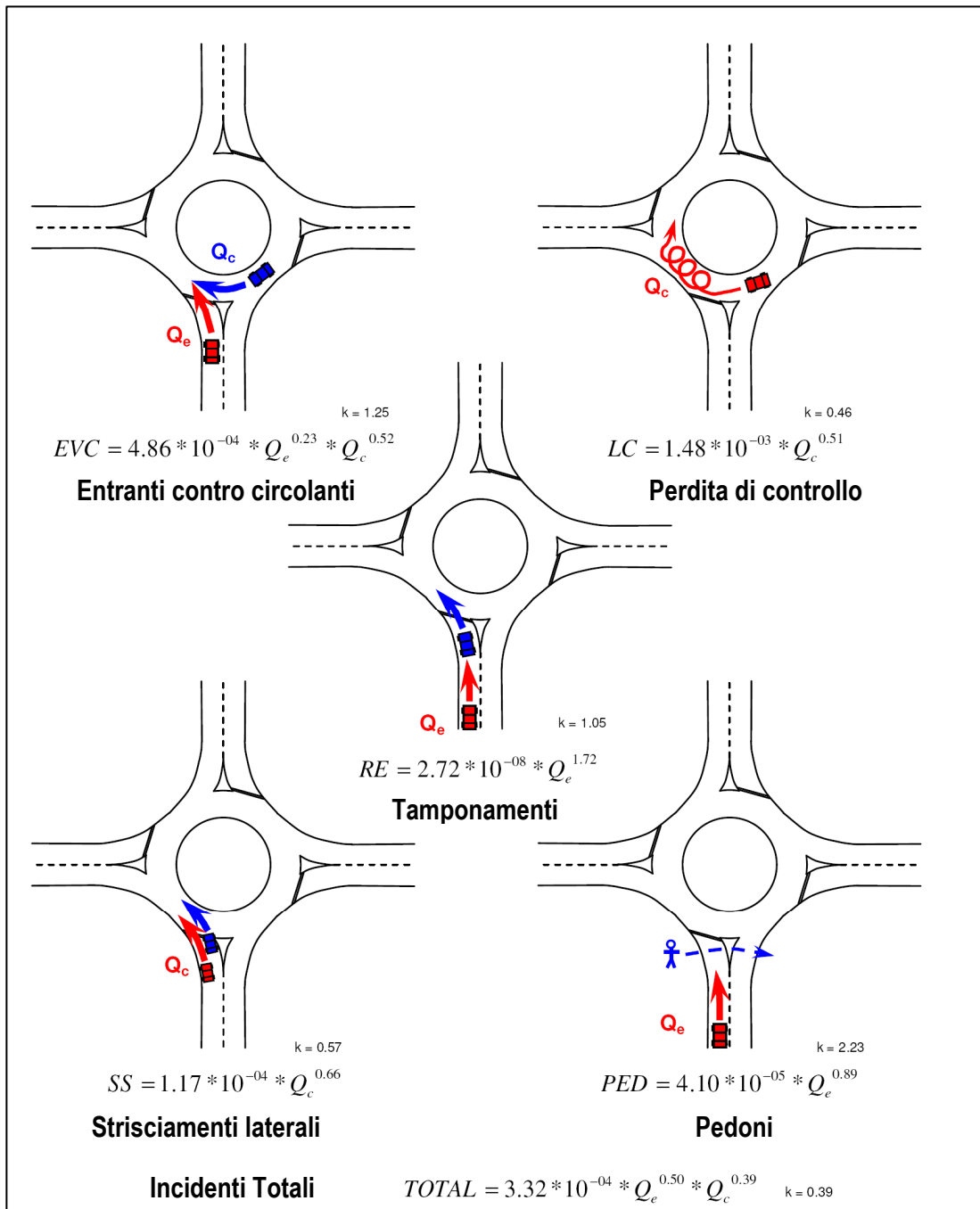


Figura 2.14: Modelli di previsione d'incidentalità senza variabili geometriche secondo Harper [2.19]

2.3.3.2. Modelli con flussi di conflitto e variabili geometriche

Le formulazioni riportate in Figura 2.14 sono state in seguito messe in correlazione con le variabili geometriche presenti nel database.

Sono state quindi individuate quelle che presentavano maggiore significatività statistica rispetto alle diverse tipologie d'incidente e di seguito inserite nei nuovi modelli.

Gli incidenti dovuti a perdita di controllo ed a tamponamenti non possono essere migliorati attraverso l'aggiunta di nessuna delle 28 variabili geometriche rilevate e pertanto non è stato sviluppato nessun nuovo modello per questi tipi d'incidente rispetto a quelli di Figura 2.14.

Ciò non è una sorpresa, in quanto le relazioni che presentano al loro interno volumi di traffico spesso, per gli scopi che si propongono i modelli previsionali d'incidente, rendono ridondanti molte variabili geometriche: ad esempio, il diametro dell'isola centrale di una rotatoria è spesso direttamente proporzionale al domanda di traffico che una rotatoria è in grado di sopportare.

I modelli con flussi veicolari che comprendono anche variabili geometriche, suddivisi per tipologia d'incidente, verranno qui di seguito riportati.

2.3.3.2.a. Incidenti totali

La variabile geometrica che risulta essere la più significativa per la previsione del numero complessivo degli incidenti in rotatoria è la seguente:

$$TOTAL = 5.31 \cdot 10^{-05} \cdot Q_e^{0.59} \cdot Q_c^{0.73} \cdot \exp(ACWL \cdot 0.057) \quad k = 0.34 \quad [\text{Eq. 2.19}]$$

Dove:

ACWL (*Adjacent Circulating Width Left*) = larghezza della corona giratoria compresa tra l'approccio corrente ed il successivo in senso orario.

La variabile *ACWL* sembra quindi assumere un significato assai importante nella valutazione del numero complessivo degli incidenti in rotatoria.

2.3.3.2.b. Incidenti tra veicoli entranti e veicoli circolanti

Le variabili geometriche che intervengono nella definizione del modello previsionale per gli incidenti tra i veicoli entranti e quelli circolanti sono le due seguenti:

$$EVC = 2.93 \cdot 10^{-05} \cdot Q_e^{0.59} \cdot Q_c^{0.73} \cdot \exp((ACDNA \cdot (-0.057)) + (EL \cdot (-0.52))) \quad k = 0.91$$

[Eq. 2.20]

Dove:

CDNA (*Chord Distance to Next Approach*) = distanza tra l'estremità dell'isola spartitraffico dell'approccio corrente e quella del ramo successivo in senso orario, basata sul raggio della circonferenza inscritta sull'approccio corrente;

ACDNA (*Alternative Chord Distance to Next Approach*) = distanza tra l'estremità dell'isola spartitraffico dell'approccio corrente e quella del ramo successivo in senso orario, basata sulla media del raggio della circonferenza inscritta su entrambi gli approcci;

EL (*Number of Entry Lanes*) = Numero di corsie in ingresso sull'approccio corrente.

Fra i modelli previsionali d'incidentalità che prendono in considerazione le variabili geometriche, questo risulta essere il più logico, vista l'importanza che assumono il numero di corsie in ingresso e la distanza tra due approcci consecutivi

2.3.3.2.c. Incidenti per strisciamento laterale

In maniera simile a quanto visto per gli incidenti tra i veicoli entranti e quelli circolanti, anche per gli impatti dovuti a strisciamento laterale il parametro geometrico più significativo per il modello previsionale è *CDNA*:

$$SS = 1.20 \cdot 10^{-04} \cdot Q_c^{0.53} \cdot \exp(CDNA \cdot 0.039) \quad k = 0.56$$

[Eq. 2.21]

Come già accennato in precedenza, gli incidenti dovuti a strisciamento laterale sono meglio correlati al flusso circolante rispetto a quello entrante.

2.3.3.2.d. Incidenti con coinvolgimento di pedoni

Gli incidenti con pedoni sono legati a due variabili geometriche, *PDG* e *PCT*. La formulazione per tutti i tipi d'attraversamento pedonale è la seguente:

$$PED = 4.10 \cdot 10^{-04} \cdot Q_e^{0.61} \cdot \exp(PDG \cdot 0.058) \quad k = 0.40$$

[Eq. 2.22]

Dove:

PDG (*Pedestrian Crossing Distance to Give Way Line*) = distanza dalla linea del dare precedenza sull'approccio corrente al punto più vicino dell'attraversamento pedonale.

PCT (*Pedestrian Crossing Type*) = tipo di attraversamento pedonale sull'approccio corrente (se presente):

- $PCT = P$, per attraversamenti adibiti per sedie a rotelle;
- $PCT = Z$, per attraversamenti con strisce pedonali;
- $PCT = S$, per attraversamenti pedonali semaforizzati.

PDG è una variabile ben definita che può influenzare notevolmente il tasso d'incidentalità. Dove non è presente alcun tipo di attraversamento pedonale sull'approccio, allora non va inserito nessun valore.

I seguenti modelli si distinguono a seconda del tipo di attraversamento pedonale presente sul ramo:

$$PEDP = 1.17 \cdot 10^{-03} \cdot Q_e^{0.61} \cdot \exp((PDG \cdot 0.028) - 1.655) \quad k = 0.31 \quad [\text{Eq. 2.23}]$$

$$PEDZ = 1.39 \cdot 10^{-04} \cdot Q_e^{0.68} \cdot \exp((PDG \cdot 0.051) + 1.461) \quad k = 0.57 \quad [\text{Eq. 2.24}]$$

$$PEDS = 3.15 \cdot 10^{-04} \cdot Q_e^{0.63} \cdot \exp((PDG \cdot 0.061) - 0.341) \quad k = 0.44 \quad [\text{Eq. 2.25}]$$

2.3.3.3. Modelli basati sul prodotto dei flussi sui rami

I modelli previsionali d'incidentalità basati sul prodotto dei flussi sui rami sono stati sviluppati utilizzando un database modificato che raggruppava le rotatorie in un'unica intersezione. I dati d'incidente sono stati aggregati in una sola categoria: incidenti totali con feriti. I dati di traffico sono stati sintetizzati in due traffici giornalieri medi, uno per la strada principale e l'altro per quella secondaria delle rotatorie a quattro o a tre bracci.

Questo tipo di modelli sono stati sviluppati in forma simile a quelli previsti da Turner nel "*Project Evaluation Manual*" [2.20].

2.3.3.3.a. Rotatorie a quattro bracci

Questo modello è stato sviluppato sulla base di un database di 75 rotatorie a quattro bracci utilizzando il prodotto tra i flussi principali e quelli secondari, con l'aggiunta delle variabili geometriche G_i e dei parametri b_i così come segue:

$$A = b_0 \cdot Q_{Major}^{b_1} \cdot Q_{Minor}^{b_2} \cdot \exp\left(\sum [G_i \cdot b_i]\right) \quad [\text{Eq. 2.26}]$$

Comunque, nessuna delle cinque variabili geometriche prese in considerazione si è dimostrata più significativa del prodotto tra i flussi principale e secondario. Cosicché, il miglior modello binomiale negativo per la previsione del numero totale d'incidenti per le rotatorie a quattro bracci, è il seguente:

$$TOTAL = 2.40 \cdot 10^{-04} \cdot Q_{Major}^{0.49} \cdot Q_{Minor}^{0.52} \quad k = 0.17 \quad [\text{Eq. 2.27}]$$

2.3.3.3.b. Rotatorie a tre bracci

Harper, attraverso un database di 14 rotatorie a tre bracci, non è riuscito a sviluppare un modello previsionale d'incidentalità in quanto forme di tipo binomiale negative non sono risultate statisticamente significative. Per di più, così come avveniva per le rotatorie a quattro rami, nessuna variabile geometrica si è dimostrata rilevante.

2.4. La rotatoria come strumento di “traffic calming”

Dai risultati delle analisi *before-after* analizzate nei precedenti paragrafi, si nota come una peculiarità delle rotatorie sia quella di regolare la velocità dei veicoli sia in ingresso, che in attraversamento ed in uscita. Ciò probabilmente è l'elemento caratteristico fondamentale che garantisce alla rotatorie un grado di sicurezza notevolmente più alto rispetto ai tradizionali incroci a raso regolati da segnali di stop, di dare precedenza o da semafori.

Un ruolo delicato è anche svolto dalle curvature adottate per i rami d'ingresso: infatti i raggi, adottati per sagomare gli ingressi alla corona giratoria, determinano la riduzione della velocità dei veicoli in immissione già prima della linea del dare precedenza. In pratica, il dimensionamento degli elementi geometrici dei rami di

accesso si può ritenere corretto, dal punto di vista geometrico e da quello funzionale, se è in grado di garantire raggi di deflessione delle traiettorie veicolari (sia in ingresso che nella percorrenza dell'anello) coerenti con i limiti di velocità previsti o desiderati.

Quanto appena affermato risulta visualizzato negli schemi di percorrenza di due intersezioni (una a quattro bracci ed una a circolazione rotatoria) riportati in Figura 2.15.

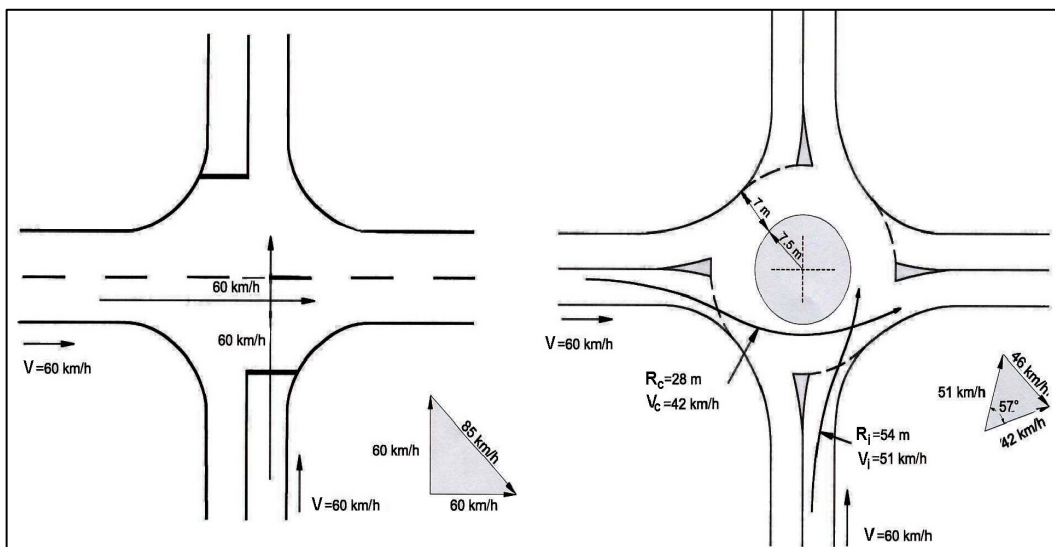


Figura 2.15: Confronto fra le velocità operative in due diverse tipologie d'intersezione [2.7]

Si può infatti notare come, nel caso dell'intersezione a doppio T, non sussista alcuna limitazione alle velocità di ingresso le quali, oltre a mantenersi costantemente pari a 60 km/h , si traducono in un'elevata velocità relativa (85 km/h) tra i veicoli in immissione e quelli in attraversamento, con conseguenze facilmente immaginabili in caso di scontro.

Tutt'altro discorso si deve fare, invece, per la rotatoria. Infatti, le curvature imposte ai rami di accesso determinano velocità ridotte sia per i veicoli in ingresso ($V_i = 51 \text{ km/h}$), che per quelli in circolo sull'anello ($V_C = 42 \text{ km/h}$). Ne consegue una velocità relativa, tra veicoli in immissione e veicoli circolanti, pari a 46 km/h (pari a poco più della metà della velocità relativa valutata nel caso dell'intersezione a quattro rami).

Di conseguenza la presenza di una serie ravvicinata di intersezioni a circolazione rotatoria garantisce sensibili riduzioni di velocità nell'attraversamento delle

intersezioni stradali medesime, a tutto vantaggio delle prestazioni in termini di sicurezza. Pertanto, le rotatorie ben dimensionate si possono, a tutti gli effetti, catalogare come interventi di moderazione della velocità, ossia di Traffic Calming.

Tali tipologie di dispositivi possono essere così classificate [2.7]:

- puntuali;
- lungo l'asse;
- coordinati.

L'intervento puntuale consiste in un particolare trattamento della sede stradale, realizzato in un ambito ridotto, con lo scopo principale di obbligare i conducenti ad un comportamento corretto. Questi particolari interventi devono essere adeguatamente segnalati, in modo tale da essere percepiti con abbondante anticipo dagli automobilisti consentendogli quindi di rettificare il loro comportamento di guida.

L'intervento lungo l'asse corrisponde invece nella trasformazione di un tratto esteso di strada, attraverso la rottura della prospettiva lineare, ottenuta con l'inserimento di ostacoli alla visuale e con la realizzazione di interventi puntuali.

Gli interventi coordinati consistono in quelle trasformazioni che si riferiscono a situazioni complesse e che, attraverso l'applicazione di interventi puntuali e/o lungo l'asse, realizzano dei veri e propri percorsi protetti.

Pertanto le rotatorie, inserite in un percorso urbano o extraurbano, possono essere classificate a pieno titolo come interventi di Traffic Calming, puntuali o lungo l'asse a seconda che siano realizzate in maniera isolata o in sequenza.

A tal proposito è conveniente esporre sinteticamente i risultati di un'indagine sperimentale condotta presso la circonvallazione di un comune del catanese [2.7], avente come peculiarità la presenza di quattro rotatorie consecutive e di tre intersezioni a raso a quattro braccia, due delle quali intervallate da un altro incrocio a circolazione giratoria. Il confronto tra le condizioni cinematiche indotte dalla sequenza delle rotatorie e le prestazioni in termini di velocità offerte dalle intersezioni a raso "tradizionali", permetterà di mettere in risalto l'effetto di traffic calming garantito dalle rotatorie presenti nel contesto periurbano oggetto dell'analisi.

Nelle Figure 2.16 e 2.17 sono riportati i profili della velocità media e dell'85° percentile per una rotatoria e per un'intersezione a raso fra quelle analizzate. E' chiaro che questi sono solo alcuni dei risultati ottenuti dalla vasta campagna d'indagine descritta in precedenza.

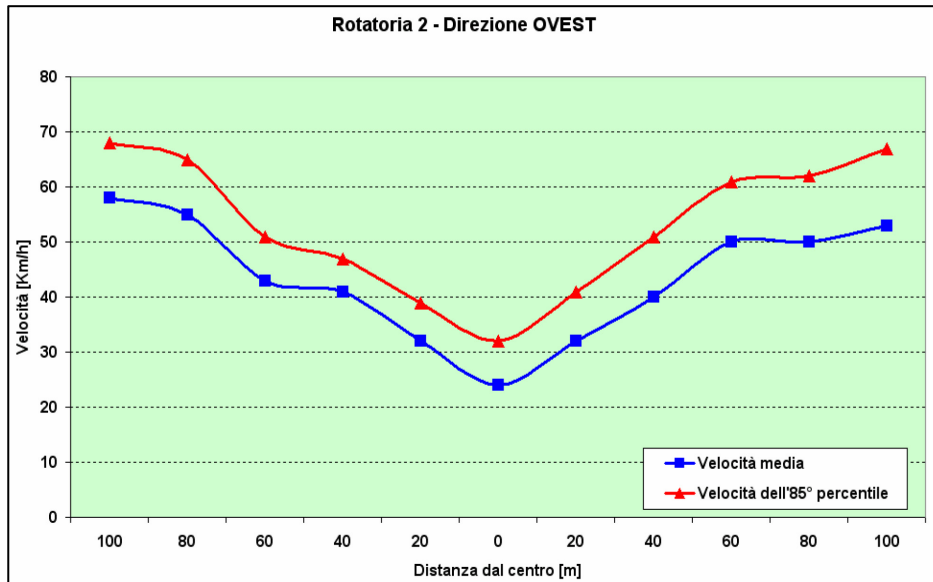


Figura 2.16: Andamento delle velocità di riferimento per una rotatoria [2.7]

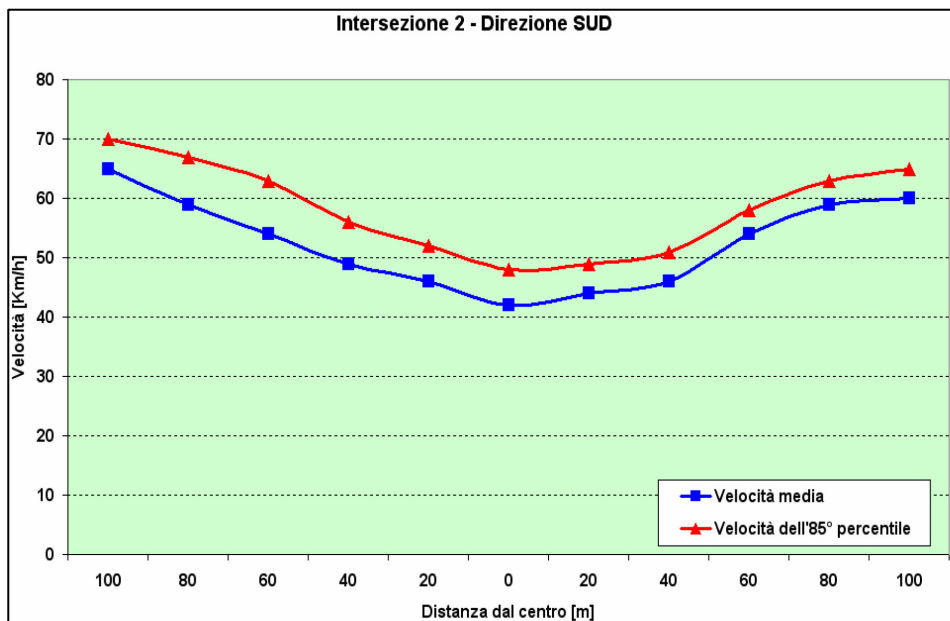


Figura 2.17: Andamento delle velocità di riferimento per un'intersezione [2.7]

La realizzazione dei profili cinematici è stata effettuata a partire dal rilievo delle velocità di transito dei veicoli in ingresso ed in uscita dalle rotatorie. Al fine di caratterizzare compiutamente la variazione delle caratteristiche cinematiche dei veicoli in approccio alle rotatorie, sono state scelte delle sezioni di rilievo, in entrambi i sensi di marcia della circonvallazione, posizionate, a partire dal centro di ognuna delle cinque rotatorie analizzate, ad intervalli reciproci di 20 m fino ad una distanza progressiva di 100 m. Inoltre, si è voluto prendere in esame anche il contributo della corona giratoria alla riduzione della velocità; a tale scopo si sono scelte altre due sezioni di rilievo poste approssimativamente in corrispondenza del punto di mezzo della distanza compresa tra le due cuspidi appartenenti alle isole di separazione esterne delle corsie di ingresso/uscita di due rami affluenti consecutivi. Anche nel caso delle intersezioni a raso di tipo convenzionale sono state adottate modalità di rilevamento analoghe a quelle impiegate per le rotatorie: si sono scelte sezioni di rilievo, in entrambi i sensi di marcia della strada principale, posizionate, a partire dal centro dell'incrocio, ad intervalli consecutivi di 20 m, fino ad una distanza complessiva di 100 m; altre due sezioni sono state posizionate a partire dal centro dell'incrocio ed in direzione ortogonale ai due tratti di circonvallazione presenti in ambedue i sensi di percorrenza.

Tenendo conto, comunque, dei dati acquisiti, è possibile compiere le seguenti osservazioni:

- Nelle rotatorie, la differenza tra la velocità media in ingresso e quella in uscita è contenuta entro un intervallo compreso tra i 5 e gli 8 km/h. La riduzione di velocità indotta dall'attraversamento della corona giratoria è, invece, maggiormente significativa in quanto compresa tra i 20 e i 30 km/h (così come si apprezza dall'analisi dei dati relativi al centro della rotatoria). Per le velocità dell'85° percentile si riscontra un andamento analogo a quello delle velocità medie; i valori di V_{85} sono però generalmente più grandi di quelli di V_m e le maggiori differenze si riscontrano in corrispondenza dei punti estremi nei quali tale variabilità si attesta tra i 5 e i 10 km/h.

- Nelle intersezioni a raso, la variazione della velocità media, in entrambi i sensi di marcia, non è così marcata come nel caso delle rotatorie. Infatti, tra i punti di rilevamento più lontani a quelli interni alle intersezioni si registra una variazione che rientra entro 10-20 km/h. Considerazioni del tutto simili si possono ripetere per ciò che concerne l'andamento della velocità dell'85° percentile, per la quale però, a differenza delle rotatorie, gli scostamenti rispetto alla velocità media sono alquanto ridotti (da un minimo di 1 km/h ad un massimo di 8 km/h).
- Dal confronto tra i valori delle velocità ottenuti in corrispondenza della zona centrale delle intersezioni, sia a raso che a circolazione rotatoria, emerge almeno un altro importante risultato: la velocità al centro della rotatoria è significativamente più bassa di quella riscontrabile nelle postazioni analoghe prescelte per le intersezioni "classiche". In particolare la V_m varia tra 20 e 32 km/h per le rotatorie, e tra 38 e 44 km/h per le intersezioni a raso; mentre la V_{85} è compresa tra 43 km/h e 49 km/h per i nodi a circolazione tradizionale e tra 24 km/h e 39 km/h per quelli a circolazione giratoria.

In sintesi, si può affermare che la variazione media della velocità tra le sezioni estreme dei rami d'ingresso e di uscita di una rotatoria - considerate convenzionalmente ad una distanza di 100 m dal centro dell'incrocio - è variabile mediamente tra il 2% e il 7%; analogamente, la percentuale media di variabilità delle velocità in immissione ed in uscita da un'intersezione a raso tradizionale si attesta tra il 3% ed il 9%.

Riguardo invece la riduzione di velocità che si manifesta al passaggio dall'ingresso delle rotatorie alla marcia sulla corona giratoria, si registrano percentuali medie comprese tra il 40% ed il 55%; nel caso delle intersezioni a raso, l'analogo confronto tra le velocità si traduce in una diminuzione media percentuale compresa tra il 30% ed il 35%.

Se considera poi, l'incremento di velocità dovuto al passaggio dalla corona giratoria all'estremità del braccio di uscita (distante anch'essa 100 metri dal centro), si

ha una variabilità mediamente compresa tra il 35% ed il 55%; nel caso delle intersezioni a raso a quattro bracci, la variazione di velocità tra la fase di attraversamento del centro e il raggiungimento della sezione del ramo di uscita posta a 100 metri dal centro del nodo, si esplica in un incremento percentuale compreso mediamente tra il 25% ed il 30%.

I dati dedotti dalla campagna d'indagine ed i commenti appena svolti forniscono un panorama già abbastanza chiaro sulla funzione della rotatoria come elemento di moderazione delle velocità; tuttavia, sempre nel contesto della medesima campagna di rilievo, si sono volute analizzare le variazioni di velocità indotte dal passaggio da un'intersezione all'altra.

In particolare, gli autori si sono soffermati sull'andamento delle velocità relativo alla sequenza costituita da due rotatorie (la 5 e la 1) intervallate da un'intersezione a raso (classificata con la lettera C).

Nelle Figure 2.18 e 2.19 sono riportati i diagrammi delle velocità lungo i due itinerari (in andata ed in ritorno).

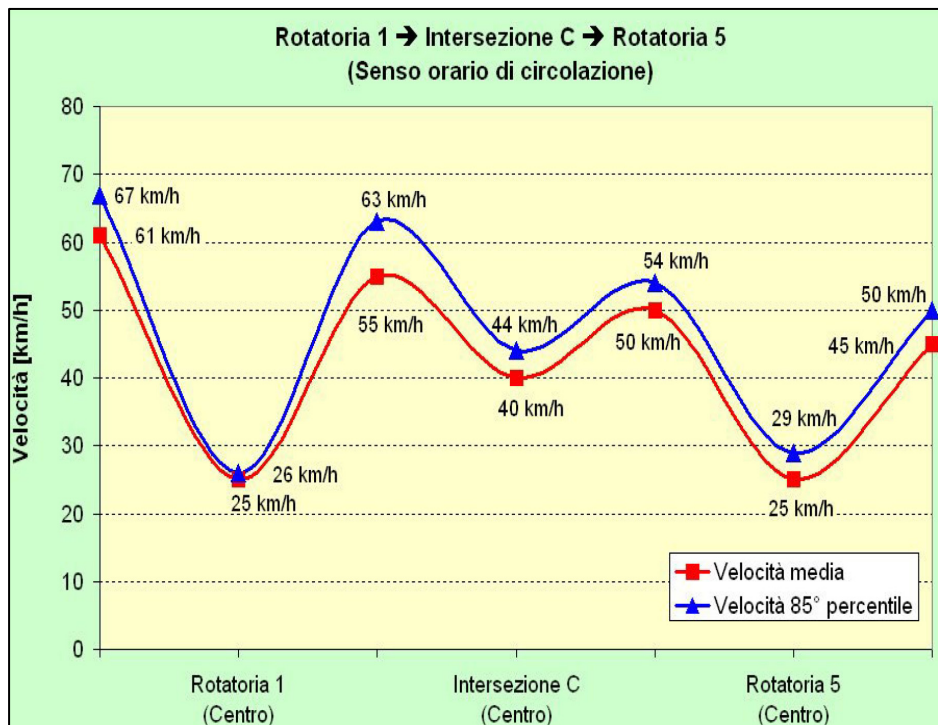


Figura 2.18: Andamento delle velocità di riferimento lungo il percorso d'andata [2.7]

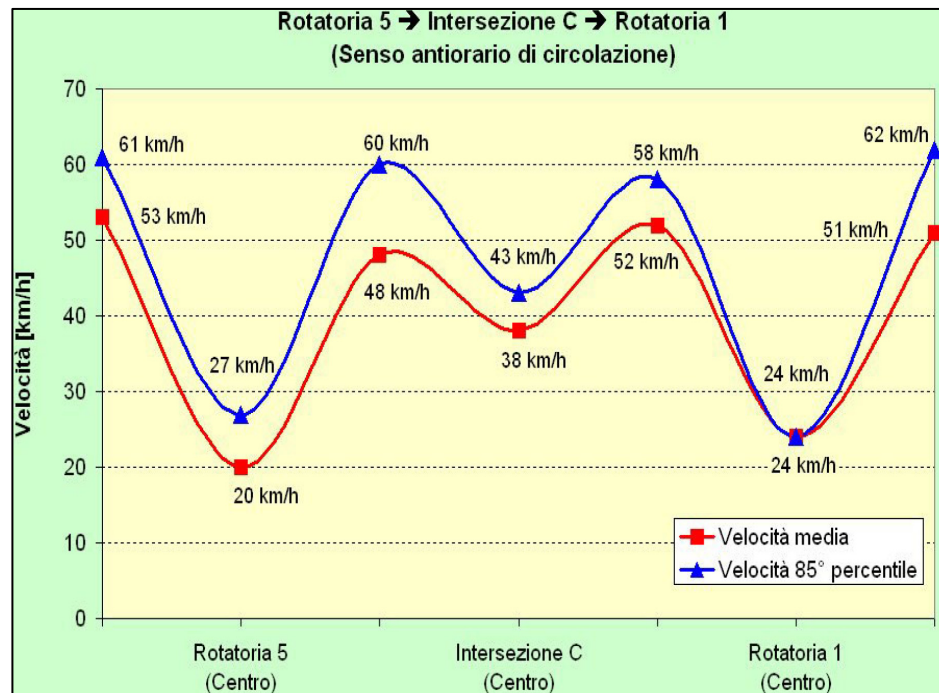


Figura 2.19: Andamento delle velocità di riferimento lungo il percorso di ritorno [2.7]

Dall'analisi dei due diagrammi riportati nelle precedenti figure si può osservare che:

- la riduzione di velocità nelle fasi di avvicinamento alle rotatorie risulta alquanto significativa: è compresa tra 33 km/h e 36 km/h con riferimento alla velocità media, ed è variabile tra 34 e 41 km/h se, invece, si considera la velocità dell'85° percentile;
- l'incremento di velocità man mano che ci si allontana da una rotatoria, valutato in corrispondenza delle sezioni estreme del rilievo, assume i seguenti valori: è interno all'intervallo avente per estremi 20 km/h e 27 km/h (con riferimento a V_m), varia tra 21 km/h e 38 km/h (nel caso di V_{85});
- la diminuzione di velocità indotta dalla presenza dell'intersezione a raso risulta meno significativa di quella che si manifesta per effetto della presenza delle rotatorie: con riferimento alla riduzione della velocità media a partire dal valore massimo assunto in corrispondenza delle sezioni intermedie comprese tra le rotatorie e le intersezioni a raso, si ha

un range di variabilità compreso tra 10 km/h e 15 km/h; analogamente, per la velocità dell'85° percentile, si ha una riduzione compresa tra 17 km/h e 19 km/h;

- anche l'incremento di velocità nel passaggio dal centro dell'intersezione a raso al punto di mezzo della congiungente l'intersezione medesima con una delle due rotatorie, risulta alquanto contenuto: varia tra 10 km/h e 14 km/h nel caso della velocità media, è compreso tra 10 km/h e 15 km/h se ci si riferisce alla velocità dell'85° percentile.

Al fine di ribadire l'efficacia delle rotatorie come dispositivi di traffic calming, possiamo ulteriormente sintetizzare i risultati dedotti dall'indagine sperimentale; in particolare, si è riscontrata una riduzione media della velocità del 55÷60% nelle fasi di avvicinamento alle rotatorie, ed una riduzione molto più contenuta, pari circa al 20÷30%, nelle situazioni in cui gli utenti si approssimano al centro dell'intersezione a raso "classica"; analogamente, gli incrementi di velocità che si manifestano mediamente nelle fasi di allontanamento delle rotatorie sono dell'ordine del 45÷60%, a fronte di un incremento medio di velocità pari a circa il 20÷25% nel passaggio dall'intersezione a raso ai tronchi adiacenti.

2.5. Altri aspetti dell'uso dello schema a rotatoria

Da quanto esposto in precedenza, è evidente che con la soluzione a rotatoria si ottiene una notevole riduzione del numero di incidenti e della loro gravità. Possiamo così riassumere i motivi di questa riduzione e i principali vantaggi riscontrati nell'utilizzo di questa tipologia di intersezione:

- la rotatoria, rispetto ad un'intersezione classica a raso, consente una riduzione dei punti di conflitto comportanti l'intersezione delle correnti veicolari;
- si eliminano le manovre di svolta a sinistra che sono la causa della maggior parte degli incidenti mortali nelle 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 l'utente 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;
- flessibilità degli itinerari data la possibilità di effettuare, in sicurezza, una manovra per lo più proibita negli incroci tradizionali: l'inversione di marcia;
- semplificazione della segnaletica verticale: la rotatoria consente l'installazione di una segnaletica più sobria e maggiormente comprensibile;
- la pianificazione dello spazio: l'utilizzo di questo incrocio contrassegna certi nodi importanti, delimita le strade di forma diversa (fine di autostrade, di superstrade o vie a scorrimento veloce) e di funzioni diverse (ingresso in un centro abitato per esempio). In tal caso la rotatoria delimita il terreno urbanizzabile e l'isola di rotazione consente la valorizzazione del luogo (pur considerando i necessari vincoli di sicurezza) con un intervento architettonico o paesaggistico di bell'effetto;
- la capacità è superiore a quella di un incrocio ordinario ed è inferiore a quella degli incroci regolati da gruppi semaforici, che sono però sconsigliati fuori dei centri abitati a causa del loro pessimo grado di sicurezza in tale ambito;
- il funzionamento: a parte la manutenzione dell'isola rotazionale (che può essere minima), la rotatoria non richiede una manutenzione specifica e

non comporta costi di gestione (non può rimanere in panne come i semafori);

- la moderazione della circolazione: sulle strade di collegamento urbane secondarie o su quelle principali dove il volume del traffico degrada le condizioni di vita della popolazione residente, una successione di rotatorie comporta dei vincoli ed un allungamento dei tempi di percorrenza, in particolare nelle ore di morbida, atti a favorire il trasferimento del traffico non locale su altri assi viabilistici od altri mezzi di trasporto.

La peculiarità fondamentale della rotatoria è quella di non attribuire priorità ad alcuna delle strade che si intersecano. Tale prerogativa è associata anche al principale svantaggio di questo tipo di intersezione: l'impossibilità di privilegiare una corrente veicolare piuttosto che un'altra. Ciò diventa un problema nel caso in cui si volesse favorire il rapido deflusso dei mezzi di trasporto pubblico o dei mezzi di soccorso; mentre è possibile predisporre corsie riservate sino all'entrata della rotatoria, l'immissione dei mezzi di trasporto pubblico o di soccorso nella corona giratoria non può usufruire del diritto di precedenza.

Bisogna anche considerare la totale inconciliabilità delle rotatorie con i moderni sistemi di regolazione centralizzata e diretta del traffico che consentono la programmazione delle precedenze per determinati flussi veicolari.

Altri svantaggi riguardano i forti condizionamenti imposti dai siti per il corretto posizionamento e la regolare funzionalità delle rotatorie.

Infatti, facendo riferimento ai contesti in cui è consigliabile la realizzazione di un incrocio a circolazione rotatoria, bisogna tener presente che, secondo quanto disposto nel "Codice della Strada" [2.28] e dalle "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" [2.2], la rotatoria è ammessa come soluzione dell'incrocio solo tra le seguenti categorie di strade:

- strade di categoria C (extraurbane secondarie);
- strade di categoria E (urbane di quartiere);
- strade di categoria F (locali urbane e locali extraurbane).

La decisione di risolvere un incrocio con un sistema di circolazione a rotatoria è basata su criteri riguardanti la gestione del traffico e la sistemazione urbanistica. La realizzazione di una rotatoria è raccomandata nei seguenti casi:

- nelle intersezioni in cui i volumi di traffico sono tali per cui la regolamentazione tramite segnale di “Stop” o di “Dare precedenza” genera ritardi inaccettabili per la strada secondaria;
- nel caso di intersezioni in cui è elevato il perditempo causato dalla regolazione semaforica. Le rotatorie offrono capacità simili a quelle delle intersezioni semaforizzate, ma operano con minor perditempo e maggiore sicurezza;
- nella sistemazione di incroci dove gli incidenti si verificano ripetutamente, ad esempio a causa dell’alta velocità;
- nelle intersezioni con più di quattro rami;
- nelle intersezioni caratterizzate da un’elevata percentuale di svolte a sinistra;
- sulle strade locali, ove non si desidera dare la priorità a nessuna direttrice e dove la presenza di una rotatoria può incrementare la sicurezza e ottimizzare lo smaltimento dei flussi veicolari verso i quartieri limitrofi;
- nel caso di intersezioni tra strade extraurbane caratterizzate da elevate velocità di marcia e da notevoli flussi di svolta a sinistra;
- nelle intersezioni a Y o a T tra strade principali;
- nelle aree dove si vuole ridurre l’inquinamento, sia acustico che atmosferico, di origine veicolare attraverso la fluidificazione del traffico e la riduzione delle manovre di “*stop and go*”.

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.

I principali condizionamenti derivano:

- dalla conformazione dello spazio esistente, tale da impedire il corretto sviluppo e dimensionamento della rotatoria;

- dalla topografia accidentata da non permettere l'adeguato andamento plano-altimetrico della rotatoria (pendenze longitudinali eccessive, problemi di visibilità planimetrica, ecc.);
- dalla vicinanza di poli attrattori/generatori di traffico pesante che potrebbero condizionare la fruibilità della rotatoria a causa degli elevati volumi di mezzi commerciali;
- dalla presenza, a valle di alcuni rami della rotatoria, di sistemi di controllo del traffico che potrebbero causare colonne tali da intasare l'anello;
- dalla presenza di altre modalità di controllo del traffico che gestiscono l'assegnazione delle precedenza (passaggi a livello);
- dalla presenza di strade con caratteristiche di volumi di traffico molto differenti; in genere è sconsigliato l'utilizzo della rotatoria quando il rapporto tra il flusso sull'arteria secondaria e quello sull'asse principale è inferiore al 20%;
- dall'esistenza di significativi flussi di pedoni e/o veicoli a due ruote e contemporanea presenza di elevati volumi di traffico.

2.6. Bibliografia specifica del Capitolo 2.

- [2.1] Canale S., Distefano N., Leonardi S., Pappalardo G. (2005) - Progettare le rotatorie - *EPC Libri*, Roma.
- [2.2] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – D. M. 19/04/2006: Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali - Roma.
- [2.3] FHWA (2000) – Roundabouts: an informational guide – Report n. FHWA-RD-00-067 – Federal Highway Administration, U.S. Department Of Transportation, Washington (USA).
- [2.4] Provincia di Padova: Assessorato alla Viabilità (2002) - Linee guida per la progettazione e la verifica delle intersezioni a rotatorie - Provincia di Padova.
- [2.5] Montella A., Elefante A. (2006) – Studio sui fattori contributivi dell'incidentalità nelle rotatorie urbane - in Adeguamento e Manutenzione delle strade esistenti: Atti del XVI Convegno Nazionale SIIV, Rende (CS).
- [2.6] Leonardi S., Pappalardo G. (2002) – Analisi delle prestazioni di sicurezza delle mini-rotatorie. Definizione del livello di servizio allargato - in Atti del XII Convegno Nazionale SIIV, Parma.
- [2.7] Leonardi S., Pappalardo G. (2002) – Rotatorie stradali come dispositivi di traffic calming.
- [2.8] Taekratok T. (2000) – Modern roundabouts for Oregon – Oregon Department of Transportation Research Unit, Oregon (USA).
- [2.9] Arndt O., Troutbeck R. J. (1995) – Relationships between roundabout geometry and accident rates – 1st International Symposium, TRB, Boston (USA).
- [2.10] Curti V., Marescotti L., Mussone L. (2001) – Rotonde. Progetto e valutazione per la sistemazione a rotonda delle intersezioni – Libreria CLUP, Milano.
- [2.11] Scott R. (2005) – High speed approaches at roundabouts - East west partners California Department of Transportation – Transportation Research Board, California (USA).
- [2.12] Vertet M., Brenac T. (2000) - Le rotatorie come strumento di sicurezza.

- [2.13] Crisman B., Fossaluzza A., Roberti R. (2006) – Verifica della sicurezza nelle intersezioni a rotatoria attraverso l'analisi del comportamento degli utenti - in Adeguamento e Manutenzione delle strade esistenti: Atti del XVI Convegno Nazionale SIIV, Rende (CS).
- [2.14] Flannery A., Elefteriadou L. (1999) - A Review of Roundabout Safety Performance in the United States - ITE Journal.
- [2.15] Kennedy J. (2005) – Accidents at roundabouts – Atti del National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (USA).
- [2.16] Nambisan, Shashi S, Parimi (2007) – A Comparative Evaluation of the Safety Performance of Roundabouts and Traditional Intersection Controls - Institute of Transportation Engineers - ITE Journal.
- [2.17] Turner S. A. (2001) - Accident Prediction Models - Transfund Research Report No. 192, Transfund New Zealand, Wellington (Nuova Zelanda).
- [2.18] Harper N. J., Dunn R. C. M. (2006) - Accident Prediction Models at Roundabouts - The University of Auckland, Auckland (Nuova Zelanda).
- [2.19] Harper N. J. (2005) - Accident Prediction Models at Urban Roundabouts in New Zealand - Unpublished Thesis, The University of Auckland, Auckland (Nuova Zelanda).
- [2.20] Transfund (2004) - Project Evaluation Manual - Amendment 8, Transfund New Zealand, Wellington (Nuova Zelanda).
- [2.21] Maycock G., Hall R. D. (1984) - Accidents at 4-Arm Roundabouts - TRRL Laboratory Report 1120, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire (Regno Unito).
- [2.22] Alphan, F., Noelle, U., Guichet, B. (1991) - Roundabouts and road safety: State of the art in France – Atti dell'International Workshop: Intersection without Traffic Signals II (pp. 107–125). Berlino (Germania).
- [2.23] Räsänen, M., Summala, H. (2000) - Car Drivers' Adjustments to Cyclists at Roundabouts - Transportation Human Factors, 2(1), 1–17, Helsinki (Finlandia).

- [2.24] Brilon, W., Stuwe, B., Drews, O. (1993) - Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen [Safety and capacity of roundabouts] - Schlussbericht FE Nr.: 77359/91, Bochum (Germania).
- [2.25] Brilon W., B. Stuwe (1993) - Capacity and Design of Traffic Circles in Germany – In Transportation Research Record 1398. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council (USA).
- [2.26] Centre d'Etude des Transports Urbains (CETUR) (1992) - Safety of Roundabouts in Urban and Suburban Areas – Parigi (Francia).
- [2.27] Comune di Reggio Emilia (2001) - Le rotatorie a Reggio Emilia: progettazione, realizzazione e impatto sul traffico - Area programmazione territoriale e investimenti, Servizio Traffico - Infrastrutture e Verde Pubblico.
- [2.28] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2005) - D.L. 285/1992: Nuovo Codice della strada - Gazzetta ufficiale n.114 del 18/05/1992 e successive modifiche.
- [2.29] Seim K. (1991) - Use, Design and Safety of Small Roundabouts in Norway – In “Inter-sections Without Traffic Signals II”, Springer-Verlag (W. Brilon, ed.), 1991, pp.270–281 (Germania).
- [2.30] Schoon C. C., van Minnen J. (1993) - Accidents on Roundabouts: II. Second study into the road hazard presented by roundabouts, particularly with regard to cyclists and moped riders - R-93-16. The Netherlands: SWOV Institute for Road Safety Research (Olanda).
- [2.31] Arndt O. (1998) - Road Design Incorporating Three Fundamental Safety Parameters - Technology Transfer Forum 5 and 6, Transport Technology Division, Main Roads Department, Queensland (Australia).

Capitolo 3.

GLI STANDARD PRESTAZIONALI DI UNA ROTATORIA: STIMA DELLE CAPACITÀ, DELLE CODE E DEI RITARDI SECONDO LE PRINCIPALI NORMATIVE INTERNAZIONALI

3.1. Introduzione

La capacità di una rotatoria è stata nel corso degli anni ridefinita in funzione delle regole di precedenza (a destra o all'anello) presenti nell'incrocio. Inizialmente le rotatorie erano regolate con la precedenza al flusso entrante, per cui i primi studi (Clayton 1945 e 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. In questo modo, per aumentare il livello di capacità della rotatoria, bisognava allungare quanto più possibile le zone di scambio con la conseguente realizzazione di rotatorie sempre più grandi.

Alla fine degli anni sessanta in Gran Bretagna, con l'introduzione della precedenza al traffico circolante nell'anello (soluzione adottata per eliminare il ricorrente fenomeno della "sovrassaturazione"), il parametro caratteristico divenne la capacità delle entrate.

Si definisce come "Capacità dell'entrata" [3.11] il più piccolo valore del flusso sul ramo d'ingresso che determina la presenza permanente di veicoli in attesa d'immettersi. Tale valore dipende dal flusso che percorre l'anello e quindi dall'insieme dei flussi in ingresso ed in uscita da tutti i bracci della rotatoria. Non è quindi possibile calcolare la capacità di un ramo se non è nota l'intera matrice M Origine/Destinazione della rotatoria, dalla quale si ricava la matrice N il cui generico elemento $p_{i,j}$ fornisce la frazione di flusso entrante da i ed uscente in j .

Per caratterizzare la rotatoria nel suo insieme, esistono due diversi tipi di Capacità

1. Capacità Semplice;

2. Capacità Totale.

Considerando una matrice M Origine/Destinazione e prendendo ∂ come il più piccolo scalare che moltiplicato per M dia luogo ad un insieme di flussi entranti ed uscenti dalla rotatoria tale che la capacità sia raggiunta in uno dei bracci, allora il prodotto di ∂ per il flusso entrante da questo ramo, che si ricava da M , prende il nome di Capacità Semplice della rotatoria.

Pertanto, partendo da una data ripartizione di traffico, la Capacità Semplice è il primo valore di flusso entrante che ha raggiunto la sua capacità (ossia il primo fenomeno di congestione) in seguito ad un aumento uniforme su tutti i bracci.

Data una matrice di distribuzione N , si definisce Capacità Totale di una rotatoria la somma dei flussi in ingresso che, distribuendosi secondo N , determinano il contemporaneo raggiungimento della capacità su tutti i bracci.

Accanto a queste categorie ne esiste una terza, che è quella dei Metodi di Simulazione, i quali si basano sulla modellizzazione delle correnti di traffico e dei comportamenti dei conducenti negli incroci.

Estremamente importante per la valutazione del livello di servizio di una rotatoria, oltre alla capacità, è anche la stima dei ritardi che avvengono durante la manovra d'attraversamento dell'intersezione stessa da parte dei veicoli.

Per poter stimare il tempo d'attraversamento di una rotatoria conviene analizzare le varie fasi in cui tale processo si articola: ad ognuna delle singole fasi è possibile associare una quota parte del ritardo complessivo.

In particolare, prendendo come riferimento la Figura 3.1 si possono distinguere tre distinti intervalli temporali [3.3]:

1. ritardo d'approccio (d_a);
2. ritardo di fermata (d);
3. ritardo di controllo (d_c).

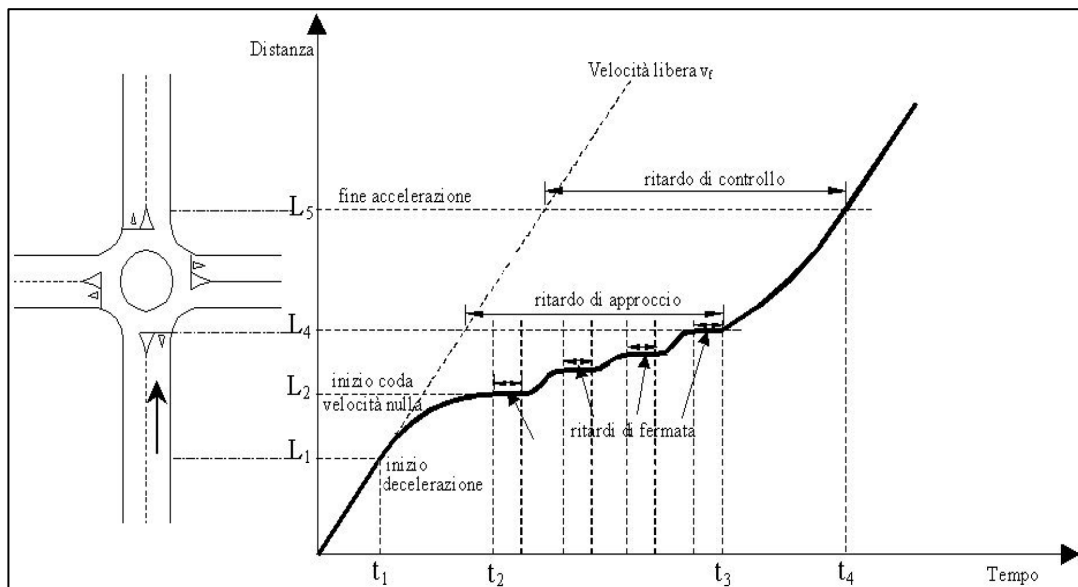


Figura 3.1: Schema dei ritardi nelle fasi d'attraversamento di una rotatoria [3.3]

Entrando nel dettaglio possiamo affermare che:

- Il ritardo d'approccio (d_a) è il tempo che un conducente perde riducendo la propria velocità nell'approssimarsi all'incrocio. Tale ritardo è dato dalla differenza tra il tempo impiegato da un veicolo nel percorrere una distanza prefissata a monte dell'incrocio (L_1) alla linea del dare precedenza (L_4) ed il tempo necessario a percorrere la stessa distanza alla velocità (V_f) di flusso libero. Facendo riferimento alla figura 3.1 si ha:

$$d_a = (t_4 - t_1) - \frac{L_4 - L_1}{V_f}$$

- Il ritardo di fermata (d) è il tempo che un utente perde, prima di attraversare l'intersezione, dovendosi fermare ed aspettare il proprio turno. Ciò avviene nelle rotatorie, quando un veicolo è costretto a fermarsi, anche più volte consecutivamente, per effetto dei veicoli in coda che lo precedono. Naturalmente tale ritardo dipende dal flusso circolante sull'anello e dai gap accettati dai conducenti in ingresso. Esso quindi si può esprimere come:

$$d = t_3 - t_2$$

- Il ritardo di controllo (d_c) è il tempo perso da un guidatore durante le fasi di decelerazione, di fermata e di accelerazione. Esso è dato dalla differenza tra il tempo che intercorre tra l'inizio della fase di decelerazione e la fine della fase di accelerazione ed il tempo impiegato a percorrere la stessa distanza in condizioni di flusso libero. Ed in tal senso si ha:

$$d_a = (t_4 - t_1) - \frac{L_5 - L_1}{V_f}$$

Come già precedentemente espresso, il ritardo, insieme alla capacità, è uno dei parametri fondamentali per valutare il livello di servizio di una rotatoria; in particolare, per la valutazione di quest'ultimo si tiene conto del ritardo di fermata e del ritardo geometrico.

Pertanto, in questo capitolo verranno introdotti ed analizzati i vari metodi di calcolo della capacità e dei ritardi di una rotatoria utilizzati in diversi Paesi europei ed extraeuropei.

Molti metodi applicabili per il calcolo della capacità delle intersezioni regolate da segnale di stop e da quello di dare precedenza vengono anche adoperati quali fondamento per la valutazione delle caratteristiche prestazionali delle rotatorie. I modelli d'analisi delle rotatorie possono quindi essere divisi in due categorie [3.6]:

- Metodi Statistici (empirici) basati sulla regressione dei dati rilevati sul campo;
- Metodi Semiprobabilistici (analitici) che si basano invece sulla teoria del gap-acceptance.

I primi si basano sull'osservazione di rotatorie esistenti al fine di ricavare delle relazioni tra le caratteristiche geometriche e la capacità, i ritardi e la lunghezza media della coda. In questo modo tali metodi danno origine a delle correlazioni (solitamente lineari o esponenziali, ma non necessariamente) tra i flussi in ingresso dai rami ed il traffico circolante di fronte ad essi. Questi modelli generalmente sono migliori di quelli analitici, ma richiedono un gran numero di rotatorie congestionate (ossia in condizioni di soprassaturazione) affinché possano essere ben calibrati ed inoltre sono

poco trasferibili ad altri paesi. Tali metodi sono adottati in Gran Bretagna, Francia, Svizzera, Germania, Norvegia ed Israele.

I modelli semiprobabilistici, basati sulla teoria del gap-acceptance, possono invece essere sviluppati dall'analisi dei dati provenienti da rotatorie non congestionate: gli utenti che si trovano in prossimità degli ingressi (flusso entrante) hanno bisogno di un "gap" accettabile nel flusso circolante tale da permettere loro di compiere la manovra d'ingresso in rotatoria. Il "gap" è l'intervallo temporale che intercorre tra due veicoli consecutivi nel flusso circolante: in tal senso, l'intervallo critico ("critical gap", t_c) non è altro che il più piccolo intervallo accettato dall'utente che si trova sulla linea del dare precedenza. Se il "gap" accettato è più grande dell'intervallo critico, allora l'utente può entrare in rotatoria: il distanziamento temporale che intercorre invece tra due veicoli consecutivi nel flusso entrante, I quali utilizzano lo stesso "gap" per l'ingresso in rotatoria, viene indicato come Tempo di Scalamento in coda ("Follow-up Time", t_f). In questo modo i metodi analitici definiscono la capacità di una rotatoria come funzione dell'intervallo critico, del tempo di scalamento in coda e del flusso circolante. In ogni caso, per poter stimare la capacità di una rotonda, bisogna fare delle assunzioni:

- " t_c " e " t_f " e devono avere dei valori costanti;
- i "gap" si distribuiscono nel flusso circolante in maniera esponenziale;
- volumi costanti per ogni corrente di traffico.

Queste specifiche assunzioni rendono particolarmente difficoltoso l'uso di questi modelli nella realtà. Ci sono inoltre delle altre limitazioni:

- la stima dell'intervallo critico non è assai semplice;
- i fattori geometrici non vengono presi direttamente in considerazione;
- gli intervalli, cosiddetti "inconsistenti" non vengono valutati dai modelli (manovre forzate nel caso di rotatorie congestionate, guidatori del flusso circolante che danno precedenza ai veicoli entranti dai rami, differenti intervalli accettati da differenti veicoli, il rifiuto di intervalli più grandi per poi accettarne degli altri più piccoli, etc.).

In Italia comunque la carenza di parametri normativi ha un po' frenato lo sviluppo delle rotatorie. Infatti, mentre il panorama normativo internazionale (Francia, USA, Australia, Regno Unito, Germania, Svezia) offre da oltre un ventennio numerosi schemi di approccio al problema del dimensionamento di una rotatoria (calcolo della capacità, etc.), in Italia invece sono state presentate delle linee guida a carattere prenormativo redatte da una commissione nominata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: "Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali" [3.11]. In essa il tema della rotatoria viene affrontato facendo riferimento, per quanto riguarda il calcolo della capacità e dei parametri prestazionali, alla metodologia francese del SETRA ("Service d'études techniques des routes et autoroutes") [3.9]. Ad oggi, tale documento è divenuto norma con il Decreto Ministeriale del 19/04/2006 dal titolo "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali" [3.4], il quale però ha completamente perso la parte relativa allo studio delle capacità e delle "performance" funzionali delle rotatorie, fornendo esclusivamente delle indicazioni puntuali sugli aspetti geometrici di tali soluzioni.

In ogni caso, il vuoto normativo lasciato dal D. M. del 19/04/2006 [3.4], non ha frenato il vertiginoso aumento dell'uso della soluzione a rotatoria per le intersezioni nel nostro Paese e ciò è probabilmente legato alla semplicità di realizzazione di tale schema ed ai bassi costi di manutenzione. Questo ha in pratica condotto molto spesso alla realizzazione di rotonde contraddistinte da numerose forzature e grossolani errori di progettazione.

Nei paragrafi successivi verranno riportate le metodologie di calcolo della capacità e dei ritardi in rotatoria secondo le seguenti normative internazionali:

- norme francesi;
- norme tedesche;
- norme americane;
- norme inglesi;
- norme svizzere;
- norme australiane;
- norme svedesi.

La Tabella 3.1 riassume le principali metodologie internazionali per il calcolo della capacità in rotatoria [3.6].

PAESE	AUTORI	TIPO	APPLICABILITÀ	PARAMETRI D'INGRESSO
USA	HCM (2000)	Analitico	1 Corsia	Flusso circolante; intervallo critico; tempo di scalamiento in coda.
	FHWA Roundabout Guide	Statistico	Urbane compatte 1 Corsia	Flusso circolante.
		Statistico	1 Corsia D=30÷40m	Flusso circolante.
		Statistico	2 Corsie D=55÷60m	Flusso circolante.
Svizzera	SIMON (1991)	Statistico	1 Corsia Linea Bus	Flusso circolante .
	LAUSANNE (1991)	Statistico	1 Corsia 3 Corsie	Flusso circolante; flusso d'ingresso; zona di scambio.
Inghilterra	KIMBER (1980)	Statistico	Tutti i tipi	Flusso circolante; lunghezza svasatura; larghezza ingresso; angolo d'ingresso; larghezza strada; diametro isola.
Francia	SETRA	Statistico	Tutti i tipi	Flusso circolante; flusso uscente; larghezza ingresso; larghezza dell'isola spartitraffico; larghezza dell'anello.
	LOUAH (1988)	Statistico	Tutti i tipi	Flusso circolante; flusso uscente.
	CETUR (1988)	Statistico	1 Corsia	Flusso circolante.
Germania	BRILON (2004)	Analitico	“Semi-two-lanes”	Flusso circolante; n° corsie d'ingresso; intervallo critico; tempo di scalamiento in coda.
	WU (1996)	Analitico	Corsie multiple	Flusso circolante; n° corsie d'ingresso; n° corsie all'anello; Intervallo critico; Tempo di scalamiento in coda; intervallo minimo.
	BRILON et al. (1996)	Statistico	1 Corsia 3 Corsie	Flusso circolante.
	BRILON et al. (1993)	Statistico	1 Corsia 3 Corsie	Flusso circolante.
	STUWE (1992)	Statistico	1 Corsia 3 Corsie	Flusso circolante; n° corsie d'ingresso; n° corsie circolanti; n° ingressi; diametro; distanza di viaggio.
Svezia	CAPCAL (1995)	Analitico	1 Corsia 2 Corsie	% veicoli pesanti; intervallo critico; tempo di scalamiento in coda; intervallo minimo; proporzione degli arrivi casuali; lunghezza zona di scambio; larghezza zona di scambio.
Australia	Troutbeck (1989)	Analitico	1-3 Corsie in ingresso 1-3 Corsie all'anello	Flusso circolante; flusso svoltante; flusso entrante; n° corsie ingresso; n° corsie all'anello; larghezza entrata; diametro; intervallo critico; tempo di scalamiento in coda.
Olanda	Crow (1999)	Analitico	Tutti i tipi	Flusso circolante; flusso uscente sugli ingressi con attraversamenti di bici.
	Crow et al. (1997)	Analitico	1 Corsia	Flusso circolante; flusso uscente sugli ingressi con attraversamenti di bici.
	Arem et al. (1992)	Analitico	1 Corsia	Flusso circolante; flusso uscente; intervallo critico; tempo di scalamiento in coda; intervallo minimo.
Israele	Polus et al. (1997)	Statistico	1 Corsia	N° ingressi; n° corsie d'ingresso; n° corsie all'anello; limite di velocità.
Austria	Fischer (1997)	Statistico	1 Corsia D=23÷40m	Flusso circolante
Finlandia	Luttinen (2004)	Analitico	Tutti i tipi	Flusso circolante; intervallo critico; tempo di scalamiento in coda

Tabella 3.1: Sommario delle principali metodologie internazionali per il calcolo della capacità

3.2. Le metodologie francesi

In Francia esistono tre diverse formulazioni per il calcolo della capacità di una rotatoria che verranno esposte in dettaglio nei seguenti paragrafi.

3.2.1. La metodologia del SETRA

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 [3.9]. I risultati sperimentali sono stati trattati 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 ed 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 3.2, dove è rappresentato il particolare di una rotatoria in corrispondenza di un braccio.

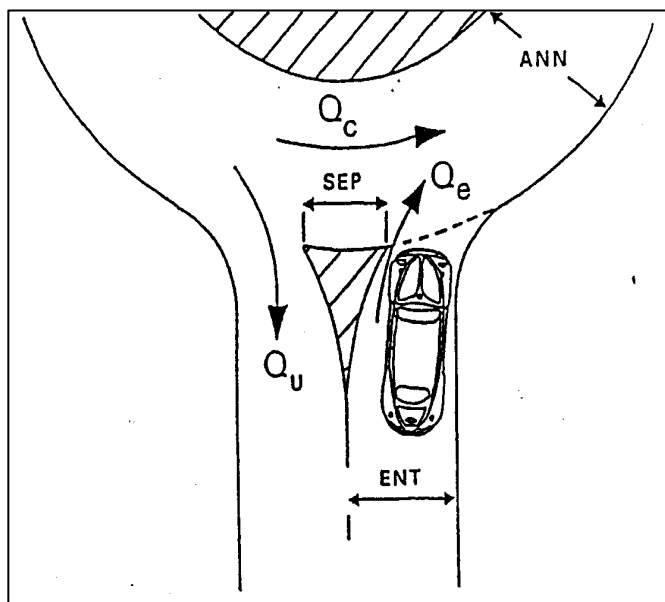


Figura 3.2: Parametri per la formula di capacità delle rotatorie in Francia.

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). Gli studi condotti dai ricercatori francesi del SETRA [3.9] nel 1988 su 56 ingressi di 17 rotatorie hanno quindi condotto alla realizzazione, attraverso la regressione dei dati rilevati, di una formula di tipo lineare per il calcolo della capacità: C è 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:

$$C = f(Q_u, Q_c, SEP, ANN, ENT) \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

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:

$$Q_u' = Q_u \cdot (15 - SEP) / 15 \quad [\text{Eq. 3.2}]$$

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

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

$$Q_d = (Q_c + 2/3 \cdot Q_u') \cdot [1 - 0.085 \cdot (ANN - 8)] \quad [\text{Eq. 3.3}]$$

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

$$C = (1330 - 0.7 \cdot Q_d) \cdot [1 + 0.1 \cdot (ENT - 3.5)] \quad [\text{Eq. 3.4}]$$

In base a questa formula, la capacità dipende dall'ampiezza dell'entrata e dal traffico complessivo di disturbo, costituito dal traffico dell'anello in prossimità dell'ingresso (Q_e) e da quello uscente. Il disturbo del traffico uscente è inversamente proporzionale alla larghezza dell'isola di separazione (SEP), al punto che isole larghe più di 15 metri eliminano l'effetto del traffico uscente.

Dall'analisi dei risultati ottenuti in Francia si può notare che:

- la variabile geometrica più rilevante è la larghezza dell'entrata, misurata dietro il veicolo fermo alla linea di precedenza;
- il traffico sull'anello (Q_e) non è stato distinto, nel caso di più corsie circolari, in flusso esterno ed interno, sia per semplicità e sia perché tale operazione non è risultata statisticamente significativa;
- la larghezza dell'anello non ha molta influenza sull'azione di disturbo prodotta dal flusso uscente (Q_u).

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

$$RC = C - Q_e \quad [\text{Eq. 3.5}]$$

Ed in termini percentuali:

$$RC(\%) = (C - Q_e)/Q_e \quad [\text{Eq. 3.6}]$$

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. Nella Tabella 3.2 è stata riportata 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: Condizione d'esercizio di una rotatoria in funzione della riserva di capacità [3.11]

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. 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 un bypass per la svolta a destra.

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.

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.

Il SETRA, utilizzando un modello basato sull'intervallo critico, ha costruito i diagrammi delle Figure 3.3 e 3.4, 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 , dove:

$$Q'_e = Q / [1 + 0.1 \cdot (ENT - 3.5)] \quad [\text{Eq. 3.7}]$$

Questi diagrammi consentono in modo semplice e veloce di fornire una valutazione sufficientemente approssimata delle caratteristiche di livello di servizio di una rotatoria.

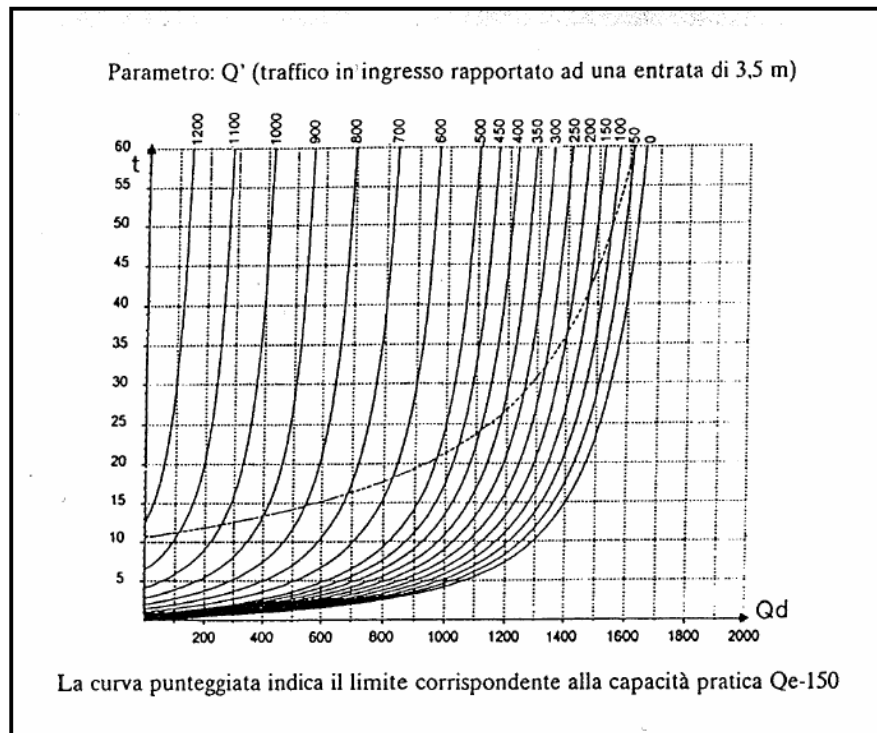


Figura 3.3: Tempi medi di attesa su un braccio di rotatoria (in secondi) [3.11]

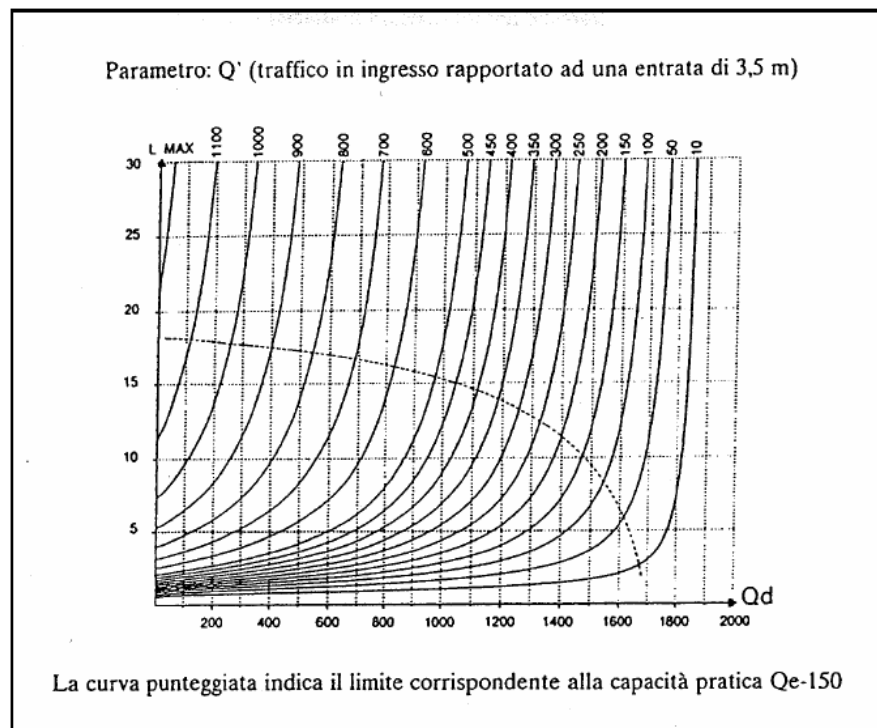


Figura 3.4: 99° percentile del numero di veicoli in attesa su un braccio di rotatoria [3.11]

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";
- la “capacità complessiva”.

Con riferimento ad una matrice O/D, la capacità semplice della rotatoria QS è il primo valore di capacità che può ottenersi ad un ingresso per un aumento uniforme dei flussi di “M”.

Da QS , 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 “ δ_i ” 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 formula generale della capacità. Il valore di δ_i si ricava facilmente in funzione dei flussi entranti e uscenti dagli altri bracci:

$$\delta_i \cdot Q_{e,i} = C_i = f(\delta_i \cdot Q_{c,i}, d_i \cdot Q_{u,i}) \quad [\text{Eq. 3.8}]$$

Il calcolo di δ_i viene ripetuto per tutti i bracci della rotatoria, e sia δ_j il più piccolo dei valori così ottenuti, relativo al braccio j.

La capacità semplice della rotatoria è quindi:

$$QS = \delta_j \cdot Q_{e,j} \quad [\text{Eq. 3.9}]$$

Essa viene raggiunta sul solo braccio j quando la matrice M, e quindi i flussi in ingresso, sono moltiplicati per δ_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:

$$QT = \sum C_i \quad [\text{Eq. 3.10}]$$

nell'ipotesi che le C_i vengano raggiunte contemporaneamente. Per calcolare QT , 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 $Q_{e,i}$:

$$Q_{e,i} = C_i = f_i(Q_{c,i}, Q_{u,i}) = g_i(Q_{e,j \neq i}) \quad [\text{Eq. 3.11}]$$

QT 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:

$$C'_i = Q_{e,i} - 150 \quad [\text{Eq. 3.12}]$$

A partire dagli indici prestazionali QS e QT 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, il tempo medio di attesa e la lunghezza della coda nei vari ingressi così come riportato nelle Figure 3.3 e 3.4 .

3.2.2. La metodologia del CETUR

La metodologia francese del SETRA, essendo stata ottenuta dall'analisi dei dati rilevati su rotatorie sia urbane che extraurbane, è applicabile a qualunque genere di rotatoria ambientata in qualsivoglia contesto. Tuttavia per le rotatorie in ambito urbano risulta più attendibile una formulazione messa a punto dal CETUR (*Centre d'Etudes des Transports Urbains*) [3.22] per la determinazione della capacità dei rami della rotonda stessa. Si tratta, anche in questo caso, di una formulazione di tipo sperimentale, ottenuta dall'osservazione di un vasto campione di rotatorie di taglia medio-grande (raggio interno compreso tra 10 e 30 m), con entrata ad una sola corsia per senso di marcia, con una buona disposizione dei bracci e con una ripartizione equilibrata del traffico. L'espressione della capacità ha quindi la seguente forma:

$$C = 1500 - \frac{5}{6} \cdot Q_d \quad [\text{Eq. 3.13}]$$

In funzione del traffico di disturbo Q_d :

$$Q_d = a \cdot Q_c + b \cdot Q_u \quad [\text{Eq. 3.14}]$$

Dove:

- il parametro “a” varia in funzione del raggio dell’isola centrale, tra 0,9 per $R_i < 15$ m e 0,7 per $R_i > 30$ m;
- il parametro “b” varia in funzione della larghezza dell’isola separatrice, tra 0 per $L_i > 15$ m e 0,3 per $L_i = 0$.

3.2.3. La metodologia del Girabase

Girabase non è altro che il nome del software commerciale correntemente usato in Francia per il calcolo della capacità di una rotatoria. Esso è stato realizzato dal CETE ed è stato accettato dal CETUR e dal SETRA [3.1].

Questa formulazione è stata sviluppata trattando, attraverso delle regressioni statistiche, dati di traffico raccolti durante l’osservazione delle entrate di 45 diverse rotatorie in condizioni di saturazione.

Questo modello può essere applicato per tutte le tipologie di rotonde, dalle mini alle grandi rotatorie, con un numero di rami variabile tra 3 ed 8 e con 1, 2 o 3 corsie all’anello ed agli ingressi.

In Tabella 3.3 sono riportati i campi di variabilità dei vari elementi per l’applicazione della formulazione.

Parametro	Descrizione	Campo di variabilità
L_c	Larghezza entrata	3 ÷ 11 m
L_i	Larghezza isola separatrice	0 ÷ 70 m
L_u	Larghezza uscita	3,5 ÷ 10,5 m
LA	Larghezza anello	4,5 ÷ 17,5 m
R_i	Raggio isola centrale	3,5 ÷ 87,5 m

Tabella 3.3: Condizione d’esercizio di una rotatoria in funzione della riserva di capacità.

La formula per il calcolo della capacità di un ingresso [uvp/h], basata sulla tecnica di regressione esponenziale, è la seguente:

$$C = A \cdot e^{-C_B \cdot Q_d} \quad [\text{Eq. 3.15}]$$

Con:

$$A = \frac{3600}{T_f} \cdot \left(\frac{L_e}{3,5} \right)^{0,8} \quad [\text{Eq. 3.16}]$$

Dove:

T_f = Tempo di sequenza = 2,05 s;

L_e = Larghezza dell'entrata in prossimità della rotatoria, misurata perpendicolarmente alla direzione d'ingresso [m];

C_B = Coefficiente che vale 3,525 per aree urbane e 3,625 per aree extraurbane;

$$Q_d = Q_u \cdot k_a \cdot \left(1 - \frac{Q_u}{Q_c + Q_u} \right) + Q_{ci} \cdot k_{ti} + Q_{ce} \cdot k_{te} \quad [\text{Eq. 3.17}]$$

Q_d = traffico di disturbo in prossimità dell'ingresso considerato [uvp/h];

Q_u = flusso di traffico uscente dall'ingresso considerato [uvp/h];

$Q_c = Q_{ci} + Q_{ce}$ = flusso di traffico circolante sull'anello in corrispondenza dell'ingresso considerato [uvp/h];

Q_{ci} = aliquota di traffico Q_c sulla semicarreggiata interna dell'anello [uvp/h];

Q_{ce} = aliquota di traffico Q_c sulla semicarreggiata esterna dell'anello (a ridosso dell'ingresso) [uvp/h];

$$k_a = \begin{cases} \frac{R_i}{R_i + LA} - \frac{L_i}{L_{i\max}} & \text{per } L_i < L_{i\max} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad [\text{Eq. 3.18}]$$

R_i = raggio dell'isola centrale [m];

LA = larghezza dell'anello [m];

L_i = larghezza dell'isola separatrice ai bracci [m];

$$L_{i\max} = 4,55 \cdot \sqrt{R_i + \frac{LA}{2}} \quad [\text{Eq. 3.19}]$$

$$k_{ii} = \min \begin{cases} \frac{160}{LA \cdot (R_i + LA)} \\ 1 \end{cases} \quad [\text{Eq. 3.20}]$$

$$k_{ie} = \min \begin{cases} 1 - \frac{(LA - 8)}{LA} \cdot \left(\frac{R_i}{(R_i + LA)} \right)^2 \\ 1 \end{cases} \quad [\text{Eq. 3.21}]$$

Va, infine, notato che in Francia, la procedura del Girabase ha sostituito da tempo le altre sviluppate dai diversi centri di ricerca del paese (anche quella del SETRA, che invece trova molta diffusione in Italia).

3.3. La metodologia tedesca dell’HBS 2001

In Germania la capacità delle rotatorie è studiata ormai da molti anni attraverso una serie di ricerche in parte basate sui metodi empirici di regressione ed in parte sulla teoria del “*Gap Acceptance*”. Inizialmente si è preferito utilizzare un approccio empirico, in cui la capacità era considerata direttamente dipendente dal flusso circolante e dal numero di corsie in ingresso ed all’anello.

Tali studi condotti nell’Università della Ruhr a Bochum [3.17] hanno portato nel 1988 alla nascita della prima formula di capacità nota con il nome di formula di Brilon, in cui, per ottenere una relazione tra il flusso entrante Q_e e quello circolante Q_c , è stata fatta una regressione esponenziale dei dati rilevati su rotatorie tedesche, pervenendo a questa espressione:

$$Q_e = A \cdot e^{-\frac{B}{10000} Q_c} \quad (\text{Formula di Brilon}) \quad [\text{Eq. 3.22}]$$

Dove i coefficienti A e B dipendono dal numero di corsie dell’anello e dell’entrata. I loro valori sono riportati nella Tabella 3.4

Numero di Corsie		Numerosità del campione	A	B
Anello	Entrata			
1	1	1060	1226	10,77
2	2	4574	1577	6,61
2-3	1	867	1300	8,60
3	2	968	2018	6,68

Tabella 3.4: Valori dei parametri A e B ricavati fino al 1993

In seguito, altri studi condotti dal governo federale in Germania, hanno dimostrato che la funzione lineare è preferibile a quella esponenziale per un migliore accordo con i dati rilevati (Brilon, Wu e Bondzio) [3.17]:

$$Q_e = C - D \cdot Q_c \text{ [av/h]} \quad [\text{Eq. 3.23}]$$

Dove i valori di *C* e *D* sono riportati in Tabella 3.5.

Numero di Corsie		Numerosità del campione	C	D
Anello	Entrata			
1	1	1504	1218	0,74
2	2	4574	1380	0,50
2-3	1	879	1250	0,53
3	2	968	1409	0,42

Tabella 3.5: Valori dei parametri C e D ricavati fino al 1996

Questo tipo di approccio è continuato fino al 1997, anno in cui Wu, partendo dall'equazione di Tanner, ha realizzato una formula per il calcolo della capacità di una rotatoria che approssima meglio la realtà e che si basa sulla teoria del "Gap Acceptance". Tale espressione è quella tuttora ufficialmente utilizzata in Germania così come indicato dall' "HBS 2001" (equivalente tedesco dell' HCM americano) ed è la seguente [3.26]:

$$C = \left(1 - \frac{\Delta \cdot Q_c}{n_c}\right)^{n_c} \cdot \frac{n_c}{T_f} \cdot \exp[-Q_c \cdot (T_0 - \Delta)] \quad [\text{Eq. 3.24}]$$

In cui:

C = capacità dell'ingresso [uvp/h];

Q_C = flusso circolante all'anello in corrispondenza dell'ingresso considerato
[uvp/h];

n_c = numero di corsie all'anello;

n_e = numero di corsie all'ingresso;

$T_0 = T_C - T_f/2$ [s];

T_C = intervallo critico [s];

T_f = intervallo di sequenza (follow-up time) [s];

Δ = minimo distanziamento tra i veicoli circolanti all'anello[s].

Per poter utilizzare questa equazione bisogna normalizzare i flussi di traffico sulla base dei fattori di conversione riportati in Tabella 3.6 .

	Valori medi in uvp equivalenti
Biciclette	0,5 uvp
Mezzi pesanti (carri)	1,5 uvp
Mezzi pesanti (autoarticolati)	2,0 uvp

Tabella 3.6: Fattori di conversione in unità veicoli passeggeri previsti dalle Norme Tedesche

Per quanto riguarda invece i parametri temporali presenti nell'espressione, i loro valori sono quelli derivanti dalle osservazioni svolte da Stuwe nel 1991 e riportati qua di seguito nella Tabella 3.7 .

Parametro	Valore [s]
T_C	4,1
T_f	2,9
Δ	2,1

Tabella 3.7: Valori dei parametri temporali della Formula di Wu

Come si può notare dall'equazione di Wu, la capacità di ogni entrata dipende naturalmente dal flusso circolante (Q_C) e dal numero di corsie tanto all'anello quanto all'ingresso. Gli altri parametri geometrici non sono stati considerati importanti per il calcolo della capacità: ciò vale anche per la larghezza dell'isola spartitraffico che invece compare sia nella formula francese che in quella svizzera.

Un'applicazione grafica dell'equazione tedesca è riportata nella Figura 3.5, dove le curve sono state ottenute seguendo le indicazioni dell'HBS 2001.

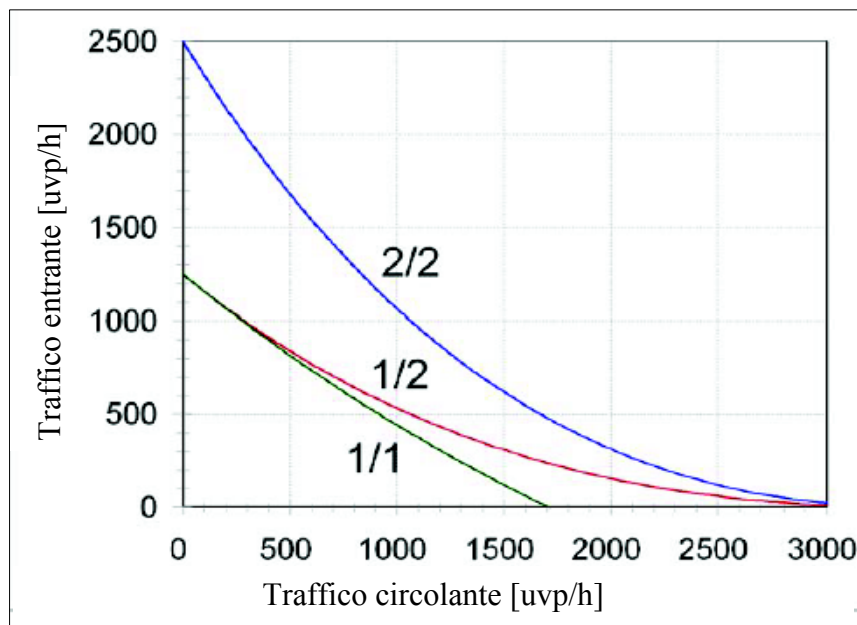


Figura 3.5: Capacità d'entrata di una rotatoria secondo l'HBS 2001 in funzione del numero di corsie Ingresso/Anello

Wu [3.26] ha anche individuato un'espressione in grado di valutare la capacità di rotatorie con le entrate allargate mediante corsie brevi partendo dal concetto di saturazione, inteso come rapporto tra domanda all'ingresso di una rotatoria e la capacità al medesimo ingresso. Le corsie brevi in corrispondenza degli ingressi possono quasi raddoppiare la capacità agli approcci, senza richiedere una carreggiata a due corsie prima della rotatoria, ma allargando semplicemente l'anello. In questo modo la capacità dell'entrata sarà pari al prodotto di un fattore A (valutato in Tab. 3.8) per la capacità di una rotatoria a due corsie.

Numero di spazi di veicolo nella corsia corta, n_f	A
0	0.500
1	0.707
2	0.794
4	0.81
6	0.906
8	0.926
10	0.939

Tabella 3.8: Valori del parametro A secondo Wu

Wu ha ricavato tali valori a partire dai gradi di saturazione delle due corsie, nel caso in cui una serva per svoltare a destra e l'altra per le manovre di svolta a sinistra e di attraversamento. In particolare ha trovato questa espressione del parametro K :

$$K = \frac{1}{\sqrt[n+1]{(X_L + X_T)^{n+1} + (X_R)^{n+1}}} \quad [\text{Eq. 3.25}]$$

Essendo le capacità ed i flussi delle due corsie gli stessi se entrambe le corsie vengono impiegate efficacemente, allora l'espressione si può semplificare in:

$$K = \frac{1}{x \cdot \sqrt[n+1]{2}} \quad [\text{Eq. 3.26}]$$

Con i gradi di saturazione “ x ” delle due corsie uguali. Se anche i flussi massimi sulle due corsie sono uguali allora si può porre $q_1=q_2=q$. In tal modo Wu pone la capacità di una rotatoria con le entrate allargate come:

$$q_{\max} = k \cdot 2 \cdot q = \frac{2q}{x \cdot \sqrt[n+1]{2}} \quad [\text{Eq. 3.27}]$$

Se $q_{\max 2}$ è la capacità di una rotatoria a due corsie, la capacità di ciascuna corsia d'ingresso è $q_{\max 2}/2$, che è uguale al flusso q diviso il grado di saturazione x , quindi la capacità assume la forma:

$$q_{\max} = \frac{q_{\max 2}}{\sqrt[n+1]{2}} \quad [\text{Eq. 3.28}]$$

Con il parametro A dato da:

$$A = \frac{1}{\sqrt[n+1]{2}} \quad [\text{Eq. 3.29}]$$

Recentemente sono stati condotti anche degli studi per l'analisi delle rotatorie compatte con due corsie all'anello ed in particolare le cosiddette “*semi-two-lane roundabouts*”, ossia le rotatorie con un a sola corsia all'anello percorribile però su due file.



Figura 3.6: Immagine di una “semi-two-lane roundabout”.

Nella pubblicazione presentata da Brilon al “National Roundabout Conference 2005” dal titolo “Roundabouts – A state of the art in Germany” [3.8], viene proprio esposta una formula specifica basata su osservazioni effettuate durante intervalli di coda ininterrotta all’entrata. Il comportamento dell’intersezione è approssimato benissimo dalla formula di Wu con l’unico accorgimento di porre $\Delta=0$. In tal modo la formula si semplifica:

$$C = 3600 \cdot \frac{n_e}{T_f} \cdot e^{-\frac{Q_c}{3600} \left(T_c - \frac{T_f}{2} \right)} \quad [\text{Eq. 3.30}]$$

La quale è in pratica l’equazione di capacità di Siegloch.

Nella Tabella 3.9 vengono riportati i parametri ottenuti dalle regressioni statistiche, mentre nella Figura 3.7 sono paragonate le piccole rotatorie percorribili su due corsie con il metodo HBS 2001.

	no. of circulating lanes	no. of entry lanes	n_z	t_g	t_f	t_{min}	valid below q_k
1-lane	1	1	1	4.1	2.9	2.1	1600
2-lane compact RA (no lane marking on the circle)	2	1	1	4.3	2.5	0	1600
		2	1.14	4.3	2.5	0	1600
2-lane large RA (with marked lanes)	2	1	1	4.3	2.5	0	2000
		2	1.6	4.1	3.0	0	2500

Tabella 3.9: Parametri statistici ottenute dalle ricerche tedesche.

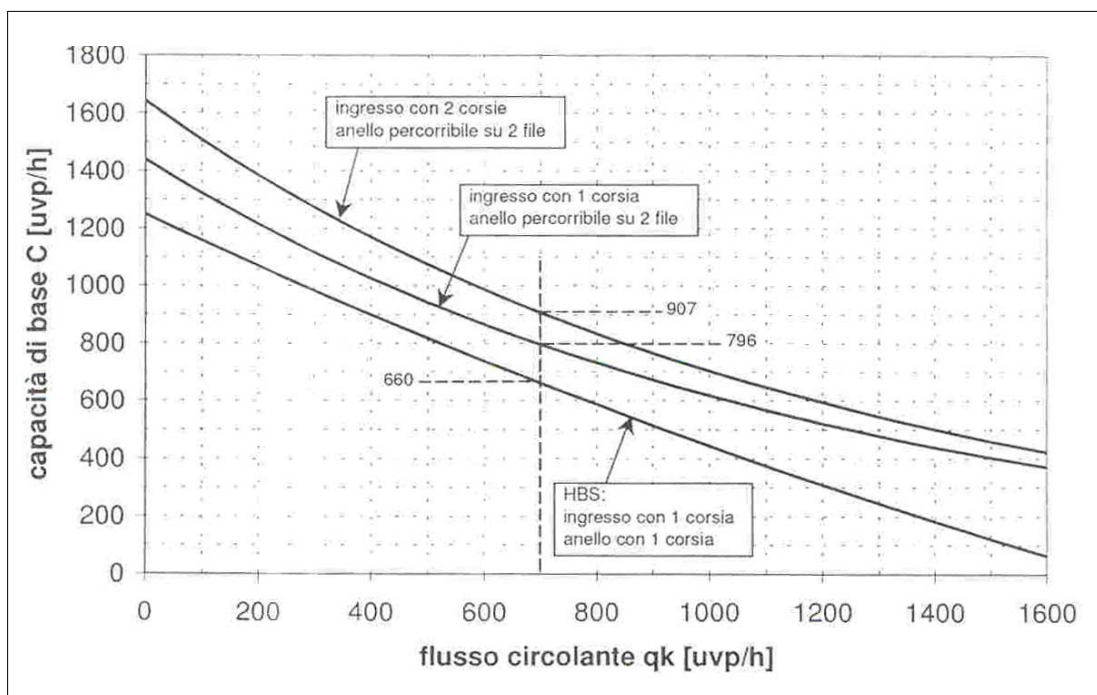


Figura 3.7: Paragone fra HBS 2001 e piccole rotatorie percorribili su due corsie.

3.4. La metodologia americana dell’HCM 2000

Le rotatorie si sono sviluppate con successo in tutto il mondo ed in maniera sempre crescente anche negli USA. Il modello scelto per determinare la capacità delle rotatorie americane si basa sulla teoria del “Gap Acceptance” ed è esposto nel capitolo 17 Part C, nell’ambito delle intersezioni controllate dal segnale di stop (Two Way Stop Controlled), dell’HCM 2000 [3.16].

I parametri di base di questo sistema sono il Tempo Critico (t_c) ed il Tempo di Sequenza (t_f). Solitamente l'analisi della capacità di ogni singolo braccio viene studiata indipendentemente l'una dall'altra, ma si è notato che i percorsi origine-destinazione influenzano le prestazioni dell'intersezione stessa. E ciò è motivabile perché i veicoli che svoltano a sinistra compiono un raggio di curvatura più piccolo, viaggiano più lentamente ed occupano la rotatoria per maggior tempo. In tal modo si riducono le opportunità per chi deve entrare in rotatoria e di conseguenza diminuisce la capacità di un'entrata.

Bisogna aggiungere che la rotatoria, trasformando tutte le svolte in svolte a destra, consente alla teoria del “*Gap Acceptance*” di equiparare il comportamento dei guidatori che affrontano una rotonda a quelli che svoltano a destra in un incrocio regolato da segnali di STOP tra due strade (*TWSC - Two Way Stop Controlled intersection*). Tutto ciò va bene per le rotatorie con una sola corsia all'anello, mentre decade nel caso di due corsie in quanto, l'aumento dei punti di conflitto, influenza il comportamento degli automobilisti.

La formula per la stima della capacità d'ingresso di una rotatoria è la seguente:

$$c_a = \frac{v_c \cdot e^{-\frac{v_c \cdot t_c}{3600}}}{1 - e^{-\frac{v_c \cdot t_f}{3600}}} \quad [\text{Eq. 3.31}]$$

Dove:

c_a = capacità di un'entrata (veic/h);

v_c = traffico circolante di conflitto sull'anello (veic/h);

t_c = Tempo Critico (s);

t_f = Tempo di Sequenza (s).

Gli studi svolti sulle rotatorie negli USA, anche se limitati, hanno permesso di determinare un intervallo di valori per il Tempo Critico e per il Tempo di Sequenza tale da poter effettuare sempre una stima ragionevole della capacità (Tab. 3.10).

	Tempo Critico (s)	Tempo di Sequenza (s)
Limite Superiore	4,1	2,6
Limite Inferiore	4,6	3,1

Tabella 3.10: Intervallo di valori per il Tempo Critico e per quello di Sequenza [3.16]

La relazione tra la capacità in ingresso ed il flusso circolante, sulla base di tali limiti inferiori e superiori di “ t_c ” e di “ t_f ”, è riportata in Figura 3.8.

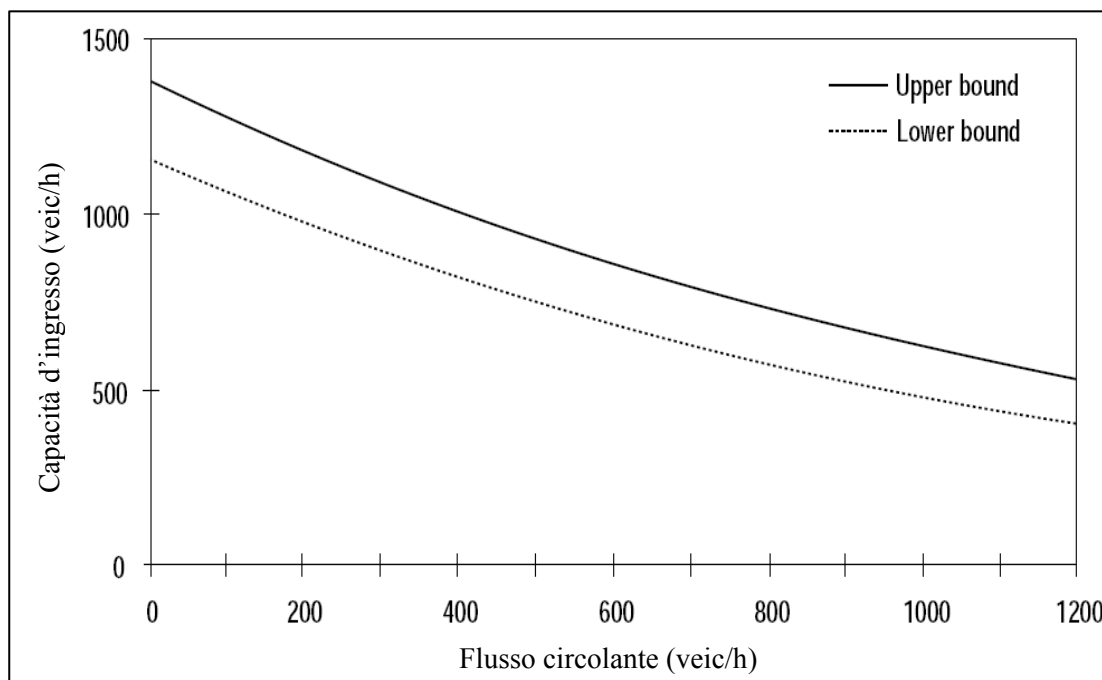


Figura 3.8: Rapporto tra la capacità in ingresso ed il flusso circolante sulla base dei limiti inferiori e superiori di “ t_c ” e di “ t_f ” [3.16]

La metodologia descritta vale solo per le rotatorie con una sola corsia all’anello. Le esperienze riguardanti le rotatorie multicorsia negli USA sono insufficienti per poter supportare una procedura completa d’analisi. Gli studi svolti negli altri Paesi hanno però evidenziato che l’introduzione di una corsia all’anello non aumenta la capacità in maniera proporzionale, ossia: raddoppiando il numero di corsie non si raddoppia la capacità. Inoltre le prestazioni di una rotatoria a più corsie sono influenzate da un maggior numero di problemi, sia geometrici che comportamentali. Quindi per poter effettuare un’analisi completa di questo tipo di rotatorie bisogna rifarsi a modelli realizzati da altre Nazioni, facendo però attenzione

nell'interpretazione dei risultati, in quanto i parametri utilizzati sono tarati per realtà diverse da quella americana.

Comunque, mentre la capacità è un valore ben definito, il livello di servizio è una misura qualitativa che caratterizza le condizioni operative di una rotatoria. Per quantificare il livello di servizio d una rotonda, l'HCM definisce dei parametri fondamentali che sono:

- il grado di saturazione;
- il ritardo complessivo;
- la lunghezza delle code.

Ciascuno di questi parametri riguarda un unico aspetto del livello di servizio di una rotatoria sotto date condizioni geometriche e di traffico per un periodo di 15 minuti per ogni entrata alla rotatoria. I dati vanno presi chiaramente durante le ore di punta in modo tale da avere informazioni sui periodi più congestionati della giornata.

Il ritardo complessivo è un elemento standard per la valutazione delle qualità operative di un'intersezione. Esso può essere scomposto in due componenti: il ritardo dovuto alla segnaletica (ritardo di controllo), che è in sostanza quello percepito dall'utente e che definisce il livello di servizio, ed il ritardo dovuto alla geometria dell'intersezione. L'HCM 2000 definisce una formula in grado di calcolare solo il ritardo di controllo, definendolo come il tempo che un conducente spende in coda nell'attesa di un varco accettabile nel flusso che circola di fronte all'ingresso. Tale ritardo viene così definito:

$$d = \frac{3600}{C_{mx}} + 900 \cdot T \left[\frac{V_x}{C_{mx}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_x}{C_{mx}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_{mx}} \right) \left(\frac{V_x}{C_{mx}} \right)}{450 \cdot T}} \right] \quad [\text{Eq. 3.32}]$$

Dove:

d = ritardo medio di controllo (sec/veic);

V_x = parte di flusso diretto lungo il movimento x (veic/h);

C_{mx} = capacità per il movimento x dell'ingresso m (veic/h);

T = tempo di ricerca (h) [ad esempio 0,25 sta per 15 minuti]

Il grafico in Figura 3.9 rappresenta il variare del ritardo in funzione della capacità di un ingresso e del flusso entrante dal ramo stesso.

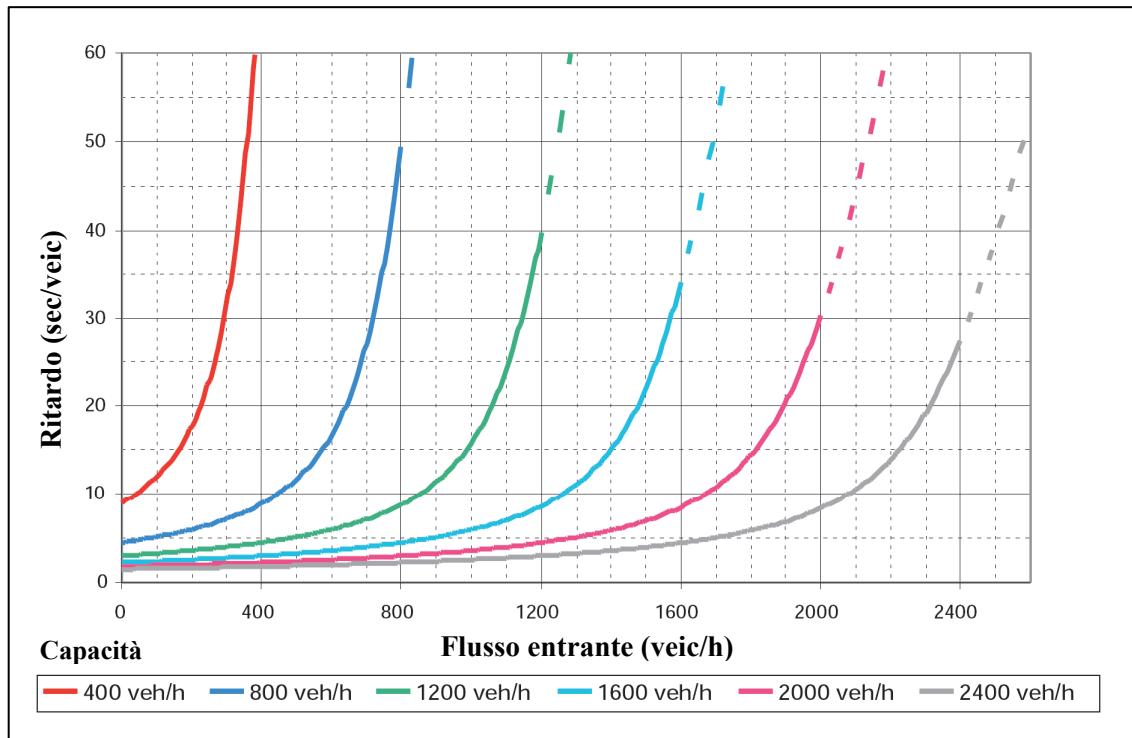


Figura 3.9: Relazione tra flusso entrante e ritardo di fermata [3.5]

La curva continua termina per un rapporto volume/capacità pari ad 1 e prosegue oltre questo valore con una linea tratteggiata. Si può notare benissimo come il ritardo cresca in maniera esponenziale nel momento in cui il flusso si approssima alla capacità, con il risultato che, in quella zona, piccoli cambiamenti di volume corrispondono a notevoli aumenti del ritardo.

Il ritardo geometrico è invece il tempo aggiuntivo che un veicolo, che non va in conflitto con altri flussi, trascorre rallentando alla velocità di percorrenza della rotatoria, attraversando l'intersezione ed accelerando alla velocità operativa. Il calcolo del rallentamento dovuto alle condizioni geometriche richiede una stima di quanti veicoli si fermano alla linea del dare precedenza, in modo da conoscere come la geometria della rotatoria condizioni la velocità dei veicoli durante l'entrata, la

percorrenza e l'uscita in un'intersezione. Una procedura per il calcolo di tale ritardo è contenuta nella normativa australiana.

In ogni caso, dall'analisi del ritardo medio totale, l'HCM 2000 fornisce una tabella in grado di fornire il livello di servizio corrispondente, così come riportato in Tabella 3.11

Livello di servizio trasportistico	Ritardo medio totale R_c (secondi/veicolo)
A	≤ 5.0
B	>5.0 e ≤ 15.0
C	>15.0 e ≤ 25.0
D	>25.0 e ≤ 40.0
E	>40.0 e ≤ 60.0
F	> 60.0

Tabella 3.11: Livelli di servizio per una rotatoria in base all'HCM 2000 [3.16]

Per quanto riguarda invece la lunghezza delle code, essa diventa un parametro importante per valutare l'adeguatezza delle caratteristiche geometriche degli approcci di una rotatoria. La lunghezza media delle code può essere calcolata attraverso la seguente formula:

$$L = \frac{v \cdot d}{3600} \quad [\text{Eq. 3.33}]$$

Dove:

v = flusso in ingresso (veic/h);

d = ritardo medio di controllo (sec/veic).

È equivalente al ritardo espresso in veicoli per un'ora su un ingresso ed è utile per poter paragonare, in termini di caratteristiche prestazionali, una rotatoria con altri tipi di intersezione.

A scopi progettuali è anche possibile utilizzare l'abaco riportato in Figura 3.10 il quale riporta l'andamento del 95° percentile della lunghezza della coda in funzione del grado di saturazione di un approccio. Le curve sono state ottenute per diversi valori del prodotto fra T e la capacità dell'ingresso. Per poter quindi valutare la lunghezza della coda, si entra nell'abaco con il previsto grado di saturazione dell'ingresso.

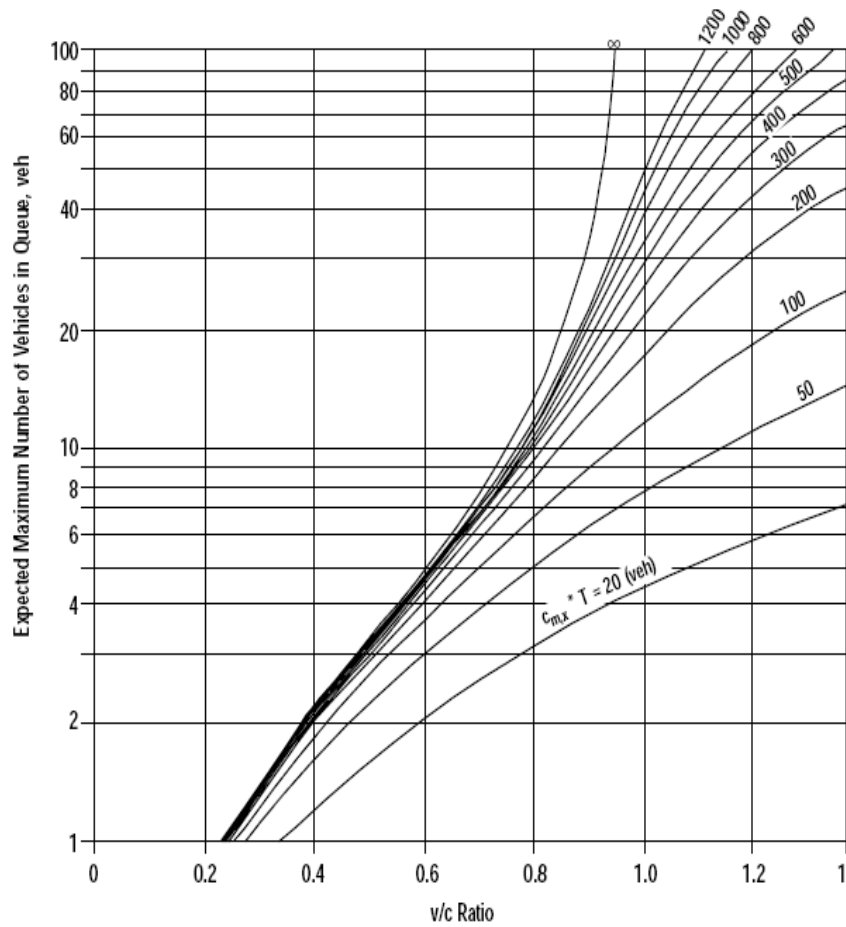


Figura 3.10: Rapporto tra il 95° percentile della lunghezza delle code ed il grado di saturazione di un ingresso [3.5] [3.16]

Alternativamente è possibile reperire delle informazioni in maniera un po' più approssimata attraverso l'utilizzo della seguente relazione:

$$Q_{95} = 900 \cdot T \left[\frac{V_x}{C_{mx}} - 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{V_x}{C_{mx}}\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_{mx}}\right)\left(\frac{V_x}{C_{mx}}\right)}{150 \cdot T}} \right] \left(\frac{C_{mx}}{3600}\right) \quad [\text{Eq. 3.34}]$$

Dove:

Q_{95} = 95° percentile della lunghezza della coda (veic);

V_x = parte di flusso diretto lungo il movimento x (veic/h);

C_{mx} = capacità per il movimento x dell'ingresso m (veic/h);

T = tempo di ricerca (h) [ad esempio 0,25 sta per 15 minuti]

Bisogna comunque fare attenzione al fatto che sia l'abaco che l'espressione precedente sono validi solo per quelle determinate situazioni in cui il grado di saturazione non supera 0,85, cioè quando le code residue sono trascurabili.

3.5. La metodologia inglese del TRRL

La capacità delle rotatorie nel Regno Unito è stata chiaramente definita in momenti e situazioni diverse, in funzione del tipo di norma che regolava il diritto di precedenza.

Infatti nel periodo in cui esisteva ancora la regola della precedenza ai flussi entranti, fu Wardrop il primo a formulare una legge che legasse la capacità alle manovre di scambio che avvenivano in rotatoria. Egli considerò la zona compresa tra due bracci della rotatoria come un'area di scambio e, sulla base di esperimenti da lui stesso condotti, ricavò la seguente formula per il calcolo della capacità di un'entrata:

$$Q_w = 345 \cdot W \frac{\left(1 + \frac{e}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{p}{3}\right)}{1 + \frac{W}{L}} \quad [\text{uvp/h}] \quad [\text{Eq. 3.35}]$$

in cui:

$$e = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad [\text{m}] \quad [\text{Eq. 3.36}]$$

e dove le variabili hanno il seguente significato:

W = larghezza della carreggiata circolante;

L = distanza tra due bracci;

e_1 = larghezza dell'entrata;

e_2 = larghezza dell'anello in corrispondenza dell'entrata;

p = rapporto tra il flusso di scambio e quello complessivo dei due bracci.

In seguito però all'adozione della norma di precedenza all'anello, che avvenne nel 1966, furono condotti da parte di Asworth e Field una serie di studi volti a

modificare la formula di Wardrop in modo da poterla ancora utilizzare. Le ricerche portate avanti dal RRL (Road Research Laboratory) verso la fine degli anni '70 portarono a considerare la rotatoria come una sequenza di incroci a T, i cui rami sono percorsi a senso unico ed hanno funzionamento indipendente l'uno dall'altro. In tal modo la capacità di una rotatoria diveniva pari alla capacità complessiva dei singoli ingressi, dipendente quindi dal flusso entrante, da quello circolante e naturalmente anche dalle caratteristiche geometriche dell'entrata.

Pertanto tutti gli studi effettuati durante il corso degli anni hanno portato alla nascita di una relazione pressoché lineare tra il flusso entrante C_e e quello circolante C_c , mentre è stato considerato ininfluenza il flusso uscente C_u .

La formula di capacità adottata diventa la seguente:

$$C_e = C_0 - f_r C_c \quad [\text{pcu/h}] \quad [\text{Eq. 3.37}]$$

Dove C_0 ed f_r sono dei fattori che tengono conto della geometria dell'entrata e della rotatoria. La formulazione più recente di questi parametri è quella ottenuta da Kimber nel 1980 [3.31]. La metodologia adoperata è stata semplice: è stata condotta un'indagine statistica su circa 160 impianti, dove, in presenza di coda agli ingressi, sono stati conteggiati, per successivi piccoli intervalli temporali della stessa ampiezza, il flusso entrante C_e e quello circolante C_c . L'insieme delle coppie di dati (C_e , C_c) è stato poi elaborato mediante una regressione lineare per poter determinare i parametri geometrici.

In particolare Kimber ha evidenziato che la capacità dipende dalla disponibilità di idonei varchi tra i veicoli circolanti in rotatoria, tali da permettere al traffico in attesa sulle entrate di immettersi nel flusso circolatorio, e da alcune caratteristiche geometriche (Fig. 3.11) di ogni punto d'entrata quali:

- l'ampiezza dell'entrata (w_a) misurata un corrispondenza dell'intersezione per pedicolarmente al bordo prospiciente del cordolo della strada;
- l'ampiezza della semicarreggiata di entrata ($w_e/2$) a monte della svasatura;

- il raggio di entrata (R_e), che è il minimo raggio di curvatura del cordolo esterno dell'entrata;
- il diametro del cerchio inscritto (D_{ex});
- la lunghezza media della svasatura (l_w);
- la velocità di variazione della sezione d'entrata (f_s);
- l'angolo d'immissione delle correnti di traffico entranti rispetto al traffico circolante in rotatoria (ϕ).

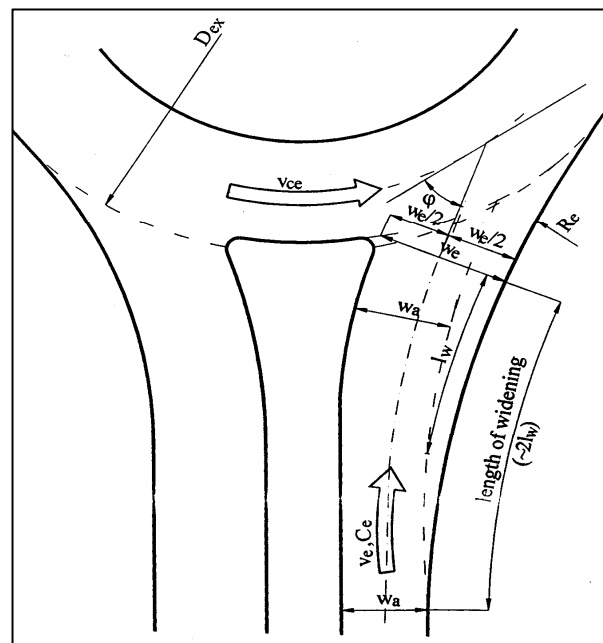


Figura 3.11: Indicazione degli elementi geometrici per il calcolo della capacità in Gran Bretagna

Per il calcolo della capacità, bisogna ricordarsi che tutti i flussi veicolari devono essere classificati in base al tipo ed agli effetti che essi producono. Pertanto occorrerà moltiplicare il numero di veicoli di un certo tipo (pesanti, auto, motocicli) per opportuni coefficienti di equivalenza, in modo tale che i flussi siano espressi in “unità veicoli passeggeri” (uvp). I coefficienti previsti dal TRL (Transport Research Laboratory) sono riportati nella Tabella 3.12.

	Valori medi in uvp equivalenti	
	In entrata	Nell'anello
Veicoli Pesanti	1,9	1,7
Veicoli a due ruote (principalmente motocicli)	0,2	0,8

Tabella 3.12: Fattori di conversione in unità veicoli passeggeri previsti dal TRL

Per rotatorie urbane compatte e per rotatorie urbane ed extraurbane ad una sola corsia con diametro del cerchio inscritto compreso tra 25 e 55 m, secondo Kimber la capacità si basa su semplici relazioni di regressione, derivate da un modello di accettazione dei varchi in funzione dei comportamenti umani.

$$C_0 = 303 \cdot x_2 \cdot k \quad [\text{pcu/h}] \quad [\text{Eq. 3.38}]$$

$$f_r = 0.21 \cdot f_{Dex} \cdot k \cdot (1 + 0.2 \cdot x_2) \quad [\text{Eq. 3.39}]$$

$$k = 1 - 0.00347 \cdot (\varphi - 30) - 0.978 \cdot \left(\frac{1}{R_e} - 0.05 \right) \quad [\text{Eq. 3.40}]$$

$$f_{Dex} = 1 + \frac{0.5}{1 + \exp(0.1 \cdot D_{ex} - 6.0)} \quad [\text{Eq. 3.41}]$$

$$f_s = 1.6 \cdot \frac{W_e - W_a}{l_w} \quad [\text{Eq. 3.42}]$$

$$x_2 = w_a + \frac{W_e - W_a}{1 + 2 \cdot f_s} \quad [\text{Eq. 3.43}]$$

Questa formula è contenuta nel Department of Transport Design Manual for Roads and Bridges Vol. 6, Section 2, Part 3: “*Geometric Design of Roundabouts*” ed è attualmente in uso in Gran Bretagna [3.19].

Da un’analisi scrupolosa di queste espressioni si può notare come i fattori geometrici che influenzano maggiormente la capacità di un ingresso sono la larghezza dell’entrata (W_e) e la svasatura ($W_e - W_a$), mentre meno importanti, anche se significativi, sono il diametro del cerchio inscritto (D_{ex}), la larghezza della carreggiata circolante (l_w), l’angolo (φ), il raggio d’ingresso (R_e) e la media delle lunghezze al di sopra delle quali si sviluppa la svasatura (l_w).

Nei seguenti grafici (Figure 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15) viene riportato l'andamento del rapporto tra flusso entrante e flusso circolante attraverso la variazione dei parametri geometrici precedentemente introdotti.

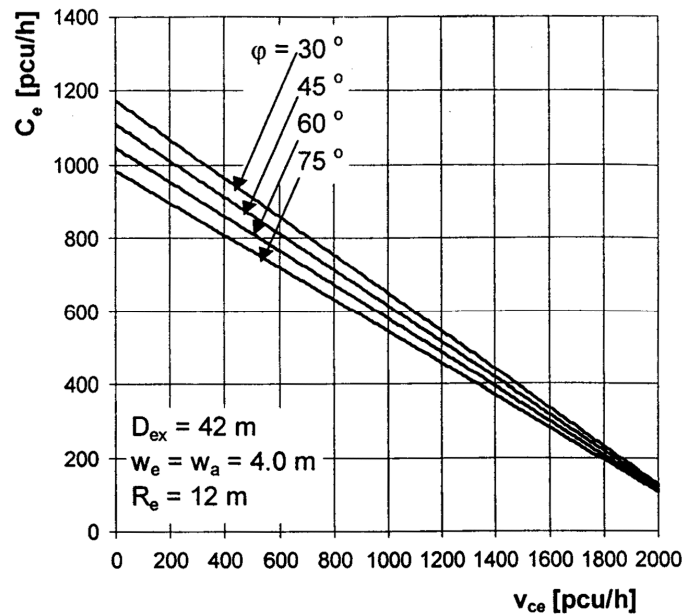


Figura 3.12: Andamento C_e/v_{ce} al variare dell'angolo φ

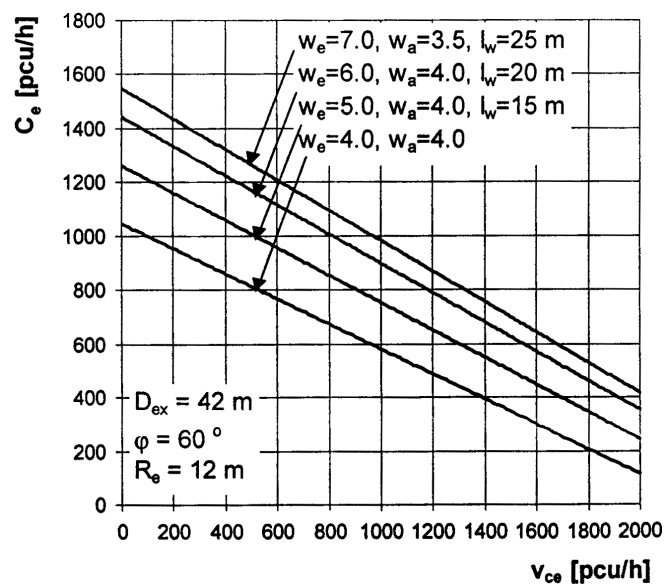


Figura 3.13: Andamento C_e/v_{ce} al variare della larghezza dell'entrata w_e e della svasatura $w_e - w_a$

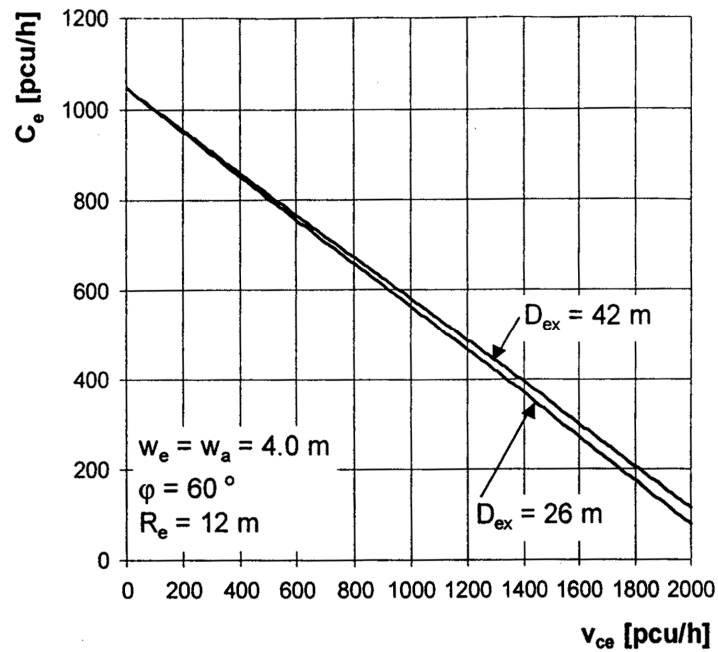


Figura 3.14: Andamento C_e/v_{ce} al variare della grandezza del diametro esterno D_{ex}

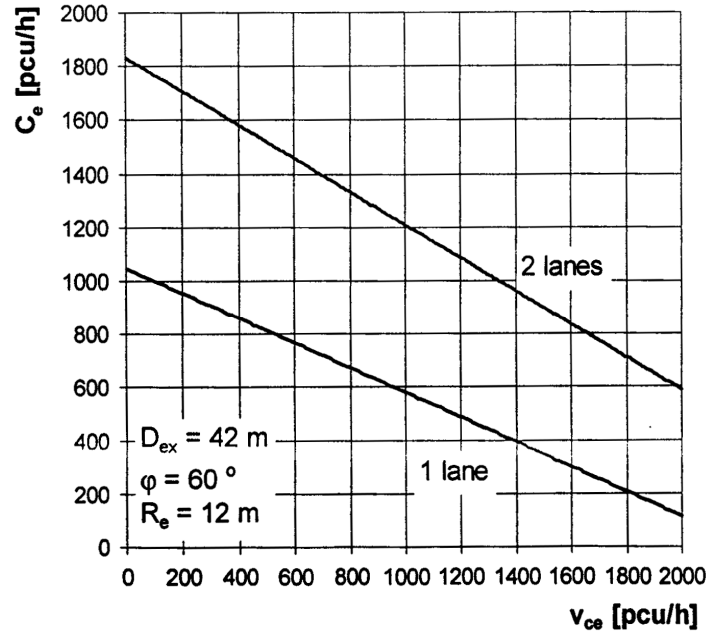


Figura 3.15: Andamento C_e/v_{ce} al variare del numero di corsie d'ingresso

3.6. La metodologia svizzera del Guide Suisse

Come già accennato in precedenza, la Svizzera, influenzata dalle esperienze condotte nella vicina Francia, ha dovuto anch'essa far fronte ad forte aumento del numero di rotatorie e come risposta a tale situazione l' "Institut des transports et de planification" ha realizzato una guida "Guide Suisse des giratoires" (Guida Svizzera delle rotatorie) [3.10], che si occupa dell'aspetto urbanistico, dell'analisi della capacità e di vari aspetti funzionali delle rotatorie. Essa in particolare pone la sua attenzione verso le rotatorie compatte, ossia quelle con diametro esterno compreso tra 22 e 35 metri, ma vengono anche trattate le minirotatorie con isola centrale semisormontabile (diametro tra i 18 ed i 24 metri) e quelle con isola completamente percorribile (14 e 20 m di diametro).

Essendo stata fortemente influenzata dagli studi francesi, la Guida utilizza un metodo di calcolo delle capacità assai simile a quello transalpino. Infatti la rotatoria viene considerata come una successione d'incroci a T e l'analisi è svolta valutando le capacità dei singoli ingressi. In generale lo scopo è quello di calcolare per ogni braccio:

- la capacità utilizzata all'entrata;
- la capacità utilizzata al punto di conflitto.

Anche qui la portata è uniformata in unità veicolo passeggero (uvp) attraverso i coefficienti di equivalenza riassunti nella Tabella 3.13.

	Valori medi in uvp equivalenti
Motocicli leggeri in entrata	0,2 uvp
Motocicli leggeri sull'anello	0,8 uvp
Veicoli pesanti	2,0 uvp

Tabella 3.13: Fattori di conversione in unità veicoli passeggeri previsti dalla Guida Svizzera

La capacità massima C di un ingresso, calcolato in uvp/h è definita dalla seguente formula sviluppata da Bovy:

$$C = \frac{1}{\gamma} \cdot (1500 - \frac{8}{9} Q_d) \quad [\text{uvp/h}] \quad [\text{Eq. 3.44}]$$

con:

$$Q_d = \beta \cdot Q_c + \alpha \cdot Q_u \quad [uvp/h] \quad [\text{Eq. 3.45}]$$

in cui:

C = capacità d'entrata [uvp/h];

Q_d = portata di traffico di disturbo [uvp/h];

Q_c = portata di traffico circolante [uvp/h];

Q_u = portata di traffico uscente [uvp/h];

α = fattore d'influenza del traffico uscente;

β = fattore di riduzione del traffico circolante: esso è funzione del numero di corsie dell'anello (Tab. 3.14).

Numero di corsie dell'anello	β
1	0,9 ÷ 1
2	0,6 ÷ 0,8
3	0,5 ÷ 0,6

Tabella 3.14: Valori dei coefficienti β

La formula indicata dalla Guida Svizzera [3.10] è basata sulla rilevazione di rotatorie in condizioni di saturazione ed è molto simile a quella francese. L'unica differenza consiste nel moltiplicatore del traffico di disturbo 8/9 usato dalla prima a differenza del 5/6 che si trova nella seconda.

I ricercatori svizzeri hanno preferito non elaborare una formula più complessa in quanto introducendo ulteriori parametri geometrici hanno notato una forte dispersione dei risultati. Hanno in sostanza preferito una formula più semplice che assegnasse solo un ordine di grandezza della capacità, ottenendo comunque una buona rappresentazione della realtà.

Il fattore α tiene conto del flusso uscente e dà la misura con cui il traffico uscente dal braccio precedente a quello in studio influenza il flusso veicolare entrante nella rotatoria. Questo parametro α dipende dalla distanza tra il punto di conflitto C del traffico uscente ed il punto di conflitto C' di quell'entrante. In particolare, quando

la distanza $C-C'$ è superiore a 28 m, si assumerà $\alpha=0$, mentre quando la distanza è minore i valori di α saranno compresi nell'intervallo da 0,4 a 0,8. Il grafico in Figura 3.16 è costituito da una spezzata (a) che è relativa ad una velocità V del flusso sull'anello compresa tra 20 e 25 Km/h. Le altre due spezzate (b) e (c) rappresentano rispettivamente il limite superiore di α , corrispondente a condizioni di velocità alte e flussi uscenti bassi, ed il suo limite inferiore, corrispondente a condizioni di velocità più basse e flussi uscenti elevati.

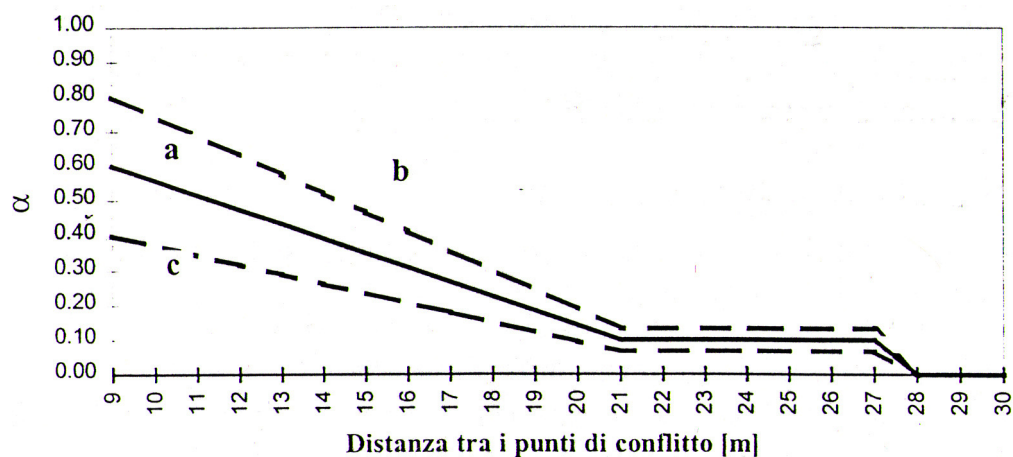


Figura 3.16: Diagramma per il calcolo di α [3.10]

Il grafico quindi, derivante da una simulazione effettuata al calcolatore da Bovy et al. presso il Politecnico Federale di Losanna, mette in evidenza in particolare la proporzionalità inversa tra il valore di α e la distanza $C-C'$.

Dopo aver definito la capacità d'entrata, restano da definire il Tasso di Capacità Utilizzata dall'entrata (TCU_e) ed il Tasso di Capacità Utilizzata al punto di conflitto (TCU_c). Le espressioni per calcolare questi parametri sono le seguenti:

$$TCU_e = \frac{\gamma \cdot Q_e}{C_e} \times 100 \quad [\%] \quad [\text{Eq. 3.46}]$$

$$TCU_c = \frac{\gamma \cdot Q_e + \frac{8}{9} Q_d}{1500} \times 100 \quad [\%] \quad [\text{Eq. 3.47}]$$

In cui γ è il fattore di ripartizione del traffico entrante in funzione delle corsie disponibili. I valori di γ sono riportati nella Tabella 3.15.

Numero di corsie d'accesso	γ
1	1
2	0,6 ÷ 0,7
3	0,5

Tabella 3.15: Valori del coefficiente γ

L'analisi del TCU_e dà informazioni sulla qualità d'inserzione del movimento del traffico entrante, ma non dà nessun ragguaglio sul carico al punto di conflitto, per cui si rende necessario anche il calcolo del TCU_C , il quale confronta l'insieme dei carichi al punto di conflitto. Quindi, per ottenere una visione completa del funzionamento della rotatoria, occorre che siano calcolati entrambi i parametri TCU_e e TCU_C .

Comunque nell'appendice B della "Guide Suisse" [3.10] è riportata un metodologia di calcolo per lo studio della capacità delle rotatorie in ambito urbano: tale formulazione deriva da uno studio condotto su sedici entrate di rotatorie urbane in Svizzera nel 1989. Questo metodo, oltre al calcolo della capacità, consente anche di poter valutare i ritardi mediante l'utilizzo delle formule individuate da Kimber e Hollis [3.18].

L'analisi dei dati ottenuti ha messo in evidenza la scarsa influenza del traffico in uscita sul valore della capacità: pertanto le formule ricavate sono di tipo lineare e sono funzione del solo traffico circolante. Le formulazioni per il calcolo della capacità sono due e si distinguono ognuna per il loro capo d'applicazione.

La capacità di un ingresso ad una sola corsia (Formula Generale CH1) su una rotatoria è esprimibile tramite la formula:

$$C_{e1} = 1300 - 0,75 \cdot Q_C \quad [\text{uvp/h}] \quad [\text{Eq. 3.48}]$$

Essa è applicabile sulle rotatorie urbane con diametro compreso tra 25 e 40 m ed una corsia all'anello con condizioni di traffico e geometria standard.

Oppure si può utilizzare la Formula Speciale CH2:

$$C_{e1} = 1450 - 0,95 \cdot Q_C \quad [\text{uvp/h}] \quad [\text{Eq. 3.49}]$$

Applicabile su rotatorie urbane con diametro compreso tra 25 e 40 m, una corsia all'anello più quelle riservate ai mezzi pubblici, entrata allargata ma non suddivisa in due corsie e con flussi elevati in entrata superiori a 1000 uvp/h.

La capacità di un'entrata a due corsie si ottiene invece dalle formule per le entrate a corsia unica secondo la seguente relazione:

$$C_{e2} = 1,4 \cdot C_{e1} \quad [\text{uvm/h}] \quad [\text{Eq. 3.50}]$$

In ambito urbano i veicoli pesanti e quelli a due ruote vengono trasformati in uvp/h attraverso i fattori riportati nella Tabella 3.16:

	Valori medi in uvp equivalenti
Motocicli ed equivalenti	0,5 uvp
Camion e semirimorchi	1 uvp
Autoarticolati	2,0 uvp

Tabella 3.16: Fattori di conversione in unità veicoli passeggeri previsti dalla Guida Svizzera [3.10]

La formula per i ritardi invece è la seguente:

$$r(m) = \frac{2000 + 2 \cdot Q_C}{C_{e1} - Q_e} \quad [s] \quad [\text{Eq. 3.51}]$$

In cui:

- C_{e1} è determinato con la CH1 o con la CH2 ;
- Q_e è il carico effettivo d'entrata in uvp/h.

Comunque, anche per le rotatorie urbane si possono calcolare i tassi d'utilizzazione TCU_e e TCU_C in maniera analoga a quanto visto in precedenza.

3.7. La metodologia australiana dell'AUSTROADS [3.13]

La determinazione della capacità e dei ritardi nelle rotatorie in Australia si basa sulla teoria del "gap-acceptance". I termini comunemente usati per definire il comportamento di un utente secondo tale teoria sono:

- Critical Gap Time (t_a), ossia il *gap* minimo in una corrente di traffico che verrà accettato da una cospicua ed omogenea popolazione d'automobilisti;
- Follow-up Time (t_f), che non è altro che il distanziamento temporale (“*headway*”) minimo dei veicoli della corrente minore che entrano nei *gap* più lunghi del traffico circolante.

E' chiaro che i valori derivati dalla teoria del *gap-acceptance* sono dei valori medi per tutti gli utenti, così come analogamente si parla di capacità media di una rotatoria o di valore medio del ritardo. In ogni caso si suppone che gli automobilisti si comportino secondo il seguente principio: un conducente non rifiuta un *gap* solamente per accettarne uno più breve più tardi e tutti gli automobilisti accettano un *gap* maggiore di quello critico. In realtà però gli automobilisti agiscono in maniera differente l'uno dall'altro e spesso agiscono anche in maniera incongrua, non essendo sempre in grado di valutare esattamente l'effettiva durata dei *gap*, tant'è che può verificarsi il caso in cui rifiutino un determinato intervallo per poi accettarne uno più piccolo.

In Australia, tecniche basate sul *gap-acceptance* per la determinazione della capacità e dei ritardi sono state studiate da Tanner (1962), Hornman e Turnbull (1974), Avent e Taylor (1979) e Troutbeck (1984, 1986 e 1990) [3.2].

In particolare, Tanner analizzò il rallentamento, in corrispondenza di una rotatoria, fra due correnti in cui la maggiore ha la priorità. Egli assunse che gli arrivi dei veicoli di entrambe le correnti fossero casuali, ma che un veicolo della corrente principale non potesse entrare nell'intersezione prima di Δ secondi dopo il precedente veicolo della corrente principale stessa. Un veicolo della corrente minore invece entra quando è disponibile un varco maggiore di T secondi. Se il varco è grande a sufficienza, alcuni veicoli della corrente minore possono entrare di seguito ad intervalli pari a T_0 . L'equazione di Tanner pertanto è:

$$C = \frac{q_c \cdot (1 - \tau \cdot q_c) \cdot e^{q_c \cdot (t_a - \tau)}}{1 - e^{-q_c \cdot t_f}} \quad [\text{Eq. 3.52}]$$

Dove q_e e q_c vengono espressi in veicoli/secondi.

Secondo Troutbeck però, l'assunzione fatta da Tanner di considerare costanti i valori di t_a e di t_f e di considerare "casuale" la distribuzione degli arrivi della corrente con diritto di precedenza, non poteva essere assai realistica. In realtà molti veicoli viaggiano in due modi, cioè o seguono da vicino i veicoli precedenti oppure viaggiano senza interazione con i veicoli che li precedono.

Troutbeck pertanto modificò l'equazione di Tanner in base a queste semplici considerazioni:

$$C = \frac{3600 \cdot (1 - \Theta) \cdot q_c \cdot e^{-\lambda \cdot (t_a - \tau)}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_f}} \quad \text{con: } \lambda = \frac{(1 - \Theta) \cdot q_c}{1 - \tau \cdot q_c} \quad [\text{Eq. 3.53}]$$

Dove :

C = capacità d'assorbimento di una corsia [veic/h];

Θ = percentuale di veicoli che viaggiano raggruppati nella corrente circolante;

q_c = flusso dei veicoli nelle correnti circolanti [veic/s];

t_a = gap critico relativo alle corsie dominanti o sub dominanti [s];

t_f = headway relativo alle corsie dominanti o sub dominanti [s];

τ = minimo headway nelle correnti circolanti [s]

La normativa australiana stabilisce che all'aumentare del numero di corsie all'anello diminuisce l'headway medio (τ) tra i veicoli raggruppati in tutte le corsie. Se ci sono due o più corsie circolanti allora l'headway medio tra i veicoli è circa 1 s, mentre se c'è solo una corsia allora esso vale 2 s, così come riportato in Tabella 3.17.

Flusso circolante	Larghezza della carreggiata circolante			
	< 10 m		≥ 10 m	
	Numero di corsie effettive	Headway tra veicoli raggruppati (τ)(s)	Numero di corsie effettive	Headway tra veicoli raggruppati (τ)(s)
<1000 veic./h	1	2	2	1
>1000 veic./h	1 (o 2)	2 (o 1)	2	1

Tabella 3.17: Headway medio (τ) tra veicoli raggruppati nel traffico circolante

Il funzionamento della corrente circolante influenza anche la percentuale dei veicoli che sono raggruppati. Tale percentuale (Θ) risulta quindi influenzata dal flusso circolante, dal numero di corsie effettive circolanti (caratterizzate dall'headway medio tra veicoli) e dalla vicinanza della rotatoria ad intersezioni semaforizzate o ad altre situazioni che accrescono il raggruppamento. Troutbeck, in tal senso, fornisce delle equazioni per stimare le percentuali di veicoli liberi, cioè quelli non raggruppati. Da queste equazioni sono calcolati i valori per le percentuali dei veicoli raggruppati: tali valori sono riportati in Tabella 3.18.

Numero di corsie circolanti effettive	1	>1
Headway medio tra veicoli raggruppati, τ , (s)	2.0	1.0
Flusso circolante (veic./h)		
0	0.250	0.250
300	0.375	0.313
600	0.500	0.375
900	0.625	0.438
1200	0.750	0.500
1500	0.875	0.563
1800	1.000	0.625
2000		0.667
2200		0.708
2400		0.750
2600		0.792

Tabella 3.18: Percentuali dei veicoli raggruppati (Θ) in funzione del traffico circolante

Troutbeck condusse una ricerca approfondita sul comportamento degli utenti in corrispondenza di una rotatoria, notando che:

- i veicoli entranti generalmente danno la precedenza a quelli circolanti nell'anello. Un'eccezione si ha quando i veicoli entrano da una corsia ausiliaria per le sole svolte a destra. Se questa corsia ausiliaria e la curva d'entrata vengono realizzate in modo tale che i veicoli entranti siano protetti dal traffico circolante, allora gli automobilisti entranti procederanno senza dare precedenza a quelli circolanti;
- negli ingressi a corsie multiple, i veicoli entrano simultaneamente fianco a fianco con gli altri veicoli entranti dallo stesso ingresso;

- gli automobilisti entranti da diverse corsie dello stesso ingresso hanno comportamenti differenti;
- di solito i veicoli uscenti non hanno effetti su quelli entranti dallo stesso braccio, a meno che la velocità di percorrenza elevata o la rotatoria di piccole dimensioni creino difficoltà ai veicoli entranti nel capire se un veicolo circolante esca o meno dalla rotatoria.

Da questo studio vengono introdotti i concetti di *corrente dominante* e *subdominante* per il flusso entrante dallo stesso braccio la prima è quella che ha il maggiore flusso in ingresso, i minori parametri d'intervallo critico e quindi maggiori capacità per la corsia d'ingresso; il flusso subdominante allo stesso braccio ha maggiori parametri critici e quindi minori capacità. In ciascuna entrata ci sarà quindi una sola corrente dominante, ma potranno esserci più correnti subdominanti: se ci sarà una sola corrente in ingresso, allora essa sarà una corrente dominante. Troutbeck individua delle nuove formule per calcolare i parametri critici in ciascuna corsia che verranno poi riportate nella normativa australiana.

Nella corrente dominante il follow-up time (t_{fd}) viene definito dalla seguente formula:

$$t_{fd} = 3,37 - 0,000394 \cdot Q_c - 0,0208 \cdot D_i + 0,0000889 \cdot D_i^2 - 0,395 \cdot n_e + 0,388 \cdot n_c$$

[Eq. 3.54]

Dove:

Q_c = traffico circolante [veic/];

D_i = diametro del cerchio inscritto [m];

n_e = numero di corsie all'ingresso;

n_c = numero di corsie all'anello.

Diametro Inscritto (m)	Flusso Circolante (veic./h)					
	0	500	1000	1500	2000	2500
20	2.99	2.79	2.60	2.40	2.20	2.00
25	2.91	2.71	2.51	2.31	2.12	1.92
30	2.83	2.63	2.43	2.24	2.04	1.84
35	2.75	2.55	2.36	2.16	1.96	1.77
40	2.68	2.48	2.29	2.09	1.89	1.70
45	2.61	2.42	2.22	2.02	1.83	1.63
50	2.55	2.36	2.16	1.96	1.76	1.57
55	2.49	2.30	2.10	1.90	1.71	1.51
60	2.44	2.25	2.05	1.85	1.65	1.46
65	2.39	2.20	2.00	1.80	1.61	1.41
70	2.35	2.15	1.96	1.76	1.56	1.36
75	2.31	2.11	1.92	1.72	1.52	1.33
80	2.27	2.08	1.88	1.68	1.49	1.39

Tabella 3.19: Follow-up Headway (t_{fd}) della corrente dominante

Dalla formula precedentemente riportata si ottiene la Tabella 3.19 dove il Follow-up Headway, per rotatorie a singola corsia, è riportato in funzione del traffico circolante e del valore del diametro inscritto. Bisogna comunque tenere presente che Q_c non può superare i 1700 veic/h per anelli ad una sola corsia, mentre per due o più corsie circolanti ($n_c = 2$ o 3) allora i valori dalla Tabella 3.18 vanno maggiorati di 0,388 (così come riscontrabile dalla formula di Troutbeck).

Per quanto riguarda invece la corrente subdominante si ha:

$$t_{fs} = 2,149 + 0,5135 \cdot t_{fd} \cdot \frac{Q_{dom}}{Q_{sub}} - 0,8735 \cdot \frac{Q_{dom}}{Q_{sub}} \quad [\text{Eq. 3.55}]$$

Dove Q_{dom} e Q_{sub} sono i flussi entranti dominante e subdominante. Dall'equazione si nota che maggiore è l'intervallo t_f per la corrente dominante e maggiore diventa quello della corrente subdominante. Nella Tabella 3.20 vengono riportati i valori del Follow-up Headway per le correnti subdominanti in base all'equazione di Troutbeck appena esposta.

Follow-up headways della corrente dominante t_{fd} (s)	Follow-up headway sub-dominante				
	Rapporto dei flussi dominante/sub-dominante				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
1.5	2.05	1.99	1.94	1.89	1.84
1.6	2.10	2.07	2.05	2.02	1.99
1.7	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15
1.8	2.20	2.23	2.25	2.28	2.30
1.9	2.25	2.30	2.35	2.40	2.46
2.0	2.30	2.38	2.46	2.53	2.61
2.1	2.35	2.46	2.56	2.66	2.76
2.2	2.41	2.53	2.66	2.79	2.92
2.3	2.46	2.61	2.76	2.92	3.07
2.4	2.51	2.69	2.87	3.05	3.23
2.5	2.56	2.76	2.97	3.17	3.38
2.6	2.61	2.84	3.07	3.30	3.53
2.7	2.70	3.92	3.17	3.43	3.69
2.8	2.80	3.00	3.28	3.56	3.84
2.9	2.90	3.07	3.38	3.69	4.00
3.0	3.00	3.15	3.48	3.82	4.15

Tabella 3.20: Follow-up Headway (t_{fs}) della corrente subdominante

Il Critical Gap dipende dal Follow-up Headway (t_f), dal flusso in circolazione, dal numero delle corsie all'anello e dalla larghezza media delle corsie di entrata espressa in metri (variabile tra 3 e 5 m):

$$\frac{t_a}{t_f} = 3,6135 - 0,0003137 \cdot Q_C - 0,3390 \cdot n_e - 0,2775 \cdot n_c \quad [\text{Eq. 3.56}]$$

Questa formula è applicabile per tutte le corsie in ingresso, per le correnti dominanti e subdominanti. Nella Tabella 3.21 è riportato il rapporto tra l'intervallo critico ed il follow-up secondo la formula precedente.

Numero di corsie dell'anello	1			>1		
	3	4	5	3	4	5
Larghezza media della corsia d'ingresso						
Flusso circolante (veic./h)						
0	2.32	1.98	1.64	2.04	1.70	1.36
200	2.26	1.92	1.58	1.98	1.64	1.30
400	2.19	1.85	1.52	1.92	1.58	1.24
600	2.13	1.79	1.45	1.85	1.51	1.18
800	2.07	1.73	1.39	1.79	1.45	1.11
1000	2.01	1.67	1.33	1.73	1.39	1.10
1200	1.94	1.60	1.26	1.67	1.33	1.10
1400	1.88	1.54	1.20	1.60	1.26	1.10
1600	1.82	1.48	1.14	1.54	1.20	1.10
1800				1.48	1.14	1.10
2000				1.41	1.10	1.10
2200				1.35	1.10	1.10
2400				1.29	1.10	1.10
2600				1.23	1.10	1.10

Tabella 3.21: Rapporti tra Critical gap e Follow-up Headway (t_{ad}/t_{fd})

Bisogna comunque tener presente che per anelli ad una sola corsia l'intervallo critico (t_a) non può essere inferiore a 2,1 s, mentre per anelli a più corsie non può scendere al di sotto di 1,5 s.

Altro parametro assai importante nello studio delle rotatorie, secondo la normativa australiana, è rappresentato dal grado di saturazione di una corsia in entrata che è dato dal rapporto tra il flusso in arrivo e la capacità d'ingresso (d'assorbimento) della corsia:

$$x = \frac{Q_m}{C} \quad [\text{Eq. 3.57}]$$

In cui:

Q_m = flusso in arrivo nella corsia d'ingresso [veic/h];

C = capacità della corsia d'ingresso [veic/h].

Il grado di saturazione di una corsia d'ingresso, per un funzionamento soddisfacente, in fase di progetto, dovrebbe essere inferiore a 0,8÷0,9, sebbene questo non sia sempre possibile. Il massimo grado di saturazione (pratico) corrisponde al concetto di “capacità pratica”.

Per quanto riguarda invece il ritardo bisogna dire che può essere distinto in due componenti:

- ritardo d'attesa;
- ritardo geometrico.

Il primo è il ritardo dovuto al tempo che gli automobilisti impiegano per accettare un gap nel traffico circolante.

Il ritardo geometrico invece è:

- a. il ritardo che gli automobilisti subiscono rallentando fino alla velocità di percorrenza, procedendo nella rotatoria ed accelerando fino a riprendere la normale velocità di crociera;
- b. il ritardo che gli automobilisti accusano rallentando fino a fermarsi alla fine della coda e, dopo aver accettato un gap, accelerando fino alla velocità di percorrenza, procedendo attraverso la rotatoria ed accelerando ulteriormente per raggiungere la velocità operativa normale. E' escluso il tempo per aspettare un gap accettabile (ritardo d'attesa).

Il ritardo d'attesa, secondo le norme australiane è dato da:

$$D = D_{\min} + 900 \cdot \left[Z + \sqrt{Z^2 + \frac{8 \cdot K \cdot x}{Q_C \cdot H}} \right] \quad [\text{Eq. 3.58}]$$

Con:

$$Z = x - 1 \quad [\text{Eq. 3.59}]$$

$$D_{\min} = e^{Q_C(t_a - \tau)} - t_a - \frac{1}{Q_C} - \frac{\tau^2 \cdot Q_C}{2} \quad [\text{Eq. 3.60}]$$

$$K = \frac{D_{\min} \cdot Q_C}{3600} \quad [\text{Eq. 3.61}]$$

Dove H rappresenta il tempo di flusso in ore ed x il grado di saturazione in quel periodo di flusso.

Il ritardo geometrico invece dipende dal fatto che i veicoli si fermano o meno alla linea del “dare precedenza”: chiaramente nel primo caso il rallentamento è maggiore.

Velocità di approccio [km/h]	Distanza dalla rotatoria D	Velocità attraverso al rotatoria [km/h]							
		15	20	25	30	35	40	45	50
40	65	10	8	7	7	7			
40	195	19	15	12	9	7			
40	325		22	17	13	10			
40	460				18	14			
40	590					18			
60	65	13	11	10	10	10	10	10	10
60	195	23	18	15	13	10	10	10	10
60	325		26	21	18	15	12	10	10
60	460				22	19	15	12	10
60	590					23	19	15	10
80	65	17	15	13	13	13	13	13	13
80	195	26	22	19	17	14	13	13	13
80	325		29	25	21	19	16	13	13
80	460				26	23	19	16	13
80	590					27	23	19	16
100	65	20	18	17	17	17	17	17	17
100	195	30	25	22	20	18	17	17	17
100	325		33	28	25	22	20	17	17
100	460				30	26	23	20	17
100	590					3	27	24	20

Tabella 3.22: Ritardo geometrico per i veicoli che si sono fermati (s per veic) [3.2]

Velocità di approccio [km/h]	Distanza dalla rotatoria D	Velocità attraverso al rotatoria [km/h]							
		15	20	25	30	35	40	45	50
40	20	7	4	2	1	0			
40	60	17	11	7	4	0			
40	100		19	13	8	40			
40	140				13	8			
40	180					12			
60	20	11	8	5	4	3	2	1	1
60	60	20	15	11	8	4	2	1	1
60	100		22	17	13	9	5	1	1
60	140				17	13	8	4	1
60	180					17	12	7	2
80	20	14	11	9	7	6	5	4	3
80	60	24	19	15	11	8	5	4	3
80	100		26	20	16	13	9	5	3
80	140				21	17	13	9	4
80	180					21	16	12	7
100	20	18	15	12	10	9	8	7	6
100	60	27	22	18	15	12	9	7	6
100	100		29	24	20	16	13	10	6
100	140				25	20	17	13	12
100	180					25	20	16	

Tabella 3.23: Ritardo geometrico per i veicoli che non si sono fermati (s per veic) [3.2]

Un altro parametro importante che viene richiesto, è la percentuale di veicoli che si arrestano: questa aumenta al crescere del traffico sulla strada principale e del grado

di saturazione sulla strada minore. In funzione del numero di corsie all'anello ed all'entrata, tramite la teoria del gap-acceptance si può calcolare tale percentuale attraverso gli abachi delle Figure 3.17 e 3.18.

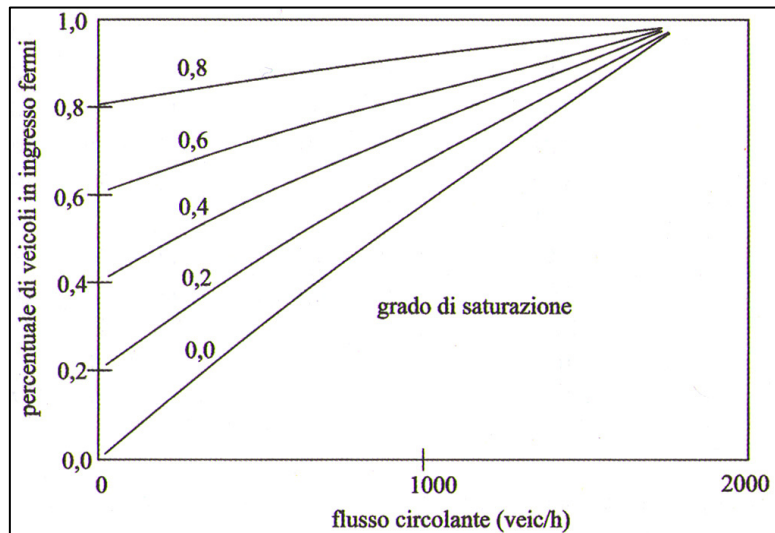


Figura 3.17: Percentuale di veicoli fermi in ingresso per anelli ad una corsia [3.13]

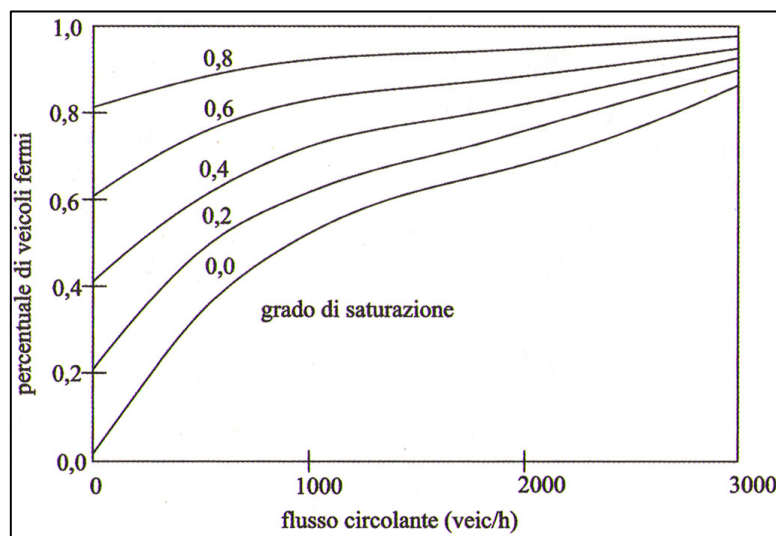


Figura 3.18: Percentuale di veicoli fermi in ingresso per anelli ad una corsia [3.13]

Pertanto il ritardo geometrico complessivo è dato da:

$$D_G = P_S \cdot D_S + (1 - P_S) \cdot D_U \quad [\text{Eq. 3.62}]$$

Dove:

P_S = percentuale dei veicoli che si fermano;

D_S = ritardo geometrico dei veicoli che si fermano;

D_U = ritardo geometrico dei veicoli che non si fermano.

3.8. La metodologia svedese del CAPCAL

Le rotatorie in Svezia funzionano con la precedenza all'anello fin dalla metà degli anni '60 e già nel 1967 furono pubblicate le prime guide per la progettazione delle rotatorie extraurbane, mentre per quelle urbane si dovette aspettare il 1973. In questi testi le rotatorie vengono trattate come una serie di intersezioni a T, per cui viene applicata la teoria del gap-acceptance di Jessen, Harders e Siegloch. Negli anni '70 furono condotte ulteriori ricerche sulla capacità e sulla sicurezza delle intersezioni e furono messi a punto dei modelli di capacità, di costo utenti e di sicurezza, basati su dati empirici. Anveden nel 1988 e Berg nel 1991 riferirono riguardo al "Swedish Capacity Manual" e sul programma CAPCAL [3.23] [3.25].

Le susseguenti ricerche condotte da Hagring su dodici differenti rotatorie hanno permesso di:

- valutare i Critical Gap per tutte le corsie d'ingresso;
- stimare il Follow-up Time per tutte le corsie d'ingresso;
- analizzare la distribuzione degli Headway;
- separare i Critical Gap misurati sulle corsie interne (*far lanes*) dell'anello da quelli delle corsie esterne (*near lanes*).

La metodologia introdotta dalla normativa svedese per il calcolo delle capacità basa su delle semplici considerazioni:

- il traffico in entrata è suddiviso in gruppi di corsie a seconda del tipo di svolta: sinistra, attraversamento, destra;
- i flussi maggiori sono ottenuti da dati empirici o da letteratura;
- il critical gap si ottiene da una formula che prende in considerazione i parametri geometrici, i limiti di velocità ed il tipo d'intersezione, con correzioni per la dimensione della città e la percentuale dei veicoli

pesanti (anche se ultimamente sono state tralasciate le correzioni per quanto riguarda le dimensioni della città e la pendenza, mentre sono state introdotte quelle relative alla larghezza dell'intersezione ed al flusso).

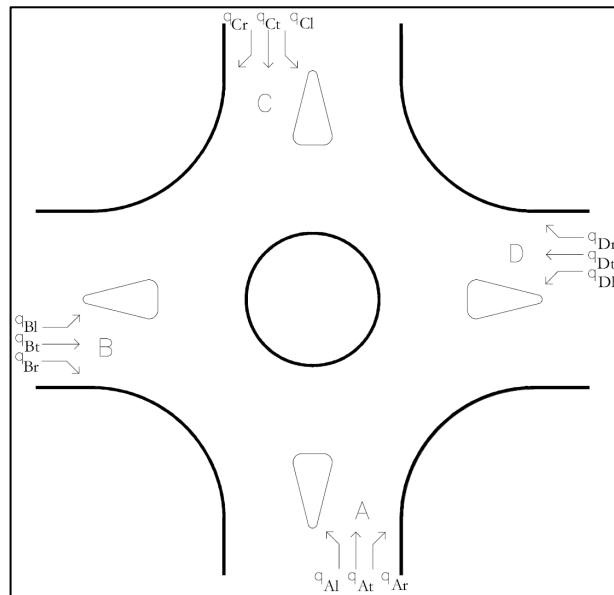


Figura 3.19: Definizione dei flussi minori in una rotatoria a 4 braccia [3.23]

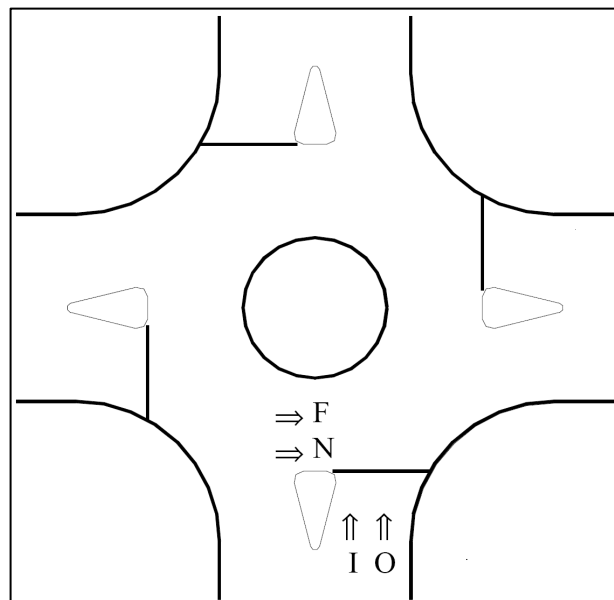


Figura 3.20: Definizione della corsia lontana (far) e vicina (near) nel flusso maggiore e della corsia interna (inner) ed esterna (outer) nel flusso minore [3.23]

Per quanto riguarda gli intervalli critici T , essi differiscono tra le corsie vicine (N) e quelle lontane (F). Sono più ampi nelle corsie vicine sia per quanto riguarda le corsie d'ingresso interne che per quelle esterne. In ogni caso la differenza tra i critical gap delle corsie vicine e quelli delle lontane non va oltre i $0,2 \div 0,3$ s così mostra la Tabella 3.24 dove sono riportati i valori medi degli intervalli critici.

Minor lane	Major lane	
	Near lane	Far lane
Outer lane	4.273	3.998
Inner lane	4.615	4.403

Tabella 3.24: Valori medi dei Critical Gap [3.23]

Hagring quindi riuscì ad ottenere una formulazione in grado di mettere in correlazione l'intervallo critico con le dimensioni della rotatoria, rappresentate dalla misura della lunghezza e della larghezza della zona di scambio:

$$T = 3,91 - 0,0278 \cdot L + 0,121 \cdot w + 0,592 \cdot (N_L - 1) \quad [\text{Eq. 3.63}]$$

Dove:

T = intervallo critico;

L = lunghezza della zona di scambio;

w = larghezza della zona di scambio;

N_L = numero identificativo della corsia (= 1 per corsia esterna [O], = 2 per corsia interna [I])

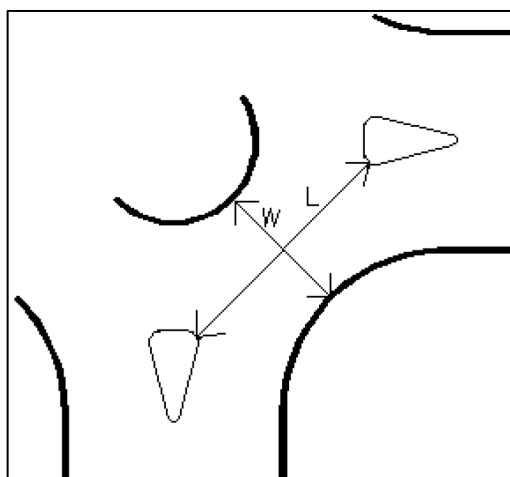


Figura 3.21: Misura della lunghezza e della larghezza della zona di scambio [3.23]

Nella Figura 3.21 è riportata l'indicazione della larghezza e della lunghezza della zona di scambio.

Per quanto riguarda la capacità, Hagring presenta una formula basata su una distribuzione generalizzata di Pearson tipo III ed include un numero illimitato di corsie maggiori, di differenti intervalli critici e tempi di servizio per le corsie principali. La distribuzione dell'Headway è quindi la seguente:

$$H(t) = 1 - \frac{\Lambda}{Q} \cdot \prod_i \frac{q_i \cdot \alpha_i}{\lambda_i} \cdot e^{-\sum_j \lambda_j \cdot (t_j - \Delta)} \quad [\text{Eq. 3.64}]$$

Dove:

Δ = headway minimo tra due veicoli;

α_i = percentuale di veicoli liberi nella corsia i (per esempio: la percentuale di Headway maggiori Δ);

λ_i = frequenza di gap più ampi sulla corsia i (per esempio: $t > \Delta$);

q_i = flusso sulla corsia i .

Con:

$$\Lambda = \sum_i \lambda_i \quad [\text{Eq. 3.65}]$$

$$Q = \sum_i q_i \quad [\text{Eq. 3.66}]$$

E $\mathbf{t} = (t_1, t_2, \dots, t_n)$, un vettore contenente n Headway di dimensioni differenti, ma maggiori di Δ .

Se $n=1$ allora la funzione di distribuzione degli Headway diventa:

$$F(t) = 1 - \alpha \cdot e^{-(t-\Delta)} \quad [\text{Eq. 3.67}]$$

λ è correlata a q dalla seguente equazione:

$$\lambda = \frac{q \cdot \alpha}{1 - q \cdot \Delta} \quad [\text{Eq. 3.68}]$$

Basandosi sempre sui dati rilevati da Haging, Δ è stato posto pari a 1,8 s ed è stata estrapolata la seguente relazione per il calcolo di α :

$$\alpha = 0,910 - 1,545 \cdot q \quad [\text{Eq. 3.69}]$$

La formulazione di capacità basata sulla precedente distribuzione degli headway è data da:

$$C = \Lambda \cdot \prod_i \frac{q_i \cdot \alpha_i}{\lambda_i} \cdot \frac{e^{-\sum_k \lambda_k T_k}}{e^{-\Lambda \Delta} \cdot (1 - e^{-\sum_m \lambda_m T_{0m}})} \quad [\text{Eq. 3.70}]$$

Dove T_0 non è altro che il Follow-up Time. Quest'ultimo è pari a 2,43 s per la corsia esterna e 2,31 s per la corsia interna rispettivamente. Non esistono delle analisi specifiche per distinguere il tempo di servizio delle autovetture e dei veicoli pesanti. Di solito però si assume che il follow-up time per i mezzi pesanti sia 1,1 s più ampio di quello delle autovetture:

$$T_0 = 2,40 + 1,1 \cdot (p_{HV} - 0,061) \quad [\text{Eq. 3.71}]$$

Dove p_{hv} non è altro che la percentuale dei veicoli pesanti.

Dall'analisi dell'equazione della capacità si nota che quest'ultima è fortemente dipendente alla distribuzione del flusso sulle varie corsie maggiori. La massima capacità si ottiene quando il flusso maggiore è equamente distribuito sulle corsie maggiori ed il minimo di capacità si ha quando il flusso maggiore è allocato per intero su una sola corsia. La differenza relativa tra la massima e la minima capacità aumenta con l'aumentare del flusso maggiore.

3.9. Influenza del transito pedonale sulla capacità degli ingressi

La presenza di attraversamenti pedonali sui rami d'approccio alle rotatorie genera delle riduzioni di capacità, sia per gli ingressi che per le uscite, direttamente proporzionali all'entità del traffico pedonale.

Tali riduzioni di capacità per le entrate di una rotatoria è possibile valutarle attraverso tre diverse metodologie di calcolo:

- quella inglese di Marlow e Maycock [3.32];
- quella tedesca di Brilon, Stuwe e Drews [3.33];
- quella francese del CETE [3.1].

Tutte e tre sono valide nell'ipotesi in cui i pedoni, sugli attraversamenti, abbiano diritto di precedenza sul flusso veicolare.

Il metodo inglese e quello francese sono di natura teorica in quanto si basano sulle formulazioni della teoria delle code, mentre quello tedesco è stato ottenuto dall'osservazione di dati ricavati su rotatorie in esercizio.

Per quanto riguarda le uscite, fino ad oggi, non esistono delle formulazioni specifiche che tengano conto di una riduzione di capacità legata ai flussi pedonali

3.9.1. La formulazione di Marlow e Maycock [3.32]

Si calcola per prima cosa la capacità C_{ap} in presenza di solo flusso pedonale Q_{ped} :

$$C_{ap} = \frac{Q_{ped}}{Q_{ped} \cdot \beta + (e^{Q_{ped} \cdot \alpha} - 1) \cdot (1 - e^{Q_{ped} \cdot \beta})} \cdot 3600 \quad [\text{Eq. 3.72}]$$

Con:

Q_{ped} = flusso di traffico pedonale [ped/s];

$$\beta = \frac{1}{C_0} \quad [s] \quad [\text{Eq. 3.73}]$$

C_0 = capacità con flusso pedonale e veicolare nulli (rotatoria completamente vuota);

$\alpha = \beta/v_{ped}$ = tempo necessario [s] affinché i pedoni percorrano completamente l'attraversamento, con B [m] larghezza della strada in corrispondenza dell'attraversamento e $v_{ped}=0,5 \div 2,0$ m/s con valore intermedio suggerito di $v_{ped}=1,4$ m/s.

La larghezza B , caratterizzante ciascuna entrata, deve essere definita separatamente per ciascuno ingresso in relazione alla geometria dell'intersezione.

Quindi, nota C_{ap} , la capacità $C_{/ped}$ dell'ingresso, considerando il flusso pedonale:

$$C_{/ped} = C \cdot M \quad [\text{Eq. 3.74}]$$

Dove M è un fattore di riduzione del valore C di capacità [veic/h] dell'ingresso considerato in assenza di traffico pedonale fornito da:

$$M = \frac{R^{n+2} - R}{R^{n+2} - 1} \quad [\text{Eq. 3.75}]$$

Con

$$R = \frac{C_{ap}}{C} \quad [\text{Eq. 3.76}]$$

Ed “ n ” è il numero di veicoli che possono trovarsi in coda nell'area compresa tra l'attraversamento pedonale e la linea del dare precedenza. Tale valore va determinato per ciascuna entrata ed è funzione dell'ingombro longitudinale medio di un veicolo (pari a 5÷6 m). Da notare che per una corretta valutazione di “ n ” bisogna considerare tutte le corsie presenti in un'entrata.

I diagrammi riportati nelle Figure 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25 forniscono l'andamento del fattore di riduzione M in funzione del traffico circolante Q_c per due rotatorie urbane, una a singola corsia (Fig. 3.22 e 3.23) ed una a doppia corsia (Fig. 3.24 e 3.25) agli ingressi. M è stato calcolato sia con la formulazione di capacità inglese del TRRL e sia con quella tedesca dell'HBS 2001. Tutti i grafici sono stati tracciati per flussi pedonali crescenti da 100 a 800 ped/h con incrementi di 100 ped/h. La larghezza B dell'attraversamento è assunta pari a 3,5 m e 7,5 m, rispettivamente per gli ingressi a singola ed a doppia corsia, mentre per la velocità dei pedoni si è posto $v_{ped}=1,4$ m/s.

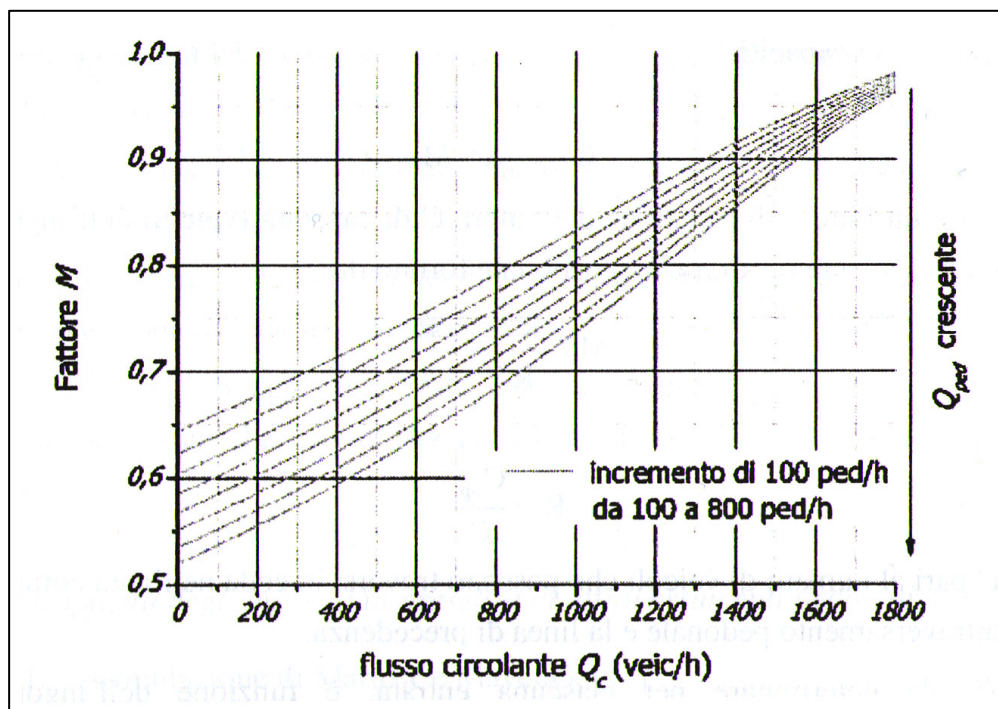


Figura 3.22: Andamento di $M=M(Q_c)$ secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con una corsia agli ingressi (capacità C determinata secondo il TRRL) [3.32]

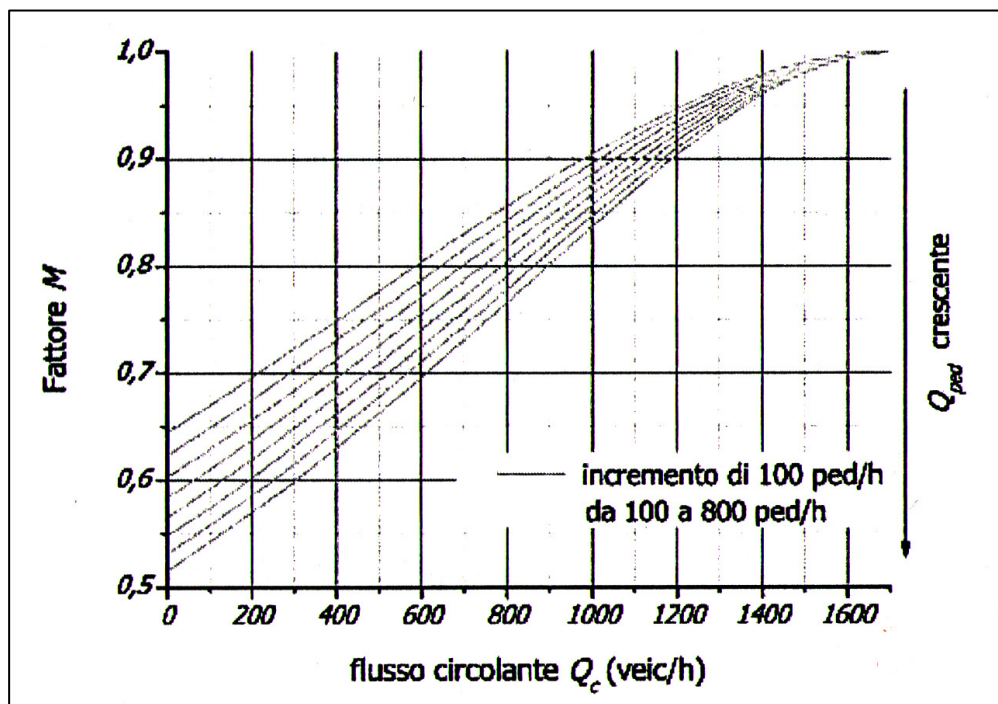


Figura 3.23: Andamento di $M=M(Q_c)$ secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con una corsia agli ingressi (capacità C determinata secondo l'HBS 2001) [3.32]

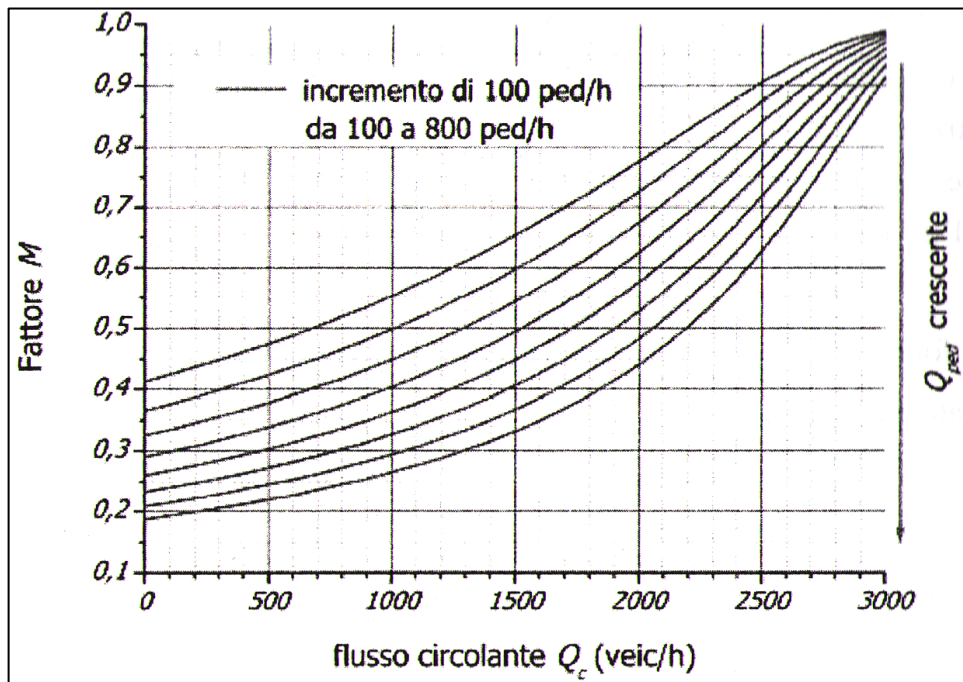


Figura 3.24: Andamento di $M=M(Q_c)$ secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con due corsie agli ingressi (capacità C determinata secondo il TRRL) [3.32]

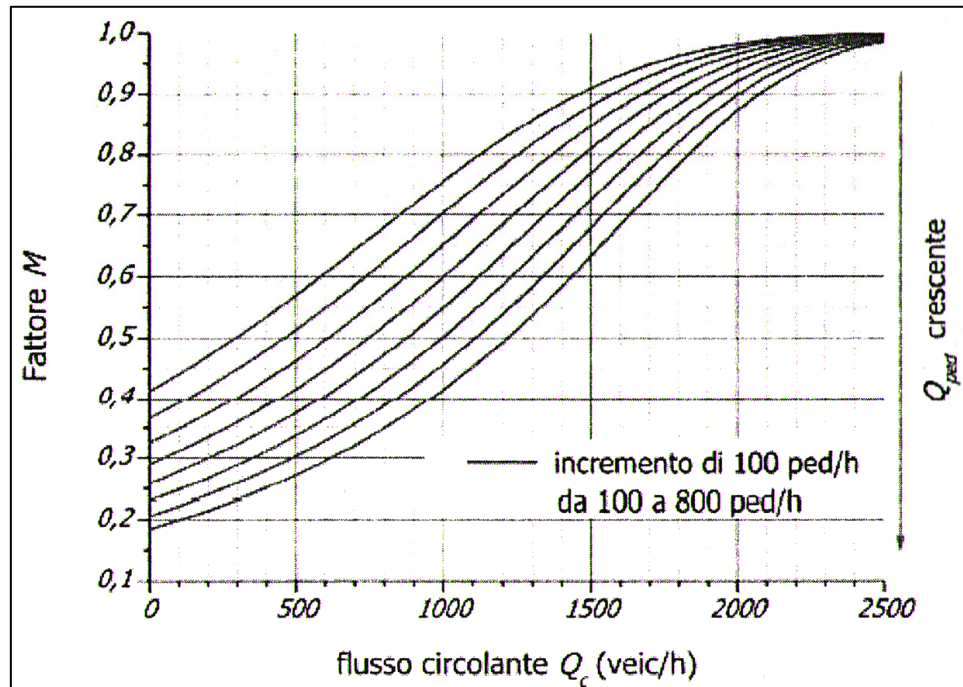


Figura 3.25: Andamento di $M=M(Q_c)$ secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con due corsie agli ingressi (capacità C determinata secondo l'HBS 2001) [3.32]

3.9.2. La formulazione di Brilon, Stuwe e Drews [3.33]

Anche per questo metodo, la capacità C dell'entrata, calcolata con qualsivoglia procedura che non considera il flusso pedonale, è ridotta attraverso un fattore M che invece ne valuta l'influenza:

$$C_{ped} = C \cdot M \quad [\text{Eq. 3.77}]$$

Dove M è fornito in funzione della tipologia d'ingressi:

- Entrata ad una corsia:

$$M = \frac{1119,5 - 0,715 \cdot Q_c - 0,644 \cdot Q_{ped} + 0,00073 \cdot Q_c \cdot Q_{ped}}{1069 - 0,65 \cdot Q_c} \quad [\text{Eq. 3.78}]$$

- Entrata a due corsie:

$$M = \frac{1260,6 - 0,381 \cdot Q_{ped} - 0,329 \cdot Q_c}{1380 - 0,50 \cdot Q_c} \quad [\text{Eq. 3.79}]$$

Con:

Q_c = flusso circolante sull'anello in prossimità dell'ingresso considerato [uvp/h];

Q_{ped} = flusso di traffico pedonale in attraversamento del braccio considerato [ped/h].

Nelle Figure 3.26 e 3.27 sono riportati gli andamenti di M in funzione del traffico circolante Q_c rispettivamente per due rotatorie, una a singola corsia (Fig. 3.26) ed una a doppia corsia (Fig. 3.27) agli ingressi. Anche questi grafici sono tracciati per valori crescenti del flusso pedonale tra 100 e 800 ped/h con step di 100 ped/h.

Le equazioni, che permettono di determinare il fattore di riduzione M , possono fornire, al di fuori del campo di esistenza delle misure sperimentali, risultati non realistici. Così, ad esempio, nel caso di rotatorie ad una sola corsia agli ingressi e basso volume di pedoni (< 100 ped/h), le formule mostrano che in corrispondenza di un incremento marginale di pedoni Q_{ped} , anche la capacità tende ad aumentare.

Tali valutazioni non inficiano comunque la formulazione nella sua struttura, ma consigliano di riservare particolare attenzione nel suo uso.

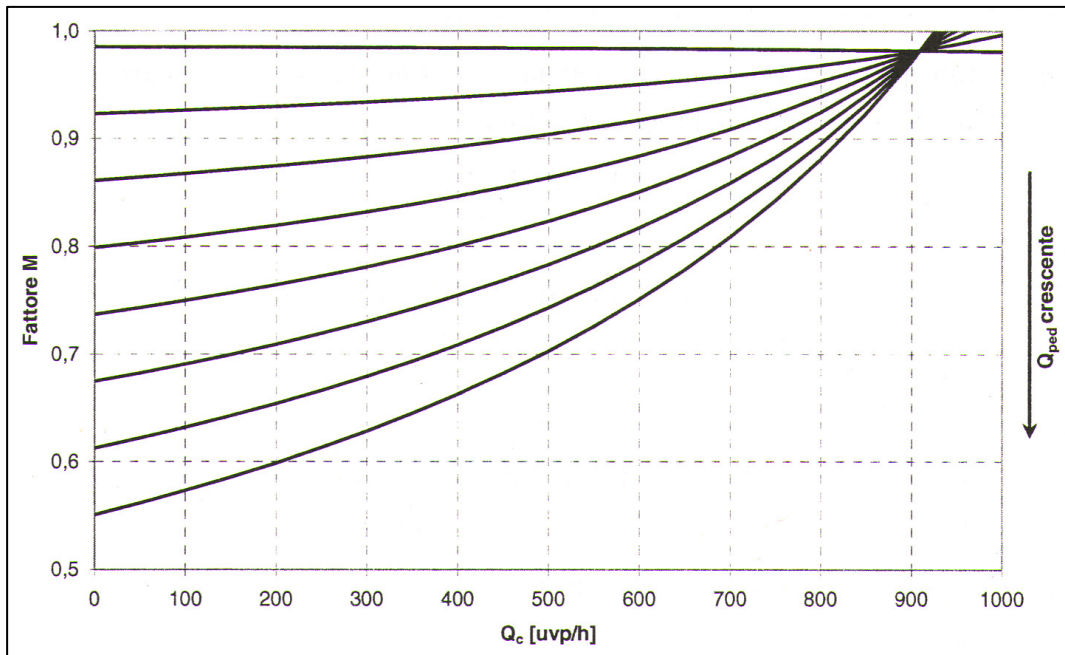


Figura 3.26: Andamento di $M=M(Q_c)$ secondo Brilon, Stuwe e Drews per una rotatoria con una corsia agli ingressi [3.33]

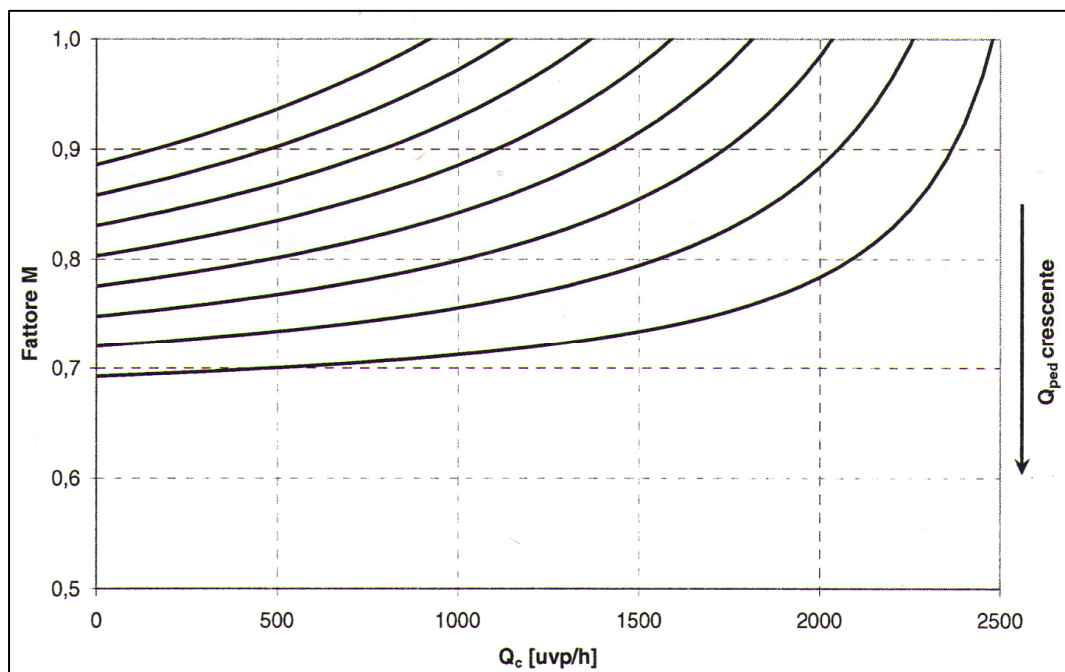


Figura 3.27: Andamento di $M=M(Q_c)$ secondo Brilon, Stuwe e Drews per una rotatoria con una corsia agli ingressi [3.33]

3.9.3. La formulazione del CETE dell'Ouest [3.1]

Così come succedeva per le altre due formulazioni, anche per questo metodo, la capacità C dell'entrata viene ridotta attraverso un fattore F che prende in considerazione il traffico pedonale:

$$C_{ped} = C \cdot F \quad [\text{Eq. 3.80}]$$

Con:

$$F = 1 - \exp(-k \cdot Q_d \cdot \beta) \cdot [1 - \exp(-Q_{ped} \cdot T)] \quad [\text{Eq. 3.81}]$$

Dove:

Q_d = traffico di disturbo in corrispondenza dell'ingresso considerato [uvp/s] (da calcolare in base alla formulazione di capacità prescelta);

Q_{ped} = flusso di traffico pedonale in attraversamento del braccio considerato [ped/s];

$$\beta = \frac{1}{C_0} \quad [s] \quad [\text{Eq. 3.82}]$$

C_0 = Capacità con flusso pedonale e veicolare nulli (rotatoria completamente vuota);

k = numero di veicoli che possono trovarsi in coda nell'area compresa tra l'attraversamento pedonale e la linea di precedenza.

In Figura 3.28 è riportato l'andamento di F in funzione del traffico circolante Q_c per valori crescenti del flusso pedonale Q_{ped} da 100 a 800 ped/h con incrementi di 100 ped/h

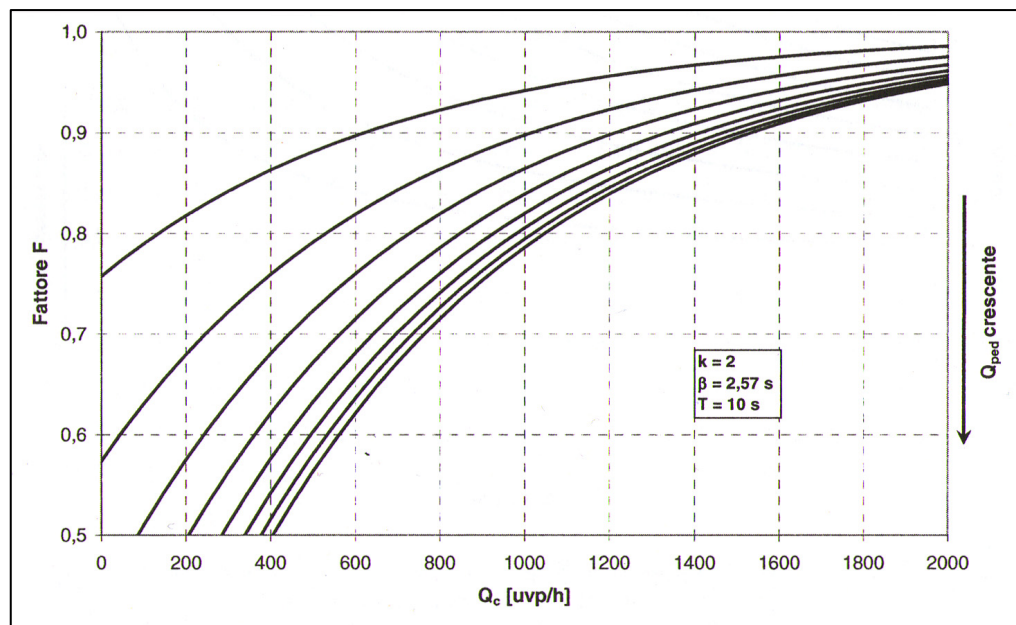


Figura 3.28: Andamento di $F=F(Q_c)$ secondo la formulazione del CETE [3.1]

3.10. Confronto fra le varie metodologie di calcolo della capacità

In questo paragrafo viene effettuato un confronto fra i valori di capacità ottenibili dai diversi metodi di calcolo internazionali esposti nei paragrafi precedenti.

In Tabella 3.25 e nel diagramma di Figura 3.22 vengono riportati i risultati ottenuti applicando le diverse metodologie internazionali per il calcolo della capacità ad una rotatoria a singola corsia con diametro esterno di 50 m, larghezza di entrata pari a 5 m, corsia della strada d'approccio larga 4,5 m, anello di 6 m, raggio d'entrata di 40 m, angolo di entrata di 60° , lunghezza della svasatura pari a 30 m e larghezza dell'isola divisionale di 15 m.

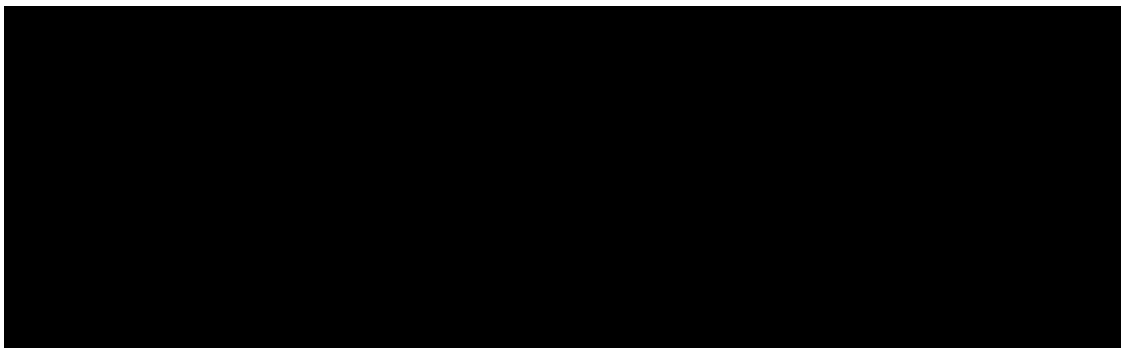


Tabella 3.25: Valori di capacità ottenuti con diverse metodologie di calcolo internazionali

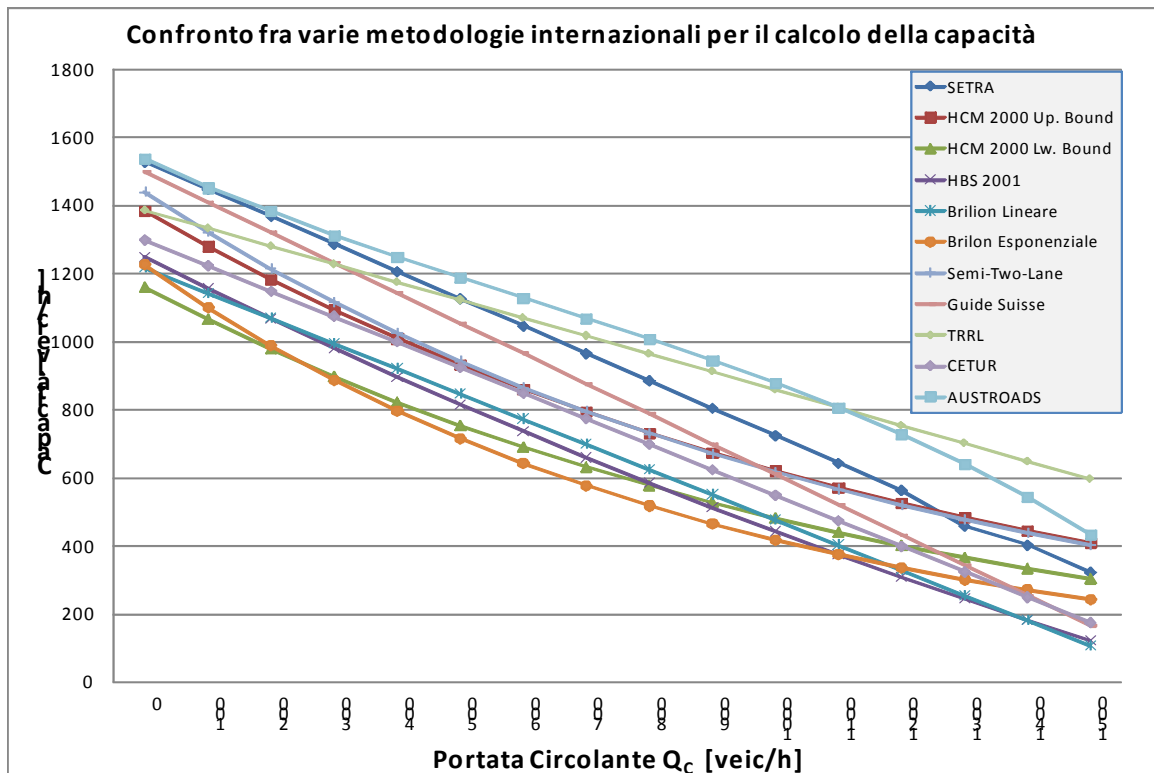


Figura 3.29: Variazione della capacità in funzione del traffico circolante in base ai diversi metodi

Da un'analisi specifica dei dati ottenuti dai singoli metodi si possono estrapolare le seguenti conclusioni:

- La formulazione australiana fornisce, fino ad una portata circolante di 1100 veic/h, i valori di capacità più elevati; dopo tale soglia di Q_c è invece la formulazione del TRRL [3.19] che restituisce i livelli di capacità maggiori.
- Per portate circolanti inferiori a 600 veic/h, anche la formula del SETRA [3.9] restituisce elevati livelli di capacità: ciò è dovuto al fatto che, essendo stata posta pari a 15 m la larghezza dell'isola spartitraffico, allora la capacità di un approccio non risente del disturbo prodotto dal traffico uscente sull'approccio stesso.
- La metodologia tedesca studiata da Brilon per il calcolo della capacità delle *Semi-Two-Lane Roundabout* [3.8] garantisce valori di capacità del tutto identici a quelli che si ottengono con l'HCM 2000 [3.16], con la

scelta però dei parametri psicotecnici al loro limite superiore (Upper Bound).

- La formulazione di capacità presente nell'HBS 2001 [3.26] fornisce dei valori assai prossimi a quelli che si ottengono con l'applicazione della formula lineare di Brilon [3.17]. Entrambe queste due metodiche danno i valori più bassi di capacità per portate circolanti maggiori di 1200 veic/h.
- I valori più bassi di capacità si ottengono invece con l'applicazione della formula esponenziale di Brilon [3.17] e con quella dell'HCM 2000 [3.16] con l'utilizzo però dei valori inferiori dei parametri psicotecnici (Lower Bound). C'è da aggiungere che per valori di Q_c inferiori a 250 veic/h è l'equazione esponenziale di Brilon [3.17] che dà capacità più elevate, mentre per portate circolanti superiori a tale livello le cose s'invertono: in particolare per $Q_c > 800$ veic/h i due andamenti corrono paralleli con un distanziamento costante prossimo ad 80 veic/h.
- La metodologia svizzera, che è di tipo lineare, per portate circolanti basse presenta elevati valori di capacità prossimi a quelli che si ottengono con la formulazione australiana [3.10] e francese [3.9]. Invece per valori di Q_c assai elevati, la capacità si abbatte notevolmente fino a coincidere praticamente con i valori di capacità ottenibili con l'equazione introdotta dal CETUR [3.22].

E più in generale, si può affermare che le discordanze tra le stime di capacità effettuate possono ricondursi ad i seguenti motivi [3.1]:

- le differenze di comportamento dei conducenti in prossimità delle rotatorie sono spesso dovute alla presenza più o meno lunga di tali intersezioni nelle reti stradali dei vari paesi;
- la diversificazione, da Stato a Stato, degli standard geometrici delle rotatorie, non rende del tutto corrispondenti configurazioni altrimenti simili per numero di corsie all'anello ed alle entrate;
- la presenza, nelle misure utilizzate per la realizzazione e la taratura di alcune formulazioni di calcolo, di dati di specifica provenienza

territoriale (ambito urbano, extraurbano, ecc.) particolarmente significativi dal punto di vista statistico, accanto ad altri solo genericamente assimilabili a quelli relativi a campioni più rilevanti;

- la non coincidenza (viste le diverse peculiarità urbanistiche) nelle diverse situazioni nazionali, dei contesti di localizzazione delle rotatorie, anche se indicati con locuzioni equivalenti;
- l'esistenza di correlazioni tra le variabili geometriche e le grandezze di traffico, in fase sperimentale, ha evidenziato o nascosto il ruolo di alcuni parametri, facendoli comparire o meno nelle diverse formulazioni di capacità.

Bisogna comunque aggiungere che le considerazioni riportate in questo capitolo si basano tutte sull'ipotesi che i sistemi considerati si trovino in equilibrio statistico, ovvero che i modelli per essi utilizzati siano di tipo stazionario [3.15].

Di solito infatti nelle fasi di progetto o di verifica di un'intersezione attraverso delle formulazioni stazionarie, le lunghezze delle code ed i tempi d'attesa vengono valutati con riferimento ai traffici di progetto di un'ora opportunamente scelta. Durante quest'ora, nei sottoperiodi, il volume di traffico viene supposto costante ed il valore complessivo di traffico viene amplificato per il fattore dell'ora di punta, per tener conto delle fluttuazioni che in realtà avvengono all'interno dell'ora stessa.

Tale approccio risulta sicuramente più semplice nella applicabilità pur presentando di fatto l'assunzione che il fenomeno sia in equilibrio stazionario, calcolando le lunghezze di coda ed i tempi d'attesa in tali condizioni, si possono ricavare dei valori sensibilmente superiori a quelli reali, pervenendo così ad un sovradimensionamento degli elementi geometrici dell'intersezione. Un altro problema inoltre è che i modelli probabilistici stazionari risultano non essere compatibili con portate prossime o superiori alla capacità, perché, in questa circostanza, restituiscono lunghezze di coda e tempi d'attesa che tendono a divenire, a rigore, infiniti.

Pertanto, accanto ad una facilità d'applicazione, il limite principale di questo approccio consiste nell'impossibilità di trattare valori di domanda di traffico prossimi o maggiori della capacità, mentre in condizioni di punta è possibile che queste

situazioni critiche possano presentarsi per periodi di tempo di durata più o meno estesa.

Si tratta perciò di situazioni del tutto diverse rispetto alla situazione reale: infatti sia nei regimi transitori che in quelli di picco, le code ed i tempi d'attesa non tendono comunque all'infinito come previsto dalla teoria stazionaria, ma si mantengono di fatto limitati, vista l'ampiezza finita del periodo critico nel quale la domanda è vicina o almeno pari alla capacità.

Per quantificare quindi l'efficienza di un'intersezione a rotatoria, durante una punta di traffico, è opportuno ricorrere a procedure che, a differenza di quelle esposte nei paragrafi precedenti, tengono conto delle variazioni di portata nel tempo, consentendo il calcolo dei parametri prestazionali (lunghezza delle code, tempi d'attesa, etc.) nel tempo, noto l'andamento della domanda anche nel caso che questa sia vicina o non minore della capacità.

Tali considerazioni saranno esposte in dettaglio nel paragrafo successivo in cui verranno analizzate le differenze fra i fenomeni in stato stazionario e quelli in stato transitorio.

3.11. Fenomeni d'attesa in stato stazionario ed in stato transitorio

Per la valutazione dei tempi medi d'attesa, della lunghezza delle code e del numero di veicoli che si trovano nel sistema è possibile fare riferimento alla “teoria delle code” [3.1].

Facendo riferimento alla Figura 3.30, nel nostro caso specifico, si ha che [3.1]:

- il processo degli arrivi e delle partenze si caratterizzano in base alla relativa legge dei conteggi del traffico;
- il punto di servizio è situato alla linea del dare precedenza prima di entrare sulla corona giratoria.

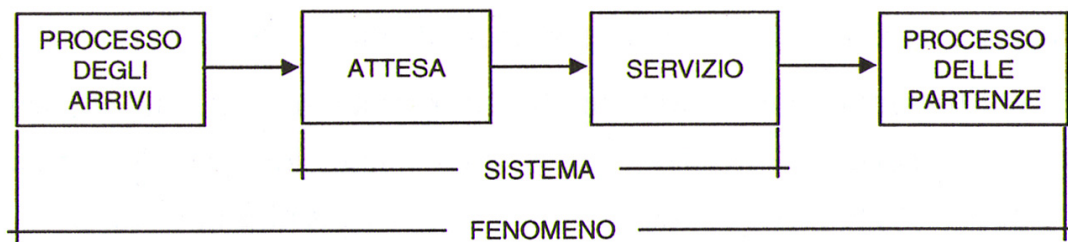


Figura 3.30: Schematizzazione del fenomeno d’attesa e delle sue componenti [3.1]

Il “meccanismo di servizio” consiste in pratica nell’attesa che sulla corrente che percorre l’anello si presenti un varco temporale, “*gap*”, utile all’inserimento di uno o più veicoli nel sistema. In base a questa modalità del servizio è possibile stabilire in termini probabilistici le proprietà (distribuzione probabilistica) del tempo di servizio T_s [3.1]:

- la disciplina della coda prevede che i conducenti siano serviti in base al loro ordine d’arrivo nel sistema (ordinamento *FIFO*, ossia “*first in first out*”);
- il numero di presenze in coda può comunque risultare grande. Infatti il veicolo, una volta accodato, non può più abbandonare la fila d’attesa.

Nei paragrafi successivi verranno espone le metodologie per la valutazione dei parametri prestazionali di una rotatoria in condizioni di domanda di traffico variabile nel tempo.

3.11.1. Alcuni richiami sull’analisi probabilistica delle file d’attesa [3.1]

Facendo riferimento, così come abbiamo già detto, alla teoria matematica delle code [3.1], è possibile definire l’intensità di traffico o grado di saturazione, ρ , come il seguente rapporto:

$$\rho = \frac{Q_e}{C} \quad [\text{Eq. 3.83}]$$

A questo punto, se si considera $E[T_s]$ come media del tempo di servizio T_s , dato il significato di C e di T_s , si può scrivere che:

$$E[T_s] = \frac{1}{C} \quad [\text{Eq. 3.84}]$$

Tenendo presente la definizione di riserva di capacità riportata nella [Eq. 3.5] e combinandola con la [Eq. 3.83], si ha:

$$\rho = 1 - \frac{RC}{C} \quad [\text{Eq. 3.85}]$$

Quindi, lo stato di un ingresso può essere caratterizzato sia in termini di RC che di ρ , così come evidenziato nella Tabella 3.26.

Ingresso Sottosaturato	Ingresso Saturato	Ingresso Sovrasaturato
$RC > 0$	$RC = 0$	$RC < 0$
$\rho < 1$	$\rho = 1$	$\rho > 1$

Tabella 3.26: Stato d'ingresso in funzione di RC o di ρ

Ricordando che il tempo d'attesa nel sistema è dato dalla somma del tempo d'attesa in coda w_c più il tempo di servizio T_s , ossia che:

$$w_s = w_c + T_s \quad [\text{Eq. 3.86}]$$

Allora, se si indica con $E[w_s]$ la media del tempo di attesa nel sistema, per la proprietà della media come operatore lineare e tenendo presente la [Eq. 3.84], si ha che:

$$E[w_s] = E[w_c] + E[T_s] = E[w_c] + \frac{1}{C} \quad [\text{Eq. 3.87}]$$

Inoltre, per il calcolo del numero medio di veicoli nel sistema $E[L_s]$, è possibile utilizzare la prima formula di Little, e cioè:

$$E[L_s] = Q_e \cdot E[w_s] \quad [\text{Eq. 3.88}]$$

La [Eq. 3.88] si può sinteticamente scrivere come:

$$L_s = Q_e \cdot w_s \quad [\text{Eq. 3.89}]$$

Ossia, durante il tempo d'attesa w_s di un veicolo generico, sopraggiungono nel sistema un numero di veicoli pari ad L_s della [Eq. 3.89].

Relazione analoga a quella riportata nella [Eq.3.89], si può scrivere per la lunghezza della coda:

$$L_c = Q_e \cdot w_c \quad [\text{Eq. 3.90}]$$

3.11.1.1. Alcuni risultati per le intersezioni non semaforizzate [3.1]

In questo paragrafo verranno riportati alcuni risultati derivanti dall'applicazione della teoria delle code ad intersezioni non semaforizzate (in particolare alle rotatorie) in condizioni di equilibrio statistico.

In ogni caso, inizialmente va definito, in maniera probabilistica, il flusso di domanda Q_e ed il meccanismo di servizio dal quale dipende la valutazione del tempo di servizio T_s .

Di solito si privilegia la modalità di servizio che verrà di seguito esposta [3.1].

Si consideri il veicolo A in testa alla fila d'attesa e quello B immediatamente successivo in coda. Se A utilizza per la sua manovra un intervallo Δt uguale o leggermente superiore all'intervallo critico T_c , tra l'istante nel quale il veicolo B si trova alla linea del dare precedenza e quello di attraversamento per inserirsi sulla corona giratoria trascorre un tempo uguale alla somma di $\Delta t - T_c$ (residuo del tempo utilizzato da A per compiere la sua manovra e rifiutato da B), degli eventuali successivi intervalli rifiutati da B e dell'intervallo critico T_c : questa somma è proprio pari a T_s .

Considerando quindi questo meccanismo di servizio è possibile utilizzare immediatamente le relazioni di Pollaczek e Khinchine [3.1] di teoria delle code secondo cui:

$$E[w_s] = E[T_s] + \frac{Q_e \cdot (E[T_s]^2 + VAR[T_s])}{2 \cdot (1 - Q_e \cdot E[T_s])} \quad [\text{Eq. 3.91}]$$

Dove $E[T_s]$ e $VAR[T_s]$ sono rispettivamente la media e la varianza del tempo di servizio, che, nell'ipotesi di distribuzione di T_s secondo una Erlang di parametro k , diventano:

$$E[T_s] = T_c + \frac{e^{kQ_c T_c} - \sum_{i=0}^k \frac{(k \cdot Q_c \cdot T_c)^i}{i!}}{Q_c \cdot \sum_{i=0}^k \frac{(k \cdot Q_c \cdot T_c)^i}{i!}} \quad [\text{Eq. 3.92}]$$

$$VAR[T_s] = \frac{(k+1) \cdot \left[e^{kQ_c T_c} - \sum_{i=0}^{k+1} \frac{(k \cdot Q_c \cdot T_c)^i}{i!} \right]}{k \cdot Q_c^2 \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k \cdot Q_c \cdot T_c)^i}{i!}} + (E[T_s] - T_c)^2 \quad [\text{Eq. 3.93}]$$

Con il parametro k della Erlang che va determinato, in buona approssimazione, in base al flusso circolante Q_c secondo le indicazioni della Tabella 3.27.

Valore del flusso Q_c [veic/h]	Valore di k
0÷500	1
501÷1000	2
1001÷1500	3

Tabella 3.27: Valori del parametro k della legge di Erlang in funzione del flusso Q_c

Dalla Tabella 3.27, ricavata sperimentalmente, una volta conosciuto il traffico circolante Q_c , determinare il valore di k come il valore intero più vicino a quello che si legge in corrispondenza di Q_c .

Bisogna comunque aggiungere che le espressioni delle [Eq.3.91], [Eq. 3.92] ed [Eq. 3.93] sono valide per arrivi poissoniani nella corrente secondaria Q_e e per tempi di servizio distribuiti in modo qualsiasi.

A questo punto, conoscendo $E[w_s]$ dalla [Eq. 3.91] e volendo calcolare $E[L_s]$ in base alla [Eq. 3.88], ossia il numero medio di veicoli presenti nel sistema, si ottiene:

$$E[L_s] = Q_e \cdot E[w_s] = Q_e \cdot E[T_s] + \frac{Q_e^2 \cdot (E[T_s]^2 + VAR[T_s])}{2 \cdot (1 - Q_e \cdot E[T_s])} \quad [\text{Eq. 3.94}]$$

Bisogna notare che il doppio di $E[L_s]$ rappresenta in genere una stima accettabile di un percentile sufficientemente elevato ($L_{s,90}$; $L_{s,95}$) di L_s .

In ogni caso, le considerazioni ed i risultati fin qui espressi valgono sempre e solo nel caso elementare di due sole correnti interferenti.

A questo punto, utilizzando per maggiore semplicità la seguente notazione:

$$T_s = s; \quad E[T_s] = \bar{s}; \quad VAR[T_s] = V[s]$$

Allora la [Eq. 3.91] diventa:

$$E[w_s] = \bar{s} + \frac{Q_e \cdot \left(\bar{s}^2 + V[s] \right)}{2 \cdot (1 - Q_e \cdot \bar{s})} \quad [\text{Eq. 3.95}]$$

E combinando quest'ultima con la [Eq. 3.83] e con la [Eq. 3.84] si ha:

$$E[w_s] = \bar{s} + \frac{\rho \cdot \left(\bar{s} + \frac{V[s]}{\bar{s}} \right)}{2 \cdot (1 - \rho)} \quad [\text{Eq. 3.96}]$$

La [Eq. 3.94] attraverso la nuova notazione diventa:

$$E[L_s] = Q_e \cdot \bar{s} + \frac{Q_e^2 \cdot \left(\bar{s}^2 + V[s] \right)}{2 \cdot (1 - Q_e \cdot \bar{s})} \quad [\text{Eq. 3.97}]$$

Combinando anche questa con la [Eq. 3.83] e con la [Eq. 3.84] si ottiene:

$$E[L_s] = \rho + \frac{\rho^2 \cdot \left(1 + \frac{V[s]}{\bar{s}} \right)}{2 \cdot (1 - \rho)} \quad [\text{Eq. 3.98}]$$

Nei paragrafi successivi verranno espresse due forme particolari delle espressioni di $E[w_s]$ e di $E[L_s]$.

3.11.1.2. Arrivi al braccio poissoniani e tempi di servizio esponenziali [3.1]

Sotto queste condizioni, considerando cioè una densità di probabilità $f_{T_s}(t)$ del tempo di servizio T_s di tipo esponenziale, allora esiste la seguente relazione tra la media e la varianza:

$$V[s] = \bar{s}^2 \quad [\text{Eq. 3.99}]$$

Con questa considerazione la [Eq. 3.96] diventa:

$$E[w_s] = \bar{s} + \frac{\rho \cdot \left(\frac{\bar{s}^2}{s} + \frac{\bar{s}}{s} \right)}{2 \cdot (1 - \rho)} = \frac{2\bar{s} - 2\rho\bar{s} + 2\rho\bar{s}}{2 \cdot (1 - \rho)} = \frac{\bar{s}}{2 \cdot (1 - \rho)} \quad [\text{Eq. 3.100}]$$

Ed utilizzando la [Eq. 3.84] si ha:

$$E[w_s] = \frac{1}{C \cdot (1 - \rho)} \quad [\text{Eq. 3.101}]$$

La [Eq. 3.98] quindi, per il numero medio di veicoli nel sistema $E[L_s]$, risulta essere:

$$E[L_s] = \rho + \frac{\rho^2 \cdot \left(1 + \frac{\bar{s}}{s} \right)}{2 \cdot (1 - \rho)} = \frac{\rho - \rho^2 + \rho^2}{1 - \rho} = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad [\text{Eq. 3.102}]$$

3.11.1.3. Arrivi al braccio poissoniani e tempi di servizio deterministici [3.1]

Questo è il caso del servizio regolare: ciascun veicolo della fila di attesa al braccio spende lo stesso tempo alla testa della fila per entrare nella corona giratoria.

Ciò equivale a considerare nulla la dispersione di $T_s = s$ intorno a $E[T_s] = \bar{s}$, ossia:

$$V[s] = 0 \quad [\text{Eq. 3.103}]$$

Sulla base di questa considerazione la [Eq. 3.96] si trasforma in:

$$E[w_s] = \bar{s} + \frac{\rho \cdot \bar{s}}{2 \cdot (1 - \rho)} = \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{2 - \rho}{2 \cdot (1 - \rho)} \right] \quad [\text{Eq. 3.104}]$$

Mentre la [Eq. 3.98], per il calcolo $E[L_s]$, diventa:

$$E[L_s] = \rho + \frac{\rho^2}{2 \cdot (1 - \rho)} = \frac{2\rho - 2\rho^2 + \rho^2}{2 \cdot (1 - \rho)} = \frac{2\rho - \rho^2}{2 \cdot (1 - \rho)} \quad [\text{Eq. 3.105}]$$

Le stesse operazioni appena effettuate si possono utilizzare per calcolare il tempo medio d'attesa in coda $E[w_c]$ ed il numero medio di veicoli in coda $E[L_c]$.

Le espressioni fin qui richiamate sono state riassunte nella Tabella 3.28.

	Coda		Sistema	
	$E[w_c]$	$E[L_c]$	$E[w_s]$	$E[L_s]$
Arrivi Poissoniani; Tempi di Servizio Esponenziali	$\frac{\rho}{C \cdot (1-\rho)}$	$\frac{\rho^2}{(1-\rho)}$	$\frac{1}{C \cdot (1-\rho)}$	$\frac{\rho}{(1-\rho)}$
Arrivi Poissoniani; Tempi di Servizio Costanti	$\frac{\rho}{2 \cdot C \cdot (1-\rho)}$	$\frac{\rho^2}{2 \cdot (1-\rho)}$	$\frac{2-\rho}{2 \cdot C \cdot (1-\rho)}$	$\frac{2\rho-\rho^2}{2 \cdot (1-\rho)}$

Tabella 3.28: Valori del parametro k della legge di Erlang in funzione del flusso Q_c

3.11.1.4. Considerazioni conclusive [3.1]

Per riassumere quanto esposto nei due paragrafi precedenti vengono qui riportati i grafici delle Figure 3.31 e 3.32.

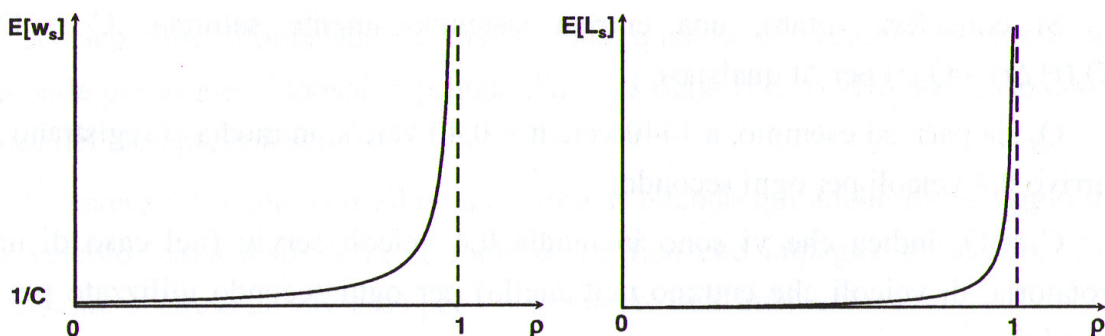


Figura 3.31: $E[w_s]$ e $E[L_s]$ in funzione di ρ (arrivi poissoniani e tempi di servizio esponenziali) [3.1]

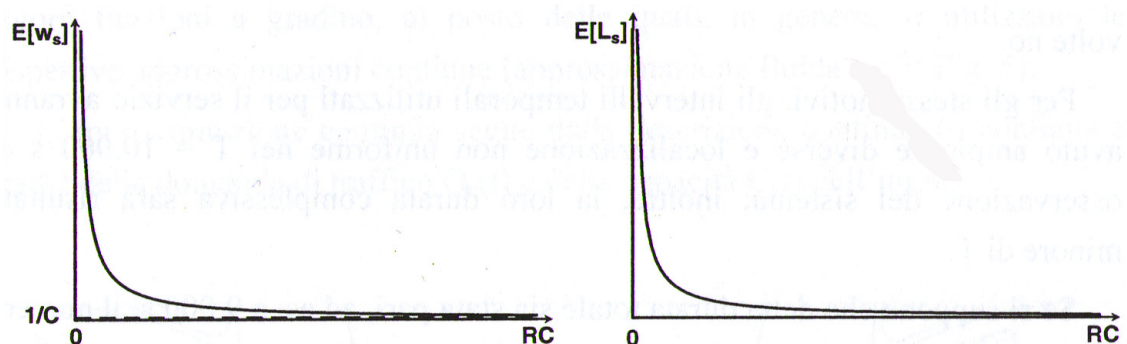


Figura 3.32: $E[w_s]$ e $E[L_s]$ in funzione di RC (arrivi poissoniani e tempi di servizio esponenziali) [3.1]

Si nota facilmente dai grafici di Figura 3.31, come gli andamenti di $E[w_s]$ e di $E[L_s]$ siano simili e presentino entrambi un ginocchio oltre il quale, all'aumentare di ρ , i gradienti crescono rapidamente presentando un asintoto verticale quando ρ tende ad 1. Andamenti analoghi si riscontrano per $E[w_c]$ e di $E[L_c]$.

Dalla Figura 3.32 invece si vede come, esprimendo i tempi medi d'attesa ed il numero medio di veicoli presenti nel sistema in funzione della riserva di capacità RC , l'asintoto coincida con l'asse delle ordinate.

Il comportamento di $E[w_s]$ e di $E[L_s]$ è proprio la conseguenza diretta di una delle due condizioni alla base del fenomeno della stazionarietà, ossia dell'ipotesi che la domanda di traffico in ingresso si mantenga indefinitamente costante.

3.11.2. Analisi deterministica delle file d'attesa [3.1]

Alla base di questo modo di interpretare le file d'attesa ci sono le cumulate nel tempo t degli arrivi $A(t)$ e degli allontanamenti $D(t)$.

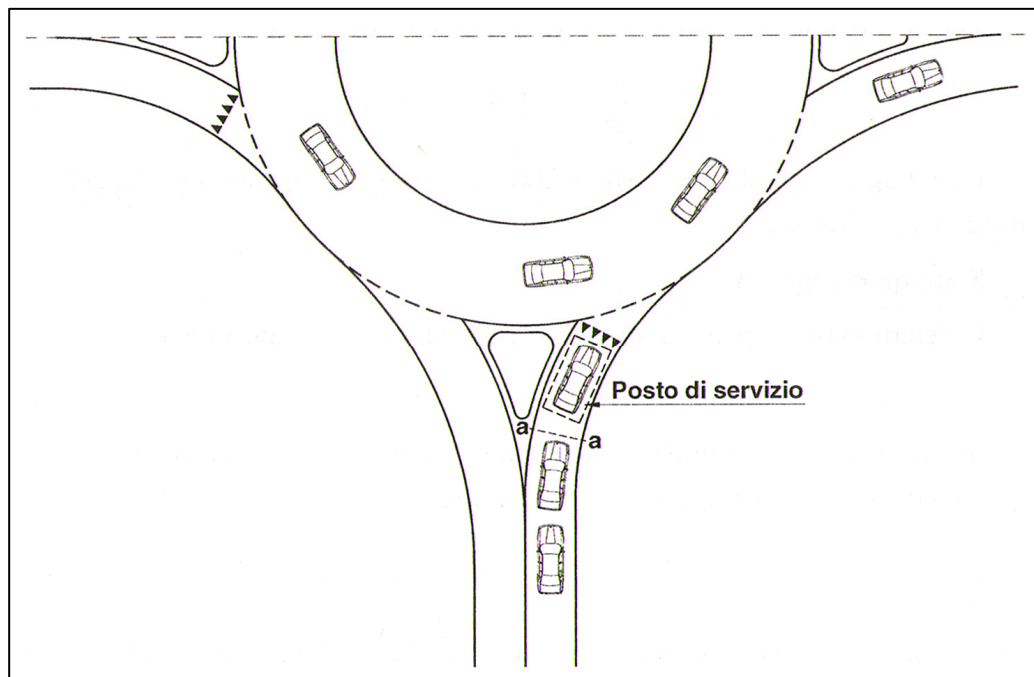


Figura 3.33: Posizionamento del posto di servizio [3.1]

Un allontanamento si registra ogni volta che un veicolo supera la linea ideale (a- a in Figura 3.33) che delimita, a monte dell'accesso, il posto di servizio.

Essendo i conteggi di traffico di tipo discreto, allora, a rigore, $A(t)$ e $D(t)$ dovrebbero essere delle funzioni a gradino, al posto delle quali, di solito, si utilizzano le rispettive approssimazioni continue (Fig. 3.34).

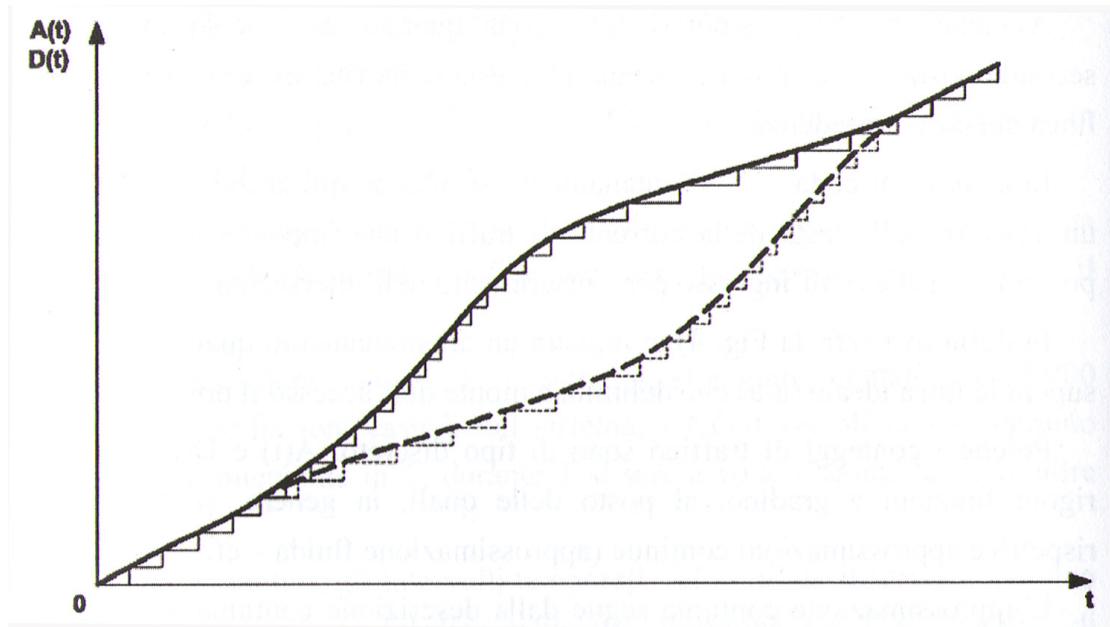


Figura 3.34: Approssimazione fluida delle cumulate degli arrivi e delle partenze [3.1]

Essendo $Q_e(t)$ la domanda di traffico e $C(t)$ la capacità dell'ingresso, allora per definizione di portata, il tasso degli arrivi sarà pari a:

$$\frac{dA(t)}{dt} = Q_e(t) \quad \forall t \quad [\text{Eq. 3.106}]$$

Con l'approccio deterministico $Q_e(t)$ e $C(t)$ si suppongono non soggette ad oscillazioni aleatorie.

Sotto queste ipotesi si può affermare che:

- le determinazioni puntuali di Q_e e C coincidono con i valori medi:

$$Q_e(t) = E[Q_e(t)]; \quad C(t) = E[C(t)] \quad \forall t \quad [\text{Eq. 3.107}]$$

- per il tasso delle cumulate degli allontanamenti (flusso in allontanamento $Q_d(t)$) è possibile porre:

$$\text{a) } \frac{dD(t)}{dt} = Q_d(t) = Q_e(t) \quad t \in (t_i; t_j) \quad [\text{Eq. 3.108}]$$

quando in tutto un generico intervallo $(t_i; t_j)$ l'ingresso è sottosaturato ($Q_e(t) < C(t)$) ed all'istante iniziale non vi è presente coda all'ingresso ($L_c(t_i)=0$);

$$\text{b) } \frac{dD(t)}{dt} = Q_d(t) = C(t) \quad t \in (t_i; t_j) \quad [\text{Eq. 3.109}]$$

se in tutto l'intervallo $(t_i; t_j)$ l'ingresso è saturato ($Q_e(t) \geq C(t)$) o se all'istante iniziale è presente coda L_0 all'ingresso ($L_c(t_i) = L_0$).

Pertanto, una volta conosciuti gli andamenti di $Q_e(t)$ e di $C(t)$, allora le $A(t)$ e $D(t)$ si possono ottenere integrando le [Eq. 3.107], [Eq. 3.108] e [Eq. 3.109].

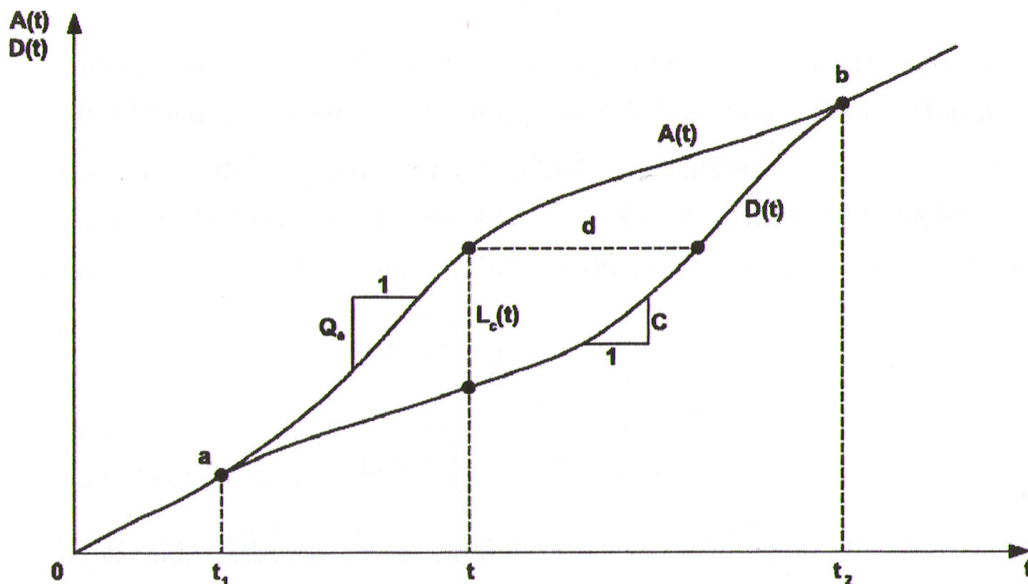


Figura 3.35: Cumulate degli arrivi $A(t)$ e degli allontanamenti $D(t)$ [3.1]

Partendo quindi dalle due curve, quella degli arrivi $A(t)$ e quella delle partenze $D(t)$, riportate in Figura 3.35, è possibile calcolare in maniera diretta tutti gli indicatori che caratterizzano un fenomeno d'attesa.

La lunghezza della coda in un qualunque istante t , $L_c(t)$, si valuta come:

$$L_c(t) = A(t) - D(t) \quad [\text{Eq. 3.110}]$$

Questa equazione esprime in pratica la legge di conservazione dei veicoli al braccio, in base alla quale i veicoli che arrivano possono solo allontanarsi dalla coda o permanervi ($A(t) = D(t) + L_c(t)$).

E siccome la disciplina della coda è di tipo FIFO, è evidente che la distanza orizzontale tra le due curve $A(t)$ e $D(t)$ rappresenta il tempo d'attesa w_c in coda del generico veicolo giunto all'istante t :

$$d = w_c(t) \quad [\text{Eq. 3.111}]$$

Ne consegue che l'area $S(aba)$ compresa tra le curve $A(t)$ e $D(t)$ rappresenta il tempo complessivo d'attesa in coda W_c relativo quindi a tutti gli utenti che hanno atteso in coda.

In tal modo è possibile calcolare il tempo medio d'attesa dividendo W_c per un idoneo numero di utenti relativi ad un periodo fissato $T_q = t_f - t_i$, ossia:

$$\overline{w_c} = \frac{W_c}{\int_{t_i}^{t_f} Q_e(t) dt} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} [A(t) - D(t)] dt}{\int_{t_i}^{t_f} Q_e(t) dt} \quad [\text{Eq. 3.112}]$$

Il ricorso alle funzioni $A(t)$ e $D(t)$ consente la determinazione anche del tempo T_d entro il quale si ripercuotono, una volta cessato il picco di traffico, gli effetti di quest'ultimo.

Quanto fin qui espresso per gli allontanamenti dalla coda vale anche per gli allontanamenti dal sistema. Infatti essendo w_c , come appena visto, la distanza tra le curve $A(t)$ e $D(t)$, e tenendo presente la [Eq. 3.84], si può scrivere:

$$w_s = w_c + T_s = w_c + \frac{1}{C} \quad [\text{Eq. 3.113}]$$

Pertanto la cumulata $D_s(t)$ degli allontanamenti dal sistema si ottiene, istante per istante, traslando, a parità di t , in orizzontale il valore di $D(t)$ di una quantità pari a $T_s = 1/C$.

3.11.2.1. Considerazioni conclusive [3.1]

Le espressioni riportate nel paragrafo precedente sono state ottenute sotto le seguenti ipotesi:

- le cumulate degli arrivi $A(t)$ e degli allontanamenti $D(t)$ sono approssimate, in generale con andamenti continui (approssimazione fluida) che, nel caso di successioni di periodi a domanda di traffico ed a capacità costante, risultano continui a tratti (spezzate);
- in un periodo di domanda di traffico Q_e costante i veicoli sopraggiungono al braccio ad intertempi costanti $\tau_a = I/Q_e$;
- in un periodo con capacità costante C i veicoli si allontanano dalla coda (o dal sistema) a cadenze temporali costanti pari $\tau_d = I/C$.

Bisogna aggiungere che l'approssimazione fluida ha tanto più fondamento quanto più il sistema è in congestione.

Per concludere, va sottolineato come le soluzioni fornite dall'approccio deterministico si possano iscrivere nella classe delle soluzioni tempo-dipendenti della teoria dei fenomeni d'attesa in quanto, a differenza di quelle probabilistiche, consentono di tener conto della estensione finita dei periodi di congestione del sistema e del protrarsi degli effetti delle punte.

3.11.3. Soluzioni tempo-dipendenti e fenomeni d'attesa [3.1]

Come è stato descritto nei paragrafi precedenti, le soluzioni fornite dall'approccio probabilistico sono valide in condizioni di stato stazionario.

Per un sistema reale, queste particolari condizioni sono solo parzialmente attingibili.

Questo tipo di soluzioni possono essere considerate approssimazioni accettabili per gli "i" ingressi se: il tempo T_i nel quale le domande di traffico Q_{ei} e le capacità C_i possono assumersi costanti è sufficientemente ampio; l'ingresso risulta sottosaturato in T_i e per esso l'intensità di traffico $\rho_i = Q_{ei}/C_i$ è opportunamente minore dell'unità.

Ciò significa che con i risultati probabilistici non è possibile studiare situazioni nelle quali Q_{ei} è variabile con il tempo e può anche superare la capacità C_i in uno specifico periodo di picco.

Per quanto riguarda invece l'approccio deterministico, nel paragrafo precedente si è evidenziato come i risultati siano tanto più attendibili quanto più l'ingresso risulta

essere sovrasaturato (con code presenti o meno all'istante iniziale di osservazione del sistema), cioè al crescere di $\rho_i > 1$: in tale circostanza, infatti, gli effetti aleatori negli indicatori di stato (code e tempi d'attesa) diventano meno rilevanti e le medie degli stessi parametri si avvicinano a quelli deterministici.

In sostanza, per condizioni nelle quali l'ingresso è sovrasaturato ($\rho_i > 1$), ma non risulta $\rho_i \gg 1$, il non considerare, con l'approccio deterministico, gli effetti aleatori dell'evoluzione del fenomeno di attesa nel tempo limita l'attendibilità dei risultati ed induce a sottostimare sistematicamente i valori dei parametri di stato.

Quindi, per descrivere situazioni di non stazionarietà, ovvero di variabilità di Q_{ei} e/o sovrasaturazione dell'ingresso, ma con ρ_i non sufficientemente maggiore dell'unità, l'approccio probabilistico e quello deterministico non risultano idonei.

Tale considerazione porta pertanto ad utilizzare, nell'analisi di un sistema in stato stazionario, criteri euristici di transizione da soluzioni statistiche a deterministiche ed ottenere, per il calcolo dei parametri di stato, relazioni nelle quali compaiono come variabili indipendenti l'intensità di traffico ρ ed il tempo T di durata del periodo di punta o di osservazione del sistema.

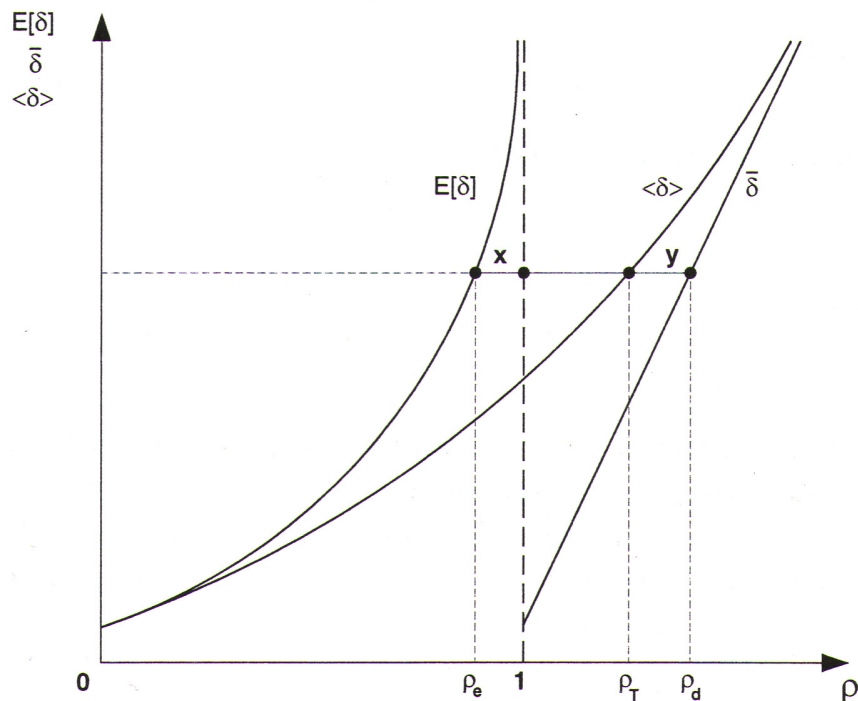


Figura 3.36: Andamenti di $E[\delta]$, $\bar{\delta}$ e $\langle \delta \rangle$ in funzione dell'intensità di traffico ρ [3.1]

In particolare, un indicatore di stato δ (per esempio L_c, L_s, w_c, w_s) viene calcolato in media $\langle \delta \rangle$, per un fissato valore dell'intervallo T , combinando opportunamente la sua speranza matematica $E[\delta]$ in condizioni di equilibrio statistico (stato stazionario) con il suo valore medio deterministico $\bar{\delta}$, in modo che (Fig. 3.36) l'asintoto obliquo della relazione $\langle \delta \rangle = \langle \delta(\rho) \rangle$ coincida con la funzione deterministica che fornisce $\bar{\delta}$.

Per la determinazione di $\langle \delta \rangle = \langle \delta(\rho) \rangle$ si possono seguire due criteri che verranno qui di seguito esposti.

Fissato un generico comune valore $E[\delta]$, $\bar{\delta}$ e $\langle \delta \rangle$ ($E[\delta] = \bar{\delta} = \langle \delta \rangle$), sia x la distanza tra $E[\delta]$ e l'asintoto verticale in $\rho=1$ ed y la distanza tra la curva $\langle \delta \rangle = \langle \delta(\rho) \rangle$ (da determinare) e la semiretta $\bar{\delta} = \bar{\delta}(\rho)$ che ne costituisce l'asintoto obliquo (Fig. 3.36).

Allora è possibile imporre:

$$x = y \quad [\text{Eq. 3.114}]$$

Oppure in alternativa:

$$x : 1 = y : \rho_d \quad [\text{Eq. 3.115}]$$

Quindi, in termini di intensità di traffico la [Eq. 3.114] diventa:

$$1 - \rho_e = \rho_d - \rho_T \quad [\text{Eq. 3.116}]$$

Ossia:

$$\rho_e = \rho_T - (\rho_d - 1) \quad [\text{Eq. 3.117}]$$

Mentre invece la [Eq. 3.115] si trasforma in:

$$1 - \rho_e = \frac{\rho_d - \rho_T}{\rho_d} \quad [\text{Eq. 3.118}]$$

E quindi:

$$\rho_e = \frac{\rho_T}{\rho_d} \quad [\text{Eq. 3.119}]$$

Partendo dalla [Eq. 3.117] e dalla [Eq. 3.119], esplicitando ρ_e e ρ_d in funzione di $E[\delta]$ e $\bar{\delta}$ si ottengono, assegnato T , due espressioni (diverse) di $\langle \delta \rangle = \langle \delta(\rho) \rangle$ cercate.

Data la natura euristica del criterio di deduzione dell'andamento di $\langle \delta \rangle$ in condizioni tempo-dipendenti (cioè non stazionarie), non vi sono motivi specifici per preferire l'una all'altra delle funzioni esposte nella [Eq. 3.114] e nella [Eq. 3.115] (o di altre che possono adottarsi per ottenere le curve di transizione).

3.11.3.1. Soluzioni tempo-dipendenti generalizzate [3.1]

Soluzioni tempo-dipendenti per la valutazione di un qualunque parametro di stato si ottengono di solito a partire dalle espressioni dei valori attesi ($E[L_s]$, $E[L_c]$, $E[w_s]$, $E[w_c]$) per stato stazionario valide nel caso di arrivi al braccio distribuiti poissonianamente e tempi di servizio esponenziali.

Tali assunzioni per il sistema degli arrivi e dei tempi di servizio vengono solitamente ritenute sufficienti a rappresentare la maggior parte delle situazioni d'interesse pratico.

Volendo comunque pervenire, ad esempio per $\langle L_s \rangle$ e $\langle w_s \rangle$, ad espressioni più generali, si possono allora assumere come valori attesi di $E[L_s]$ e di $E[w_s]$ in stato stazionario, dalle quali partire per la transizione verso le medie deterministiche \bar{L}_s e \bar{w}_s , la [Eq. 3.97] e la [Eq. 3.95], dove la media \bar{s} e la varianza $V[s]$ del tempo di servizio sono in generale definite dalla [Eq. 3.92] e dalla [Eq. 3.93].

Nelle applicazioni numeriche di queste formulazioni è possibile utilizzare $\bar{s} = 1/C$, mentre per $V[s]$ si può ricorrere a valori reperibili in letteratura ottenuti da rilievi di traffico, anche se tutto ciò può condurre a volte a delle stime distorte.

Ad esempio, applicando alla [Eq. 3.97] gli stessi procedimenti esposti nel paragrafo precedente, si può ottenere per $\langle w_s \rangle$, nell'ipotesi semplificativa che $L_{s0}=0$ (nessun utente nel sistema all'istante iniziale), la seguente espressione generalizzata:

$$\langle w_s \rangle = \bar{s} + (\bar{s} + V[s]) \cdot \frac{\rho \cdot C}{2} + \frac{T}{4} \cdot \left[\rho - 1 + \sqrt{(\rho - 1)^2 + \frac{4 \cdot \rho}{C \cdot T}} \right] \quad [\text{Eq. 3.120}]$$

Allo stesso modo è possibile ottenere delle altre relazioni analoghe anche per gli altri indicatori di stato.

3.11.3.2. Considerazioni conclusive [3.1]

E' stato già detto come le relazioni tempo-dipendenti, di solito, vengano ricavate nell'ipotesi che le soluzioni di equilibrio statistico, dalle quali transitare verso quelle deterministiche, siano legate ad arrivi di tipo poissoniano ed a tempi di servizio esponenziali e che le condizioni di equilibrio statistico prima e dopo il picco siano le stesse.

La plausibilità di queste assunzioni è in ogni caso provata da indagini teoriche e dai buoni risultati che si conseguono nella pratica tecnica.

Comunque, qualunque sia il livello di generalità delle relazioni tempo-dipendenti utilizzate, vista la loro natura euristica, i risultati ottenuti non collimano esattamente con quelli che si ottengono con i procedimenti matematici rigorosi della teoria delle code in assenza di equilibrio statistico.

Le discordanze in ogni caso, per questo tipo di applicazioni, risultano in sostanza non significative.

Come è già stato evidenziato nei paragrafi precedenti, le espressioni tempo-dipendenti sono funzioni continue dell'intensità di traffico ρ (Fig. 3.36), a quale può variare in tutto il suo intervallo di definizione ($\rho \in [0; +\infty[$).

Ciò permette quindi di ottenere, non solo soluzioni nell'intorno di $\rho=1$ (dove sia l'approccio probabilistico che quello deterministico non forniscono delle risposte aderenti con la realtà), ma anche di trattare il caso di punte di traffico caratterizzate, durante il picco, da sottosaturazione dell'entrata.

Per concludere, bisogna comunque aggiungere che soluzioni approssimate per lo studio degli stati transitori dei fenomeni d'attesa alle intersezioni sono ancora oggi oggetto di approfondite ricerche scientifiche [3.34], a dimostrazione dell'importanza che tale argomento ricopre nell'ambito della progettazione funzionale delle intersezioni.

3.12. Bibliografia specifica del Capitolo 3.

- [3.1] Mauro R. (2007) – Il calcolo delle rotatorie. Capacità. Tempi d’attesa. Lunghezza delle code – *Hevelius Edizioni*, Benevento.
- [3.2] Annunziata F., Cecere E., Coni M., Maltinti F., Pinna F., Portas S. (2007)- Progettazione stradale. Dalla ricerca al disegno delle strade - *Dario Flaccovio Editore*, Palermo.
- [3.3] Canale S., Distefano N., Leonardi S., Pappalardo G. (2005) - Progettare le rotatorie - *EPC Libri*, Roma.
- [3.4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – D. M. 19/04/2006: Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali - Roma.
- [3.5] FHWA (2000) – Roundabouts: an informational guide – Report n. FHWA-RD-00-067 – Federal Highway Administration, U.S. Department Of Transportation, Washington (USA).
- [3.6] Rodegerdts L. (2004) – NCHRP 3-65: Applying Roundabouts in the United States – Committee on Highway Capacity and Quality of Service, Washington (USA).
- [3.7] Provincia di Padova: Assessorato alla Viabilità (2002) - Linee guida per la progettazione e la verifica delle intersezioni a rotatorie - Provincia di Padova.
- [3.8] Brilon W. (2005) – Roundabouts: a state of the art in Germany – Atti del National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [3.9] SETRA (1997) – Carrefours giratoires: evolution des caracteristiques geometriques – Documentation Technique 44 – Ministere de l’equipement du logement, de l’amenagement du territoire et des transports, Parigi (Francia).
- [3.10] Bovy P., Dietrich K., Harmann A. et AA.VV. (1991) – Guide Suisse des giratoires – FVS/FSS-EPFL – Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Losanna (Svizzera).
- [3.11] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Ispettorato Generale per la circolazione e la sicurezza stradale (2001) - Norme sulle caratteristiche

funzionali e geometriche delle intersezioni stradali - *Rapporto di Sintesi a Carattere Prenormativo*.

- [3.12] Commissione VSS 2 (1999) – Norme Svizzere SN 640-263 – Intersezioni: le rotatorie – Unione dei professionisti svizzeri della strada, Losanna (Svizzera).
- [3.13] NAASRA (1986) – Roundabouts: A Design Guide – National Association of Australian State Road Authorities, Sydney (Australia).
- [3.14] Curti V., Marescotti L., Mussone L. (2001) – Rotonde. Progetto e valutazione per la sistemazione a rotonda delle intersezioni – Libreria CLUP, Milano.
- [3.15] Esposito T., Mauro R. (2003) – Fondamenti di infrastrutture viarie, Volume 2: La progettazione funzionale delle strade - *Hevelius Edizioni*.
- [3.16] AA. VV. (2000) – Highway Capacity Manual 2000 - Transportation Research Board (TRB), Washington D.C. (USA).
- [3.17] Brilon W., Wu N., Bondzio L. (1997) - Unsignalized intersections in Germany: A state of the art 1997 - in Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals, Bochum (Germania).
- [3.18] Kimber R. M., Hollis E. M. (1979) – Traffic queues and delays at road junctions – TRRL Report 909.
- [3.19] TRL's Software Bureau (1998) - Roundabout design for capacity and safety. The UK empirical methodology - TRL.
- [3.20] Luttinen R. T. (2004) – Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections – Finnra Reports 1/2004 – Finnish Road Administration, Helsinki (Finlandia).
- [3.21] Directorate General of Highways (1993) – Indonesian Highway Capacity Manual– NO. 09/T/BNKT/1993 – Ministry of Public Works, Giacarta (Indonesia).
- [3.22] CERTU (1999) – Guide carrefours urbains – Centre d'études sur les reseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Lione (Francia).
- [3.23] Hagring H. (2003) – Capacity Model for Roundabouts – Trivector Traffic AB, Swedish National Road Administration, Lund (Svezia).

- [3.24] Akcelik R. (2004) – Roundabouts. Comments on aaSIDRA and TRL (UK) linear regression model – Akcelik & Associates Pty Ltd, Sydney (Australia).
- [3.25] Hagring H. (2004) - Effects of OD Flows on Roundabout Entry Capacity - Department of Technology and Science, Lund University (Svezia).
- [3.26] Wu N. (2000) - The proposed new version of German Highway Capacity Manual - Institute for Traffic Engineering, Ruhr University Bochum (Germania).
- [3.27] Directorate General of Highways Ministry of Public Works (1993) - Indonesian Highway Capacity Manual – (Indonesia).
- [3.28] Grant T., Nicholson A. (2005) - Rural Roundabouts And Their Application In New Zealand - University of Canterbury (Nuova Zelanda).
- [3.29] Kimber R. M., Daly P., Barton J., Giokas C. (1986) - Predicting time-dependent distributions of queues and delays for road traffic at roundabouts and priority junctions – The Journal of the Operational Research Society, Vol. 37, No. 1. (Gennaio 1986), pp.87-97.
- [3.30] Troutbeck R. J., Brilon W. (1992) – Unsignalized intersection theory – Capitolo 8 di “Traffic Flow Theory: a state of the art report”, Washington (USA).
- [3.31] Kimber R. M. (1980) – The traffic capacity of roundabouts – TRRL Laboratory, Report 942, Crowthorne (Regno Unito).
- [3.32] Marlow M., Maycock G. (1982) – The effect of zebra crossing on junction entry capacities – TRRL Laboratory, Report SR 742, Crowthorne (Regno Unito).
- [3.33] Brilon W., Stuwe B., Drews O. (1993) – Sicherheit und leistungsfähigkeit von kreisverkehrsplätzen – Institute of traffic engineering, Ruhr Universität, Bochum (Germania).
- [3.34] Brilon W., Wu N. (2007) – Time dependent delay at unsignalized intersections – Atti del 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT17), Londra (Regno Unito).

Capitolo 4.

GLI STANDARD PRESTAZIONALI DI UNA ROTATORIA: APPLICAZIONE DELLE PRINCIPALI FORMULAZIONI INTERNAZIONALI DI CAPACITÀ A CASI DI STUDIO

4.1. Introduzione

La sistemazione degli incroci a raso con schema a rotatoria ha conosciuto negli ultimi anni, in Italia ed in molti altri Paesi, un notevole sviluppo in quanto generalmente considerata idonea a garantire benefici effetti sia in termini di qualità del deflusso veicolare che in termini di sicurezza stradale. Sono noti, infatti, i principali vantaggi che offre tale sistemazione, quali l'aumento della capacità e la contemporanea diminuzione dei tempi medi d'attesa rispetto ad un pari incrocio con precedenza o con regolazione semaforica, la riduzione dell'inquinamento acustico e di quello dovuto alla generazione di polveri sottili, la riduzione della velocità di percorrenza in intersezioni altrimenti molto pericolose e quindi una generale diminuzione dell'incidentalità in termini di quantità e magnitudo.

Ma mentre il panorama normativo internazionale (Francia, USA, Australia, Regno Unito, Germania, Svezia) offre da oltre un ventennio numerosi schemi di approccio al problema del dimensionamento di una rotatoria (calcolo della capacità, etc.), in Italia, accanto ad un uso diffuso e generalizzato di tale soluzione nella gestione delle intersezioni, si è parallelamente sviluppato un quadro normativo sulla progettazione delle stesse che fornisce solo indicazioni sugli aspetti geometrici, e non prestazionali [4.24].

Inoltre è opportuno sottolineare come il sempre più esteso utilizzo della soluzione a rotatoria da parte dei progettisti si confronta, in special modo nelle aree urbane, con il tessuto connettivo stradale esistente, oltre che con le caratteristiche fisiche ed orografiche dei siti prescelti.

Tutto ciò ha portato alla nascita di una “*compromise choice*”, ossia a scelte

progettuali di compromesso che solitamente vanno a penalizzare una o più caratteristiche geometriche di uno schema standard di rotatoria. In particolare in Italia, dove la rete stradale ed il tessuto delle aree urbane spesso presentano delle caratteristiche disomogenee tra di loro, si è assistito alla proliferazione di tutta una serie di rotonde “anomale” dal punto di vista geometrico rispetto agli schemi classici di letteratura, spesso caratterizzate cioè da gratuite innovazioni e non lievi errori di progettazione.

Alla luce di quanto premesso ci si è posti l’obiettivo di verificare l’applicabilità di alcuni metodi, tra i più diffusi in ambito internazionale, concepiti per la verifica e/o il dimensionamento di rotatorie eseguendo due applicazioni dirette: una su di un’importante intersezione esistente e “geometricamente non conforme” agli schemi classici di rotonde e ad un’altra su una rotatoria invece di dimensioni più contenute, sostanzialmente di forma polar-simmetrica, ma con flussi di traffico sbilanciati.

4.2. Il caso di studio: la rotatoria di Cosenza Nord [4.24]

Alla luce di quanto esposto precedentemente, in questo paragrafo, si è presa in considerazione una rotatoria che può comprendersi tra quelle rotonde cosiddette “anomale” o “geometricamente non conformi”.

In Figura 4.1 è riportata una planimetria dell’intersezione studiata: essa è collocata in coincidenza dello svincolo dell’autostrada A3 (Nodo A) di Cosenza Nord e si trova lungo la direttrice che collega il centro urbano di Quattromiglia di Rende (provincia di Cosenza) all’Università della Calabria ed alla SS 107 per Paola (itinerario B-D e D-B).

Una possibile classificazione tipologica di tale intersezione può essere intrapresa indicandola quale rotatoria extraurbana di grande diametro a corsia singola. E’ in corso però un processo di urbanizzazione della zona con insediamenti abitativi ad alta densità che porterà nel medio termine a dover considerare il sito in ambito urbano con un probabile aumento della portata di traffico.

Le Figure 4.2 e 4.3 mostrano invece due vedute aree della rotatoria.

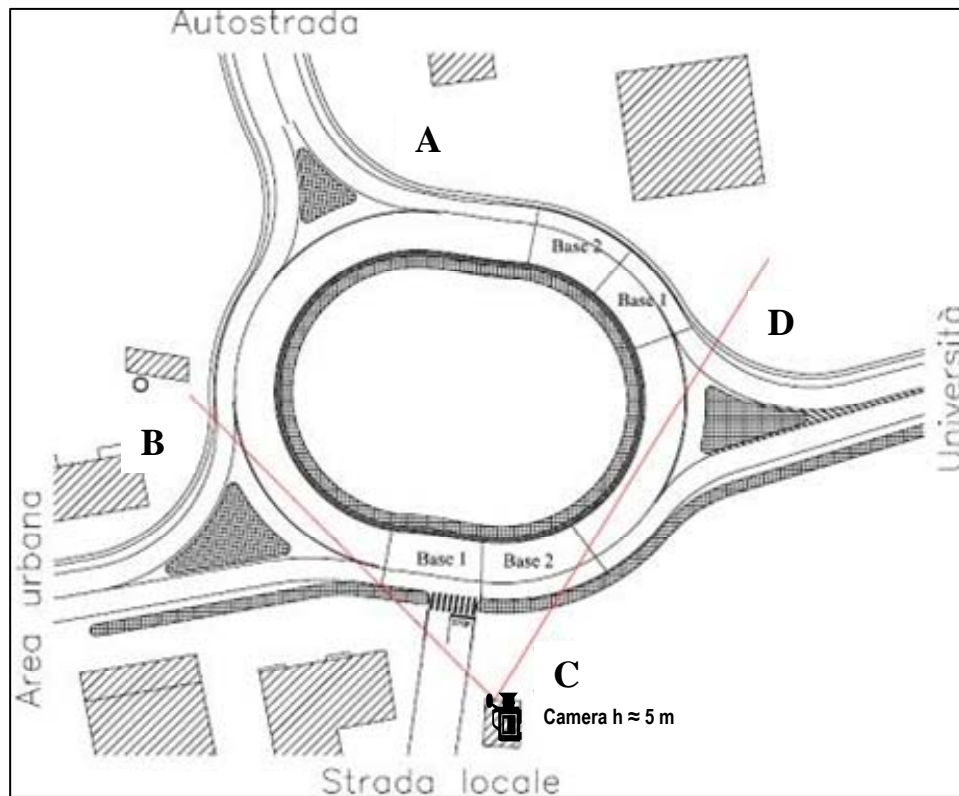


Figura 4.1: Planimetria della rotonda di Cosenza Nord [4.24]



Figura 4.2: Vista aerea della rotonda di Cosenza Nord

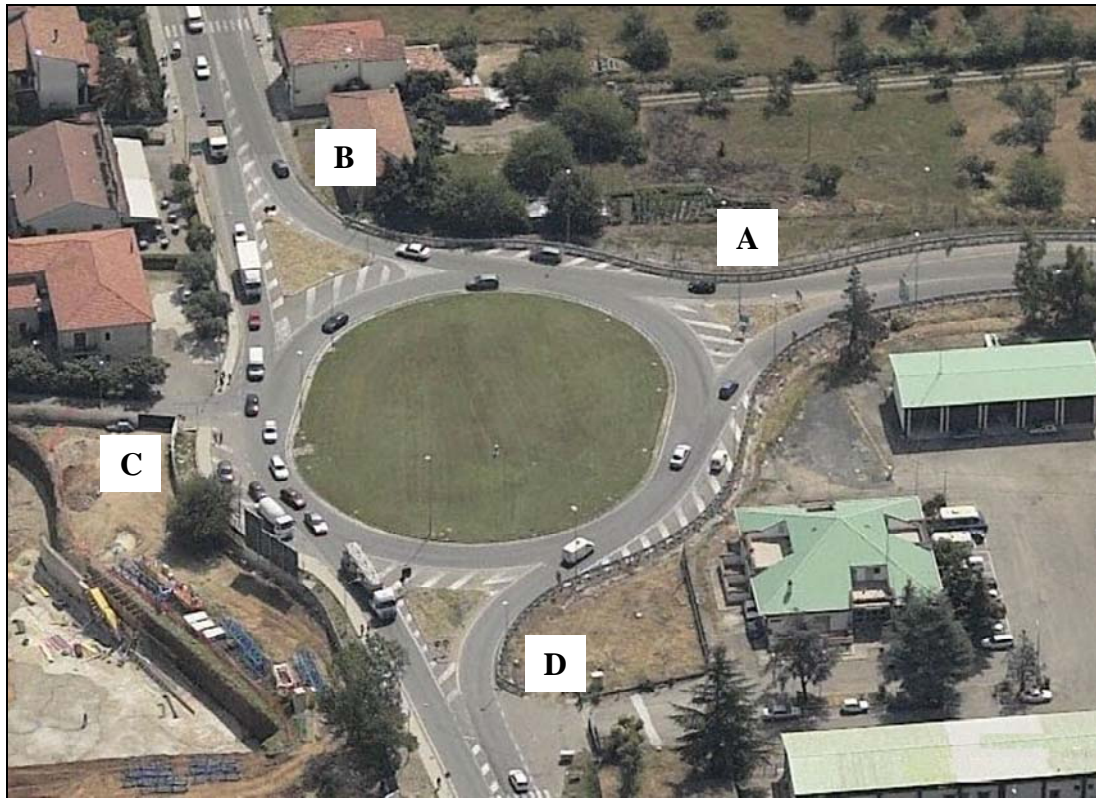


Figura 4.3: Vista aerea della rotatoria di Cosenza Nord

La scelta di tale intersezione quale “caso di studio” può riassumersi nei motivi appresso indicati:

- forma dell’anello non circolare, ma ellittica (in pratica si possono rilevare due diametri esterni uno pari a 65 metri e l’altro a 80 metri);
- corsia d’ingresso del ramo B tangente alla traiettoria di percorrenza dell’anello, quindi con conseguente raggio di deflessione del percorso B-D non conforme alle indicazioni riscontrabili in letteratura;
- completo disallineamento tra ingressi opposti;
- zona di scambio tra gli ingressi A e B troppo breve per poter garantire una corretta attuazione di tutte le manovre in essa contemplate;
- presenza di un ramo d’ingresso (C) non conforme alle indicazioni consigliate in letteratura, in quanto la lunghezza delle corsie d’ingresso e d’uscita risulta inferiore a 3 metri e non dotato d’isola separatrice;
- larghezza della corsia all’anello maggiore di 8 metri (limite suggerito per

le rotatorie a corsia singola): tale considerazione porta a classificare questa rotatoria come una “semi-two-lane roundabouts”;

- flussi di traffico sbilanciati in quanto, in termini di flusso veicolare, esiste una direttrice principale Università-Area urbana (B-D), che assorbe quasi il 50% di tutto il traffico entrante in rotatoria, ed un nodo (C) la cui portata entrante è pari solo al 5% di quella complessiva.

In Tabella 4.1 sono sintetizzate tutte le grandezze degli elementi geometrici che costituiscono questa rotatoria.

Raggio isola centrale (m)	Diametro esterno (m)	Larghezza Anello (m)	Corsie anello	Larghezza isole divisionali (m)				Larghezza corsie ingressi (m)			
				A	B	C	D	A	B	C	D
23 - 30	65 - 80	9.80	1	9.80	15.50	1	11.20	5.60	6.05	4.00	6.05

Tabella 4.1: Principali caratteristiche geometriche della rotatoria di Cosenza Nord

I metodi esposti e i rilievi sperimentali, opportunamente elaborati, hanno permesso di ricavare i seguenti parametri:

- le capacità, i tempi medi d’attesa e le lunghezze delle code agli ingressi;
- i tempi di servizio complessivi e sui singoli nodi;

4.2.1. La metodologia di rilievo

Per la costruzione delle matrici Origine/Destinazione (O/D), ci si è avvalsi di una videocamera digitale e di un software apposito per l’analisi di immagini in movimento.

Preventivamente il sito è stato ispezionato in differenti fasce orarie e diverse giornate della settimana, individuando nelle giornate infrasettimanali e nella fascia oraria 11-13 l’intervallo temporale entro cui la rotatoria presentava configurazioni al limite della capacità (presenza contemporanea di almeno quattro veicoli in coda su tutti i rami).



Figura 4.4: Fotogramma del rilievo della rotatoria di Cosenza Nord

Come mostrato nelle Figure 4.1 e 4.4, la telecamera è stata posta in posizione rialzata rispetto all'intersezione (circa 5 m rispetto al piano stradale) ed in maniera tale da poter inquadrare l'intera rotonda. Reperate le immagini, si è proceduto alla visione dei filmati e quindi alla conseguente estrapolazione delle informazioni relative alla quantità ed alla composizione del flusso veicolare impegnante la rotatoria.

Un significativo rilievo è stato effettuato mercoledì 26 Ottobre 2005 nel periodo temporale compreso tra le 11.30 e le 12.30 per un totale di 60 minuti. Le condizioni ambientali durante le ore di rilievo sono state ottimali: cielo sereno e pavimentazione asciutta.

All'interno dell'ora di rilievo sono stati individuati 45 minuti utili al reperimento delle informazioni per il calcolo dei parametri prestazionali della rotonda. Si è quindi proceduto alla suddivisione del campione di 45min in 9 intervalli temporali da 5min ciascuno. Per ogni intervallo T_i , e per ogni nodo, si è provveduto a conteggiare i veicoli entranti, la composizione del traffico e la loro destinazione finale, in modo da ottenere gli elementi per costruire la matrice O/D (vedasi schema di Figura 4.5).

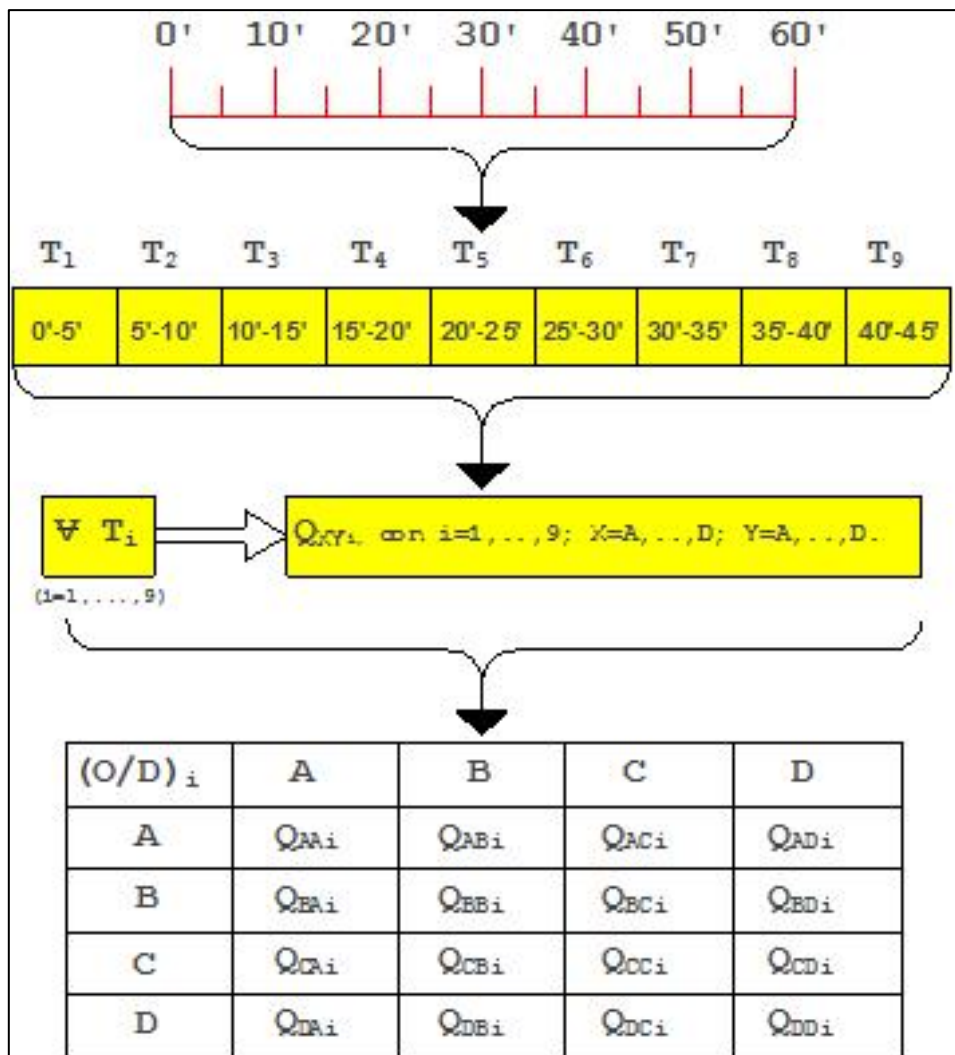


Figura 4.5: Metodologia di elaborazione delle informazioni rilevate - Diagramma di flusso [4.24]

I flussi misurati sui 5 min sono stati uniformati in veicoli equivalenti attraverso opportuni coefficienti di omogeneizzazione (ricavati dall’HCM [4.13]) e proiettati nell’arco temporale dell’ora in modo da essere espressi in veic/h.

I dati di traffico relativi ai 9 intervalli temporali sono stati riassunti in un’unica tabella in cui sono riportati i valori minimo, medio e massimo del flusso per ogni itinerario (Tab. 4.2).

Per il calcolo delle capacità e degli altri parametri, attraverso i metodi descritti nel Capitolo 3, si è ritenuto opportuno utilizzare la matrice O/D derivante dal rilievo dell’intervallo T₈, ossia dell’arco temporale compreso tra i 35’ ed i 40’ (Tab. 4.3), in

quanto è stato l'unico intervallo in cui si è riscontrata contemporanea presenza di code su tutti e 4 i rami d'ingresso (almeno 4 veicoli in attesa di immettersi).

Min÷Med÷Max (veic/h)	A	B	C	D	Qe (media)
A	0	264÷378÷492	120÷270÷420	0÷96÷192	744
B	132÷264÷396	0	180÷420÷660	12÷54÷96	738
C	204÷378÷552	204÷534÷864	0	12÷42÷72	954
D	0÷12÷24	0÷24÷48	12÷36÷60	0	72
Qu (media)	654	936	726	192	

Tabella 4.2: Matrice O/D con i valori dei flussi veicolari min-med-max per ciascun itinerario [4.24]

	A	B	C	D	Qe (veic/h)
A	0	492	228	24	744
B	288	0	660	24	972
C	276	492	0	60	828
D	24	0	60	0	84
Qu (veic/h)	588	984	948	108	

Tabella 4.3: Matrice O/D relativa all'intervallo temporale T8 tra i 35' ed i 40' di rilievo [4.24]

4.2.2. Analisi dei dati di capacità ottenuti

Come precedentemente spiegato la matrice O/D di Tabella 4.3, ossia i flussi di traffico misurati nell'intervallo di rilievo T₈, sono stati utilizzati per il calcolo delle capacità e degli altri indici prestazionali (tempo medio d'attesa e 95° percentile della lunghezza delle code) utilizzando alcune delle principali formulazioni normative esposte nel terzo capitolo.

L'applicazione di tali metodologie di calcolo ha portato alla redazione della Tabella 4.4 dove risultano posti in evidenza, in funzione dei nodi della rotonda, i dati sperimentali relativi all'intervallo T₈ unitamente ai dati caratteristici calcolati per i seguenti metodi:

- SETRA;
- HCM 2000 (*Upper Bound* e *Lower Bound*);
- HBS 2001;
- Brilon Lineare;
- Brilon Esponenziale;
- *Semi-Two-Lane Roundabout*;

- *Guide Suisse* (Bovy e CH1);
- TRRL;
- CETUR;
- AUSTRROADS.

	NODI				
	A	B	C	D	
	744	972	84	828	Qe
Capacità (veic/h)	717	1058	198	1010	SETRA
	721	889	411	889	HCM 2000 Lw B.
	895	1084	538	1084	HCM 2000 Up B.
	775	940	325	972	HBS 2001
	810	987	348	987	Brilon Lineare
	677	876	345	876	Brilon Esponenziale
	902	1106	532	1106	Semi-Two-Lane
	1058	1250	521	1250	Bovy
	886	1066	418	1066	Guide Suisse (CH1)
	1652	1780	693	1618	TRRL
	886	1066	418	1066	CETUR
	1181	1320	675	1320	AUSTRROADS

Tabella 4.4: Calcolo della Capacità per la rotonda di CS Nord durante l'intervallo T_8

Di più agevole lettura risultano i dati relativi alle capacità e rappresentati sottoforma di istogrammi nelle Figure 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 distinti per nodo d'ingresso.

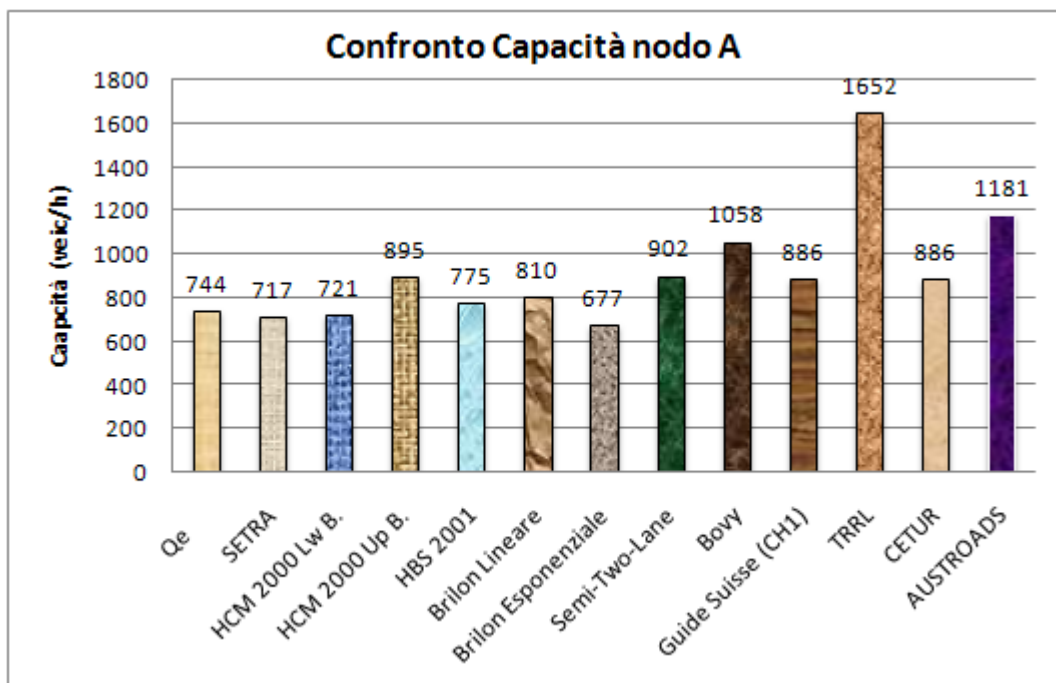


Figura 4.6: Calcolo della Capacità del nodo A per la rotonda di CS Nord durante l'intervallo T_8

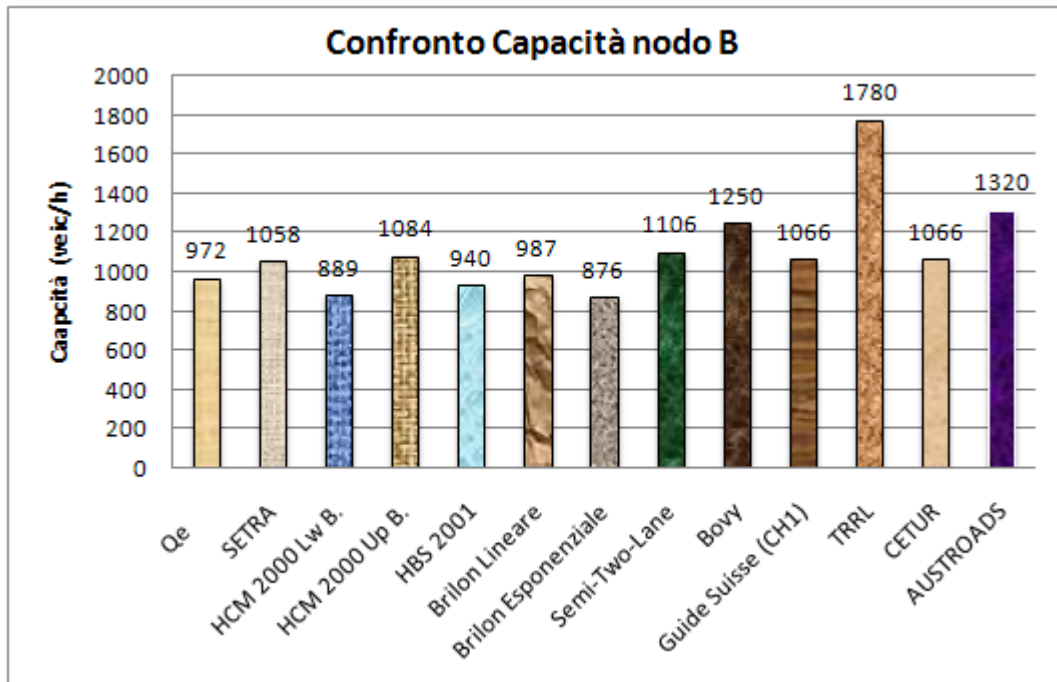


Figura 4.7: Calcolo della Capacità del nodo B per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

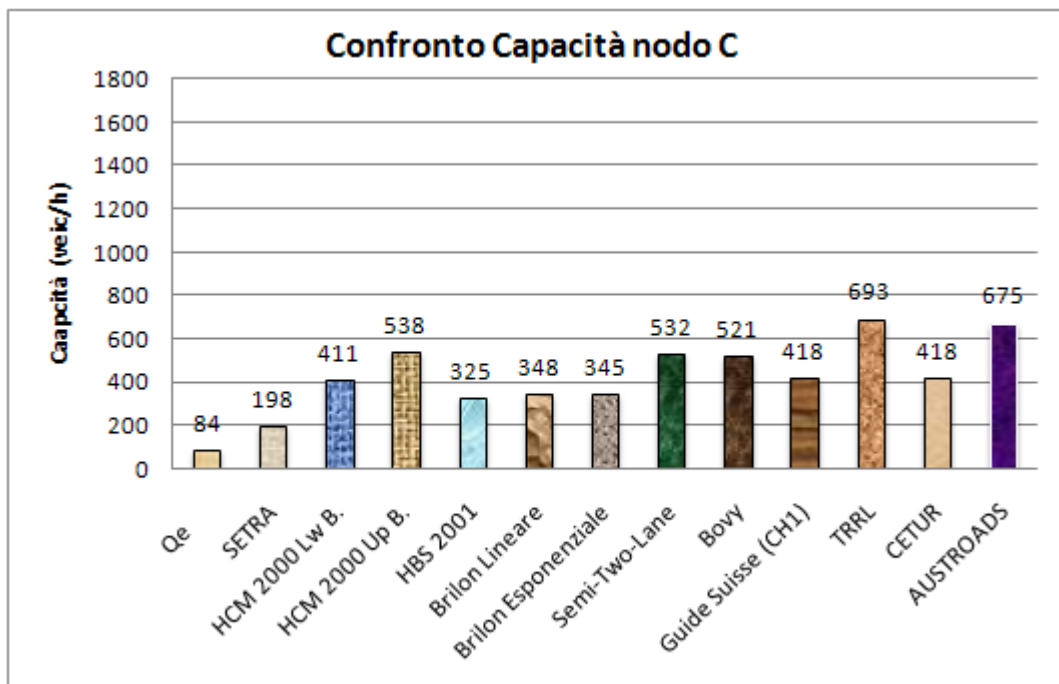


Figura 4.8: Calcolo della Capacità del nodo C per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

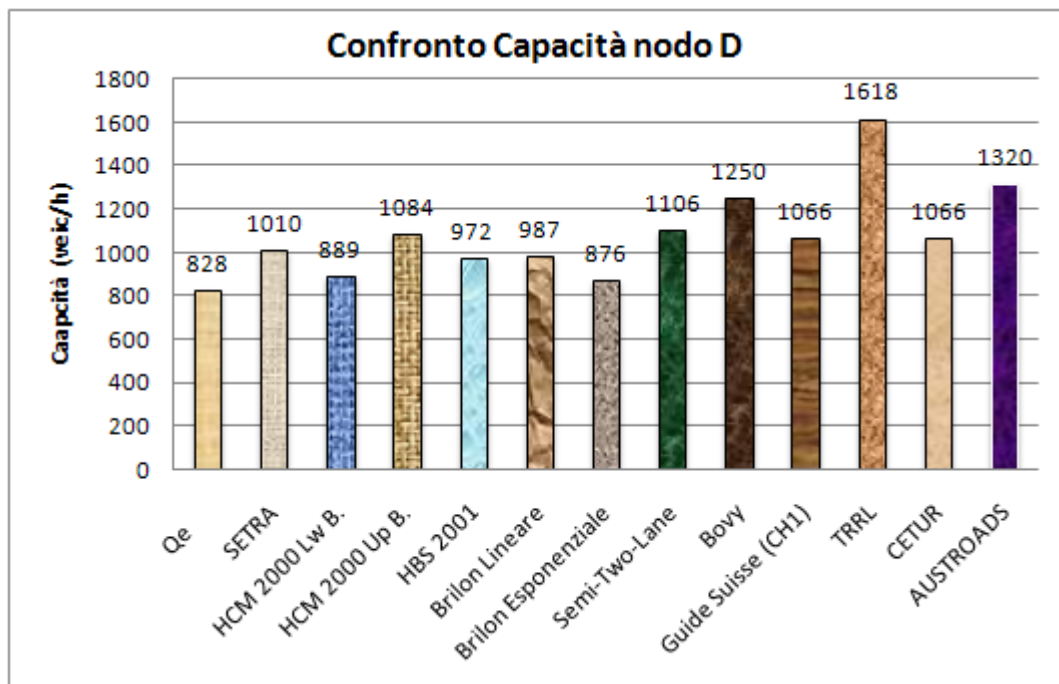


Figura 4.9: Calcolo della Capacità del nodo D per la rotonda di CS Nord durante l'intervallo T_8

	Min	Max	Med	
Scostamento percentuale	4%	22%	11%	SETRA
	3%	9%	6%	HCM 2000 Lw B.
	12%	31%	21%	HCM 2000 Up B.
	3%	17%	8%	HBS 2001
	2%	19%	10%	Brilon Lineare
	6%	10%	8%	Brilon Esponenziale
	14%	34%	23%	Semi-Two-Lane
	29%	51%	41%	Bovy
	10%	29%	19%	Guide Suisse (CH1)
	83%	122%	100%	TRRL
	10%	29%	19%	CETUR
	36%	59%	51%	AUSTROADS

Tabella 4.5: Scostamento percentuale della Capacità dai dati sperimentali

Escludendo il nodo C, caratterizzato da scarsi volumi di traffico e da una geometria fortemente difforme rispetto ai canoni ideali (ad es. completa assenza di isole di separazione tra flussi uscenti ed entranti) è possibile calcolare lo scostamento percentuale (inteso in valore assoluto) tra i dati sperimentali e i dati calcolati, per i soli nodi A, B e D (Tab. 4.5).

Dall'analisi dei risultati ottenuti è possibile asserire che:

- Le metodologie del SETRA [4.7], dell’HCM2000 (*Lower Bound*) [4.13], dell’HBS2001 [4.22], Brilon Lineare e Brilon Esponenziale [4.14] interpretano meglio la condizione di raggiunta capacità della rotonda con degli scostamenti percentuali medi prossimi o addirittura al di sotto del 10%.
- Le formulazioni dell’HCM2000 (*Upper Bound*) [4.13], delle “*Semi-two-lane roundabout*” [4.6], del *Guide Suisse* (CH1) [4.8] e del CETUR [4.18] danno dei valori un po’ più lontani dai dati rilevati, ma comunque accettabili in termini numerici in quanto comunque il loro scostamento medio oscilla intorno al 20%.
- I metodi del *Guide Suisse* (Bovy) [4.8] e dell’AUSTROADS [4.11] invece cominciano già a restituire dei risultati un po’ più discordanti rispetto ai dati realmente osservati, ma anche rispetto alle altre metodologie: infatti il loro scostamento medio varia tra il 40% (Svizzera) ed il 50% (Australia). In particolare, la differenza tra le due formule svizzere per rotonde a singola corsia, quella cosiddetta CH1 e quella di Bovy, è dovuta al fatto che la prima deriva dall’analisi di rotonde compatte fino a 40 m di diametro esterno, mentre l’altra si basa soprattutto su rotonde con diametro esterno non più grande di 30÷35 m.
- Un’osservazione a parte meritano i risultati ottenuti con il metodo TRRL [4.16] per il quale si riscontrano gli scostamenti più alti e compresi tra l’83% ed il 122% circa. Tale forte dispersione, con buona probabilità, può farsi risalire in prima istanza sia al fatto che il metodo tiene conto di molteplici parametri geometrici che risultano fortemente variabili da nodo a nodo, che alla difformità geometrica dell’anello (ellisse anomala avente diametri compresi tra 65 e 80 metri), ma anche alla diversa filosofia progettuale inglese, che, attraverso la realizzazione di isole centrali piccole, minore deflessione ed ingressi con svasature, permette ai conducenti di affrontare la rotonda a velocità più elevate con un netto aumento della capacità ed un conseguente abbattimento del livello di

sicurezza.

4.2.3. Studio dei tempi medi di servizio e dei ritardi

Un parametro che consente di qualificare gli aspetti prestazionali di una rotatoria, unitamente alla capacità, è rappresentato dal ritardo medio di fermata: tempo speso in coda o, per un utente posto alla testa della coda, speso in attesa di individuare un varco temporale “accettabile” sul flusso circolante all’anello tale da consentirgli l’immissione nell’intersezione.

Per stimare tale ritardo ci si è avvalsi di una relazione derivante dalla “teoria delle code” [4.1] e che tiene conto sia della portata in ingresso al nodo che del tempo medio di servizio; quest’ultimo risulta strettamente legato alla portata veicolare circolante in rotatoria pertinente al settore di anello antistante il nodo in esame. Tale approccio ha già visto alcune notevoli applicazioni nell’ambito dello studio di rotatorie di medio/piccolo diametro in ambito extraurbano [4.2].

$$R_C = T_{S(\text{medio})} + \frac{Q_i \cdot [T_{S(\text{medio})}^2 + V(T_S)]}{2 \cdot [1 - Q_i \cdot T_{S(\text{medio})}]} \quad [\text{Eq. 4.1}]$$

Dove:

- $T_S(\text{medio})$ = Tempo medio di servizio [s];
- $V(T_S)$ = Varianza del tempo di servizio [s];
- Q_i = Portata veicolare entrante sul ramo “i”.

Per poter utilizzare la precedente formulazione è necessario risalire alla legge di variazione del tempo di servizio, questa è stata calcolata a partire dai rilievi sperimentali effettuati.

La procedura utilizzata per ottenere la stima della “funzione” tempo di servizio ha visto, durante l’analisi dei filmati ad ogni nodo e ad intervalli di 60 sec (per un totale di 45 min), l’acquisizione dei seguenti dati:

- la portata circolante all’anello (trasformata in $\text{veic}_{\text{eq}}/\text{h}$);
- i tempi di servizio dei singoli veicoli che si immettevano in rotatoria.

Ciascun minuto di osservazione, quindi, è stato contraddistinto da una portata circolante [veic/h] e da un tempo medio di servizio [s] media di tutti i tempi di servizio

registrati relativi a veicoli in fase di immissione in rotatoria. In ultimo, per ottenere una legge rappresentativa per l'intera rotatoria, tutti i minuti che presentavano uguale portata circolante sono stati accorpati in un'unica classe di portata, caratterizzata da un tempo medio di servizio ottenuto come media dei tempi di tutti gli intervalli di osservazione appartenenti a tale classe (Tab. 4.6).

Qc (veic/h)	Ts (s) min	Ts (s) med	Ts (s) max	Ncamp	Var	Dev. St.
60	1,68	1,68	1,68	1	x	x
120	1,72	1,87	2,02	2	0,045	0,212
240	1,16	1,86	2,84	9	0,303	0,551
300	1,00	2,17	3,88	7	1,280	1,132
360	1,16	2,51	5,22	9	1,593	1,262
420	1,18	2,10	3,30	10	0,594	0,770
480	1,44	2,47	4,17	10	0,921	0,960
540	1,63	3,53	5,73	10	2,289	1,513
600	1,47	3,69	6,62	10	3,626	1,904
660	1,54	2,91	7,05	11	2,341	1,530
720	1,36	3,35	10,24	8	8,179	2,860
780	4,30	4,73	5,15	2	0,360	0,600
840	1,88	4,43	5,65	8	1,662	1,289
900	3,68	4,59	6,20	3	1,966	1,402
960	1,88	3,05	4,50	5	1,403	1,185
1020	3,56	5,14	7,23	5	2,030	1,425
1080	5,89	6,04	6,20	2	0,049	0,222
1140	5,32	6,60	7,89	2	3,315	1,821
1260	3,20	4,13	5,08	3	0,884	0,940
1320	2,08	2,08	2,08	1	x	x
1380	6,68	8,83	11,48	3	5,953	2,440
1440	3,52	5,87	11,68	4	15,229	3,902
1500	5,80	5,80	5,80	1	x	x
1560	4,60	4,60	4,60	1	x	x
1620	5,72	5,72	5,72	1	x	x

Tabella 4.6: Distribuzione dei tempi di servizio in funzione del traffico circolante

I valori così ottenuti ed i relativi intervalli di oscillazione registrati sono riportati in Tabella 4.6 e successivamente diagrammati in Figura 4.10.

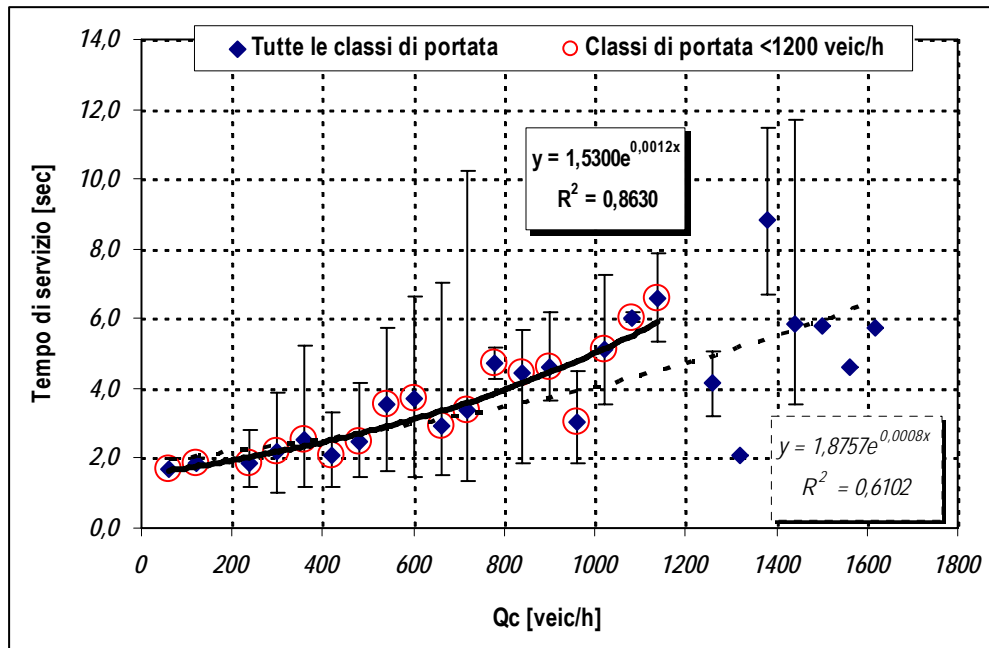


Figura 4.10: Distribuzione dei tempi di servizio in funzione del traffico circolante [4.24]

È conveniente precisare che i dati relativi alle portate superiori a 1200 veic/h, come provato dai filmati, risultano generalmente caratteristici della “instabilità” delle attese e rappresentano di fatto fenomeni di “forzatura” della manovra di immissione; questo spiegherebbe tempi di servizio più bassi al crescere della portata.

La relazione presente in Figura 4.10 relativa a flussi circolanti minori di 1200 veic/h, è di seguito indicata (Q_c = traffico circolante) [4.24]:

$$T_s = 1,5300 \cdot e^{0,0012 \cdot Q_c} \quad [\text{Eq. 4.2}]$$

Se si combina tale relazione con la formulazione generale del ritardo riportata in precedenza, potendo considerare nulla la varianza della funzione $T_s(Q_c)$, ossia considerando arrivi al braccio poissoniani e tempi di servizio deterministici [4.1], si ottiene la seguente legge teorico-sperimentale:

$$R_c = 1,5300 \cdot e^{0,0012 \cdot Q_c} + \frac{\frac{Q_i}{3600} \cdot 2,3409 \cdot e^{0,0024 \cdot Q_c}}{2 \cdot \left[1 - \frac{Q_i}{3600} \cdot 1,5300 \cdot e^{0,0012 \cdot Q_c} \right]} \quad [\text{Eq. 4.3}]$$

L'applicazione di questa formula alle portate di traffico relative alla Tabella 4.3 (Matrice O/D intervallo T_8) consente di ricavare i ritardi complessivi ai singoli nodi.

In particolare, i grafici delle Figure 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, mettono a confronto il ritardo così stimato con i relativi ritardi calcolati utilizzando i seguenti metodi analitici:

- SETRA;
- HCM 2000 (*Lower Bound* e *Upper Bound*);
- *Guide Suisse* (CH1);
- HBS 2001.

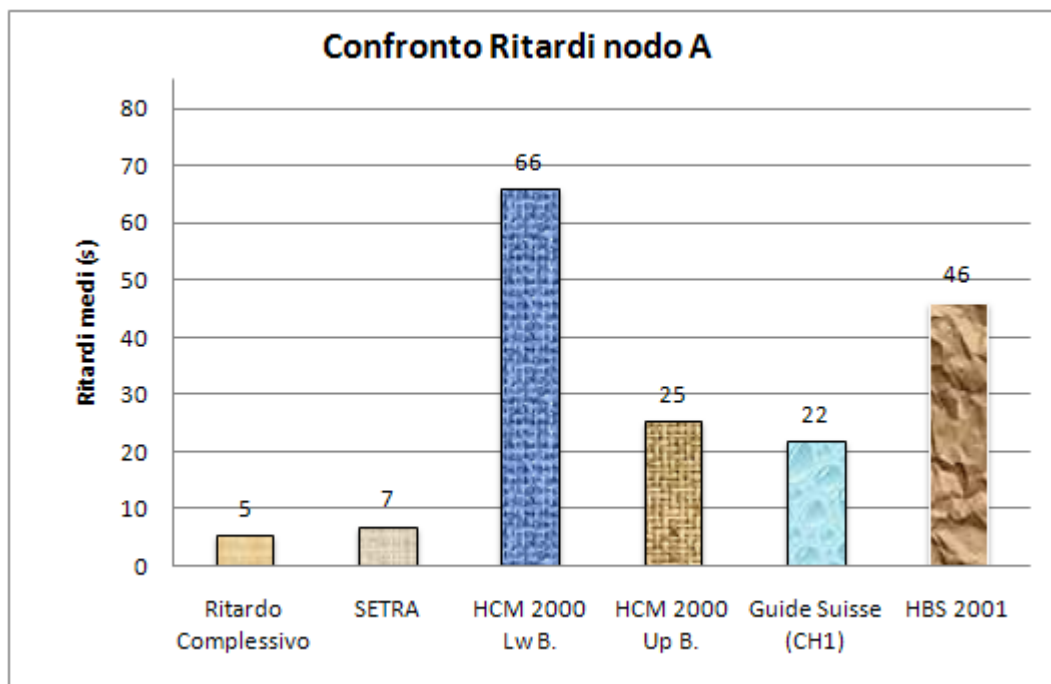


Figura 4.11: Confronto dei Ritardi del nodo A per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

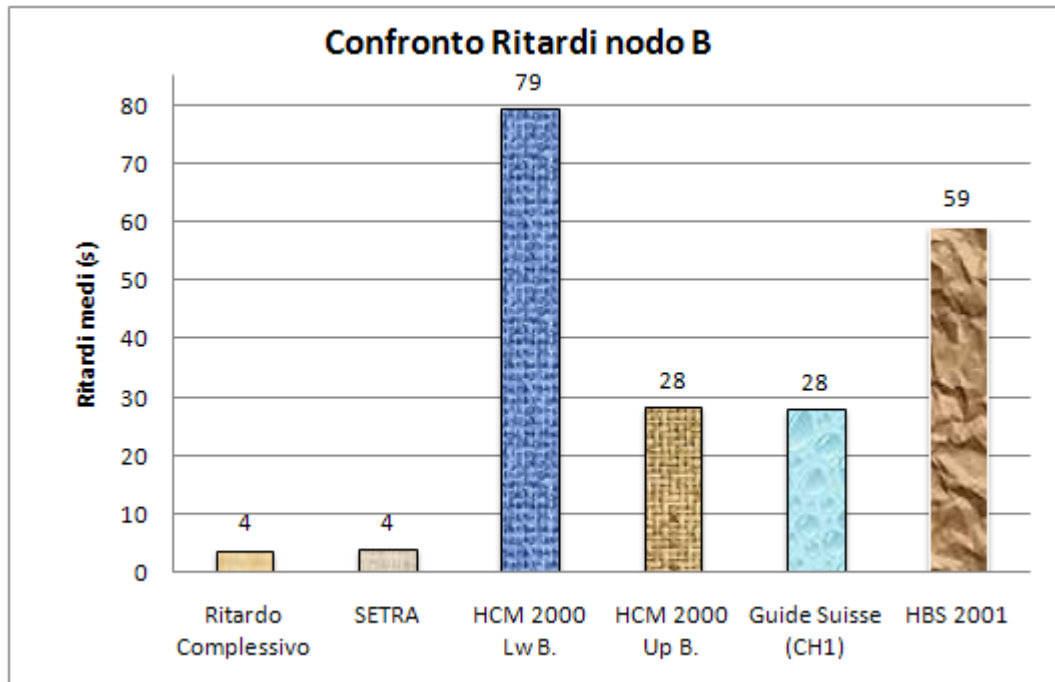


Figura 4.12: Confronto dei Ritardi del nodo B per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

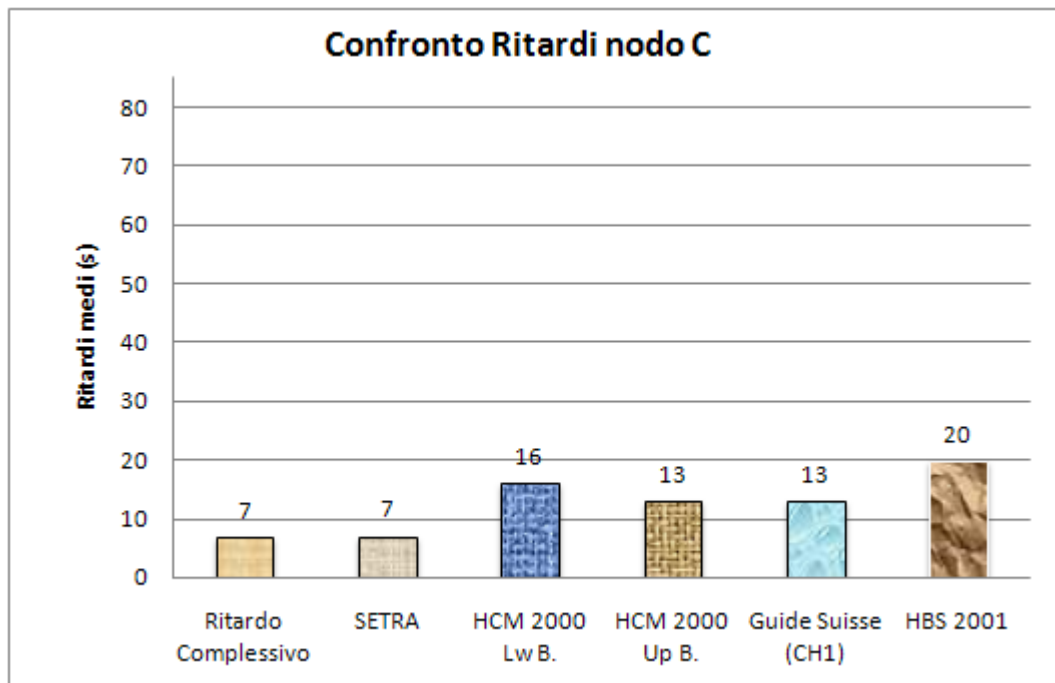


Figura 4.13: Confronto dei Ritardi del nodo C per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

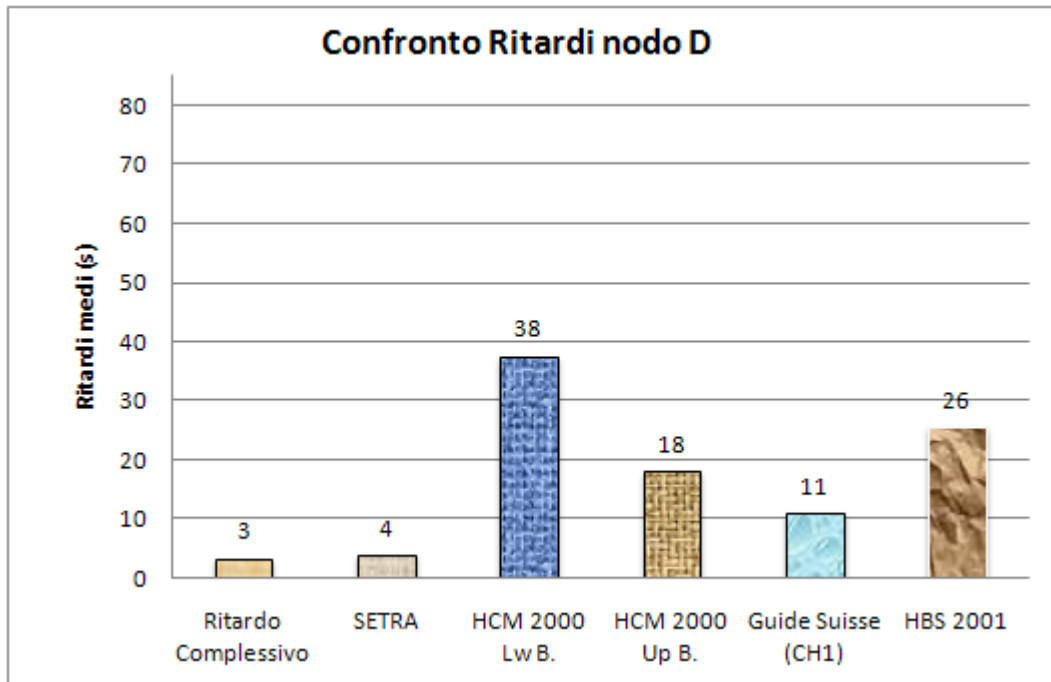


Figura 4.14: Confronto dei Ritardi del nodo D per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

Dalla comparazione degli istogrammi riportati nelle Figure 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, si possono trarre le seguenti considerazioni:

- Per tutti e quattro i nodi, considerando anche quello più anomalo (nodo C) il metodo del SETRA [4.7] è l'unico che restituisce i valori più prossimi, se non addirittura coincidenti, ai ritardi complessivi ottenuti con la formula che si basa sul ritardo medio di fermata.
- Dopo il SETRA gli altri due metodi che danno dei risultati accettabili sono il *Guide Suisse* (CH1) [4.8] e l'HCM 2000 [4.13] con l'utilizzo dei parametri psicotecnici al loro limite superiore (*Upper Bound*) previsto dal manuale americano. Ciò significa che, per quanto riguarda l'HCM, per questa tipologia di rotatoria e per il modo di guida dei conducenti calabresi, questi valori dell'intervallo critico (T_c) e del tempo di scalamento in coda (T_f) sono quelli che meglio rappresentano l'effettivo comportamento degli utenti.
- L'HCM 2000 (*Lower Bound*) [4.13] e l'HBS 2001 [4.22] danno dei

valori di ritardo nettamente superiori a quelli ottenuti sperimentalmente. Probabilmente tali risultati sono legati all'utilizzo di parametri psicotecnici che non si adeguano bene al reale comportamento dei conducenti ed alla particolare geometria dell'intersezione.

4.2.4. Analisi della lunghezza delle code

Le condizioni di deflusso in una rotatoria (ma anche nelle altre tipologie di intersezioni stradali) possono dar luogo, soprattutto nelle ore di punta, a formazione di code sugli ingressi. E' chiaro che lo smaltimento di queste code è direttamente correlato ai perditempo accumulati dai veicoli sui bracci dell'intersezione.

L'analisi della lunghezza delle code è importante principalmente per due motivi:

- la scelta delle caratteristiche geometriche dei rami d'ingresso (numero di corsie e loro larghezza, lunghezza della svasatura, etc.);
- il confronto tra le caratteristiche prestazionali della rotatoria con quelle offerte dalle intersezioni classiche.

Quindi per la stima della lunghezza delle code si può fare riferimento alla seguente formula [4.1] [4.2]:

$$L_{coda} = \frac{L_m \cdot d \cdot Q_i}{3600} \quad [\text{Eq. 4.4}]$$

dove:

- L_m = lunghezza media di veicoli in coda (si può porre uguale a 6 metri);
- Q_i = flusso in entrata [veic/h];
- d = ritardo medio di fermata [sec/veic].

L'applicazione delle formulazioni internazionali analizzate nel Capitolo 3, relative alla Tabella 4.3 (Matrice O/D intervallo T_8) consente di ricavare il 95° percentile della lunghezza delle code sui singoli nodi.

Negli istogrammi delle Figure 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, verranno messe a confronto le code così stimate con quelle calcolate utilizzando le seguenti formulazioni analitiche:

- SETRA;

- HCM 2000 (*Lower Bound* e *Upper Bound*);
- HBS 2001;
- *Guide Suisse* (Bovy);
- TRRL;
- AUSTRROADS.

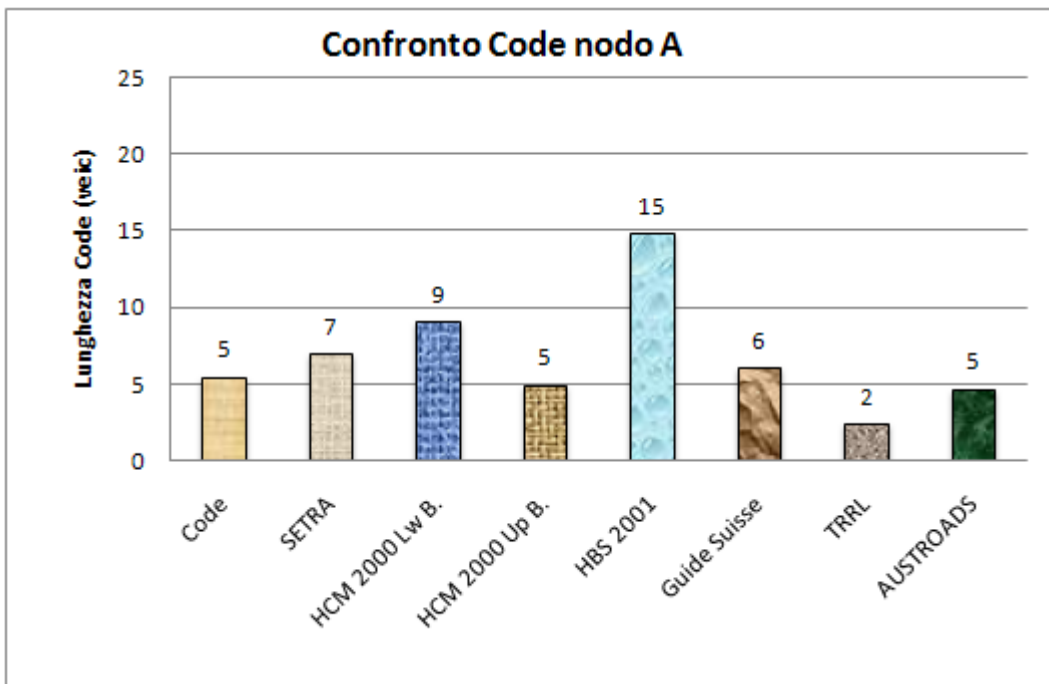


Figura 4.15: Confronto delle Code sul nodo A per la rotonda di CS Nord durante l'intervallo T_8

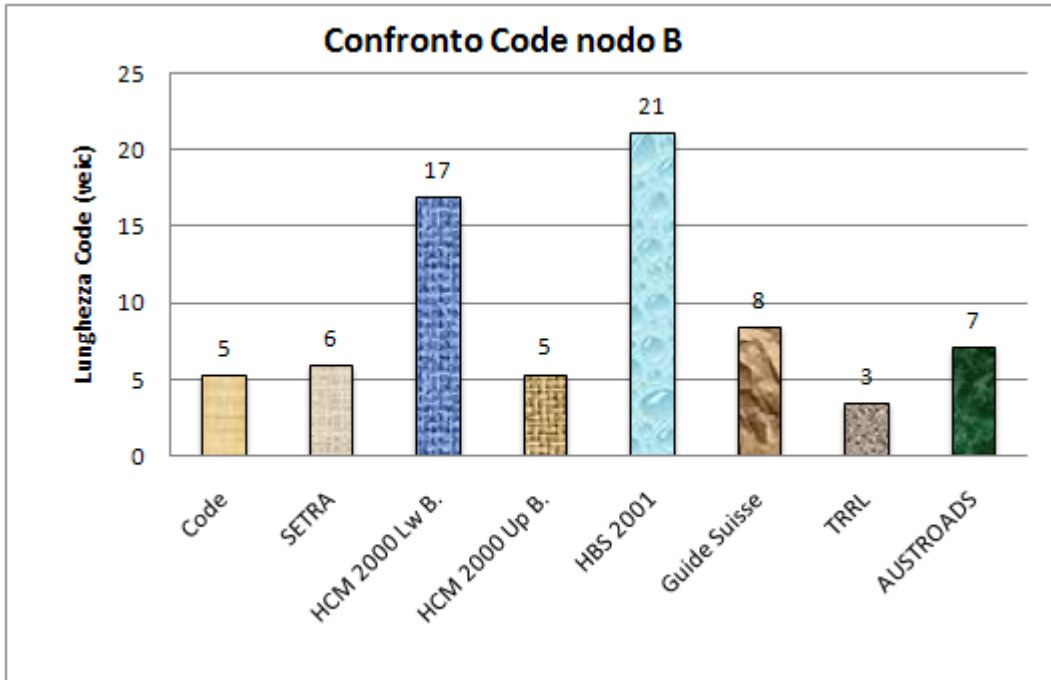


Figura 4.16: Confronto delle Code sul nodo B per la rotonda di CS Nord durante l'intervallo T_8

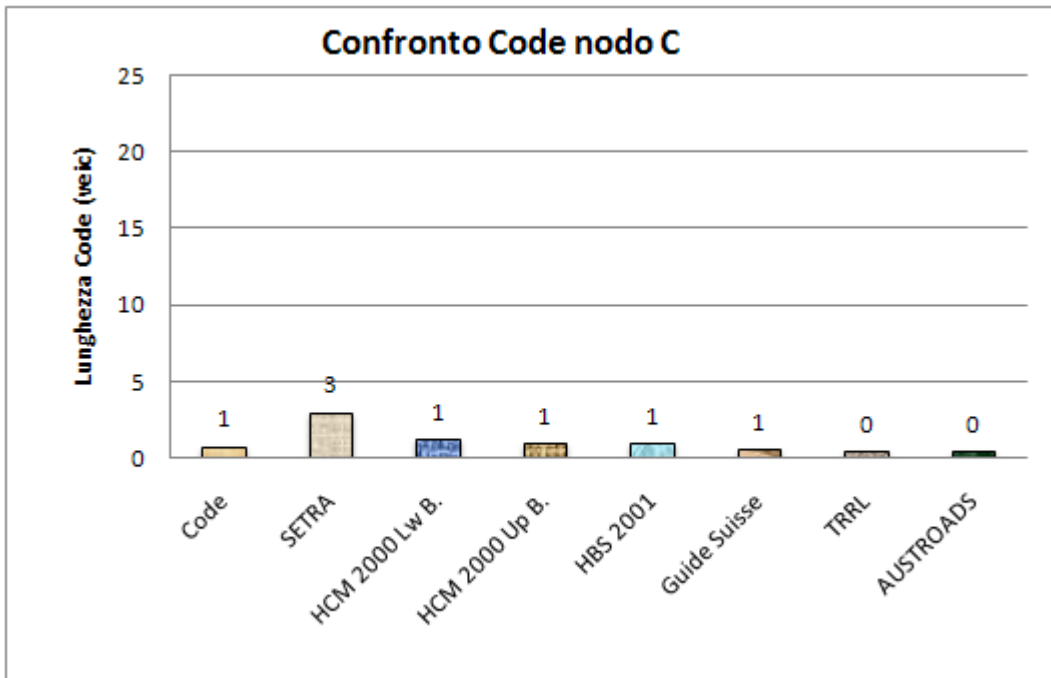


Figura 4.17: Confronto delle Code sul nodo C per la rotonda di CS Nord durante l'intervallo T_8

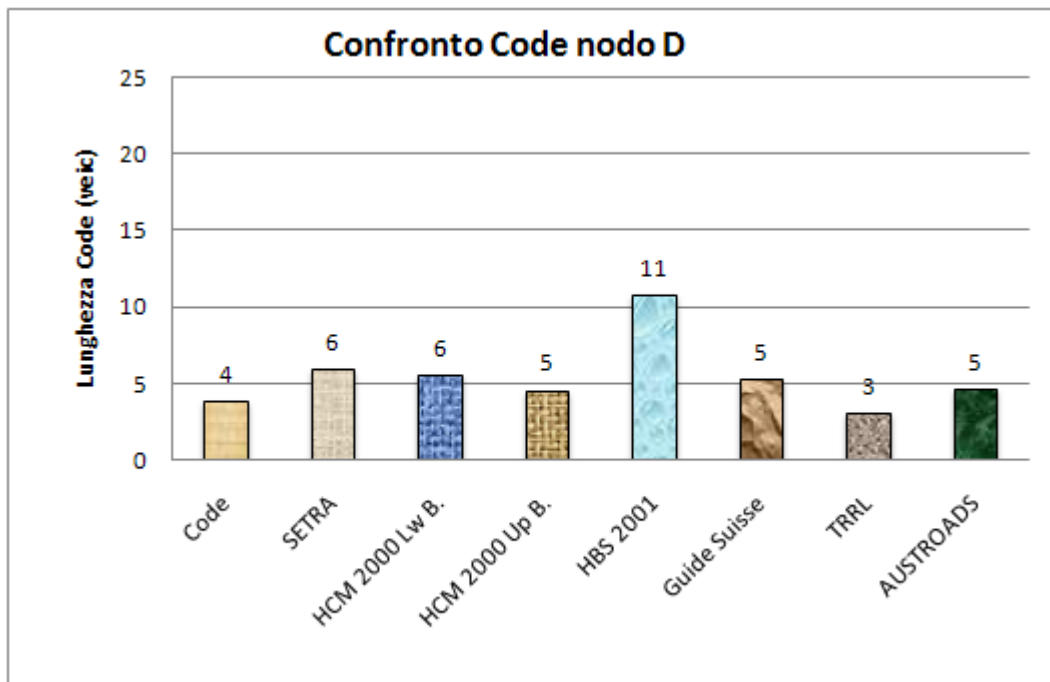


Figura 4.18: Confronto delle Code sul nodo D per la rotonda di CS Nord durante l'intervallo T_8

Come si può notare dagli istogrammi delle Figure 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 i valori di lunghezza delle code valutati con i vari metodi sono molto prossimi fra di loro (tranne che per l'HCM 2000 *Upper Bound* [4.13] e per l'HBS 2001 [4.22]) ed abbastanza vicini a quelle calcolate con la formula del ritardo complessivo.

	Min	Max	Med	
Scostamento percentuale	14%	54%	32%	SETRA
	43%	222%	110%	HCM 2000 Lw B.
	2%	18%	10%	HCM 2000 Up B.
	170%	303%	216%	HBS 2001
	12%	60%	36%	Guide Suisse
	22%	56%	37%	TRRL
	14%	36%	24%	AUSTROADS

Tabella 4.7: Scostamento percentuale delle Code dai dati sperimentali

La Tabella 4.7 riporta i valori di scostamento percentuale delle code calcolate con i vari metodi su esposti rispetto a quelle ottenute “sperimentalmente”, non tenendo in considerazione i dati del nodo “anomalo” C. Anche in questo caso, possono essere fatte alcune semplici considerazioni di natura statistica:

- Il metodo che questa volta restituisce i risultati migliori è l'HCM 2000 (*Upper Bound*) [4.13] con uno scostamento medio del 10%. Quindi così come per i ritardi, anche per le code questa formulazione, con i parametri psicotecnici al loro limite superiore, dà dei risultati assai prossimi a quelli ottenuti con la formula derivante dal ritardo medio di fermata calcolato sperimentalmente.
- Dopo l'HCM 2000 (*Upper Bound*) [4.13] è la metodologia australiana dell'AUSTROADS [4.11] a riportare lo scostamento percentuale più basso (24%). Anche questa formulazione prevede al suo interno l'utilizzo di parametri psicotecnici, come l'intervallo critico ed il tempo di scalamento in coda, nonché il distanziamento temporale medio tra i veicoli che circolano sull'anello, chiaramente tarati sulla base di esperienze condotte da molti anni in Australia, dove ormai i conducenti, a differenza di quelli italiani, sono abituati alla presenza di rotatorie.
- Il SETRA [4.7], il *Guide Suisse* (Bovy) [4.8] ed il TRRL [4.16] presentano degli scostamenti percentuali medi compresi tra il 32% ed il 37%. Anche se il metodo francese non dà i risultati migliori, rimane comunque uno dei più affidabili visto gli scarti minimi rispetto alle lunghezze di coda misurate sperimentalmente. E' da notare anche che i risultati del TRRL sono nettamente migliori rispetto ai dati di capacità precedentemente esposti.
- L'HCM 2000 (*Lower Bound*) [4.13] e soprattutto l'HBS 2001 [4.22], così come accadeva per i ritardi, danno dei valori di lunghezza delle code notevolmente differenti da quelli ottenuti con la formula derivante dalla teoria delle code (scartamenti medi compresi tra il 100% ed il 200%).

4.3. Il caso di studio: la rotatoria di Mottola

In questo paragrafo, così come è stato già fatto in quello precedente, verranno applicate alcune delle metodologie internazionali per il calcolo della capacità ad una

intersezione a rotatoria, con schema polar-simmetrico, ubicata nel Comune di Mottola, in provincia di Taranto.

In Tabella 4.8 sono indicate le principali caratteristiche geometriche che sono state misurate durante un sopralluogo in sito, mentre in Figura 4.19 è riportata la planimetria della rotatoria con l'indicazione della lettera identificativa di ogni nodo

Raggio isola centrale (m)	Diametro esterno (m)	Larghezza Anello (m)	Corsie anello	Larghezza isole divisionali (m)				Larghezza corsie ingressi (m)			
				A	B	C	D	A	B	C	D
7.50	28.80	7.20	1	4.87	4.92	4.95	2.82	5.60	6.05	4.00	6.05

Tabella 4.8: Principali caratteristiche geometriche della rotatoria di Mottola [4.23]

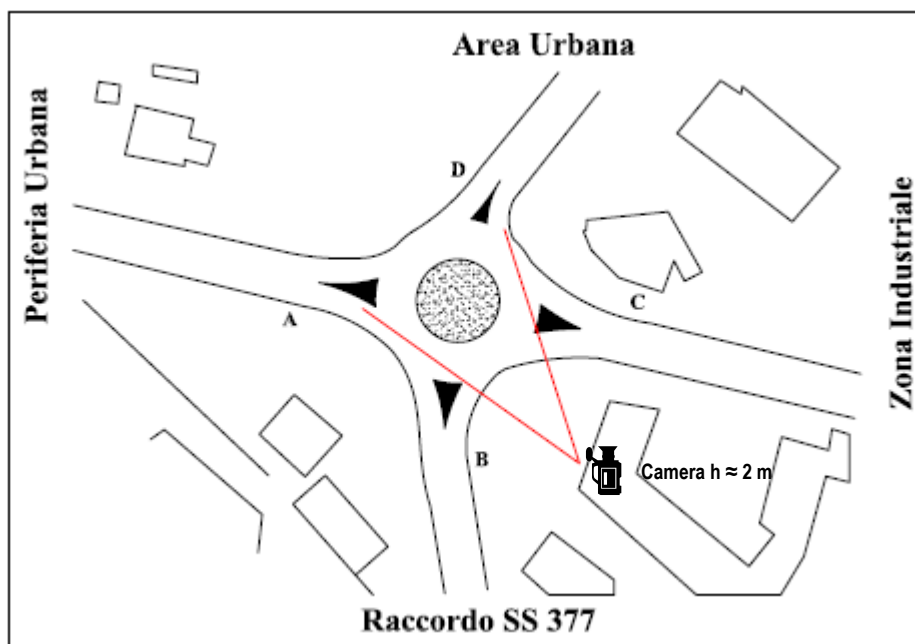


Figura 4.19: Planimetria della rotatoria sita nel Comune di Mottola (TA) [4.23]

Viste le sue dimensioni questa rotatoria può essere classificata come una Compatta Urbana a corsia singola (Fig. 4.20), quindi assai diversa come tipologia rispetto a quella di Cosenza Nord esposta nel precedente paragrafo. La sua scelta però è stata dettata dal fatto, intanto, di trovarsi ubicata in un'altra regione, la Puglia, che potrebbe presentare degli aspetti, specialmente nel comportamento degli utenti, abbastanza diversi da quelli rilevati in Calabria. Inoltre questa rotonda, a differenza di

quella di Cosenza, presenta i suoi bracci disposti in maniera quasi ortogonale e quindi senza rami tangenti all'anello. A ciò va aggiunto che anch'essa possiede un ingresso, quello caratterizzato dalla lettera C, la cui portata entrante è abbastanza scarsa a confronto con quella degli altri nodi.

I metodi esposti nel Capitolo 3 ed i rilievi sperimentali, opportunamente elaborati, hanno permesso anche in questo caso di ricavare i seguenti parametri:

- le capacità, i tempi medi d'attesa e le lunghezze delle code agli ingressi;
- i tempi di servizio complessivi e sui singoli nodi.



Figura 4.20: Immagine della rotatoria sita nel Comune di Mottola (TA)

4.3.1. La metodologia di rilievo

Per ottenere i dati di traffico utili all'applicazione delle metodologie di stima delle prestazioni della rotatoria di studio, si è progettato ed effettuato un rilievo dei

flussi veicolari attraverso l'uso di una videocamera digitale e di un software apposito per l'analisi delle immagini in movimento.

Il rilievo dei flussi veicolari è stato effettuato in un giorno infrasettimanale in un'ora compresa tra le 12:30 e le 13:30. Tale periodo temporale è stato scelto in quanto, da una analisi visiva, si è constatato che la rotatoria assorbe il maggior numero di veicoli raggiungendo il limite massimo di capacità (presenza contemporanea di almeno quattro veicoli in coda su tutti i rami).

Il rilievo è stato eseguito in condizioni ideali di cielo sereno e pavimentazione asciutta.

La telecamera è stata posta su un tre piedi a circa 2 metri d'altezza tra i nodi "B" e "C", così come si può notare nelle Figure 4.19 e 4.20, in modo tale da poter filmare tutte le entrate e le uscite senza particolari difficoltà. La durata del filmato supera di poco i 60 minuti.

In laboratorio poi (con l'aiuto del programma ADOBE PREMIERE 6.5) si è proceduto all'acquisizione ed all'elaborazione dei dati di traffico.

La procedura di acquisizione dei dati ha comportato l'analisi minuto per minuto dei flussi veicolari distinguendo:

- n° di veicoli per minuto di osservazione;
- spettro tipologico dei veicoli osservati per minuto di osservazione;
- per ogni veicolo braccio di origine di immissione in rotatoria e braccio di destinazione (uscita dalla rotatoria).

Tale lavoro preliminare ha consentito di costruire le matrici Origine/Destinazione (O/D) relative ad intervalli temporali di 5 minuti ciascuno.

In tal modo è stato scorporato l'intero rilievo, della durata di un'ora, in 12 intervalli caratterizzati ognuno da una Matrice O/D. I flussi misurati sui 5 minuti sono stati uniformati in veicoli equivalenti, attraverso i coefficienti di omogeneizzazione presenti nell'HCM 2000 [4.13], e proiettati nell'arco temporale dell'ora in modo da essere espressi in $\text{veic}_{\text{eq}}/\text{h}$.

Il precedente procedimento è interamente riassunto nel Diagramma di Flusso riportato in Figura 4.21.

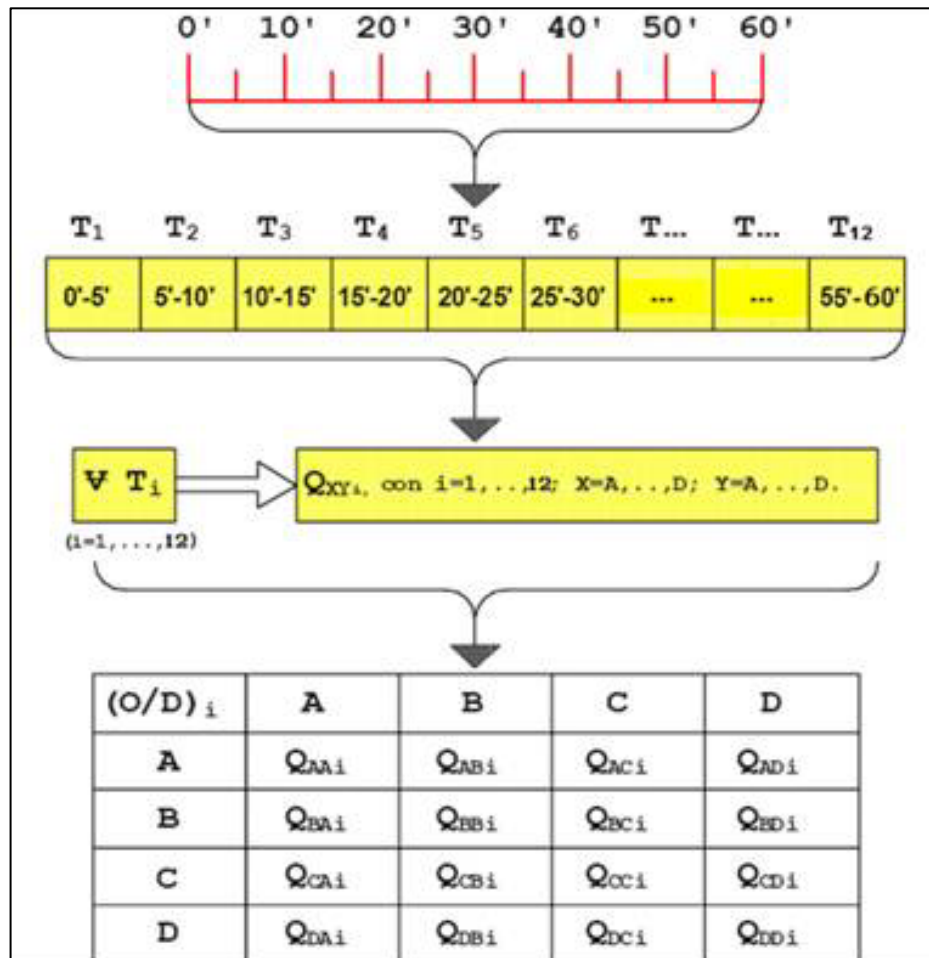


Figura 4.21: Metodologia di elaborazione delle informazioni rilevate - Diagramma di flusso

I dati di traffico relativi ai 12 intervalli temporali sono stati qui di seguito riassunti in un'unica tabella (Tab. 4.9) in cui sono stati riportati i valori minimi, medi e massimi del flusso per ogni itinerario.

Min÷Med÷Max (veic/h)	A	B	C	D	Qe (media)
A	0÷1÷12	12÷104÷252	0÷26÷72	48÷178÷384	309
B	36÷72÷174	0÷16÷60	0÷30÷60	300÷430÷660	548
C	0÷37÷120	0÷24÷48	0	0÷33÷132	94
D	24÷209÷354	288÷560÷864	0÷39÷84	0÷5÷24	813
Qu (media)	319	704	95	646	

Tabella 4.9: Matrice O/D con i valori dei flussi veicolari min-med-max per ciascun itinerario

4.3.2. Analisi dei dati di capacità ottenuti

Il calcolo della capacità e degli altri parametri prestazionali è stato eseguito per ogni matrice O/D, come esposto nel Capitolo 3, ma si è ritenuto opportuno, poiché forniva maggiori dati rilevanti all'indagine di studio effettuata, esporre i risultati derivanti dal rilievo dell'intervallo T_3 , ossia nell'arco temporale compreso tra i 10' ed i 15', in quanto è stato uno degli intervalli in cui si è riscontrata la presenza contemporanea di code su tutti e 4 rami d'ingresso.

Vediamo riportata nella Tabella 4.10 la matrice O/D relativo all'intervallo T_3 .

	A	B	C	D	Qe (veic/h)
A	0	72	24	342	438
B	132	12	36	522	702
C	120	48	0	132	300
D	330	528	48	6	912
Qu (veic/h)	582	660	108	1002	

Tabella 4.10: Matrice O/D relativa all'intervallo T_3 tra i 10' ed i 15' di rilievo

L'applicazione delle metodologie di stima della capacità della rotatoria ha portato alla redazione della Tabella 4.11, dove vengono posti in evidenza, per ciascun nodo della rotatoria, i dati di capacità relativi all'intervallo T_3 ricavati sperimentalmente unitamente a quelli ottenuti con le seguenti metodologie internazionali di calcolo:

- SETRA;
- HCM 2000 (*Upper Bound* e *Lower Bound*);
- HBS 2001;
- Brilon Lineare;
- Brilon Esponenziale;
- *Semi-Two-Lane Roundabout*;
- *Guide Suisse* (Bovy e CH1);
- TRRL;
- CETUR;
- AUSTROADS.

	NODI				
	A	B	C	D	
	438	702	300	912	Qe
Capacità (veic/h)	668	657	283	900	SETRA
	676	813	484	898	HCM 2000 Lw B.
	845	1000	625	1094	HCM 2000 Up B.
	719	848	446	983	HBS 2001
	756	912	481	996	Brilon Lineare
	626	785	419	888	Brilon Esponenziale
	849	1014	619	1117	Semi-Two-Lane
	587	699	626	547	Bovy
	832	990	553	1075	Guide Suisse (CH1)
	994	969	792	1218	TRRL
	832	990	553	1075	CETUR
	765	905	551	991	AUSTROADS

Tabella 4.11: Calcolo della Capacità per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

Nelle figure 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 i dati relativi alle capacità, sopra enumerati, sono rappresentati sottoforma di istogrammi e distinti per singolo nodo dai quali è possibile scorgere una chiave di lettura immediata dei risultati ottenuti.

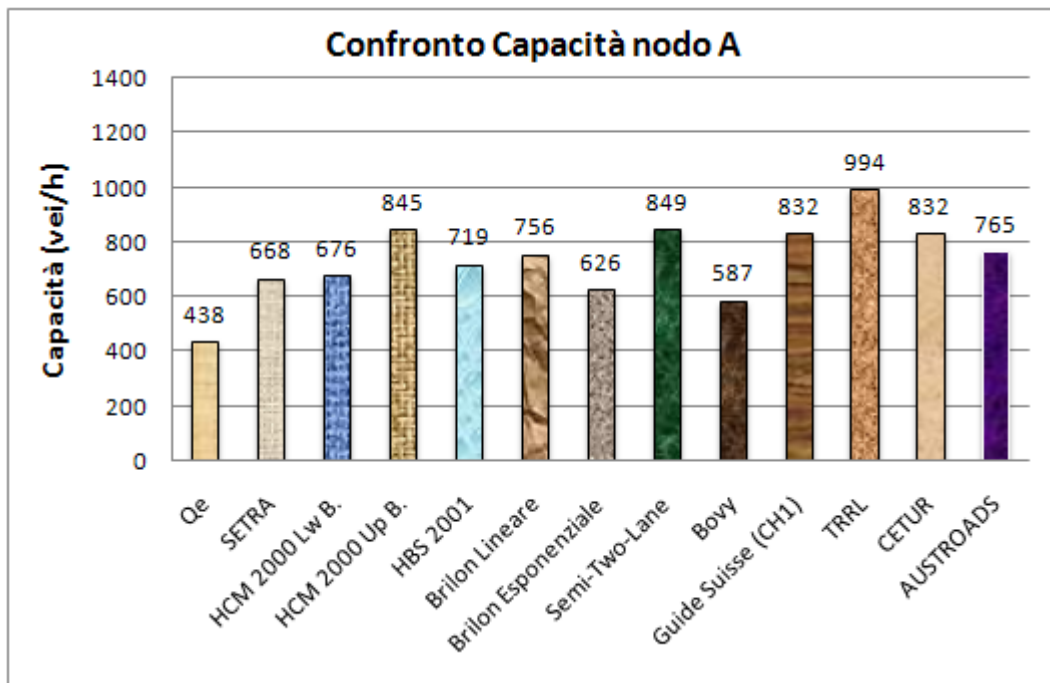


Figura 4.22: Calcolo della Capacità del nodo A per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

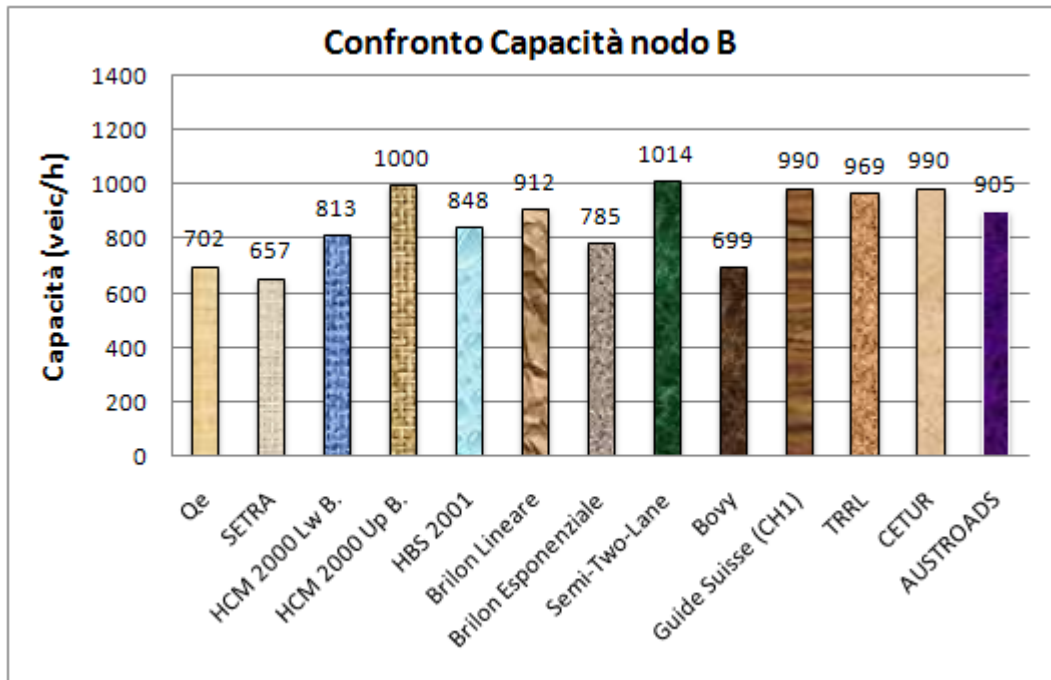


Figura 4.23: Calcolo della Capacità del nodo B per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

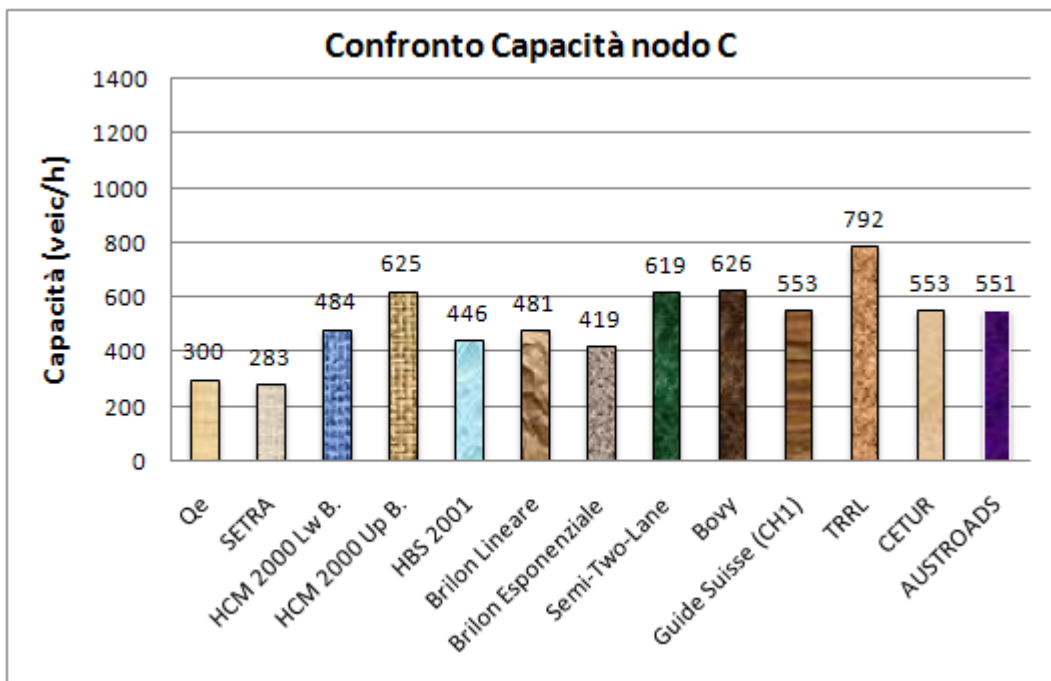


Figura 4.24: Calcolo della Capacità del nodo C per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

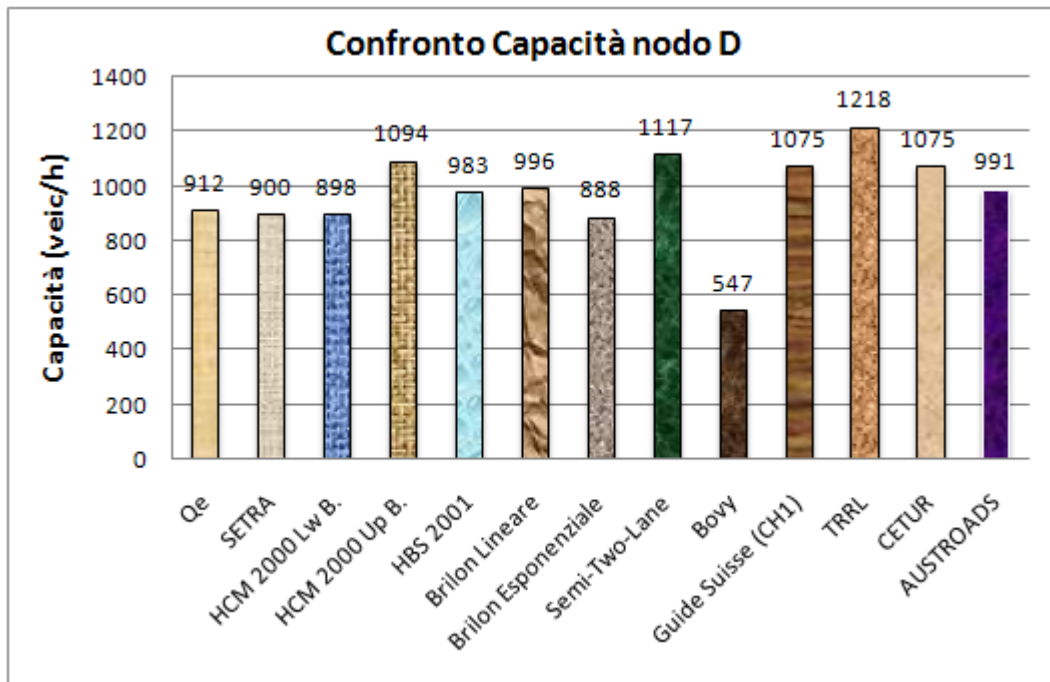


Figura 4.25: Calcolo della Capacità del nodo D per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

	Min	Max	Med	
Scostamento percentuale	1%	53%	16%	SETRA
	2%	54%	24%	HCM 2000 Lw B.
	20%	93%	52%	HCM 2000 Up B.
	8%	64%	31%	HBS 2001
	9%	73%	37%	Brilon Lineare
	3%	43%	19%	Brilon Esponenziale
	22%	94%	54%	Semi-Two-Lane
	0%	40%	25%	Bovy
	18%	90%	50%	Guide Suisse (CH1)
	34%	127%	66%	TRRL
	18%	90%	50%	CETUR
	9%	75%	37%	AUSTRoads

Tabella 4.12: Scostamento percentuale della Capacità dai dati sperimentali

Non considerando il nodo C, caratterizzato, anche per questo sito, da scarsi volumi di traffico e valutando i dati della Tabella 4.12, in cui sono riportati gli scostamenti percentuali minimi, massimi e medi tra i dati sperimentali e i dati calcolati, per i soli nodi A, B e D, è possibile asserire che:

- I metodi del SETRA [4.7], dell'HCM2000 (*Lower Bound*) [4.13], di

Brilon Esponenziale [4.14] e del *Guide Suisse* (Bovy) [4.8] presentano scostamenti medi dell'ordine del 20%. Così come avveniva per la rotatoria di Cosenza Nord, anche per questa di Mottola, che possiede caratteristiche nettamente differenti, i primi tre modelli appena indicati si dimostrano i migliori nel valutare la capacità della rotatoria in funzione della reale portata in ingresso misurata. L'unica differenza che si nota è quella della presenza, in questa categoria, della formulazione svizzera di Bovy che invece per l'altro sito dava dei valori più elevati. Ciò è motivabile dal fatto che la formulazione di Bovy è stata ricavata dall'analisi di rotatorie compatte con diametri esterni compresi tra 25 e 35 m (categoria in cui ricade questa rotatoria e non quella di Cosenza Nord, la quale possiede un diametro esterno variabile tra 65 e 80 m).

- Risultati leggermente peggiori si hanno invece con l'HBS 2001 [4.22], Brilon Lineare [4.14] e con l'AUSTROADS [4.11] (scostamenti superiori al 30%). Però, mentre le due formulazioni tedesche davano già ottimi risultati per la rotatoria di Cosenza Nord (scostamenti inferiori al 10%), l'AUSTROADS invece presenta un netto miglioramento passando dal 51% al 37% di scostamento medio.
- Le rimanenti formulazioni dell'HCM 2000 (*Upper Bound*) [4.13], delle *Semi-two-lane roundabout* [4.6], del CETUR [4.18] e soprattutto TRRL [4.16] (anche in questo caso, così come avveniva per Cosenza Nord, è la metodologia che dà i risultati peggiori) danno degli scostamenti superiori al 50 %.

Si possono quindi riassumere i dati sopra segnati in ordine gerarchico di "affidabilità" del metodo rispetto alla portata entrante misurata:

- 1 Brilon Esponenziale: scostamento medio $\approx 19\%$;
- 2 SETRA: scostamento medio $\approx 20\%$;
- 3 HCM 2000 (*Upper Bound*): scostamento medio $\approx 24\%$;
- 4 *Guide Suisse* (Bovy): scostamento medio $\approx 25\%$;
- 5 HBS 2001: scostamento medio $\approx 31\%$;

- 6 Brilon Lineare: scostamento medio $\approx 37\%$;
- 7 AUSTROADS: scostamento medio $\approx 37\%$;
- 8 *Guide Suisse* (CH1): scostamento medio $\approx 50\%$;
- 9 CETUR: scostamento medio $\approx 50\%$;
- 10 HCM 2000 (*Lower Bound*): scostamento medio $\approx 52\%$;
- 11 *Semi-Two-Lane Roundabout*: scostamento medio $\approx 54\%$;
- 12 TRRL: scostamento medio $\approx 66\%$.

4.3.3. Studio dei tempi medi di servizio e dei ritardi

Come già detto in precedenza, oltre alla capacità, un altro parametro estremamente importante per una corretta analisi prestazionale di una rotatoria è il tempo medio d'attesa.

Tale ritardo è possibile stimarlo una volta nota la legge che regola la variazione dei tempi medi di servizio in funzione della portata circolante.

Anche per la rotatoria di Mottola, così come è stato fatto per quella di Cosenza Nord, è stato possibile, attraverso la stessa procedura esposta nel paragrafo precedente, estrapolare tale legge di variazione.

I valori dei tempi di servizio ottenuti sperimentalmente ed i relativi *range* di oscillazione registrati sono riportati in Tabella 4.13.

Qc (veic/h)	Ts (s) min	Ts (s) med	Ts (s) max	Ncamp	Var	Dev. St.
0	2,07	2,93	3,57	4	0,495	0,704
60	1,33	2,62	3,80	15	0,599	0,774
120	1,33	3,28	5,63	21	1,971	1,404
150	2,17	2,40	2,63	2	0,107	0,328
180	1,43	3,47	6,53	20	1,961	1,400
240	1,67	4,08	7,03	25	2,616	1,617
300	2,30	4,37	8,77	9	4,199	2,049
360	2,10	4,62	12,10	15	5,736	2,395
420	1,63	4,49	6,16	19	2,475	1,573
480	0,57	4,29	9,27	15	5,679	2,383
540	2,43	4,40	6,70	17	1,492	1,221
600	1,83	4,88	9,13	15	4,532	2,129
660	2,33	5,55	12,10	15	5,410	2,326
690	4,79	5,36	5,93	2	0,657	0,811
720	2,17	6,03	10,40	11	8,065	2,840
750	5,17	6,41	7,65	2	3,075	1,754
780	1,97	4,31	6,12	6	2,386	1,545
840	2,78	6,61	9,43	9	5,246	2,291
900	1,83	5,76	11,37	11	12,107	3,479
1020	3,99	5,36	6,73	2	3,766	1,941
1080	2,43	5,74	12,32	3	32,498	5,701
1140	4,40	7,57	11,55	3	13,267	3,642
1200	2,43	2,45	2,47	2	0,001	0,028

Tabella 4.13: Distribuzione dei tempi di servizio in funzione del traffico circolante [4.23]

Quindi, partendo da quanto descritto nel paragrafo precedente, è possibile determinare il Ritardo Complessivo di fermata attraverso la seguente formula derivata dalla teoria delle code [4.1] [4.2]:

$$Rc = Ts_{(medio)} + \frac{Qi \cdot [Ts_{(medio)}^2 + V(Ts)]}{2 \cdot [1 - Qi \cdot Ts_{(medio)}]} \quad [\text{Eq. 4.5}]$$

A questo punto è necessario ricavare dai dati riportati in Tabella 4.13, diagrammandoli, l'equazione di regressione che lega i tempi medi di servizio dei veicoli che si immettono da un nodo alla portata circolante di fronte al nodo stesso.

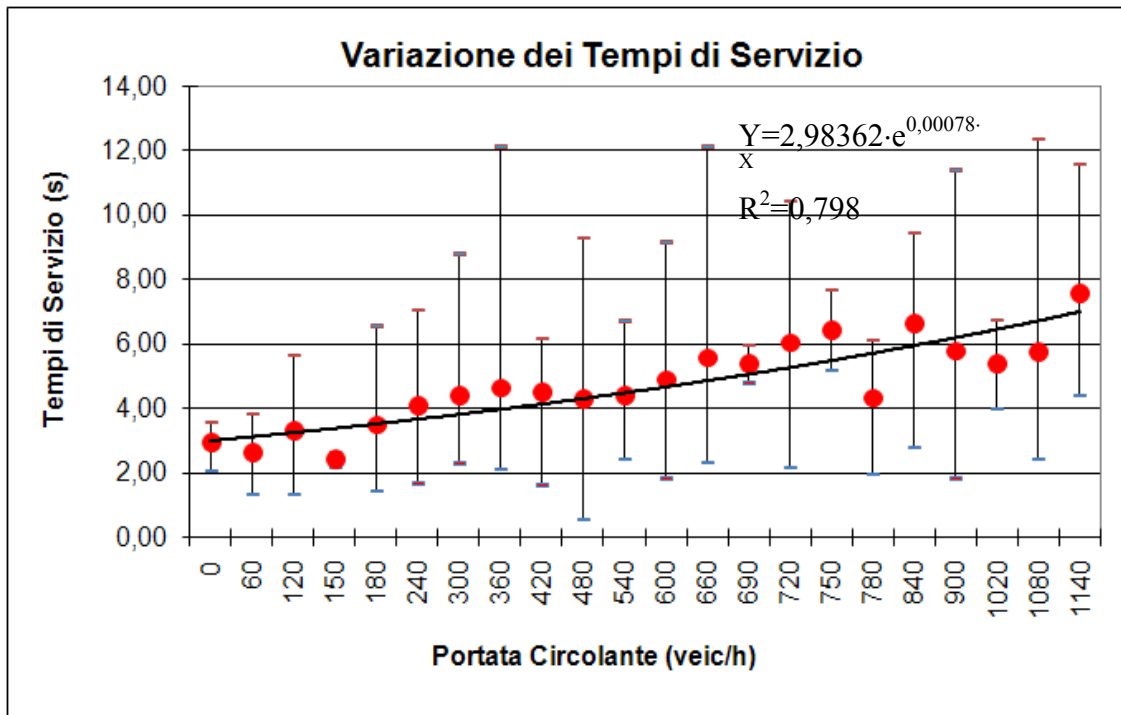


Figura 4.26: Distribuzione dei tempi di servizio in funzione del traffico circolante [4.23]

Dalla regressione dei riportati in Figura 4.26 attraverso una curva di tipo esponenziale è stata ricavata la seguente relazione che lega il Tempo di Servizio con la portata circolante e che presenta un buon indice di correlazione ($R^2 \approx 0,80$) [4.23].

$$T_s = 2,98362 \cdot e^{0,00078 \cdot Q_c} \quad [\text{Eq. 4.6}]$$

Facendo sempre riferimento alla formula generale del Ritardo Complessivo e sostituendo a T_s l'espressione appena ricavata, considerando sempre nulla la varianza, ossia considerando arrivi al braccio poissoniani e tempi di servizio deterministici [4.1], si ottiene la seguente espressione:

$$R_c = 3,03141 \cdot e^{0,00080 \cdot Q_c} + \frac{\frac{Q_i}{3600} \cdot 9,1894 \cdot e^{0,0016 Q_c}}{2 \cdot \left[1 - \frac{Q_i}{3600} \cdot 3,03141 \cdot e^{0,0007 Q_c} \right]} \quad [\text{Eq. 4.7}]$$

Dove:

- Q_i = flusso in ingresso sul ramo in esame [veic/h];

- Q_c = portata veicolare in circolo sul tratto di corona giratoria adiacente all'ingresso considerato [veic/h].

L'utilizzo di questa formulazione con le portate di traffico relative alla Tabella 4.10 (Matrice O/D intervallo T_3) consente di ricavare i ritardi sui singoli nodi.

Gli istogrammi delle Figure 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 mettono a confronto il ritardo stimato attraverso questa equazione con i relativi ritardi calcolati utilizzando i seguenti metodi:

- SETRA;
- HCM 2000 (*Lower Bound* e *Upper Bound*);
- *Guide Suisse* (CH1);
- HBS 2001.

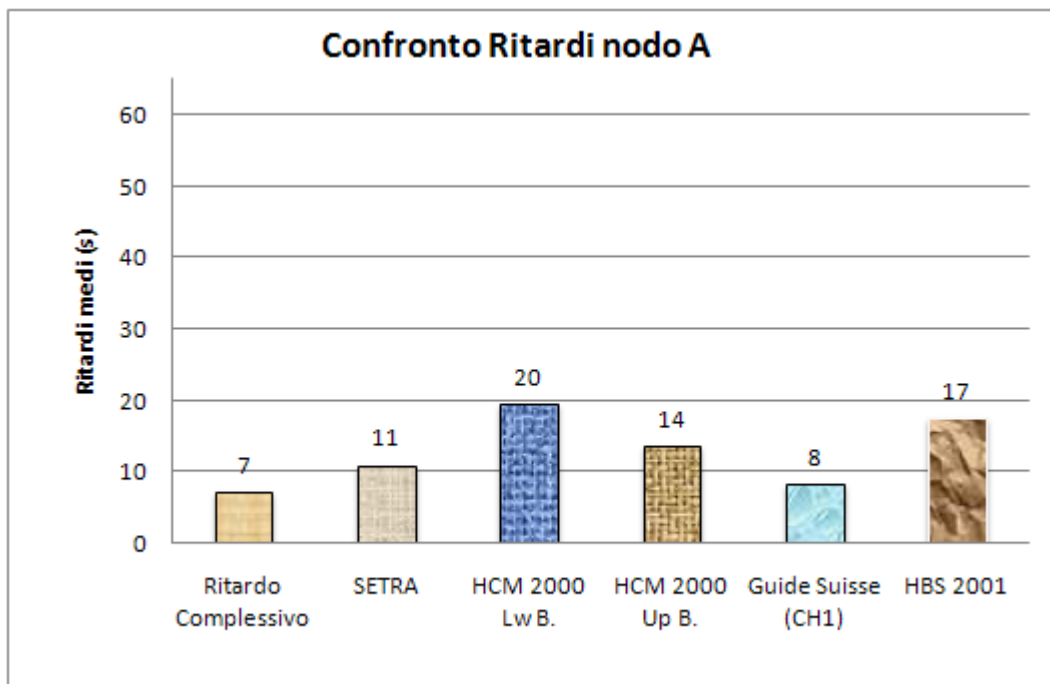


Figura 4.27: Confronto dei Ritardi del nodo A per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

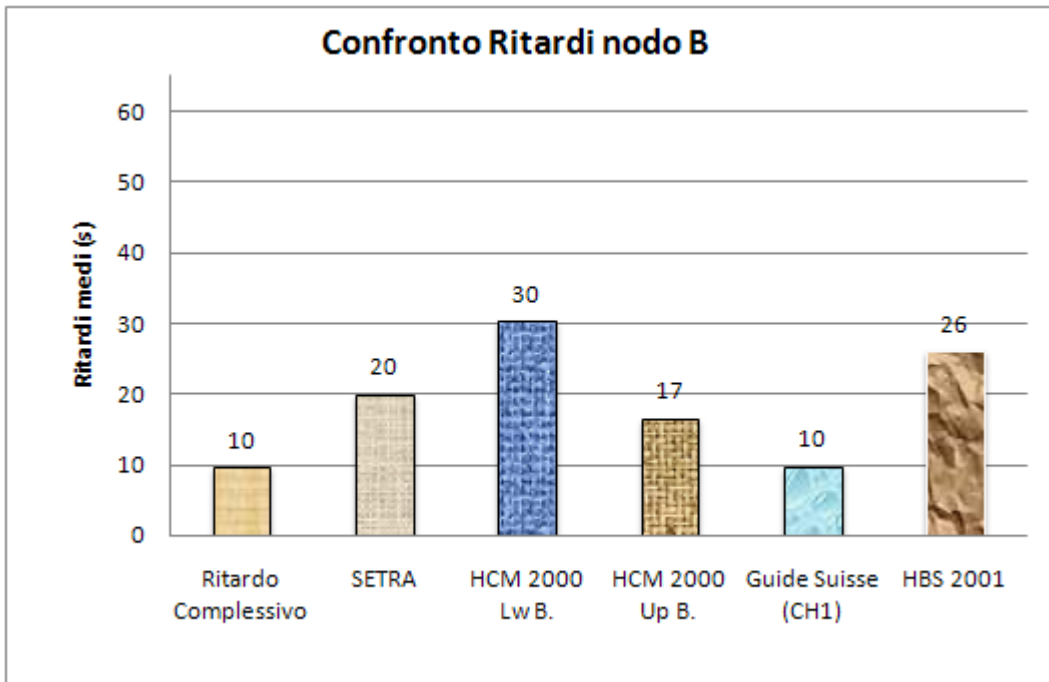


Figura 4.28: Confronto dei Ritardi del nodo B per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

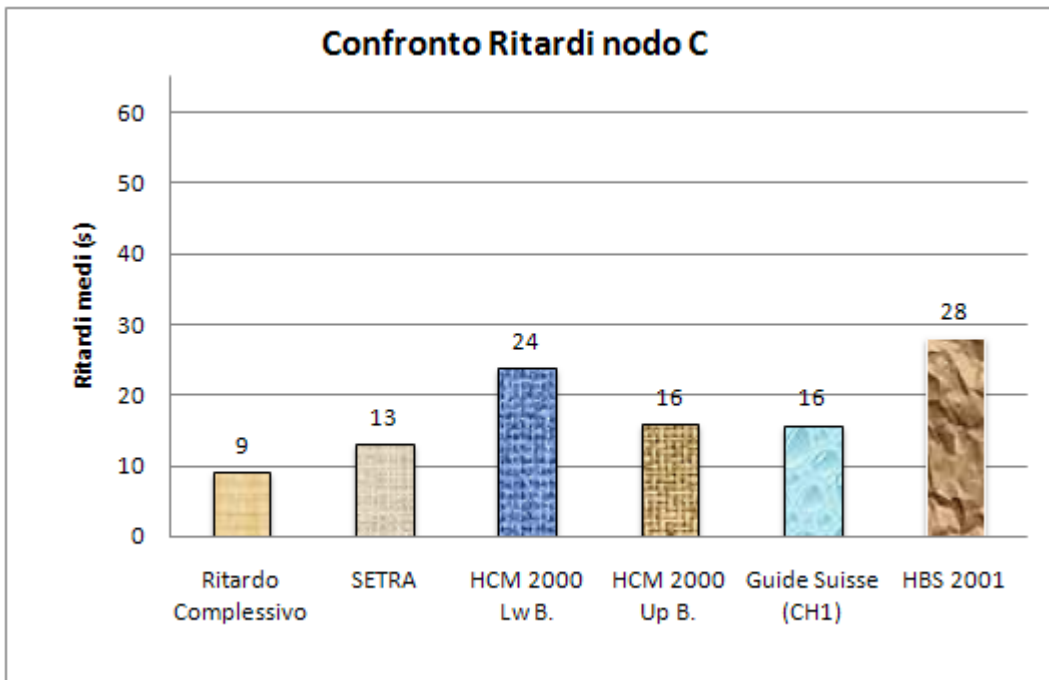


Figura 4.29: Confronto dei Ritardi del nodo C per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

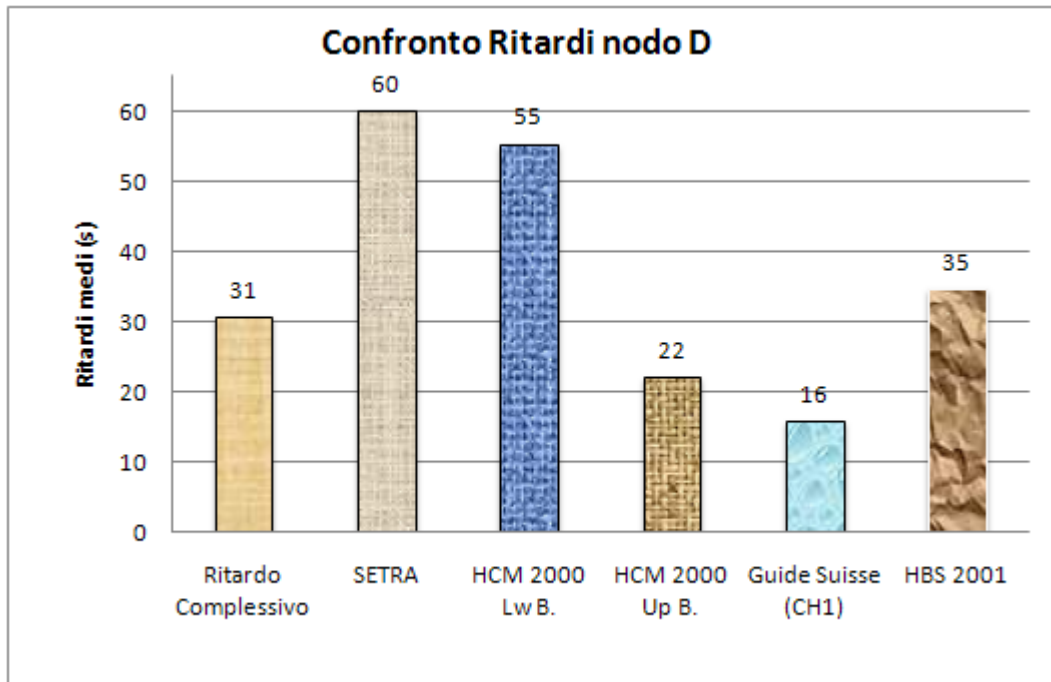


Figura 4.30: Confronto dei Ritardi del nodo D per la rotonda di Mottola durante l'intervallo T_3

Dall'analisi dei grafici esposti nelle Figure 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 va sottolineato come:

- La metodologia svizzera del *Guide Suisse* (CH1) [4.8] è quella che, in assoluto, dà i risultati più prossimi a quelli misurati sperimentalmente (scostamento medio intorno al 20%).
- Il metodo del SETRA [4.7] insieme all'HCM 2000 (*Upper Bound*) [4.13], restituiscono dei valori del ritardo medio peggiori rispetto a quelli del Guide Suisse, ma comunque accettabili rispetto a quelli ottenuti con la formula del ritardo complessivo. E ciò è vero sia nel caso di ingressi scarichi, come quello C, che di ingressi con elevati flussi entranti, come il ramo D in questo caso.
- L'HCM 2000 (*Lower Bound*) [4.13] in particolare, ma anche l'HBS 2001 [4.22] danno dei ritardi notevolmente elevati e ciò è probabilmente legato all'utilizzo di parametri psicotecnici che mal si adattano al reale comportamento dei conducenti pugliesi.

4.3.4. Analisi della lunghezza delle code

Anche per la stima del 95° percentile della lunghezza delle code, così come già detto nel caso delle capacità e dei ritardi, la procedura adoperata per la rotatoria di Mottola è del tutto analoga a quella seguita per la rotatoria di Cosenza Nord.

Ci si è quindi avvalsi della seguente formulazione generale [4.1] [4.2]:

$$L_{coda} = \frac{L_m \cdot d \cdot Q_i}{3600} \quad [\text{Eq. 4.8}]$$

Applicando i dati di traffico riportati nella matrice O/D di Tabella 4.9.

I risultati ottenuti da questa operazione sono stati poi messi a confronto e diagrammati (come si può vedere dagli istogrammi riportati nelle Figure 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34) con i valori di lunghezza delle code ottenuti dall'applicazione dei flussi di Tabella 4.10 ai seguenti metodi internazionali di calcolo:

- SETRA;
- HCM 2000 (*Lower Bound e Upper Bound*);
- HBS 2001;
- TRRL;
- AUSTROADS.

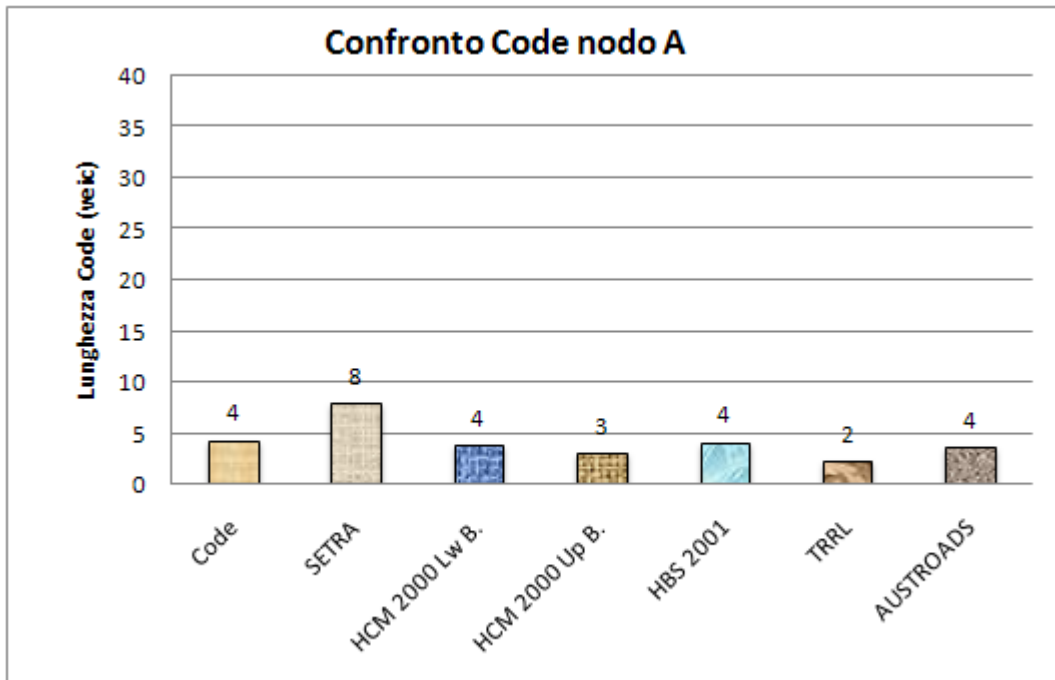


Figura 4.31: Confronto delle Code sul nodo A per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

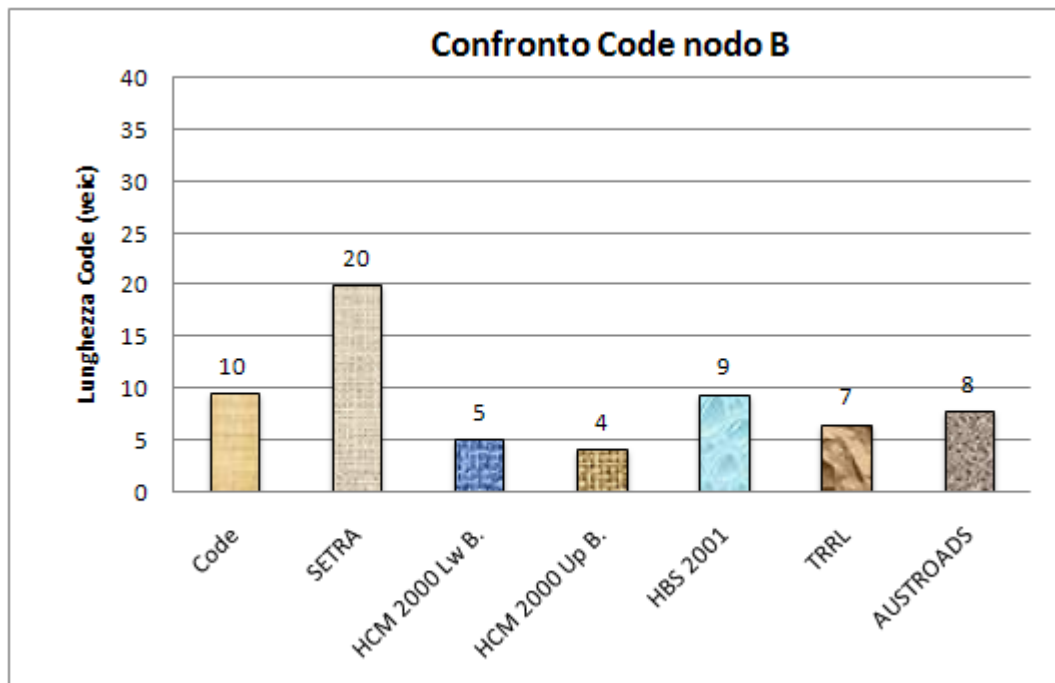


Figura 4.32: Confronto delle Code sul nodo B per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

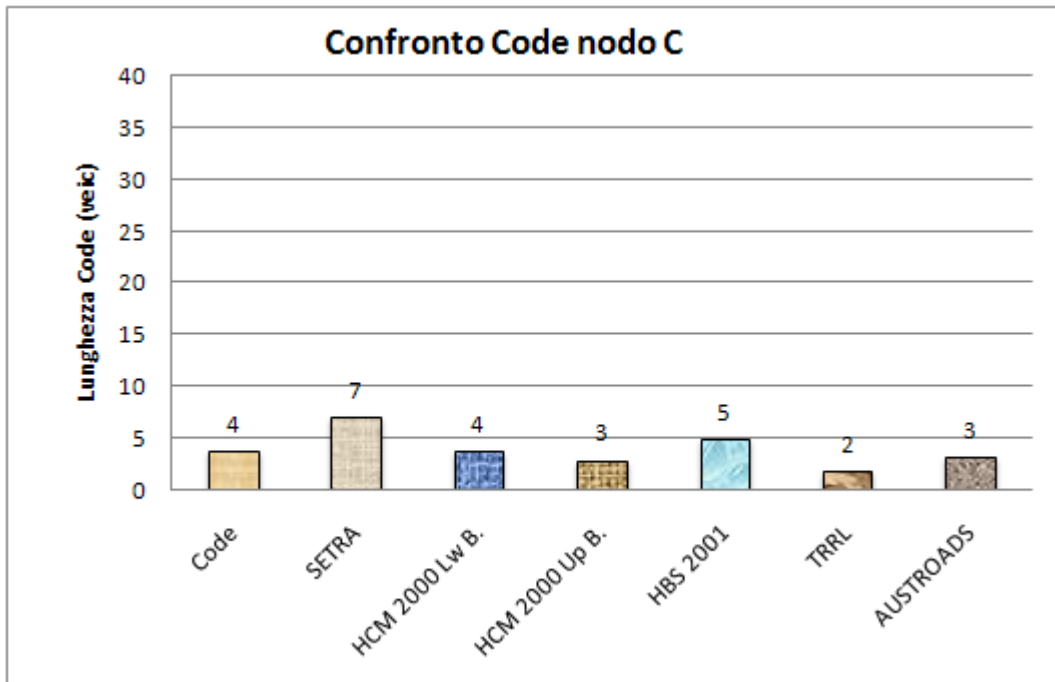


Figura 4.33: Confronto delle Code sul nodo C per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

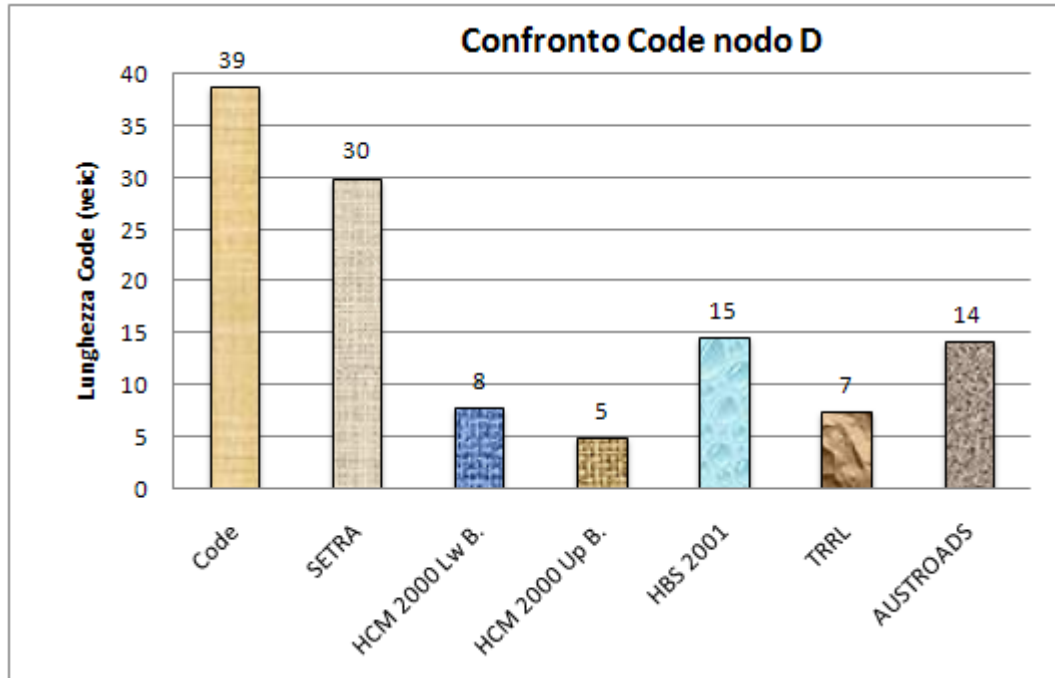


Figura 4.34: Confronto delle Code sul nodo D per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

Come si può notare dai grafici di figura 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34 in questa circostanza, non è il SETRA a garantire i valori di lunghezza delle code più prossimi a quelle calcolate con la formula del ritardo complessivo.

Ciò è ancora più facilmente riscontrabile dai dati riportati nella tabella 4.14, che mostrano lo scostamento percentuale tra le code calcolate con i vari metodi su esposti e quelle ottenute “sperimentalmente”.

	Min	Max	Med	
Scostamento percentuale	23%	110%	75%	SETRA
	11%	80%	46%	HCM 2000 Lw B.
	29%	87%	57%	HCM 2000 Up B.
	0%	62%	22%	HBS 2001
	31%	81%	53%	TRRL
	16%	63%	32%	AUSTROADS

Tabella 4.14: Scostamento percentuale delle Code dai dati sperimentali

In questo caso, i dati della tabella mostrano che:

- Il metodo più affidabile nella valutazione della lunghezza delle code della rotonda sembra essere l’HBS 2001 [4.22] insieme all’AUSTROADS [4.11] (rispettivamente 22% e 32% di scostamento). E’ importante soprattutto il dato relativo alla formulazione australiana, perché conferma il trend di miglioramento che era stato già riscontrato nella valutazione della capacità. Ciò dimostra probabilmente che i parametri utilizzati da questa metodologia si adeguano meglio a rotonde della tipologia di Mottola che non di Cosenza Nord ed al comportamento degli utenti pugliesi piuttosto che calabresi.
- L’HCM 2000 (*Upper e Lower Bound*) [4.13] ed il TRRL [4.16] presentano invece degli scostamenti percentuali medi intorno al 50%. Ciò più o meno segue la tendenza già riscontrata per i ritardi e per le capacità.
- Il SETRA [4.7] in questa circostanza è la metodologia che dà il peggior risultato con uno scostamento medio del 75%.

4.4. Conclusioni

Mentre gli schemi di intersezione a rotatoria “classici” trovano generalmente rappresentatività analitica nei metodi di dimensionamento e/o verifica proposti dalla letteratura internazionale, lo stesso non può dirsi per gli schemi caratterizzati da “difformità” geometrico-funzionali rispetto ai canoni oramai codificati o da flussi di traffico non bilanciati.

Inoltre, l’assenza in ambito nazionale di strumenti tecnico-normativi ha imposto, quale obiettivo primario, di verificare l’applicabilità di alcuni metodi (statistici e semiprobabilistici), tra i più diffusi in ambito internazionale, e concepiti per la verifica e/o il dimensionamento prestazionale di rotatorie a due casi di studio reali: uno caratterizzato da non conformità geometrica e flussi non bilanciati, mentre l’altro contraddistinto da una geometria classica ma da correnti di traffico fortemente sbilanciate.

In questo capitolo sono stati quindi presentati i risultati di questo studio volto a individuare la possibile applicabilità di metodi statistici e semiprobabilistici al caso di una rotatorie caratterizzate da significative singolarità geometriche o di flusso.

Alla luce di quanto esposto, e limitatamente ai casi analizzati ed alle posizioni assunte per giungere alla stima sperimentale del ritardo di fermata e della lunghezza delle code, è possibile asserire che:

- Tra i metodi statistici applicati, il SETRA [4.7] ed il TRRL [4.16], pur se entrambi caratterizzati, nei rispettivi algoritmi, dalla presenza di puntuali parametri geometrici che definiscono gli elementi costituenti l’intersezione, soltanto il primo è risultato quantificare e qualificare sufficientemente gli aspetti prestazionali delle rotatorie (capacità, ritardo di fermata ai nodi e code) in relazione a ciò che il responso sperimentale aveva fatto riscontrare. Il metodo TRRL, di contro, ha portato ad una sovrastima delle capacità ai nodi mediamente superiore al 70% rispetto ai dati rilevati in sito. Tale forte dispersione, con buona probabilità, può farsi risalire alla diversa filosofia progettuale inglese, che, attraverso la

realizzazione di isole centrali piccole, minore deflessione ed ingressi con svasature, permette ai conducenti di affrontare la rotatoria a velocità più elevate con un netto aumento della capacità ed un conseguente abbattimento del livello di sicurezza. C'è da aggiungere comunque che il SETRA garantisce risultati migliori nel caso di rotatorie a singola corsia con diametri sufficientemente grandi (> 30 m), come quella di Cosenza Nord.

- Entrambi i metodi semiprobabilistici HCM 2000 [4.13] e HBS 2001 [4.22], pur presentando un'accettabile affinità con i dati sperimentali per ciò che riguarda il calcolo della capacità ai nodi, hanno fatto registrare una forte discrepanza in relazione al calcolo dei ritardi di fermata;
- Le formulazioni di Brilon, quella esponenziale e quella lineare [4.14], danno dei valori di capacità assai prossimi in entrambi i casi a quanto realmente misurato, a differenza della formulazione per le *semi-two-lane roundabout* [4.6], messa a punto dallo stesso Brilon, la quale però non fornisce dei risultati buoni (eppure Cosenza Nord dovrebbe ricadere proprio nel caso di rotatorie con una sola corsia all'anello tanto larga da permettere a due veicoli di affiancarsi). Ciò è probabilmente dovuto alla differenza di comportamento tra i conducenti tedeschi, più abituati a percorrere le rotatorie rispetto a quelli italiani.
- Le due formulazioni svizzere, quella di Bovy e la CH1 [4.8], danno risultati sostanzialmente diversi. La prima si adatta meglio al caso di Mottola in quanto deriva dalla regressione di dati ottenuti da rotatorie con diametro esterno compreso tra 25 e 35 m; mentre la seconda si adegua meglio al caso di Cosenza Nord, ossia a rotatorie a corsia singola con diametro esterno superiore a 35m.
- La formulazione australiana dell'AUSTROADS [4.11] si dimostra più adatta a stimare i parametri prestazionali di rotatorie geometricamente conformi, rispetto a quelle rotonde che presentano delle particolari anomalie, come poteva essere la rotatoria di Cosenza Nord.

4.5. Bibliografia specifica del Capitolo 4.

- [4.1] Mauro R. (2007) – Il calcolo delle rotatorie. Capacità. Tempi d’attesa. Lunghezza delle code – *Hevelius Edizioni*, Benevento.
- [4.2] Canale S., Distefano N., Leonardi S., Pappalardo G. (2005) - Progettare le rotatorie - *EPC Libri*, Roma.
- [4.3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – D. M. 19/04/2006: Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali - Roma.
- [4.4] FHWA (2000) – Roundabouts: an informational guide – Report n. FHWA-RD-00-067 – Federal Highway Administration, U.S. Department Of Transportation, Washington (USA).
- [4.5] Provincia di Padova: Assessorato alla Viabilità (2002) - Linee guida per la progettazione e la verifica delle intersezioni a rotatorie - Provincia di Padova.
- [4.6] Brilon W. (2005) – Roundabouts: a state of the art in Germany – Atti del National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [4.7] SETRA (1997) – Carrefours giratoires: evolution des caracteristiques geometriques – Documentation Technique 44 – Ministere de l’equipement du logement, de l’amenagement du territoire et des transports, Parigi (Francia).
- [4.8] Bovy P., Dietrich K., Harmann A. et AA.VV. (1991) – Guide Suisse des giratoires – FVS/FSS-EPFL – Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Losanna (Svizzera).
- [4.9] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Ispettorato Generale per la circolazione e la sicurezza stradale (2001) - Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali - *Rapporto di Sintesi a Carattere Prenormativo*.
- [4.10] Commissione VSS 2 (1999) – Norme Svizzere SN 640-263 – Intersezioni: le rotatorie – Unione dei professionisti svizzeri della strada, Losanna (Svizzera).
- [4.11] NAASRA (1986) – Roundabouts: A Design Guide – National Association of Australian State Road Authorities, Sydney (Australia).

- [4.12] Esposito T., Mauro R. (2003) – Fondamenti di infrastrutture viarie, Volume 2: La progettazione funzionale delle strade - *Hevelius Edizioni*.
- [4.13] AA. VV. (2000) – Highway Capacity Manual 2000 - Transportation Research Board (TRB), Washington D.C. (USA).
- [4.14] Brilon W., Wu N., Bondzio L. (1997) - Unsignalized intersections in Germany: A state of the art 1997 - in Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals, Bochum (Germania).
- [4.15] Kimber R. M., Hollis E. M. (1979) – Traffic queues and delays at road junctions – TRRL Report 909.
- [4.16] TRL's Software Bureau (1998) - Roundabout design for capacity and safety. The UK empirical methodology - TRL.
- [4.17] Luttinen R. T. (2004) – Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections – Finnra Reports 1/2004 – Finnish Road Administration, Helsinki (Finlandia).
- [4.18] CERTU (1999) – Guide carrefours urbains – Centre d'études sur les reseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Lione (Francia).
- [4.19] Hagring H. (2003) – Capacity Model for Roundabouts – Trivector Traffic AB, Swedish National Road Administration, Lund (Svezia).
- [4.20] Akcelik R. (2004) – Roundabouts. Comments on aaSIDRA and TRL (UK) linear regression model – Akcelik & Associates Pty Ltd, Sydney (Australia).
- [4.21] Hagring H. (2004) - Effects of OD Flows on Roundabout Entry Capacity - Department of Technology and Science, Lund University (Svezia).
- [4.22] Wu N. (2000) - The proposed new version of German Highway Capacity Manual - Institute for Traffic Engineering, Ruhr University Bochum (Germania).
- [4.23] Capiluppi G. F., Gallelli V., Vaiana R. (2007) - Roundabouts performances analysis: comparison between classical methodologies, micro-simulation and field measuring – Atti del XXII European Conference on Operational Research, Road Traffic Management Session, Praga (Repubblica Ceca).

- [4.24] Capiluppi G. F., Gallelli V., Vaiana R. (2006) – Intersezioni a raso con soluzione a rotatoria dissimmetrica: un caso di studio - in Adeguamento e Manutenzione delle strade esistenti: Atti del XVI Convegno Nazionale SIV, Rende (CS).
- [4.25] Troutbeck R. J., Brilon W. (1992) – Unsignalized intersection theory – Capitolo 8 di “Traffic Flow Theory: a state of the art report”, Washington (USA).

LA MICROSIMULAZIONE COME STRUMENTO PER L'ANALISI PRESTAZIONALE DI UNA ROTATORIA

5.1. Introduzione

L'uso sempre più crescente di rotatorie per risolvere i problemi legati al traffico ha dato origine ad un gran numero di modelli capaci di prevedere le caratteristiche prestazionali di una rotatoria. Ciascuna di queste metodologie permette di stimare alcune caratteristiche importanti per una rotatoria, come la capacità, i tempi medi d'attesa e la lunghezza delle code, attraverso delle formulazioni di tipo statistico o semiprobabilistico. In particolare, le formulazioni che si basano sulla teoria del gap-acceptance presentano delle assunzioni assai complesse circa il comportamento dei conducenti e spesso non è semplice ottenere buoni risultati.

Quindi per ovviare a questo genere di problemi, oggi si fa sempre più ricorso all'utilizzo di diversi software, che attraverso complessi modelli teorici ed un gran numero di parametri in ingresso, sono in grado di analizzare il comportamento degli utenti nelle rotatorie.

Le procedure informatizzate, oltre a velocizzare le fasi di restituzione degli input, hanno il pregio di consentire all'operatore di simulare diversi scenari operativi, al fine di rendere più celere il processo di ottimizzazione delle prestazioni complessive offerte dalle rotatorie.

Comunque, non tutti questi programmi di simulazione sono capaci di riprodurre esattamente in tutti i suoi aspetti una rotatoria. Pertanto tali software possono essere divisi in due categorie: macroscopici e microscopici. Quelli macroscopici come SIDRA, Rodel, Arcady, Kreisel, etc., analizzano i parametri prestazionali attesi in funzione del traffico attraverso un'analisi statistica: essi utilizzano i flussi veicolari per modellare la rotatoria come un sistema isolato. Quelli microscopici invece simulano il

movimento dei singoli veicoli consentendo in ogni caso un'analisi globale dell'intersezione intesa come un nodo all'interno di una rete più complessa.

Un sommario dei principali software internazionali per il calcolo delle caratteristiche funzionali di una rotatoria è riportato in Tabella 5.1 [5.22].

PAESE	NOME	TIPOLOGIA	RIFERIMENTO
Regno Unito	RODEL	Empirico	[5.6] [5.8]
Regno Unito	ARCADY	Empirico	[5.10]
Regno Unito	PARAMICS	Gap-Acceptance	[5.8]
Australia	SIDRA	Gap-Acceptance	[5.14]
Germania	KREISEL	Tutti i metodi	[5.2]
Germania	VISSIM	Gap-Acceptance	[5.15] [5.16]
U.S.A.	HCS/SYNCHRO	Gap-Acceptance	[5.11]
U.S.A.	CORSIM	-	[5.12]
U.S.A.	INTEGRATION	-	[5.13]
U.S.A.	SIMTRAFFIC	-	[5.13]
Francia	GIRABASE	Empirico	[5.2]
Spagna	GETRAM	-	[5.17]

Tabella 5.1: Principali software internazionali di simulazione per le rotatorie [5.7] [5.22]

Tra i software riportati nella Tabella 5.1 andiamo a dissertare brevemente su qualcuno di essi prodotto da enti di ricerca internazionali, come:

- SIDRA [5.2] [5.3] [5.13] [5.14];
- ARCADY [5.2] [5.10] [5.13];
- RODEL [5.2] [5.6] [5.8] [5.13];
- GIRABASE [5.2] [5.13];
- KREISEL [5.2] [5.13].

Il SIDRA, prodotto in Australia dalla “*Akçelik and Associates Pty Ltd*”, si basa per l'appunto sul lavoro di ricerca svolto dall'ARRB (*Australian Road Research Board*) e sulla metodologia australiana per il calcolo della capacità. Esso permette la stima degli intervalli critici, del tempo di scalamento in coda e della capacità, tenendo in considerazione sia il condizionamento dovuto alla geometria della rotatoria e sia quello provocato dal flusso circolante e da quello in ingresso. E' possibile inoltre valutare i ritardi ed i livelli di servizio utilizzando le procedure proposte dall'HCM. Tra i principali vantaggi di questo software, che è assai diffuso anche negli USA, c'è la possibilità di analizzare il comportamento di intersezioni diverse dalle rotatorie, come quelle regolate da semafori, da segnale di stop o dalla regola del dare

precedenza: ciò è molto positivo perché permette di svolgere delle analisi comparate fra diversi schemi d'incrocio. Bisogna inoltre aggiungere che il SIDRA, oltre alla formulazione australiana per il calcolo della capacità in rotatoria, incorpora al suo interno anche la metodologia americana dell'HCM 2000 [5.25] e quella tedesca dell'HBS 2001 [5.2] [5.13] [5.26].

ARCADY (*Assessment of Roundabout Capacity and Delay*) invece è un software inglese sviluppato originariamente dal TRL (*Transport Research Laboratory*) per semplificare le operazioni di calcolo della capacità in rotatoria. Attualmente, oltre alla stima della capacità attraverso la metodologia introdotta da Kimber, consente di calcolare i ritardi, le code ed i tassi d'incidentalità: questi ultimi vengono valutati attraverso un modello previsionale basato sui flussi di traffico e sulla geometria dell'intersezione. ARCADY permette quindi di visualizzare le variazioni, durante un periodo di riferimento, delle code su ciascun ingresso ed inoltre consente di effettuare delle previsioni circa la variabilità dei ritardi accumulati dai conducenti. Tra i tanti pregi di questo software c'è anche quello di poter modellare qualsiasi tipo di rotatoria, tenendo in considerazione, nella valutazione della funzionalità complessiva dell'intersezione stessa, la presenza di flussi pedonali. Uno dei pochi svantaggi di questo programma è il fatto di dover definire dettagliatamente, per una corretta analisi dei parametri prestazionali, tutti gli elementi geometrici della rotatoria [5.2] [5.13].

RODEL (*ROundabout DELay*) è un software inglese ideato da Crown nel 1987. Presenta caratteristiche simili ad ARCADY perché anch'esso si basa sulla formulazione empirica di Kimber per il calcolo della capacità e perché permette di valutare le variazioni delle prestazioni operative delle rotatorie in funzione del grado di sicurezza imposto dall'utente (RODEL darà lo stesso risultato di ARCADY se il livello di sicurezza è posto al 50%). RODEL include inoltre una procedura di ottimizzazione geometrica che permette di testare interattivamente le variabili geometriche e restituisce degli output che possono essere specificati per tutto il periodo di analisi o solo per una o più frazioni di esso. Ultimamente si sta valutando di realizzare una nuova versione del programma in grado di fornire previsioni in base alle diverse tipologie d'incidente che si possono verificare su di una rotatoria con

determinate caratteristiche geometriche e di traffico. Anche RODEL, così come ARCADY, ha come difetto principale quello di dover definire dettagliatamente, per una corretta analisi dei parametri prestazionali, tutti gli elementi geometrici della rotatoria [5.2] [5.13].

GIRABASE è invece il software realizzato dal CETE (*Centres d'Etudes Techniques de l'Equipment*) a Nantes, in Francia, ed accettato da entrambi gli istituti nazionali per la progettazione urbana (CETUR) ed extraurbana (SETRA) delle rotatorie. Esso si basa su una formulazione empirica francese per il calcolo della capacità di una rotatoria e, rispetto agli altri programmi precedentemente esposti, tiene in considerazione un maggior numero di parametri quali: la larghezza delle entrate, la larghezza dell'anello, il raggio dell'isola centrale, la larghezza dell'isola divisionale, la larghezza delle uscite, l'angolo tra due bracci consecutivi, i flussi di traffico veicolare, i flussi di traffico pedonale ed il posizionamento della rotatoria (urbana, suburbana ed extraurbana). Attraverso l'inserimento dei dati di input appena descritti, GIRABASE permette di valutare la capacità di un ramo in funzione del traffico circolante di fronte ad esso. I campi di variabilità degli elementi geometrici utilizzati dal GIRABASE sono i seguenti:

ELEMENTO	MINIMO (m)	MASSIMO (m)
N° Bracci	3	8
Raggio Isola Centrale	3.5	87.5
Larghezza Anello	4.5	17.5
Larghezza Ingresso	3	11
Larghezza Isola Divisionale	0	70
Larghezza Uscita	3.5	10.5

Tabella 5.2: Campi di variabilità degli elementi geometrici del software GIRABASE [5.2]

L'ultima versione del GIRABASE consente il calcolo della capacità anche per rotatorie a due corsie all'anello; in tal senso si è visto che la capacità di un ramo di una rotatoria a due corsie si incrementa dell'80% rispetto a quella di un ramo di una rotonda a singola corsia. Un altro vantaggio di questo software è quello di segnalare agli utilizzatori le condizioni di progetto inusuali o indesiderate e suggerisce opportune alternative progettuali. Unico neo del programma è la sua scarsa diffusione negli USA [5.2] [5.13].

KREISEL è il software ideato e prodotto da W. Brilon alla Ruhr University di Bochum in Germania. E' in grado di calcolare la capacità ed i ritardi in rotatoria attraverso l'utilizzo delle diverse metodologie internazionali più diffuse (quella francese, quella inglese, quella svedese, oltre che quella tedesca, ecc.) e di compiere quindi una buona analisi comparata. Esso tiene in considerazione gli attraversamenti pedonali nella stima della capacità di un ingresso. Anche questo programma però è scarsamente diffuso in America [5.2] [5.13].

Dopo questo breve excursus su alcuni dei software internazionali di microsimulazione, andremo a definire più in dettaglio, nei seguenti paragrafi, le caratteristiche di VISSIM [5.18], ossia del programma di microsimulazione che è stato utilizzato per valutare l'effetto dei parametri geometrici e di quelli comportamentali sulle caratteristiche prestazionali di una rotatoria.

5.2. Il software di microsimulazione VISSIM

La simulazione dei fenomeni di deflusso veicolare in rotatoria presenta spesso parecchie complessità, perché non è sempre facile definire tutte le caratteristiche geometriche dello schema e quelle comportamentali dell'utente. In tal senso Vissim fornisce una piattaforma flessibile che consente agli utenti di modellare una rotatoria in maniera più realistica possibile.

VISSIM è un modello che simula in maniera microscopica la circolazione tenendo conto delle differenti caratteristiche riguardanti la composizione delle corsie, la strutturazione del traffico, la regolazione della precedenza agli incroci e le prestazioni dei veicoli sia del traffico privato che di quelli del trasporto collettivo. E' possibile inoltre valutare differenti modi di gestione del traffico attraverso la descrizione qualitativa e quantitativa della circolazione stessa. La qualità del modello dei flussi di traffico, che descrive il movimento dei veicoli nella rete, è essenziale per la qualità del modello di simulazione stesso [5.15] [5.16].

Contrariamente a modelli più semplici che ipotizzano delle velocità più o meno costanti e dei processi di successione dei veicoli di tipo deterministico, VISSIM

impiega il modello di percezione psicofisica di WIEDEMANN [5.4] [5.5]. La calibrazione del modello d'accodamento dei veicoli è stata fatta con l'aiuto di numerose sperimentazioni all'Istituto di Scienze della Circolazione dell'Università di Karlsruhe. L'idea di base del modello consiste nel considerare che il conducente di un veicolo più rapido comincia a frenare nel momento in cui egli tocca la sua soglia individuale di percezione. Dal momento che non sa stimare in maniera esatta la velocità del veicolo che lo precede, la velocità del suo veicolo diminuisce al di sotto di questa, e ciò ha per conseguenza un'accelerazione dopo il superamento della sua soglia di percezione. Ne risulta una successione di lievi azioni di accelerazione e decelerazione. Delle funzioni di distribuzione, riguardanti le velocità e il distanziamento tra i veicoli, permettono di tener conto del comportamento distinto di differenti conducenti. Delle recenti misurazioni garantiscono la modellizzazione corretta del comportamento, che si è evoluto nel tempo, e delle prestazioni tecniche più avanzate dei veicoli. In VISSIM la simulazione del comportamento di un conducente, su una carreggiata a più corsie, non tiene solamente conto dei due veicoli che lo precedono ma anche dei veicoli posti sulle corsie vicine [5.15] [5.16].

VISSIM, a differenza degli altri software, si basa su di una struttura ad archi-connettori, anziché a nodi-connettori, la quale consente di costruire in maniera più agevole un'intera rete viaria, o, più in particolare, una singola intersezione. Esso è inoltre in grado di importare un layout *CAD* in formato *DXF* o *JPG* e di utilizzarlo, una volta assegnata una scala appropriata, come sfondo su cui poi disegnare gli archi della rete. In questo modo, tutti gli elementi geometrici di una rotatoria (come le isole divisionali, le larghezze delle corsie, il numero di corsie, la larghezza delle entrate, ecc.) possono essere disegnati in maniera assai precisa. In ogni caso, affinché si possa raggiungere un accurato livello di simulazione, è necessario definire in dettaglio quattro elementi fondamentali:

- 1) il comportamento dei conducenti;
- 2) le velocità d'approccio, le zone in cui avviene la riduzione di velocità (prima dell'ingresso in rotatoria) e la velocità sulla corona giratoria;
- 3) le regole di precedenza;

4) l'assegnazione dinamica dei flussi di traffico.

5.2.1. Il modello comportamentale di Wiedemann [5.4] [5.5]

Il modello dei flussi di traffico presente in VISSIM è un modello microscopico, stocastico e discreto che considera le unità conducente-veicolo come singole entità. Esso impiega un modello di percezione psicofisica per il movimento longitudinale dei veicoli ed un algoritmo basato sulle regole di precedenza per i movimenti laterali. Il suddetto modello è basato sul lavoro svolto da Wiedemann presso l'Università di Karlsruhe fin dai primi anni '70 [5.4] [5.5]. Tale modello prende in considerazione le seguenti quattro modalità di guida che sono correlate a diverse combinazioni di distanza e di differenza di velocità tra due veicoli consecutivi (Fig. 5.1) [5.18]:

- Guida libera: non vi sono influenze dovute a veicoli che precedono. In questa modalità il conducente cerca di raggiungere e mantenere la propria velocità desiderata. In realtà, la velocità nella guida libera non può essere mantenuta costante, ma oscilla attorno alla velocità desiderata.
- Approccio: processo di adattamento della velocità del conducente alla minore velocità del veicolo precedente. Nell'avvicinarsi, un conducente applica una decelerazione tale che la differenza di velocità dei due veicoli è uguale a zero nel momento in cui egli raggiunge la sua distanza di sicurezza.
- Accodamento: il conducente segue il veicolo precedente senza una cosciente accelerazione o decelerazione. Egli mantiene la distanza di sicurezza in modo più o meno costante ma, a causa della difficoltà di controllo della velocità e di valutazione della distanza, la differenza di velocità oscilla attorno allo zero.
- Frenata: applicazione di una decelerazione medio-alta se la distanza scende al di sotto del valore di sicurezza desiderato. Questo può succedere se la macchina precedente cambia velocità improvvisamente, o se una terza macchina cambia corsia davanti al conducente osservato.

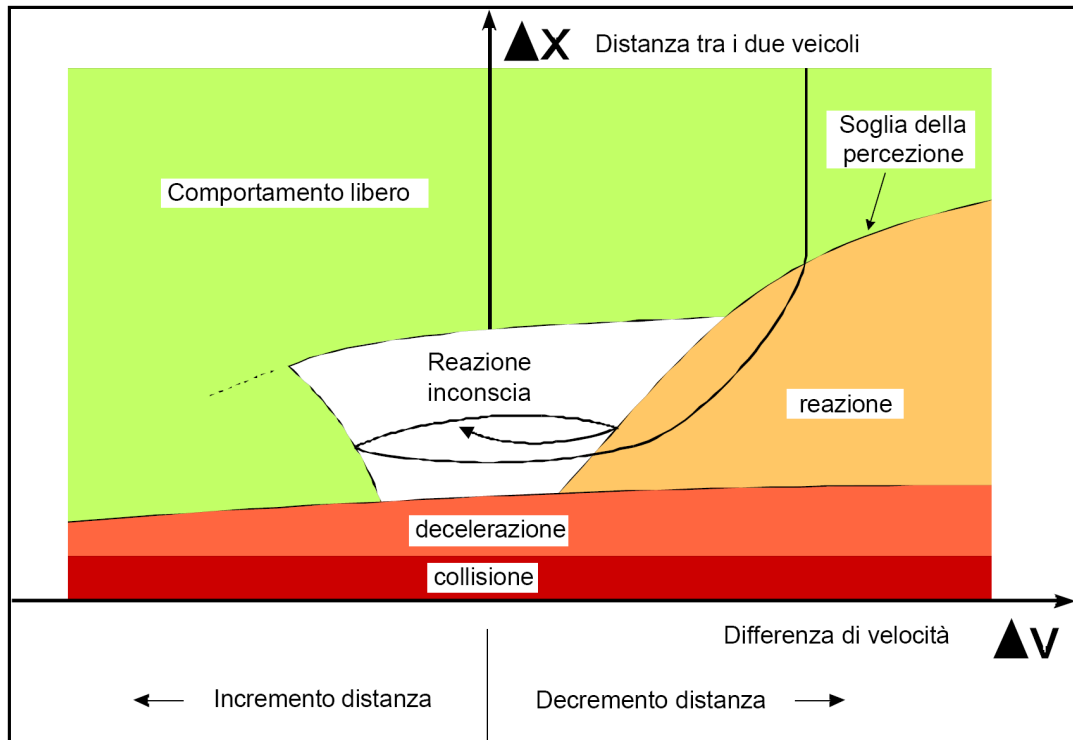


Figura 5.1: Modello di successione dei veicoli secondo Wiedemann [5.18]

Per ciascuna modalità, l'accelerazione è descritta come il risultato di velocità, differenza di velocità, distanza e caratteristiche proprie del conducente e del veicolo. Il conducente può passare da una modalità ad un'altra non appena raggiunge un certo limite che può essere espresso dalla combinazione della differenza di velocità e della distanza. Per esempio, una leggera differenza di velocità può essere realizzata in piccole distanze, mentre una differenza di velocità maggiore costringe i conducenti che si avvicinano a reagire molto prima. L'abilità di percepire le differenze di velocità e di stimare le distanze varia in funzione del conducente, così come le velocità desiderate e le distanze di sicurezza. A causa della combinazione di aspetti psicologici e restrizioni fisiologiche della percezione del conducente, il modello è definito modello di percezione psicofisica.

5.2.2. Velocità d'approccio, velocità sull'anello e zone di riduzione della velocità

Un'accurata definizione delle velocità di percorrenza dei vari elementi di una rotatoria è estremamente importante per poter ottenere una buona simulazione. VISSIM consente di definire molti parametri come distribuzione stocastica piuttosto che come valore fisso. In questo modo la natura stocastica delle situazioni di traffico può essere rappresentata in modo più realistico. Molte delle distribuzioni, quali ad esempio quelle di velocità, vengono gestite in modo simile, e per la loro definizione è possibile utilizzare qualsiasi tipo di dato empirico o stocastico.

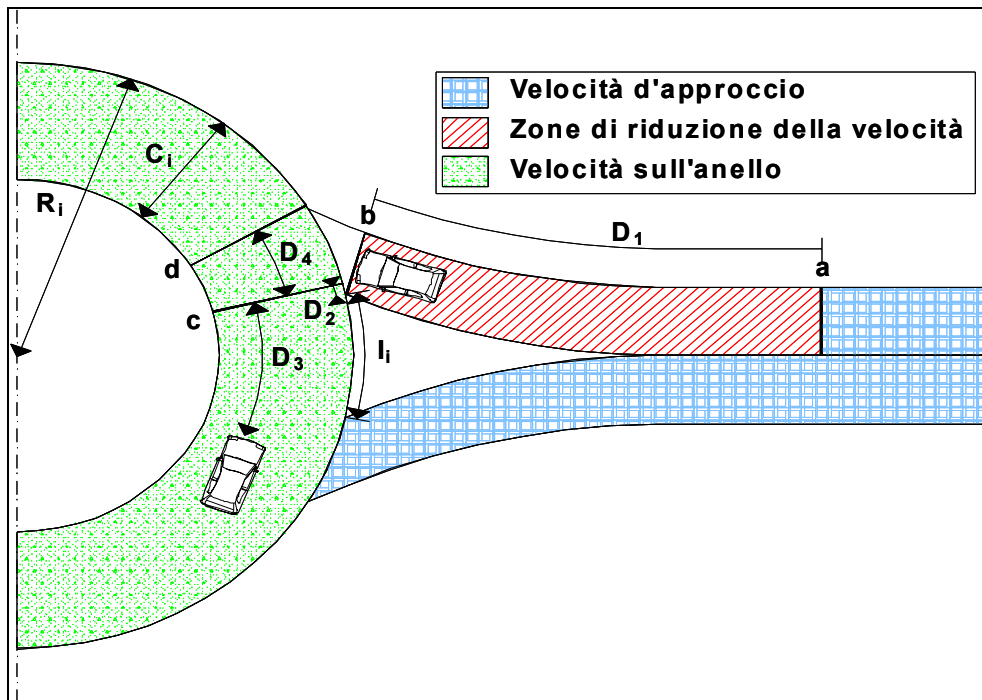


Figura 5.2: Parametri usati in Vissim per definire le velocità e le regole di precedenza [5.22]

In Figura 5.2 sono schematizzati i parametri fondamentali per una corretta definizione delle velocità di percorrenza dei vari elementi della rotatoria e delle regole di precedenza e dove:

- a = inizio zona a velocità ridotta;
- b = linea di stop / Fine della zona di riduzione della velocità;
- c = linea di conflitto 1 / “Sezione diritto di precedenza 1”;

d = linea di conflitto 2 / “Sezione diritto di precedenza 2”;

D_1 = lunghezza della zona di riduzione della velocità ($a_{max} = 2 \text{ m/sec}^2$);

D_2 = distanza di c dal bordo dell'isola divisionale

D_3 = distanziamento temporale e/o interdistanza spaziale rilevata;

D_4 = distanza tra le linee di conflitto;

R_i = raggio della circonferenza inscritta;

C_i = larghezza della corona giratoria;

I_i = larghezza dell'isola divisionale.

Vissim consente quindi di definire la velocità desiderata per ogni classe di veicolo non appena quest'ultimo entra nella rete. Le velocità d'approccio su ogni ramo d'ingresso sono comprese all'interno di un intervallo definito da una curva empirica di velocità che può essere gestita dall'utente: solitamente si utilizzano delle curve a forma di “S” per schematizzare la distribuzione Normale delle velocità.

I veicoli, pertanto, non appena vengono generati ed entrano nella rete, assumono la loro velocità desiderata e la mantengono fintanto che i condizionamenti dovuti al traffico o alle caratteristiche geometriche dell'intersezione non richiedono loro di cambiarla.

Vissim utilizza delle zone di riduzione della velocità (ossia zone dove avvengono le decelerazioni dei veicoli – elemento D_1 in Figura 5.2) per far variare la velocità desiderata dei veicoli: tali zone, poste sui bracci d'ingresso, prima che il veicolo entri sull'anello, servono proprio a materializzare l'effetto riduttivo che la geometria degli ingressi produce sulla velocità d'approccio. La loro lunghezza D_1 (Fig. 5.2) è di solito direttamente correlata alla velocità d'approccio di ciascun ramo della rotatoria: maggiore è la velocità d'approccio e più lunga sarà la zona di riduzione della velocità. Tali zone assegnano una nuova distribuzione di velocità ai veicoli, i quali incominciano a decelerare non appena oltrepassano l'inizio di questa area (linea a in Figura 5.2). Al termine di queste zone (linea b in Figura 5.2) i veicoli cominciano ad accelerare fino a raggiungere di nuovo la loro velocità desiderata, se l'utente non ne ha definita una nuova.

In particolare, per le rotatorie, dopo le zone di riduzione di velocità poste in corrispondenza degli ingressi, bisogna definire una nuova distribuzione per la corona giratoria la cui velocità di percorrenza sarà direttamente correlata alla formula dell'equilibrio dell'aderenza trasversale in curva:

$$V = \sqrt{127 \cdot R \cdot (q + f_i)} \quad [\text{Eq. 5.1}]$$

Imponendo queste assunzioni:

$$q = 0;$$

$$f_i = 0.23;$$

$$R = R_i - (C_i/2). \quad [R_i \text{ e } C_i \text{ sono riportati in Figura 5.2}]$$

Questa equazione consente quindi di ottenere la velocità media (V_m) di percorrenza dei veicoli sull'anello. Per poter invece definire l'intervallo di variabilità della velocità stessa, considerando una distribuzione normale, basterà aggiungere e sottrarre alla V_m la quantità " $1.96 \cdot \sigma$ ", dove per " σ " si intende la deviazione standard, solitamente posta pari a 5 Km/h (questo è un dato derivante da osservazioni sperimentali). In tal modo il campo di variabilità della nuova distribuzione per la velocità di percorrenza dei veicoli sulla corona giratoria sarà pari a $V_m \pm (1.96 \cdot \sigma)$, in modo da prendere in considerazione il 95° percentile della distribuzione delle velocità.

5.2.3. Regole di precedenza

L'aspetto più importante per il corretto funzionamento di una rotatoria in Vissim è sicuramente la corretta definizione delle regole di precedenza per le manovre d'ingresso e di uscita dalla rotonda stessa (nel caso di rotatorie a singola corsia esisteranno regole di precedenza solo per le manovre d'ingresso). Tali regole consistono in una linea d'attesa (**b** in Figura 5.2) ed in una o più sezioni di diritto di precedenza (**c** e **d** in Figura 5.2) che sono associate alla linea d'attesa. Secondo le condizioni attuali delle sezioni di diritto di precedenza la linea d'attesa permette o meno ai veicoli di attraversare la strada.

Le regole di precedenza si basano su due parametri fondamentali:

- minimo intervallo temporale;

- minima interdistanza.

L'interdistanza è definita come distanza tra la “Sezione diritto di precedenza” (linea **c** in Figura 5.2) ed il primo veicolo che si avvicina a questa linea. L'intervallo di tempo è definito come il tempo necessario al primo veicolo che si avvicina alla “Sezione diritto di precedenza” per arrivare su quest'ultima alla sua velocità corrente. Un veicolo che si trova sulla linea di attesa (linea **b** in Figura 5.2), entra in rotatoria solo quando il gap e/o l'interdistanza rilevati (D_3 in Figura 5.2) dalle due sezioni di conflitto (**c** e **d** in Figura 5.2) sono più grandi dei valori minimi impostati.

In pratica se qualsiasi parte di un veicolo è posizionato sulla prima linea di conflitto (**c** in Figura 5.2), allora l'interdistanza risultante è uguale a 0 m. Se l'interdistanza corrente è minore dell'interdistanza minima, allora la linea di attesa corrispondente (linea **b** in Figura 5.2) blocca qualsiasi veicolo che si avvicina. Durante la simulazione, l'intervallo di tempo corrente è determinato per ogni passo temporale dal tempo che occorre ad un veicolo che si sta avvicinando per raggiungere la sezione di diritto di precedenza (linea **c** in Figura 5.2). Un veicolo posizionato sulla linea **c** non viene preso in considerazione dall'intervallo di tempo corrente. Se l'intervallo di tempo corrente è minore dell'intervallo di tempo minimo (definito apriori per la sezione di diritto di precedenza) la linea d'attesa **b** corrispondente blocca ogni veicolo che si sta avvicinando.

Come già detto, le regole di precedenza sono di solito composte da una linea di attesa (linea **b** in Figura 5.2) e da uno o due sezioni di diritto di precedenza (in questo caso sono due: linea **c** e linea **d** in Figura 5.2). In particolare nel caso di rotatoria a corsia singola, la linea **c**, posta a distanza D_2 dall'angolo destro dell'isola divisionale, viene utilizzata per definire il minimo intervallo temporale e la minima interdistanza in condizioni di traffico normale. La linea **d** invece, posta a distanza D_4 dalla linea **c**, serve esclusivamente per definire l'interdistanza minima in condizioni di traffico congestionato. In ogni caso, affinché un veicolo possa entrare in rotatoria è necessario che siano soddisfatte entrambe le condizioni dettate dalle due sezioni di diritto di precedenza.

Può essere inoltre definita la velocità massima dei veicoli che percorrono l'anello: in questo modo solo i veicoli che si avvicinano alla sezione con diritto di precedenza con una velocità minore della velocità massima verranno considerati dall'interdistanza della regola di precedenza.

Sia la linea d'attesa che la sezione con diritto di precedenza possono essere definiti anche solo per alcune classi di veicolo, ma in questa circostanza verranno considerati solo flussi di traffico misurati in veicoli "equivalenti per ora".

5.2.4. Assegnazione dinamica del traffico

Un'altra caratteristica molto importante in Vissim è l'assegnazione dinamica del traffico.

L'assegnazione dinamica in VISSIM è basata sulla simulazione iterata. Questo significa che una rete modellizzata è simulata non solo una volta, ma ripetutamente ed i conducenti scelgono l'itinerario in base alle esperienze che hanno avuto nelle precedenti simulazioni.

Quando si utilizza l'assegnazione dinamica la domanda di trasporto non viene specificata utilizzando i flussi in entrata sugli archi selezionati con un dato volume, ma con una matrice O/D. Per definire la domanda di trasporto utilizzando una matrice O/D, l'area che deve essere simulata viene suddivisa in sub-aree definite zone (ad esempio, per una rotatoria a quattro braccia, il numero di zone è quattro) e la matrice contiene il numero degli spostamenti che vengono effettuati da e verso tutte le zone per un determinato intervallo di tempo. Quindi la dimensione della matrice diventa: (numero delle zone) x (numero delle zone) [5.18].

Per modellizzare i punti dove i veicoli entrano o lasciano la rete stradale, bisogna utilizzare l'elemento di rete "parcheggio". Un parcheggio appartiene ad una specifica zona, cioè i viaggi che hanno origine o hanno come destinazione questa zona possono iniziare o terminare da questo parcheggio. Bisogna aggiungere che i veicoli generati dai "parcheggi", vengono immessi sulla rete secondo una distribuzione di tipo Poissoniana [5.18].

Il traffico che parte da un parcheggio è simile al traffico generato dal flusso in ingresso, ma la composizione del traffico non viene esplicitamente specificata per il parcheggio. La composizione del traffico viene definita con la matrice O/D che genera il flusso veicolare in entrata al parcheggio. Comunque la velocità desiderata per i veicoli che escono da quest'ultimo, non viene presa dalla distribuzione definita nella composizione del traffico con la matrice, ma viene presa dalla distribuzione della velocità desiderata definita localmente al parcheggio [5.18].

Inoltre per la simulazione che utilizza l'assegnazione dinamica, possono essere definite più matrici, ognuna con le informazioni su un certo tipo di veicoli e per un certo intervallo di tempo. Gli intervalli di tempo delle diverse matrici possono anche essere sovrapposti arbitrariamente ed il traffico generato in ogni istante risulta essere quello prodotto da tutte le matrici che includono quell'istante nel loro intervallo di tempo [5.18].

5.3. Definizione dei parametri per la campagna di simulazione

Alla luce di quanto esposto nei paragrafi precedenti, si è deciso di utilizzare il software Vissim per condurre una vasta campagna di microsimulazione. Sono stati scelti degli scenari standard di rotatoria a singola corsia facendo variare di volta in volta parametri differenti, sia di tipo geometrico che di tipo comportamentale, con lo scopo di valutare il loro effetto sulle caratteristiche prestazionali dell'intersezione.

Di seguito verranno riportati i parametri d'ingresso utilizzati per la realizzazione della campagna di simulazione, considerando in ordine:

- la distribuzione e l'assegnazione dinamica dei flussi di traffico nello spazio e nel tempo;
- l'implementazione delle regole di circolazione, quali le velocità d'approccio, le zone di riduzione delle velocità, le velocità sulla corona giratoria e le regole di precedenza;
- la definizione degli scenari da analizzare (quindi la scelta delle variabili geometriche e di traffico).

I risultati derivanti dall'analisi degli scenari simulati verranno rappresentati in termini di tempi medi d'attesa e di livello di servizio.

5.3.1. La distribuzione e l'assegnazione dinamica dei flussi di traffico

L'analisi del flusso di traffico permette di quantificare le prestazioni di un'intersezione a rotonda: la variazione dei flussi nel tempo, infatti, influenza la possibile formazione di code sui rami d'ingresso ed è quindi estremamente importante conoscere l'effettivo andamento della domanda di traffico per valutare la variazione dei parametri prestazionali dell'intersezione stessa.

Esistono dei metodi in grado di ricostruire la conformazione della curva di domanda nell'intorno del suo massimo, basandosi su una serie consecutiva di conteggi orari dei flussi di traffico, tenendo conto che sarebbe desiderabile avere a disposizione tutti i dati di traffico per segmenti temporali di 5 o 10 minuti, i quali potrebbero consentire di determinare un diagramma più dettagliato e preciso.

Occorre quindi sviluppare un algoritmo che possa predire i parametri che determinano la curva reale, partendo da un diagramma determinato con una serie consecutiva di conteggi orari, tarandolo successivamente con ulteriori rilevamenti più ravvicinati. Gli algoritmi che definiscono i modelli analitici dei flussi veicolari possono così classificarsi, in base alla modalità di approssimazione della curva di domanda [5.19]:

- flusso espresso dalla curva “normale” o Gaussiana;
- flusso rappresentato dalla curva parabolica;
- flusso approssimato con la curva “sintetica tempo-flusso”.

Per la campagna sperimentale condotta in questo studio si è deciso di utilizzare una distribuzione del flusso veicolare secondo la curva teorica “flusso-tempo” (curva verde in Figura 5.3), semplificata poi da una curva di progetto “flusso-tempo” a variazione lineare (spezzata color arancio in Figura 5.3).

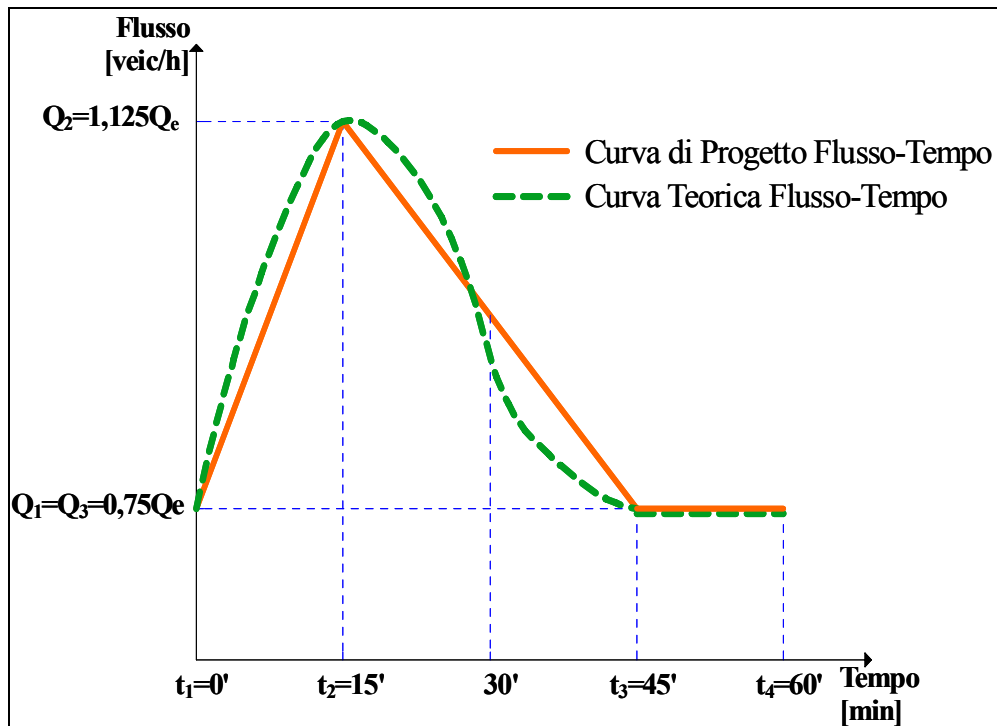


Figura 5.3: Curva teorica di distribuzione del flusso e curva di progetto usata nelle simulazioni [5.22]

Questa curva viene costruita con i seguenti dati di flusso ed i relativi tempi [5.19]:

- (Q_1, t_1) , valore della domanda di traffico Q_1 all'istante di tempo t_1 (istante precedente all'istante in cui la domanda di traffico presenta il suo massimo).
- (Q_2, t_2) , coppia di valori flusso/tempo che definisce il massimo valore raggiunto dalla domanda di traffico al tempo t_2 , nel periodo di punta considerato.
- (Q_3, t_3) , valori di flusso del traffico Q_3 al tempo t_3 istante di tempo successivo al tempo t_2 .

L'algoritmo matematico utilizzato per valutare tali coppie è basato sull'ipotesi che la domanda di traffico totale su un dato ramo durante l'ora di punta, sia pari a Q_e [veic/h]; allora bisogna porre:

$$Q_1 = Q_3 = \frac{0.75 \cdot Q_e}{60} \quad Q_2 = 1.5 \cdot Q_1 = \frac{1.125 \cdot Q_e}{60} \quad [\text{Eq. 5.2}]$$

Con:

- $t_1 = 0$ minuti (istante iniziale di distribuzione del flusso e precedente al momento in cui la domanda raggiunge il suo massimo);
- $t_2 = 15$ minuti (istante in cui si ritiene si verifichi il massimo della domanda di traffico);
- $t_3 = 45$ minuti (istante successivo al valore di “picco”);
- $t_4 = 60$ minuti (istante in cui il flusso si è stabilizzato).

Tali condizioni equivalgono ad un picco della durata di un'ora con 15 minuti di pre-picco e post-picco. Ciò fa sì che il flusso, durante il periodo di picco di un'ora, sia una buona approssimazione di Q_e .

Per descrivere completamente una domanda di flusso di traffico non è comunque sufficiente definire la sua variabilità nel tempo, ma è necessario descrivere sia la composizione del traffico (percentuale di veicoli pesanti, leggeri, ecc.) sia la sua effettiva distribuzione nell'area dell'incrocio (percentuali di svolta).

Per quanto riguarda la scelta effettuata nella definizione degli scenari da simulare, si è deciso di adoperare solo flussi veicolari espressi in veicoli equivalenti per ora, senza quindi introdurre la presenza di mezzi pesanti o di ciclomotori. Sono state così individuate quattro classi di flusso veicolare (F_i con $i=1, \dots, 4$) contraddistinte da diversi valori di Q_e e nomenclate nel seguente modo:

- Classe F_1 : $Q_e = 350$ veic_{eq}/h;
- Classe F_2 : $Q_e = 500$ veic_{eq}/h;
- Classe F_3 : $Q_e = 600$ veic_{eq}/h;
- Classe F_4 : $Q_e = 650$ veic_{eq}/h;

Si è stabilito inoltre di prendere in considerazione esclusivamente delle intersezioni bilanciate, ossia con una distribuzione delle svolte uniforme ed uguale per ogni ramo d'ingresso, senza privilegiare alcuna direzione di attraversamento dell'incrocio o di svolta. Si è così ottenuto una matrice O/D corrispondente a un'intersezione a rotatoria perfettamente equilibrata (Tab. 5.3).

	A	B	C	D	
A	-	1/8	6/8	1/8	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Attraversamenti </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Svolte DX </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffffff; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Svolte SX </div> </div>
B	1/8	-	1/8	6/8	
C	6/8	1/8	-	1/8	
D	1/8	6/8	1/8	-	

Tabella 5.3: Matrice O/D per rotatorie con distribuzione di traffico bilanciata [5.19]

A questo punto, dopo aver definito la distribuzione dei flussi lungo i diversi rami della rotatoria, per ogni classe di portata sono state calcolate le quattro matrici O/D (in funzione dei tempi t_i con $i=1, \dots, 4$ derivanti dalla curva flusso-tempo) da caricare in Vissim per poter simulare la variazione del traffico durante un'ora.

Nelle tabelle 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 sono riportate tutte e quattro le matrici, legate alle quattro classi di portata F_i , adoperate per la simulazione.

0'-15'	A	B	C	D	15'-30'	A	B	C	D
A	0	10	62	10	A	0	12	67	12
B	10	0	10	62	B	12	0	12	67
C	62	10	0	10	C	67	12	0	12
D	10	62	10	0	D	12	67	12	0

30'-45'	A	B	C	D	45'-60'	A	B	C	D
A	0	9	56	9	A	0	8	50	8
B	9	0	9	56	B	8	0	8	50
C	56	9	0	9	C	50	8	0	8
D	9	56	9	0	D	8	50	8	0

Tabella 5.4: Matrici O/D bilanciate per la classe di portata F_1 dove $Q_e=350$ veic/h

0'-15'	A	B	C	D	15'-30'	A	B	C	D
A	0	15	88	15	A	0	16	97	16
B	15	0	15	88	B	12	0	12	97
C	88	15	0	15	C	97	16	0	12
D	15	88	15	0	D	16	97	16	0

30'-45'	A	B	C	D	45'-60'	A	B	C	D
A	0	13	79	13	A	0	12	70	12
B	13	0	13	79	B	12	0	12	70
C	79	13	0	9	C	70	12	0	8
D	13	79	13	0	D	12	70	12	0

Tabella 5.5: Matrici O/D bilanciate per la classe di portata F_1 dove $Q_e=500$ veic/h

0'-15'	A	B	C	D
A	0	18	105	18
B	18	0	18	105
C	105	18	0	18
D	18	105	18	0

15'-30'	A	B	C	D
A	0	19	116	19
B	19	0	19	116
C	116	19	0	19
D	19	116	19	0

30'-45'	A	B	C	D
A	0	16	95	16
B	16	0	16	95
C	95	16	0	16
D	16	95	16	0

45'-60'	A	B	C	D
A	0	14	85	14
B	14	0	14	85
C	85	14	0	14
D	14	85	14	0

Tabella 5.6: Matrici O/D bilanciate per la classe di portata F_1 dove $Q_e=600$ veic/h

0'-15'	A	B	C	D
A	0	19	114	19
B	19	0	19	114
C	114	19	0	19
D	19	114	19	0

15'-30'	A	B	C	D
A	0	21	126	21
B	21	0	21	126
C	126	21	0	21
D	21	126	21	0

30'-45'	A	B	C	D
A	0	17	103	17
B	17	0	17	103
C	103	17	0	17
D	17	103	17	0

45'-60'	A	B	C	D
A	0	15	92	15
B	15	0	15	92
C	92	15	0	15
D	15	92	15	0

Tabella 5.7: Matrici O/D bilanciate per la classe di portata F_1 dove $Q_e=650$ veic/h

Le matrici O/D appena esposte sono state così caricate in excel e salvate in formato “*fma*” (Testo di Tabulazione) in modo tale da renderle leggibili per Vissim. La finestra riportata in Figura 5.4 mostra come, per una data classe di portata caratterizzata da un certo valore di Q_e e composta esclusivamente da autovetture, sia possibile caricare su Vissim le quattro matrici O/D corrispondenti alla distribuzione del flusso durante i quattro quarti d’ora.

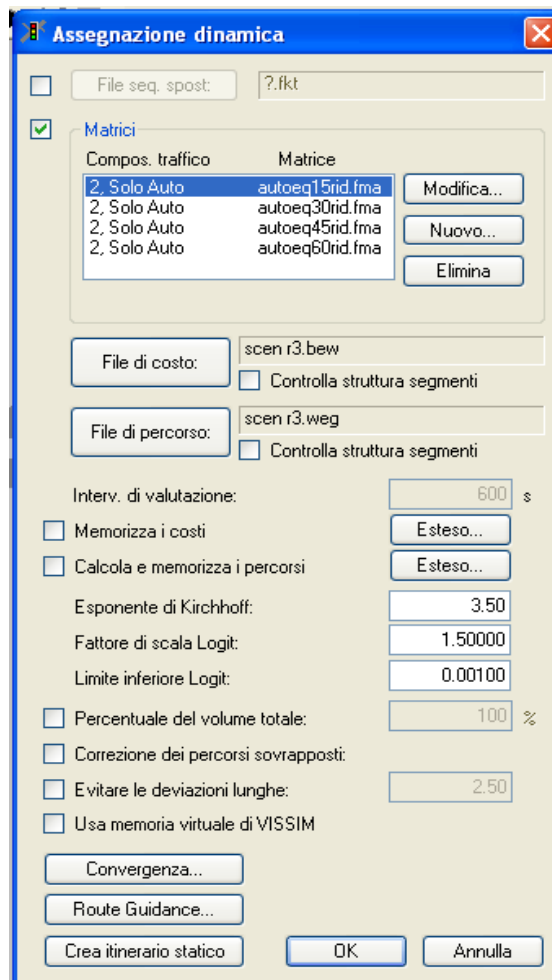


Figura 5.4: Finestra per l'assegnazione dinamica del flusso veicolare su Vissim

5.3.2. L'implementazione delle regole di circolazione

Come è stato già scritto nei paragrafi precedenti, le regole di circolazione consistono in tutta una serie di parametri opportunamente definiti in modo da poter realizzare una simulazione della rotatoria che sia il più possibile vicina al comportamento reale degli utenti.

Queste regole di circolazione si basano quindi sulla definizione delle seguenti caratteristiche dell'intersezione:

- velocità d'approccio agli ingressi (V_i con $i=1,2,3$);
- zone di riduzione della velocità (D_i , Figura 5.2, variabile in funzione di V_i);

- velocità di percorrenza della corona giratoria (legata alla formula dell'aderenza trasversale del veicolo in curva);
- regole di precedenza agli ingressi;
- comportamento del veicolo “successivo”.

Questi cinque punti verranno analizzati in dettaglio nei seguenti paragrafi.

5.3.2.1. Velocità d'approccio agli ingressi

La definizione della velocità d'approccio agli ingressi della rotatoria è un parametro estremamente importante per una corretta simulazione, perché influisce sensibilmente sulla capacità del nodo stesso e sui relativi tempi di percorrenza. In Vissim, un veicolo che non è disturbato mantiene sempre la sua velocità di percorrenza desiderata [5.18].

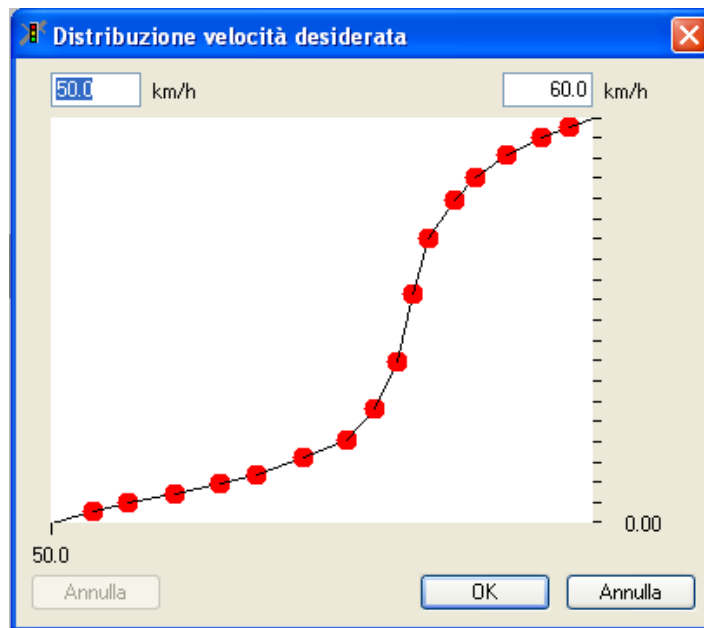


Figura 5.5: Finestra di Vissim per la distribuzione della velocità desiderata

E' possibile quindi definire un'opportuna distribuzione delle velocità inserendo rispettivamente i valori delle velocità minime e massime e delineando l'andamento della funzione attraverso l'utilizzo di punti ausiliari (punti rossi in Figura 5.5). Nel nostro caso si è sempre cercato di definire un andamento ad “S” della funzione delle velocità (Fig. 5.5) in modo che la distribuzione si avvicinasse il più possibile ad una

distribuzione Gaussiana (tale considerazione deriva dall'analisi di rilievi di velocità svolti su rotonde realmente esistenti).

In particolare, la Figura 5.5 mostra un esempio di distribuzione di velocità desiderata che è stata utilizzata per la simulazione degli scenari di rotonda: si può notare come i limiti massimi e minimi siano 50 e 60 Km/h e come al loro interno le velocità vengano distribuite secondo un andamento ad "S".

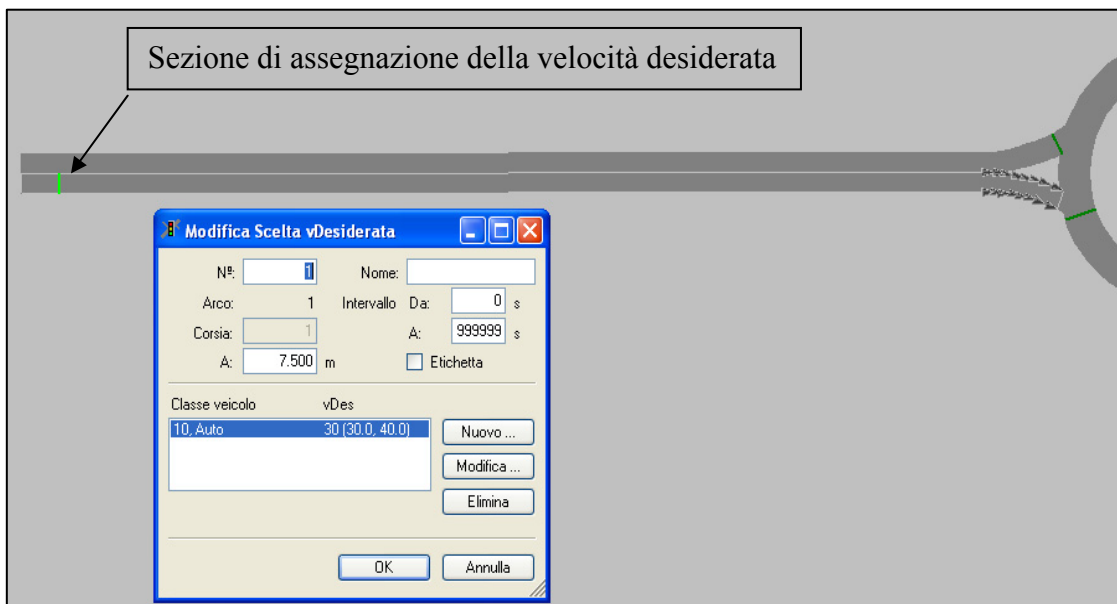


Figura 5.6: Finestra di Vissim per l'attribuzione della velocità desiderata ad un approccio

La Figura 5.6 mostra come sia possibile in Vissim assegnare ai veicoli generati dai "parcheggi" la velocità desiderata attraverso delle sezioni di assegnazione (quella in verde). I veicoli, in questo caso, se non hanno alcun tipo di condizionamento, mantengono questa velocità per tutto l'arco fino poi a raggiungere le zone di riduzione della velocità prima dell'ingresso sull'anello.

Per quanto riguarda la campagna di simulazione condotta in questo studio, dopo aver svolto una lunga serie di tentativi si è scelto di considerare tre classi di velocità d'approccio (V_i con $i=1,2,3$), così definite:

- Classe V_1 : $30 \text{ Km/h} \leq V \leq 40 \text{ Km/h}$;
- Classe V_2 : $40 \text{ Km/h} \leq V \leq 50 \text{ Km/h}$;
- Classe V_3 : $50 \text{ Km/h} \leq V \leq 60 \text{ Km/h}$.

5.3.2.2. Zone di riduzione della velocità

Nel caso in cui il comportamento relativo alla velocità deve variare solo per un breve tratto dell'itinerario (ad esempio lungo una svolta per l'ingresso in rotatoria), in Vissim l'uso delle "zone di rallentamento" è l'elemento più indicato. A ciascun veicolo che entra nella zona di rallentamento viene assegnata una nuova velocità desiderata presa dalla distribuzione di velocità selezionata. La decelerazione all'interno di una zona di riduzione della velocità può essere definita in base alle caratteristiche delle particolari classi di veicolo: nel nostro caso, trattandosi di simulazioni di sole autovetture si è adoperata una decelerazione standard di 2 m/s^2 .

Quando il veicolo esce dall'area di rallentamento, ad esso viene automaticamente riassegnata la velocità che aveva prima oppure gliene viene data una nuova, se quest'ultima è stata definita attraverso una sezione d'attribuzione della velocità desiderata [5.18].

Le Figure 5.7 e 5.8 mostrano rispettivamente come sia possibile definire le zone di rallentamento in Vissim e dove quest'ultime siano ubicate sui rami di un generico scenario di rotatoria.

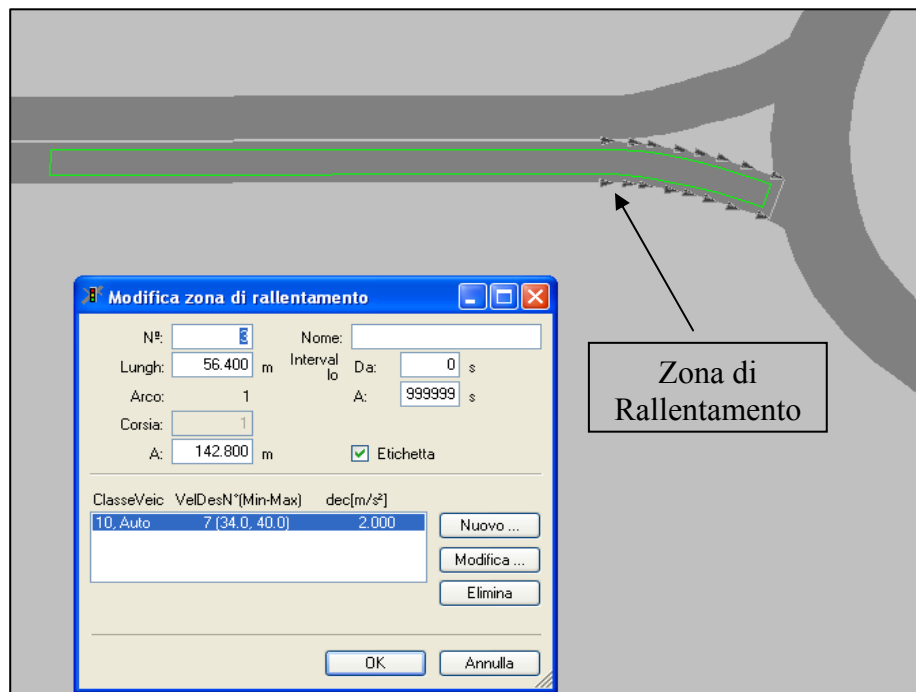


Figura 5.7: Finestra di Vissim per la definizione delle zone di rallentamento su un ingresso

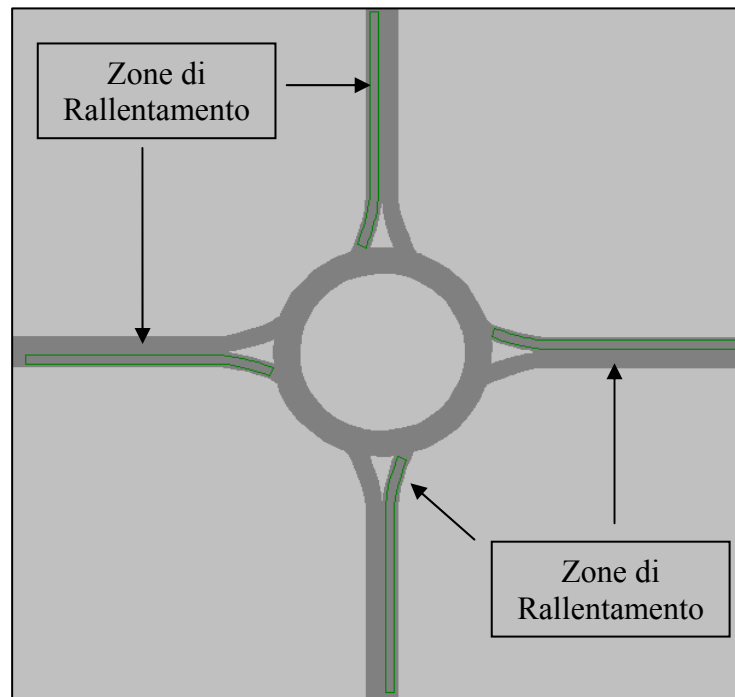


Figura 5.8: Posizionamento delle zone di rallentamento su di una rotatoria in Vissim

Come già accennato nel Paragrafo 5.2.2., la lunghezza delle zone di rallentamento è stata scelta in funzione della velocità d'approccio di ciascun scenario e sulla base di dati sperimentali derivanti da studi condotti sulla determinazione della lunghezza dei tratti di decelerazione dei veicoli che si approssimano ad una rotatoria con una data velocità da parte del FHWA (*Federal Highway Administration*) [5.24] e riportati poi sulla normativa americana.

I dati presi in considerazione sono i seguenti esposti in Tabella 5.8:

V (Km/h)	D (m)
70	100
50	80
40	60
35	50
20	35

Tabella 5.8: Correlazione tra la lunghezza della zona di rallentamento e la velocità d'approccio

Da un'accurata analisi dei dati di Tabella 5.8 è stata estrapolata una relazione lineare che interpola tali valori e che lega linearmente la lunghezza della zona di riduzione della velocità con la velocità d'approccio.

La relazione è la seguente:

$$D_{li} = 1.29 \cdot V_{mi} + 11.43 \quad [\text{Eq. 5.3}]$$

Dove:

D_{li} = lunghezza della zona di rallentamento [m];

V_{mi} = velocità media d'approccio prima del rallentamento [Km/h].

Nel nostro caso particolare, avendo definito tre classi di velocità d'approccio, avremo necessariamente tre lunghezze di zone di rallentamento.

A queste zone di riduzione della velocità, così come è possibile notare dalla Figura 5.7, bisogna associare, oltre che una lunghezza, anche una distribuzione di velocità. La determinazione di queste distribuzioni è del tutto analoga a quella spiegata nel paragrafo precedente, con l'unica considerazione però che, nel caso delle zone di rallentamento, gli estremi superiore ed inferiore della distribuzione vengono presi rispettivamente uguale al limite superiore della distribuzione della velocità d'approccio del ramo ed al limite superiore della corrispondente distribuzione delle velocità sulla corona giratoria (questa verrà definita nel sottoparagrafo successivo).

Quindi, mentre la lunghezza della zona di rallentamento è legata esclusivamente alla velocità d'approccio, la sua distribuzione di velocità è invece correlata sia alla velocità d'approccio che a quella sull'anello (che a sua volta dipende dal raggio della circonferenza inscritta).

Parametri		Zona di rallentamento	
Velocità d'approccio (Km/h)	Raggio circonferenza inscritta (m)	Distribuzione velocità (Km/h)	Lunghezza (m)
30-40	15	[28,40]	56,4
	20	[31,40]	
	25	[34,40]	
	30	[37,40]	
40-50	15	[28,50]	69,3
	20	[31,50]	
	25	[34,50]	
	30	[37,50]	
50-60	15	[28,60]	82,1
	20	[31,60]	
	25	[34,60]	
	30	[37,60]	

Tabella 5.9: Definizione delle velocità e delle lunghezze delle zone di rallentamento

La Tabella 5.9 riassume il tutto, considerando le tre classi di velocità (V_i) ed i quattro raggi esterni (R_i , con $i=1, \dots, 4$):

5.3.2.3. Velocità di percorrenza della corona giratoria

Per la definizione della velocità di percorrenza sull'anello, il discorso è praticamente identico a quello fatto per la determinazione delle velocità d'approccio sui rami della rotatoria. In particolare, in questo caso, la scelta dei limiti superiore ed inferiore è correlata alla valutazione della velocità media (V_m) di percorrenza dell'anello ottenibile dalla [Eq. 5.1], ossia dallequazione dell'equilibrio trasversale in curva sotto le condizioni imposte nel Paragrafo 5.2.2. (pendenza trasversale pari a 0 e coefficiente d'aderenza trasversale uguale a 0.23).

Infatti, considerando una distribuzione di tipo normale delle velocità sulla corona giratoria, allora il limite superiore dell'intervallo diventa pari a " $V_m + 1.96 * \sigma$ ", mentre viceversa il limite inferiore sarà pari a " $V_m - 1.96 * \sigma$ ". Il valore della deviazione standard " σ " è stato posto pari a 5 Km/h, in quanto questo è il risultato ottenuto da una serie di rilievi di velocità condotti su rotatorie realmente esistenti.

Quindi in funzione dei raggi esterni R_i , già definiti nel precedente paragrafo, sono state individuate quattro distribuzioni di velocità, così come riportato nella Tabella 5.10.

	Raggio circonferenza inscritta (m)	Distribuzione velocità Anello(Km/h)
R_1	15	[8-28]
R_2	20	[12-31]
R_3	25	[14-34]
R_4	30	[17-37]

Tabella 5.10: Definizione dei limiti di distribuzione della velocità sulla corona giratoria

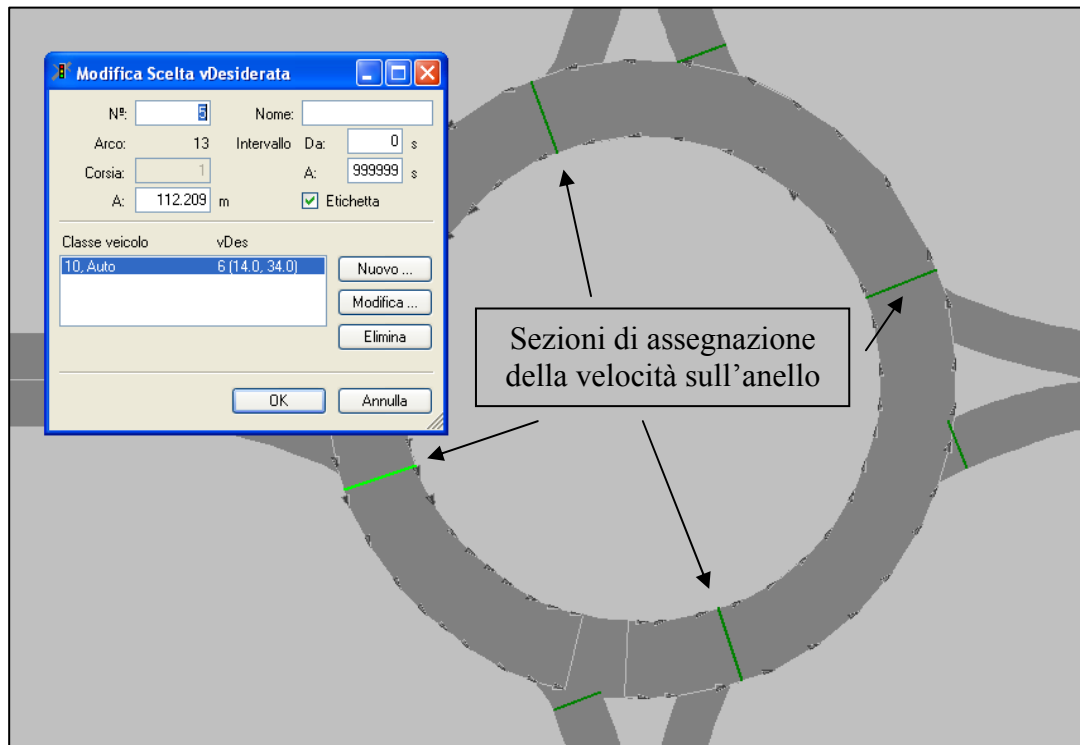


Figura 5.9: Posizionamento delle zone di rallentamento su di una rotatoria in Vissim

In Figura 5.9 è possibile notare il posizionamento delle sezioni di assegnazione della velocità sull'anello: ciascuna delle quattro sezioni introdotte è ubicata subito dopo la connessione che lega l'arco in ingresso con l'arco che definisce la corona giratoria.

5.3.2.4. Definizione delle regole di precedenza

Vissim consente di modellizzare con estrema precisione la regolazione delle precedenze degli incroci con schema a rotatoria.

In particolare, per definire i parametri che regolano l'entrata di una rotatoria con due corsie all'ingresso, è necessario inserire molte regole di precedenza, ognuna delle quali svolge un proprio compito. Nel caso di una rotatoria con una sola corsia in ingresso ed all'anello, la situazione diventa abbastanza più semplice: in sostanza, basta definire due sezioni di diritto di precedenza associandole ad una sola linea d'attesa (per ciascuna categoria di veicolo).

Per la nostra campagna di simulazione, avendo considerato esclusivamente flussi espressi in veicoli equivalenti, allora è bastato definire le condizioni delle due sezioni di precedenza per ciascuna linea d’attesa posta all’ingresso dei quattro nodi della rotatoria.

Sulla base di quanto già espresso nel Paragrafo 5.2.3, le due principali condizioni da controllare sulle sezioni di diritto di precedenza sono:

- il minimo intervallo di tempo (*Minimum Gap*);
- la minima interdistanza (*Minimum Headway*).

Dove per *gap* minimo s’intende il tempo necessario al primo veicolo che si avvicina alla sezione di diritto di precedenza per arrivare su quest’ultima alla sua velocità corrente. L’*headway* minimo è invece definito come la distanza tra la sezione di diritto di precedenza (linea *c* in Figura 5.2) ed il primo veicolo che si avvicina a questa linea.

Nelle Figure 5.10 e 5.11 vengono rispettivamente definiti i parametri di settaggio per la sezione di precedenza 1 (linea *c* in Figura 5.2) e per la sezione di precedenza 2 (linea *d* in Figura 5.2).

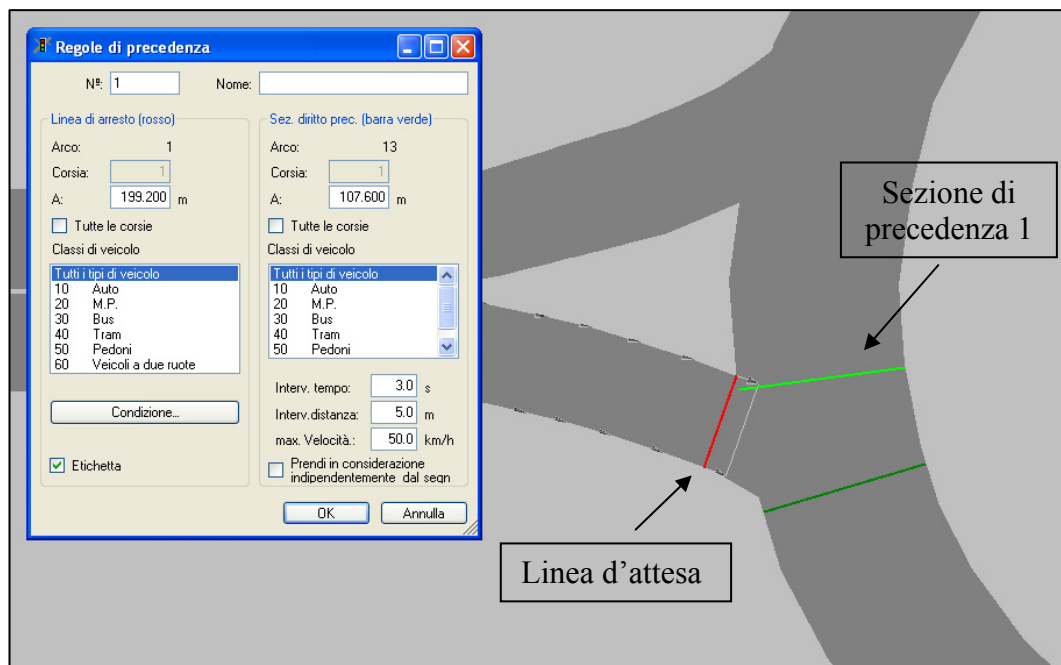


Figura 5.10: Posizionamento e definizione delle regole di precedenza su di una rotatoria in Vissim

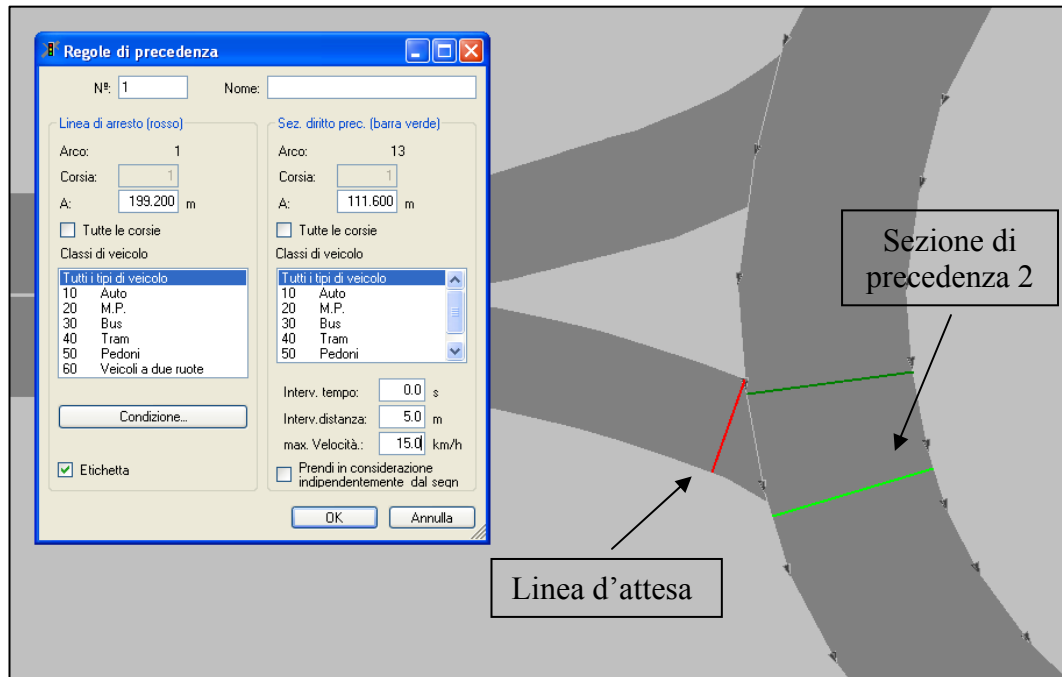


Figura 5.11: Posizionamento e definizione delle regole di precedenza su di una rotatoria in Vissim

Quindi, facendo riferimento alla Figura 5.10, la sezione di precedenza 1, in base ai settaggi adoperati per la nostra campagna di simulazione, è stata posta ad una distanza $D_2 = 0.5 \text{ m}$ dall'angolo destro dell'isola divisionale, mentre i valori utilizzati per definire il minimo intervallo temporale e la minima interdistanza sono stati rispettivamente di $3.0 - 3.5 - 4.0 \text{ secondi}$ per il *gap* e di 5.0 metri per l'*headway*. Queste regole di precedenza entrano in funzione in condizioni di traffico normale, poiché è stata anche definita una velocità massima di 50 Km/h , la quale stabilisce che solo i veicoli che si avvicinano alla sezione con diritto di precedenza 1 con una velocità minore di questa velocità massima verranno considerati dall'interdistanza della regola di precedenza.

Considerando invece la Figura 5.11, si può intanto dire che la sezione di precedenza 2, per le nostre simulazioni, è stata posta ad una distanza $D_4 = 4.0 \text{ m}$ dalla sezione di precedenza 1. Per questa sezione è bastato soltanto definire l'interdistanza minima pari a 5.0 metri con una $V_{max} = 15 \text{ Km/h}$, in quanto queste regole diventano effettive esclusivamente in condizioni di traffico congestionato sull'anello, ossia quando la velocità dei veicoli non supera i 15 Km/h .

In ogni caso, affinché un veicolo possa entrare in rotatoria è necessario che siano soddisfatte entrambe le condizioni dettate dalle due sezioni di diritto di precedenza.

E' chiaro comunque che tutti i parametri che sono stati scelti per la modellizzazione delle regole di precedenza derivano in parte da un accurato studio condotto sui dati misurati nella realtà su rotatorie esistenti [5.21] ed in parte da un'attenta osservazione delle simulazioni animate in modo che tra i veicoli non avvenissero degli scontri. Quindi la definizione di molti di questi valori è giunta solo al termine di numerose simulazioni (più di 3.500 circa!) ed attraverso un'approfondita analisi bibliografica [5.8] [5.9] [5.15] [5.16].

Nella Tabella 5.11 sono stati riassunti tutti i parametri utilizzati per la realizzazione delle regole di precedenza (dove D_2 , D_3 e D_4 sono le grandezze riportate in Figura 5.2).

D_2	0,5 m		
D_3	Se la velocità sull'anello è \Rightarrow	15÷50 km/h \downarrow	≤ 15 km/h \downarrow
		Linea di precedenza 1	Linea di precedenza 2
	Gap Minimo	3.0 – 3.5 – 4.0 sec	0 sec
	Headway Minimo	5.0 m	5.0 m
D_4	4.0 m		

Tabella 5.11: Sintesi dei parametri per la modellizzazione delle regole di precedenza in Vissim

La scelta di utilizzare tre diversi valori del *gap* minimo (3.0, 3.5 e 4.0 secondi) è stata fatta per poter valutare l'effetto che questo parametro psicotecnico, fondamentale per la scelta degli utenti di immettersi o meno in rotatoria, ha sulle caratteristiche prestazionali di una rotatoria.

5.3.2.5. Comportamento del “veicolo successivo”

Ultimo elemento per una corretta definizione delle regole di circolazione in rotatoria è il comportamento del cosiddetto veicolo “successivo”.

Come già ampiamente esposto nel Paragrafo 5.2.1., in Vissim, il comportamento dei veicoli è legato al modello a quattro modalità di guida introdotto da Wiedemann nel 1974 [5.4] ed aggiornato poi dal lavoro dei ricercatori dell'Università di Karlsruhe.

Questo modello prevede la definizione dei parametri per quattro diverse casistiche di comportamento, ossia:

- comportamento del veicolo successivo;
- comportamento di cambio corsia;
- comportamento laterale;
- comportamento al segnale di giallo.

Quello che a noi interessa, per la campagna di simulazione condotta in questa indagine, è la definizione del comportamento del veicolo successivo. Infatti avendo scelto esclusivamente, come scenari, delle intersezioni a rotatoria a singola corsia è chiaro che non ci potranno essere né manovre di cambio corsia, né possibili scontri laterali (visto che i veicoli non si possono affiancare su una sola corsia), né tantomeno problemi con il segnale di giallo, dato che la rotatoria è di solito un'intersezione non regolata da lanterne semaforiche.

Quindi, in Figura 5.12, è riportata la finestra di Vissim che consente all'utente di settare i parametri per la definizione del comportamento di guida dei veicoli.

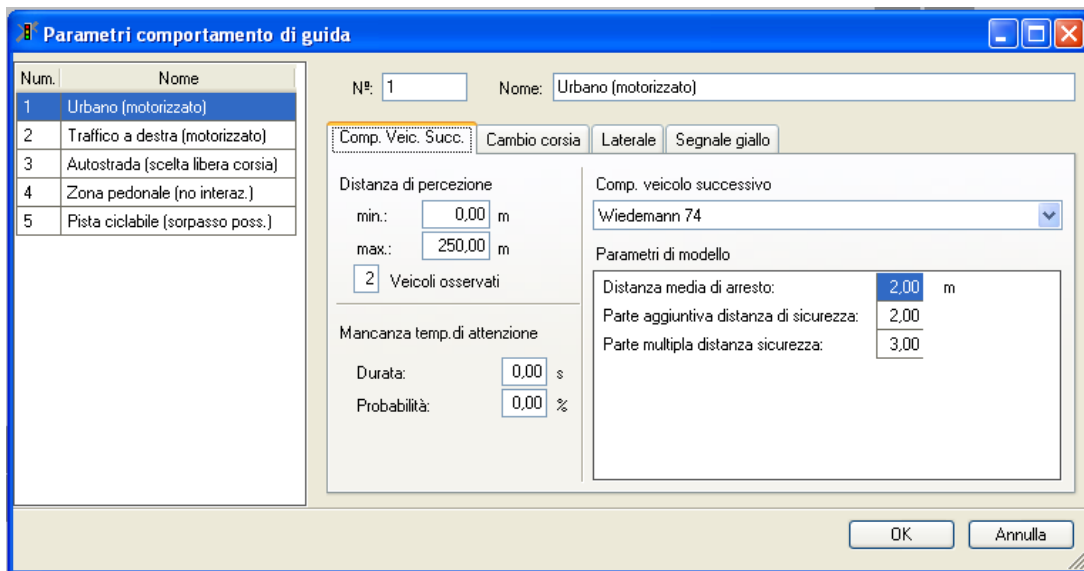


Figura 5.12: Finestra di Vissim per la definizione del comportamento di guida dei veicoli

Come si può notare dalla Figura 5.12, le scelte fatte per la modellizzazione del comportamento del veicolo “successivo” sono state quelle di utilizzare il modello di

Wiedemann del '74 [5.4], che è specifico per il comportamento dei veicoli in area urbana, lasciando i parametri settati di *default*, ossia:

- distanza media di arresto pari a 2.0 m. Essa definisce la distanza desiderata media tra macchine ferme;
- Parte Costante della distanza di sicurezza uguale a 2.0 m e Parte Moltiplicativa della distanza di sicurezza pari a 3.0 m. Queste ultime hanno effetto diretto sul calcolo della distanza di sicurezza desiderata.

5.3.3. La classificazione degli scenari adoperati per la simulazione

Nei capitoli precedenti si è ampiamente discusso su come sia possibile determinare il livello di servizio di un'intersezione stradale con schema a rotatoria.

In particolare, grazie ad un duplice approccio operativo, è stato possibile chiarire le modalità attraverso cui tutte le variabili in gioco (flussi veicolari, caratteristiche geometriche dell'incrocio, parametri psicotecnici degli utenti) influiscono sulle caratteristiche prestazionali dell'intersezione stessa.

Pertanto, il primo obiettivo che si vuole raggiungere in questo studio, è quello di impostare una metodologia razionale che permetta di definire il livello di servizio delle rotatorie, in funzione dei principali parametri che le caratterizzano (geometria, flussi veicolari, velocità operative, comportamento di guida).

A tal fine, si è ricorso all'utilizzo della microsimulazione, attraverso un'opportuna scelta di scenari da modellizzare.

Per la definizione di questi scenari si è partiti da una configurazione di rotatoria con le seguenti caratteristiche geometriche standard:

- larghezza delle entrate pari a 3.5 m (grandezza costante);
- larghezza delle uscite pari a 4.0 m (grandezza costante);
- larghezza delle isole divisionali pari a 6.0 m (grandezza variabile);
- larghezza della corona giratoria pari a 6.0 m (grandezza variabile);
- lunghezza del raggio della circonferenza inscritta pari a 25 m (grandezza variabile).

Ed è stato scelto di far variare una per volta queste caratteristiche geometriche, combinandole con le diverse classi di flusso veicolare, di velocità d'approccio e di comportamento di guida. Si è dato così origine a tre macrogruppi di scenari ognuno caratterizzato per la variazione di uno solo dei parametri geometrici su esposti e contraddistinto da una lettera che indica l'elemento geometrico che si sta facendo variare. Di seguito vengono riportati i campi di variabilità delle tre grandezze:

- Scenari R_i correlati alla variazione del Raggio esterno della rotatoria, con: $R_1 = 15$ m, $R_2 = 20$ m, $R_3 = 25$ m ed $R_4 = 30$ m.
- Scenari I_i correlati alla variazione dell'Isola divisionale degli ingressi, con: $I_0 = 6$ m, $I_1 = 8$ m, $I_2 = 10$ m, $I_3 = 12$ m e $I_4 = 14$ m.
- Scenari C_i correlati alla variazione della Corona giratoria della rotatoria, con: $C_0 = 6$ m, $C_1 = 7$ m, $C_2 = 8$ m, $C_3 = 9$ m e $C_4 = 10$ m.

Pertanto, ciascuna di queste tre tipologie di scenario presenterà quattro variabili: una geometrica, una di traffico, una di velocità d'approccio ed un'altra di comportamento di guida.

Il tabellone riportato in Figura 5.13 riassume tutte le possibili combinazioni di scenario scelte per le simulazioni.

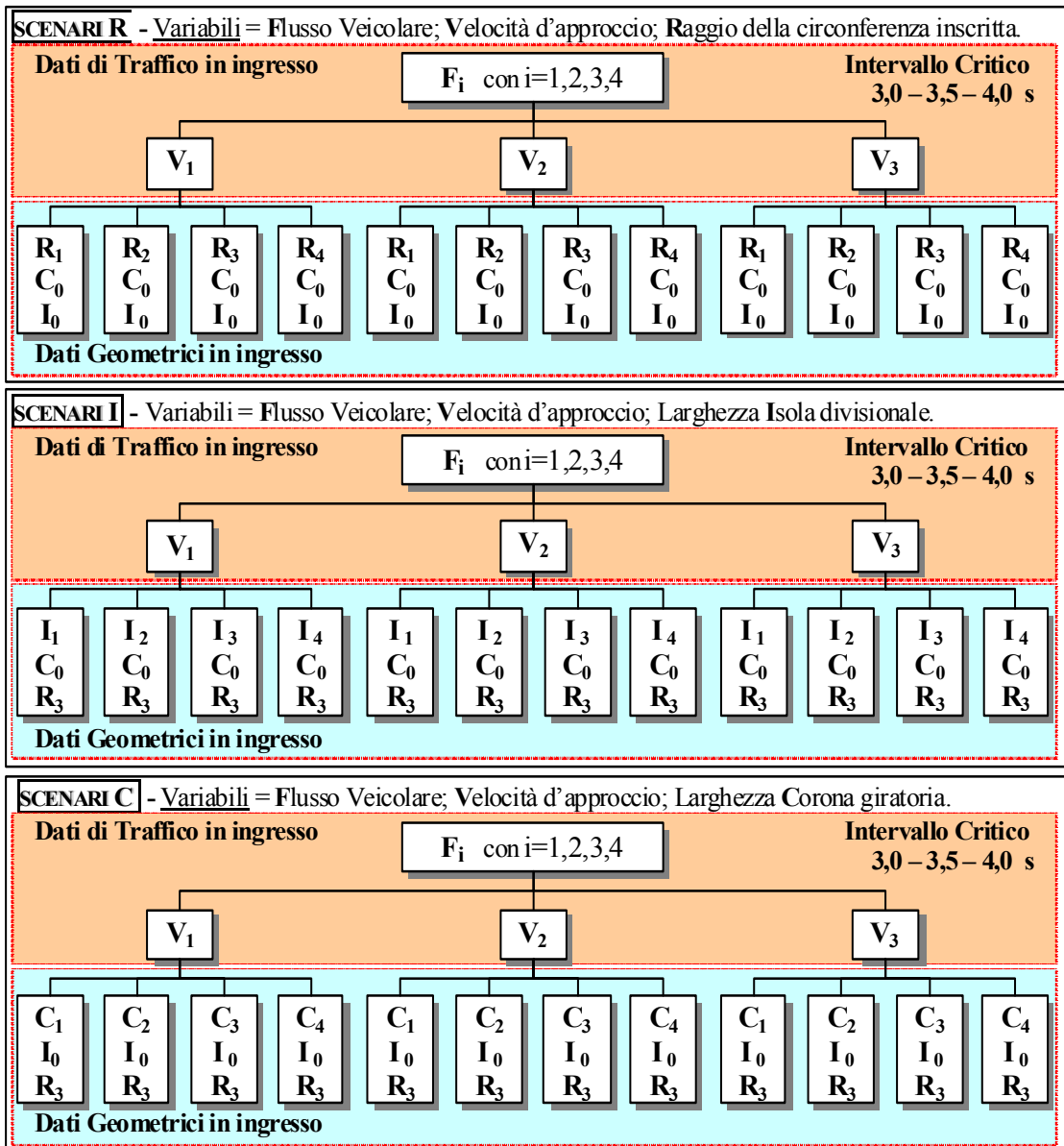


Figura 5.13: Set di scenari utilizzati per la microsimulazione

Da una attenta lettura del tabellone precedente si può affermare che:

- Gli Scenari R_i , presentano le seguenti variabili: Flusso veicolare (F_i), Velocità d'approccio (V_i), Raggio esterno della rotatoria (R_i) ed Intervallo Critico (IC_i).
- Gli Scenari I_i , presentano le seguenti variabili: Flusso veicolare (F_i), Velocità d'approccio (V_i), Larghezza dell'Isola divisionale (I_i) ed Intervallo Critico (IC_i).

- Gli *Scenari* C_i , presentano le seguenti variabili: Flusso veicolare (F_i), Velocità d'approccio (V_i), Larghezza della Corona giratoria (C_i) ed Intervallo Critico (IC_i).

Nella Tabella 5.12 sono invece stati riassunti tutti i campi di variabilità delle sei variabili che entrano in gioco nella definizione degli scenari.

PARAMETRI	DATI IN INGRESSO
Flusso Veicolare	$F_1=350\text{veic/h}$; $F_2=500\text{veic/h}$; $F_3=600\text{veic/h}$; $F_4=650\text{veic/h}$
Velocità d'Approccio	$V_1=30\div 40\text{km/h}$; $V_2=40\div 50\text{km/h}$; $V_3=50\div 60\text{km/h}$;
Raggio Circonferenza Inscritta	$R_1=15\text{m}$; $R_2=20\text{m}$; $R_3=25\text{m}$; $R_4=30\text{m}$;
Larghezza Isola Divisionale	$I_0=6\text{m}$; $I_1=8\text{m}$; $I_2=10\text{m}$; $I_3=12\text{m}$; $I_4=14\text{m}$;
Larghezza Corona Giratoria	$C_0=6\text{m}$; $C_1=7\text{m}$; $C_2=8\text{m}$; $C_3=9\text{m}$; $C_4=10\text{m}$;
Intervallo Critico	$IC_1=3.0\text{ s}$; $IC_2=3.5\text{ s}$; $IC_3=4.0\text{ s}$;

Tabella 5.12: Campi di variabilità dei parametri per la modellizzazione degli scenari in Vissim

In definitiva il numero di scenari di rotatoria complessivi analizzati attraverso l'utilizzo di Vissim è stato pari a 432.

Anche in questo caso, la scelta definitiva delle variabili e dei loro range di variabilità è arrivata dopo una lunga serie di simulazioni (più di 3.500), che sono servite per stabilire quali fossero gli elementi geometrici, comportamentali, di traffico e di velocità che mostravano gli effetti più significativi sui parametri prestazionali di una rotatoria (capacità, media dei ritardi e lunghezza delle code).

5.4. Analisi dei dati sperimentali

Sulla base dei parametri assunti per le simulazioni dei diversi scenari, riportiamo di seguito i risultati ottenuti mediante le simulazioni condotte con Vissim.

E' opportuno precisare che, essendo Vissim, come tutti i software di microsimulazione, un programma che simula il traffico in tipologia *one-shot* [5.11] (ossia in maniera pseudo-aleatoria, infatti diverse simulazioni dello stesso scenario danno risultati prossimi fra di loro, ma non identici), allora, per poter dare validità statistica ai risultati ottenuti, sono state compiute tre simulazioni per ognuno dei 432 scenari (per un totale di 1.296 simulazioni effettivamente analizzate) definiti nel precedente paragrafo [5.22]. I dati ottenuti per ciascun scenario derivano quindi dalla media sui valori ricavati per ognuna delle tre simulazioni e su ogni ramo della

rotatoria.

Pertanto i risultati ottenuti da queste simulazioni ed espressi in termini di tempo medio d'attesa, sono stati aggregati secondo le tre macro categorie di scenari (R_i , I_i e C_i).

I dati così ricavati dalle diverse configurazioni di rotatoria sono stati altresì sintetizzati, mediante degli abachi, in termini di “livello di servizio”.

Per le diverse fasce dei livelli di servizio si è fatto riferimento ai limiti riportati dall'HCM 2000 [5.25] per le intersezioni non semaforizzate e riproposti nella Tabella 5.13



LIVELLO DI SERVIZIO		TEMPO MEDIO D'ATTESA (sec/veic)
A		≤ 10
B		10÷15
C		15÷25
D		25÷35
E		35÷50
F		> 50

Tabella 5.13: Livelli di servizio per le intersezioni non semaforizzate secondo l'HCM 2000 [5.25]

5.4.1. Analisi dei dati degli scenari R_i

Gli scenari R_i sono caratterizzati principalmente dalla seguente variabile geometrica: il raggio del cerchio inscritto della rotatoria.

Per questo tipo di scenari però entrano in gioco altre tre variabili di tipo non geometrico, ossia:

- il flusso veicolare (F_i);
- la velocità d'approccio (V_i);
- l'intervallo critico (IC_i).

In ogni caso, c'è da aggiungere che la variazione del raggio del cerchio inscritto per ogni scenario, lasciando fissi gli altri parametri geometrici visti nel Paragrafo 5.3.3., comporta anche l'automatica variazione dell'angolo di deflessione β e della sequenza dei raggi di curvatura $R1$, $R2$ ed $R3$ (riferendoci alla Figura 1.16).

A tal proposito, la verifica di una corretta modellizzazione delle rotatorie nei diversi scenari in Vissim, è passata proprio dal controllo di queste grandezze in funzione della variabilità dell'elemento geometrico principale, che in questo caso era il raggio esterno della rotonda.

La Tabella 5.14 mostra la correlazione esistente tra queste variabili geometriche.

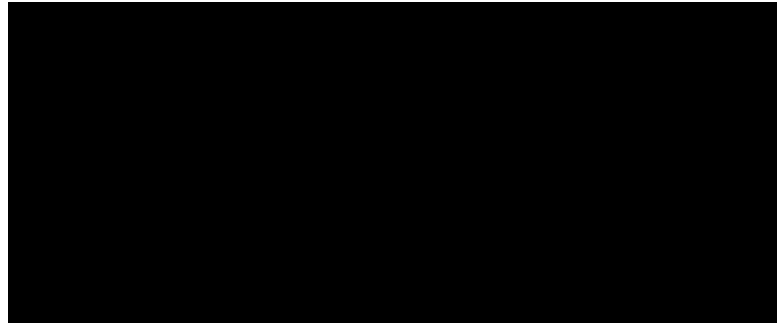


Tabella 5.14: Relazione tra Angolo di deflessione, Raggi di deflessione e Raggio esterno della rotatoria

Ciò si nota ancora meglio dalla riproposizione di questi dati nei quattro grafici riportati nelle Figure 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17.

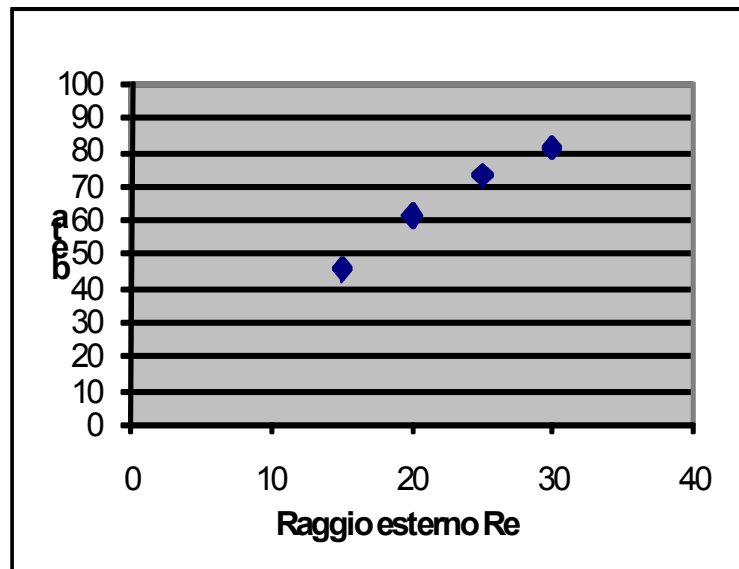


Figura 5.14: Relazione tra Angolo di deflessione β e Raggio esterno della rotatoria

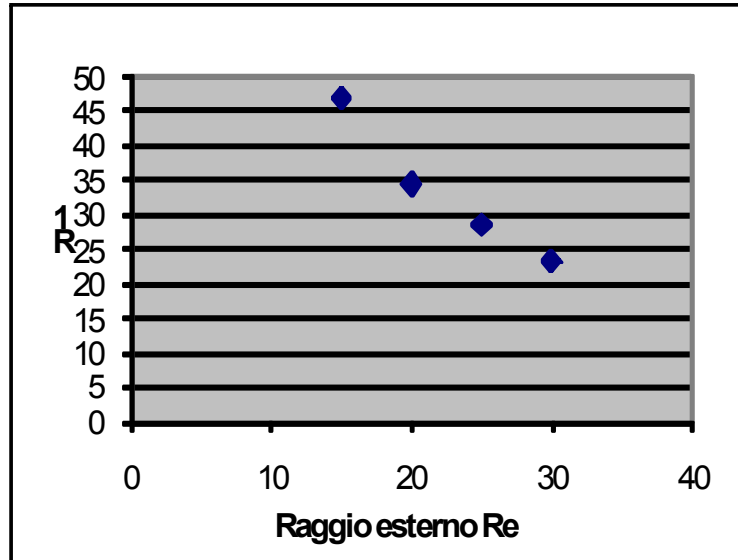


Figura 5.15: Relazione tra Raggio di deflessione R1 e Raggio esterno della rotatoria

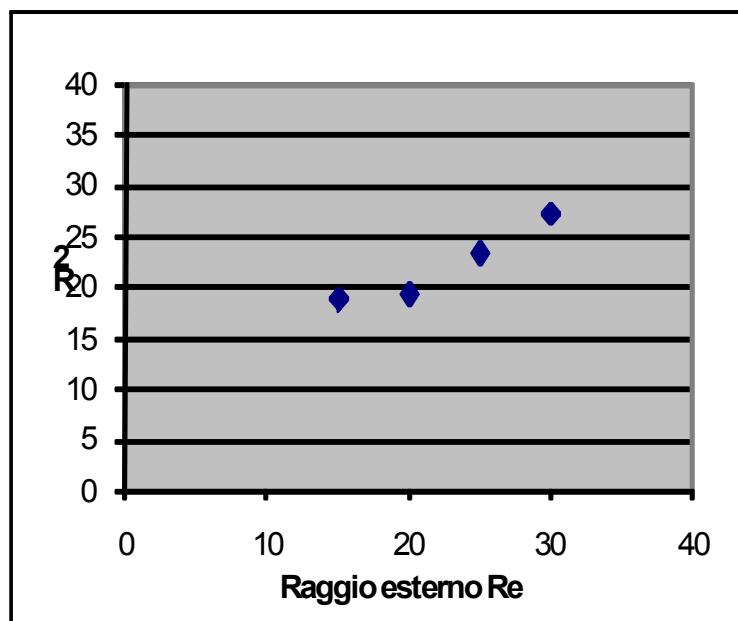


Figura 5.16: Relazione tra Raggio di deflessione R2 e Raggio esterno della rotatoria

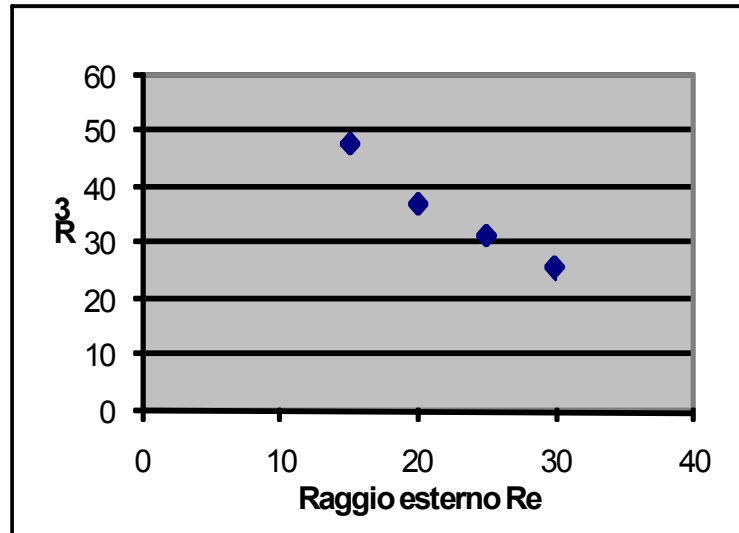


Figura 5.17: Relazione tra Raggio di deflessione R_3 e Raggio esterno della rotatoria

Da una rapida lettura di questi grafici si nota come all'aumentare del raggio esterno della rotatoria, aumentino sia l'angolo di deflessione β che il raggio di deflessione R_2 . Viceversa, all'aumentare sempre del raggio del cerchio inscritto, diminuiscono sia il raggio R_1 che quello R_3 .

Entrambe le considerazioni risultano riscontrabili in letteratura scientifica e ciò a conforto della congruenza geometrica degli scenari.

Nelle Tabelle 5.15, 5.16 e 5.17 sono riportati i risultati.

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 3,0 s						
Scenari	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
R1	2,8	2,8	2,8	10,8	11,0	11,5
R2	2,9	2,8	2,9	9,9	9,7	11,5
R3	2,8	2,8	3,1	9,5	9,0	11,2
R4	2,5	2,3	2,4	7,5	8,5	8,3
Scenari	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
R1	30,3	34,4	37,5	68,6	69,4	71,7
R2	26,6	30,3	32,8	58,5	63,5	62,3
R3	26,6	27,5	31,1	60,0	60,0	61,3
R4	17,1	18,3	22,8	42,1	43,8	44,1

Tabella 5.15: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari R_i (gap critico = 3.0 s)

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 3,5 s						
Scenari	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
R1	3,8	3,8	3,9	14,9	14,5	17,9
R2	3,7	4,2	4,2	17,7	15,3	18,5
R3	4,3	4,8	4,6	20,6	17,9	22,9
R4	3,6	3,8	4,1	15,6	19,1	18,4
Scenari	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
R1	61,0	60,6	62,9	88,2	89,3	94,5
R2	56,5	63,7	48,6	87,8	91,6	99,2
R3	96,9	96,4	93,2	107,2	109,7	110,6
R4	65,7	85,5	72,7	100,3	101,2	107,0

Tabella 5.16: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari R_i (gap critico = 3.5 s)

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 4,0 s						
Scenari	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
R1	5,5	5,5	6,0	26,8	24,7	31,1
R2	6,5	6,5	6,6	41,7	50,9	56,0
R3	7,5	7,0	7,7	55,0	60,5	76,7
R4	5,8	6,0	6,7	56,2	56,1	55,0
Scenari	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
R1	88,7	84,4	91,9	106,7	107,4	109,8
R2	76,1	76,7	87,9	116,5	122,7	121,4
R3	122,9	127,6	127,7	130,7	133,6	132,2
R4	118,6	121,3	123,0	126,7	130,4	130,4

Tabella 5.17: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari R_i (gap critico = 4.0 s)

Le Tabelle 5.15, 5.16 e 5.17 riportano i tempi medi d'attesa valutati da Vissim durante la simulazione degli scenari R_i in funzione della variazione dei gap critici, dei flussi di traffico e delle velocità d'approccio.

Nei paragrafi successivi verranno riportati i risultati delle simulazioni differenziandoli per flussi di traffico, mettendo a confronto i dati ottenuti con i diversi intervalli critici e determinando anche i diversi livelli di servizio per le varie combinazioni di variabili.

5.4.1.1. Risultati degli scenari R_i con $F_1=350$ veic/h

Prendendo in considerazione solo i risultati ottenuti con gli scenari R_i applicando il flusso di traffico $F_1=350$ veic/h, si ottengono i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del gap critico e della velocità d'approccio.

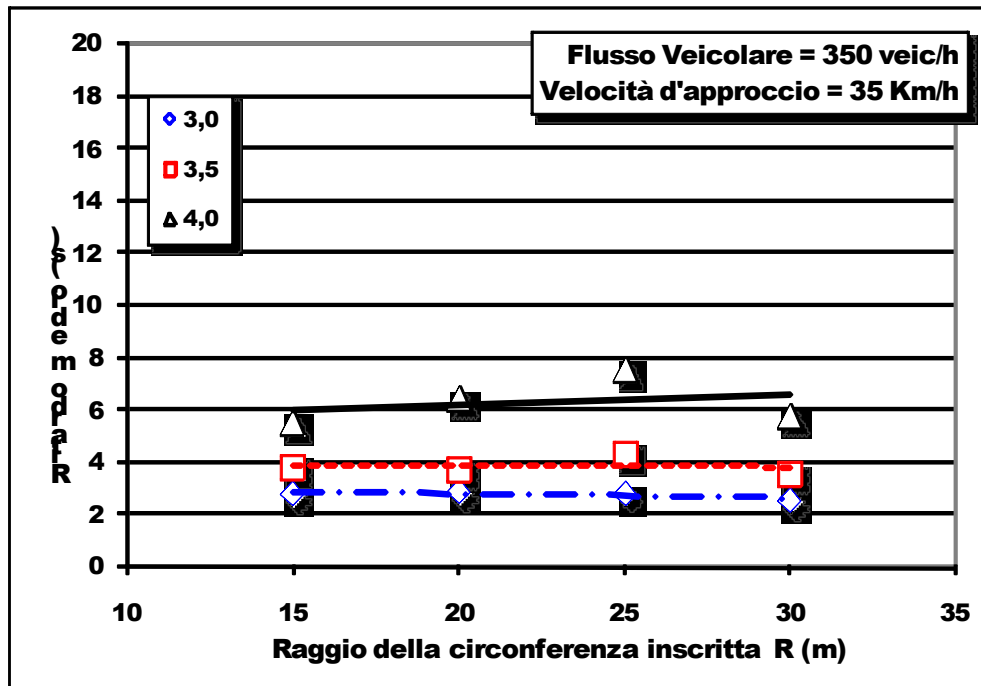


Figura 5.18: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=350$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

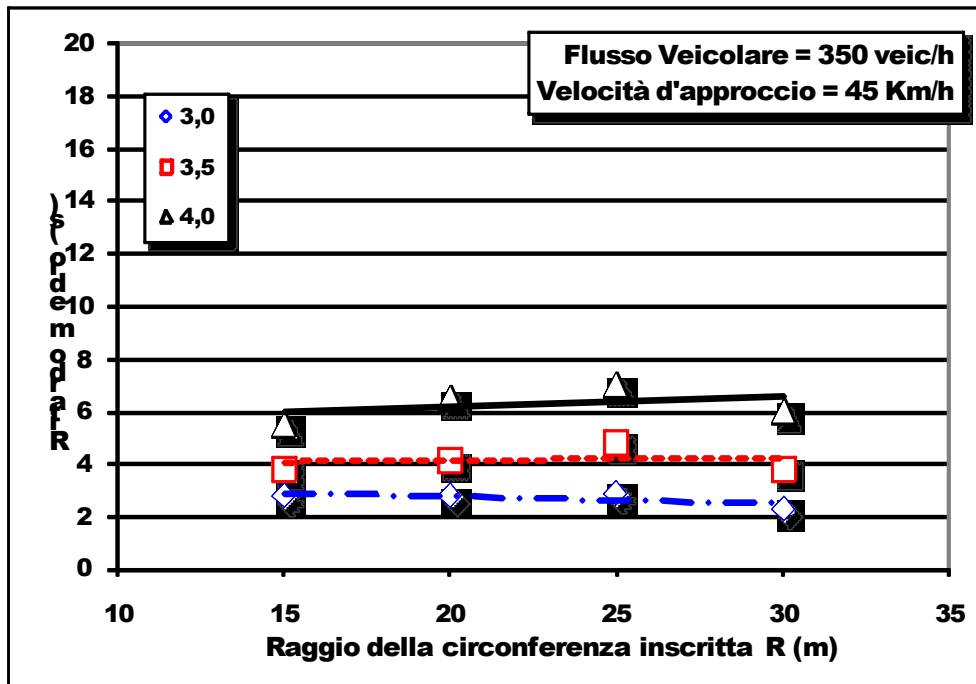


Figura 5.19: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=350$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

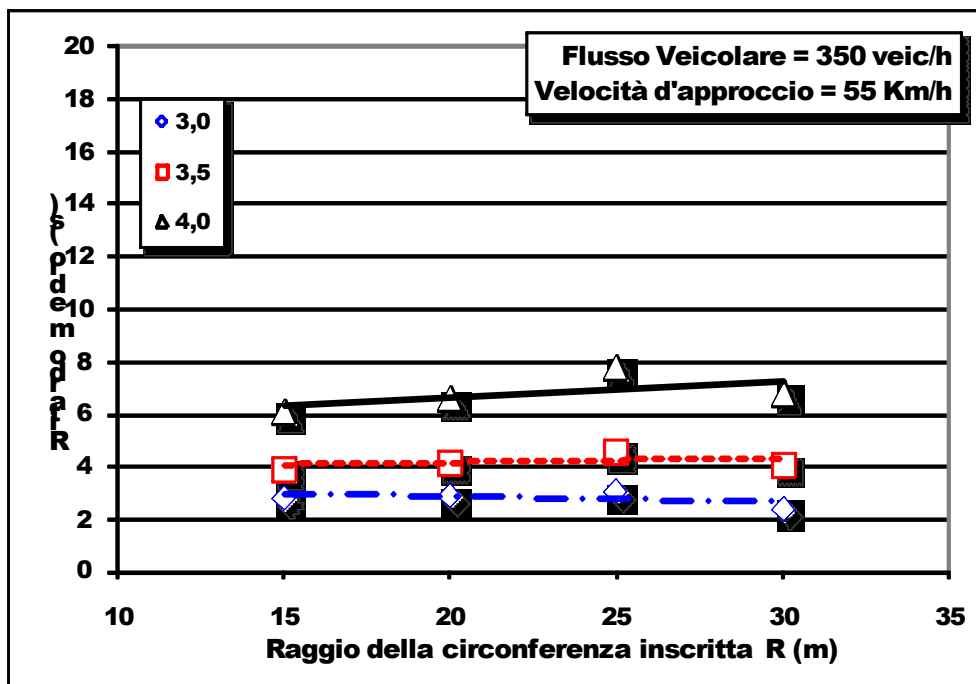


Figura 5.20: Tempi medi d'attesa per $V=55$ Km/h, $F=350$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

Dall'analisi di questi dati, espressi in termini di “tendenze” di tipo lineare, si nota che mentre per *time gap* uguali a 3,0 e 3,5 s un incremento del raggio della circonferenza inscritta risulta indifferente ai fini della variazione del ritardo medio, invece per *gap* = 4,0 s, al crescere del raggio cresce anche il ritardo: e ciò è vero per tutte le velocità d'approccio. In ogni caso, essendo la F_1 la classe di flussi di traffico più scarsa, per qualunque configurazione, i ritardi non superano mai i 10 s.

5.4.1.2. Risultati degli scenari R_i con $F_2=500$ veic/h

Così come fatto nel paragrafo precedente, vengono riportati i risultati ottenuti con gli scenari R_i applicando questa volta il flusso di traffico $F_2=500$ veic/h. Si ottengono così i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

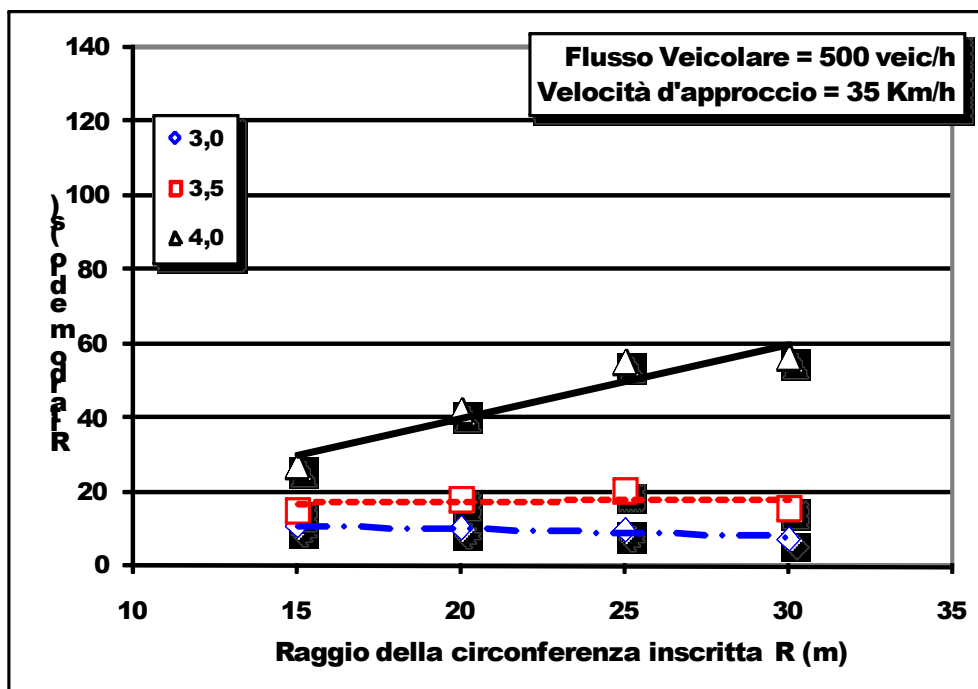


Figura 5.21: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=500$ veic/h, *gap* e raggi esterni variabili

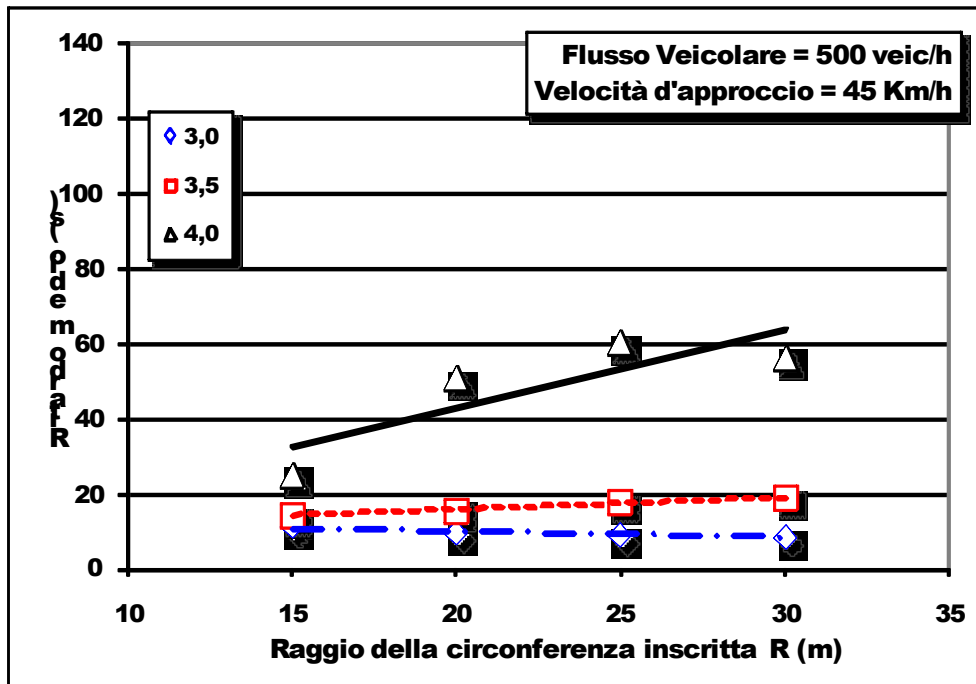


Figura 5.22: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=500$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

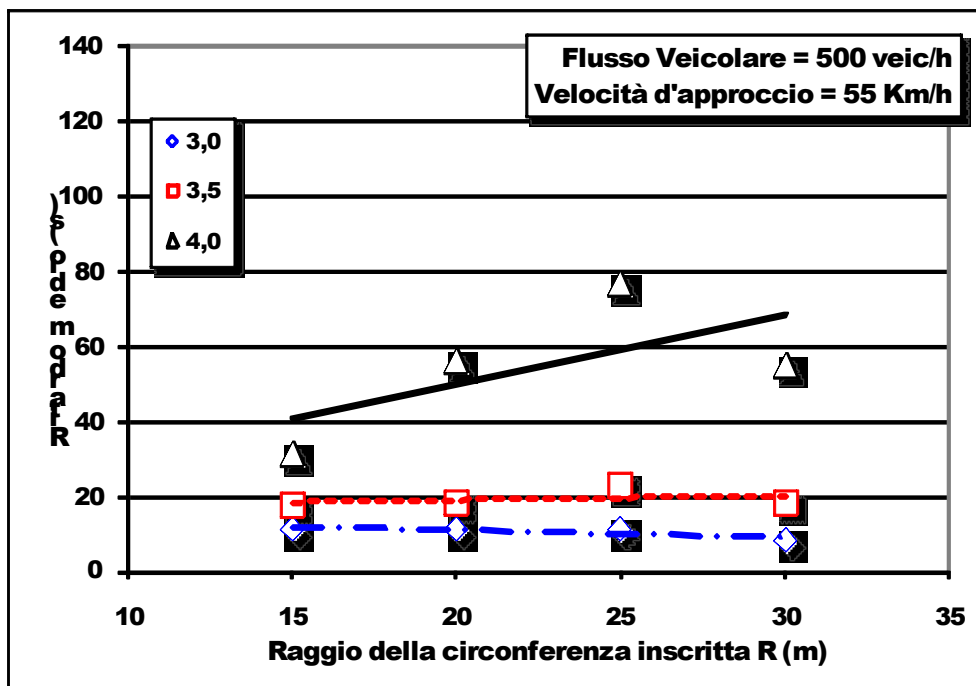


Figura 5.23: Tempi medi d'attesa per $V=55$ Km/h, $F=500$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

Anche in questo caso si nota come, per un fissato raggio esterno della rotatoria, per *time gap* uguali a 3,0 e 3,5 s, un incremento del raggio della circonferenza inscritta risulta indifferente ai fini della variazione del ritardo medio.

Inoltre per *time gap* pari a 4.0 s, per qualsiasi velocità di approccio, al crescere del raggio della rotatoria si registra un andamento crescente dei ritardi.

Per *time gap* invece inferiori a 3,5 s, l'andamento dei ritardi, al variare del raggio, si mantiene pseudo-costante e sempre inferiore a 20 s.

5.4.1.3. Risultati degli scenari R_i con $F_3=600$ veic/h

Anche per gli scenari R_i applicando il flusso di traffico $F_3=600$ veic/h, sono stati ottenuti i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

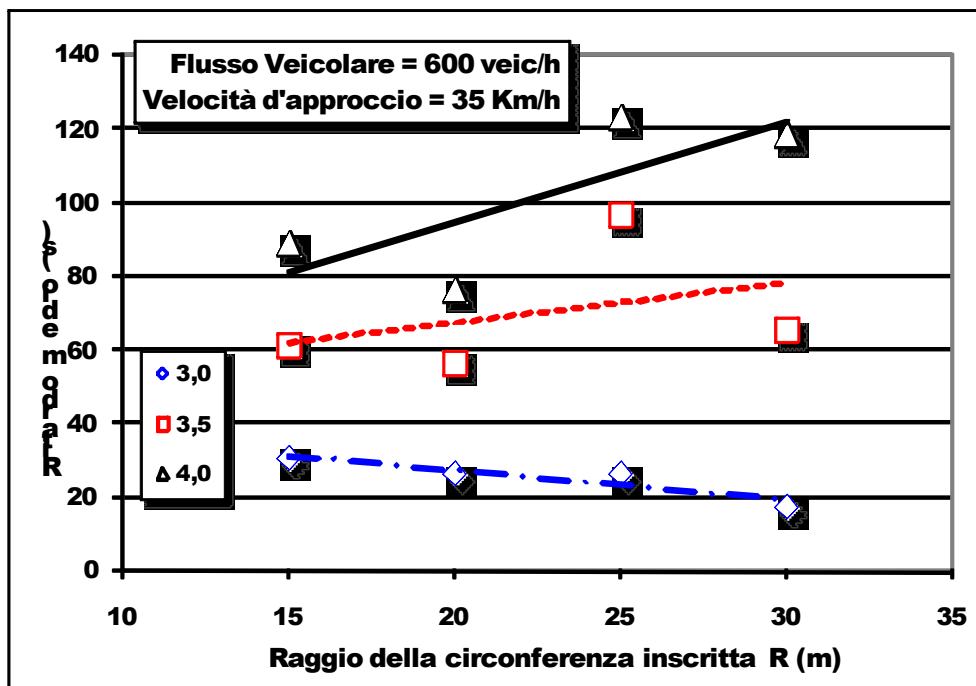


Figura 5.24: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=600$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

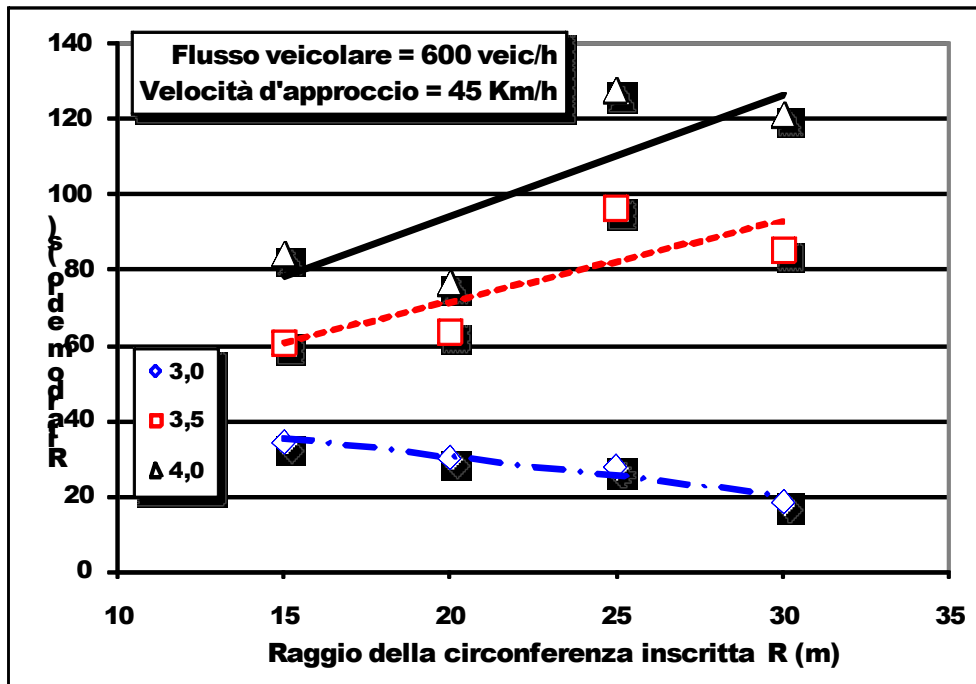


Figura 5.25: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=600$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

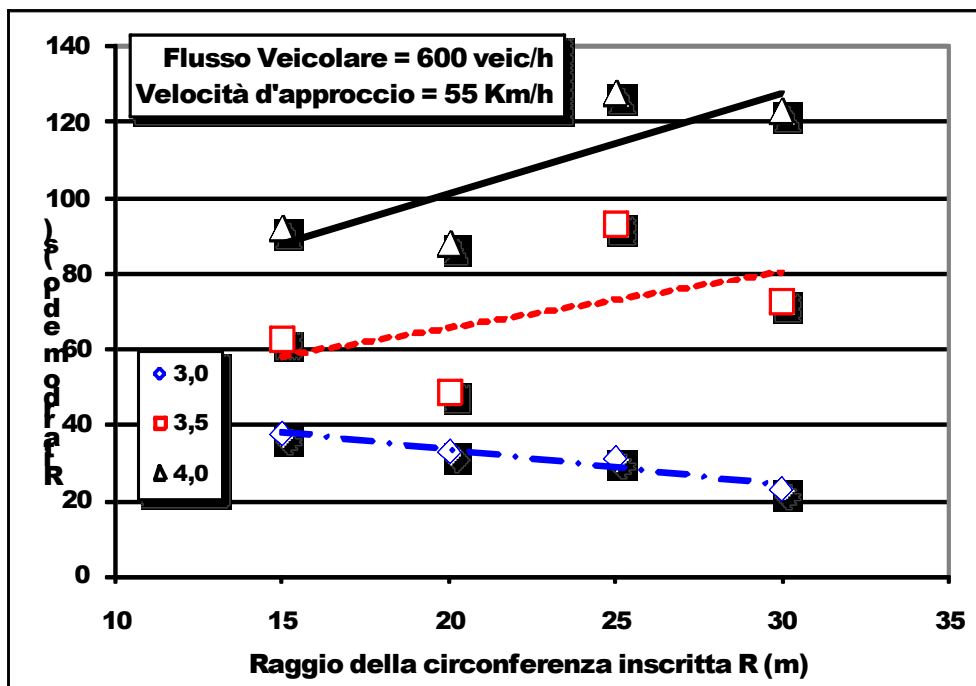


Figura 5.26: Tempi medi d'attesa per $V=55$ Km/h, $F=600$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

In questo caso c'è da dire che, per un dato raggio della rotonda, ad intervalli critici elevati corrispondono ritardi estremamente elevati.

Da notare inoltre che, per *time gap* maggiori o uguali a 3,5 s, per qualsiasi velocità di approccio al crescere del raggio della rotonda si registra un andamento crescente dei ritardi, mentre per *time gap* inferiori a 3.0 s, l'andamento dei ritardi è decrescente al crescere del raggio. Risulta opportuno, a tal proposito, compiere alcune considerazioni: nei casi in questione caratterizzati da elevate portate in ingresso che quindi alimentano il flusso circolante, risulta evidente che ci sia una maggiore probabilità di avere, sul flusso circolante, intervalli ≤ 3 s piuttosto che superiori a tale valore. Ciò giustifica, in buona sostanza, gli andamenti registrati.

5.4.1.4. Risultati degli scenari R_i con $F_4=650$ veic/h

Partendo quindi dagli scenari R_i ed applicando il flusso di traffico $F_4=650$ veic/h, sono stati realizzati i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

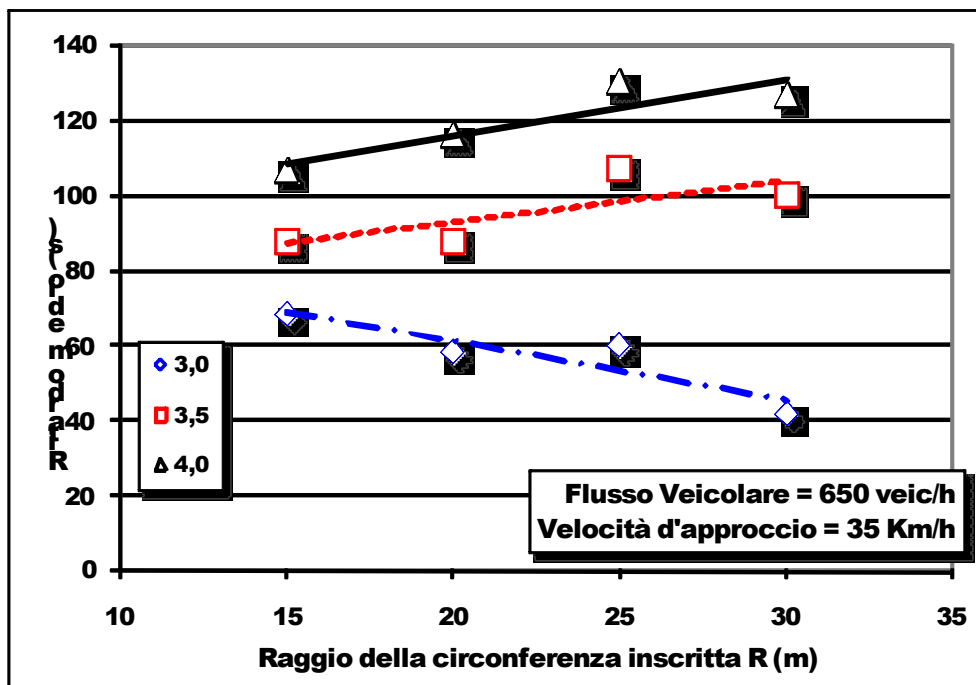


Figura 5.27: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=650$ veic/h, *gap* e raggi esterni variabili

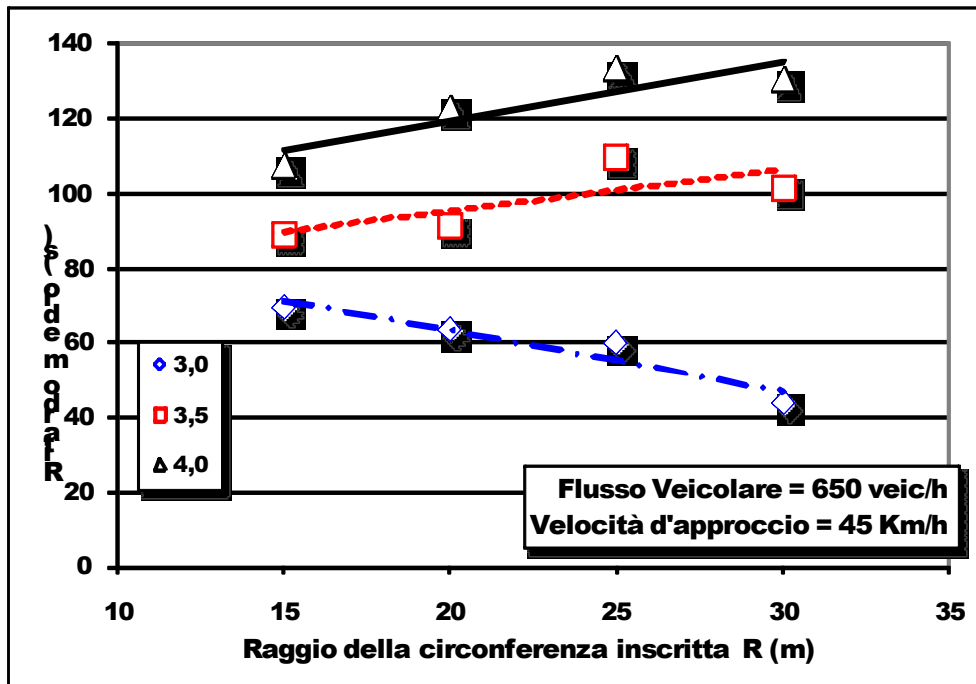


Figura 5.28: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=650$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

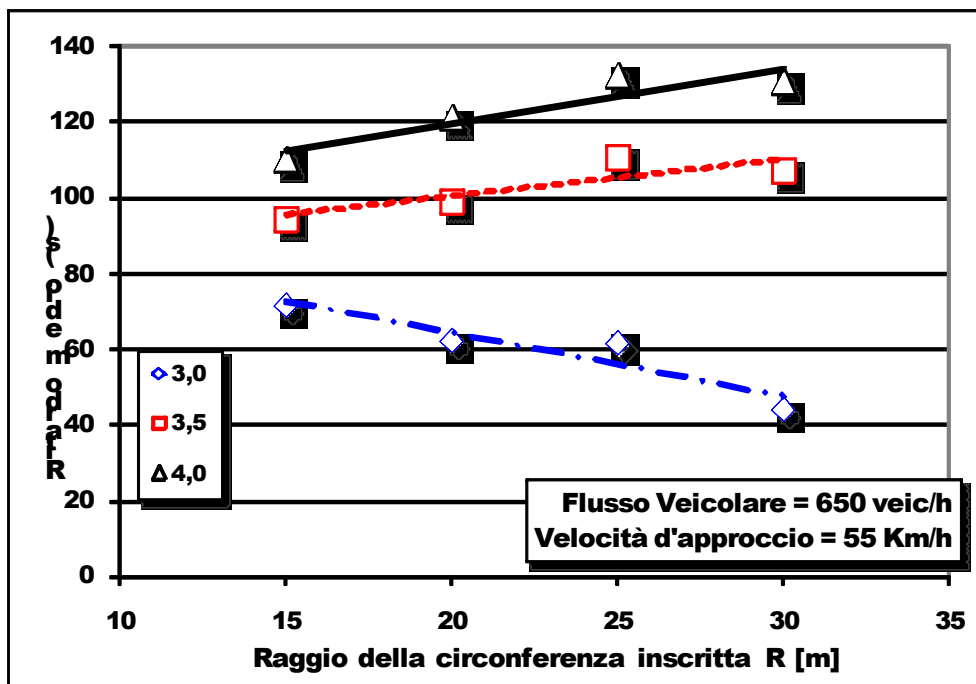


Figura 5.29: Tempi medi d'attesa per $V=55$ Km/h, $F=650$ veic/h, gap e raggi esterni variabili

Anche per questi scenari, per un fissato raggio della rotatoria, a *time gap* elevati corrispondono ritardi elevati.

Inoltre per *time gap* maggiori o uguali a 3.5 s, per qualsiasi velocità di approccio, al crescere del raggio della rotatoria si registra un andamento crescente dei ritardi, mentre per *time gap* inferiori a 3.0 s, l'andamento dei ritardi diventa decrescente al crescere del raggio. Risulta opportuno, a tal proposito, compiere alcune considerazioni: nei casi in questione caratterizzati da elevate portate in ingresso che quindi alimentano il flusso circolante, risulta evidente che ci sia una maggiore probabilità di avere, sul flusso circolante, intervalli ≤ 3 s piuttosto che superiori a tale valore. Ciò giustifica, in buona sostanza, gli andamenti registrati.

5.4.1.5. Risultati degli scenari R_i in termini di livelli di servizio

Gli stessi risultati delle simulazioni degli scenari R_i , realizzati in Vissim, possono essere rappresentati in termini di livelli di servizio, secondo la Tabella 5.13: è possibile cioè individuare i campi di variabilità del livello di servizio in funzione della velocità d'approccio alla rotatoria, del flusso di traffico, del raggio della circonferenza inscritta e del *time gap* utilizzato.

I seguenti abachi riportano i ritardi misurati sui diversi scenari per *gap* = 3.0 s.

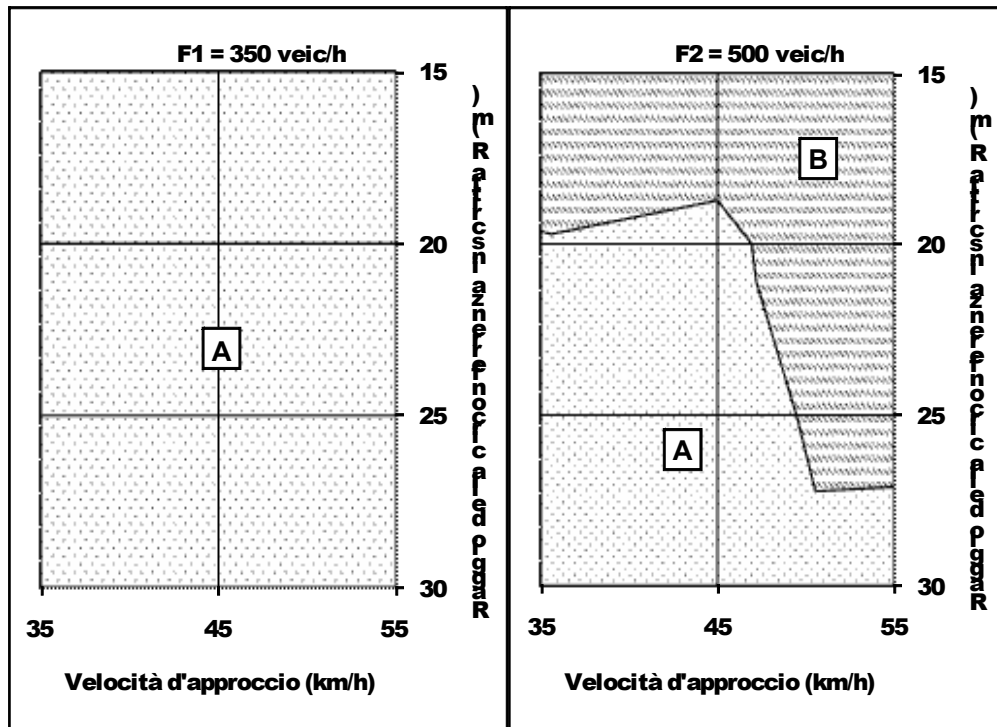


Figura 5.30: Tempi d'attesa per $F=350$ ed $F=500$ veic/h, $gap=3.0$ s, velocità e raggi esterni variabili

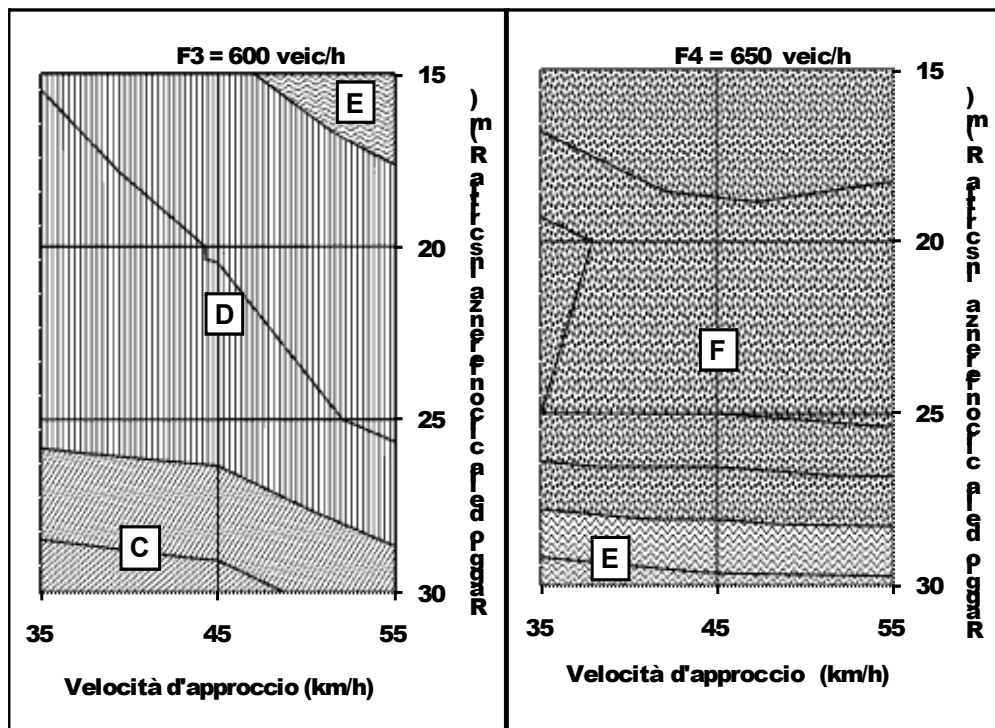


Figura 5.31: Tempi d'attesa per $F=600$ ed $F=650$ veic/h, $gap=3.0$ s, velocità e raggi esterni variabili

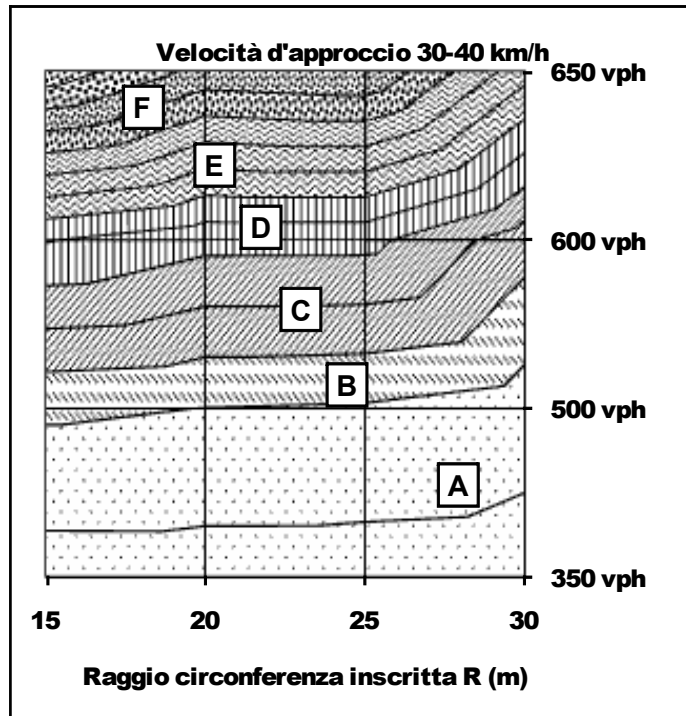


Figura 5.32: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e raggi esterni variabili

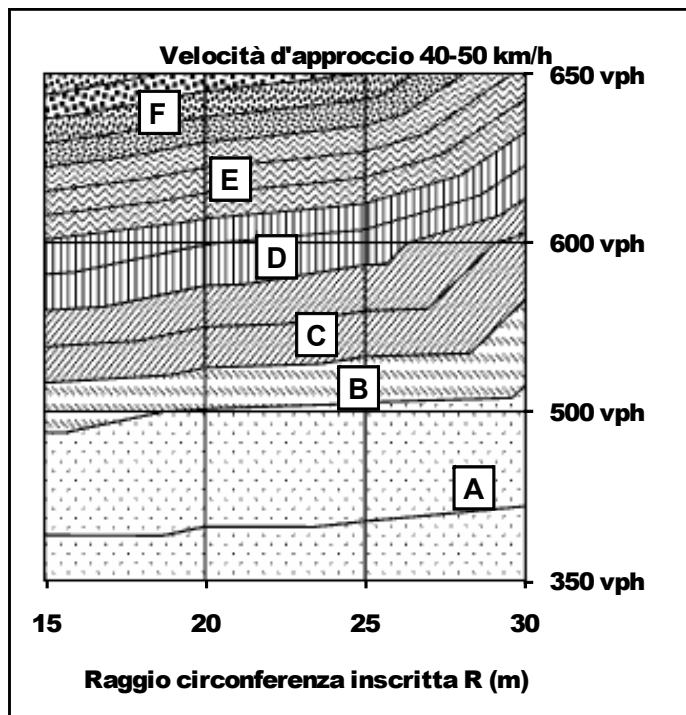


Figura 5.33: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e raggi esterni variabili

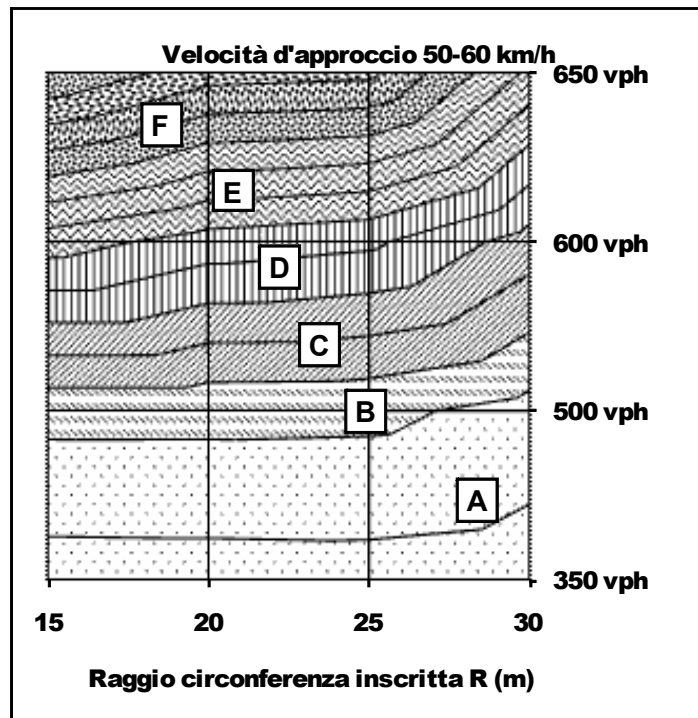


Figura 5.34: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e raggi esterni variabili

Questi abachi riportano invece i ritardi misurati sui diversi scenari per $gap=3.5$ s.

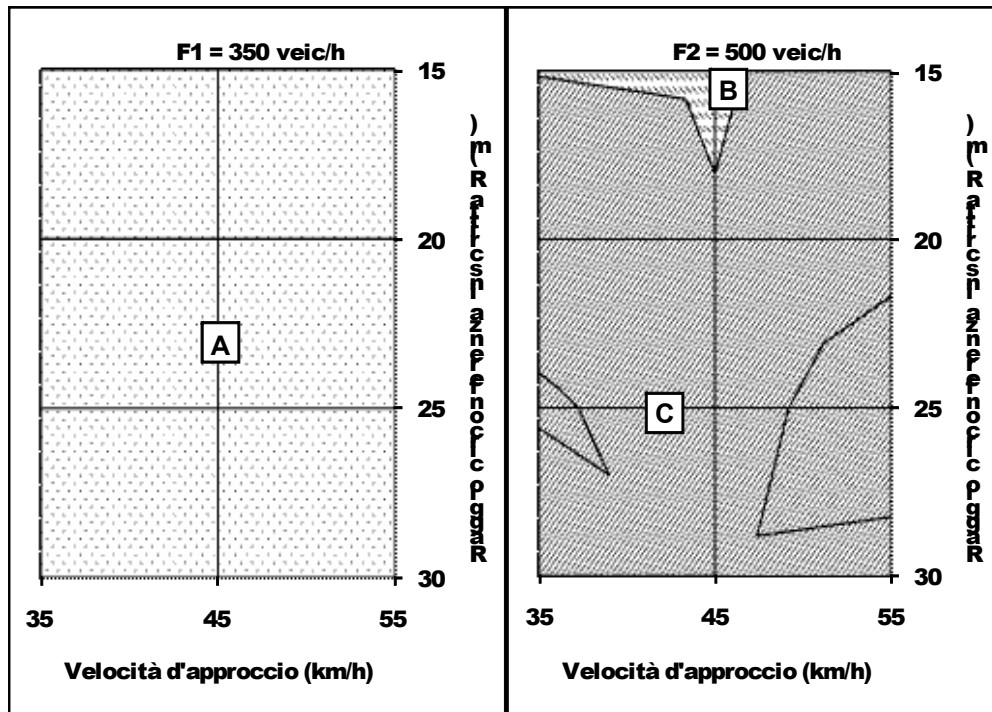


Figura 5.35: Tempi d'attesa per $F=350$ ed $F=500$ veic/h, $gap=3.5$ s, velocità e raggi esterni variabili

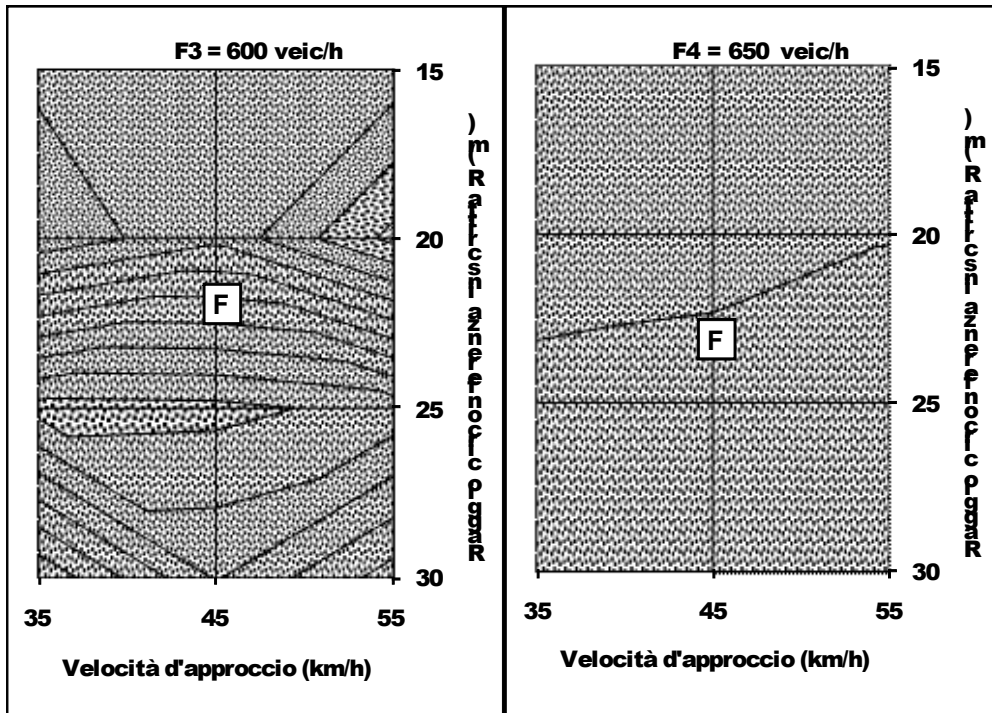


Figura 5.36: Tempi d'attesa per $F=600$ ed $F=650$ veic/h, $gap=3.5$ s, velocità e raggi esterni variabili

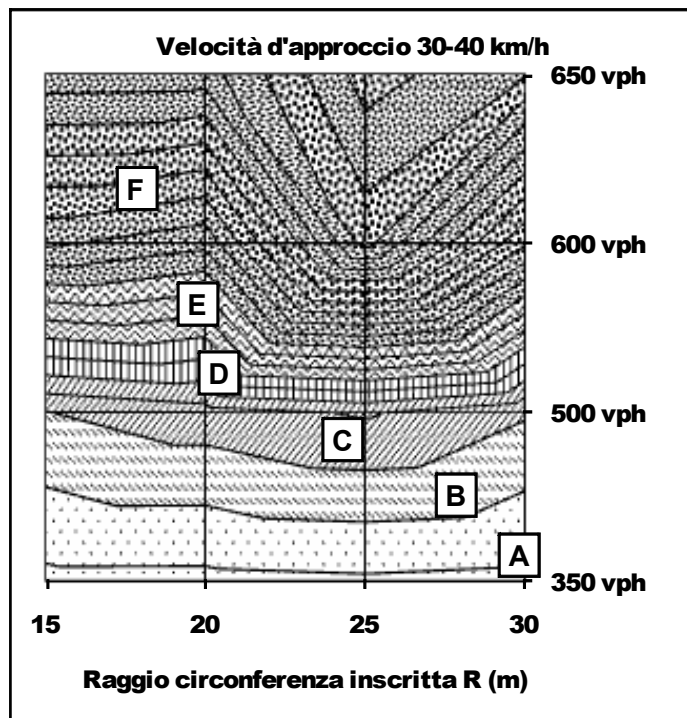


Figura 5.37: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e raggi esterni variabili

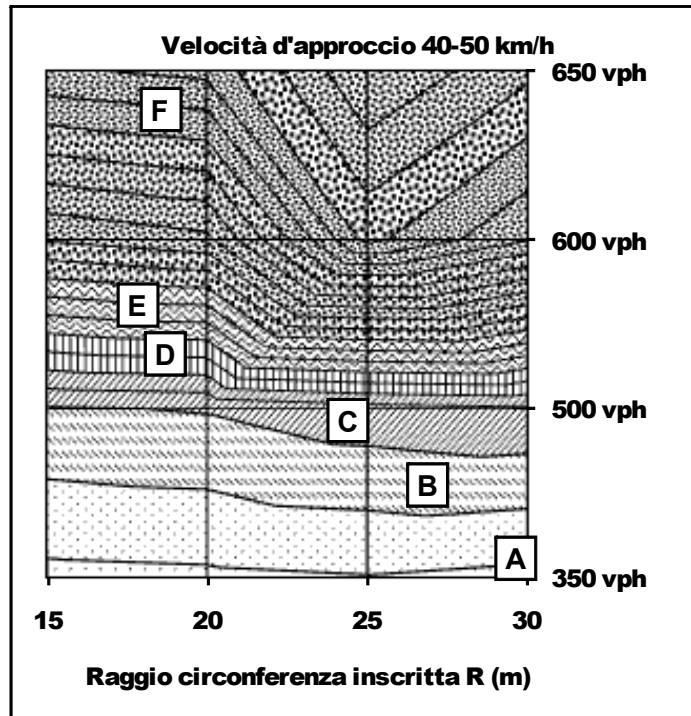


Figura 5.38: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e raggi esterni variabili

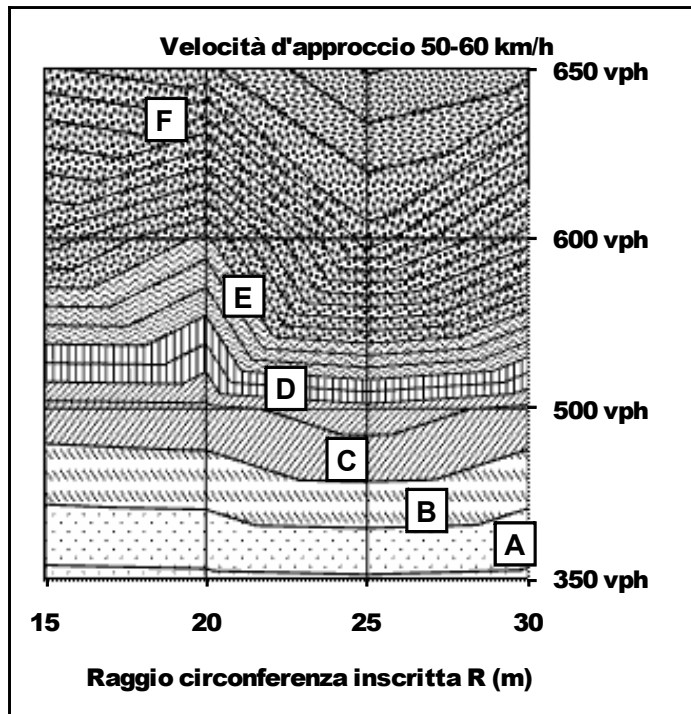


Figura 5.39: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e raggi esterni variabili

Questi altri abachi riportano i ritardi misurati sui diversi scenari per $gap=4.0$ s.

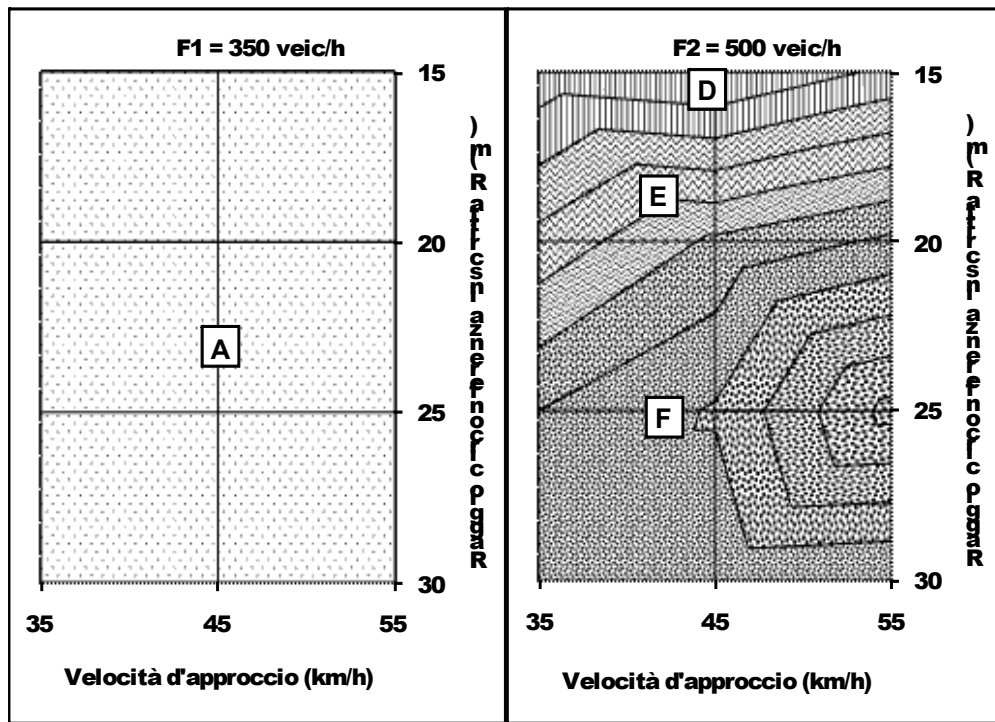


Figura 5.40: Tempi d'attesa per $F=350$ ed $F=500$ veic/h, $gap=4.0$ s, velocità e raggi esterni variabili

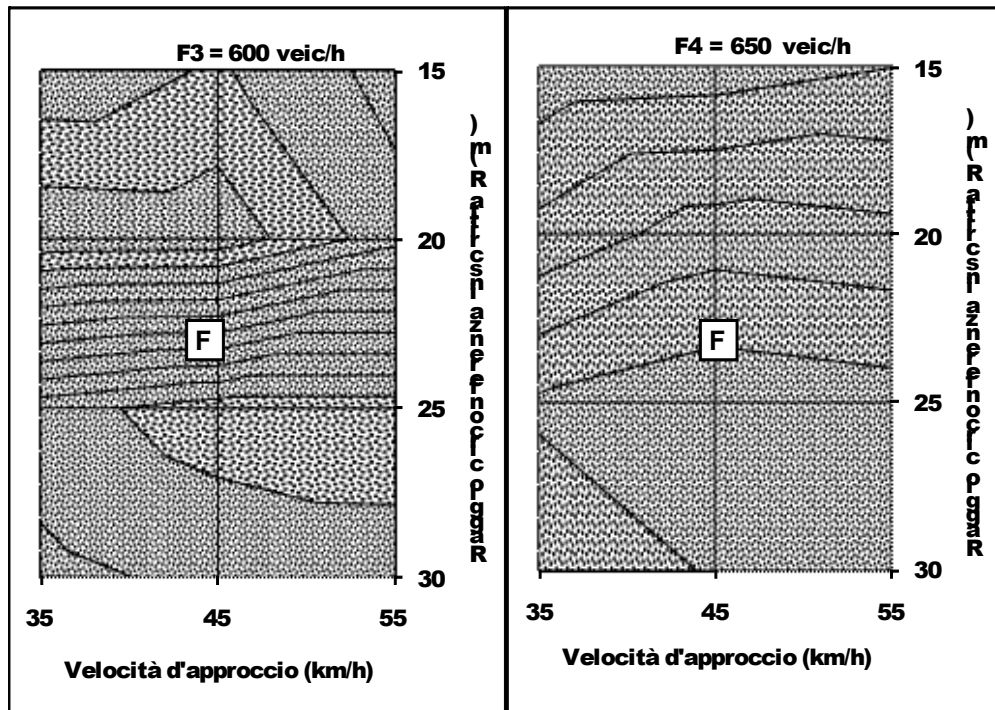


Figura 5.41: Tempi d'attesa per $F=600$ ed $F=650$ veic/h, $gap=4.0$ s, velocità e raggi esterni variabili

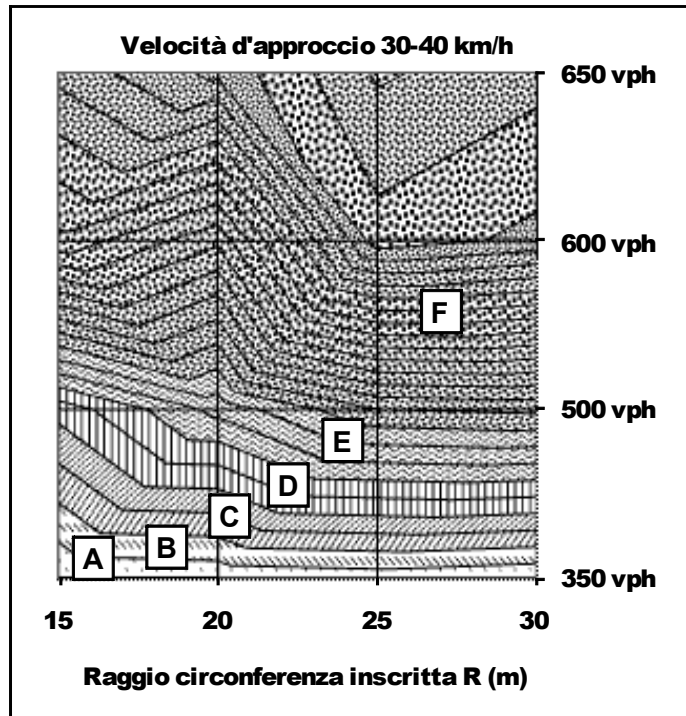


Figura 5.42: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e raggi esterni variabili

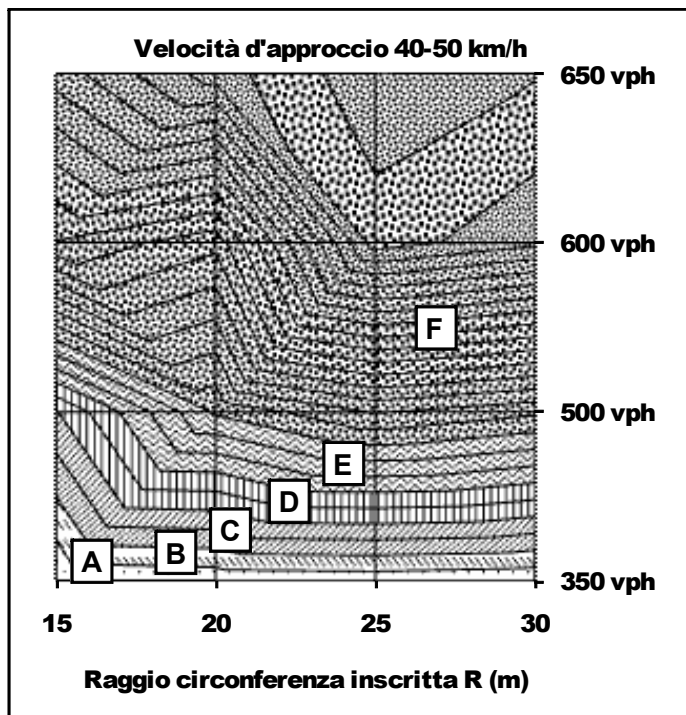


Figura 5.43: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e raggi esterni variabili

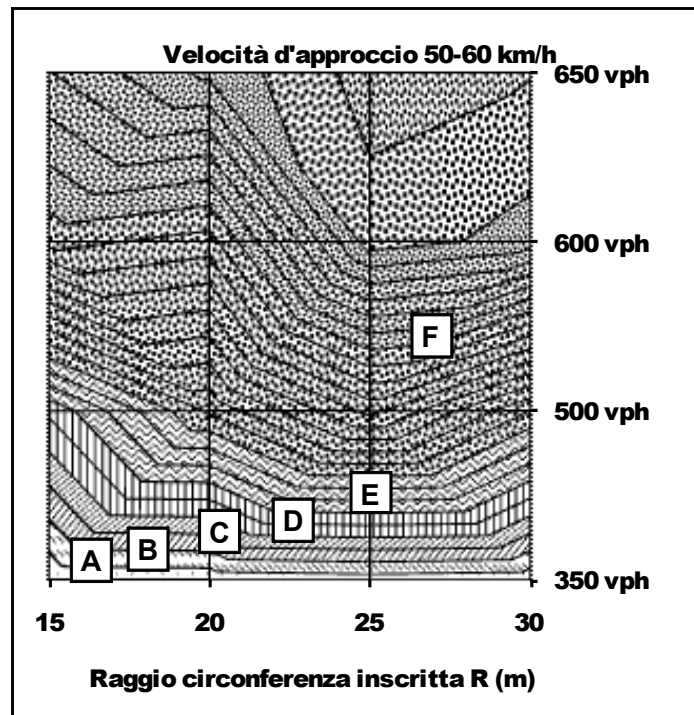


Figura 5.44: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e raggi esterni variabili

5.4.2. Analisi dei dati degli scenari I_i

Gli scenari I_i sono caratterizzati dalla variabilità della larghezza dell'isola divisionale ai bracci della rotatoria.

Anche per questo tipo di scenari entrano in gioco altre tre variabili di tipo non geometrico, ossia:

- il flusso veicolare (F_i);
- la velocità d'approccio (V_i);
- l'intervallo critico (IC_i).

Ancora, per gli scenari I_i , c'è da aggiungere che la variazione della larghezza dell'isola divisionale per ogni scenario, lasciando fissi gli altri parametri geometrici visti nel Paragrafo 5.3.3., comporta anche l'automatica variazione dell'angolo di deflessione β e della sequenza dei raggi di curvatura $R1$, $R2$ ed $R3$ della traiettoria di attraversamento (riferendoci alla Figura 1.16).

A tal proposito, la verifica di una corretta modellizzazione delle rotatorie nei diversi scenari in Vissim, è passata proprio dal controllo di queste grandezze in funzione della variabilità dell'elemento geometrico principale, che in questo caso era la larghezza dell'isola divisionale.

La Tabella 5.18 mostra la correlazione esistente tra queste variabili geometriche.

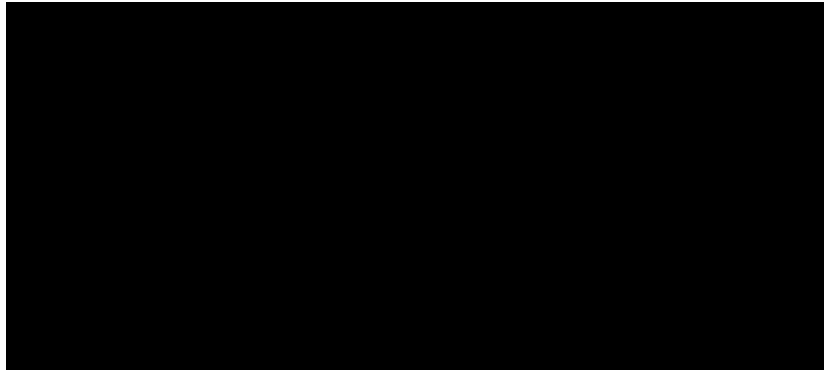


Tabella 5.18: Relazione tra Angolo di deflessione, Raggi di deflessione e larghezza dell'isola divisionale

Ciò è riscontrabile nei quattro grafici riportati nelle Figure 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48.

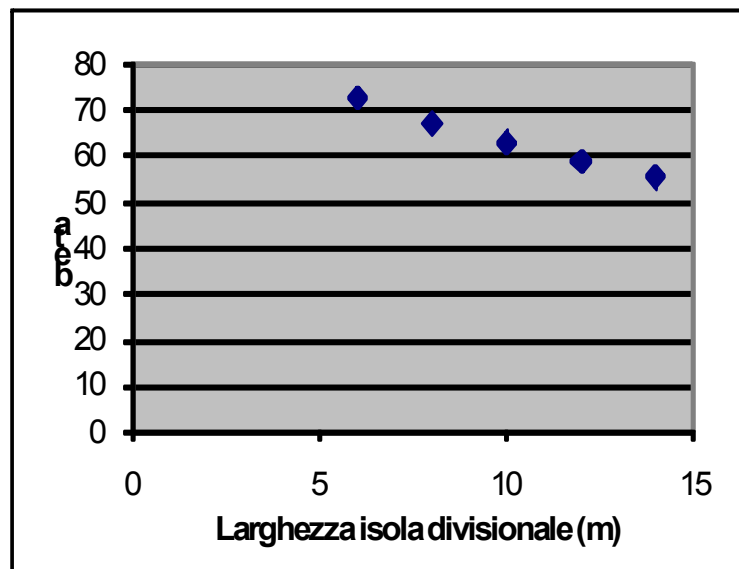


Figura 5.45: Relazione tra Angolo di deflessione β e larghezza dell'isola divisionale della rotatoria

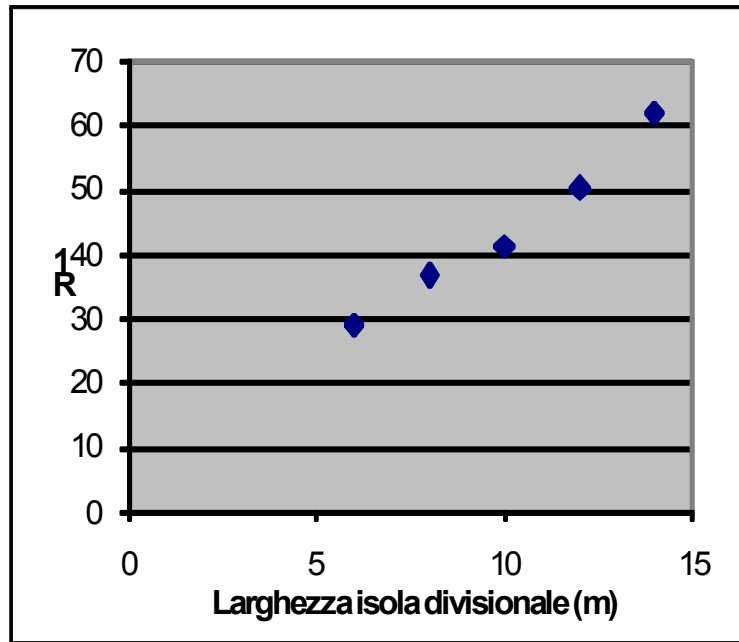


Figura 5.46: Relazione tra Raggio di deflessione R1 e larghezza dell'isola divisionale della rotatoria

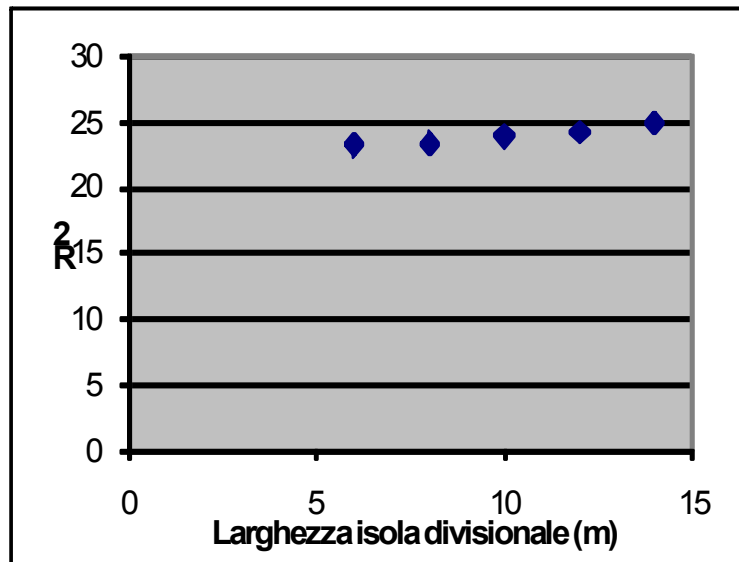


Figura 5.47: Relazione tra Raggio di deflessione R2 e larghezza dell'isola divisionale della rotatoria

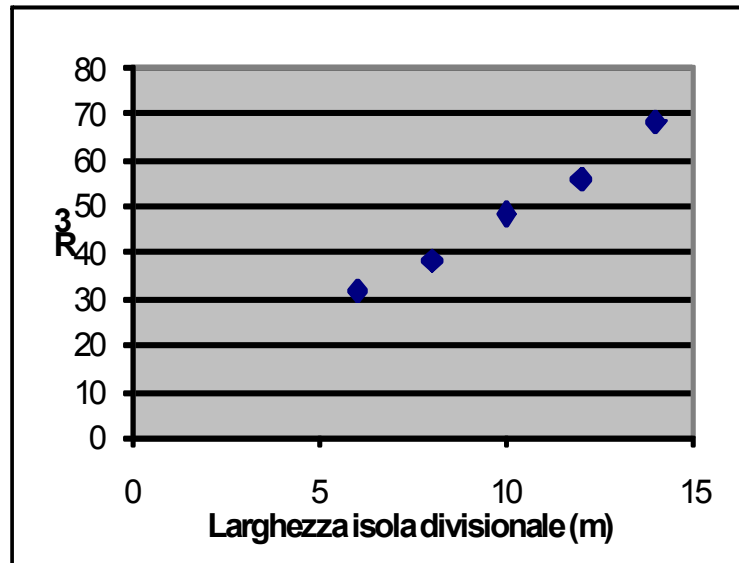


Figura 5.48: Relazione tra Raggio di deflessione $R3$ e larghezza dell'isola divisionale della rotatoria

Dall'analisi di questi grafici si nota come all'aumentare della larghezza dell'isola divisionale della rotatoria, diminuisca l'angolo di deflessione β .

Viceversa, all'aumentare sempre della larghezza dell'isola divisionale, aumentano i raggi $R1$, $R2$ ed $R3$.

Entrambe le considerazioni sopra esposte sono pienamente in linea con le relazioni rinvenibili in letteratura.

Di seguito le Tabelle 5.19, 5.20 e 5.21 riportano i tempi medi d'attesa valutati da Vissim durante la simulazione degli scenari I_i in funzione della variazione dei *gap* critici, dei flussi di traffico e delle velocità d'approccio.

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 3,0 s						
	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
I0	2,8	2,8	3,1	9,5	10,5	11,4
I1	2,7	2,3	2,5	8,2	8,7	9,5
I2	2,4	2,3	2,5	8,5	8,5	8,3
I3	2,2	2,1	2,1	7,3	7,4	8,1
I4	2,1	1,9	2,1	7,1	6,9	7,6
	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
I0	26,6	27,5	31,1	60,0	60,0	33,8
I1	18,1	16,8	18,3	37,6	39,5	25,5
I2	16,0	15,7	15,0	29,5	36,1	19,7
I3	12,1	11,9	13,2	21,2	21,8	18,2
I4	11,7	11,5	11,3	20,6	19,6	11,5

Tabella 5.19: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari I_i (gap critico = 3.0 s)

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 3,5 s						
	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
I0	4,3	4,8	4,6	20,6	17,9	22,9
I1	3,5	3,3	3,8	12,9	13,9	14,6
I2	3,1	3,1	3,3	11,2	11,5	12,4
I3	2,8	3,0	2,9	9,7	10,5	9,4
I4	2,6	2,6	2,8	9,3	9,2	9,6
	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Approach Speed					
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
I0	96,9	96,4	93,2	107,2	109,7	110,6
I1	47,6	50,0	56,3	83,2	89,3	87,1
I2	41,1	34,6	44,1	62,5	67,3	73,1
I3	20,1	20,1	23,4	41,1	44,4	46,5
I4	18,1	16,5	19,1	32,0	34,7	29,5

Tabella 5.20: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari I_i (gap critico = 3.5 s)

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 4,0 s						
	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
I0	7,5	7,0	7,7	55,0	60,5	76,7
I1	5,2	5,5	6,0	28,0	31,5	28,1
I2	4,1	4,6	4,9	21,6	21,1	23,2
I3	3,7	3,9	4,5	13,6	14,2	15,0
I4	3,4	3,5	3,9	11,7	12,0	12,0
	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
I0	122,9	127,6	127,7	130,7	133,6	132,2
I1	107,1	111,1	112,2	117,4	118,9	118,3
I2	84,3	83,6	84,2	100,8	104,3	109,4
I3	54,6	56,1	59,2	82,3	83,1	89,4
I4	31,7	34,2	32,1	63,3	65,2	67,6

Tabella 5.21: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari I_i (gap critico = 4.0 s)

Nei paragrafi successivi verranno riportati i risultati delle simulazioni differenziandoli per flussi di traffico, mettendo a confronto i dati ottenuti con i diversi intervalli critici e determinando anche i diversi livelli di servizio per le varie combinazioni di variabili.

5.4.2.1. Risultati degli scenari I_i con $F_1=350$ veic/h

Prendendo in considerazione i risultati ottenuti con gli scenari I_i applicando il flusso di traffico $F_1=350$ veic/h, si hanno i grafici delle Figure 5.49, 5.50 e 5.51, in cui i tempi medi d'attesa sono riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

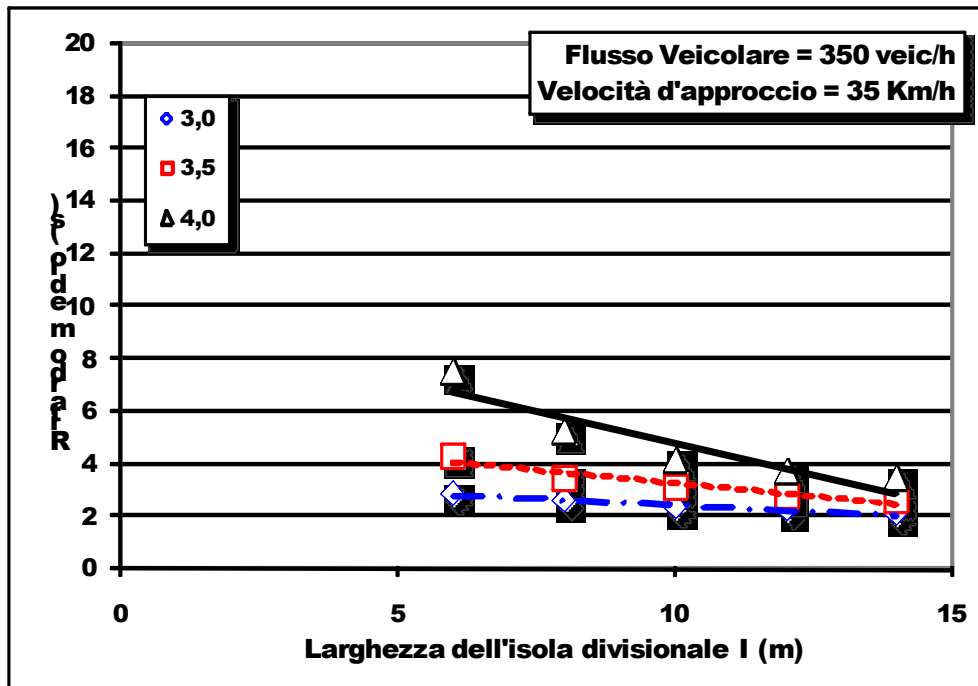


Figura 5.49: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=350$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

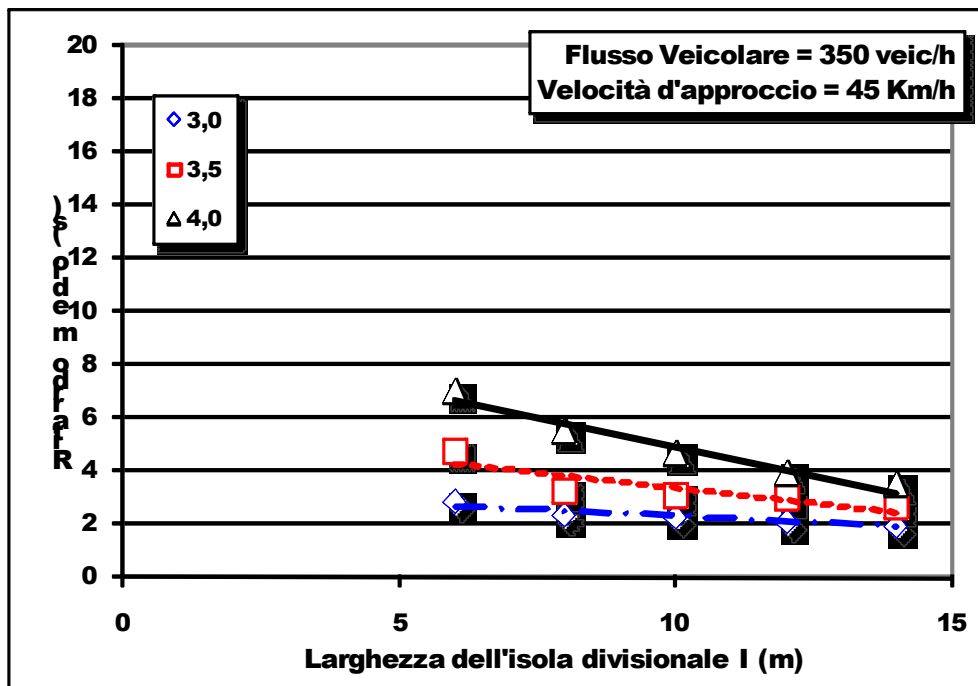


Figura 5.50: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=350$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

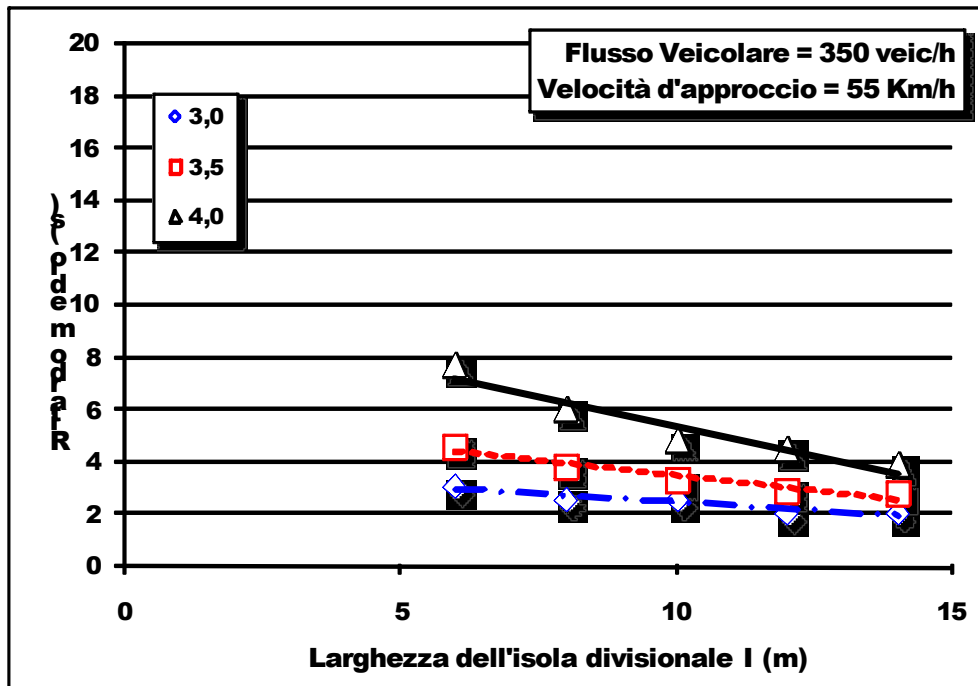


Figura 5.51: Tempi medi d'attesa per $V=55\text{ Km/h}$, $F=350\text{ veic/h}$, gap e larghezze delle isole variabili

Dall'analisi dei dati si nota subito come all'aumentare dei gap aumentino anche i ritardi, mentre all'aumentare della larghezza dell'isola diminuiscono i ritardi per qualunque classe di velocità e per qualunque valore del *gap*.

In ogni caso, essendo la F_1 la classe di flussi di traffico più scarsa, per qualunque configurazione, i ritardi non superano mai i 10 s.

5.4.2.2. Risultati degli scenari I_i con $F_2=500\text{ veic/h}$

Così come fatto nel paragrafo precedente, riportiamo i risultati ottenuti con gli scenari I_i applicando questa volta il flusso di traffico $F_2=500\text{ veic/h}$ (vedi Fig. 5.52, 5.53 e 5.54). Si ottengono così i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

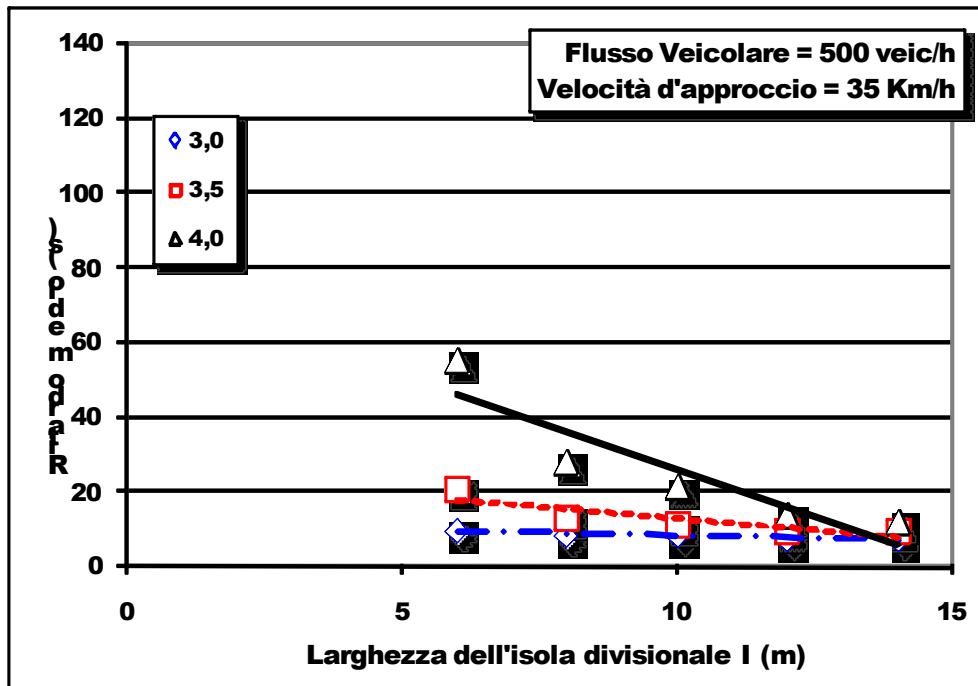


Figura 5.52. Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=500$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

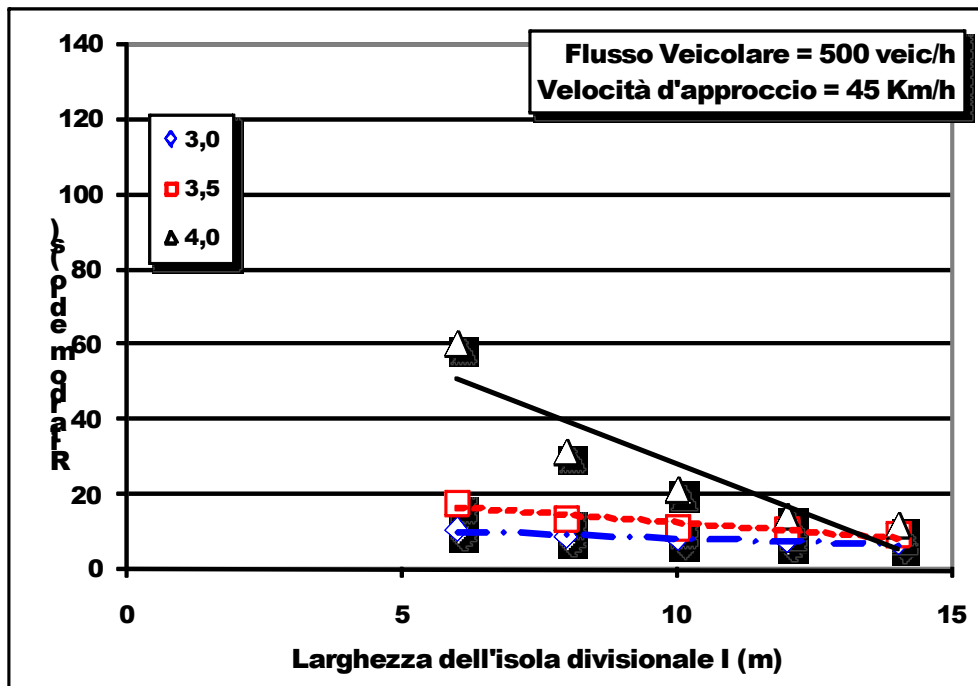


Figura 5.53: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=500$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

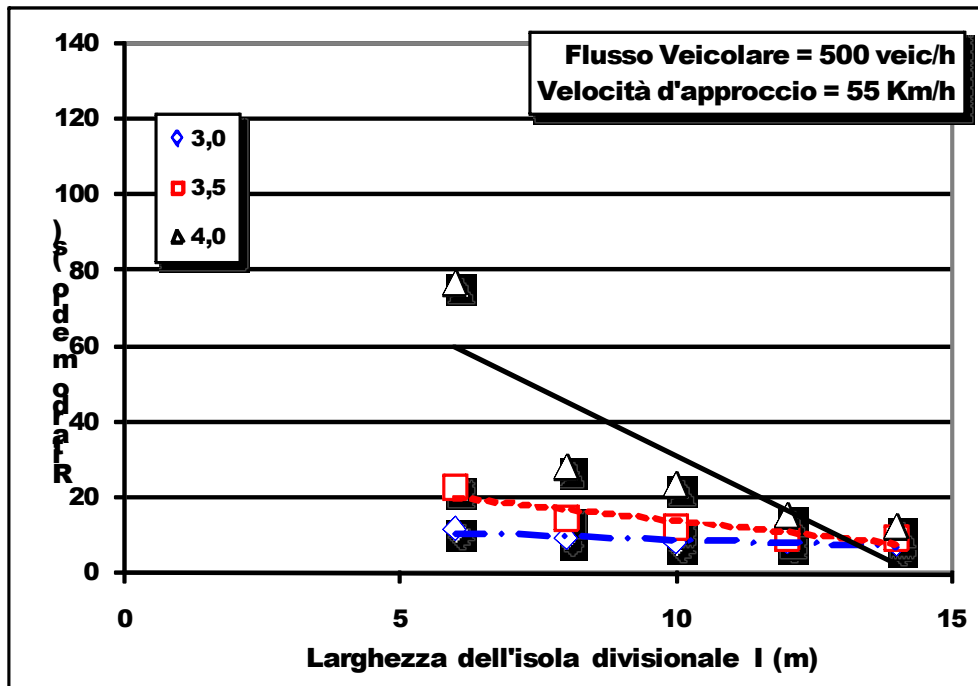


Figura 5.54: Tempi medi d'attesa per $V=55\text{ Km/h}$, $F=500\text{ veic/h}$, gap e larghezze delle isole variabili

Anche in questo caso si nota subito come, per un fissato valore della larghezza dell'isola divisoriale della rotatoria, all'aumentare del gap critico, sistematicamente aumentano i tempi medi d'attesa ai nodi.

Inoltre per qualunque valore del $time\ gap$ e per qualsiasi velocità di approccio, al crescere della larghezza dell'isola divisoriale si registra un andamento decrescente dei ritardi.

Per $time\ gap$ compresi tra 3.0 e 3.5 s, l'andamento dei ritardi, al variare della larghezza dell'isola, si mantiene sempre inferiore a 20 s. Per $gap = 4,0\text{ s}$ si nota invece come l'elemento geometrico "larghezza dell'isola divisoriale" risulti essere determinante in quanto un aumento del suo valore da 6 a 14 m produce un abbattimento del ritardo medio dell'85% circa.

5.4.2.3. Risultati degli scenari I_i con $F_3=600\text{ veic/h}$

Anche per gli scenari I_i applicando il flusso di traffico $F_3=600\text{ veic/h}$, si ottengono i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del gap critico e della velocità d'approccio.

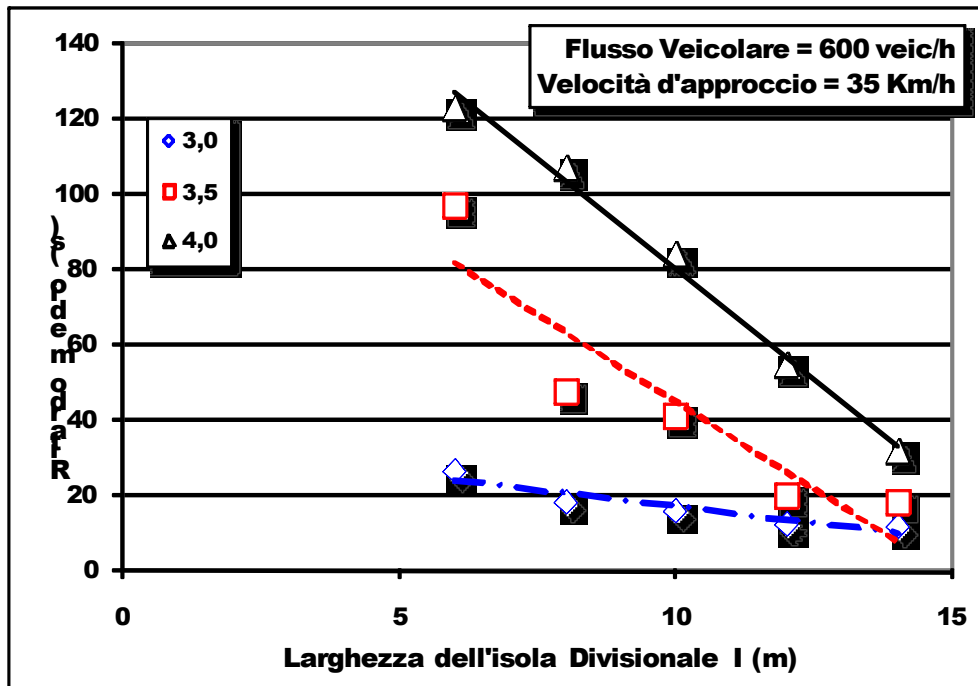


Figura 5.55: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=600$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

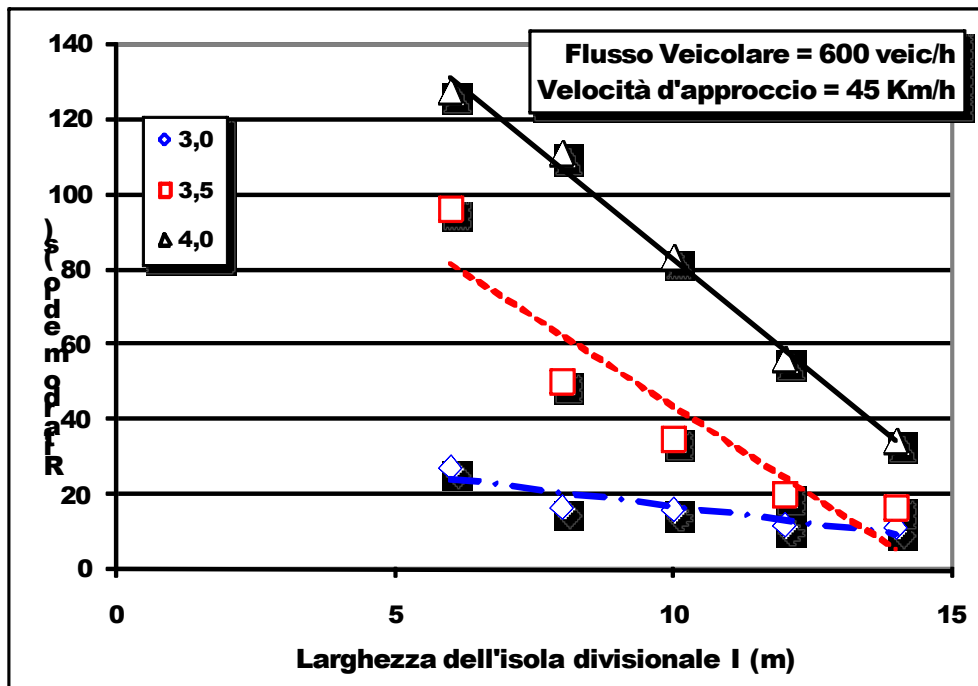


Figura 5.56: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=600$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

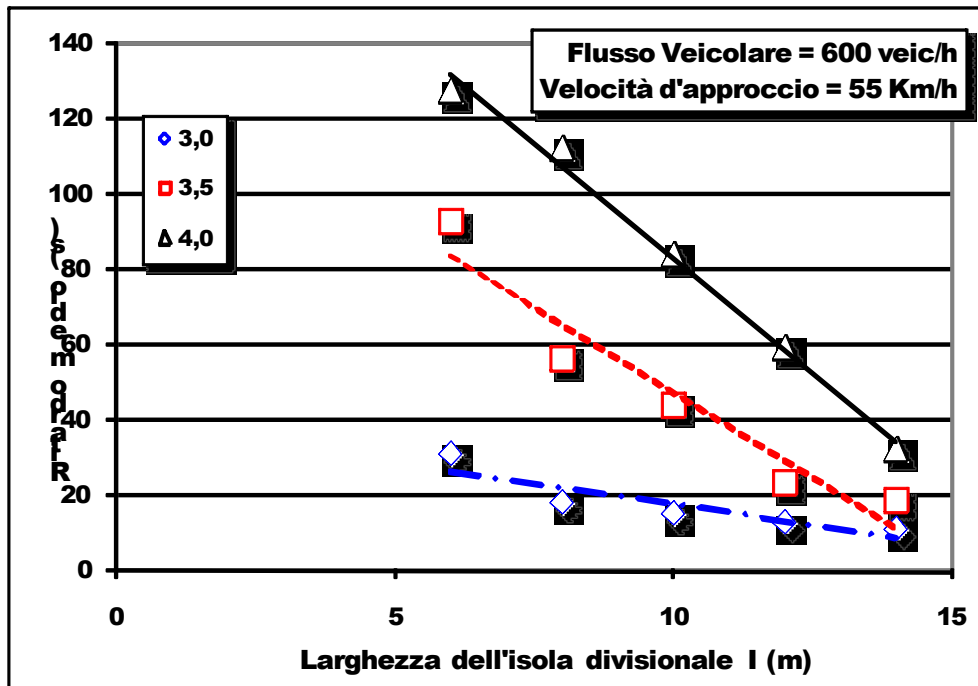


Figura 5.57: Tempi medi d'attesa per $V=55\text{ Km/h}$, $F=600\text{ veic/h}$, gap e larghezze delle isole variabili

In questo caso c'è da dire che, per una data larghezza dell'isola della rotatoria, ad intervalli critici elevati corrispondono ritardi estremamente elevati.

Da notare inoltre che, per qualunque *time gap* e per qualsiasi velocità di approccio, al decrescere della larghezza dell'isola spartitraffico si registra un andamento crescente dei ritardi: ciò è tanto più evidente quanto più è elevato l'intervallo critico. Un incremento di flusso entrante da 500 a 600 veic/h produce di fatto una maggiore criticità per *gap* uguali a 4,0 s e 3,5 s; è probabile infatti che, in rotatoria, l'utente in ingresso trovi sempre meno intervalli temporali $\geq 3,5$ s. Ciò si traduce in una maggiore pendenza della linea di tendenza per tali valori del *gap*. Per $gap = 3,0$ s comunque il ritardo non va mai oltre i 30 s.

5.4.2.4. Risultati degli scenari I_i con $F_4=650\text{ veic/h}$

Partendo quindi dagli scenari I_i ed applicando il flusso di traffico $F_4=650\text{ veic/h}$, vengono rappresentati i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

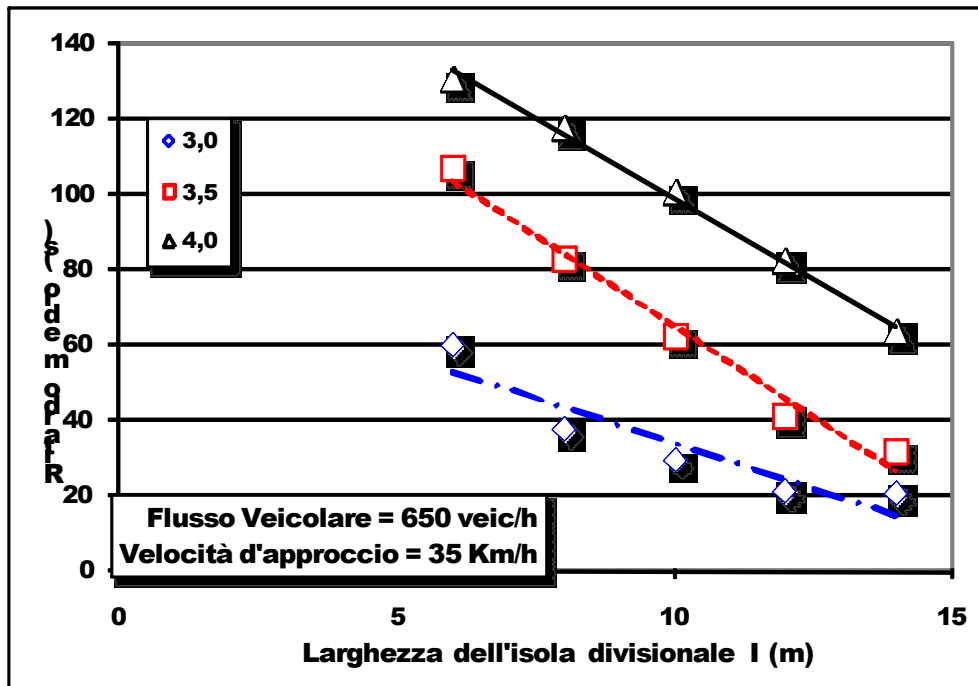


Figura 5.58: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=650$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

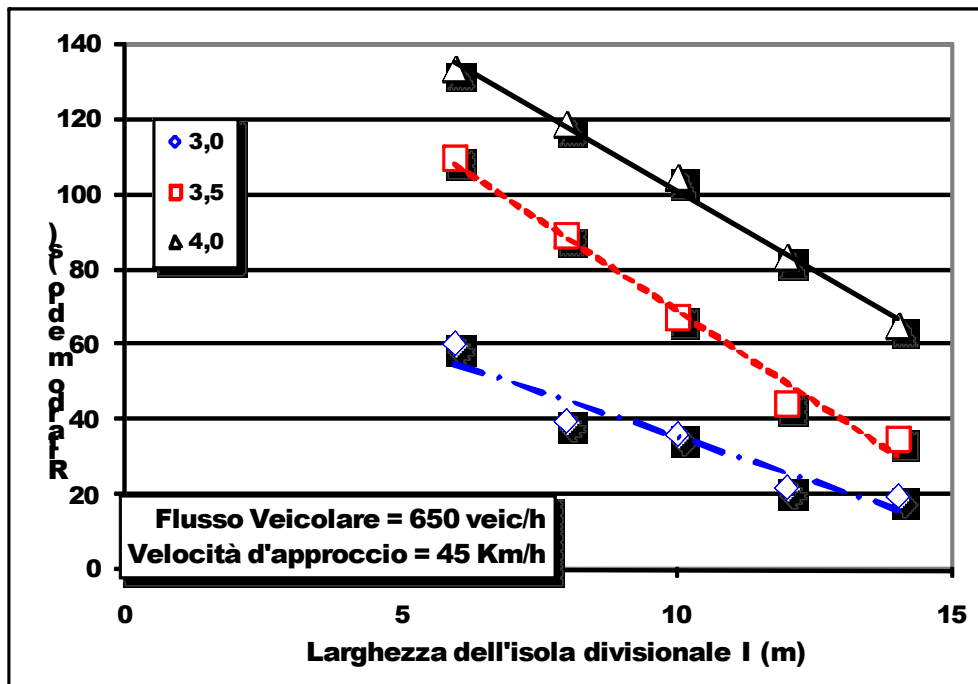


Figura 5.59: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=650$ veic/h, gap e larghezze delle isole variabili

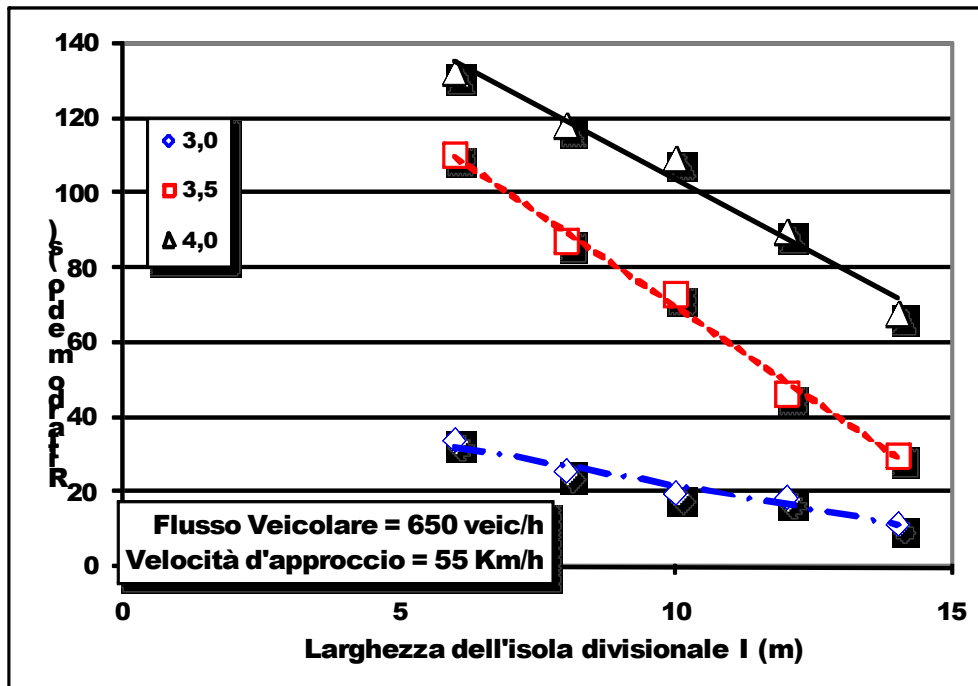


Figura 5.60: Tempi medi d'attesa per $V=55\text{ Km/h}$, $F=650\text{ veic/h}$, gap e larghezze delle isole variabili

Anche per questi scenari, per un dato valore della larghezza delle isole, a *time gap* elevati corrispondono ritardi elevati.

Inoltre per qualunque *time gap* e per qualsiasi velocità di approccio, al decrescere della larghezza delle isole si registra un forte andamento crescente dei ritardi.

C'è da aggiungere inoltre che per *time gap* uguali a 3.0 s, per qualunque valore della velocità e della larghezza dell'isola, i ritardi rimangono comunque sempre al di sotto dei 60 s e nel caso della massima velocità d'approccio (55 Km/h) tale limite si abbatte a circa 30 s.

5.4.2.5. Risultati degli scenari I_1 in termini di livelli di servizio

Gli stessi risultati delle simulazioni degli scenari I_i , realizzati in Vissim, possono essere rappresentati in termini di livelli di servizio, secondo la Tabella 5.13: è possibile cioè individuare i campi di variabilità del livello di servizio in funzione della velocità d'approccio alla rotatoria, del flusso di traffico, della larghezza dell'isola divisionale e del *time gap* utilizzato.

I seguenti abachi riportano i ritardi misurati sui diversi scenari per $gap = 3.0$ s.

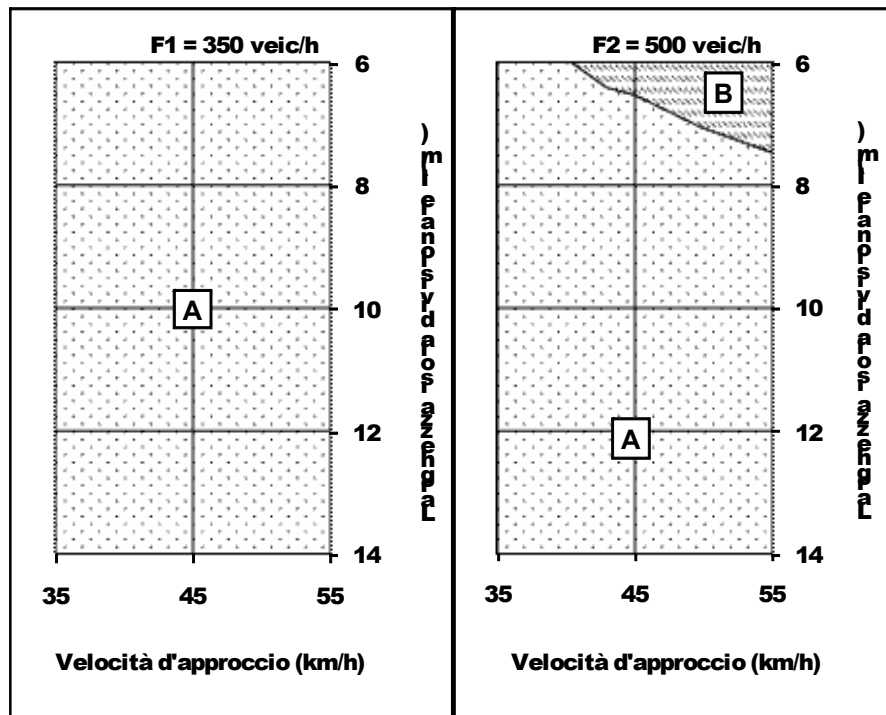


Figura 5.61: Tempi d'attesa per $F=350$ e 500 veic/h, $gap=3.0$ s, velocità e larghezze isole variabili

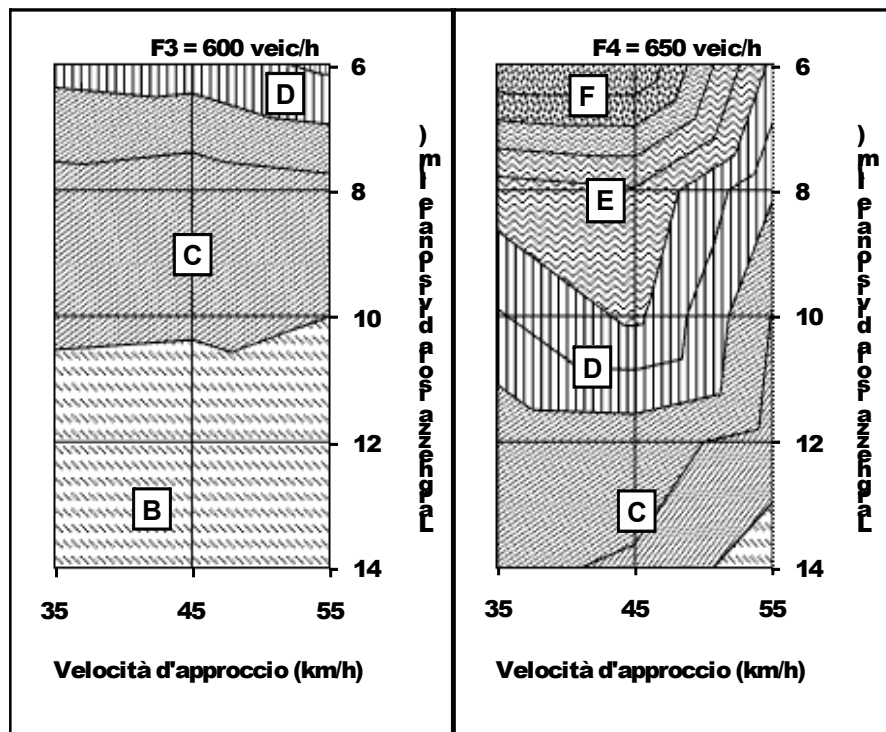


Figura 5.62: Tempi d'attesa per $F=600$ e 650 veic/h, $gap=3.0$ s, velocità e larghezze delle isole variabili

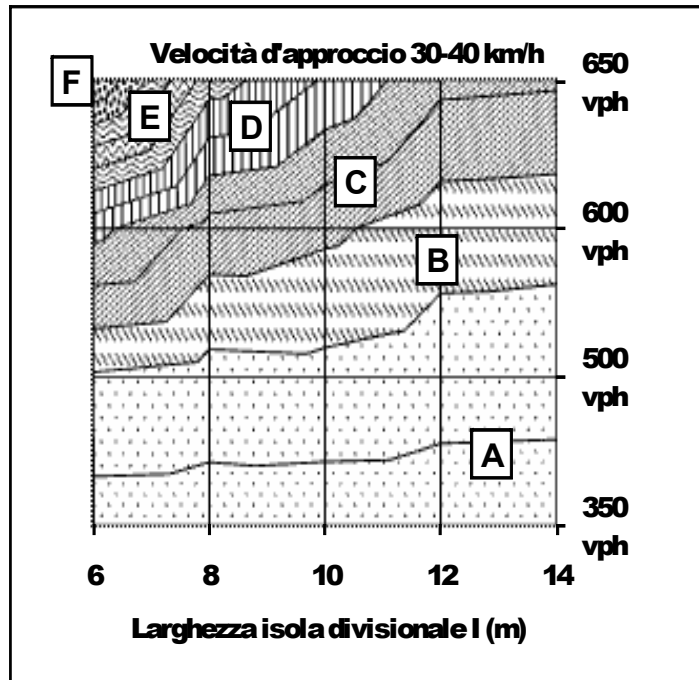


Figura 5.63: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

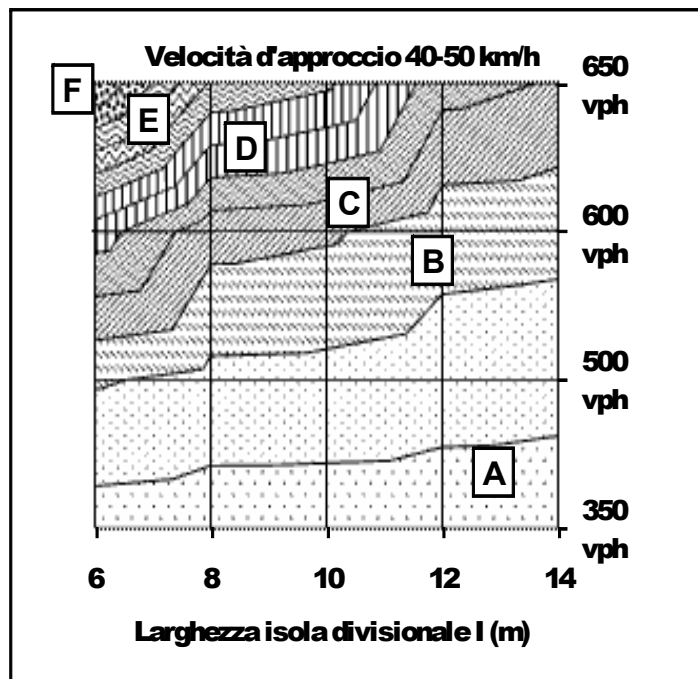


Figura 5.64: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

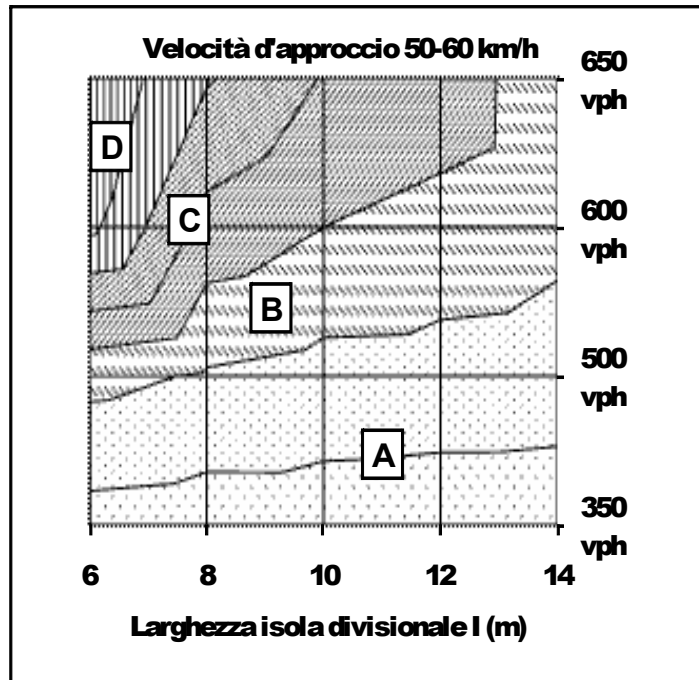


Figura 5.65: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

Gli abachi seguenti riportano invece i ritardi misurati sui diversi scenari per $gap=3.5$ s.

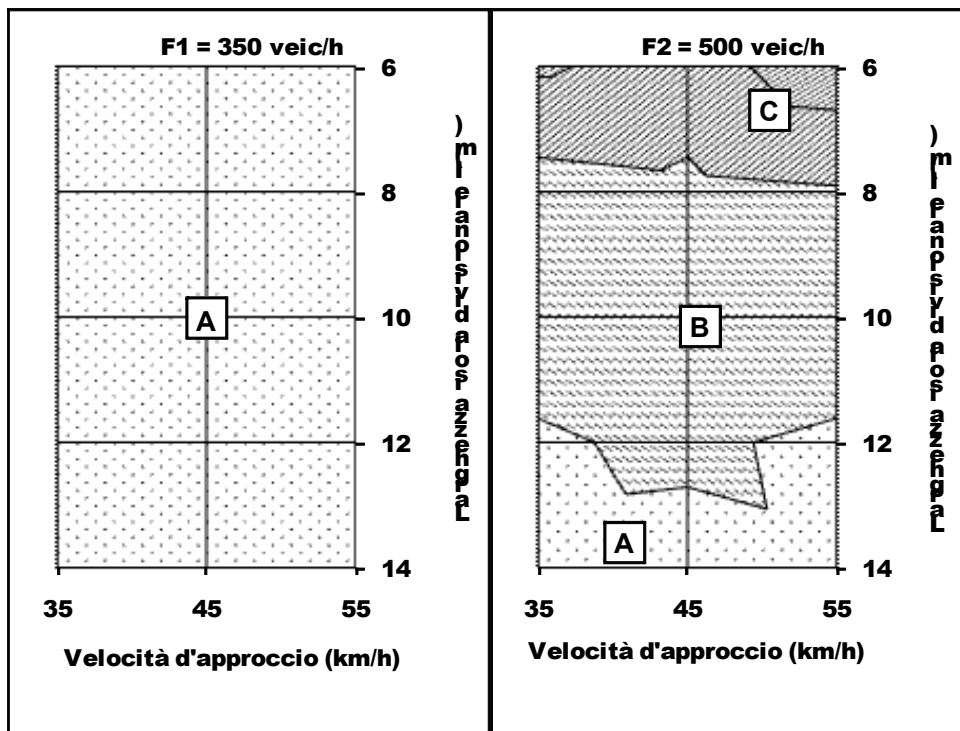


Figura 5.66: Tempi d'attesa per $F=350$ e 500 veic/h, $gap=3.5$ s, velocità e larghezze delle isole variabili

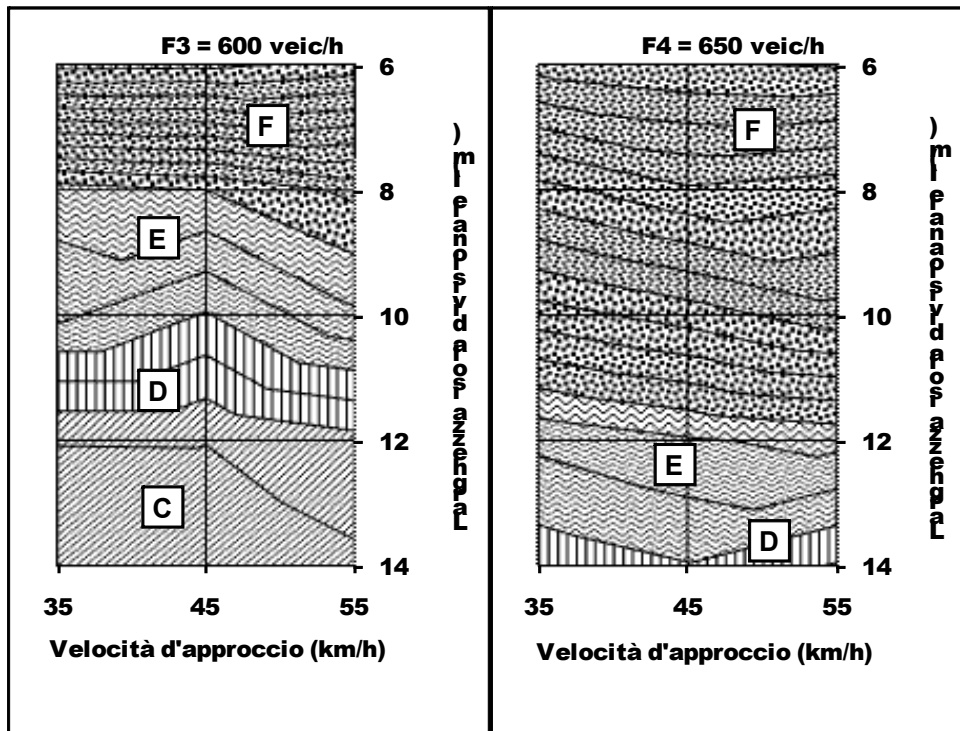


Figura 5.67: Tempi d'attesa per $F=600$ e 650 veic/h, $gap=3.5$ s, velocità e larghezze delle isole variabili

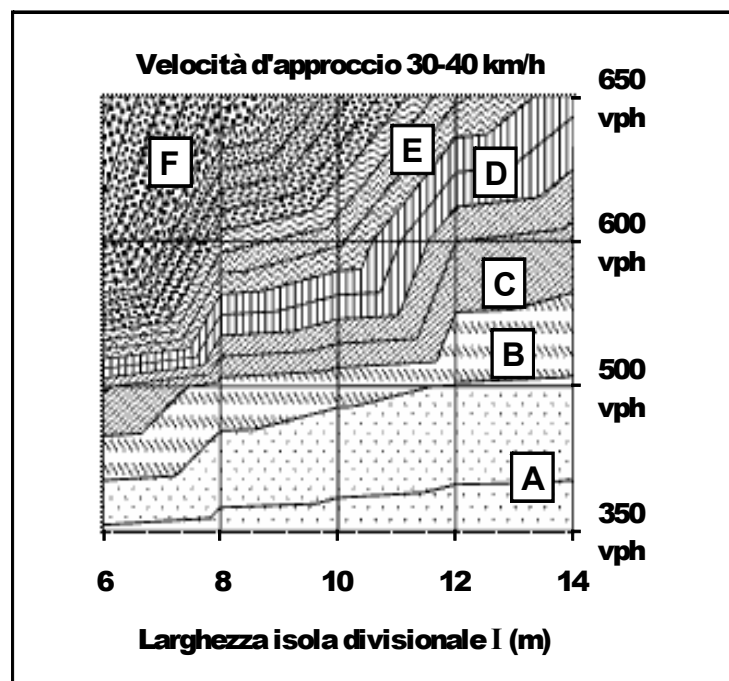


Figura 5.68: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

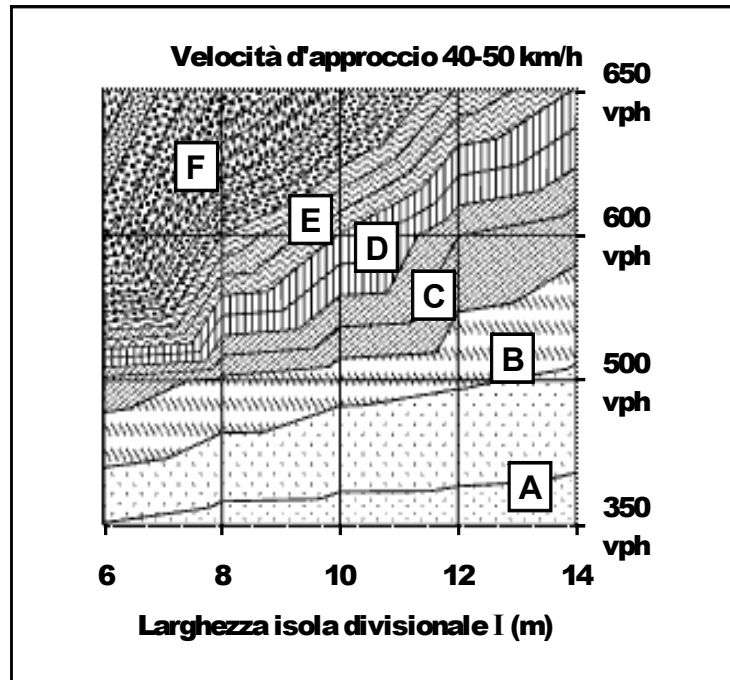


Figura 5.69: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

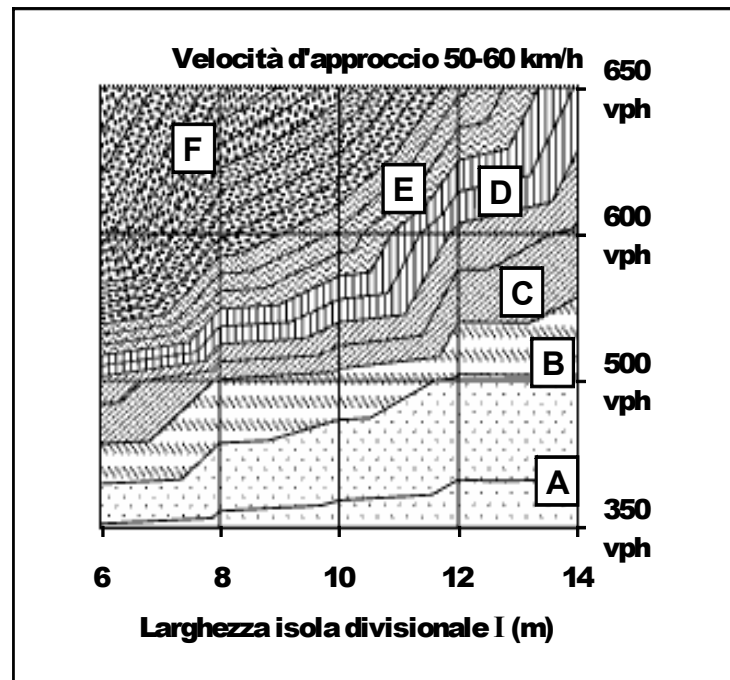


Figura 5.70: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

Gli abachi seguenti riportano invece i ritardi misurati sui diversi scenari per $gap=4.0$ s.

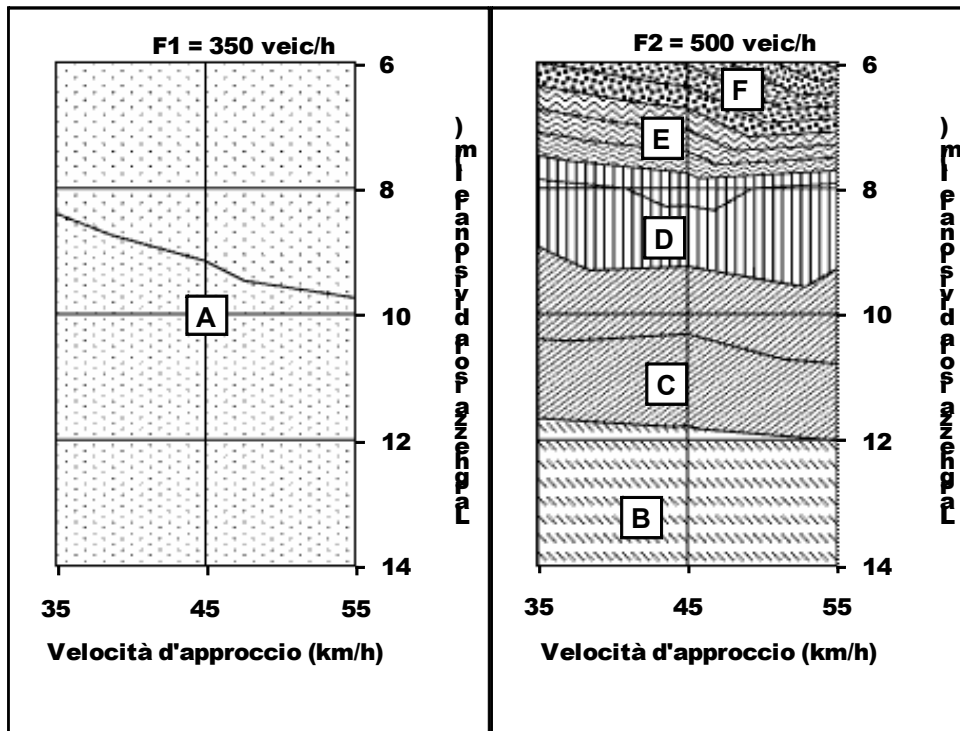


Figura 5.71: Tempi d'attesa per $F=350$ e 500 veic/h, $gap=4.0$ s, velocità e larghezze delle isole variabili

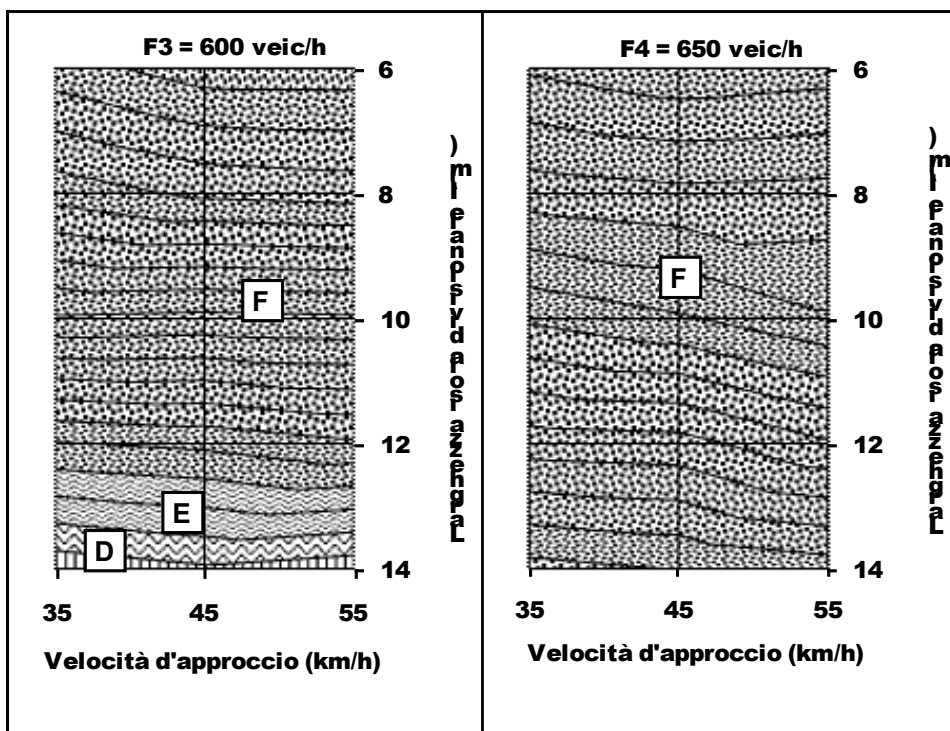


Figura 5.72: Tempi d'attesa per $F=600$ e 650 veic/h, $gap=4.0$ s, velocità e larghezze delle isole variabili

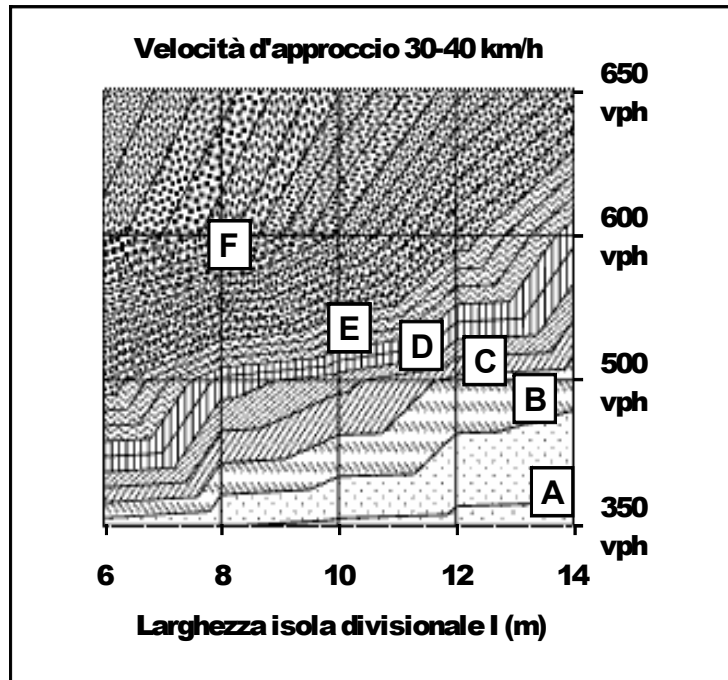


Figura 5.73: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

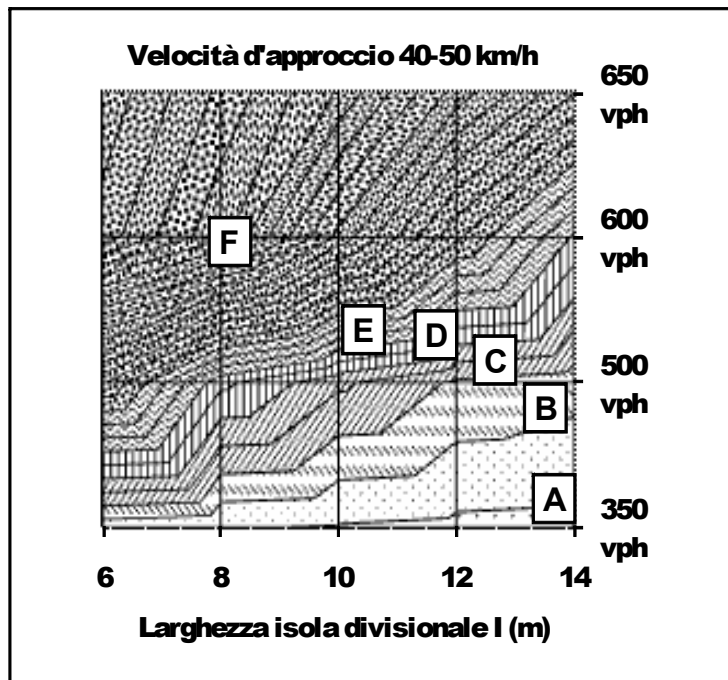


Figura 5.74: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

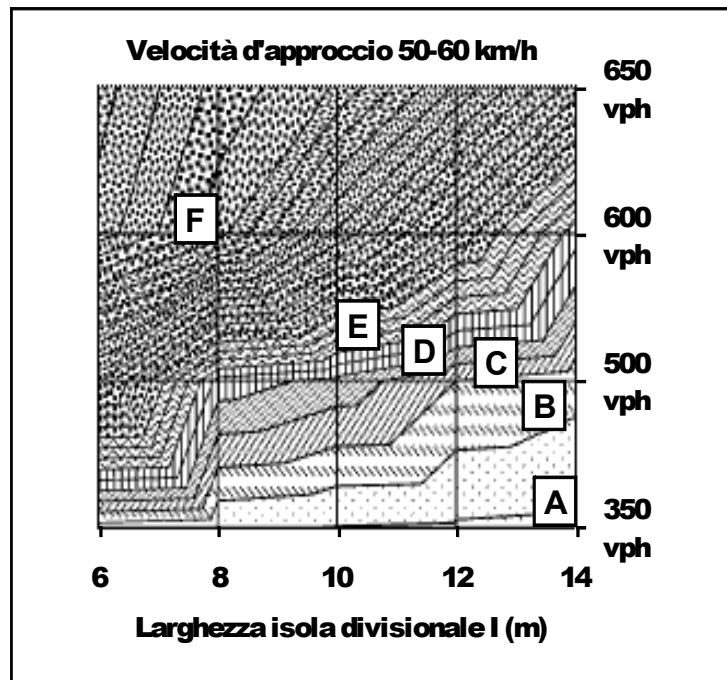


Figura 5.75: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e larghezze delle isole variabili

5.4.3. Analisi dei dati degli scenari C_i

Gli scenari C_i sono caratterizzati dalla variabilità della larghezza della corona giratoria della rotonda.

Anche per questo tipo di scenari entrano in gioco tre variabili di tipo non geometrico, ossia:

- il flusso veicolare (F_i);
- la velocità d'approccio (V_i);
- l'intervallo critico (IC_i).

Come è stato già fatto per le altre due classi di scenari, anche per quelli I_i , c'è da aggiungere che la variazione della larghezza dell'anello, lasciando fissi gli altri parametri geometrici visti nel Paragrafo 5.3.3., comporta anche la conseguente variazione dell'angolo di deflessione β e della sequenza dei raggi di curvatura $R1$, $R2$ ed $R3$ relativi alla traiettoria di attraversamento (riferendoci alla Figura 1.16).

A tal proposito, la verifica di una corretta modellizzazione geometrica delle rotonde nei diversi scenari in Vissim, è passata proprio dal controllo di queste

grandezze in funzione della variabilità dell'elemento geometrico principale, che in questo caso era la larghezza dell'isola divisionale.

La Tabella 5.22 mostra la correlazione esistente tra queste variabili geometriche.

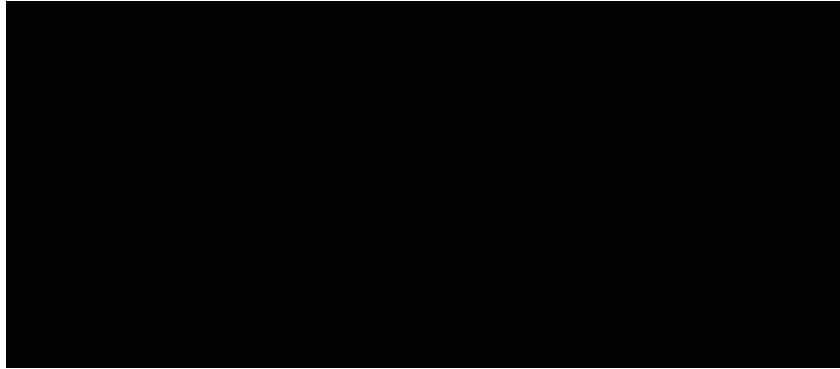


Tabella 5.22: Relazione tra Angolo di deflessione, Raggi di deflessione e larghezza dell'anello

Tutto ciò è riscontrabile nei quattro grafici riportati nelle Figure 5.76, 5.77, 5.78 e 5.79.

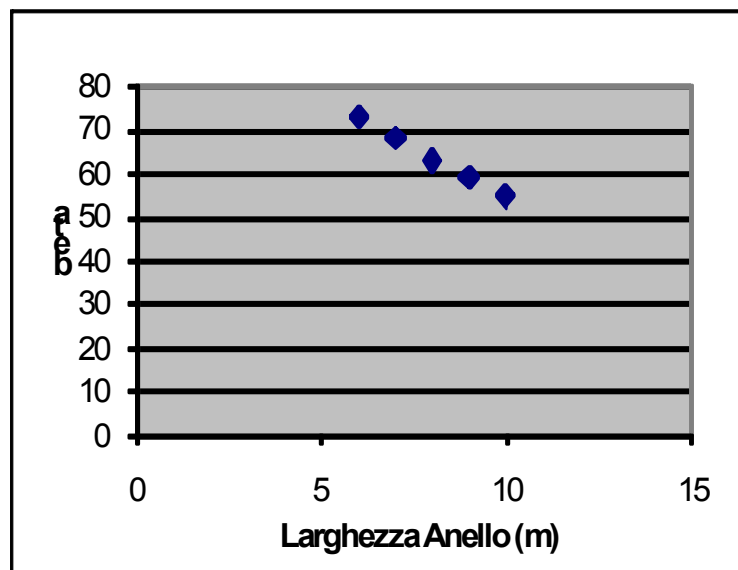


Figura 5.76: Relazione tra Angolo di deflessione β e larghezza della corona giratoria

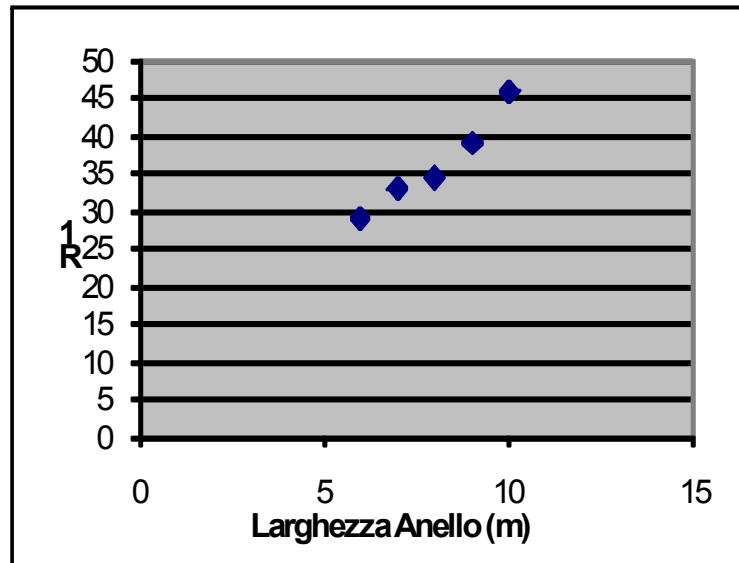


Figura 5.77: Relazione tra Raggio di deflessione R_1 e larghezza della corona giratoria

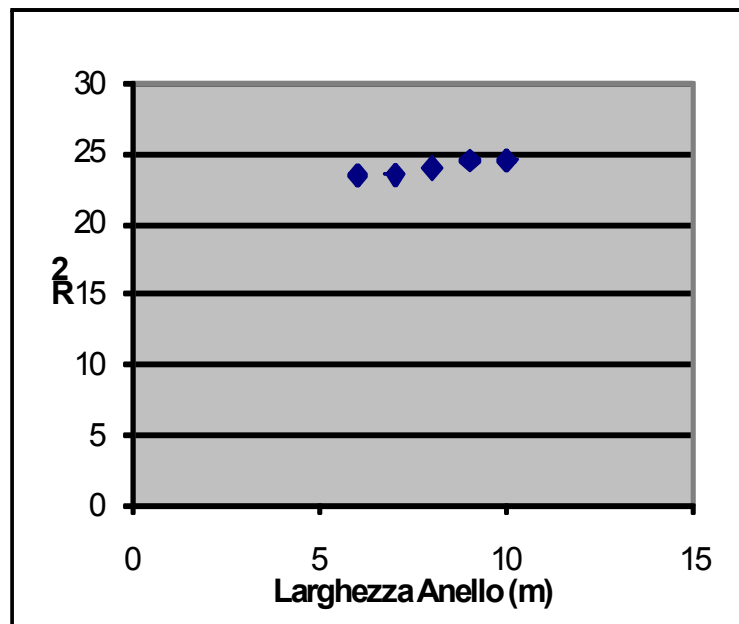


Figura 5.78: Relazione tra Raggio di deflessione R_2 e larghezza della corona giratoria

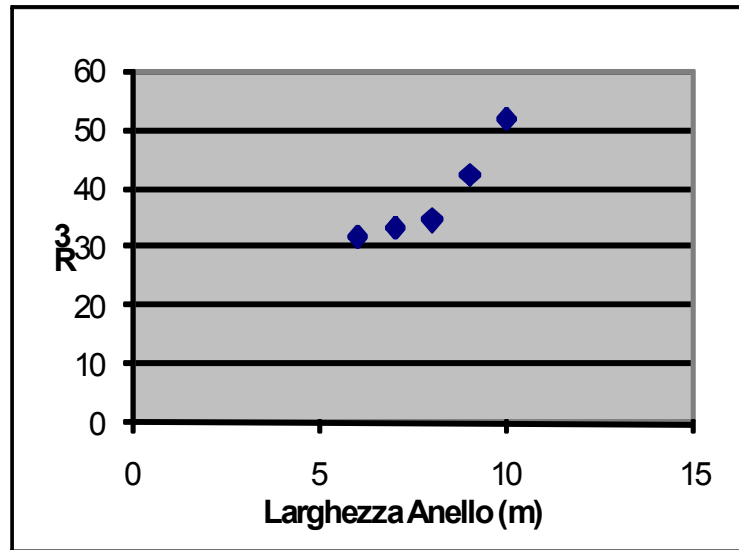


Figura 5.79: Relazione tra Raggio di deflessione R3 e larghezza della corona giratoria

Dall'analisi dei grafici appena esposti, si nota come all'aumentare della larghezza dell'anello della rotatoria, decresca l'angolo di deflessione β .

Viceversa, all'aumentare sempre della larghezza della corona giratoria, aumentano i raggi $R1$, $R2$ ed $R3$.

Entrambe le considerazioni sopra esposte sono pienamente in linea con le relazioni rinvenibili in letteratura.

Di seguito le Tabelle 5.23, 5.24 e 5.25 riportano i tempi medi d'attesa valutati da Vissim durante la simulazione degli scenari C_i in funzione della variazione dei *gap* critici, dei flussi di traffico e delle velocità d'approccio.

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 3,0 s						
	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
C0	2,8	2,8	3,1	9,5	10,5	11,4
C1	2,6	2,5	2,8	9,0	9,5	9,5
C2	2,3	2,5	2,5	8,4	8,7	9,4
C3	2,6	2,5	2,6	8,7	8,0	8,9
C4	2,4	2,4	2,6	8,6	8,8	9,0
	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
C0	26,6	27,5	31,1	60,0	60,0	61,3
C1	23,8	25,6	26,2	54,0	53,2	56,1
C2	19,2	17,8	18,2	39,9	44,6	40,3
C3	19,4	21,0	21,5	40,1	40,8	41,0
C4	17,5	19,5	20,3	36,5	46,4	46,2

Tabella 5.23: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari C_i (gap critico = 3.0 s)

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 3,5 s						
	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
C0	4,3	4,8	4,6	20,6	17,9	22,9
C1	4,0	4,4	4,8	20,6	20,0	20,3
C2	3,6	3,8	3,9	15,9	16,0	16,3
C3	3,7	3,7	4,2	16,6	16,9	17,3
C4	3,4	3,8	4,0	15,0	16,5	17,4
	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
C0	96,9	96,4	93,2	107,2	109,7	110,6
C1	95,4	96,3	88,0	109,3	107,8	110,5
C2	65,0	67,9	69,1	86,9	91,3	90,4
C3	72,6	79,8	75,6	99,1	99,2	101,8
C4	71,1	70,3	73,2	95,5	96,5	99,5

Tabella 5.24: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari C_i (gap critico = 3.5 s)

Tempi medi d'attesa (s) - Intervallo Critico = 4,0 s						
	F1 = 350 veic/h			F2 = 500 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
C0	7,5	7,0	7,7	55,0	60,5	76,7
C1	6,7	7,2	6,7	62,7	49,3	62,7
C2	6,3	6,4	6,3	43,1	43,1	43,1
C3	6,4	6,5	6,4	37,4	49,9	37,4
C4	5,9	6,9	5,9	39,9	37,9	39,9
	F3 = 600 veic/h			F4 = 650 veic/h		
	Velocità d'approccio			Velocità d'approccio		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
C0	122,9	127,6	127,7	130,7	133,6	132,2
C1	123,9	128,2	123,9	130,4	133,7	130,4
C2	114,4	119,2	114,4	120,8	123,2	120,8
C3	115,4	118,4	115,4	119,8	125,6	119,8
C4	113,2	114,9	113,2	118,6	121,4	118,6

Tabella 5.25: Tempi medi d'attesa restituiti da Vissim per gli scenari C_i (gap critico = 4.0 s)

Nei paragrafi successivi saranno riportati, in termini grafici, tali risultati differenziandoli per flussi di traffico, mettendo inoltre a confronto i dati ottenuti con i diversi intervalli critici e determinando anche i diversi livelli di servizio per le varie combinazioni di variabili.

5.4.3.1. Risultati degli scenari C_i con $F_1=350$ veic/h

Prendendo in considerazione solo i risultati ottenuti con gli scenari C_i applicando il flusso di traffico $F_1=350$ veic/h, si ottengono i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del gap critico e della velocità d'approccio.

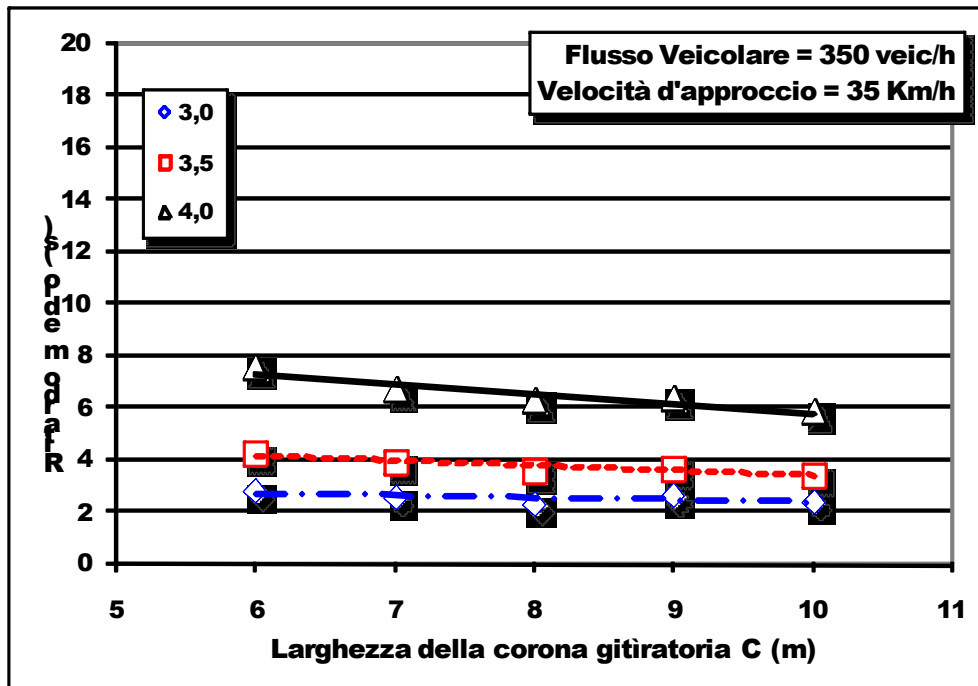


Figura 5.80: Tempi medi d'attesa per $V= 35 \text{ Km/h}$, $F=350 \text{ veic/h}$, gap e larghezze dell'anello variabili

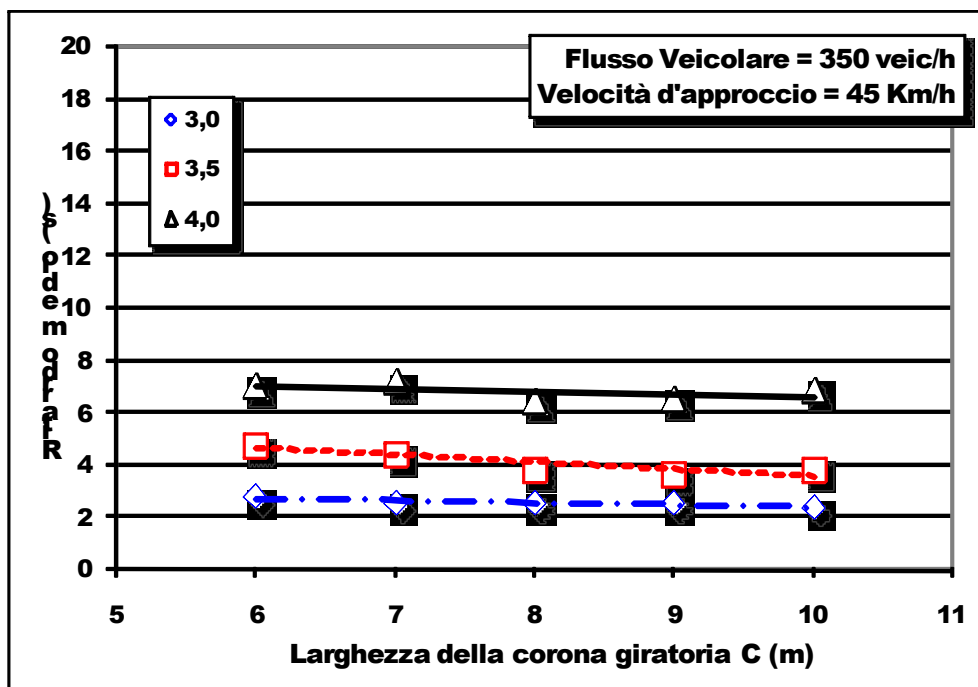


Figura 5.81: Tempi medi d'attesa per $V= 45 \text{ Km/h}$, $F=350 \text{ veic/h}$, gap e larghezze dell'anello variabili

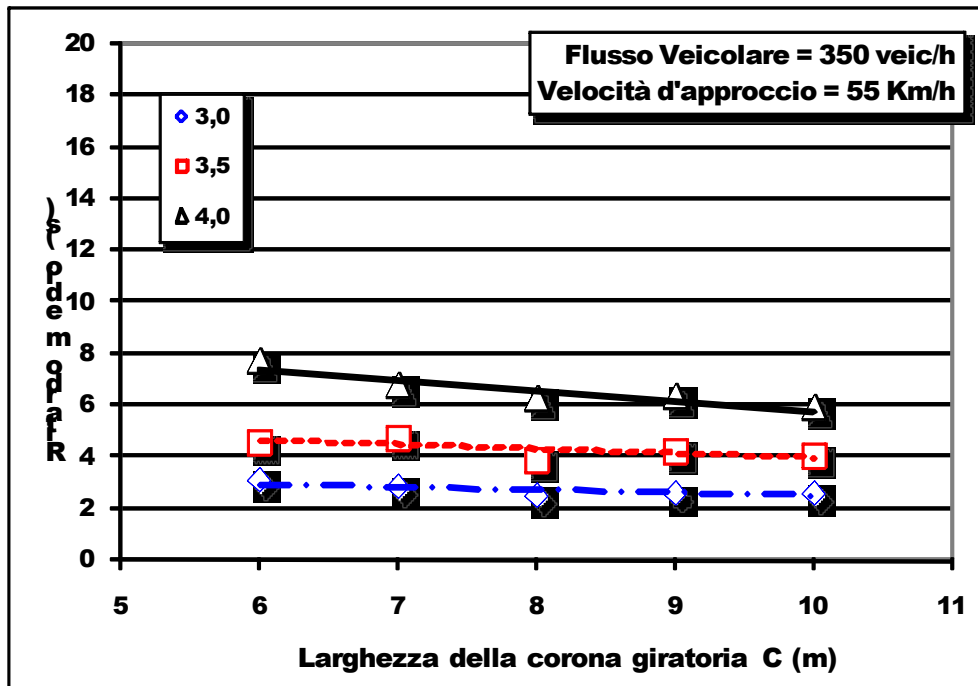


Figura 5.82: Tempi medi d'attesa per $V=55$ Km/h, $F=350$ veic/h, gap e larghezze dell'anello variabili

Dall'analisi dei dati si nota subito come all'aumentare dei gap aumentino anche i ritardi, mentre all'aumentare della larghezza dell'anello diminuiscono i ritardi per qualunque classe di velocità e per qualunque valore del gap.

In ogni caso, essendo la F_1 la classe di flussi di traffico più scarsa, per qualunque configurazione, i ritardi non superano mai gli 8 s.

5.4.3.2. Risultati degli scenari C_i con $F_2=500$ veic/h

Così come fatto nel paragrafo precedente, vengono riportati i risultati ottenuti con gli scenari C_i applicando questa volta il flusso di traffico $F_2=500$ veic/h. Si ottengono così i seguenti grafici in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del gap critico e della velocità d'approccio.

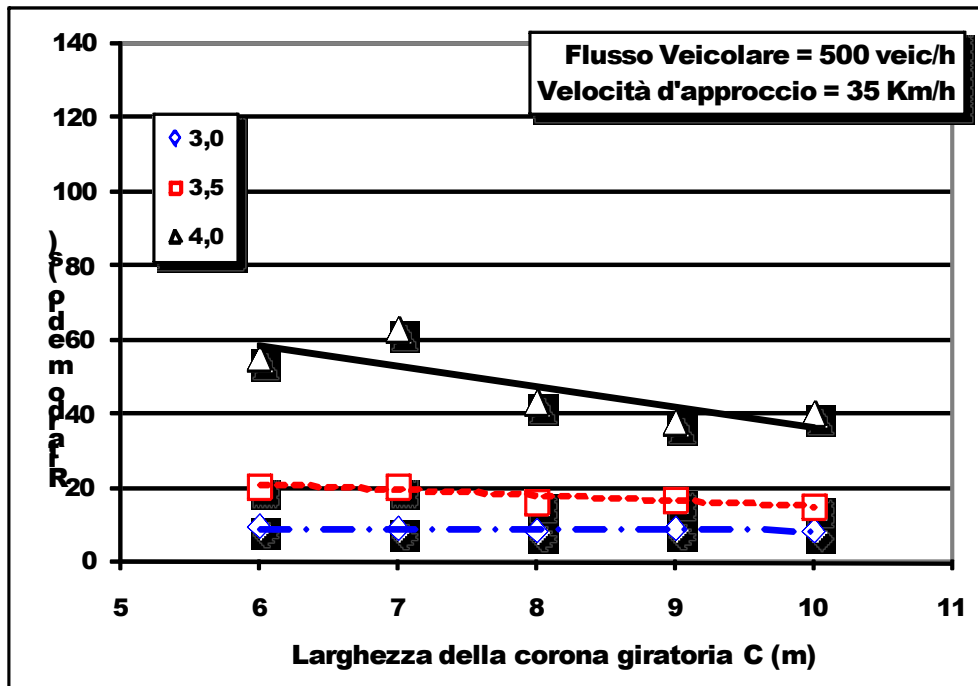


Figura 5.83: Tempi medi d'attesa per $V= 35 \text{ Km/h}$, $F=500 \text{ veic/h}$, gap e larghezze dell'anello variabili

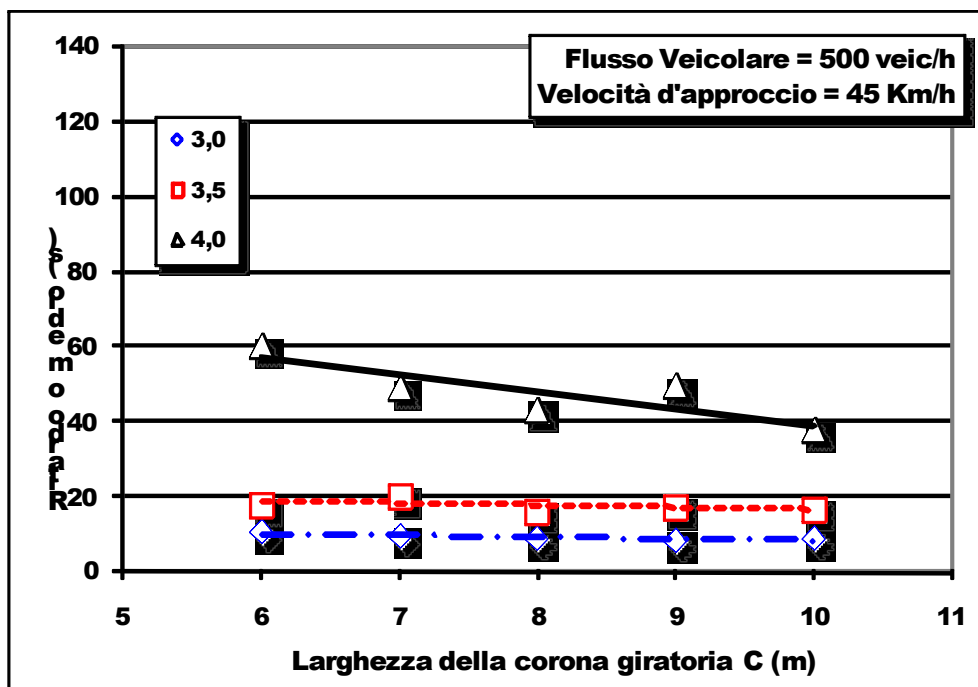


Figura 5.84: Tempi medi d'attesa per $V= 45 \text{ Km/h}$, $F=500 \text{ veic/h}$, gap e larghezze dell'anello variabili

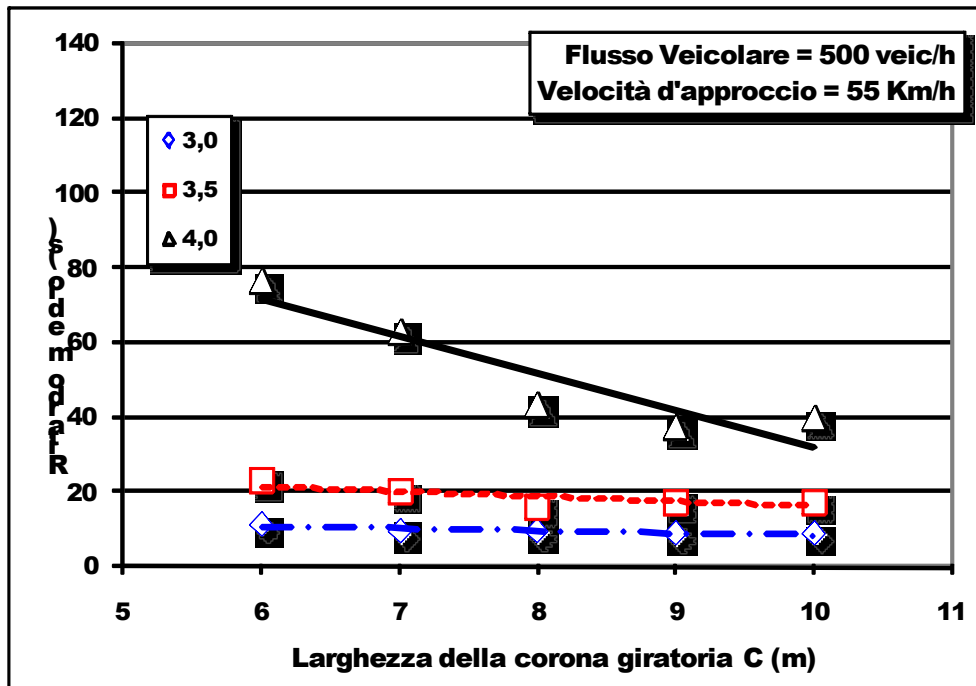


Figura 5.85: Tempi medi d'attesa per $V=55$ Km/h, $F=500$ veic/h, gap e larghezze dell'anello variabili

Anche in questo caso, i grafici mostrano come, per un fissato valore della larghezza della corona giratoria della rotonda, all'aumentare del *gap* critico, sistematicamente aumentano i tempi medi d'attesa ai nodi.

Inoltre per *time gap* = 4,0 s, per qualsiasi velocità di approccio, al crescere della larghezza dell'isola divisionale si registra un andamento decrescente dei ritardi.

Per *time gap* compresi tra 3.0 e 3.5 s, l'andamento dei ritardi, al variare della larghezza dell'anello, si mantiene pressappoco costante e sempre inferiore a 20 s.

5.4.3.3. Risultati degli scenari C_i con $F_3=600$ veic/h

Anche per gli scenari C_i applicando il flusso di traffico $F_3=600$ veic/h, vengono proposti i grafici seguenti in cui i tempi medi d'attesa sono sempre riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

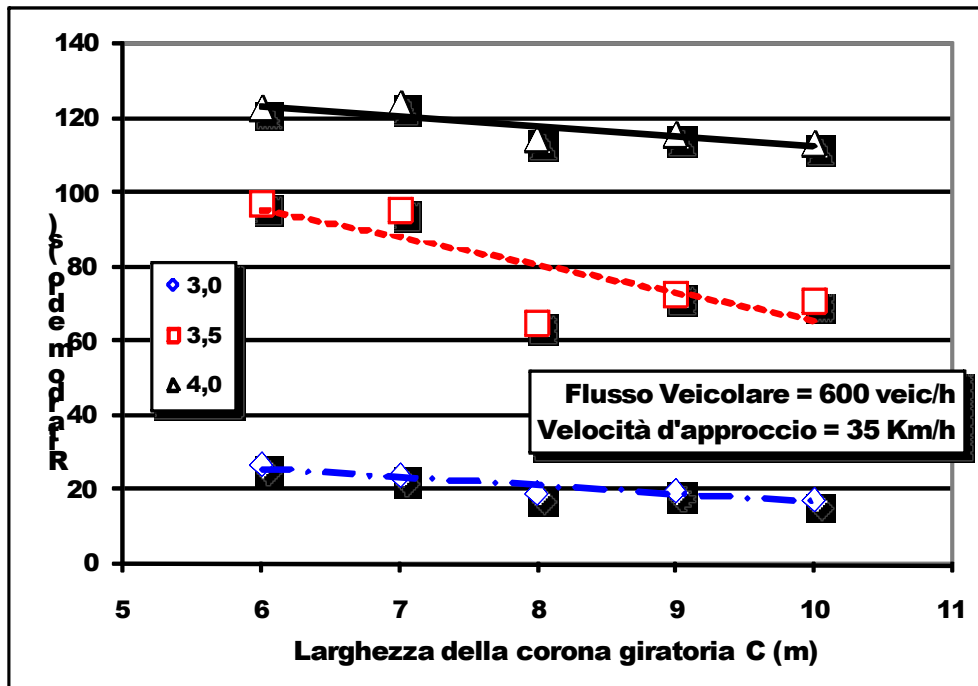


Figura 5.86: Tempi medi d'attesa per $V= 35 \text{ Km/h}$, $F=600 \text{ veic/h}$, gap e larghezze dell'anello variabili

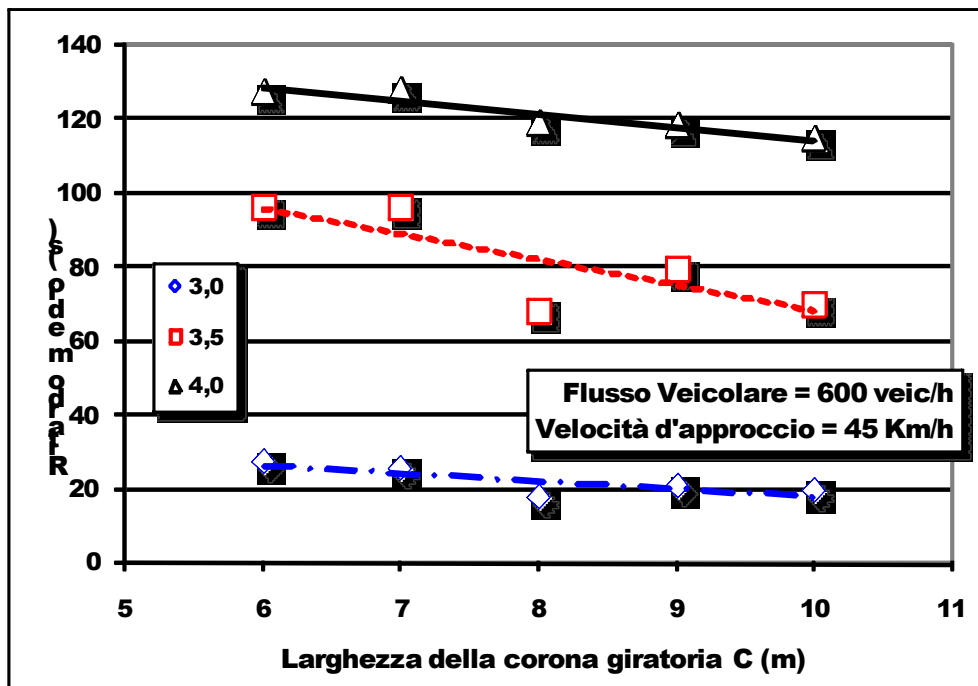


Figura 5.87: Tempi medi d'attesa per $V= 45 \text{ Km/h}$, $F=600 \text{ veic/h}$, gap e larghezze dell'anello variabili

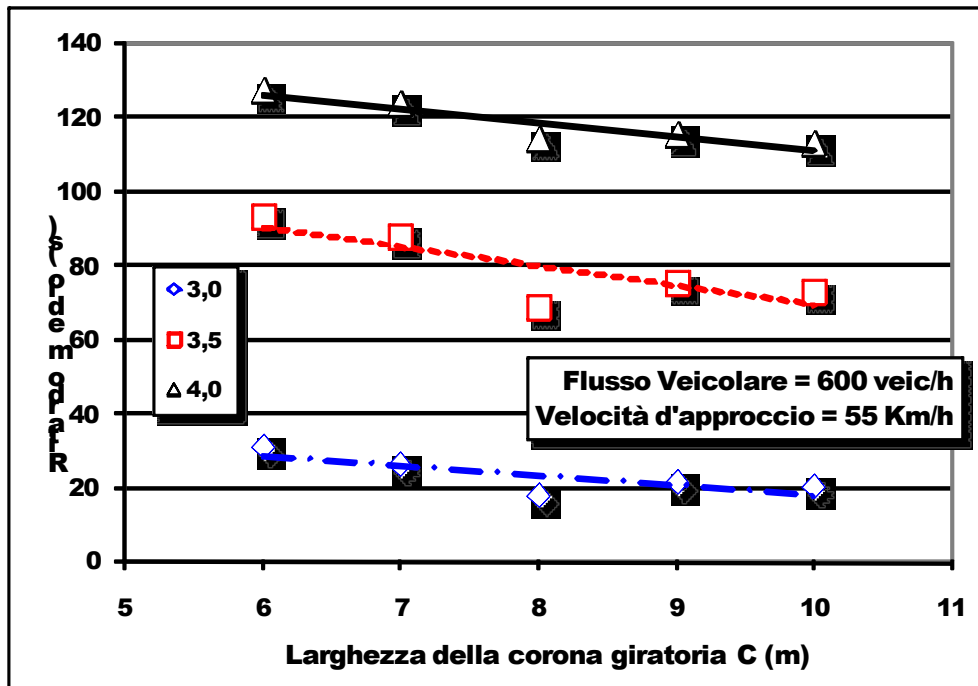


Figura 5.88: Tempi medi d'attesa per $V=55$ Km/h, $F=600$ veic/h, gap e larghezze dell'anello variabili

In questo caso c'è da dire che, per una data larghezza dell'isola della rotatoria, ad intervalli critici elevati corrispondono ritardi estremamente elevati.

Da notare inoltre che, per qualunque *time gap* e per qualsiasi velocità di approccio, al crescere della larghezza della corona giratoria si registra un andamento decrescente dei ritardi: ciò è tanto più evidente quanto più è elevato l'intervallo critico.

E' opportuno sottolineare che, a prescindere da *gap* critico imposto durante la simulazione, un aumento della larghezza della corona giratoria comporta una diminuzione dei ritardi medi; diminuzione che risulta essere meno accentuata solo nel caso di $gap = 3,0$ s; questo assunto consente comunque di evidenziare come tale parametro geometrico risulti essere importante nell'ottica dell'ottimizzazione degli aspetti funzionali di una rotatoria.

5.4.3.4. Risultati degli scenari C_i con $F_4=650$ veic/h

Partendo pertanto dagli scenari C_i ed applicando il flusso di traffico $F_4=650$ veic/h, vengono proposti i grafici seguenti in cui i tempi medi d'attesa sono sempre

riportati in funzione del raggio esterno della rotonda, del *gap* critico e della velocità d'approccio.

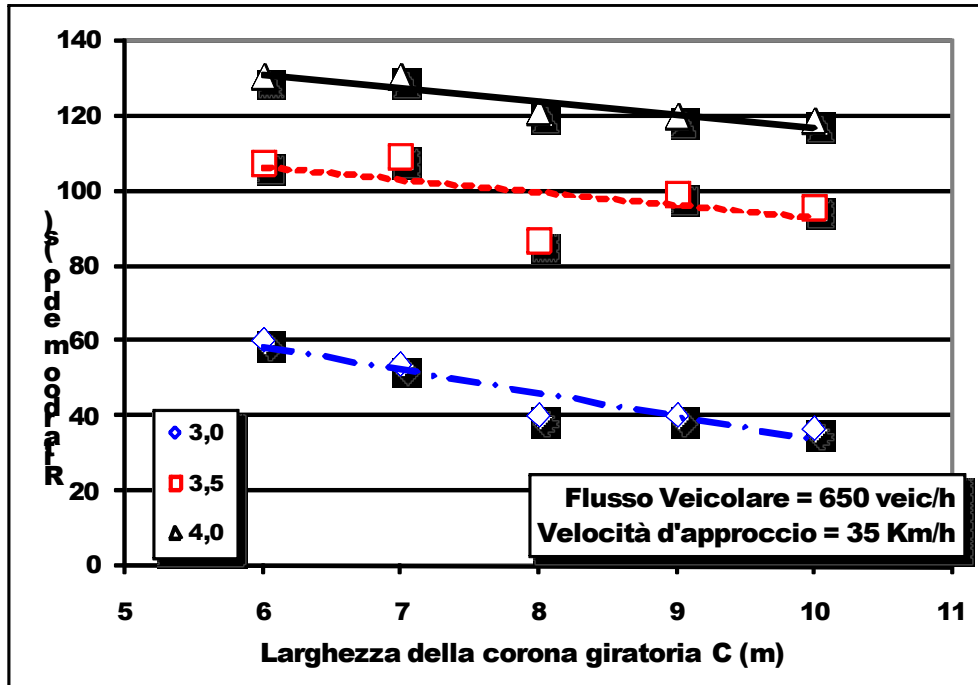


Figura 5.89: Tempi medi d'attesa per $V=35$ Km/h, $F=650$ veic/h, *gap* e larghezze dell'anello variabili

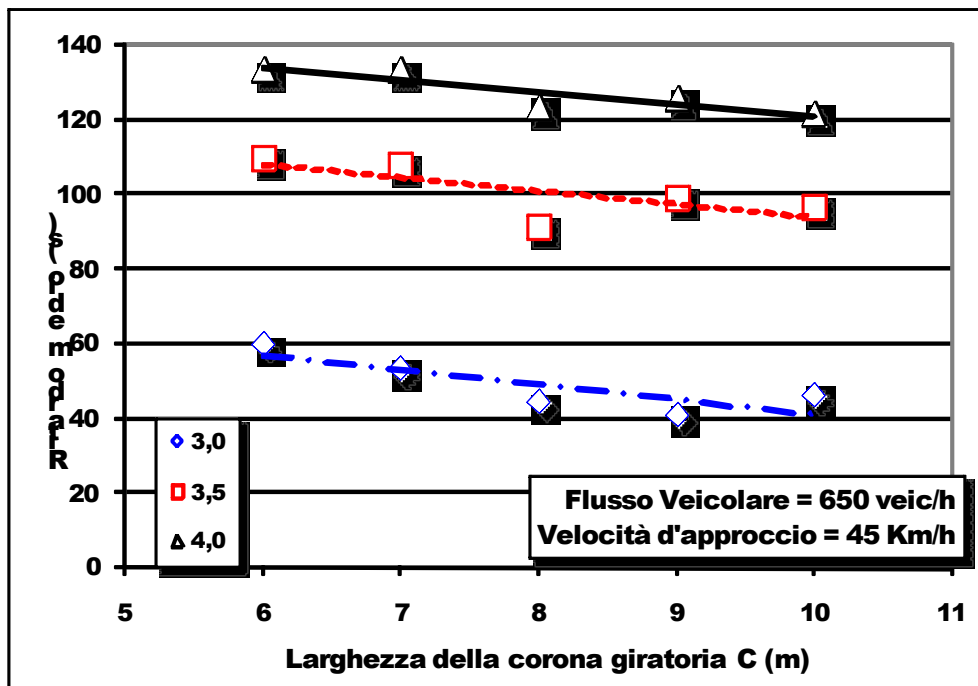


Figura 5.90: Tempi medi d'attesa per $V=45$ Km/h, $F=650$ veic/h, *gap* e larghezze dell'anello variabili

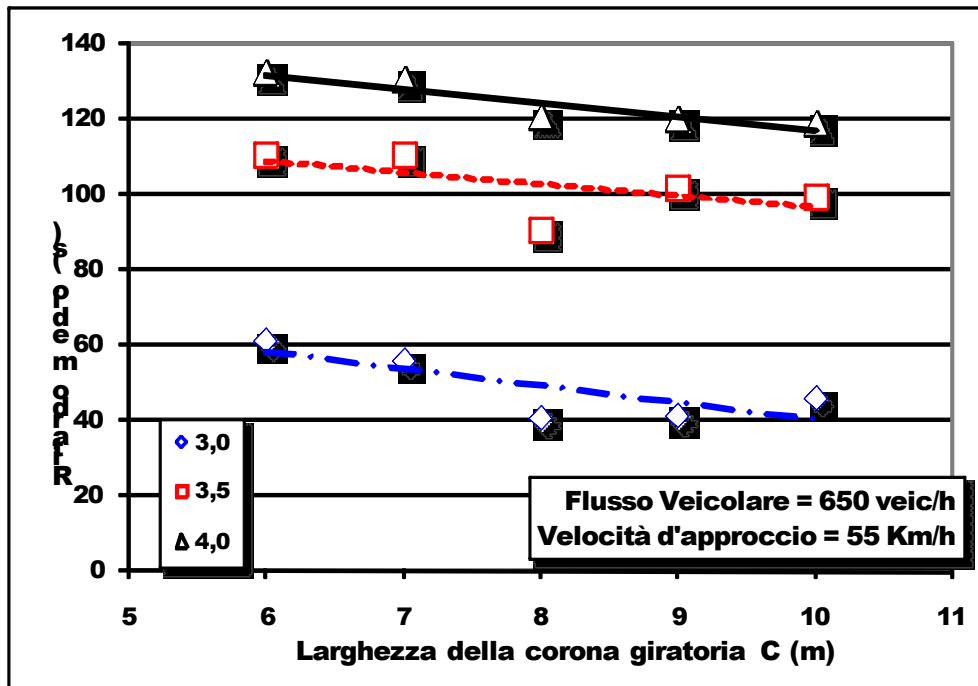


Figura 5.91: Tempi medi d'attesa per $V= 55 \text{ Km/h}$, $F=650 \text{ veic/h}$, gap e larghezze dell'anello variabili

Anche per questi scenari, per un dato valore della larghezza dell'anello, a *time gap* elevati corrispondono ritardi elevati.

Inoltre per qualunque *time gap* e per qualsiasi velocità di approccio, al decrescere della larghezza della corona si registra un forte andamento crescente dei ritardi.

C'è da aggiungere inoltre che per *time gap* uguali a 3.0 s, per qualunque valore della velocità e della larghezza dell'isola, i ritardi rimangono comunque sempre al di sotto dei 60 s.

E' opportuno sottolineare che, a prescindere da *gap* critico imposto durante la simulazione, un aumento della larghezza della corona giratoria comporta una diminuzione dei ritardi medi; diminuzione che risulta essere meno accentuata solo nel caso di $gap = 3, 0 \text{ s}$; questo assunto consente comunque di evidenziare come tale parametro geometrico risulti essere importante nell'ottica dell'ottimizzazione degli aspetti funzionali di una rotatoria.

5.4.3.5. Risultati degli scenari C_i in termini di livelli di servizio

Gli stessi risultati delle simulazioni degli scenari C_i , realizzati in Vissim, possono essere rappresentati in termini di livelli di servizio, secondo la Tabella 5.13: è possibile cioè individuare i campi di variabilità del livello di servizio in funzione della velocità d'approccio alla rotatoria, del flusso di traffico, della larghezza della corona giratoria e del *time gap* utilizzato.

I seguenti abachi riportano i ritardi misurati sui diversi scenari per $\text{gap} = 3.0$ s.

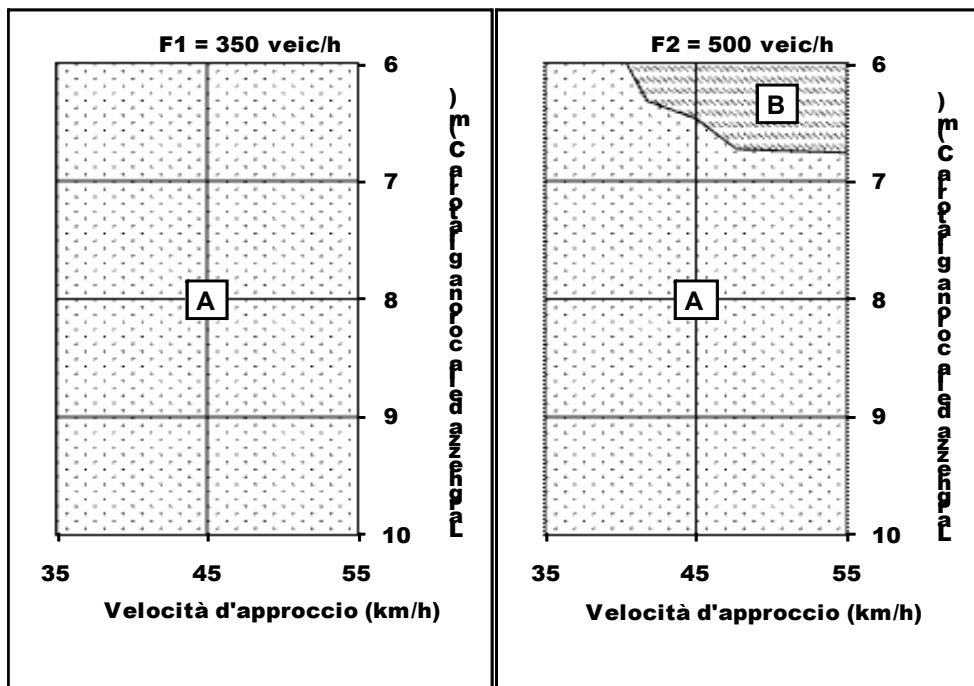


Figura 5.92: Tempi d'attesa per $F=350$ e 500 veic/h, $\text{gap}=3.0$ s, velocità e larghezze anello variabili

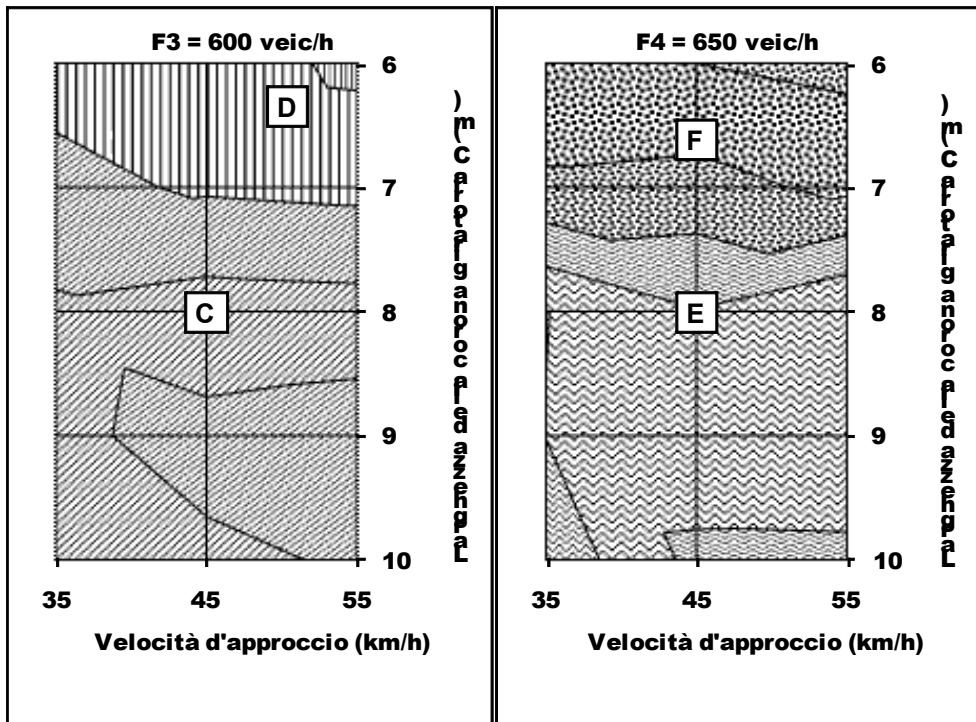


Figura 5.93: Tempi d'attesa per $F=600$ e 650 veic/h, $gap=3.0s$, velocità e larghezze dell'anello variabili

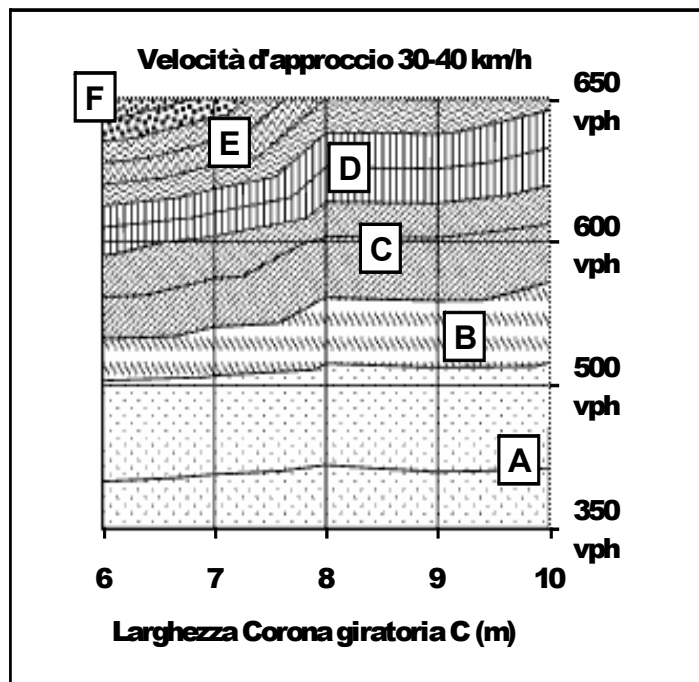


Figura 5.94: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

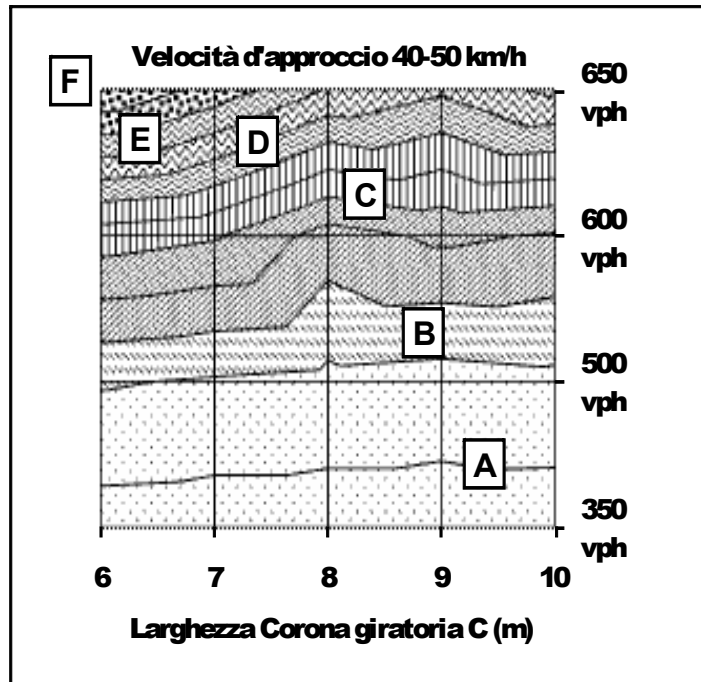


Figura 5.95: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

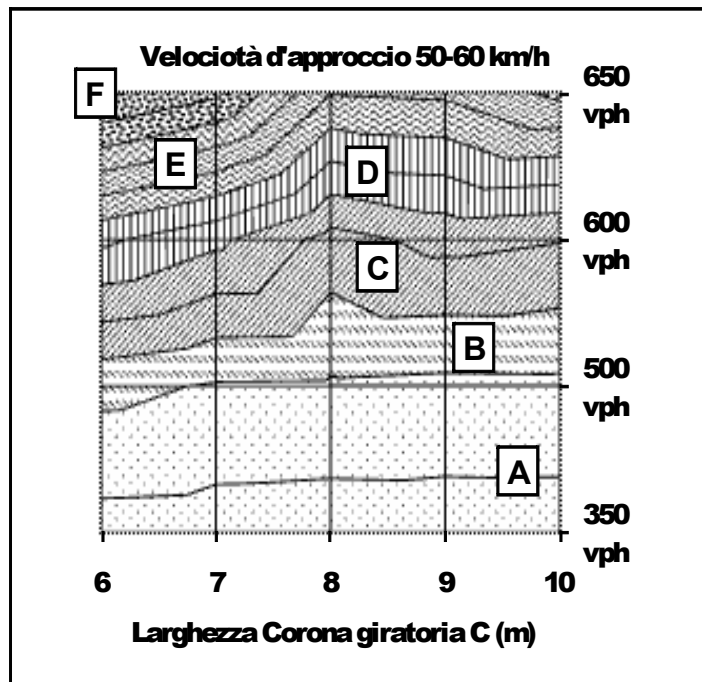


Figura 5.96: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=3.0$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

Gli abachi seguenti riportano invece i ritardi misurati sui diversi scenari per $gap=3.5$ s.

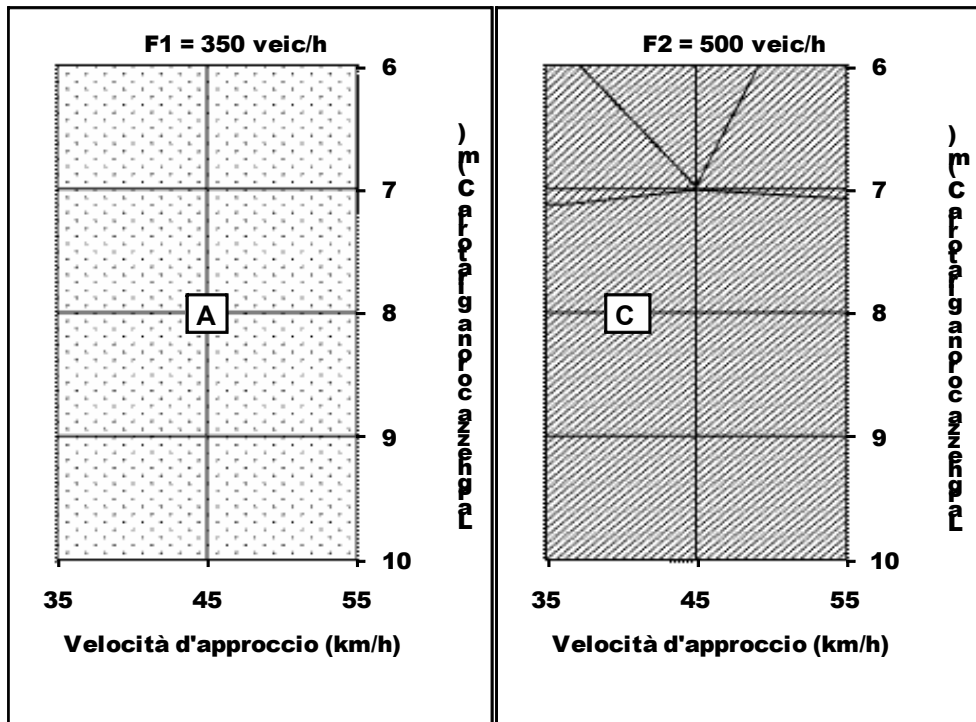


Figura 5.97: Tempi d'attesa per $F=350$ e 500 veic/h, $gap=3.5$ s, velocità e larghezze anello variabili

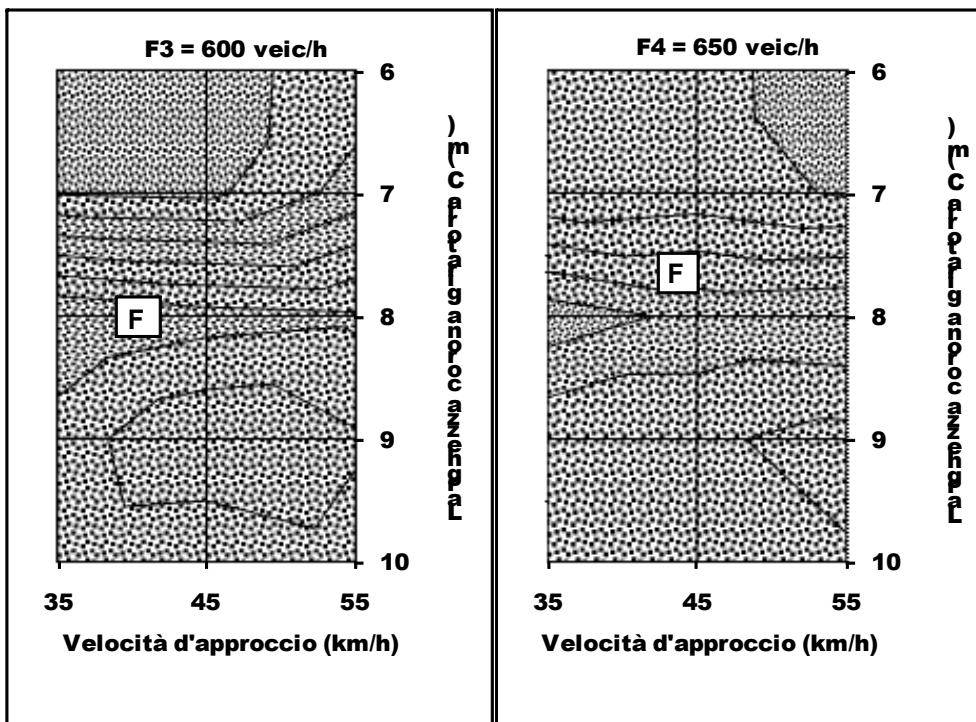


Figura 5.98: Tempi d'attesa per $F=600$ e 650 veic/h, $gap=3.5$ s, velocità e larghezze anello variabili

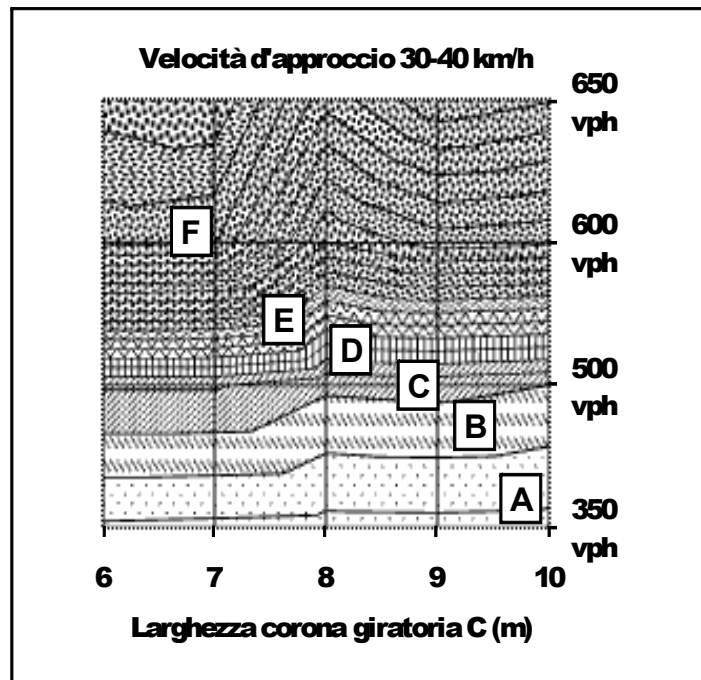


Figura 5.99: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

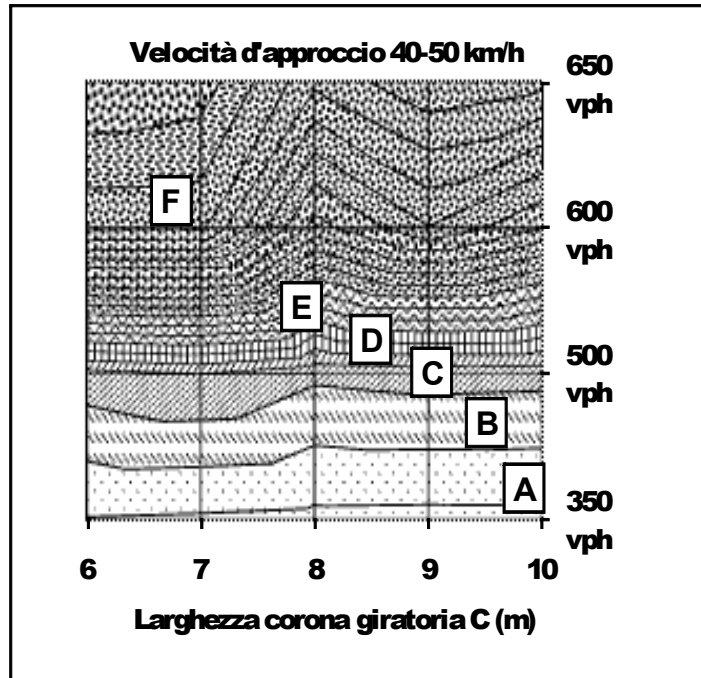


Figura 5.100: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

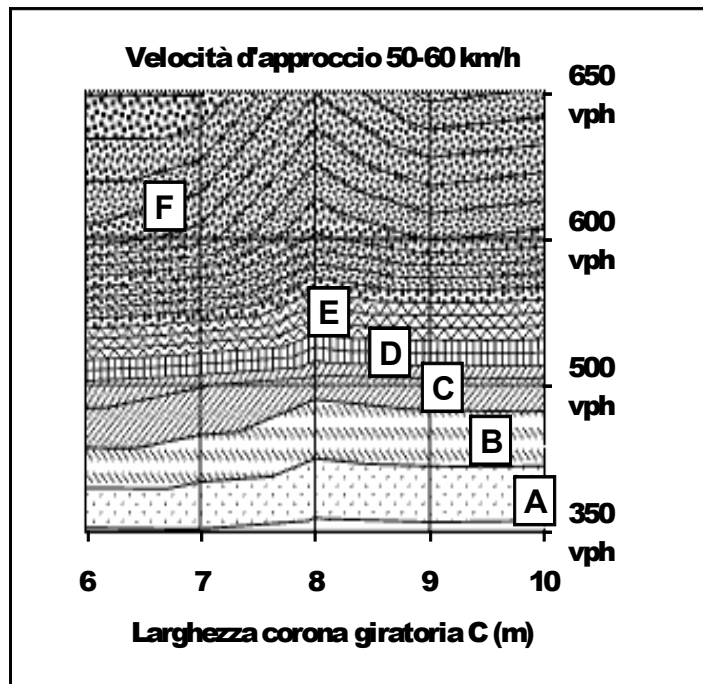


Figura 5.101: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=3.5$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

I seguenti abachi mostrano i ritardi misurati sui diversi scenari per $gap=4.0$ s.

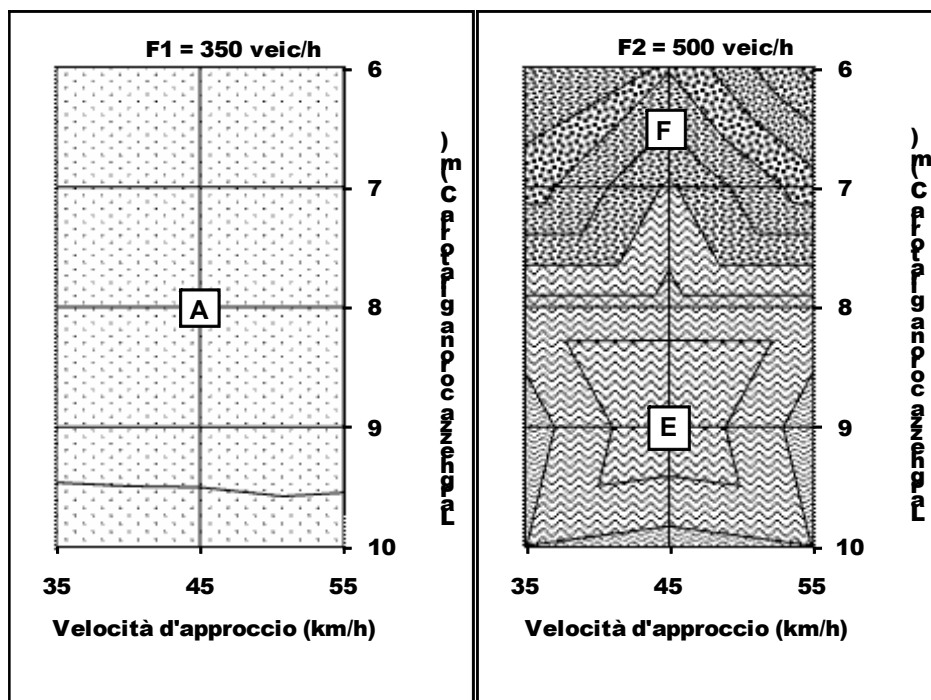


Figura 5.102: Tempi d'attesa per $F=350$ e 500 veic/h, $gap=4.0$ s, velocità e larghezze anello variabili

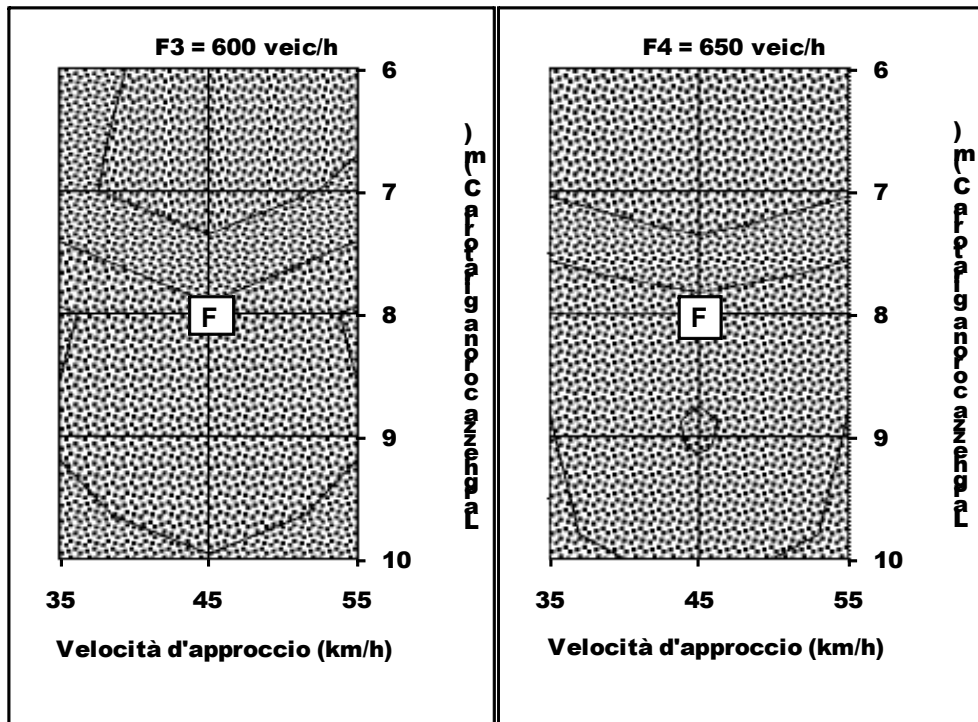


Figura 5.103: Tempi d'attesa per $F=600$ e 650 veic/h, $gap=4.0$ s, velocità e larghezze dell'anello variabili

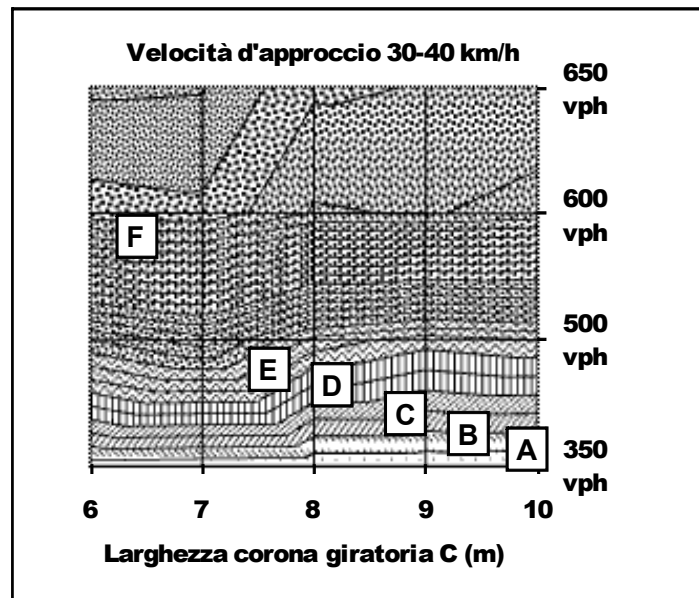


Figura 5.104: Tempi d'attesa per $V=30-40$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

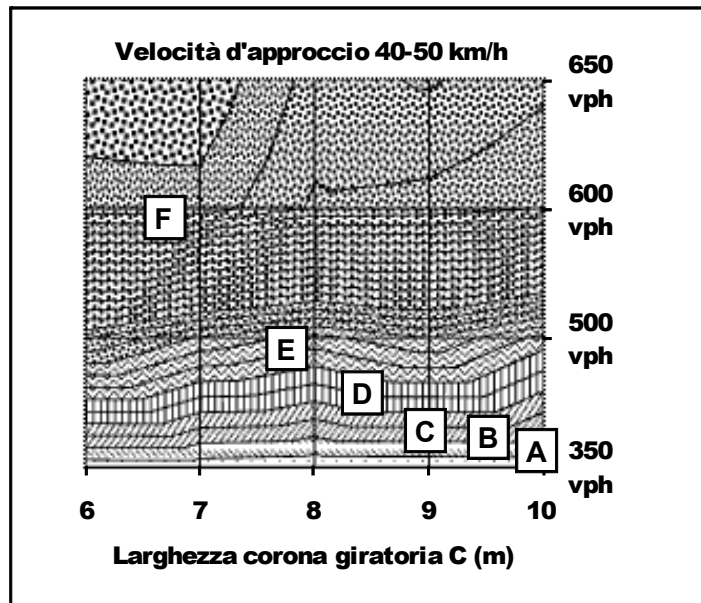


Figura 5.105: Tempi d'attesa per $V=40-50$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

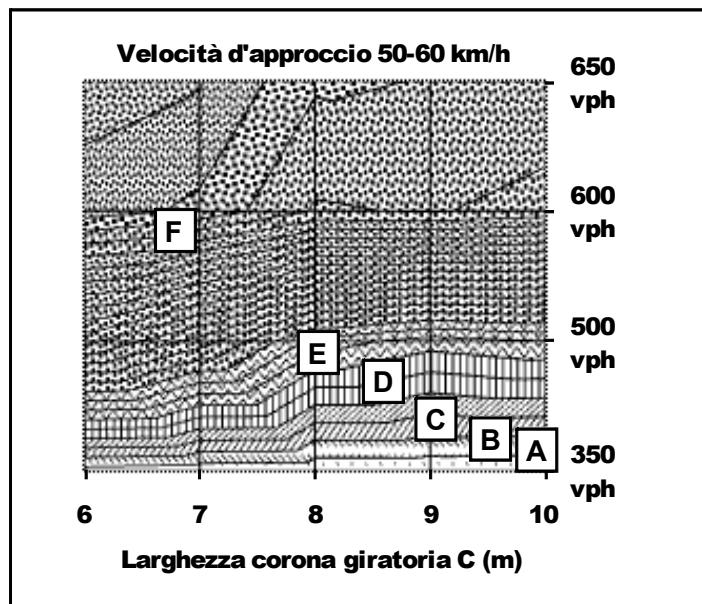


Figura 5.106: Tempi d'attesa per $V=50-60$ Km/h, $gap=4.0$ s, flussi e larghezze dell'anello variabili

5.5. Considerazioni conclusive

Le nuove metodologie di progettazione delle intersezioni stradali hanno portato, in questi ultimi anni, allo studio di nuove soluzioni che esprimano la necessità di venire incontro alle diverse problematiche riguardanti specialmente il rapporto sicurezza/prestazione.

A partire dalla riscoperta della rotatoria negli Stati Uniti si è avuta, negli ultimi trent'anni, una crescita esponenziale dello sviluppo funzionale di questo tipo di intersezione nei paesi europei più importanti, traducendo la necessità della stessa come una soluzione ai problemi della congestione e della regolamentazione del traffico.

La rotatoria, dunque, viene tuttora considerata come la soluzione che meglio fornisce i comportamenti positivi di autoregolamentazione nei guidatori. In tale contesto, una questione lungamente dibattuta è quella relativa alla formulazione di criteri progettuali che permettano univocamente la definizione geometrica delle intersezioni a circolazione rotatoria. La letteratura tecnica del settore propone diversi studi sulle caratteristiche geometriche, sui modelli interpretativi dell'andamento del traffico e sui modelli per la previsione delle caratteristiche prestazionali. Attraverso i nuovi modelli di studio delle intersezioni stradali sono stati creati alcuni software di calcolo in diversi paesi del mondo.

Nell'ambito del presente studio si è fatto uso degli algoritmi implementati nel software tedesco Vissim, che permette, con un'architettura assai flessibile, l'analisi completa di tutti i tipi di intersezioni, da quelle semaforizzate alle rotatorie. Col supporto di tale modello di calcolo è stato possibile elaborare una metodologia in grado di permettere la caratterizzazione geometrica delle rotatorie in funzione del livello di funzionalità associato ai tempi medi d'attesa.

Il risultato finale si è esplicitato nell'elaborazione di una serie di abachi di calcolo utili nelle fasi di progettazione e di verifica delle rotatorie urbane ed extraurbane. Ogni abaco, infatti, si distingue, dal punto di vista geometrico, per un dato valore del raggio esterno, della larghezza dell'isola divisionale e della corona

giratoria di una rotatoria. A queste variabili si aggiungono poi tre classi distinte di velocità, quattro flussi di traffico e soprattutto tre valori dell'intervallo critico.

Attraverso l'utilizzo di questi abachi, si ritiene, in definitiva, che si possano affrontare in maniera più semplice e razionale sia le questioni inerenti alla scelta dei parametri geometrici, che quelle relative alla determinazione del grado di efficienza delle intersezioni a circolazione rotatoria.

5.6. Bibliografia specifica del Capitolo 5.

- [5.1] Mauro R. (2007) – Il calcolo delle rotatorie. Capacità. Tempi d'attesa. Lunghezza delle code – Hevelius Edizioni, Benevento.
- [5.2] Canale S., Distefano N., Leonardi S., Pappalardo G. (2005) - Progettare le rotatorie - EPC Libri, Roma.
- [5.3] Akçelik R. (2003) – A roundabout case study comparing capacity estimates from alternative analytical model – Atti del 2nd Urban Street Symposium, Anaheim, California (USA).
- [5.4] Wiedemann, R. (1974) - Simulation des Straßenverkehrsflusses - Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (Germania).
- [5.5] Wiedemann, R. (1991) - Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads - In Advanced Telematics in Road Transport edito dalla Commissione Europea, DG XIII, Bruxelles (Lussemburgo).
- [5.6] RODEL SOFTWARE LTD (2002) – Rodel 1: interactive roundabout design – Rodel Software Ltd and Staffordshire County Council.
- [5.7] Rodegerdts L. (2004) – NCHRP 3-65: Applying Roundabouts in the United States – Committee on Highway Capacity and Quality of Service, Washington (USA).
- [5.8] Stanek D., Milam R. (2005) – High-capacity roundabout intersection analysis: going around in circles – Atti del National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [5.9] Bared J. G., Edara P. K. (2005) - Simulated Capacity of Roundabouts and Impact of Roundabout Within a Progressed Signalized Road - TRB National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [5.10] Mohamed A., Yasser H. (2001) – State of the art report on: roundabouts design, modelling and simulation – Orlando, Florida (USA).
- [5.11] Kinzel C., Trueblood M. (2004) – The Effects of Operational Parameters in the Simulation of Roundabouts – Kansas City, Missouri (USA).

- [5.12] V.A. (2000) – Traffic Analysis Software Tools – Transportation Research Board (TRB), Washington (USA).
- [5.13] V.A. (2004) – Introduction to roundabouts: Ins & Outs – Wick Engineers Inc.
- [5.14] Sisiopiku V., Oh H. (2001) – “Evaluation of roundabout performance using Sidra” – Journal of transportation engineering, Marzo/Aprile 2001, pp. 143-150.
- [5.15] Trueblood M., Dale J. (2004) – Simulating roundabouts with Vissim – Kansas City, Missouri (USA).
- [5.16] Kiattikomol V., Urbanik II T. (2005) – An Evaluation of Roundabout as an Alternative Intersection Control Device using VISSIM Simulation application– [cd-rom], TRB Annual Meeting, Washington (USA).
- [5.17] V.A. (2005) – The comparison of Paramics, Getram, Corsim and Vissim – University of Maryland, (USA).
- [5.18] Planung Transport Verkehr AG (2005) - Manuale per l'utente di VISSIM, versione 4.00 - Transport Planning Service, Perugia.
- [5.19] Capiluppi G. F. (2000) – La rotatoria come strumento per la regolazione delle intersezioni viarie a raso. Ottimizzazione della geometria e delle caratteristiche prestazionali – Atti del X Convegno Nazionale S.I.I.V., Catania.
- [5.20] Astarita, V., Guido, G., Vitale, A., (2006) – Verifica della applicabilità di rotatorie di forma non circolare tramite simulazione microscopica del deflusso veicolare – Atti del XVI Convegno Nazionale S.I.I.V., Rende (CS).
- [5.21] Gallelli V., Capiluppi G.F., Vaiana R. (2007) - Roundabouts performances analysis: comparison between classical methodologies, micro-simulation and field measuring - Atti del XXII European Conference on Operational Research, Road Traffic Management Session, Praga (Repubblica Ceca).
- [5.22] Gallelli V., Capiluppi G.F., Vaiana R. (2007) - Roundabout intersections: analysis for scenarios by micro-simulation - Atti del 4th International SIIV Congress - Advances in transport infrastructures and stakeholder expectations, Management Session + Poster Session, Palermo.

- [5.23] Gallelli V., Astarita V., Guido G., Vitale A. (2007) - Microscopic traffic simulation of non-conventional roundabouts performances: a case study - Atti del 4th International SIIV Congress - Advances in transport infrastructures and stakeholder expectations, Management Session, Palermo.
- [5.24] FHWA (2000) – Roundabouts: an informational guide – Report n. FHWA-RD-00-067 – Federal Highway Administration, U.S. Department Of Transportation, Washington (USA).
- [5.25] AA. VV. (2000) – Highway Capacity Manual 2000 - Transportation Research Board (TRB), Washington D.C. (USA).
- [5.26] Wu N. (2000) - The proposed new version of German Highway Capacity Manual - Institute for Traffic Engineering, Ruhr University Bochum (Germania).

CONFRONTO TRA LE FORMULAZIONI INTERNAZIONALI E LA MICROSIMULAZIONE: APPLICAZIONE AI CASI DI STUDIO

6.1. Introduzione

In ambito internazionale, come ampiamente esposto nel Capitolo 3, molteplici sono le metodiche utilizzate per studiare le performance offerte da una rotatoria (metodi statistici, metodi semiprobabilistici, microsimulazione, etc.).

Ogni metodo privilegia alcuni aspetti caratteristici della rotatoria rispetto ad altri e questo comporta, spesso, diversità di risultati ottenuti anche se applicati allo stesso caso di studio.

E' a partire da queste considerazioni che in questo capitolo verranno presentati, in termini comparativi, i risultati relativi all'applicazione su due rotatorie (i due casi di studio già visti nel Capitolo 4), una geometricamente simmetrica (Mottola) e l'altra non simmetrica (Cosenza Nord), dei metodi tradizionali e della microsimulazione mediante il software Vissim [6.23].

Riassumendo, le varie formulazioni applicate sono le seguenti:

- SETRA [6.7];
- HCM 2000 (*Upper Bound e Lower Bound*) [6.13];
- HBS 2001 [6.22];
- Brilon Lineare [6.14];
- Brilon Esponenziale [6.15];
- *Semi-Two-Lane Roundabout* [6.6];
- *Guide Suisse* (Bovy e CH1) [6.8];
- TRRL [6.16];
- CETUR [6.18];
- AUSTROADS [6.11];

- VISSIM [6.44].

Quindi nei paragrafi successivi verranno definiti in dettaglio i parametri adoperati per modellizzare in Vissim [6.44] le due rotonde prese in esame e verrà effettuata un'analisi comparata fra i risultati ottenuti con le diverse formulazioni internazionali, partendo dai dati già riportati nel Capitolo 4, e quelli invece derivanti dalla simulazione dei due scenari.

6.2. Il caso di studio: la rotonda di Cosenza Nord

La scelta di prendere in considerazione questa rotonda, di cui si è già discusso nel Paragrafo 4.2, consiste nel fatto che può essere considerata tra quelle rotonde cosiddette “anomale” o “geometricamente non conformi”.

Questa intersezione, che si trova in prossimità dello svincolo di Cosenza Nord dell'autostrada A3, è caratterizzata dall'aver una forma ellittica e non circolare, con due “diametri” esterni di 65 e 80 m.

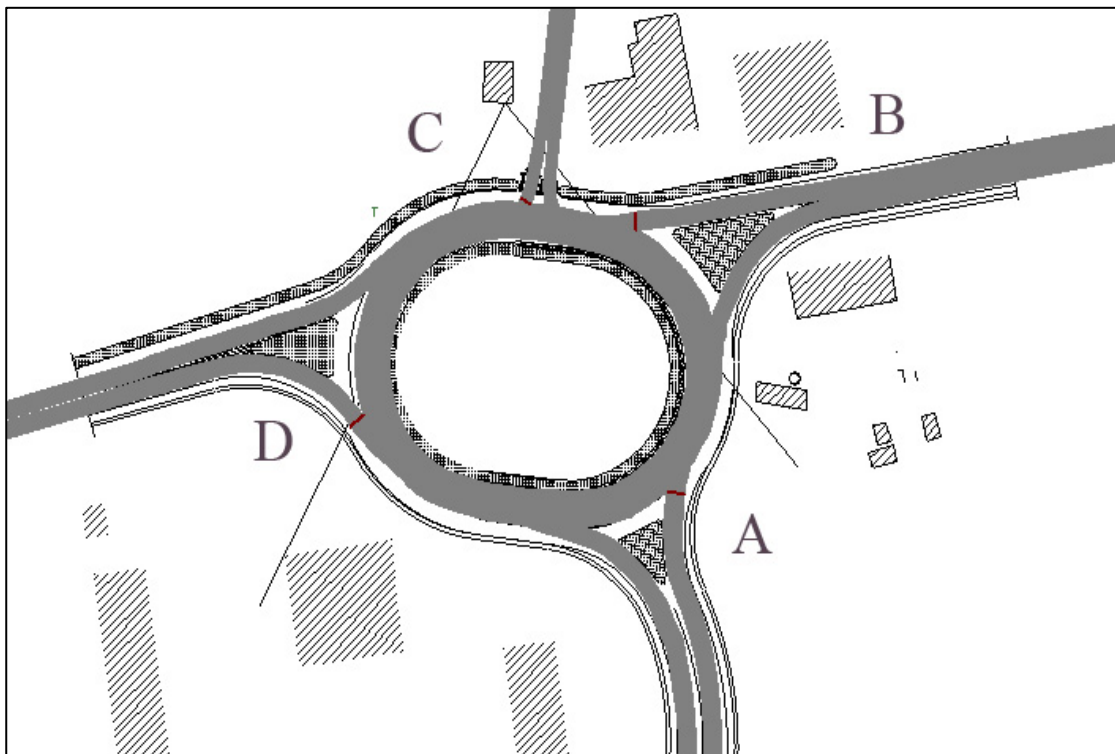


Figura 6.1: Modellizzazione grafica della rotonda di Cosenza Nord in Vissim

In Figura 6.1, è stata riportata la modellizzazione grafica della rotatoria di Cosenza Nord realizzata in Vissim mediante l'utilizzo come sfondo di un file di planimetria in formato "dxf", assai utile per una corretta geometrizzazione dello schema dell'intersezione.

Per completezza riportiamo la Tabella 6.1, dove vengono riassunti i valori degli elementi geometrici che costituiscono questa rotonda.

Raggio isola centrale (m)	Diametro esterno (m)	Larghezza Anello (m)	Corsie anello	Larghezza isole divisionali (m)				Larghezza corsie ingressi (m)			
				A	B	C	D	A	B	C	D
23 - 30	65 - 80	9.80	1	9.80	15.50	1	11.20	5.60	6.05	4.00	6.05

Tabella 6.1: Principali caratteristiche geometriche della rotatoria di Cosenza Nord [6.24]

6.2.1. Definizione dei parametri per la simulazione

Per poter realizzare una simulazione di una rotatoria, che dia risultati il più possibile vicini a quelli derivanti dal comportamento reale dei conducenti sull'intersezione stessa, è di vitale importanza una corretta definizione di tutti quei parametri che entrano in gioco nella modellizzazione di una rotatoria.

Un adeguato settaggio di queste caratteristiche deriva, oltre che da un'opportuna analisi bibliografica dei lavori che si sono occupati di tal problema, anche da un copioso numero di simulazioni, la cui attenta osservazione fornisce le indicazioni migliori per una loro corretta definizione.

I parametri principali, quelli cioè che vanno a condizionare fortemente i risultati di una simulazione, sono gli stessi che sono stati affrontati in dettaglio nel Capitolo 5, ossia:

- la distribuzione dei flussi di traffico;
- la determinazione delle velocità d'approccio ai nodi e di percorrenza sull'anello, nonché le zone di riduzione delle velocità;
- la definizione del comportamento dell'utente, attraverso la scelta del comportamento del "veicolo successivo" e la modellizzazione delle regole di precedenza.

Questi sono i tre punti che verranno affrontati nei paragrafi successivi.

6.2.1.1. La distribuzione dei flussi di traffico

Per la scelta dei flussi di traffico, ci si è chiaramente rifatti ai dati ottenuti dal rilievo condotto sulla rotatoria nell'ottobre del 2005. Dati che poi sono stati utilizzati nel Capitolo 4 per l'applicazione delle metodologie internazionali di calcolo della capacità e delle caratteristiche prestazionali di una rotatoria.

Anche per le simulazioni sono stati considerati solo flussi misurati in veicoli equivalenti attraverso i coefficienti di omogeneizzazione dell'HCM 2000 [6.13].

Quindi, per poter compiere alla fine un'analisi comparata tra i risultati della simulazione e quelli ottenuti con le formulazioni dei vari Paesi, si è ritenuto opportuno utilizzare la matrice O/D derivante dal rilievo dell'intervallo T_8 , ossia dell'arco temporale compreso tra i 35' ed i 40' (Tab. 6.2), in quanto è stato l'unico intervallo, durante il rilievo, in cui si è riscontrata contemporanea presenza di code su tutti e 4 i rami d'ingresso (almeno 4 veicoli in attesa di immettersi).

	A	B	C	D	Qe (veic/h)
A	0	492	228	24	744
B	288	0	660	24	972
C	276	492	0	60	828
D	24	0	60	0	84
Qu (veic/h)	588	984	948	108	

Tabella 6.2: Matrice O/D relativa all'intervallo temporale T_8 tra i 35' ed i 40' di rilievo [6.24]

Comunque nella trattazione di una qualunque assegnazione di traffico in Vissim, bisogna sempre ricordare che, dalle aree "parcheggio", i veicoli vengono generati ed immessi sulla rete con una distribuzione di Poisson, ossia con la più classica delle distribuzioni utilizzata in letteratura per la legge degli arrivi.

6.2.1.2. Velocità d'approccio, velocità all'anello e zone di rallentamento

L'effetto determinante che ha sulla capacità di un nodo e sui relativi tempi di percorrenza rende la velocità d'approccio agli ingressi della rotatoria un parametro estremamente importante per un'ottima simulazione.

Nel caso della rotatoria di Cosenza Nord, le distribuzioni di velocità utilizzate per gli approcci sono state definite facendo riferimento alle velocità effettivamente rilevate sui rami d’ingresso dell’intersezione stessa.

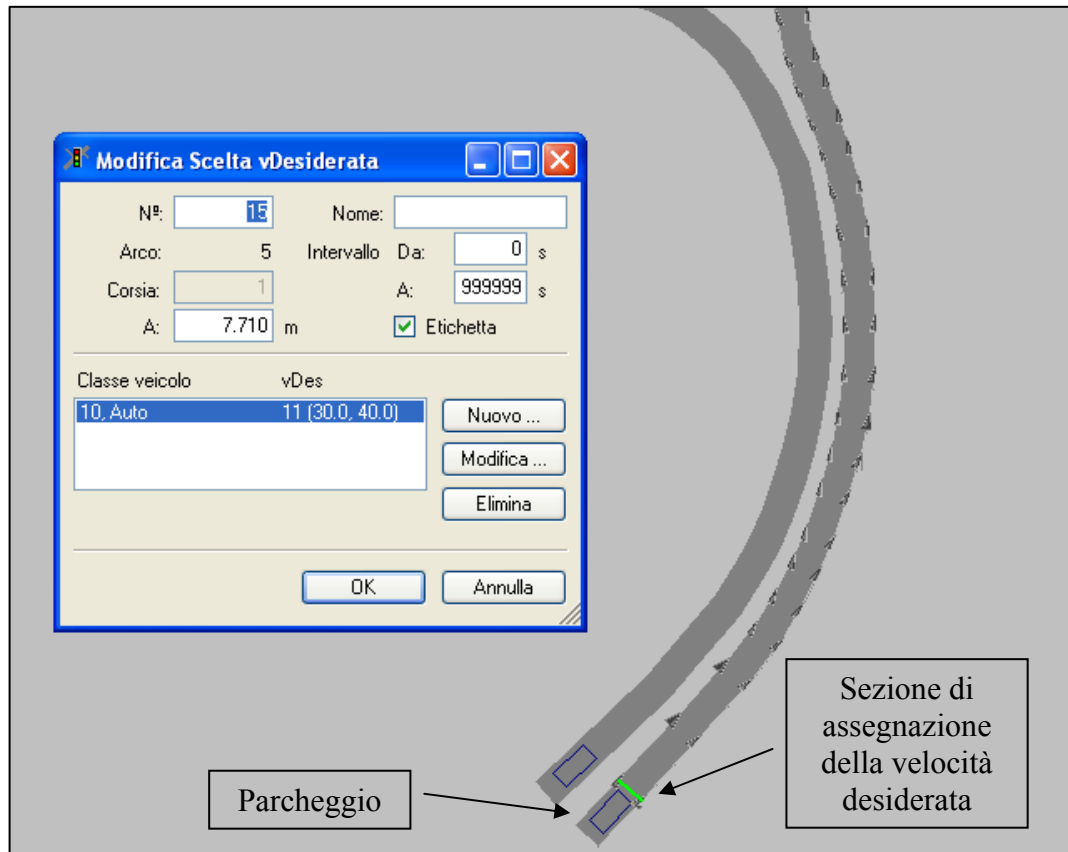


Figura 6.2: Velocità d’approccio del braccio A della rotatoria di Cosenza Nord in Vissim

In Figura 6.2 si può notare come sia possibile in Vissim assegnare una velocità desiderata ai veicoli non appena quest’ultimi vengono generati dal parcheggio di un nodo.

Le quattro distribuzioni di velocità assegnate ai quattro rami della rotatoria sono rispettivamente quelle riportate in Tabella 6.3.

	Rami della rotatoria			
	A	B	C	D
Distribuzioni di velocità (Km/h)	[30 – 40]	[40 – 50]	[20 – 30]	[40 – 50]

Tabella 6.3: Distribuzioni di velocità in Vissim sui rami della rotatoria di Cosenza Nord

C'è da aggiungere che i valori riassunti nella Tabella 6.3 rappresentano i limiti superiore ed inferiore delle distribuzioni di velocità d'approccio assegnate ai bracci della rotonda e che la forma della funzione di distribuzione è quella classica ad "S".

Per la definizione della velocità all'anello, il discorso è stato un po' più complicato, in quanto, essendo la rotatoria ellittica e non circolare, si son dovuti svolgere più rilievi di velocità su diversi settori della corona giratoria.

Ciò ha consentito di settare un'opportuna velocità di percorrenza, il più possibile prossima a quella rilevata, per ogni parte dell'anello.

In Figura 6.3 si possono vedere tutte le sezioni di assegnazione della velocità desiderata imposte sulla corona giratoria.

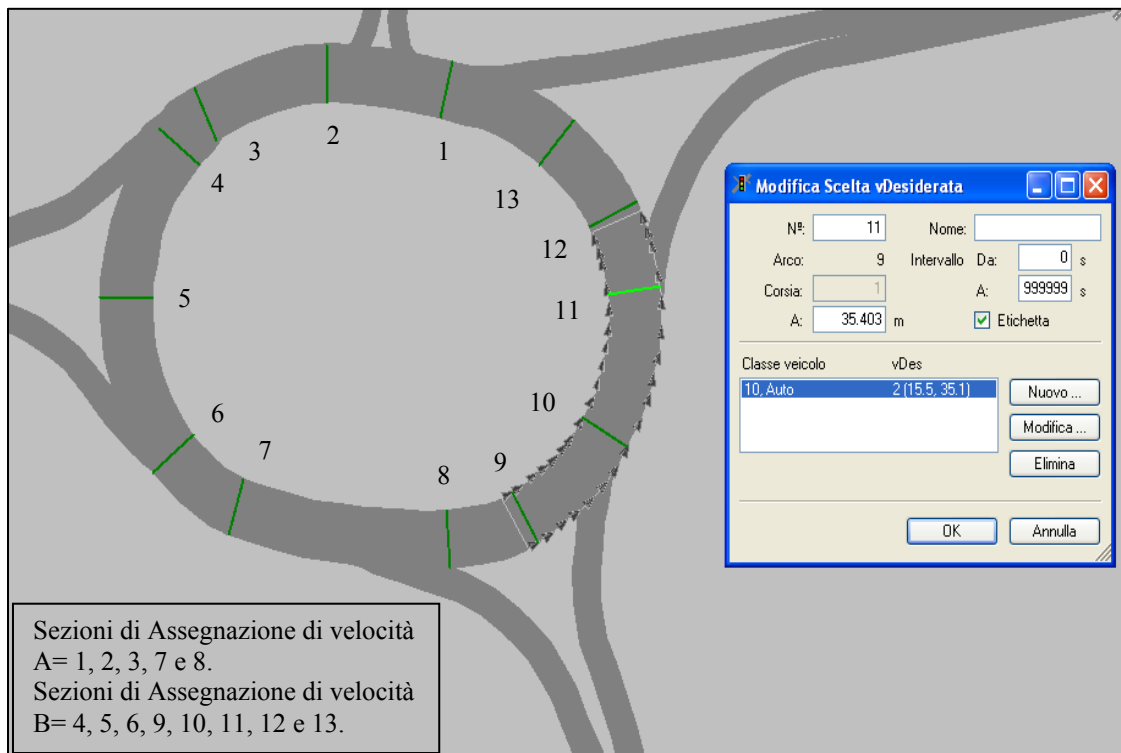


Figura 6.3: Definizione della velocità di percorrenza dell'anello della rotatoria di Cosenza Nord

Dai rilievi di velocità compiuti sull'anello sono state ricavate due distribuzioni di velocità:

- Distribuzione A = [19.0 – 38.6] (Km/h);
- Distribuzione B = [15.5 – 35.1] (Km/h).

Il posizionamento delle diverse sezioni di assegnazione è rappresentato in Figura 6.3. Sono state definite ben 13 diverse sezioni in quanto ne va posta almeno una subito dopo ogni connessione di un arco con la corona ed almeno un'altra nel punto in cui avviene il cambio di velocità.

Per quanto concerne invece le zone di rallentamento, una volta conosciuta la velocità d'approccio e quella sull'anello, si è proceduti con la tecnica descritta nel Capitolo 5. Ossia, per la definizione delle distribuzioni sui singoli rami, si è preso come limite superiore e come limite inferiore quei valori derivanti rispettivamente dalla velocità d'approccio e dalla velocità di percorrenza dell'anello di fronte all'ingresso.

Per la determinazione invece della lunghezza delle zone di rallentamento, anche in questo caso si è fatto riferimento ai dati riportati nella normativa americana [6.4] per quanto riguarda la dimensione dei tratti di decelerazione dei veicoli che si approssimano ad una rotatoria possedendo una certa velocità d'approccio.



Figura 6.4: Posizionamento delle zone di rallentamento per la rotatoria di Cosenza Nord

La Figura 6.4 mostra la distribuzione planimetrica in Vissim delle zone di riduzione della velocità per la rotatoria di Cosenza Nord.

Pertanto, utilizzando la [Eq. 5.3] per poter calcolare la lunghezza delle zone di rallentamento e riprendendo le considerazioni appena fatte sulle distribuzioni di velocità, è possibile riassumere nella Tabella 6.4 i dati di ciascuna zona per ciascun ingresso della rotatoria.

Zona di rallentamento		
Nodi	Velocità (Km/h)	Lunghezza (m)
A	[35.1 – 40.0]	56.40
B	[38.6 – 50.0]	69.30
C	[19.0 – 30.0]	43.60
D	[38.6 – 50.0]	69.30

Tabella 6.4: Distribuzione delle velocità e lunghezze delle zone di rallentamento per Cosenza Nord

In Figura 6.5 viene mostrata in dettaglio la zona di rallentamento del ramo A (in verde) della rotatoria di Cosenza Nord e la finestra di dialogo di Vissim dove vengono settati i parametri di velocità e di lunghezza della zona stessa.

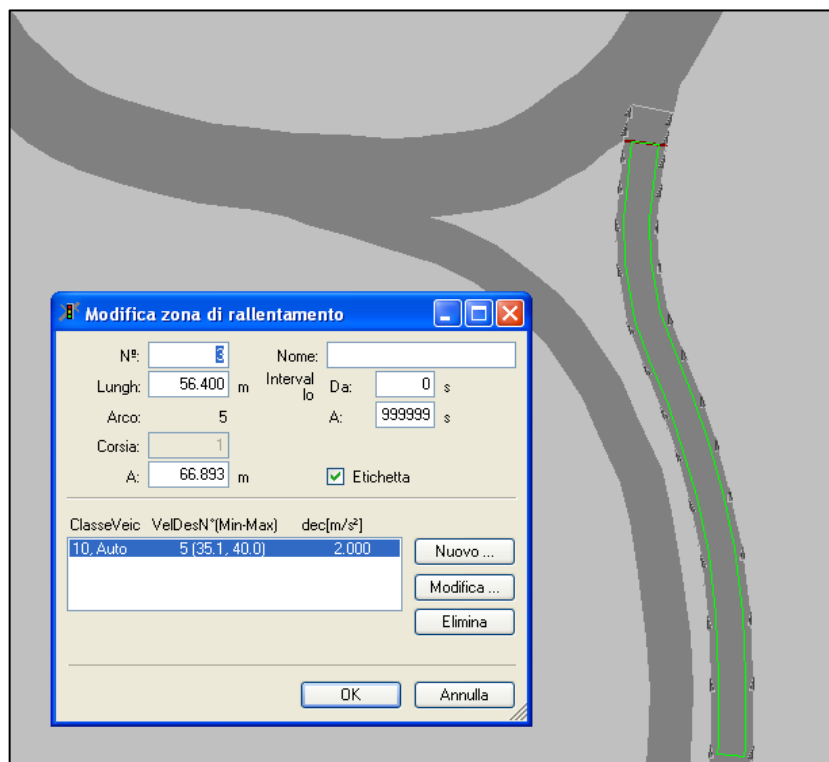


Figura 6.5: Definizione della zona di rallentamento del ramo A della rotatoria di Cosenza Nord

6.2.1.3. Comportamento dell'utente e regole di precedenza

Dopo aver fissato i flussi di traffico e le velocità dei vari elementi della rotatoria, affinché si possa raggiungere un buon grado di affidabilità della simulazione, è fondamentale definire il comportamento di guida del conducente e soprattutto le regole di precedenza.

Per quanto riguarda il comportamento di guida, essendo quella di Cosenza Nord una rotonda con una sola corsia all'anello (anche se molto larga) e con una sola corsia per ogni ingresso, allora il modello comportamentale scelto in Vissim [6.44] è stato quello del “veicolo successivo” di Wiedemann del '74 [6.30] in ambito urbano. In questo caso, così come è stato fatto per la campagna di simulazione di rotatorie a corsia singola esposto nel Capitolo 5, sono stati presi in considerazione i parametri di *default* utilizzati dal software per la definizione del modello comportamentale.

Per la determinazione delle regole di precedenza invece il settaggio dei parametri ha comportato un lungo lavoro di valutazione delle dinamiche di simulazione della rotatoria stessa. Infatti la scelta definitiva dei valori di intervallo critico, di distanziamento minimo e di velocità massima per le precedenze, è arrivata alla fine di un'attenta analisi dei movimenti dei veicoli durante le simulazioni: era necessario che le traiettorie dei veicoli che entravano sulla corona giratoria non andassero a scontrarsi con quelle degli altri veicoli che invece stavano già percorrendo l'anello.

D'altra parte però bisognava pure che i conducenti che si trovavano in testa alla coda su un ramo non aspettassero troppo per entrare, generando così code eccessive agli ingressi.

Quindi, dopo aver provato tutta una serie di valori, aver confrontato i risultati ottenuti, sia dal punto di vista visivo che dal punto di vista dei valori di output delle code e dei ritardi restituiti da Vissim, ed aver considerato le esperienze riportate sui più recenti articoli scientifici che si sono occupati di tale argomento [6.26] [6.27] [6.35] [6.37] [6.41] [6.42], si è giunti alla determinazione definitiva di tutti i parametri da usare per le regole di precedenza.

Innanzitutto, bisogna dire che, considerando solo flussi di traffico espressi in veicoli equivalenti, è stato sufficiente stabilire per ogni nodo regole di precedenza valide solo per autovetture. Poi, per la realizzazione vera e propria su Vissim di ognuna di esse, è bastato fissare una linea d’attesa e due sole linee di precedenza sull’anello, in quanto, come è stato già detto, la rotatoria di Cosenza Nord presenta una corsia all’anello ed una per ogni ingresso.

Nelle Figure 6.6 e 6.7 sono riportate due schermate di Vissim dove vengono definiti i parametri delle due linee di precedenza dell’ingresso A. I valori utilizzati per questo ramo sono stati scelti anche per quello B e per quello D, in quanto presentano delle caratteristiche geometriche simili tra di loro.

Per il nodo C invece si è dovuto fare ricorso a dei valori leggermente differenti da quelli degli altri tre ingressi a causa di tutta una serie di anomalie che lo caratterizzano. Tra le più evidenti ci sono: la completa assenza di isola divisionale tra le corsie in entrata ed in uscita e la ridotta larghezza della corsia d’entrata stessa.

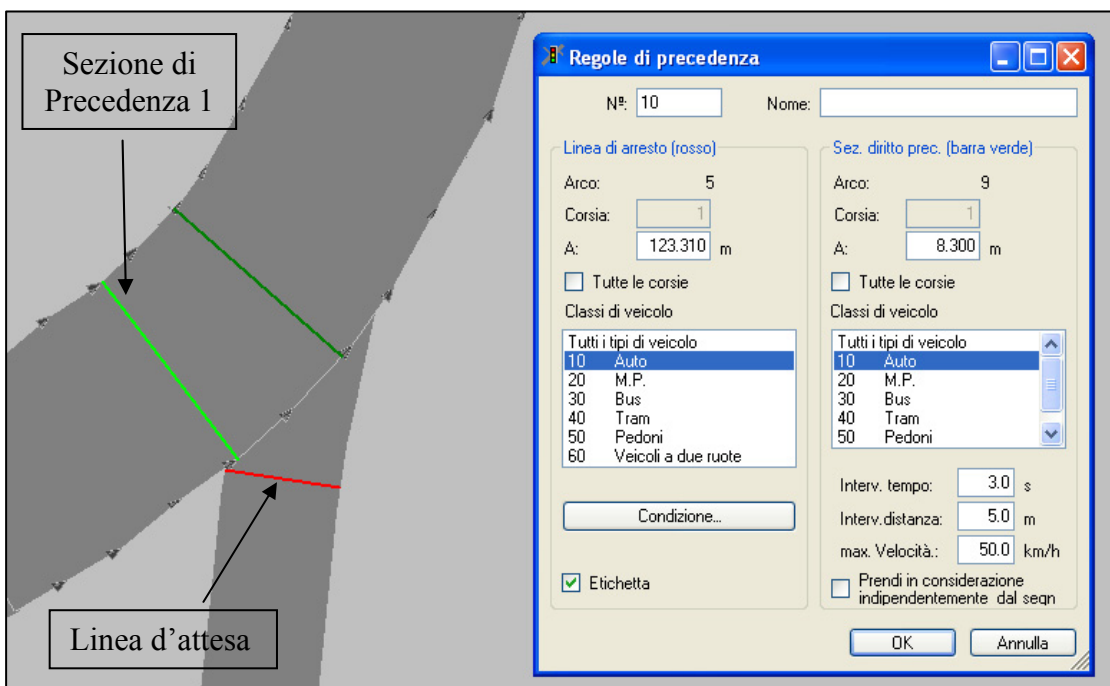


Figura 6.6: Definizione delle regole di precedenza (1) del ramo A della rotatoria di Cosenza Nord

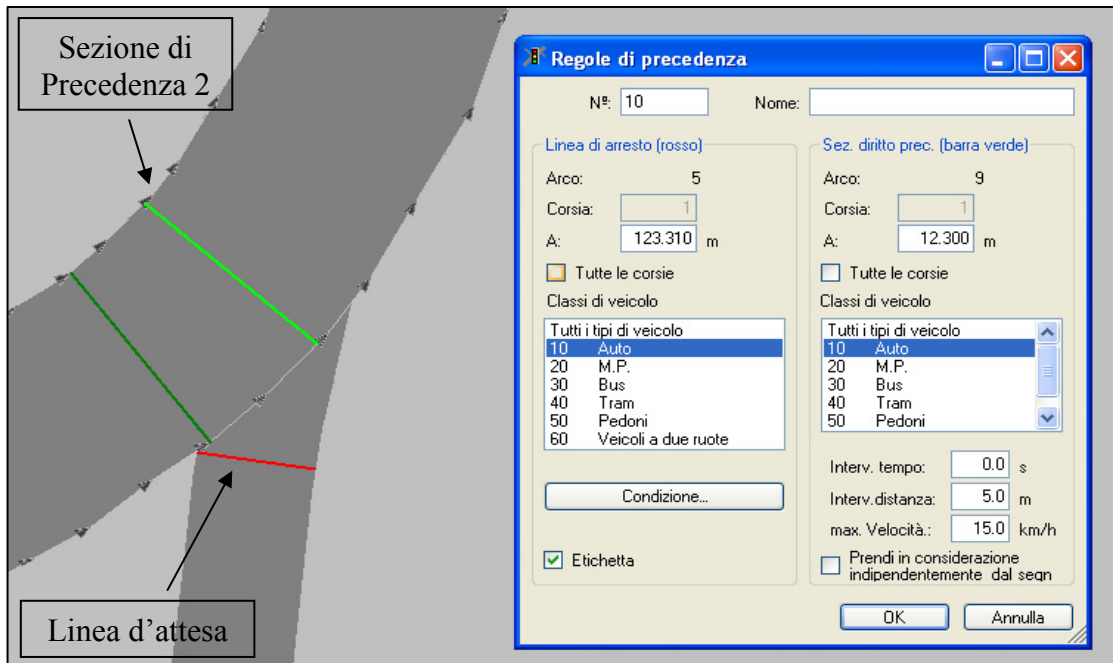


Figura 6.7: Definizione delle regole di precedenza (2) del ramo A della rotonda di Cosenza Nord

Nelle Figure 6.8 e 6.9 sono invece riportate le schermate che definiscono le regole di precedenza per il nodo C.

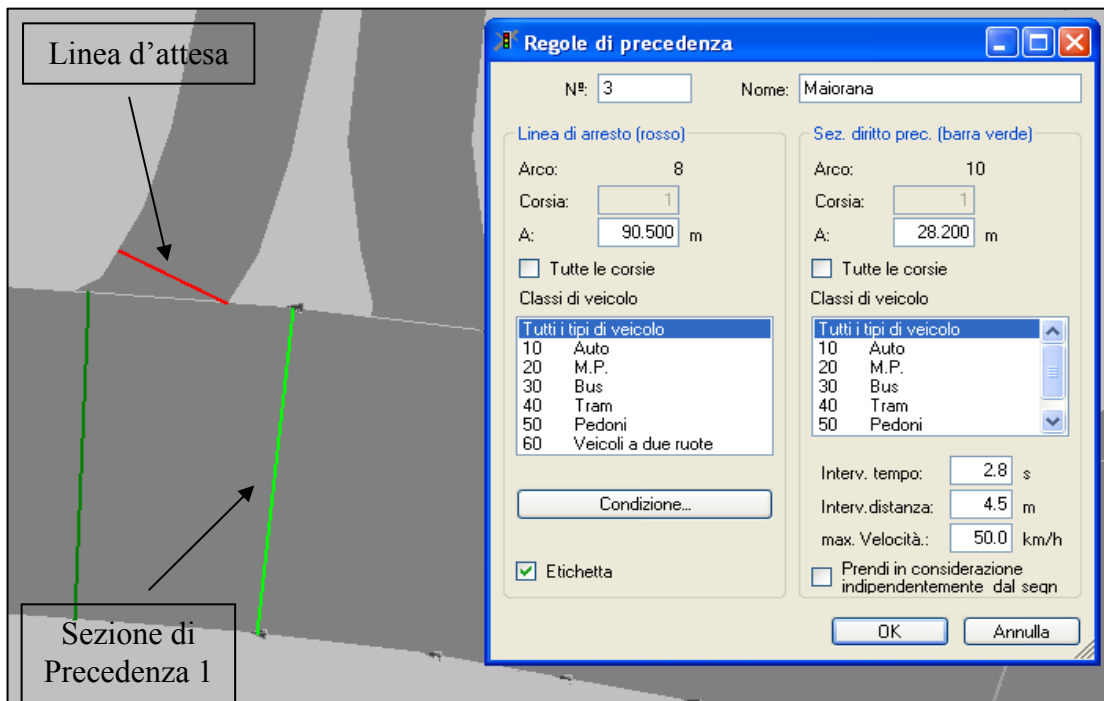


Figura 6.8: Definizione delle regole di precedenza (1) del ramo C della rotonda di Cosenza Nord

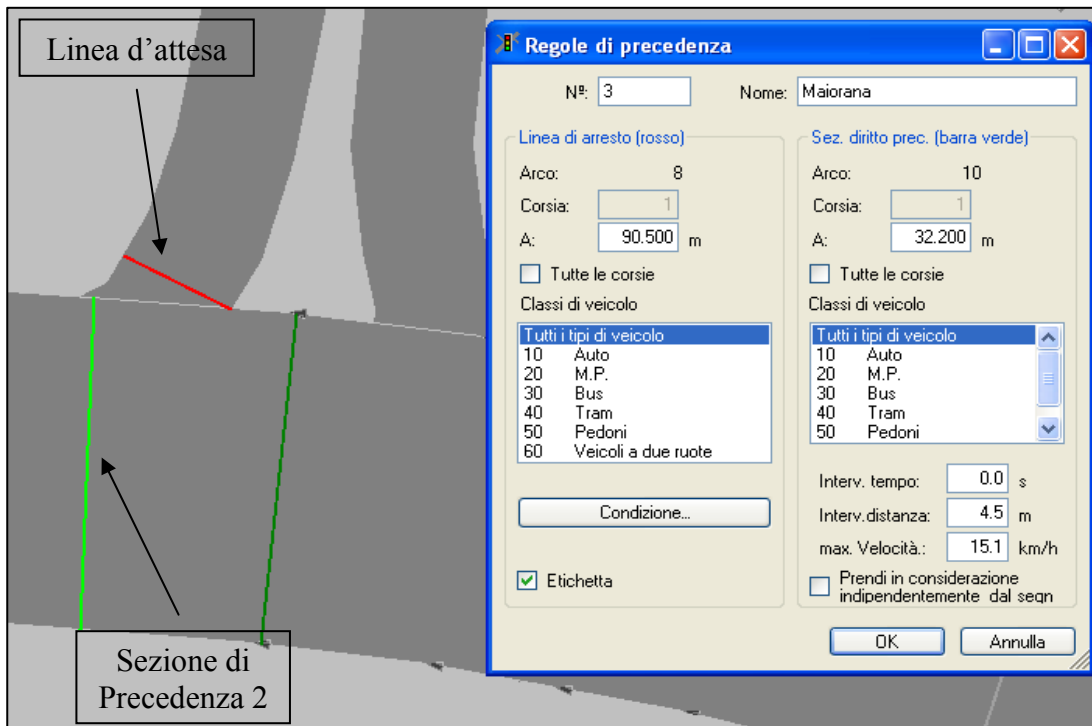


Figura 6.9: Definizione delle regole di precedenza (1) del ramo C della rotatoria di Cosenza Nord

I parametri delle due diverse regole di precedenza riportate nelle Figure 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9, sono riepilogate nella Tabella 6.5.

Parametri di precedenza per i nodi A, B e D			
D₂	0,5 m		
D₃	Se la velocità sull'anello è ⇒	15÷50 km/h ↓	≤ 15 km/h ↓
		Linea di precedenza 1	Linea di precedenza 2
	Gap Minimo	3.0 sec	0 sec
	Headway Minimo	5.0 m	5.0 m
D₄	4.0 m		
Parametri di precedenza per il nodo C			
D₂	-2.0 m		
D₃	Se la velocità sull'anello è ⇒	15÷50 km/h ↓	≤ 15 km/h ↓
		Linea di precedenza 1	Linea di precedenza 2
	Gap Minimo	2.8 sec	0 sec
	Headway Minimo	4.5 m	4.5.0 m
D₄	4.0 m		

Tabella 6.5: Sintesi dei parametri delle regole di precedenza in Vissim per Cosenza Nord

Dove D_2 , D_3 e D_4 sono le grandezze riportate in Figura 5.2.

Quindi, ciò in cui sostanzialmente si differenziano le due regole è legato a due elementi in particolare:

- i parametri psicotecnici (*gap* minimo e *headway* minimo);
- il posizionamento delle due linee di precedenza sull'anello.

Infatti per il nodo C, il *gap* minimo della sezione di precedenza 1 è pari a 2.8 s, mentre per gli altri tre nodi è uguale a 3.0 s. Ed anche l'*headway* è minore per il nodo C: vale 4.5 m a differenza dei 5 m per gli altri nodi (sia per la sezione di precedenza 1 che per la 2).

Per quanto riguarda invece il posizionamento delle linee di precedenza, si nota come le sezioni di conflitto collegate alla linea d'attesa del nodo C siano poste più indietro sull'anello rispetto a quelle degli altri nodi: 2 m prima del margine sinistro della corsia d'ingresso in C per la linea 1, contro i 0.5 m dopo il bordo destro dell'isola divisionale (o margine sinistro della corsia) per i rami A, B e D.

Tali differenze nei parametri psicotecnici, sono dovute al fatto che gli utenti del nodo C, trovandosi lungo la direttrice di traffico B-D (corrente dominante nella rotatoria), sono spesso costretti, per entrare sulla corona giratoria, ad utilizzare dei *gap* più piccoli con un conseguente aumento del rischio d'incidenti.

Il differente posizionamento dei *marker* di precedenza è anch'esso correlato all'elevato traffico circolante di fronte al ramo C, ma è pure legato alla mancanza dell'isola divisionale.

I valori di D_4 (pari a 4 m) e delle velocità massime per le due linee di precedenza (50 Km/h per la linea 1 e 15 Km/h per la linea 2) rimangono invece invariati per tutti i nodi.

6.2.2. Analisi dei ritardi medi e delle lunghezze delle code

I due parametri fondamentali per la valutazione delle caratteristiche prestazionali di una rotatoria sono:

- i tempi medi d'attesa per i veicoli che si devono immettere sulla corona giratoria;
- il 95° percentile della lunghezza delle code ai nodi.

Vissim consente di calcolare entrambi gli elementi attraverso degli opportuni file di output gestibili in *Excel*.

Per quanto riguarda i tempi medi d’attesa, Vissim può generare dati di perditempo per l’intersezione basandosi sugli itinerari definiti per le misurazioni dei tempi di percorrenza [6.44]. Ogni itinerario consiste in una sezione di partenza ed in una sezione di destinazione. Quindi i tempi medi di percorrenza di un qualunque itinerario, inserito nella rete, non rappresentano altro che il tempo medio di viaggio che impiega un veicolo (incluso il tempo di attesa o di sosta) nell’attraversare la prima sezione trasversale fino a raggiungere la seconda sezione.

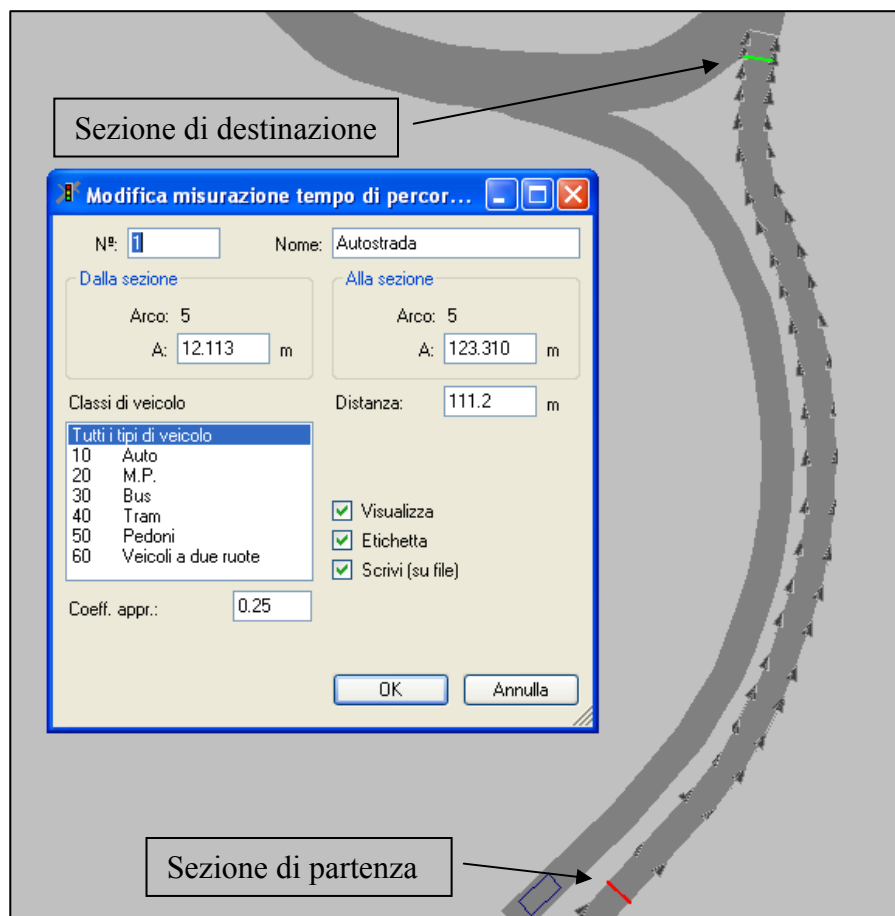


Figura 6.10: Definizione dei tempi di percorrenza per il ramo A della rotatoria di Cosenza Nord

In Figura 6.10 è indicata l’ubicazione delle due sezioni, quella di partenza e quella di destinazione, per la definizione dei tempi di percorrenza e dei perditempo sul ramo A della rotatoria di Cosenza Nord.

Il ritardo totale viene alla fine calcolato per ogni veicolo che completa la sezione

del tempo di percorrenza sottraendo il tempo di percorrenza teorico (ideale) dal tempo di percorrenza reale. Il tempo di percorrenza teorico è il tempo che un veicolo impiegherebbe nel percorrere un itinerario se nella rete non ci fossero altri veicoli o fermate (Vissim tiene conto delle zone di rallentamento).

Per la valutazione delle lunghezze delle code invece il discorso è più semplice. Attraverso l'introduzione di un rilevatore di coda posto in coincidenza della linea d'attesa di ogni nodo, Vissim consente di calcolare la lunghezza media e quella massima della coda durante un periodo di tempo definito dall'utente (solitamente si preferiscono intervalli da 5 minuti ciascuno) [6.44].

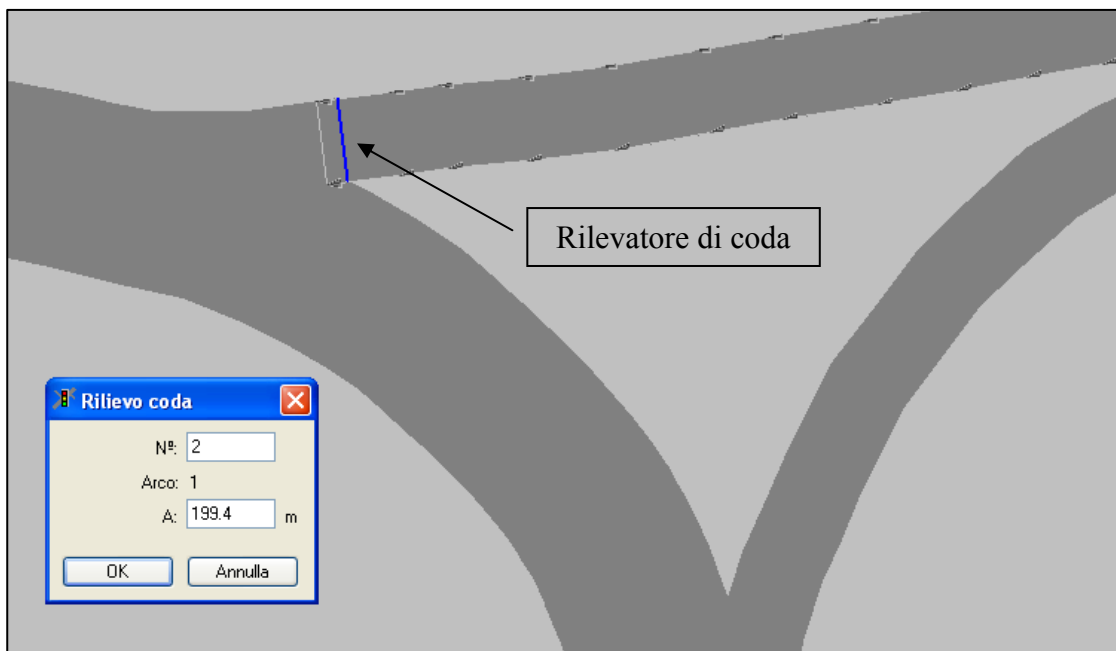


Figura 6.11: Posizionamento del rilevatore di coda sul nodo B della rotatoria di Cosenza Nord

In Figura 6.11 è mostrato l'esatto posizionamento del rilevatore di coda sul nodo B della rotatoria di Cosenza Nord.

L'ultima cosa da aggiungere prima di andare ad esporre i risultati è che, per dare validità statistica ai dati ottenuti, è stato necessario compiere simulazioni multiple dello stesso scenario (cinque nel nostro caso specifico). Vissim infatti, come tutti i software di microsimulazione, simula il traffico in tipologia *one-shot* [6.26] [6.41].

A questo punto non rimane altro che mettere a confronto i risultati ottenuti con le metodologie internazionali di calcolo (riportati in dettaglio nel Capitolo 4) con

quelli reperiti mediante le simulazioni effettuate in Vissim.

I dati relativi ai ritardi sono riassunti nella Tabella 6.6 e diagrammati negli istogrammi delle Figure 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15.

A	B	C	D	
5	4	7	3	Ritardo Comp.
7	4	7	4	SETRA
66	79	16	38	HCM 2000 Lw B.
25	28	13	18	HCM 2000 Up B.
22	28	13	11	Guide Suisse (CH1)
46	59	20	26	HBS 2001
29	8	15	7	VISSIM

Tabella 6.6: Calcolo dei ritardi sui 4 nodi di Cosenza Nord durante l'intervallo T_8

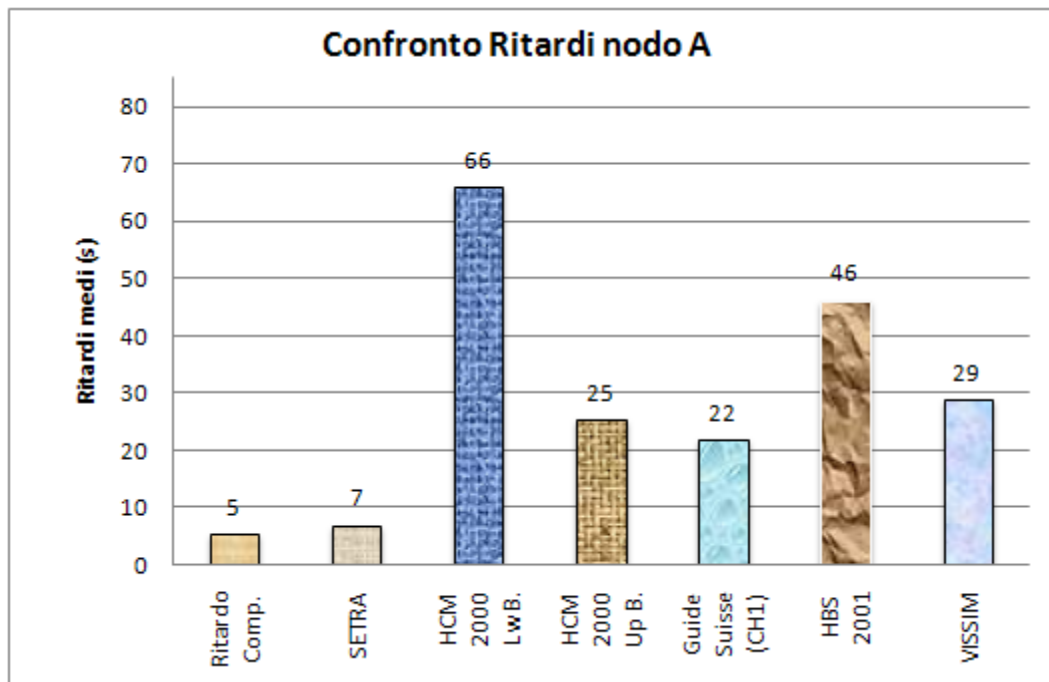


Figura 6.12: Confronto dei Ritardi del nodo A per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

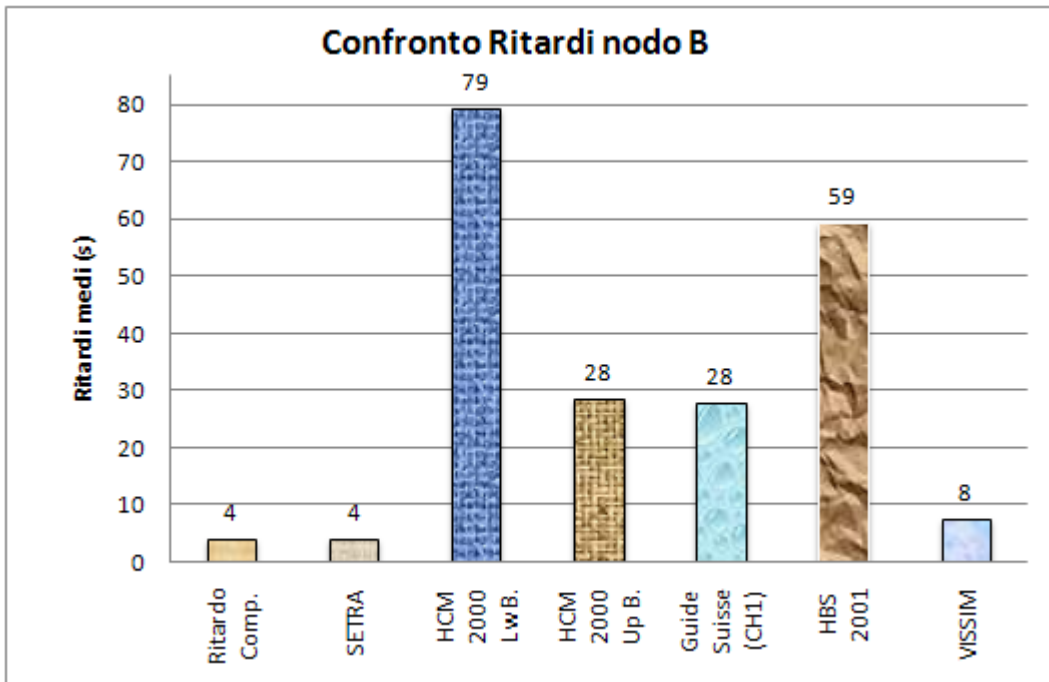


Figura 6.13: Confronto dei Ritardi del nodo B per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

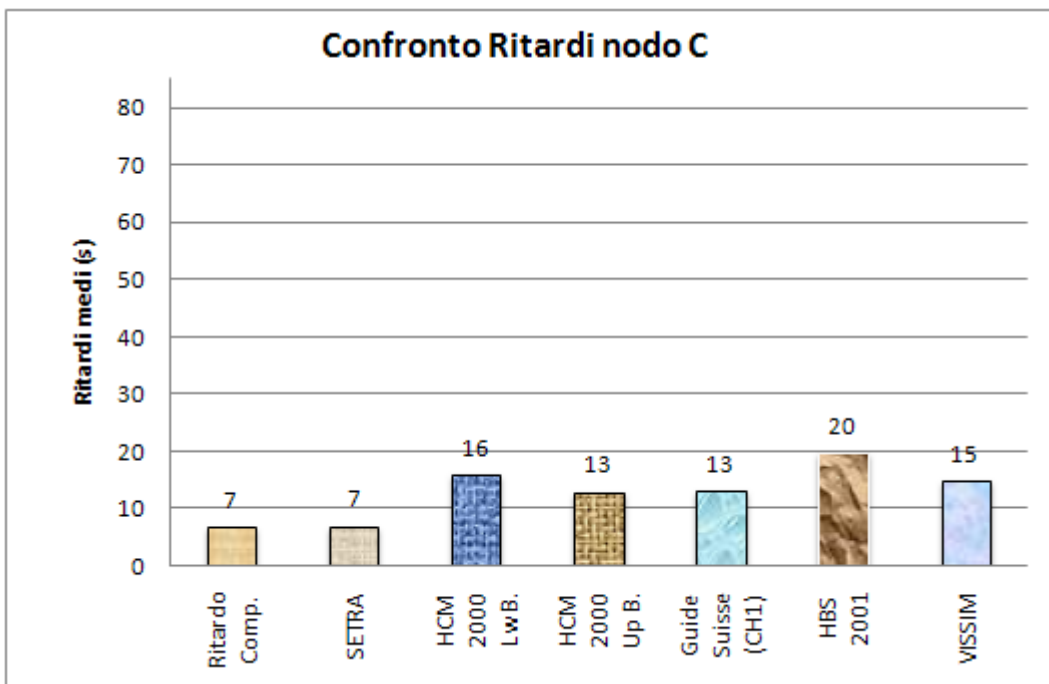


Figura 6.14: Confronto dei Ritardi del nodo C per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

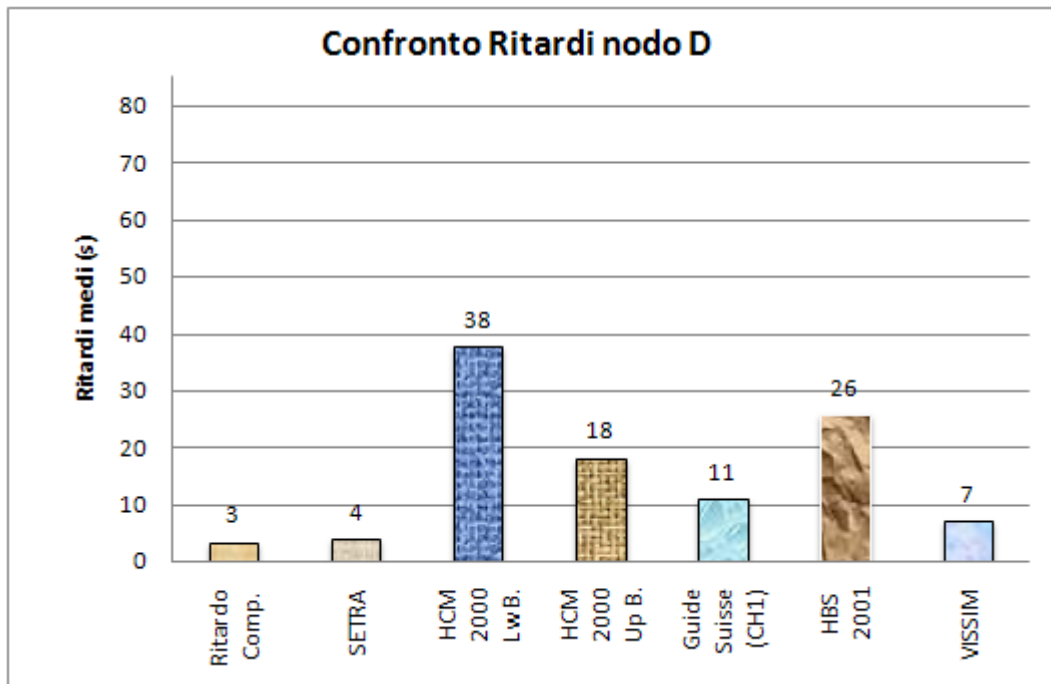


Figura 6.15: Confronto dei Ritardi del nodo D per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

Dalla comparazione degli istogrammi delle Figura 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15, si possono trarre le seguenti considerazioni:

- Per tre dei quattro nodi della rotatoria (tutti tranne il nodo A), Vissim [6.44], insieme al SETRA [6.7], restituisce i valori più prossimi ai ritardi complessivi ottenuti con la formula che si basa sul ritardo medio di fermata.
- L'unico nodo in cui valori di Vissim sono nettamente differenti da quelli del ritardo complessivo è quello A. In ogni caso, tali dati sono sempre più bassi di quelli ottenuti con l'HCM 2000 (*Lower Bound*) [6.13] e con l'HBS 2001 [6.22], e prossimi a quelli del *Guide Suisse* [6.8] e dell'HCM 2000 (*Upper Bound*) [6.13]. Questa discrepanza probabilmente è legata al fatto che, in condizione di raggiungimento della capacità della rotatoria, i veicoli sul ramo A si affiancano per entrare sulla corona giratoria, pur non essendoci due corsie all'ingresso su quel braccio. Questo fenomeno è ben visibile nell'immagine di Figura 6.16 (cerchio

rosso), “catturata” durante l’intervallo T_8 del rilievo condotto sulla rotatoria di Cosenza Nord.



Figura 6.16: Presenza di veicoli in doppia fila sul nodo A della rotatoria di Cosenza Nord

Per quanto riguarda invece la valutazione del 95° percentile della lunghezza delle code (misurato in veicoli), i dati derivanti da Vissim, confrontati con quelli ottenuti e già riportati nel Capitolo 4, sono stati riepilogati in Tabella 6.7.

A	B	C	D	
5	5	1	4	Code
7	6	3	6	SETRA
9	17	1	6	HCM 2000 Lw B.
5	5	1	5	HCM 2000 Up B.
15	21	1	11	HBS 2001
6	8	1	5	Bovy
10	14	1	8	Guide Suisse (CH1)
2	3	0	3	TRRL
5	7	0	5	AUSTROADS
10	6	3	3	VISSIM

Tabella 6.7: Calcolo del 95° percentile delle code sui 4 nodi di Cosenza Nord durante l’intervallo T_8

Negli istogrammi delle Figure 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20, vengono ripresi i dati del

Capitolo 4 con l'aggiunta dei risultati ottenuti in Vissim.

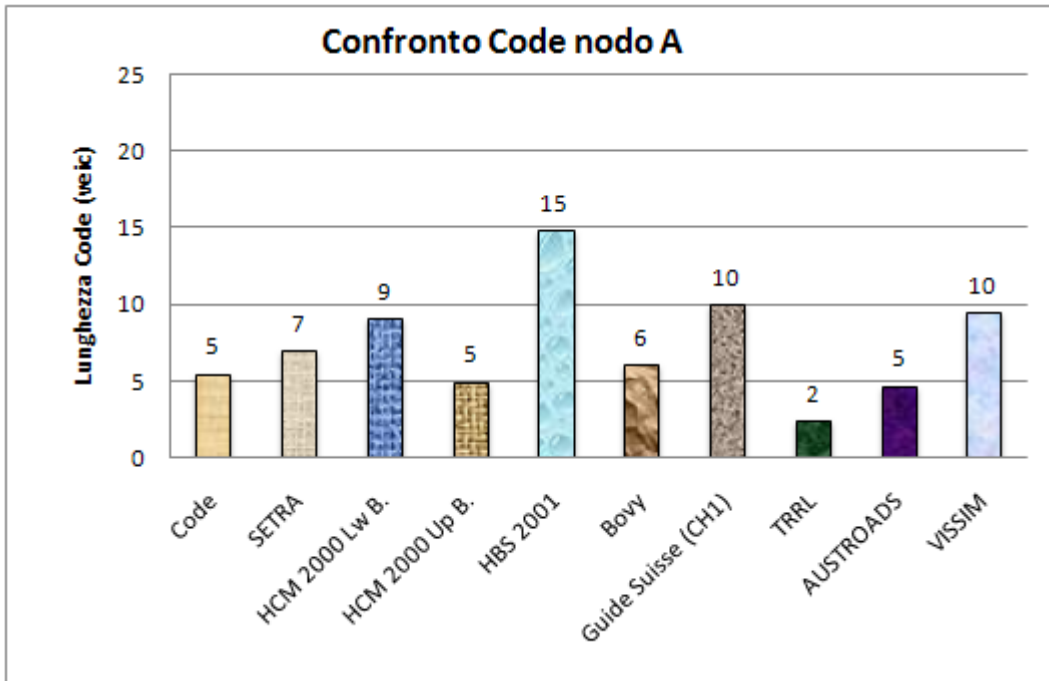


Figura 6.17: Confronto delle Code sul nodo A per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

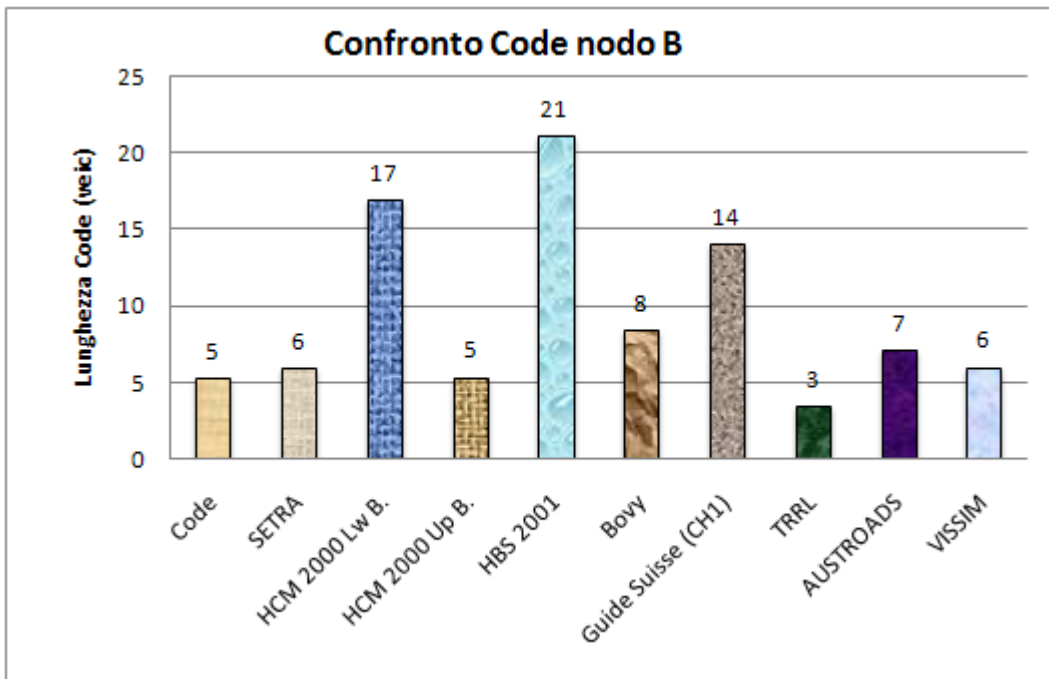


Figura 6.18: Confronto delle Code sul nodo B per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

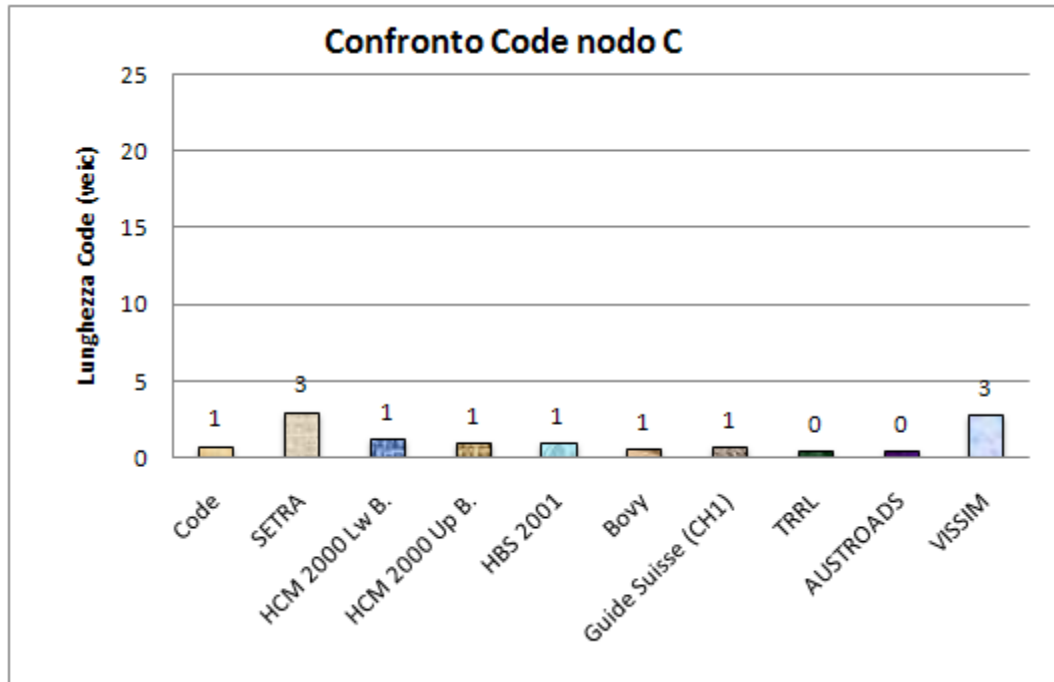


Figura 6.19: Confronto delle Code sul nodo C per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

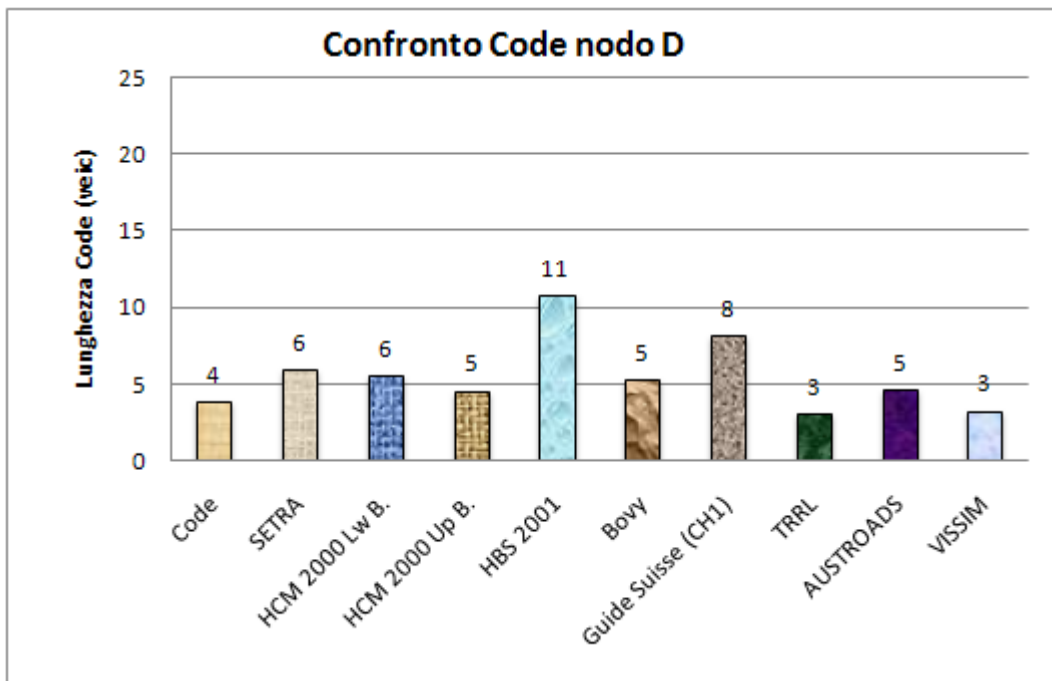


Figura 6.20: Confronto delle Code sul nodo D per la rotatoria di CS Nord durante l'intervallo T_8

Dalla comparazione dei diagrammi delle Figura 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20, si possono trarre alcune considerazioni:

- Per i nodi B, C e D della rotatoria, Vissim [6.44] restituisce valori di lunghezza delle code praticamente identici a quelli ricavati con la formula che si basa sul ritardo medio di fermata (scostamenti percentuali inferiori al 10%).
- Per il ramo A, così come avveniva nella stima dei ritardi, il risultato che si ottiene è abbastanza più alto rispetto a quello ottenuto “sperimentalmente” (comunque più basso di quello del *Guide Suisse* [6.8] e dell’HBS 2001 [6.22]). La motivazione è sicuramente la stessa di quella data per i ritardi, ossia la disposizione su due file dei veicoli in coda sull’ingresso A in condizioni di sovrassaturazione della rotatoria (Fig. 6.16).

6.3. Il caso di studio: la rotatoria di Mottola

Riprendendo tutte le informazioni riportate nel paragrafo 4.3, qui di seguito verrà realizzata un’analisi comparativa tra i risultati prodotti dall’applicazione di alcune delle metodologie internazionali per il calcolo dei parametri prestazionali di una intersezione a rotatoria e quelli derivati dalla simulazione della stessa rotonda in Vissim.

L’intersezione in questione, è una rotatoria con schema sostanzialmente simmetrico, ubicata in ambito urbano nel Comune di Mottola, in provincia di Taranto.

In Tabella 6.8 sono sintetizzate le principali caratteristiche geometriche della rotatoria in esame

Raggio isola centrale (m)	Diametro esterno (m)	Larghezza Anello (m)	Corsie anello	Larghezza isole divisionali (m)				Larghezza corsie ingressi (m)			
				A	B	C	D	A	B	C	D
7.50	28.80	7.20	1	4.87	4.92	4.95	2.82	5.60	6.05	4.00	6.05

Tabella 6.8: Principali caratteristiche geometriche della rotatoria di Mottola [6.23]

La scelta di utilizzare questa intersezione per il nostro studio è legata principalmente a due fattori:

- la sua conformazione di tipo polar-simmetrico (quindi con l'assenza di rami tangenti all'anello come avveniva per Cosenza Nord);
- la sua ubicazione in una realtà, quella pugliese della provincia di Taranto, diversa da quella calabrese (ossia con possibili differenze di comportamento da parte degli utenti).

La Figura 6.21 mostra la modellizzazione grafica della rotatoria di Mottola realizzata in Vissim mediante l'utilizzo come sfondo di un file di planimetria in formato "dxf": in questo modo, basta disegnare gli archi sopra le corrispondenti corsie (dopo aver naturalmente scalato con precisione lo sfondo) per ottenere una buona rappresentazione grafica dello schema.

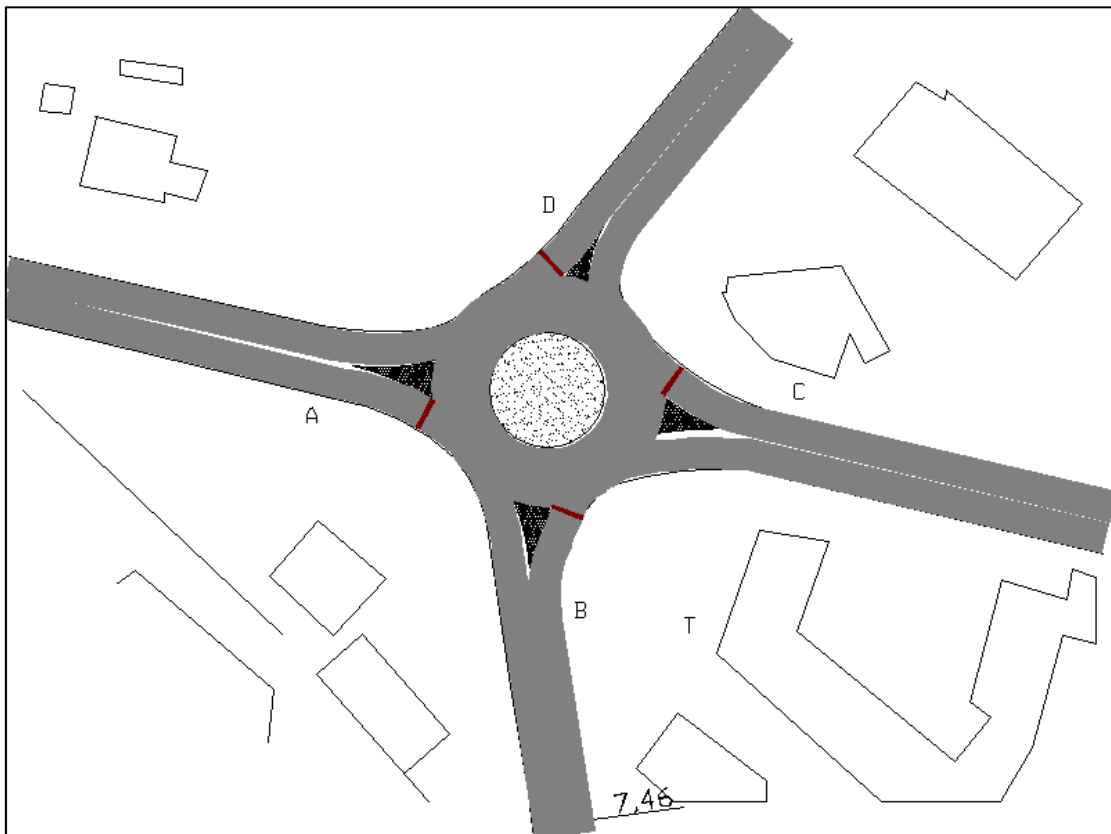


Figura 6.21: Modellizzazione grafica della rotatoria di Mottola in Vissim

6.3.1. Definizione dei parametri per la simulazione

I parametri principali da definire in una simulazione, affinché ci dia risultati il più possibile vicini a quelli derivanti dal comportamento reale dei conducenti che affrontano l'intersezione, sono gli stessi che sono stati già esposti nel Paragrafo 6.2.1., ossia:

- la distribuzione dei flussi di traffico;
- la determinazione delle velocità d'approccio ai nodi e di percorrenza sull'anello, nonché le zone di riduzione delle velocità;
- la definizione del comportamento dell'utente, attraverso la scelta del comportamento del "veicolo successivo" e la modellizzazione delle regole di precedenza.

E' chiaro che il definitivo settaggio di questi parametri è derivato, sia da una buona analisi bibliografica e che da un grosso numero di simulazioni.

6.3.1.1. La distribuzione dei flussi di traffico

Per quanto riguarda la scelta dei flussi di traffico, si è ritenuto opportuno utilizzare la matrice O/D derivante dal rilievo dell'intervallo T_3 , ossia dell'arco temporale compreso tra i 10' ed i 15' (Tab. 6.9), in quanto è stato l'unico intervallo, durante il rilievo, in cui si è riscontrata contemporanea presenza di code su tutti e 4 i rami d'ingresso (almeno 4 veicoli in attesa di immettersi).

	A	B	C	D	Qe (veic/h)
A	0	72	24	342	438
B	132	12	36	522	702
C	120	48	0	132	300
D	330	528	48	6	912
Qu (veic/h)	582	660	108	1002	

Tabella 6.9: Matrice O/D relativa all'intervallo temporale T_3 tra i 10' ed i 15' di rilievo

Anche questa volta, i flussi di traffico sono stati calcolati in veicoli equivalenti per ora, pertanto, per l'assegnazione dinamica in Vissim, è stato necessario caricare una sola matrice O/D (essendoci una sola classe veicolare).

6.3.1.2. Velocità d’approccio, velocità all’anello e zone di rallentamento

La velocità d’approccio sugli ingressi della rotatoria è un parametro estremamente importante per un’ottima simulazione, in quanto il suo effetto diventa determinante nella valutazione della capacità di un nodo e dei suoi relativi tempi di percorrenza.

Anche per questa rotatoria, le distribuzioni di velocità utilizzate per gli approcci sono state definite facendo riferimento alle velocità effettivamente misurate sui rami d’ingresso dell’intersezione stessa durante il rilievo.

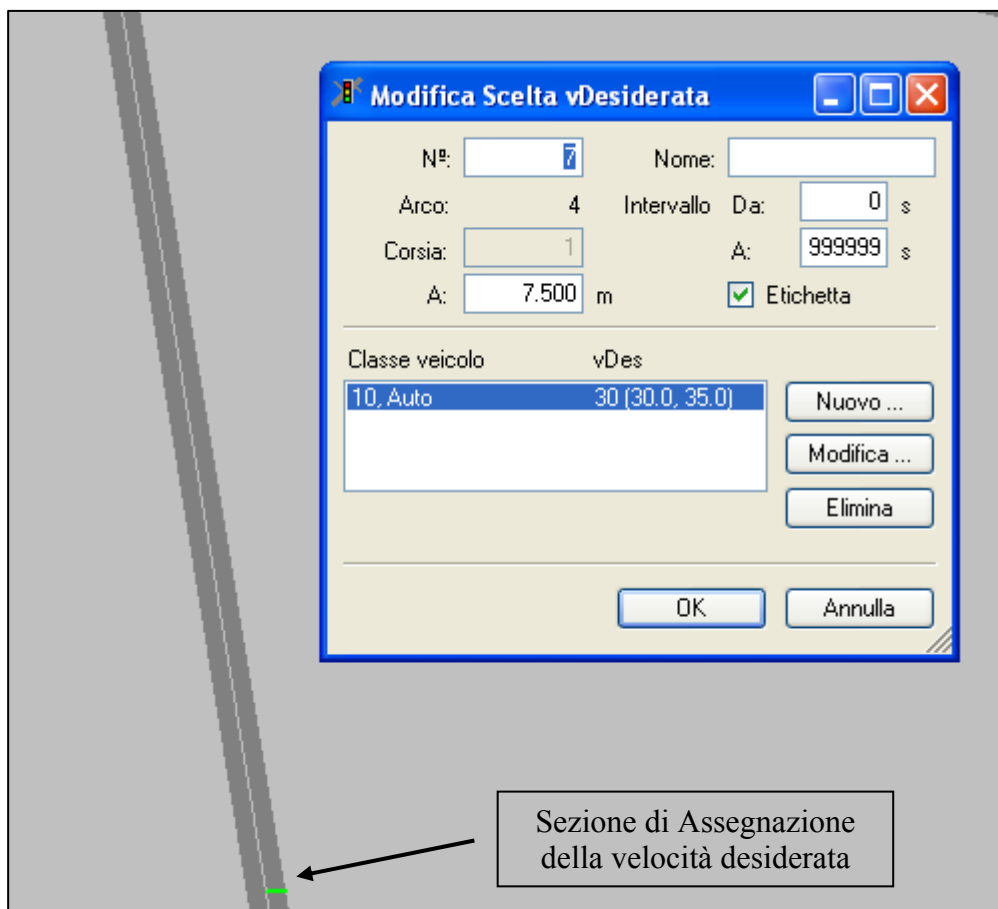


Figura 6.22: Velocità d’approccio del braccio B della rotatoria di Mottola in Vissim

La Figura 6.22 mostra la finestra di dialogo in Vissim necessaria per assegnare una velocità desiderata ai veicoli non appena quest’ultimi vengono generati dal parcheggio di un nodo.

Le quattro distribuzioni di velocità assegnate ai quattro rami della rotatoria sono in questo caso tutte uguali, essendo questa un'intersezione ubicata in ambito urbano.

I limiti delle distribuzioni sono quelli riportati nella Tabella 6.10.

	Rami della rotatoria			
	A	B	C	D
Distribuzioni di velocità (Km/h)	[30 – 35]	[30 – 35]	[30 – 35]	[30 – 35]

Tabella 6.10: Distribuzioni di velocità in Vissim sui rami della rotatoria di Mottola

I valori riassunti nella Tabella 6.10 rappresentano i limiti superiore ed inferiore delle distribuzioni di velocità d'approccio assegnate ai bracci della rotonda, mentre la forma della funzione di distribuzione è quella classica ad "S".

Per la definizione della velocità sulla corona giratoria è stato necessario, anche questa volta, fare ricorso ai rilievi di velocità compiuti sull'anello

In Figura 6.23 si può notare la distribuzione delle sezioni di assegnazione della velocità desiderata sulla corona giratoria.

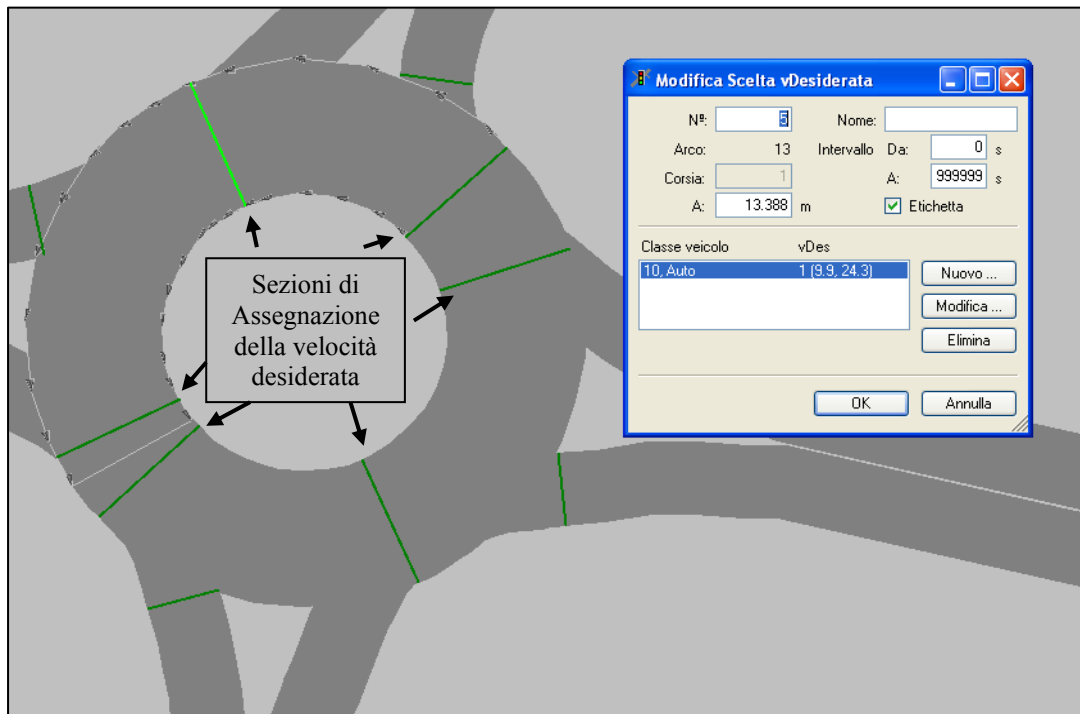


Figura 6.23: Definizione della velocità di percorrenza dell'anello della rotatoria di Mottola

Dai rilievi di velocità compiuti sull'anello è stata ottenuta una sola distribuzione di velocità per l'anello

- Distribuzione = [9.9 – 24.3] (Km/h).

Questa tipologia di distribuzione delle velocità sulla corona giratoria, realmente misurata, rispetta in pieno le considerazioni fatte sulla correlazione tra la velocità media di percorrenza dell'anello e l'equazione dell'equilibrio trasversale del veicolo in curva.

Le sei sezioni di assegnazione della velocità, presenti sulla corona, sono state poste ognuna subito dopo ogni connessione di un arco con l'anello stesso.

Per quanto riguarda invece le zone di rallentamento, nota la velocità d'approccio e quella sull'anello, il limite superiore e quello inferiore della loro distribuzione di velocità diventano pari rispettivamente al valore più alto della velocità d'approccio ed al limite superiore della velocità di percorrenza dell'anello di fronte all'ingresso.

Per la lunghezza di queste aree di rallentamento, si fa ancora riferimento ai dati riportati nella normativa americana per quanto riguarda la dimensione dei tratti di decelerazione dei veicoli che si avvicinano ad una rotatoria possedendo una certa velocità d'approccio.

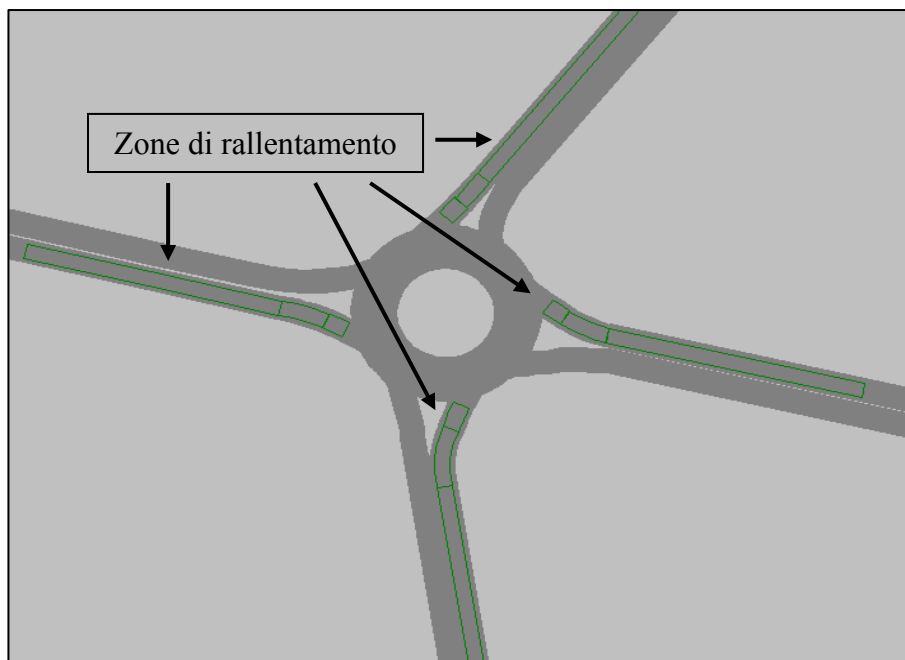


Figura 6.24: Posizionamento delle zone di rallentamento per la rotatoria di Mottola

La Figura 6.24 mostra la distribuzione planimetrica in Vissim delle zone di riduzione della velocità per la rotatoria di Mottola.

Quindi, utilizzando ancora una volta l'equazione [5.3] per poter calcolare la lunghezza delle zone di rallentamento e riprendendo le considerazioni fatte sulle distribuzioni di velocità, è possibile riassumere nella Tabella 6.11 i dati di ciascuna zona per ciascun ingresso della rotatoria.

Zona di rallentamento		
Nodi	Velocità (Km/h)	Lunghezza (m)
A	[24.3 – 35.0]	39.50
B	[24.3 – 35.0]	39.50
C	[24.3 – 35.0]	39.50
D	[24.3 – 35.0]	39.50

Tabella 6.11: Distribuzione delle velocità e lunghezze delle zone di rallentamento per Mottola

La Figura 6.25 mette in evidenza una zona di rallentamento del ramo A (in verde) della rotatoria di Mottola e la finestra di dialogo di Vissim con i parametri di velocità e di lunghezza della zona stessa appena settati.

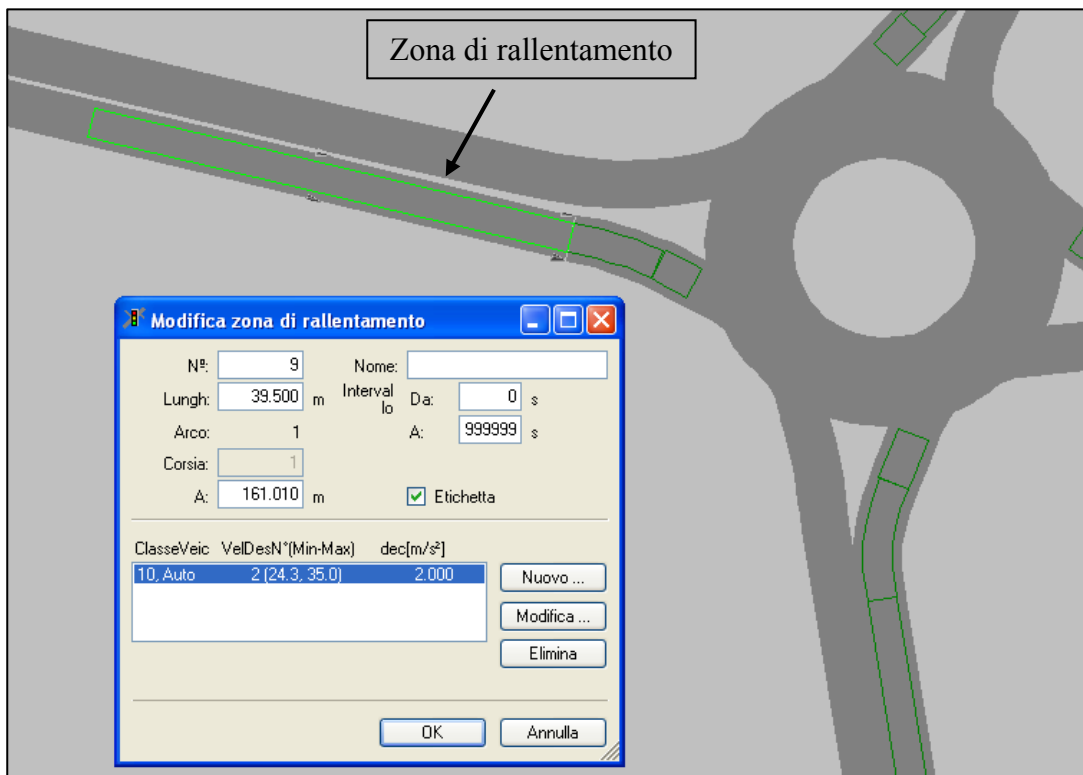


Figura 6.25: Definizione della zona di rallentamento del ramo A della rotatoria di Cosenza Nord

6.3.1.3. Comportamento dell'utente e regole di precedenza

Visto che anche la rotatoria di Mottola è caratterizzata da una sola corsia sia all'anello che agli ingressi, allora anche in questo caso, il modello comportamentale scelto per le simulazioni in Vissim è stato quello del “veicolo successivo” di Wiedemann del '74 [6.30] in ambito urbano.

Pur essendo la rotatoria di Mottola ubicata in Puglia, si è comunque notato, da un'attenta analisi delle immagini del rilievo, che il comportamento dei conducenti era del tutto analogo a quello visto sulla rotatoria di Cosenza Nord.

Di conseguenza, anche questa volta si è deciso di lasciare i parametri di *default* utilizzati da Vissim per la definizione del modello comportamentale [6.44].

Per la sistemazione delle regole di precedenza si è invece dovuto ricorrere ad un lungo lavoro di stima delle dinamiche di simulazione della rotatoria stessa e ad un'approfondita analisi bibliografica, in modo da poter scegliere in maniera adeguata i valori dei parametri psicotecnici.

Lo scopo è stato sempre quello di non utilizzare dei valori che generassero code eccessive sugli ingressi, ma che anche non provocassero scontri tra i veicoli entranti e quelli circolanti.

Bisogna inoltre aggiungere che, considerando solo flussi di traffico espressi in veicoli equivalenti, è bastato stabilire per ogni nodo regole di precedenza valide solo per autovetture. Poi, per la trasposizione di ognuna di esse su Vissim, è stato sufficiente fissare una linea d'attesa e due linee di precedenza sulla corona giratoria, visto che la rotatoria di Mottola presenta una sola corsia sia all'anello che agli ingressi.

Le Figure 6.26 e 6.27 mostrano due schermate di Vissim dove vengono definiti i parametri delle due linee di precedenza dell'ingresso C. I valori utilizzati per questo ramo sono stati scelti anche per gli altri tre nodi, in quanto presentano delle caratteristiche geometriche simili tra di loro.

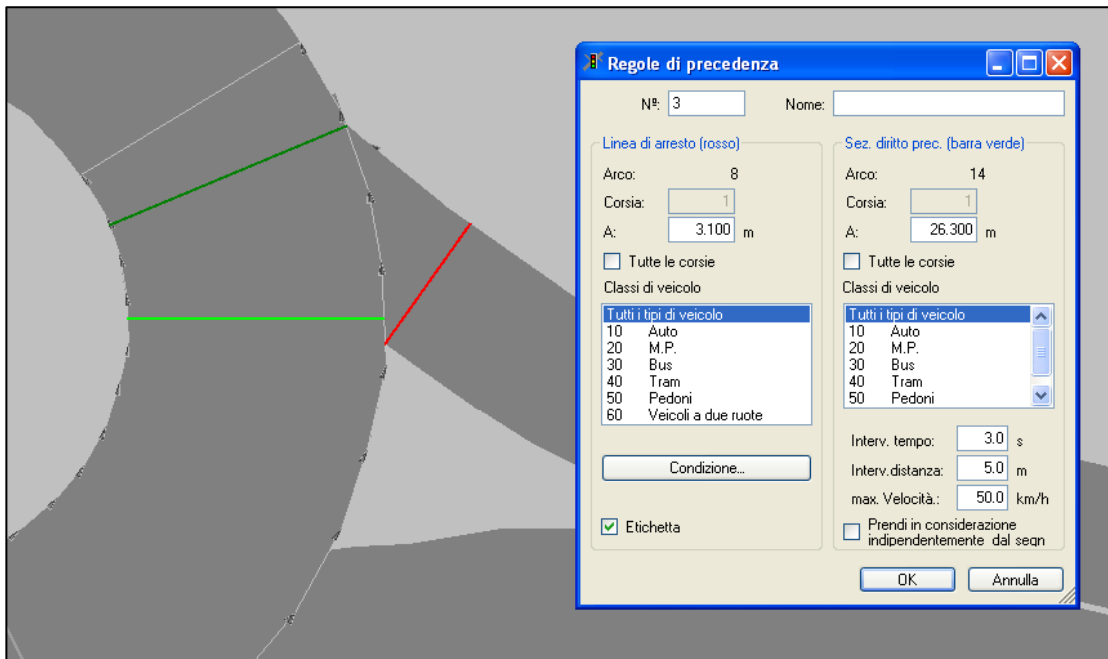


Figura 6.26: Definizione delle regole di precedenza (1) del ramo C della rotatoria di Mottola

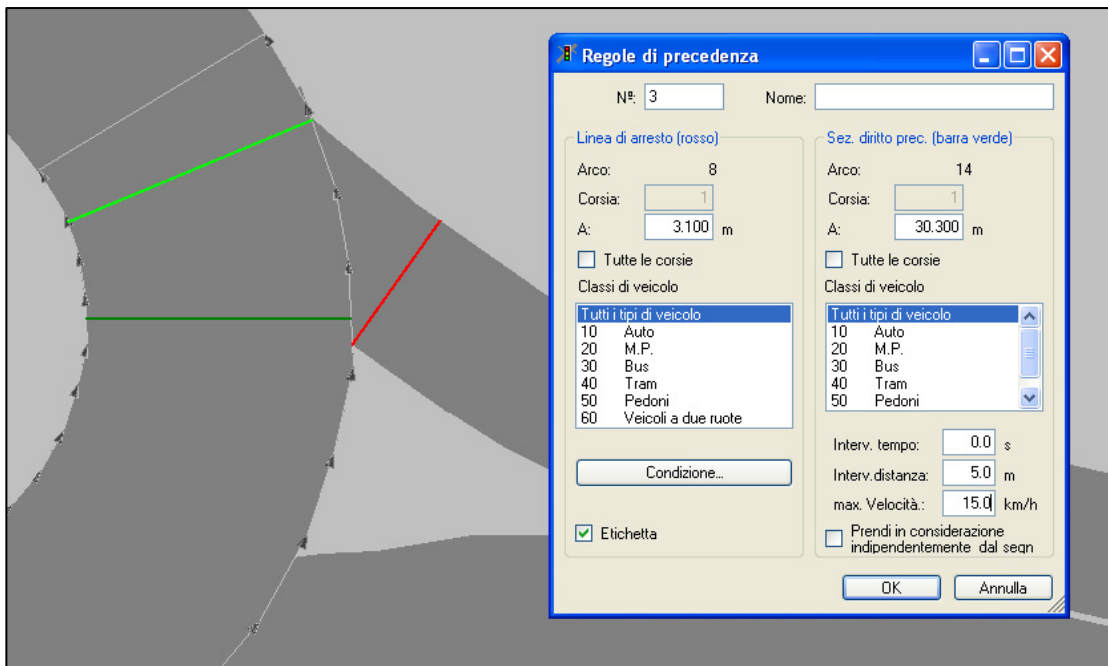


Figura 6.27: Definizione delle regole di precedenza (2) del ramo C della rotatoria di Mottola

I parametri delle regole di precedenza riportate nelle Figure 6.26 e 6.27 sono riassunte nella Tabella 6.12.

Parametri di precedenza per i nodi A, B e D			
D₂	0,5 m		
D₃	Se la velocità sull'anello è ⇒	15÷50 km/h ↓	≤ 15 km/h ↓
		Linea di precedenza 1	Linea di precedenza 2
	Gap Minimo	3.0 sec	0 sec
	Headway Minimo	5.0 m	5.0 m
D₄	4.0 m		

Tabella 6.12: Sintesi dei parametri delle regole di precedenza in Vissim per Mottola

Dove D_2 , D_3 e D_4 sono sempre le grandezze riportate in Figura 5.2.

Quindi, per il *gap* si è scelto un valore pari a 3.0 s, mentre per l'*headway* è stato adoperata una distanza di 5 m (sia per la sezione di precedenza 1 che per la 2).

Per quanto concerne invece il posizionamento delle linee di precedenza, le due sezioni di conflitto sono state poste a 4 m di distanza l'una dall'altra, con la linea 1 situata a 0.5 m dopo il bordo destro dell'isola divisionale (o margine sinistro della corsia).

Le velocità massime per i due “*conflict marker*” sono state scelte pari a 50 Km/h per la linea 1 ed a 15 Km/h per la linea 2, così come era stato fatto anche per la rotatoria di Cosenza Nord.

6.3.2. Analisi dei ritardi medi e delle lunghezze delle code

I due parametri prestazionali più importanti, insieme alla capacità, per una rotatoria sono:

- i tempi medi d'attesa per i veicoli che si devono immettere sulla corona giratoria;
- il 95° percentile della lunghezza delle code ai nodi.

Come già discusso nel Paragrafo 6.2.2., Vissim è in grado di valutarli entrambi anche graficamente (però solo se si possiede il modulo specifico). In ogni caso restituisce sempre dei file di output gestibili in *Excel*.

Per i tempi medi d'attesa, Vissim può dunque generare dati di perditempo per l'intersezione basandosi sugli itinerari definiti per le misurazioni dei tempi di

percorrenza. Ogni itinerario consiste in una sezione di partenza ed in una sezione di destinazione. Quindi i tempi medi di percorrenza di un qualunque itinerario, inserito nella rete, non rappresentano altro che il tempo medio di viaggio che impiega un veicolo (incluso il tempo di attesa o di sosta) nell'attraversare la prima sezione trasversale fino a raggiungere la seconda sezione [6.44].

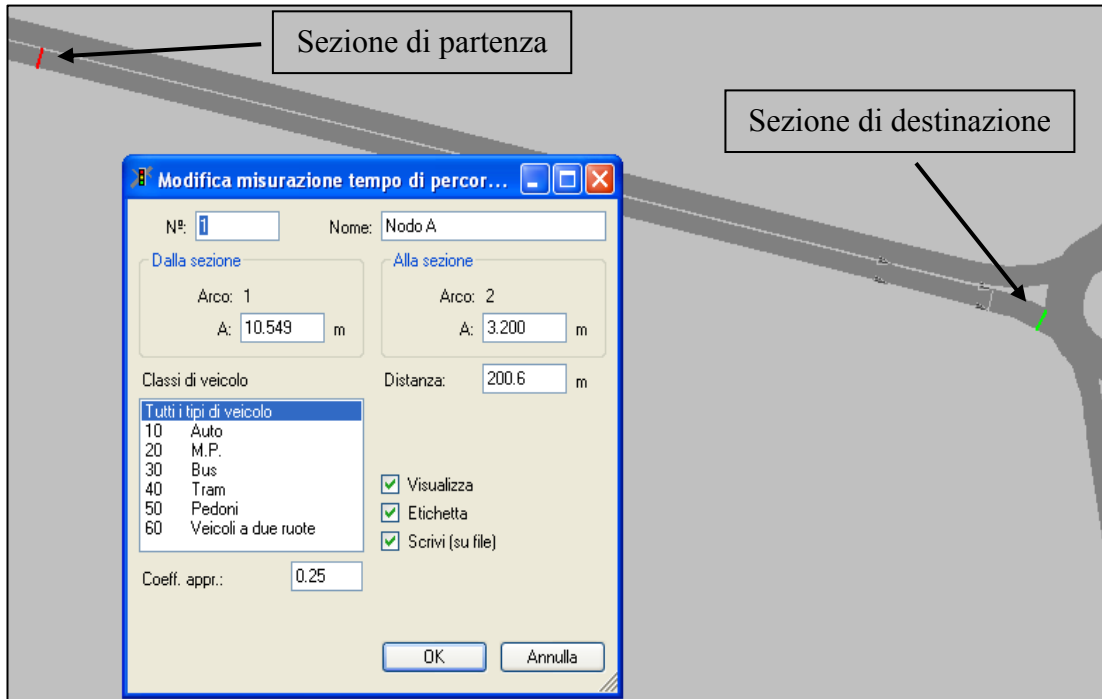


Figura 6.28: Definizione dei tempi di percorrenza per il ramo A della rotonda di Mottola

La Figura 6.28 indica l'esatto posizionamento delle due sezioni, quella di partenza e quella di destinazione, per la determinazione dei tempi di percorrenza e dei perditempo sul ramo A della rotonda di Mottola.

Il ritardo totale viene alla fine calcolato per ogni veicolo che completa la sezione del tempo di percorrenza sottraendo il tempo di percorrenza teorico (ideale) dal tempo di percorrenza reale. Il tempo di percorrenza teorico è il tempo che un veicolo impiegherebbe nel percorrere un itinerario se nella rete non ci fossero altri veicoli o fermate (Vissim tiene conto delle zone di rallentamento).

Per la stima del 95° percentile della lunghezza delle code invece il discorso è legato esclusivamente all'introduzione di un rilevatore di coda posto in coincidenza della linea d'attesa su ogni ingresso [6.44].

In Vissim ogni rilevatore è in grado di stimare la lunghezza media e quella massima della coda durante un periodo di tempo definito dall'utente (solitamente si preferiscono intervalli da 5 minuti ciascuno).

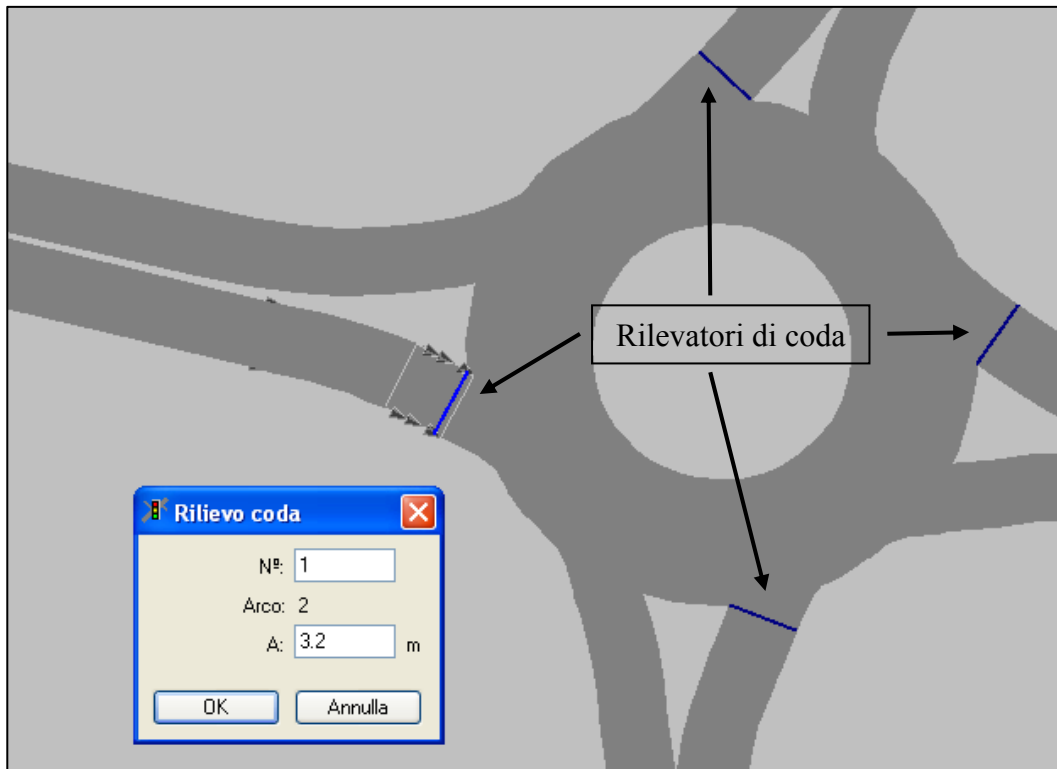


Figura 6.29: Posizionamento dei rilevatori di coda sui nodi della rotatoria di Mottola

La Figura 6.29 evidenzia la posizione dei rilevatori di coda posti sulla rotatoria di Mottola.

Anche per la rotatoria di Mottola, sono state compiute cinque simulazioni dello stesso scenario, in modo tale da poter dare validità statistica ai risultati ottenuti (vista la tipologia *one-shot* del software Vissim) [6.27] [6.41].

Pertanto, mettendo a confronto i risultati ottenuti con le metodologie internazionali di calcolo (esposti nel Capitolo 4) e quelli estrapolati dalle simulazioni effettuate in Vissim, si ottengono i valori riportati nella Tabella 6.13 e diagrammati negli istogrammi delle Figure 6.30, 6.31, 6.32 e 6.33.

NODI				
A	B	C	D	
7	10	9	31	Ritardo Comp.
11	20	13	60	SETRA
20	30	24	55	HCM 2000 Lw B.
14	17	16	22	HCM 2000 Up B.
8	10	16	16	Guide Suisse (CH1)
17	26	28	35	HBS 2001
5	14	22	45	VISSIM

Tabella 6.13: Calcolo dei ritardi sui 4 nodi di Mottola durante l'intervallo T_3

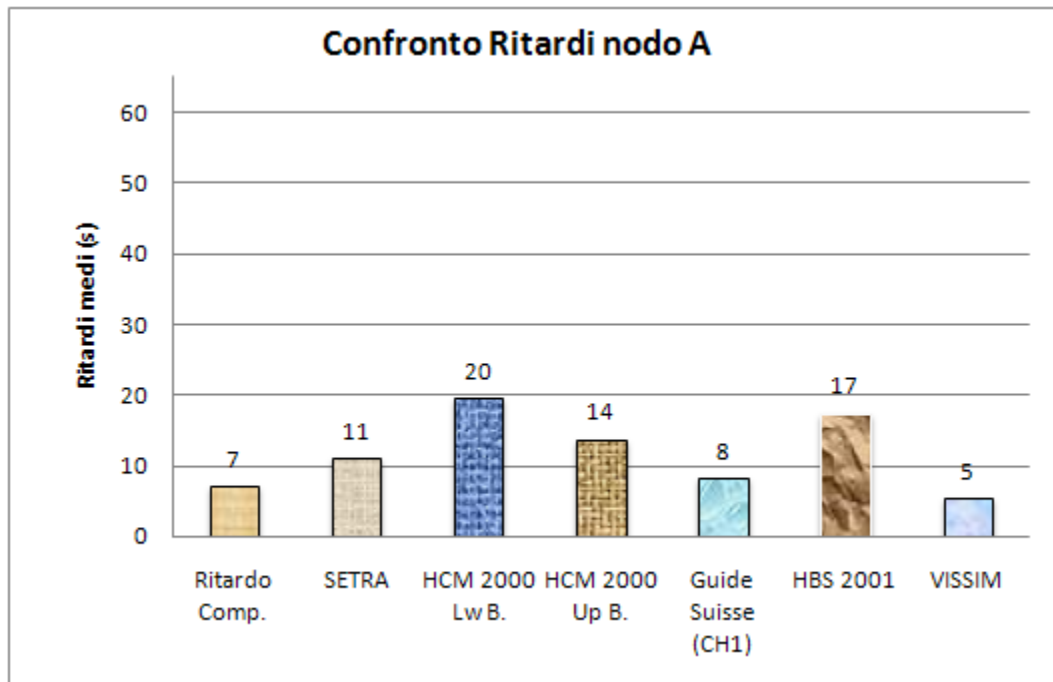


Figura 6.30: Confronto dei Ritardi del nodo A per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

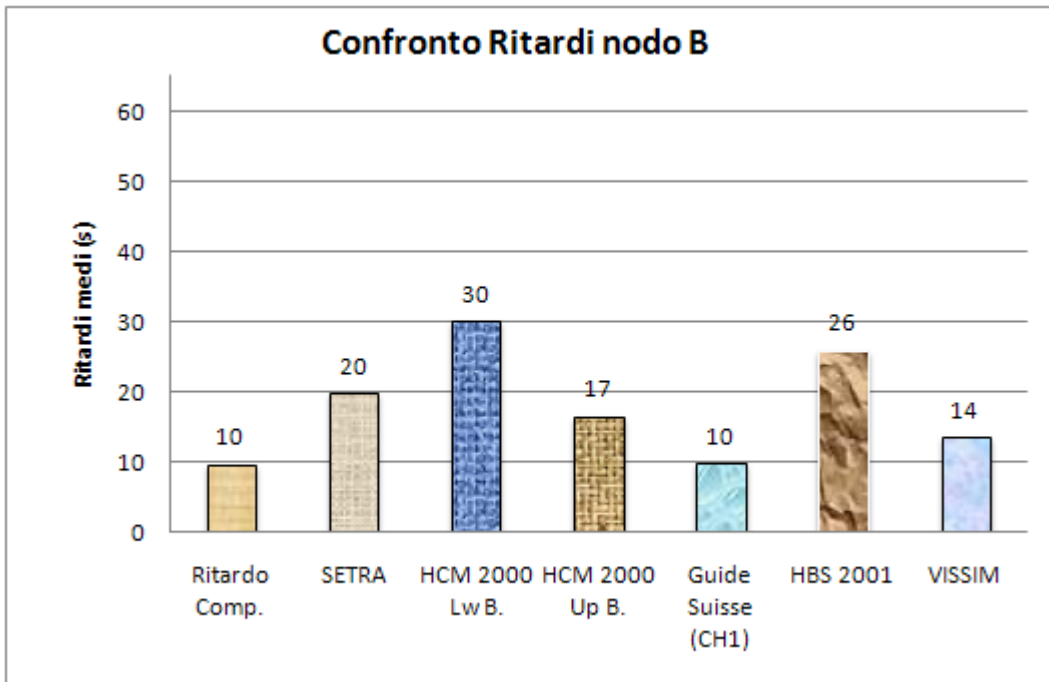


Figura 6.31: Confronto dei Ritardi del nodo B per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

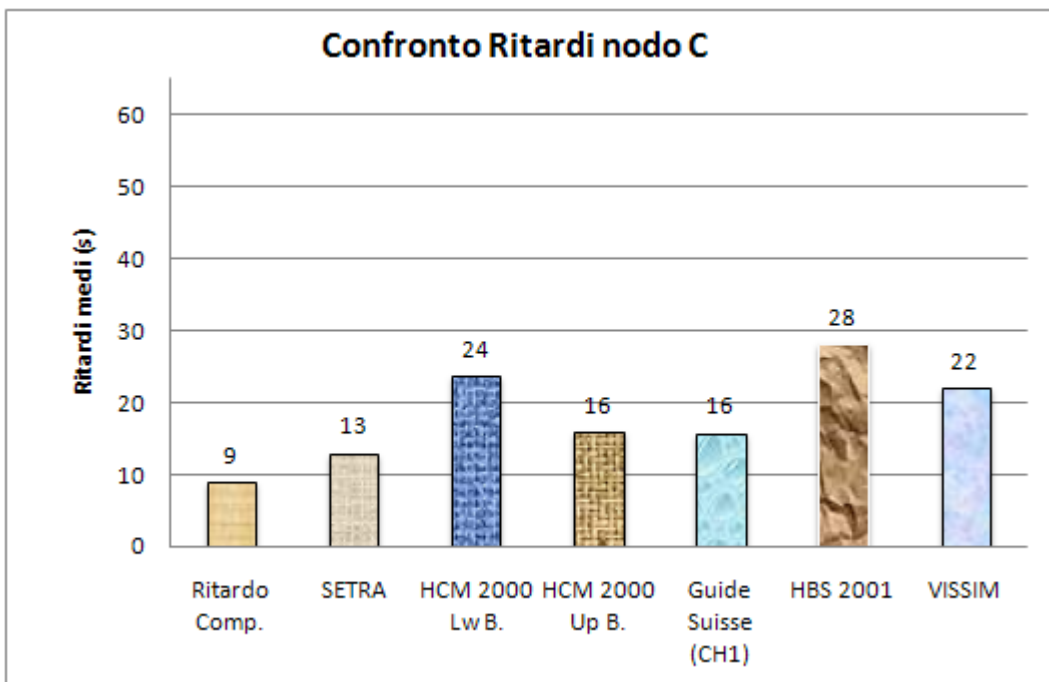


Figura 6.32: Confronto dei Ritardi del nodo C per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

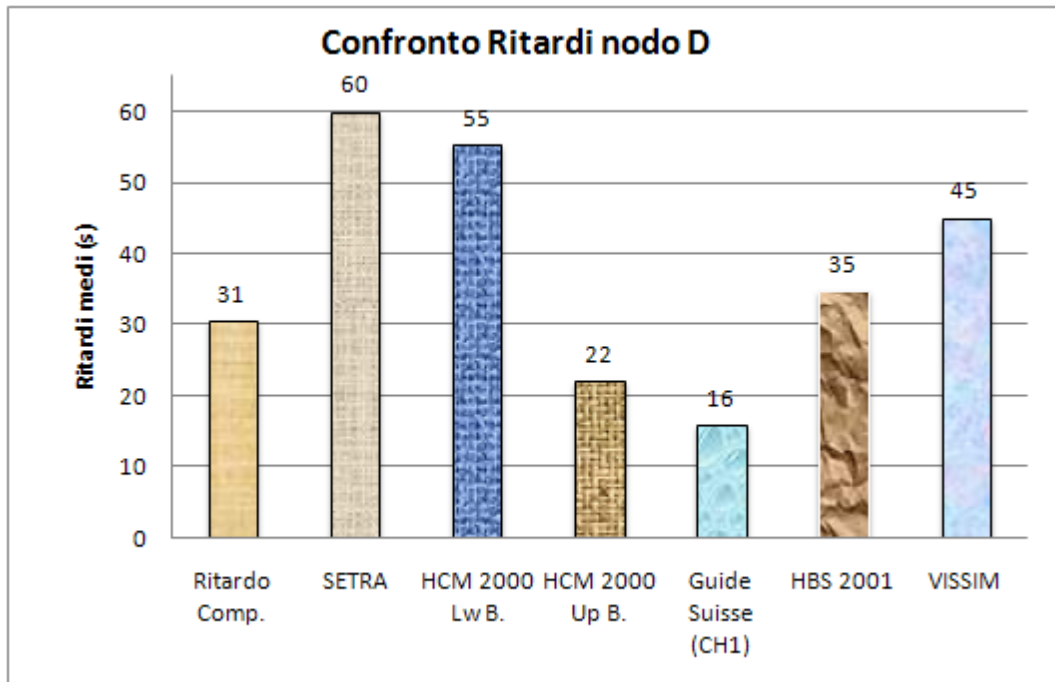


Figura 6.33: Confronto dei Ritardi del nodo D per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

Confrontando gli istogrammi delle Figure 6.30, 6.31, 6.32 e 6.33 si possono effettuare delle semplici considerazioni:

- Per i nodi A e B, Vissim restituisce, insieme alla metodologia del *Guide Suisse* [6.8], i valori più prossimi ai ritardi complessivi ottenuti con la formula che si basa sul ritardo medio di fermata (scostamento percentuale medio del 28% circa).
- Per gli ingressi C e D, rispettivamente quello più scarico e quello più trafficato, Vissim dà dei risultati un pò più elevati rispetto a quelli del ritardo complessivo, anche se tali dati sono sempre più bassi o vicini a quelli ottenuti con l'HCM 2000 (*Upper e Lower Bound*) [6.13] e con l'HBS 2001 [6.22].

Per quanto riguarda invece la stima del 95° percentile della lunghezza delle code (misurato in veicoli), i dati reperiti con Vissim, confrontati con quelli ottenuti e già riportati nel Capitolo 4, sono stati riassunti nella Tabella 6.14.

NODI				
A	B	C	D	
4	10	4	39	Code
8	20	7	30	SETRA
4	5	4	8	HCM 2000 Lw B.
3	4	3	5	HCM 2000 Up B.
4	9	5	15	HBS 2001
2	7	2	7	TRRL
4	8	3	14	AUSTROADS
4	12	13	33	VISSIM

Tabella 6.14: Calcolo del 95° percentile delle code sui 4 nodi di Mottola durante l'intervallo T_3

Gli istogrammi delle Figure 6.34, 6.35, 6.36 e 6.37 riprendono i dati del Capitolo 4 con l'aggiunta dei risultati ottenuti con Vissim.

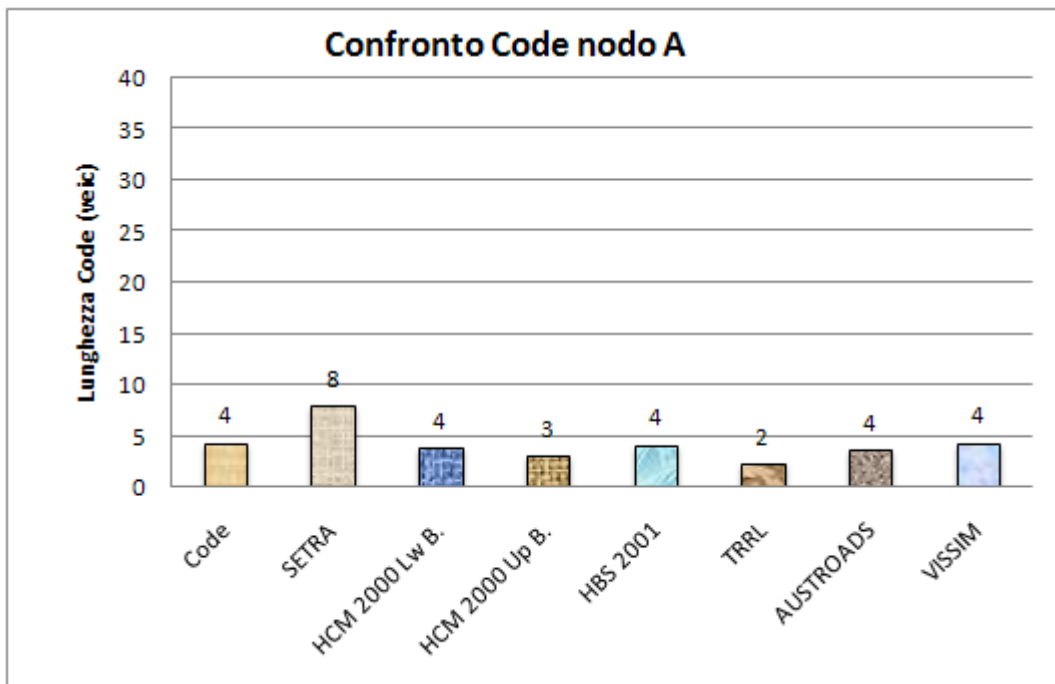


Figura 6.34 Confronto delle Code sul nodo A per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

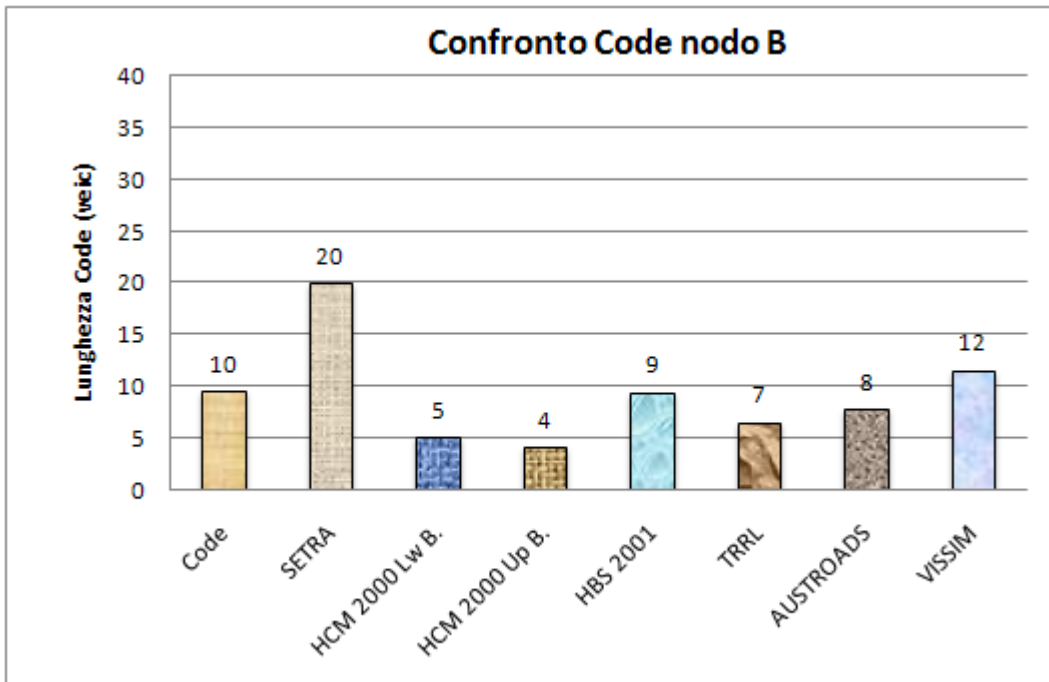


Figura 6.35: Confronto delle Code sul nodo B per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

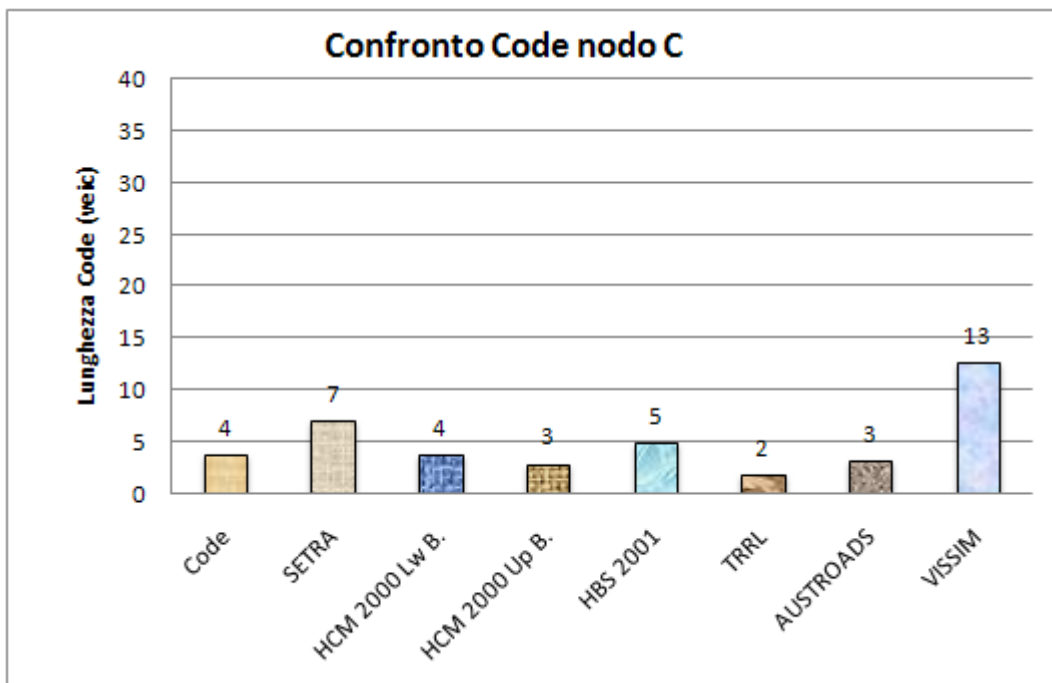


Figura 6.36: Confronto delle Code sul nodo C per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

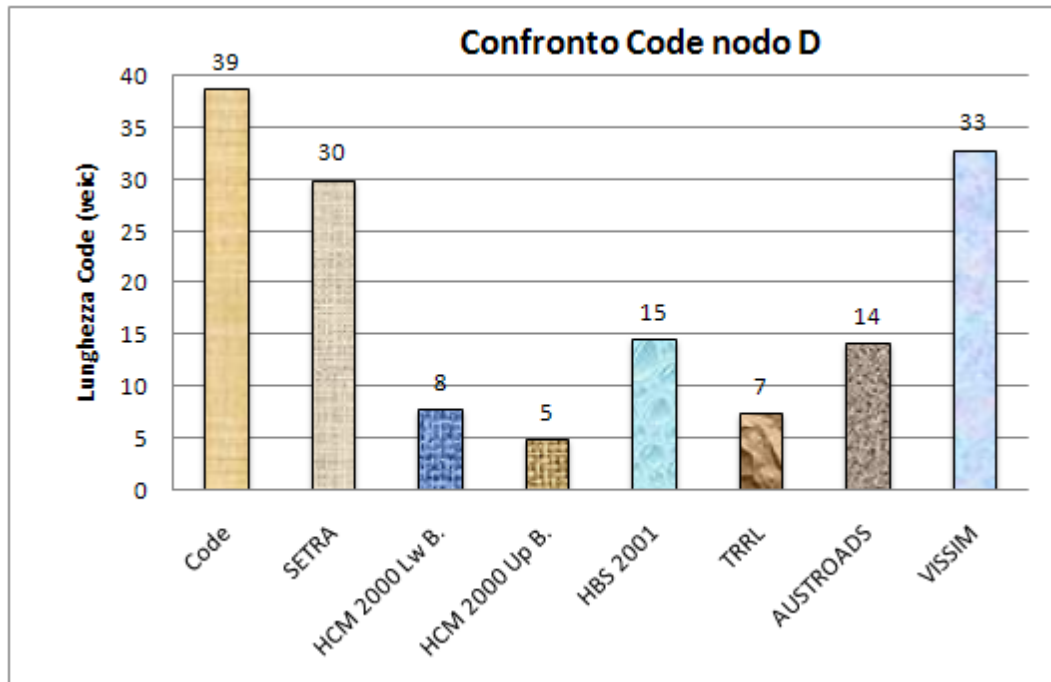


Figura 6.37: Confronto delle Code sul nodo D per la rotatoria di Mottola durante l'intervallo T_3

Dalla comparazione dei diagrammi delle Figure 6.34, 6.35, 6.36 e 6.37, si possono trarre alcune considerazioni:

- Per tutti i nodi, tranne quello C, Vissim restituisce valori di lunghezza delle code praticamente identici a quelli ricavati con la formula che si basa sul ritardo medio di fermata (scostamenti percentuali inferiori al 15%), dimostrandosi così lo strumento più affidabile tra quelli analizzati.
- Per il ramo C invece, così come avveniva per la stima dei ritardi, il risultato che si ottiene è il più alto in assoluto rispetto a quelli presi in considerazione. La motivazione è probabilmente legata al forte traffico circolante di fronte all'ingresso (l'itinerario B-D infatti è quello dominante per questa rotatoria), il quale riduce i *gap* accettabili da parte dei veicoli che si trovano ad immettersi sull'anello

6.4. Conclusioni

In questo capitolo sono stati presentati i risultati di uno studio volto ad individuare i possibili vantaggi dell'utilizzo di un software di microsimulazione,

Vissim, per il dimensionamento e la verifica delle rotatorie rispetto all'applicazione dei tradizionali metodi di calcolo presenti in letteratura.

Quindi sulla base dei risultati riportati nei paragrafi precedenti in termini di tempi medi d'attesa e di lunghezze delle code, è possibile compiere le seguenti considerazioni:

- Sia nel caso di rotatorie di grandi (Cosenza Nord) che di medio-piccole dimensioni (Mottola), Vissim, una volta definiti correttamente tutti i parametri di simulazione [6.44], si dimostra nel suo complesso lo strumento più affidabile, insieme alla metodologia del SETRA [6.7], nella valutazione delle caratteristiche prestazionali dell'intersezione.
- Vissim risente sensibilmente delle anomalie presenti in rotatoria, cosa che spesso non accade a diverse formulazioni internazionali. Infatti molte metodiche non prendono in considerazione delle caratteristiche che a volte diventano decisive per una corretta valutazione della capacità, delle code e dei ritardi.
- Difetto fondamentale dei modelli internazionali studiati per il dimensionamento delle rotatorie è quello di basarsi sull'ipotesi di sistemi in condizioni di equilibrio statistico [6.1] [6.11]. Ciò comporta una valutazione delle code e dei tempi d'attesa spesso sensibilmente più elevati rispetto a quelli reali, pervenendo così ad un sovradimensionamento degli elementi geometrici dell'intersezione. In Vissim, questo problema è superato attraverso il sistema dell'assegnazione dinamica dei flussi. Infatti, la possibilità di distribuire i flussi lungo un arco di tempo in maniera completamente arbitraria da parte dell'utente, permette al simulatore di restituire dei valori di coda e di ritardo molto più prossimi a quelli reali.
- Un altro problema dei modelli probabilistici stazionari è quello di non essere compatibili con portate prossime o superiori alla capacità [6.1] [6.11], perché, in questa circostanza, restituiscono lunghezze di coda e tempi d'attesa che tendono a divenire infiniti. Ciò non corrisponde la

vero, perché, sia nei regimi transitori che in quelli di picco, le code ed i tempi d'attesa non tendono comunque all'infinito come previsto dalla teoria stazionaria, ma si mantengono di fatto limitati, vista l'ampiezza finita del periodo critico nel quale la domanda è vicina o almeno pari alla capacità.

Pertanto si può concludere che, per quantificare l'efficienza di un'intersezione a rotatoria, durante una punta di traffico, è opportuno ricorrere a software di microsimulazione, come Vissim, che, a differenza dei modelli internazionali di calcolo, tengono conto delle variazioni di portata nel tempo, consentendo il calcolo dei parametri prestazionali (lunghezza delle code, tempi d'attesa, etc.) nel tempo, noto l'andamento della domanda anche nel caso che questa sia vicina alla capacità.

6.5. Bibliografia specifica del Capitolo 6.

- [6.1] Mauro R. (2007) – Il calcolo delle rotatorie. Capacità. Tempi d’attesa. Lunghezza delle code – *Hevelius Edizioni*, Benevento.
- [6.2] Canale S., Distefano N., Leonardi S., Pappalardo G. (2005) - Progettare le rotatorie - *EPC Libri*, Roma.
- [6.3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – D. M. 19/04/2006: Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali - Roma.
- [6.4] FHWA (2000) – Roundabouts: an informational guide – Report n. FHWA-RD-00-067 – Federal Highway Administration, U.S. Department Of Transportation, Washington (USA).
- [6.5] Provincia di Padova: Assessorato alla Viabilità (2002) - Linee guida per la progettazione e la verifica delle intersezioni a rotatorie - Provincia di Padova.
- [6.6] Brilon W. (2005) – Roundabouts: a state of the art in Germany – Atti del National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [6.7] SETRA (1997) – Carrefours giratoires: evolution des caracteristiques geometriques – Documentation Technique 44 – Ministere de l’equipement du logement, de l’amenagement du territoire et des transports, Parigi (Francia).
- [6.8] Bovy P., Dietrich K., Harmann A. et AA.VV. (1991) – Guide Suisse des giratoires – FVS/FSS-EPFL – Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Losanna (Svizzera).
- [6.9] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Ispettorato Generale per la circolazione e la sicurezza stradale (2001) - Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali - *Rapporto di Sintesi a Carattere Prenormativo*.
- [6.10] Commissione VSS 2 (1999) – Norme Svizzere SN 640-263 – Intersezioni: le rotatorie – Unione dei professionisti svizzeri della strada, Losanna (Svizzera).
- [6.11] NAASRA (1986) – Roundabouts: A Design Guide – National Association of Australian State Road Authorities, Sydney (Australia).

- [6.12] Esposito T., Mauro R. (2003) – Fondamenti di infrastrutture viarie, Volume 2: La progettazione funzionale delle strade - *Hevelius Edizioni*.
- [6.13] AA. VV. (2000) – Highway Capacity Manual 2000 - Transportation Research Board (TRB), Washington D.C. (USA).
- [6.14] Brilon W., Wu N., Bondzio L. (1997) - Unsignalized intersections in Germany: A state of the art 1997 - in Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals, Bochum (Germania).
- [6.15] Kimber R. M., Hollis E. M. (1979) – Traffic queues and delays at road junctions – TRRL Report 909.
- [6.16] TRL's Software Bureau (1998) - Roundabout design for capacity and safety. The UK empirical methodology - TRL.
- [6.17] Luttinen R. T. (2004) – Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections – Finnra Reports 1/2004 – Finnish Road Administration, Helsinki (Finlandia).
- [6.18] CERTU (1999) – Guide carrefours urbains – Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Lione (Francia).
- [6.19] Hagring H. (2003) – Capacity Model for Roundabouts – Trivector Traffic AB, Swedish National Road Administration, Lund (Svezia).
- [6.20] Akcelik R. (2004) – Roundabouts. Comments on aaSIDRA and TRL (UK) linear regression model – Akcelik & Associates Pty Ltd, Sydney (Australia).
- [6.21] Hagring H. (2004) - Effects of OD Flows on Roundabout Entry Capacity - Department of Technology and Science, Lund University (Svezia).
- [6.22] Wu N. (2000) - The proposed new version of German Highway Capacity Manual - Institute for Traffic Engineering, Ruhr University Bochum (Germania).
- [6.23] Capiluppi G. F., Gallelli V., Vaiana R. (2007) - Roundabouts performances analysis: comparison between classical methodologies, micro-simulation and field measuring – Atti del XXII European Conference on Operational Research, Road Traffic Management Session, Praga (Repubblica Ceca).

- [6.24] Capiluppi G. F., Gallelli V., Vaiana R. (2006) – Intersezioni a raso con soluzione a rotatoria dissimmetrica: un caso di studio - in Adeguamento e Manutenzione delle strade esistenti: Atti del XVI Convegno Nazionale SIIV, Rende (CS).
- [6.25] Astarita, V., Guido, G., Vitale, A., (2006) – Verifica della applicabilità di rotatorie di forma non circolare tramite simulazione microscopica del deflusso veicolare – Atti del XVI Convegno Nazionale S.I.I.V., Rende (CS).
- [6.26] Gallelli V., Capiluppi G. F., Vaiana R. (2007) - Roundabout intersections: analysis for scenarios by micro-simulation - Atti del 4th International SIIV Congress - Advances in transport infrastructures and stakeholder expectations, Management Session + Poster Session, Palermo.
- [6.27] Gallelli V., Astarita V., Guido G., Vitale A. (2007) - Microscopic traffic simulation of non-conventional roundabouts performances: a case study - Atti del 4th International SIIV Congress - Advances in transport infrastructures and stakeholder expectations, Management Session, Palermo.
- [6.28] Capiluppi G. F. (2000) – La rotatoria come strumento per la regolazione delle intersezioni viarie a raso. Ottimizzazione della geometria e delle caratteristiche prestazionali – Atti del X Convegno Nazionale S.I.I.V., Catania.
- [6.29] Akçelik R. (2003) – A roundabout case study comparing capacity estimates from alternative analytical model – Atti del 2nd Urban Street Symposium, Anaheim, California (USA).
- [6.30] Wiedemann, R. (1974) - Simulation des Straßenverkehrsflusses - Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (Germania).
- [6.31] Wiedemann, R. (1991) - Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads - In Advanced Telematics in Road Transport edito dalla Commissione Europea, DG XIII, Bruxelles (Lussemburgo).
- [6.32] RODEL SOFTWARE LTD (2002) – Rodel 1: interactive roundabout design – Rodel Software Ltd and Staffordshire County Council.

- [6.33] Rodegerdts L. (2004) – NCHRP 3-65: Applying Roundabouts in the United States – Committee on Highway Capacity and Quality of Service, Washington (USA).
- [6.34] Stanek D., Milam R. (2005) – High-capacity roundabout intersection analysis: going around in circles – Atti del National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [6.35] Bared J. G., Edara P. K. (2005) - Simulated Capacity of Roundabouts and Impact of Roundabout Within a Progressed Signalized Road - TRB National Roundabout Conference 2005, Vail, Colorado (U.S.A.).
- [6.36] Mohamed A., Yasser H. (2001) – State of the art report on: roundabouts design, modelling and simulation – Orlando, Florida (USA).
- [6.37] Kinzel C., Trueblood M. (2004) – The Effects of Operational Parameters in the Simulation of Roundabouts – Kansas City, Missouri (USA).
- [6.38] V.A. (2000) – Traffic Analysis Software Tools – Transportation Research Board (TRB), Washington (USA).
- [6.39] V.A. (2004) – Introduction to roundabouts: Ins & Outs – Wick Engineers Inc.
- [6.40] Sisiopiku V., Oh H. (2001) – “Evaluation of roundabout performance using Sidra” – Journal of transportation engineering, Marzo/Aprile 2001, pp. 143-150.
- [6.41] Trueblood M., Dale J. (2004) – Simulating roundabouts with Vissim – Kansas City, Missouri (USA).
- [6.42] Kiattikomol V., Urbanik II T. (2005) – An Evaluation of Roundabout as an Alternative Intersection Control Device using VISSIM Simulation application– [cd-rom], TRB Annual Meeting, Washington (USA).
- [6.43] V.A. (2005) – The comparison of Paramics, Getram, Corsim and Vissim – University of Maryland, (USA).
- [6.44] Planung Transport Verkehr AG (2005) - Manuale per l’utente di VISSIM, versione 4.00 - Transport Planning Service, Perugia.

L'EVOLUZIONE GEOMETRICO-FUNZIONALE DELLO SCHEMA A ROTATORIA

7.1. Introduzione

Nella definizione di rotatoria riportata nel Capitolo 1, secondo cui essa è un'intersezione con un'area centrale circondata da un anello percorribile in un solo senso dal traffico proveniente da diverse entrate, dove vige la regola della precedenza per i veicoli che percorrono la carreggiata anulare [7.12], rientrano tutti i tipi di incroci di forma circolare previsti dalle varie normative internazionali e classificati di solito in base alla loro ampiezza.

Sempre in tali norme, non compaiono in alcun caso nessun tipo di prescrizioni circa il direzionamento o la canalizzazione dei traffici sull'anello. In sostanza, il deflusso veicolare sulla carreggiata anulare avviene attraverso la libera interazione delle traiettorie dei veicoli e quindi delle manovre di scambio a seconda del percorso da compiere tra un'entrata ed un'uscita generiche.

Oggi però, le numerose osservazioni sperimentali disponibili in letteratura hanno dimostrato come in alcuni casi particolari, quali ad esempio le rotatorie con due o tre corsie all'anello ed agli ingressi e con bracci posti o inclinati in maniera particolare, si possano riscontrare dei seri problemi di circolazione e di sicurezza. Recenti studi tedeschi [] hanno infatti messo in evidenza l'estrema pericolosità della demarcazione sull'anello di corsie concentriche nel caso di rotatorie di grande diametro.

Ultimamente quindi, in diversi paesi europei, sono stati condotti degli studi sulla possibilità di individuare delle varianti allo schema tradizionale di rotonda in grado di garantire migliori livelli di servizio in termini di capacità e di sicurezza.

Ed in tal senso i principali provvedimenti finora adottati sono stati due:

- la semaforizzazione delle rotatorie, durante tutta la giornata o solo parzialmente durante le ore di punta;

- la preselezione in ingresso dei flussi in funzione della loro destinazione finale e la conseguente loro canalizzazione sulle corsie all'anello, tramite un nuovo schema di intersezione a rotatoria denominato "a spirale" o "Turboratoria".

7.2. Le rotatorie "semaforizzate"

Le rotatorie semaforizzate nascono nel Regno Unito dove inizialmente vennero adoperate per controllare il traffico nelle rotonde di grande dimensioni presenti nei centri urbani già da molto tempo e che con l'aumentare dei flussi raggiungevano sempre più spesso la condizione di sovrassaturazione. Semaforizzazioni complete e durature lungo tutto l'arco della giornata furono le soluzioni più utilizzate per la maggior parte di queste intersezioni.

La tendenza ad introdurre delle semaforizzazioni in rotatoria sta via via aumentando. Da uno studio condotto in Gran Bretagna nel 1997 dal CSS (*County Surveyors' Society*) si è scoperto che tra il '91 ed il '94 il tasso di crescita delle installazioni di rotatorie semaforizzate è stato del 25% annuo rispetto al 3% delle intersezioni semaforizzate in generale. L'indagine condotta su 161 rotatorie regolate da semafori ha mostrato che il 35% sono state completamente semaforizzate, il 36% solo in parte, mentre il 34% presentano delle facilitazioni per l'attraversamento dei pedoni [7.7].

Caratteristica di progetto	Opzione	Descrizione
1. Metodi di controllo	Diretto	Semaforizzazioni per gli approcci interni ed esterni (tutti i punti di conflitto sono controllati)
	Indiretto	Flussi esterni controllati con "metering signals" e flussi circolanti non controllati
2. Completo / Part time	Completo	Semafori operanti permanentemente
	In parte	Semafori accesi solo part time o mediante rilevatori di coda
3. Completo / Controllato in parte	Completo	Tutti gli ingressi sono semaforizzati
	In parte	Una o più entrate rimangono sotto il sistema del "dare precedenza"

Tabella 7.1: Tipologie di semaforizzazione in rotatoria secondo Hallworth [7.14]

Hallworth già nel 1992 [7.14] individuò sei possibili scelte per l'introduzione dei semafori in una rotatoria (Fig. 7.1), anche se un sito specifico può nascere come combinazione di diverse opzioni.

Anche in Australia negli ultimi anni sono stati installati dei semafori sugli ingressi di alcune particolari rotatorie caratterizzate da flussi di traffico sbilanciati, in modo da dosare il flusso circolante sull'anello riducendo così i tempi d'attesa sui rami opposti. Questi sistemi di controllo vengono utilizzati part time e si attivano solo quando la lunghezza della coda sull'approccio più svantaggiato raggiunge una lunghezza critica.



Figura 7.1: Esempio di rotatoria con flussi non bilanciati in Australia [7.10]

Hallworth, sempre nel '92 [7.14], notò i benefici che possono essere ottenuti dall'utilizzo dei semafori in rotatoria. Tali vantaggi, correlati all'uso di semafori su tutti gli ingressi, rimangono tali anche in presenza di una semaforizzazione parziale.

	Rotatorie ordinarie	Rotatorie semaforizzate
Ritardi	Su alcuni rami possono diventare eccessivi a causa di flussi non bilanciati	I semafori possono alterare il sistema delle precedenze, bilanciando i ritardi
Code	Possono raggiungere una lunghezza critica su alcuni particolari ingressi	I semafori possono monitorare e ridurre le code, gestendo i tempi di verde
Capacità	In condizioni di sovrassaturazione può risultare insufficiente	I semafori possono migliorare la capacità in condizioni di sovrassaturazione
Sicurezza	La necessità di scambiare e di confluire può creare delle difficoltà su alcune entrate	I semafori possono regolare i flussi, riducendo gli scambi e le velocità
Pedoni	La mancanza di controllo può rendere difficoltoso l'attraversamento pedonale	I semafori possono rendere gli attraversamenti pedonali più sicuri

Tabella 7.2: Benefici dovuti all'uso dei semafori in rotatoria secondo Hallworth [7.14]

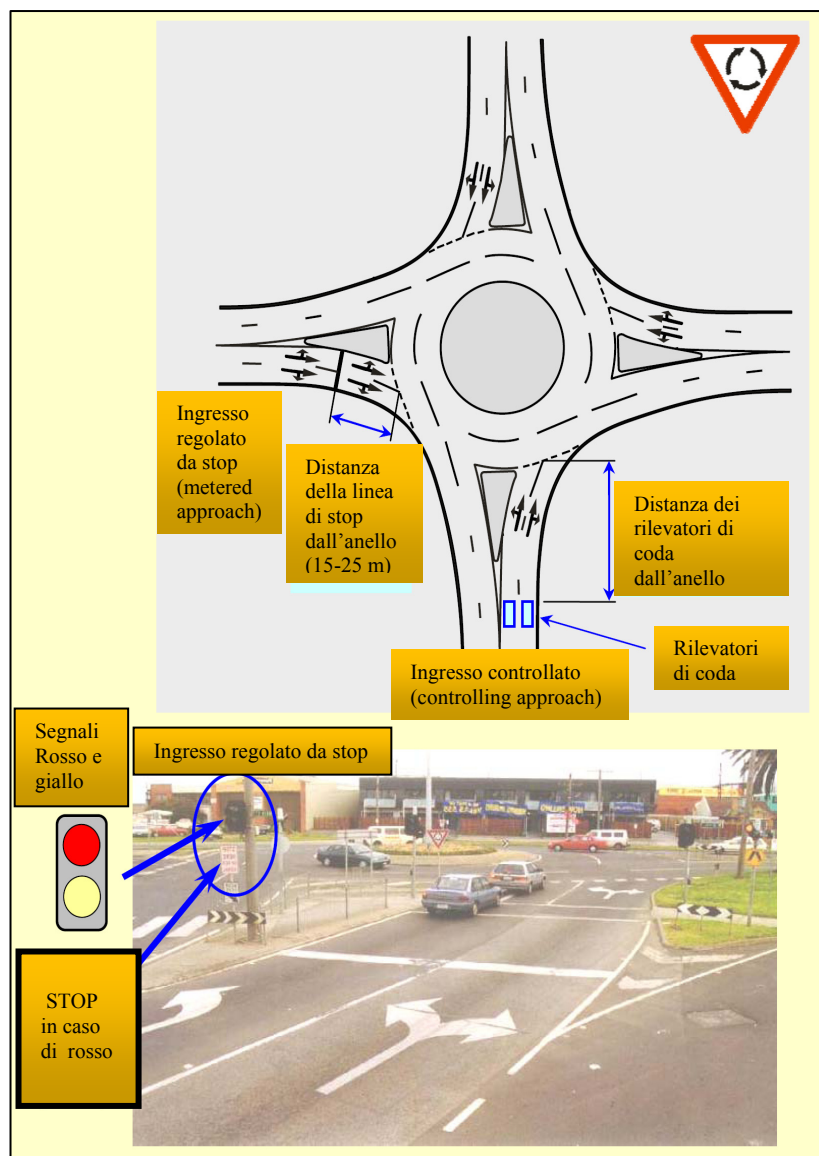


Figura 7.2: Esempio di metering signals per una rotatoria in Australia [7.10]

Molti casi reali studiati mostrano come la capacità ed il livello di servizio di una rotatoria dipendano non solo dal traffico circolante, ma anche dal suo bilanciamento. Infatti flussi circolanti dominanti, generati di solito prevalentemente da un singolo approccio, riducono la capacità d'ingresso; quindi per alleviare gli eccessivi ritardi e le code, in Australia, Regno Unito e Stati Uniti vengono adoperati dei “*Metering Signals*” (Fig. 7.2), ossia dei semafori correlati alla misurazione del livello di traffico, in grado di generare dei *gap* nel flusso circolante sull'anello.

A tal proposito, Huddart, già nel lontano 1983, affermava “che la capacità di una rotatoria risulta particolarmente limitata se i flussi di traffico non sono bilanciati. Ciò avviene in particolare quando un ingresso presenta un traffico intenso ed immediatamente dopo di esso si trova un altro approccio il cui flusso è molto basso: in questo modo il flusso maggiore procederà praticamente come se fosse ininterrotto, dando così origine, sul ramo minore, a code sempre più lunghe” [7.7].

I *metering signals* vengono di solito adoperati part-time durante le ore di punta del traffico. Come si può notare dalla Figura 7.2, con il termine di “*metered approach*” si intende quell'ingresso regolato da semaforo che presenta il flusso dominante; mentre con il termine di “*controlling approach*” si indica l'ingresso monitorato da spire induttive rilevatrici di coda e che presenta il traffico più basso. Sempre in Figura 7.2 si può notare come il semaforo presenti solo due segnali: il rosso ed il giallo. Però, in presenza di un attraversamento pedonale sul *metered approach*, si può avere un semaforo con tre segnali: rosso, giallo e verde (Fig. 7.3).



Figura 7.3: Esempio di metering signals con attraversamento pedonale in Australia [7.6]

La normativa australiana sulle segnalazioni di traffico (*Australian Traffic Signal Guide*) raccomanda l'uso di almeno due semafori: uno primario, montato in corrispondenza o a sinistra (perché la guida in Australia è a sinistra!) della linea di stop del braccio; ed uno terziario, montato sul lato sinistro a valle dell'approccio. A questi si aggiunge un cartello fissato nelle vicinanze della linea di stop con su scritto "STOP IN CASO DI ROSSO". Le linee di stop devono essere posizionate a non meno di 3 m dalla linea del dare precedenza, ma è preferibile porle a circa 15÷25 m da quest'ultima. Le spire induttive, utilizzate come rilevatori di coda sul *controlling approach*, vengono di solito sistemate ad una distanza compresa tra 50 e 120 m [7.7].

In pratica, quando la coda sull'ingresso controllato si estende fino ai rilevatori, sul semaforo posto sul "*metered approach*" comparirà il rosso in modo tale da creare un gap nel flusso circolante: tutto ciò aiuta il traffico sull'approccio controllato ad entrare in rotatoria. Nel momento in cui scompare il rosso dal semaforo, la rotatoria ritorna nelle sue normali condizioni di esercizio.

Esistono quindi due possibili tipi di operazioni legati all'uso o meno di rilevatori anche sull'approccio regolato da semaforo (ingresso con flusso maggiore). La durata del segnale di Bianco viene determinata in funzione della richiesta di tempo minimo di

bianco, oppure viene estesa dal traffico entrante dal *metered approach* attraverso l'uso di rilevatori sul ramo stesso:

- Se l'ingresso regolato dal semaforo possiede anch'egli dei rilevatori, allora il settaggio del tempo di Bianco Minimo e della massima estensione del Bianco sarà legato alla regolazione dei gap. Il timer per la valutazione della massima estensione del bianco parte subito dopo il tempo minimo di bianco (se la richiesta del rilevatore di coda viene registrata sul *controlling approach*). La domanda per la fase di bianco è registrata quando il primo veicolo, durante la fase di rosso, viene rilevato dalle spire presenti sul *metered approach* [7.11].
- Se invece l'approccio regolato da semaforo non è dotato di rilevatori, allora verrà effettuato solo il settaggio del tempo di bianco minimo. La durata del tempo di bianco può essere determinata dopo il tempo di bianco minimo non appena la richiesta del rilevatore di coda posto sull'approccio controllato viene registrata. La richiesta per la fase di bianco viene registrata automaticamente nel momento in cui comincia la fase di rosso [7.11].

La durata della fase di rosso sul *metered approach* è determinata dal traffico presente sul *controlling approach*. A tal proposito, i settaggi per il tempo di rosso minimo e per il tempo di massima estensione del rosso vengono regolati attraverso la determinazione del gap dei rilevatori di coda. In particolare, il settaggio del tasso di occupazione dei rilevatori di coda, viene adoperato come parametro addizionale per la registrazione della richiesta di fase di rosso. Il timer per la valutazione della massima estensione del rosso parte subito dopo il tempo di rosso minimo (quando la richiesta è registrata sul *metered approach* come appena descritto).

Nella Tabella 7.3 Akçelik sintetizza i parametri di controllo per le semaforizzazioni in rotatoria [7.11].

Metered Approach	
Distanza della linea d'arresto dal segnale di stop	14 – 24 m
Distanza dei rilevatori d'arresto (se usati)	2,5 m
Lunghezza delle spire (se usate)	4,5 m
Settaggio del tempo di Bianco Minimo	20 – 50 s
Settaggio della massima estensione del tempo di Bianco	30 s
Settaggio del gap del segnale di bianco	3,5 s
Tempo di giallo	4,0 s
Tempo di rosso	1,0 – 2,0 s
Controlling Approach	
Distanza dei rilevatori di coda dall'ingresso in anello	50 – 120 m
Lunghezza delle spire per i rilevatori di coda	4,5 m
Settaggio del tempo di rosso minimo	10 – 20 s
Settaggio della massima estensione del tempo di Rosso	20 – 60 s
Settaggio del gap dei rilevatori di coda	3,0 – 3,5 s
Settaggio del tasso di occupazione dei rilevatori di coda	4,0 - 4,5 s
Tempo di giallo	3,0 – 4,0 s
Tempo di rosso	1,0 – 2,0 s

Tabella 7.3: Parametri di controllo adoperati per i metering signals in Australia [7.11]

Da un'analisi condotta sempre da Akçelik, attraverso il software di microsimulazione aaSIDRA, sulle caratteristiche prestazionali delle rotatorie semaforizzate rispetto a quelle tradizionali si scopre che non sempre l'introduzione di semafori migliora i livelli di servizio di una rotatoria [7.5].

Ed a tal proposito Natalizio (2005) [7.7], partendo dagli studi condotti negli ultimi anni dalla "Akçelik and Associated Pty Ltd" ed analizzando delle rotatorie senza semaforizzazioni, ha mostrato come esista una zona di transizione ristretta fra la condizione di soddisfazione per l'ingresso controllato ed un'altra in cui i criteri prescritti erano oltrepassati. Tale zona, in ogni caso, non è larga più di 100 veic/h. In Figura 7.4 sono riportate le condizioni di flusso sul *controlling approach* che avrebbero benefici dall'installazione di *metering signals* in rotatoria.

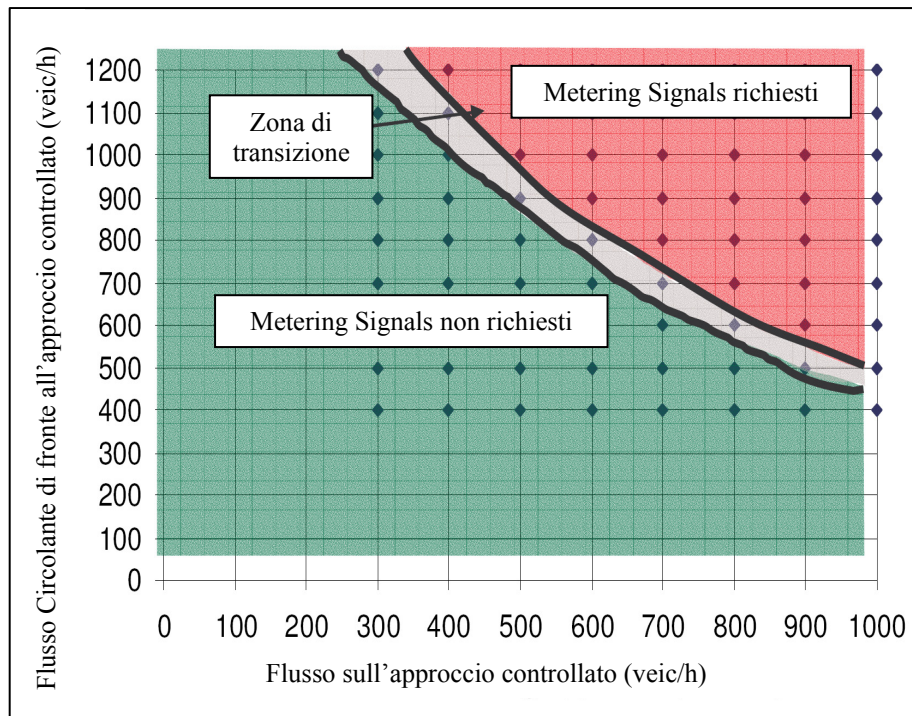


Figura 7.4: Condizioni di flusso sull'approccio controllato per la richiesta di Metering Signals [7.7]

Passando poi all'analisi delle rotatorie semaforizzate, Natalizio [7.7] nota come tutte le operazioni adottate abbiano condotto ad un miglioramento della capacità e delle prestazioni sull'approccio controllato, mentre ad un peggioramento della capacità e delle performance sull'ingresso regolato dal semaforo.

Comparando i diversi settaggi utilizzati per le rotatorie con *metering signals*, i risultati ottenuti mostrano che:

- un tempo minimo di bianco e di rosso più ampio garantisce un miglioramento della capacità e delle prestazioni maggiore rispetto a quello che si può ottenere riducendo la distanza dall'anello dei rilevatori di coda. In ogni caso cicli più lunghi recano beneficio all'approccio controllato [7.7];
- una distanza dall'anello più corta per i rilevatori di coda garantisce un minore miglioramento della capacità e delle performance del ramo semaforizzato rispetto ad un più ampio tempo minimo di bianco e di rosso. Quindi cicli semaforici più brevi arrecano beneficio ai *metered approach* [7.7];

- tempi minimi di rosso più corti hanno un minore impatto sulla capacità e sulle prestazioni degli ingressi semaforizzati rispetto a più lunghi tempi minimi di bianco e distanze dall'anello più lunghe per i rilevatori di coda [7.7].

Dall'analisi di questi risultati Natalizio [7.7] tira fuori alcune linee guida per la progettazione dei *metering signals* valide però esclusivamente per rotatorie con singola corsia all'anello e che hanno flussi più intensi provenienti solo da due rami.

I settaggi scelti per ottenere la migliore condizione di capacità e di prestazione per una rotatoria con i metering signals sono i seguenti:

- distanza dall'anello dei rilevatori di coda = 60 metri;
- tempo minimo di bianco = 20 secondi;
- tempo minimo di rosso = 20 secondi.

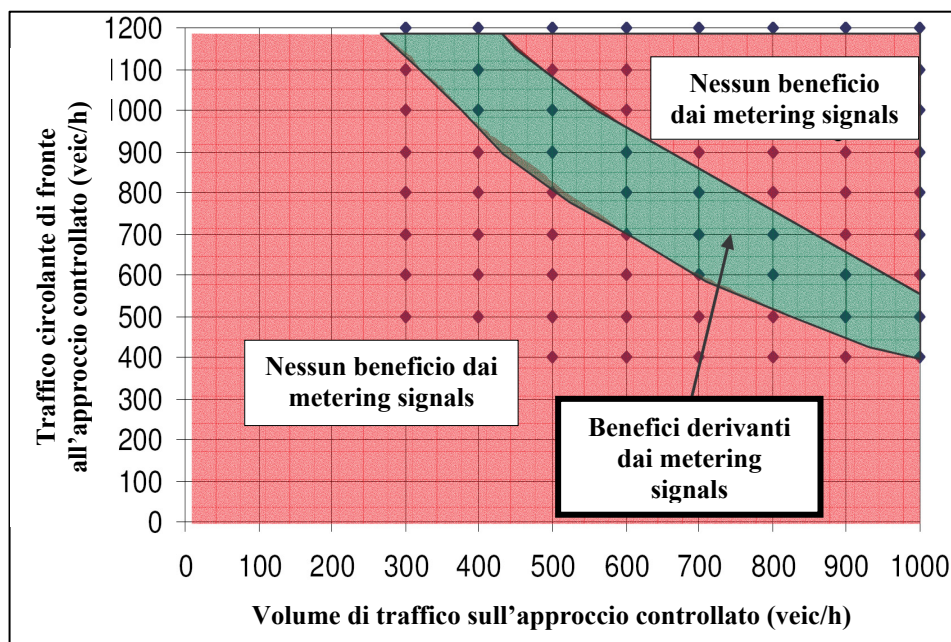


Figura 7.5: Condizioni di flusso sull'approccio controllato che ottengono benefici dai Metering Signals [7.7]

Quindi, analizzando i risultati ottenuti dall'adozione di questi parametri di default, si possono stabilire le condizioni di traffico sull'approccio controllato, che possono ricavare beneficio dall'applicazione dei semafori sulla rotonda (Fig. 7.5). La fascia verde messa in evidenza nella Figura 7.5 indica la combinazione fra traffico

entrante dall'approccio controllato e traffico circolante di fronte ad esso che può avere beneficio dall'adozione dei *metering signals* basati sui settaggi di default precedentemente stabiliti.

I risultati mostrano come i *metering signals* siano di beneficio su di una rotatoria ad una corsia quando la somma combinata del volume di traffico entrante dall'approccio svantaggiato insieme a quello circolante di fronte ad esso stesso è compresa tra i 1300 ed i 1400 veic/h.

I vantaggi derivanti dell'inserimento di questo particolare tipo di semaforizzazione in rotatoria cominciano a svanire nel momento in cui la somma del flusso in ingresso dal *controlling approach* e del traffico circolante di fronte ad esso è compresa tra 1550 e 1650 veic/h. Tale risultato indica che esiste in pratica solo una piccola fascia, larga circa 250 veic/h, in cui la rotatoria riceve benefici dall'introduzione dei *metering signals*.

Per quanto riguarda i metered approach, ossia quei rami regolati dai semafori, se tali ingressi presentano un grado di saturazione inferiore a 0,6, allora è necessario che con l'introduzione dei *metering signals* non si superi il valore di 0,85. Similmente se invece tali approcci possiedono un grado di saturazione minore di 0,7, allora è conveniente mantenere tale grado inferiore a 1 dopo l'introduzione della semaforizzazione [7.7].

7.3. Le rotatorie a spirale o “Turborotatorie”

Questo nuovo tipo di rotatorie sono state trattate per la prima volta da Harte e Fortuijn nel 1997 e sono state poi oggetto del rapporto n. 126 (1998) di Crow. Negli anni seguenti ne furono progettate alcune in Olanda ed in Polonia, mentre più di recente ne sono state realizzate delle altre in Germania ed in Gran Bretagna [7.1].

Come già riportato nell'introduzione a questo capitolo, la caratteristica principale di queste rotatorie è rappresentata dal fatto che gli utenti sono costretti, fin dal loro avvicinarsi all'incrocio, ad incanalarsi su delle corsie prestabilite per il tipo di manovra che si apprestano a compiere e delimitate fra di loro mediante dei cordoli o

delle vere e proprie isole di separazione, sia in ingresso che sull'anello, come si può notare dalle Figure 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9.



Figura 7.6: Veduta aerea di una Turborotatoria in Olanda

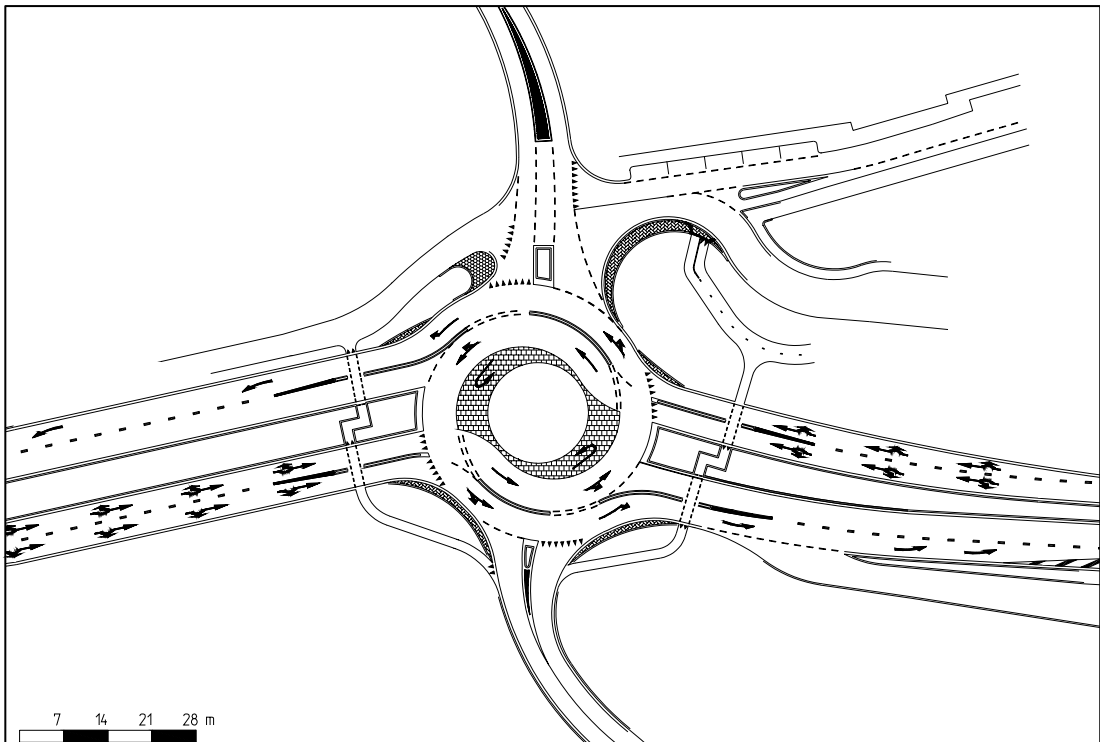


Figura 7.7: Esempio di una Turborotatoria [7.1]

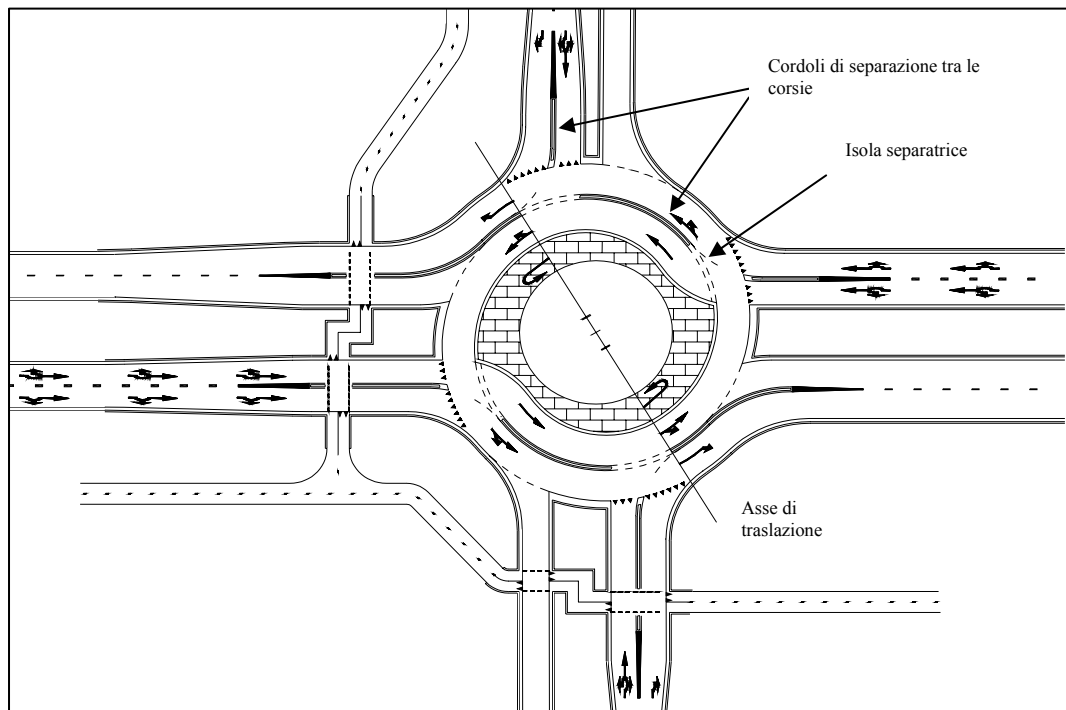


Figura 7.8: Elementi caratterizzanti di una Turborotatoria [7.1]



Figura 7.9: Elementi caratterizzanti di una Turborotatoria [7.3]

Con questi particolari accorgimenti di disciplina dei flussi si vogliono cercare di evitare le collisioni laterali sia sull'anello che in entrata ed in uscita. In Figura 7.8 sono indicati gli elementi caratteristici di una turborotatoria: i cordoli di separazione per le corsie all'ingresso, le isole separatrici per quelle all'anello e l'asse di traslazione (segmento sul quale risultano allineati i centri degli elementi circolari con i quali si definisce il bordo multilineare dell'isola centrale).

In Figura 7.10 invece è riportata una sezione trasversale del cordolo che separa le corsie ed un esempio di profilatura dell'isola spartitraffico che introduce il cordolo stesso tra le corsie all'anello.

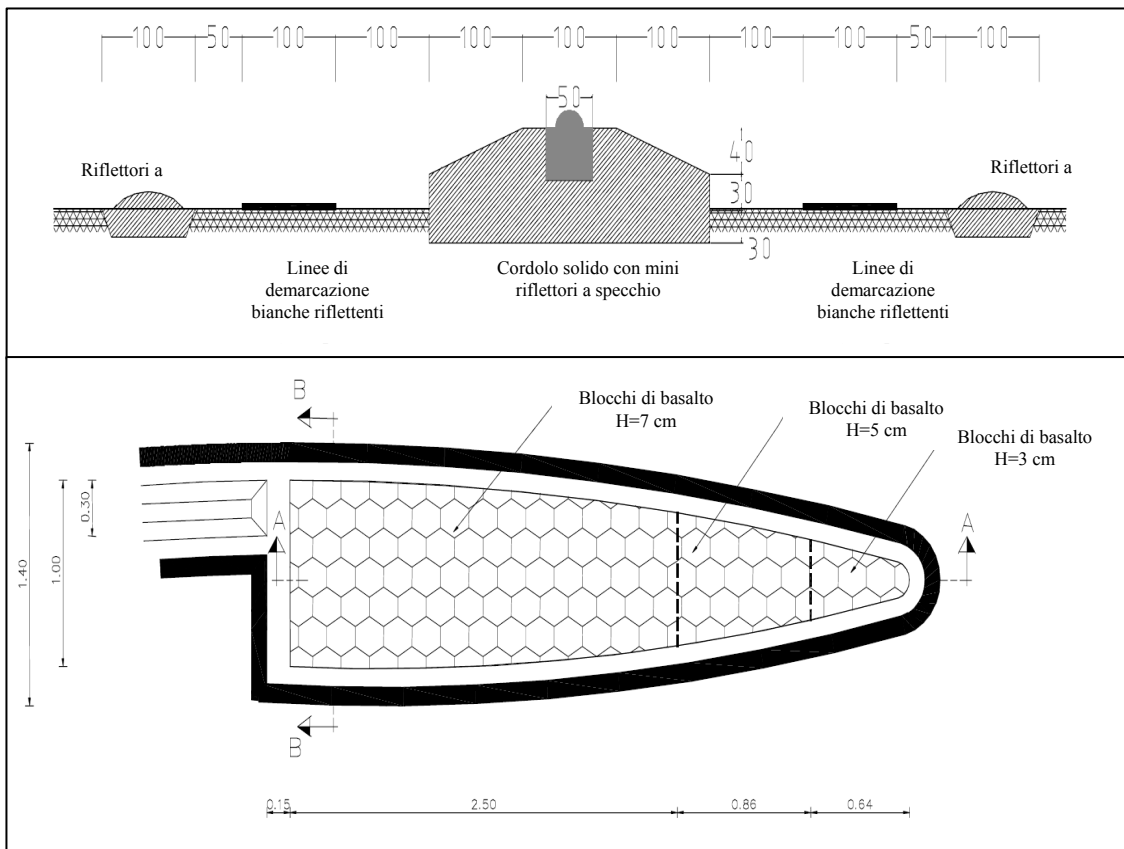


Figura 7.10: Dettagli dei cordoli e dell'isola separatrice di una Turborotatoria (quote in mm) [7.3]

Quando un automobilista affronta una rotatoria così organizzata, il suo itinerario è già prefissato. Pertanto bisogna disporre un'adeguata segnaletica in grado di guidare l'utente nella scelta della corsia prima dell'ingresso in rotatoria.

Nelle Figure 7.11 e 7.12 si può osservare qualche dettaglio sui cordoli di separazione tra le corsie in ingresso ed all'anello, nonché sulla segnaletica orizzontale di una rotatoria a spirale in Olanda.



Figura 7.11: Cordoli e segnaletica orizzontale in una Turborotatoria olandese [7.1]



Figura 7.12: Cordoli all'anello in una Turborotatoria olandese [7.3]

Per quanto riguarda il disegno dell'isola centrale, la quale assume un ruolo fondamentale nello sviluppo delle corsie all'anello, non esistono tuttora delle indicazioni per la definizione degli elementi curvilinei che la compongono. Come criterio generale si può assumere che i quattro assi di traslazione convergano su di una "piazza" centrale in modo tale che durante la percorrenza dell'anello si abbia una successione di elementi circolari di corsia con raggi di ampiezza confrontabile.

Ad esempio, facendo riferimento allo schema di turborotatoria riportato in Figura 7.13, si può notare come un conducente che intende effettuare una svolta a sinistra venga direzionato al ramo d'ingresso verso una delle due corsie di sinistra. Una volta entrato nell'anello, nel primo quarto, esso si dispone sulla corsia centrale o su quella più interna, per poi continuare, subito dopo aver attraversato il primo asse, ancora su quella centrale oppure passando su quella esterna. A questo punto, dopo aver percorso il secondo quarto di rotatoria ed aver oltrepassato il secondo asse di traslazione l'utente lascia l'intersezione uscendo al ramo desiderato.

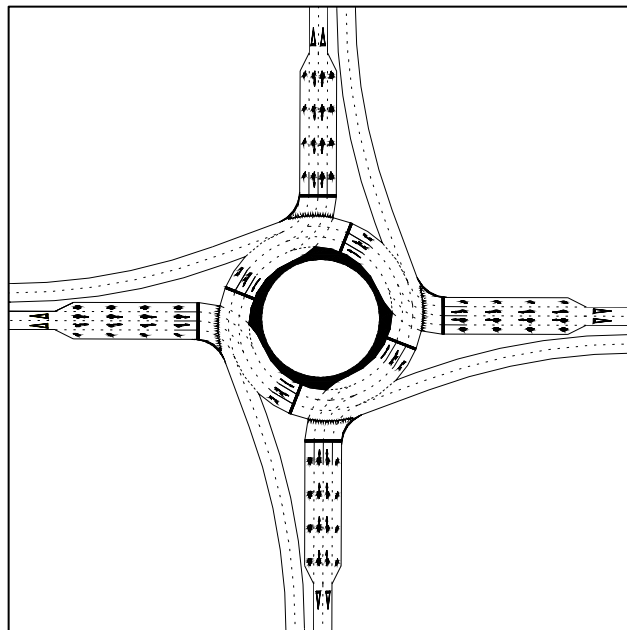


Figura 7.13: Schema di rotatoria a spirale con tre corsie all'ingresso ed all'anello [7.1]

In pratica un automobilista, ogni volta che attraversa un asse di traslazione, si troverà a dover percorrere un arco di corsia a raggio più ampio, come si può vedere in Figura 7.14.

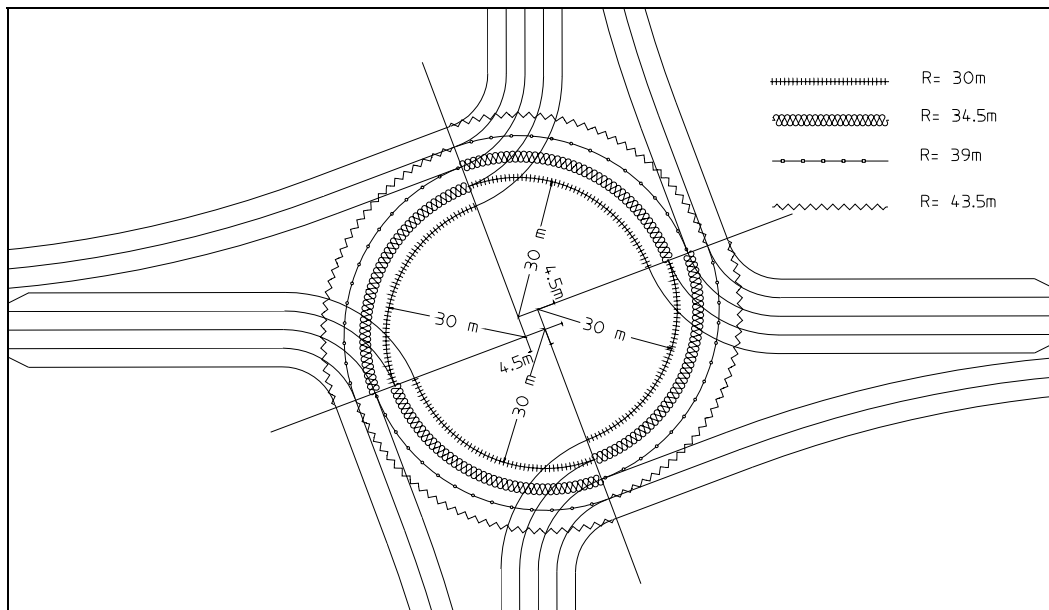


Figura 7.14: Variazione dei raggi sull'anello di una turborotatoria [7.1]

Per quanto riguarda le caratteristiche prestazionali c'è da dire che questo tipo di rotatoria, a parità di ingombro planimetrico e di domanda di traffico, garantisce un aumento sostanziale di capacità rispetto ad uno schema tradizionale. E ciò deriva dal fatto che l'uso forzato della corsia interna dovrebbe sortire un effetto positivo sulla capacità complessiva dell'incrocio: infatti in una rotatoria standard con due corsie all'anello, la corsia esterna risulta maggiormente utilizzata rispetto a quella interna anche per le manovre di svolta a sinistra, perché così l'utente evita di dover cambiare corsia in prossimità dell'uscita desiderata.

Nelle turborotatorie tutto questo non avviene perché la corsia interna, per via delle canalizzazioni all'ingresso, risulta essere utilizzata in maniera più razionale ed inoltre il conducente che percorre l'anello, sempre per via dei cordoli, non risulta più essere influenzato dal comportamento degli altri conducenti che lo affiancano.

In Figura 7.15 è riportato un diagramma derivante da esperienze olandesi in cui viene messa a confronto la capacità di una rotatoria a due corsie all'anello con una turborotatoria di pari dimensioni e con due corsie all'anello.

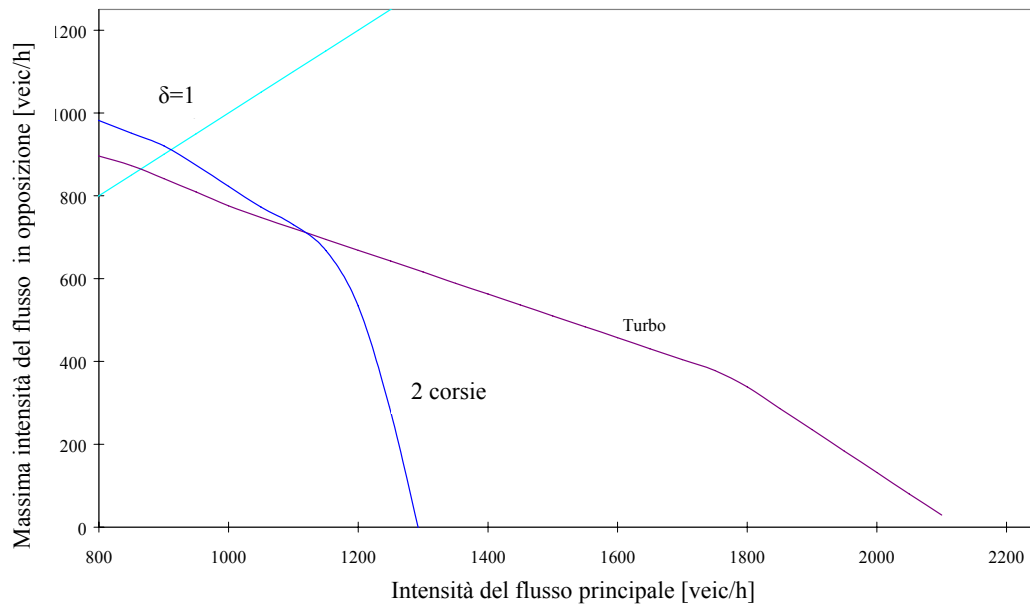


Figura 7.15: Confronto tra la capacità di una rotatoria ordinaria ed una turborotatoria [7.1]

Per quanto riguarda invece la sicurezza e quindi il numero di potenziali punti di conflitto è possibile svolgere alcune semplici considerazioni. In ogni intersezione un veicolo compie delle manovre consistenti essenzialmente in variazioni di velocità e di traiettoria, che per la presenza di altri veicoli, non possono essere compiute liberamente. Quindi, per qualunque genere di manovra, si verificano una o più interferenze fra le correnti veicolari dando così origine ai punti di conflitto. Il numero di punti di conflitto per un'intersezione dipende dal numero di rami che afferiscono al nodo, dal tipo d'incrocio e dal sistema di regolazione.

Nelle Figure 7.16, 7.17 e 7.18 vengono messi a confronto i punti di conflitto tra tre tipologie di rotatoria differenti: una ordinaria (Fig. 7.16) e due a spirale (Fig. 7.17 e 7.18). Nello schema A riportato in Figura 7.16 sono indicati tutti e 22 i punti di conflitto, mentre in quello B solo i 16 che si manifestano con maggior frequenza. Per le turborotatorie in Figura 7.17 e 7.18 invece si presentano sempre 10 punti di conflitto.

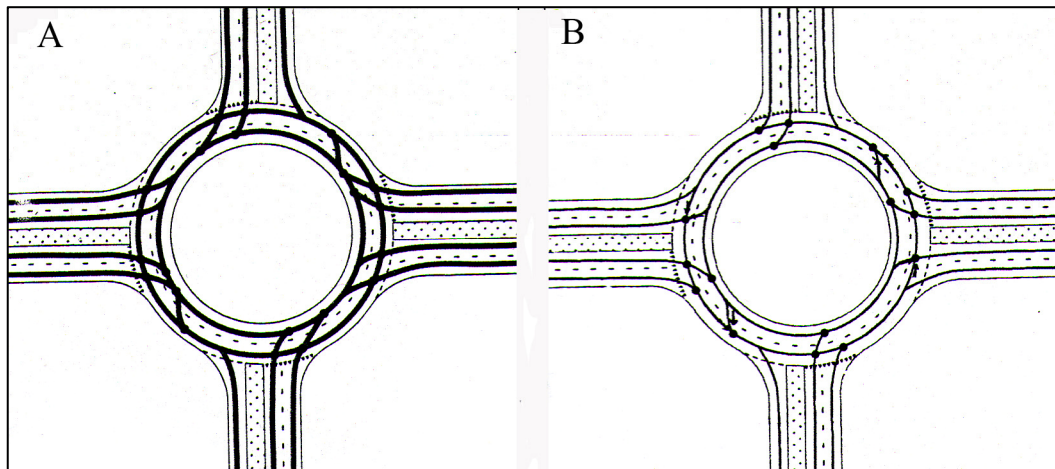


Figura 7.16: Punti di conflitto per una rotatoria ordinaria (A = tutti; B = più frequenti) [7.13]

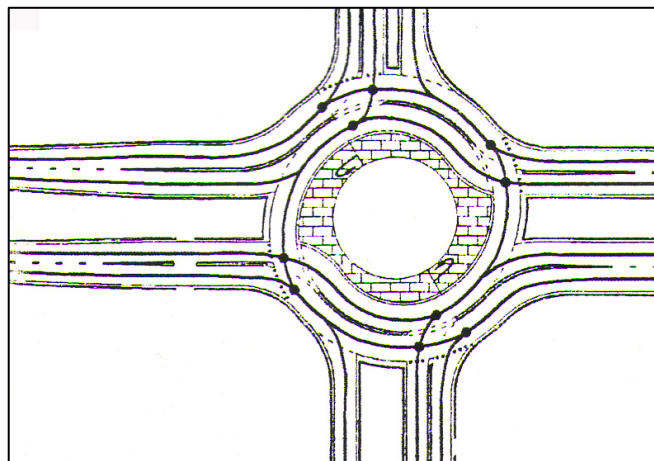


Figura 7.17: Punti di conflitto per una turborotatoria [7.13]

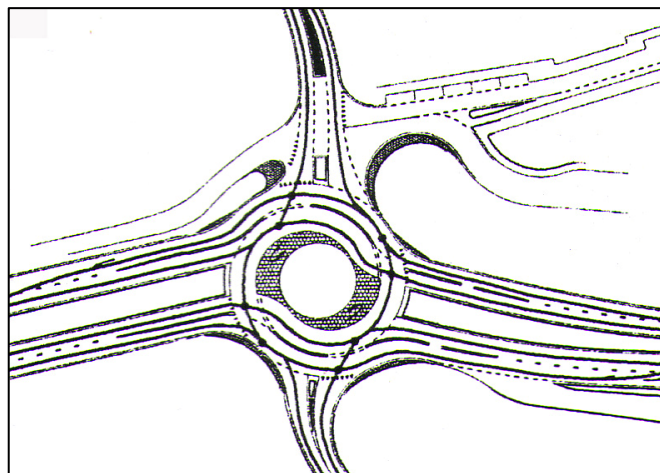


Figura 7.18: Punti di conflitto per una turborotatoria [7.13]

Confrontando quindi gli schemi si nota come una rotatoria a spirale possa ridurre i punti di conflitto rispettivamente del 55% e del 37,5% a fronte di una rotatoria ordinaria, a seconda che si considerino tutte le interferenze o solo quelle più frequenti.

Tra i più recenti studi condotti su queste particolari intersezioni, il più interessante è stato realizzato da Yperman ed Immers [7.2] i quali hanno messo a confronto la capacità di una turborotatoria e di una rotatoria classica attraverso l'utilizzo del software di microsimulazione Paramics.

In particolare sono state modellizzate:

- una turborotatoria con due corsie all'anello, dove i conducenti non possono scegliere la corsia preferita, bensì sono costretti ad incanalarsi su quella imposta dalla rotatoria stessa;
- una rotatoria classica con tre corsie sulla corona giratoria.

Naturalmente sono stati utilizzati, per la definizione dei due schemi, gli stessi elementi di costruzione, le stesse regole di precedenza, la stessa tipologia di veicoli, le stesse matrici O/D (bilanciate), le stesse caratteristiche degli utenti e gli stessi parametri di simulazione.

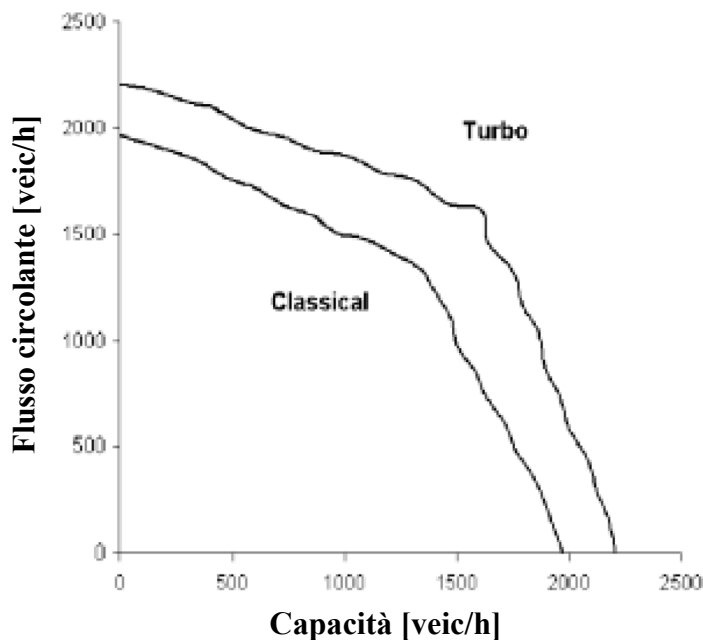


Figura 7.19: Confronto fra la capacità di una turborotatoria e di una rotatoria classica attraverso la microsimulazione [7.2]

Il diagramma di Figura 7.19 mostra come la capacità complessiva di una turborotatoria a due corsie sia rispettivamente più grande del 12% di quella della rotatoria classica a tre corsie quando il flusso circolante tende a zero e del 20% quando invece il traffico circolante e quello entrante sono uguali.

Come già espresso in precedenza, l'utilizzo forzato della corsia interna della corona giratoria genera un effetto positivo sulla capacità complessiva della rotatoria. Viceversa, in una rotatoria classica, la corsia più esterna dell'anello è più attrattiva di quella interna, in quanto consente agli utenti di non effettuare manovre di scambio quando devono lasciare la rotatoria.

Quindi in una turborotatoria non avvengono manovre di scambio e le corsie interne vengono utilizzate in maniera più efficiente.

Il grafico di Figura 7.19 mette anche in evidenza come la capacità complessiva, sia della rotatoria classica che della turborotatoria, aumenti quando i flussi d'ingresso sui quattro approcci sono prossimi l'un l'altro. In particolare, per una rotatoria classica, quando il traffico è equamente distribuito sui quattro approcci, la capacità complessiva è più grande del 35% rispetto ad una distribuzione in cui il flusso in opposizione tende a zero. Per una turborotatoria, questa percentuale raggiunge il 45%.

7.4. Bibliografia specifica del Capitolo 7.

- [7.1] Fortuijn L.G.H., Carton P.J. (2006) – Turbo circuits: a well-tried concept in a new guise - Board of Economy and Transport, Province of South Holland (Olanda).
- [7.2] Yperman I., Immers B. (2007) - Capacity of a turbo-roundabout determined by micro-simulation - Department of Civil Engineering, Transportation Planning and Highway Engineering, Leuven (Belgio).
- [7.3] Fortuijn L.G.H. (2007) - Pedestrian and Bicycle-Friendly Roundabouts; Dilemma of Comfort and Safety - Province of South-Holland and Delft University of Technology (Olanda).
- [7.4] Yperman I., Immers B. (2004) - Analyse en reconceptie van de verkeerssituatie op de cruising van de leuvense ring met de kapucijnenvoer en de koning boudewijnlaan – (Olanda).
- [7.5] Akçelik R. (2006) - Operating cost, fuel consumption and pollutant emission savings at a roundabout with metering signals – Atti del Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2006), Istanbul (Turchia).
- [7.6] Akçelik R. (2005) - Capacity and Performance Analysis of Roundabout Metering Signals – Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [7.7] Natalizio E. (2005) - Roundabouts with Metering Signals – Atti del Institute of Transportation Engineers 2005 Annual Meeting, Melbourne (Australia).
- [7.8] Stevens C. R. (2005) - Signals and Meters at Roundabouts – Atti del 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa (USA).
- [7.9] AA. VV. (2005) - Signalised Roundabouts and Gyrotories - Scrutiny Forum for Transport & Sustainable Development (Inghilterra).
- [7.10] Akçelik R. (2004) - Roundabouts with Unbalanced Flow Patterns – Atti del Institute of Transportation Engineers 2004 Annual Meeting, Lake Buena Vista, Florida (USA).

- [7.11] Akçelik R. (2006) - Analysis of Roundabout Metering Signals – Atti del 25th AITPM 2006 National Conference, Melbourne (Australia).
- [7.12] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Ispettorato Generale per la circolazione e la sicurezza stradale (2001) - Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali - *Rapporto di Sintesi a Carattere Prenormativo*.
- [7.13] Mauro R., Andrighettoni C. (2007) – Un nuovo tipo di incrocio a rotatoria – pp. 76-80, *Le Strade* 1-2/2007.
- [7.14] Hallworth M. S. (1992) - Signalling roundabouts - 1. Circular arguments, pp 354-363 *Traffic Engineering + Control*.

CONCLUSIONI

Il vuoto normativo lasciato dal Decreto Ministeriale del 19/04/2006 (*Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali*) in merito alla determinazione delle *performance* offerte da una intersezione con soluzione a rotatoria è risultato essere l'*incipit* per effettuare uno studio, di respiro internazionale, di catalogazione e successiva applicazione a due casi di studio dei principali metodi analitici di calcolo delle capacità e dei tempi medi di attesa con il fine di individuare gli intervalli di significatività degli stessi.

Alla luce di quanto mostrato è possibile affermare che tra i metodi statistici applicati, il SETRA ed il TRRL, pur se entrambi caratterizzati, nei rispettivi algoritmi, dalla presenza di puntuali parametri geometrici che definiscono gli elementi costituenti l'intersezione, soltanto il primo è risultato quantificare e qualificare sufficientemente gli aspetti prestazionali delle rotatorie (capacità, tempi medi d'attesa ai nodi e lunghezza delle code) in relazione a ciò che il responso sperimentale aveva fatto riscontrare. Il metodo TRRL, di contro, ha portato ad una sovrastima delle capacità ai nodi mediamente superiore al 70% rispetto ai dati rilevati in sito. Tale forte dispersione, con buona probabilità, può farsi risalire alla diversa filosofia progettuale inglese, che, attraverso la realizzazione di isole centrali piccole, minore deflessione ed ingressi con svasature, permette ai conducenti di affrontare la rotatoria a velocità più elevate con un netto aumento della capacità ed un conseguente abbattimento del livello di sicurezza. Tra i metodi semiprobabilistici, l'HCM 2000 e l'HBS 2001, pur presentando un'accettabile affinità con i dati sperimentali per ciò che riguarda il calcolo della capacità ai nodi, hanno fatto registrare una forte discrepanza in relazione al calcolo dei ritardi di fermata. Per quanto riguarda invece le formulazioni di Brilon, quella esponenziale e quella lineare, hanno dato dei valori di capacità assai prossimi in entrambi i casi di studio a quanto realmente misurato, a differenza della formulazione per le "*semi-two-lane roundabout*", messa a punto dallo stesso autore, la quale però

non ha fornito dei risultati accettabili (anche se Cosenza Nord dovrebbe ricadere proprio nel caso di rotatorie con una sola corsia all'anello tanto larga da permettere a due veicoli di affiancarsi). Ciò è probabilmente dovuto alla differenza di comportamento tra i conducenti tedeschi, più abituati a percorrere le rotatorie rispetto a quelli italiani. Le due formulazioni svizzere invece, quella di Bovy e la "CH1", hanno dato risultati sostanzialmente diversi. La prima si è adattata meglio al caso di Mottola in quanto deriva dalla regressione di dati ottenuti da rotatorie con diametro esterno compreso tra 25 e 35 m; mentre la seconda si è adeguata in maniera migliore al caso di Cosenza Nord, ossia a rotatorie a corsia singola con diametro esterno superiore a 35m. Per quanto concerne infine la formulazione australiana dell'AUSTROADS, essa si è dimostrata più adatta a stimare i parametri prestazionali di rotatorie geometricamente conformi, rispetto a quelle rotonde che presentano delle particolari anomalie, come poteva essere la rotatoria di Cosenza Nord.

Comunque è opportuno ribadire che, come evidenziato anche in alcuni studi internazionali di settore, accanto ad una immediata applicabilità dei metodi analitici esposti forse uno dei principali "limiti" degli stessi è rappresentato dal fatto che in tali metodologie il sistema rotatoria-flusso di traffico è di fatto considerato in condizioni di "equilibrio statico". In altri termini tali metodi, quando implementati su casi reali, "fotografano" le condizioni "istantanee" di un fenomeno che in realtà si articola nel tempo in modalità pseudo-aleatoria. Questa circostanza ha portato, nelle applicazioni esposte in questo lavoro, alla stima di valori delle lunghezze di coda e dei tempi medi d'attesa sensibilmente superiori a quelli realmente osservati, pervenendo così ad informazioni che, se usate in fase di progettazione, porterebbero ad un sovradimensionamento degli elementi geometrici dell'intersezione stessa.

In funzione di tali affermazioni uno studio sistematico dei problemi di dimensionamento funzionale di una rotatoria è stato affrontato attraverso l'utilizzo di strumenti informatici di microsimulazione, i quali consentono una migliore versatilità ed un minore dispendio di risorse (umane ed economiche) rispetto a sperimentazioni sul campo. Naturalmente la "bontà" dei dati di tali applicazioni passa necessariamente

attraverso una preliminare taratura di parametri “sensibili” del processo simulativo attraverso osservazioni sul campo.

In tal senso, sono stati implementati un totale di 432 scenari, considerando variabili geometriche (raggio esterno della circonferenza inscritta, larghezza dell’isola divisionale, larghezza della corona giratoria), variabili di velocità (tre classi distinte di velocità d’approccio ai nodi), variabili di flusso (quattro classi di portate entranti dai nodi comprese tra 350 veic/h e 650 veic/h) e variabili legate al comportamento degli utenti (intervallo critico variabile tra 3.0 s e 4.0 s).

I risultati ai quali si è pervenuti hanno consentito di effettuare una prima sistematica catalogazione, che se pur suscettibile di ulteriori sviluppi ed integrazioni, acquisisce valore di obiettivo perseguibile nella direzione di realizzare una utile guida alle scelte progettuali, in termini di “disegno” geometrico di una rotatoria, a partire proprio dalle prestazioni attese, quali: adeguata “capacità” di smaltimento dei flussi veicolari e ridotti tempi medi di attesa per l’immissione in rotatoria.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Inman V. W., Davis G. W. (2007) – Synthesis of Literature Relevant to Roundabout Signalization to Provide Pedestrian Access - Roundabout Signalization for Accessibility Synthesis.
- [2] Schroeder B. J., Roupail N. M., Hughes R. (2007) - Exploratory Analysis of Pedestrian Signalization Treatments at One and Two-Lane Roundabouts Using VISSIM Microsimulation – Atti del 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C. (USA).
- [3] Festa D. C., Guido G., Vitale A. (2006) – Verifica della trasferibilità di un modello di car-following per l’analisi del deflusso in rotatoria, in Adeguamento e Manutenzione delle strade esistenti: Atti del XVI Convegno Nazionale SIIV, Rende (CS).
- [4] Harper N. J., Dunn R. C.M. (2006) - Accident Prediction Models at Roundabouts - The University of Auckland (Nuova Zelanda).
- [5] Fouladvand M. E., Sadjadi Z., Shaebani M. R. (2006) - Characteristics of Vehicular Traffic Flow at a Roundabout – Zanjan University, Zanjan (Iran).
- [6] Johnson G. P. (2006) - Roundabout analysis at Idaho Maryland and main intersection using Vissim microsimulation model - Nevada county transportation commission (USA).
- [7] Mauro M., Corradini M. (2005) – Forme e prestazioni degli incroci a rotatoria – Atti del seminario, Palermo.
- [8] Esposito T., Mauro M., Corradini M. (2005) - Evaluation of Roundabout entries reliability - in People, Land, Environment and Transport Infrastructures: Proceedings of the Third SIIV International Conference, Bari.
- [9] Camus R., Dall’acqua M., Longo G. (2005) - Roundabout’s performance evaluation - in People, Land, Environment and Transport Infrastructures: Proceedings of the Third SIIV International Conference, Bari.

- [10] Orden H. G., Zamanillo A. V. (2005) - Road Safety in Intersections Regulated by Roundabouts - in People, Land, Environment and Transport Infrastructures: Atti del Third SIIV International Conference, Bari.
- [11] Romano R. (2005) - Modeling Drivers' Roundabout Behavior - in People, Land, Environment and Transport Infrastructures: Atti del Third SIIV International Conference, Bari.
- [12] Belluz L., Skene M. (2005) - Roundabouts: International Experiences Influencing Canada.
- [13] Daniels S., Wets G. (2005) - Traffic safety effects of roundabouts: a review with emphasis on bicyclist's safety - 18th ICTCT workshop, Belgio.
- [14] Furtado G. (2005) - Accommodating Vulnerable Road Users in Roundabout Design - McElhanney Consulting Services Ltd.
- [15] List G., Eisenman S. M. (2005) - A technique for data collection and estimation of turning movements at roundabouts – Atti del TRB 2005 Annual Meeting, Washington D. C. (USA).
- [16] Mahmassani H. S., Eisenman S. M. (2005) - A mesoscopic approach to the simulation of roundabouts – Atti del TRB 2005 Annual Meeting, Washington D. C. (USA).
- [17] Rodegerdts L. A. (2005) - State-of-the-Art in U.S. Roundabout Practice – Atti del Institute of Transportation Engineers 2005 Annual Meeting, Melbourne (Australia).
- [18] Comune di Messina (2005) - Le rotatorie stradali - Comando Polizia Municipale Sezione Organizzazione Studi Ricerche e P.R.
- [19] Geruschat D. R., Hassan S. E. (2005) - The Effects of Vehicle Speed and Pedestrian Behavior on Driver Yielding at Roundabouts – Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [20] Walsh B. (2005) - Washington State's Roundabout Program - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).

- [21] Redington T. (2005) - Roundabout topics-findings and trends from vermont and beyond - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [22] Hughes R. G., Srinivasan R. (2005) - NCHRP Project 3-78. Crossing Solutions at Roundabouts and Channelized Turn Lanes for Pedestrians with Vision Disabilities - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [23] NYSDOT (2005) - Unconventional roundabout techniques utilized in New York State - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [24] Sides K., Seals J., Wallwork M. (2005) - Impact Study: Conversion of Three Signalized Intersections and Three Stop-controlled Intersections to Modern Roundabouts on Cleveland Street in Clearwater, Florida - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [25] Kliska J., Winn K. (2005) - The 'Sock Puppet' and other Lessons Learned in Grand Junction. How to involve, inform and educate the public and elected officials when building roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [26] Walloon Ministry of Equipment and Transports (2005) - The safety of roundabouts and traffic lights in Belgium - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [27] NYSDOT (2005) - Why roundabouts? Why not signal, 2 way, or 4 way stops? - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [28] Mandavilli S., Russell E. R., Rys M. (2005) - Study of Operational Performance and Environmental Study of Operational Performance and Environmental Impacts of Impacts of Modern Roundabouts in Modern Roundabouts in Kansas - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [29] Long R., Ashmead D., Roupail N., Guth D., Hughes R., Ponchillia P., Wall R. (2005) - Street Crossing by Blind and Sighted Pedestrians at Modern

- Roundabouts: An Overview of Research - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [30] Wallwork M. (2005) - Some Common Design and Operational Issues - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [31] Ourston Roundabout Engineering (2005) - Single-lane Roundabouts. Geometric design in context - Urban versus rural - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [32] Roupail N. M., Hughes R., Chae K. (2005) - Simulation of Pedestrian-Vehicle Interactions at Roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [33] Ourston Roundabout Engineering (2005) - Safety Auditing of Roundabouts: In-service or at Design - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [34] Stratmeyer J. M., Banigan C. (2005) - Roundabouts in Harford County, Maryland. A Local Perspective - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [35] Walsh B., Van Schalkwyk I. (2005) - Conflicts and accidents at multilane roundabouts in Washington - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [36] Baranowski B. (2005) - Roundabouts and Light Rail Combined: An Innovative Intermodal Solution - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [37] Sargeant S. (2005) - Roundabouts: The Responsible Solution - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [38] Weber P., Ritchie S. (2005) - Internationally recognized roundabout signs - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [39] Akcelik R. (2005) - Roundabout model calibration issues and a case study - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [40] NYSDOT (2005) - Roundabout lessons learned the hard way in New York State - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).

- [41] Fredrickson, Hoskins, Singh (2005) - Roundabout: A Safety Improvement Countermeasure - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [42] Kennedy J. V., Peirce J., Summersgill I. (2005) - Review of Accident Research at Roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [43] Kennedy J. (2005) - Accidents at roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [44] Roupail N., Hummer J., Milazzo II J., Allen P. (2005) - Capacity analysis of pedestrian and bicycle facilities: recommended procedures for the "pedestrians" chapter of the Highway Capacity Manual - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [45] Road Network Infrastructure and Pavements Branch (2005) - Concrete Roundabout Pavements. A Guide to their Design and Construction - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [46] Granà A., Giuffrè T. (2005) - Performance analysis of roundabouts in strongly constrained environment. Case studies in urban areas - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [47] Baranowski B. (2005) - Pedestrian Crosswalk Signals at Roundabouts: Where are they Applicable? - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [48] King S. (2005) - New Roundabout Guidance at Kansas DOT - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [49] Inman V. W., Katz B. J. (2005) – Navigation Signing for Roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [50] Moule M. M. (2005) - Pedestrians and Bicyclists at Roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [51] Ritchie S. (2005) - Introduction to multi-lane roundabout design - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).

- [52] Hicks T. (2005) - Maryland State Highway Administration - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [53] Akcelik R., Besley M. (2005) - Introduction to aaSIDRA for roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [54] Persaud B., Harkey D., Troutbeck R. (2005) - INCHRP 3-65: Applying Roundabouts in the United States - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [55] Jamieson R. (2005) - In Transition: Roundabouts In Greater Vancouver, British Columbia - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [56] Moe R., Matsen M. (2005) - Implications and Placement of a modern Roundabout - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [57] Hudson S., Routh R. (2005) - How We Fixed a Roundabout to Match Driver Expectations - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [58] Kuntemeyer M., Evans D. (2005) - Using Design Visualizations to Address Safety Issues - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [59] Ritchie S. (2005) - High Speed Approaches At Roundabouts Roundabout - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [60] Alonzo E. (2005) - From the Circle to the Roundabout - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [61] Guichet B. (2005) - Evolution of Roundabouts in France and new uses - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [62] Inman V. W., Davis G. W., Sauerburger D. (2005) - Roundabout Access for Visually Impaired Pedestrians: Evaluation of a Vehicle Alerting System for Double-Lane Roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).

- [63] Kennedy D. R., Taylor K. M. (2005) - Estimating Roundabout Performance using Delay and Conflict Opportunity Crash Prediction - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [64] Waddell E., Albertson J. (2005) - The Dimondale Mini: America's First Mini-Roundabout - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [65] Mowr R. (2005) - Development of Caltrans Guidance and Policy on Roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [66] Lord D., Van Schalkwyk I., Staplin L., Chrysler S. (2005) - Reducing Older Driver Injuries at Intersections Using More Accommodating Roundabout Design Practices - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [67] Waalkes S. (2005) - Design and Construction of Concrete Roundabouts - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [68] Kyte M., Dixon M., List G., Flannery A., Rodegerdts L. (2005) - NCRHP 3-65: Data collection and extraction - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [69] Weinberger S. (2005) - Case Study: Blue Lake Roundabout (Humboldt County, California) - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [70] Moule M. M. (2005) - Bicyclists at Roundabouts: State of the Practice - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [71] Ariniello A. J. (2005) - Are Roundabouts Good for Business? - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [72] Rodegerdts L. A., Blackwelder G. E. (2005) - Analytical Analysis of Pedestrian Effects on Roundabout Exit Capacity - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).

- [73] Lutkevich P., Hasson P. (2005) - An Examination of Current Practices in Roundabout Lighting - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [74] Sarchet R. G. (2005) - A Study of the Safety Effects of Signalizing Intersections on Colorado State Highways - Atti del TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA).
- [75] Ritchie S. (2005) - High speed approaches at roundabouts - East West Partners California Department of Transportation Transportation Research Board, California (USA).
- [76] Turner S., Durdin P., Roozenburg A. (2005) - Prediction Models for Cycle Accidents.
- [77] Department of Transportation (2004) - Facilities Development Manual: Chapter 11 - State of Wisconsin.
- [78] Campbell D., Jurisich I., Dunn R., (2004) - Improved Multi-lane Roundabout Designs for Cyclists – GHD Ltd, Auckland (Nuova Zelanda).
- [79] Eisenman S., List G. (2004) - Technique for data collection and estimation of turning movements at roundabouts – Atti del 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C. (USA).
- [80] Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc (2004) - SR-35 Columbia River Crossing Project - Southwest Washington Regional Transportation Council, Vancouver (Canada).
- [81] Robertson D., Delsey M., Oketch T. (2004) - Evaluation of performance of modern roundabouts using paramics micro-simulation model – Atti del Innovative Intersection and Interchange Designs, TAC 2004 Annual Conference, Quebec City (Canada).
- [82] Russell E. R., Mandavilli S. (2004) - Can Modern Roundabouts Safely Accommodate All Users?.
- [83] Akcelik R., Besley M. (2004) - Differences between the AUSTROADS Roundabout Guide and aaSIDRA Roundabout Analysis Methods – Atti del

- 26th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2004), Clayton, Melbourne (Australia).
- [84] Akcelik R. (2004) - Roundabouts: Comments on the aaSIDRA model and the TRL (UK) linear regression model.
- [85] Clayton C., Kua C., Stephenson B. (2004) - Roundabouts in Edmonton. A Comparison to the State-of-the-Art – Proceedings of the 2004 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Quebec City, Quebec (Canada).
- [86] Akcelik R. (2004) - Estimating negotiation radius, distance and speed for vehicles using roundabouts - 24th Conference of Australian Institutes of Transport Research.
- [87] Akcelik R. (2004) - New Features of aaSIDRA2.1 - Akcelik & Associates Pty Ltd.
- [88] Romano R. (2004) - Driver Behaviour At The Roundabouts: Analysis And Simulation - Atti del XIV Convegno Nazionale SIIV, Firenze.
- [89] U.S. Department of Transportation (2004) - Roundabouts. A proven safety solution that reduces the number and severity of intersection crashes.
- [90] Pinna F., Pinna S. (2003) – Rotatorie: Esperienze a confronto - in Strade, Ferrovie, Aeroporti: Atti del XIII Convegno Nazionale SIIV, Padova.
- [91] Canale S., Leonardi S., Pappalardo G. (2003) - Performance indices for the characterization of the safety level for the roundabouts.
- [92] Canale S., Leonardi S., Pappalardo G. (2003) - Nuovi criteri di progetto e di verifica per le rotatorie stradali extraurbane.
- [93] Manage S., Nakamura H., Suzuki K. (2003) - Performance analysis of roundabouts as an alternative for intersection control in Japan - Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, ottobre 2003.
- [94] Lenters M. (2003) - Roundabout planning and design for efficiency & safety case study: wilson street, meadowbrook drive, hamilton drive city of Hamilton – Atti del 2003 Annual Conference of the Transportation Association Of Canada, St. John's, Newfoundland & Labrador (Canada).

- [95] TEDS (2003) - Arterial and collector geometric design, including roundabouts - Capitolo 6.
- [96] Esposito T., Mauro R. (2003) – Fondamenti di infrastrutture viarie, Volume 1: La geometria stradale - *Hevelius Edizioni*.
- [97] Rozental J., Eng P. (2003) - Planning and Design of Modern Roundabouts - Technical Bulletin of the Ministry of Transportation of British Columbia.
- [98] Elvik R. (2003) - Effects on road safety of converting intersections to roundabouts: A review of evidence from non-US studies - TRB 2003 Annual Meeting.
- [99] Shiftan Y., Polus A., Shmueli-Lazar S. (2003) - Evaluation of the waiting-time effect on critical gaps at roundabouts by a logit model - TRB 2003 Annual Meeting.
- [100] Russell E. R., Mandavilli S., Rys M. J. (2003) - Operational Efficiency of Roundabouts – Atti del 2nd Urban Street Symposium, Anaheim, California (USA).
- [101] Sargeant S., Christie J. (2002) - Evaluation of a series of roundabouts implemented on south golden road – Proceedings of Institute of Transportation Engineers Annual Meeting, California (USA).
- [102] Provincia di Vercelli (2002) – Piano provinciale della sicurezza stradale.
- [103] Mauro R., Corradini M. (2002) - Una analisi comparativa tra la procedura HCM 2000 ed un criterio semplificato per la valutazione dei livelli di servizio alle intersezioni a raso – Atti del XII Convegno Nazionale SIIV, Parma.
- [104] Mauro R., Cattani M. (2002) - Un modello per la stima della incidentalità potenziale agli incroci a rotatoria – Atti del XII Convegno Nazionale SIIV, Parma.
- [105] Hagrang O., Roupail N. M., Sørensen H. A. (2002) - Comparison of capacity models for two-lane roundabouts – Atti del 82° annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC (USA).

- [106] Najafi F. T., Jivacate I. (2002) - The current status of roundabouts – Atti del 4th Transportation Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal (Canada).
- [107] Van Staden D. (2002) - Implementation of Rural Roundabouts in New Zealand - Technical Paper 2002 NZ Roading Symposium.
- [108] Retting R. A., Luttrell G., Russell E. R. (2002) - Public Opinion and Traffic Flow Impacts of Newly Installed Modern Roundabouts in the United States - *Ite Journal*.
- [109] NYSDOT (2002) - Rodel 1 interactive roundabout design.
- [110] Stone J. R., Chae K., Pillalamarri S. (2002) - The Effects of Roundabouts on Pedestrian Safety - The Southeastern Transportation Center, Knoxville, Tennessee (USA).
- [111] O'Brien A., Akçelik R., Williamson D., Pantas T. (2002) - Three-laning a two-lane roundabout: the outcomes - Institution of Transportation Engineers.
- [112] Russell A. E.R., Luttrell G. B., Rys M. C. (2002) - Roundabout studies in Kansas - 4th Transportation Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering.
- [113] Rodegerdts L. A., Robinson B. W. (2002) - Capacity and Performance of Roundabouts: A Summary of Recommendations in the FHWA Roundabout Guide - Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity.
- [114] Committee on Geometric Design (2002) - Geometric Design: Past, Present, and Future - Transportation Research Board.
- [115] Akcelik R., Akcelik & Associates Pty Ltd (2002) – Estimating negotiation radius, distance and speed for vehicles using roundabouts - in 24th Conference of Australian Institutes of Transport Research, CAITR 2002, Sydney (Australia).
- [116] G. W. Davis, Inman V. W., Shafer T., Katz B. J. (2001) - A simulation study of path and speed through double-lane roundabouts – Atti del Second

- International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design.
- [117] Sides K. (2001) - Assessing the Clearwater beach entryway roundabout.
- [118] Wu N. (2001) - A universal procedure for capacity determination at unsignalized (priority-controlled) intersections - Transportation Research part B 35 (2001), Issue 3.
- [119] AA. VV. (2001) - Roundabouts: interim requirements and guidance.
- [120] Akcelik R. (2001) – Roundabout capacity and performance – Atti del International Conference on Modern Roundabouts, Loveland, Colorado (USA).
- [121] Seiberlich E. L. (2001) - A formulation to evaluate capacity and delay of multilane roundabouts in the united states for implementation into a travel forecasting model - The University of Wisconsin-Milwaukee.
- [122] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Ispettorato Generale per la circolazione e la sicurezza stradale (2001) - Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade, *Decreto Legislativo 05/11/2001*.
- [123] Insurance Institute for Highway Safety (2001) - Roundabouts: Status Report.
- [124] Brewer J., Otto S., German J., Ruff W., Krammes R., Sillan S., Movassaghi Stamatiadis N. K., Okamoto J., Walters R. (2001) - Geometric design practices for european roads - *Transportation Research Board*.
- [125] Sisiopiku V. P., Heung-Un Oh (2001) - Evaluation of roundabout performance using Sidra - Journal of transportation engineering.
- [126] FHWA (2001) - Kansas Roundabout Guide – Supplemento alla “Roundabouts: An Informational Guide” del FHWA.
- [127] Tan J. (2001) - Comparison of capacity between roundabout design and signalised junction design - 1° Swiss Transport Research Conference.
- [128] Züger P., Porchet A., Burch D. (2001) - Roundabouts: Fuel Consumption, Emissions of pollutants, Crossing times - 1° Swiss Transport Research.

- [129] Räsänen M., Summala H. (2000) - Car Drivers' Adjustments to Cyclists at Roundabouts - *Transportation Human Factors*, 2(1), 1–17, Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- [130] Sabra Z., Wallace C. E., Lin F. (2000) - *Traffic Analysis Software Tools* - Transportation Research Board.
- [131] Bernhard W., Portmann P. (2000) – Traffic simulation of roundabouts in Switzerland – *Atti del 2000 Winter Simulation Conference*.
- [132] U.S. Department of Transportation (2000) - Roundabouts: interim requirements and guidance - Federal Highway Administration.
- [133] Insurance Institute for Highway Safety (2000) - Roundabouts: Status Report.
- [134] Persaud B. N., Retting R. A., Garder P. E., Lord D. (2000) - Crash Reductions Following Installation of Roundabouts in the United States - Insurance Institute for Highway Safety.
- [135] Canale S., Leonardi S., Pappalardo G. (2000) - Mini-rotatorie urbane: ingressi a rischio.
- [136] Russell E. R., Rys M., Sathyanarayanan S. (2000) - Further Studies of Roundabouts: Hutchinson, Kansas Study - Mack-Blackwell National Rural Transportation Study Center, Kansas City (USA).
- [137] Krogscheepers J. C., Roebuck C. S. (2000) - Unbalanced Traffic Volumes at Roundabouts - *Transportation Research Circular E-C018*, 4th International Symposium on Highway Capacity, Hawaii (USA).
- [138] Russell E. R., Rys M., Luttrell G. (2000) - Modeling traffic flows and conflicts at roundabouts - Mack-Blackwell Rural Transportation Center, University of Arkansas.
- [139] Bosia C. (2000) - Le rotatorie extraurbane. Studio per la determinazione del raggio minimo e della capacità di assorbimento di una rotatoria.
- [140] Luttrell G., Russell E. R., Rys M. (2000) - A Comparison of a Roundabout to Two-way Stop Controlled Intersections with Low and High Traffic Volumes - Kansas State University.

- [141] Roebuck C. S., Krogscheepers J. C. (1999) - Unbalanced Traffic Volumes at Roundabouts - Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity.
- [142] Ewing R. (1999) – Traffic calming state of the practice - Seminar on Traffic Calming, Institute of Transportation Engineers (ITE).
- [143] K. Sides, (1999) - Assessing the clearwater beach entryway roundabout - Public Works Administration City of Clearwater.
- [144] AA. VV. (1998) – Synthesis of Highway Practice 264: Modern roundabout practice in the United States – Transportation Research Board, Washington D.C. (USA).
- [145] Waddell E., (1998) - Evolution of Roundabout Technology: A History-Based Literature Review - Michigan Department of Transportation.
- [146] Ernish E., Harrison P., Yuwan J. (1998) - Traffic calming in your neighborhood - Transportation Alternatives, New York (USA).
- [147] Jacquemart G. (1998) - Modern Roundabout Practice in the United States - Transportation Research Board.
- [148] Waddell E. (1998) - Evolution of Roundabout Technology: A History-Based Literature Review - Michigan Department of Transportation.
- [149] Krogscheepers J.C., Roebuck C.S. (1998) - Unbalanced Traffic Volumes at Roundabouts - Transportation Research Board..
- [150] AA. VV. (1998) – Roundabout design for capacity and safety. The UK empirical methodology.
- [151] Ferrari P., Giannini F. (1998) - Geometria e progetto di strade, volume 1 - *ISEDI 1998*.
- [152] Mimee H. (1997) - L'aménagement de carrefours giratoires sur les routes du Québec - Département d'aménagement : Faculté D'aménagement, D'architecture Et Des Arts Visuels Université Laval.
- [153] Akçelik R. (1997) - Lane-by-lane modelling of unequal lane use and flares at roundabouts and signalised intersections: the SIDRA solution - "*Traffic Engineering Control*", 38 (7/8), pp. 388-399.

- [154] Barclay W. J., Hutt L. (1997) - Point-to-point microscopic simulation: a discussion of issues - *Hutt City Council*.
- [155] CETUR (1997) - Guide. Le minigiratoires, textes et recommandations - Lione (Francia).
- [156] Bergh T. (1997) – Roundabouts: current swedish practice and research - Atti del Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals, Portland, Oregon (USA).
- [157] Wu N. (1997) - Capacity of Shared-Short Lanes at Unsignalised Intersections – Atti del Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals, Portland, Oregon (USA).
- [158] Brilon W., Wu N., Lemke K. (1996) - Capacity at Unsignalized Two-Stage Priority Intersections - Transportation Research Record 1555 TRB, National Research Board, Washington, D.C. (USA).
- [159] TRL (1996) - Cyclists at roundabouts: continental design geometry - Driver Information and Traffic Management Division, Londra (Regno Unito).
- [160] Florida Department of Transportation (1996) - Florida Roundabout Guide.
- [161] State of Maryland Department Of Transportation State Highway Administration (1995) - Roundabout Design Guidelines – Maryland (USA).
- [162] Ourston L., Bared J. (1995) - Roundabout Safety Comes to America - Public Roads, Autunno 1995, Vol. 59, No. 2.
- [163] Federal Highway Administration (1994) - Traffic Calming, Auto-Restricted Zones and Other Traffic Management Techniques: Their Effects on Bicycling and Pedestrians - National Bicycling and Walking Study FHWA Case Study No. 19, Washington (USA).
- [164] Wu N. (1994) - An approximation for the distribution of queue lengths at unsignalized intersections – Atti del Second International Symposium on Highway Capacity. Sydney (Australia).
- [165] The Highways Agency; The Scottish Office Development Department; The Welsh Office Y SWYDDFA GYMREIG; The Department of Environment for

- Northern Ireland (1993) - Geometric Design of Roundabouts - Overseeing Departements.
- [166] Huddart K.W. (1993) - Signalling of Hyde Park Corner, Elephant and Castle and other roundabouts - PTRC 11th Summer Annual Meeting.
- [167] CETUR, SETRA (1993) - Giratoires 1992 - Atti del Seminario, Lione (Francia).
- [168] FHWA (1992) – Traffic Flow Theory. A state of the art report – Transportation Research Board, Washington (USA).
- [169] CETUR (1988) - Conception des carrefours à sens giratoire implantés en milieu urbain - Lione (Francia).
- [170] Huddart, K. W. (1983) - Signalling of Hyde Park Corner, Elephant and Castle and other roundabouts –PTRC 11th Summer Annual Meeting, Atti del Seminario K (Traffic Operation and Management), pp 193-208.