

ABACO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE ROTATORIE IN AMBITO URBANO

CALCOLO DEL LIVELLO DI SERVIZIO ATTRAVERSO L'IMPIEGO DI UN MODELLO DI MICROSIMULAZIONE DINAMICO



Luglio 2013

Progetti, Pianificazione e Innovazione della Mobilità

Resp. Ing. Alessandro Fuschiotto

ROMA



mobilità

U.O. Pianificazione dei Trasporti

Resp. Ing. Stefano Brinchi

Gruppo di lavoro :

Ing. Chiara Cianella
Ing. Marco Cianfano
Geom. Lorenzo D'Amore
Arch. Giuseppina Giaccio
Ing. Manuela Lomonaco

P.I. Aniello Picardi
Ing. Carlo Riccucci
Ing. Giacomo Tuffanelli
Ing. Renata Verghini
Dott.ssa Valentina Zelada



ROMA CAPITALE

ABACO

PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE ROTATORIE IN AMBITO URBANO

**Calcolo del Livello di Servizio
attraverso l'impiego di un modello
di microsimulazione dinamico.**

Supporto Tecnico:



TPS srl

INDICE

1. PREMESSA	4
2. VANTAGGI E SVANTAGGI DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIE.....	6
2.1. Pregi delle intersezioni a rotatoria	6
2.1.1. Sicurezza.....	6
2.1.2. Capacità.....	7
2.1.3. Livelli di Servizio.....	8
2.2. Limitazioni al ricorso delle intersezioni a rotatoria.....	9
3. CENNI SUI METODI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIA	11
3.1. Modelli empirici	12
3.2. Modelli razionali	12
4. ITER METODOLOGICO PER LA COSTRUZIONE E VERIFICA DELL'ABACO .	13
4.1. Microsimulazioni dello stato attuale.....	13
4.1.1. Intersezione di Piazza Oderico da Pordenone – Raggio Esterno pari a 18 metri	14
4.1.2. Intersezione di Piazza Azolino Hazon – Raggio Esterno pari a 36 metri	16
4.1.3. Risultati delle simulazioni relative allo stato attuale.....	20
4.2. Microsimulazione di scenari relativi a diverse configurazioni raggio esterno – volume di domanda.....	23
4.3. Definizione del livello di servizio delle rotatorie (LOS).....	26
4.4. Costruzione di una abaco per la stima preliminare del LOS a partire dal livello di domanda e dal diametro esterno.....	26
5. L'ABACO.....	28
6. VERIFICA DELL'ABACO.....	33

6.1.	Iter metodologico per la verifica dell'abaco.....	33
6.2.	Analisi dell'offerta di trasporto	34
6.2.1.	Geometria dell'intersezione	34
6.2.2.	Stima dei flussi di saturazione	34
6.2.3.	Stima delle velocità a flusso nullo.....	36
6.3.	Analisi della domanda	37
6.3.1.	Condizioni generali della domanda di traffico	37
6.4.	Modellizzazione dell'intersezione in ambiente VISSIM	39
6.5.	Risultati delle simulazioni ed indicatori numerici	41
6.5.1.	Rappresentazioni grafiche delle microsimulazioni dinamiche	41
6.5.2.	Indicatori numerici	51
6.6.	Utilizzo dell'abaco per la determinazione dei ritardi e dei livelli di servizio.....	54
6.6.1.	Risultati forniti dall'utilizzo dell'abaco in forma grafica	54
6.6.2.	Risultati forniti dall'utilizzo dell'abaco in forma tabellare	56
6.7.	Verifica dell'abaco	57

1. PREMESSA

Obiettivo del presente studio è quello di pervenire alla redazione di un abaco per la stima preliminare del livello di servizio di una intersezione a rotatoria una volta noti il livello di domanda globale ed il raggio esterno della corona rotatoria.

Tale stima preliminare ha lo scopo di determinare i campi di utilizzabilità delle intersezioni a rotatoria in funzione dello spazio disponibile per l'inserimento urbanistico dell'opera, ed il livello di domanda globale afferente il nodo.

La rotatoria costituisce una delle soluzioni progettuali maggiormente adottate negli ultimi anni per affrontare e risolvere i problemi legati agli schemi ed alla funzionalità delle intersezioni stradali critiche, fornendo riscontri positivi in termini di incremento di sicurezza, possibile incremento di capacità, percezione da parte degli utenti di un discreto livello di servizio (in relazione ai ritardi sperimentati).

A fronte di tali riscontri positivi esistono anche dei casi in cui il ricorso alla rotatoria quale soluzione progettuale di una intersezione risulta sconsigliato.

Nell'applicazione in campo urbano, elemento discriminante è rappresentato dalla componente pedonale che qualora risultasse in misura rilevante potrebbe costituire l'elemento dirimente.

Nel complesso quadro di vantaggi e svantaggi si collocano le scelte progettuali inerenti l'adozione o meno dello schema a rotatoria, ed in caso affermativo le scelte progettuali inerenti il corretto dimensionamento di tutti gli elementi e delle caratteristiche geometriche degli stessi.

L'utilizzo delle rotatorie non dovrebbe essere considerato come una soluzione sempre valida, ma dovrebbe essere una delle diverse alternative da considerare, e bisognerebbe comunque valutarne attentamente la fattibilità all'interno del contesto in cui si opera.

Nel progetto di una rotatoria è fondamentale valutarne le prestazioni ed una questione fondamentale sulla quale focalizzare l'attenzione riguarda il calcolo della capacità.

Va infatti scongiurata l'eventualità di realizzare una rotatoria sottodimensionata dal punto di vista della capacità, il che produrrebbe livelli di servizio inaccettabili per l'utenza, e allo stesso modo è opportuno evitare di realizzare rotatorie sovradimensionate per non generare problemi in fase di progettazione, costi di realizzazione più elevati, problemi di inserimento urbanistico ed elevati impatti (il tutto in assenza di benefici apprezzabili per l'utenza).

Qualsiasi modello per il calcolo della capacità venga utilizzato, per fornire risultati affidabili andrebbe "calibrato" e adattato alle peculiarità territoriali, ambientali, comportamentali proprie delle zone di applicazione.

Inoltre, pur pervenendo tramite un modello analitico, ad una stima accurata della capacità e di conseguenza del grado di saturazione degli accessi, non sono presenti nella letteratura tecnica indicazioni e definizioni univoche, determinate e consolidate in merito al calcolo dei ritardi e alla determinazione dei livelli di servizio per le intersezioni a rotatoria.

Pertanto, tenendo conto del quadro di incertezze tecniche e delle forti peculiarità territoriali, ambientali e comportamentali proprie del territorio di Roma Capitale, nell'ambito del presente lavoro le valutazioni quantitative sulla funzionalità delle rotatorie sono state effettuate tramite l'utilizzo di modelli di microsimulazione.

Il software di simulazione microscopica dinamica utilizzato (VISSIM) permette la simulazione dei singoli movimenti veicolari che, visualizzati in tempo reale, rendono assolutamente accurato lo studio di problemi legati alla mobilità.

Nello specifico il software di microsimulazione dinamica VISSIM impiegato, permette la rappresentazione e l'analisi dei movimenti dei singoli veicoli sulla rete, evidenziando qualitativamente e quantitativamente il formarsi di fenomeni di congestione.

L'iter procedurale seguito è stato seguito il seguente:

Sono state individuate due intersezioni significative nel territorio di Roma Capitale e sono state effettuate le microsimulazioni di tre periodi d'analisi (ore di punta del mattino, del mezzogiorno e della sera) relativi a tre livelli di domanda. Tali microsimulazioni sono state finalizzate, oltre che alla stima di capacità e ritardi, alla calibrazione e validazione dei modelli.

A partire dai due modelli calibrati e validati relativi allo stato attuale, sono stati costruiti e microsimulati modelli relativi a rotatorie di diverso raggio esterno, finalizzati alla stima di capacità e ritardi in base a diversi livelli di domanda (determinati a partire dai tre periodi d'analisi).

È stato adottato un criterio per l'attribuzione del livello di servizio (LOS, da Level Of Service) per le intersezioni a rotatoria in funzione del ritardo medio per veicolo (indicatore calcolato come media pesata dei ritardi di ciascuna manovra di svolta sul volume di ciascuna manovra), ed infine è stato costruito un abaco per la stima preliminare del LOS a partire dal livello di domanda espresso in volume di veicoli equivalenti/ora, e dal raggio esterno espresso in metri.

Infine, si è proceduto ad effettuare una verifica dell'abaco redatto, applicandolo ad una rotatoria opportunamente scelta sul territorio di Roma Capitale e confrontando i ritardi ed i livelli di servizio calcolati tramite il modello di microsimulazione dell'intersezione con quelli forniti dall'abaco.

2. VANTAGGI E SVANTAGGI DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIE

2.1. Pregi delle intersezioni a rotatoria

La rotatoria costituisce una delle soluzioni progettuali maggiormente adottate negli ultimi anni per affrontare e risolvere i problemi legati agli schemi ed alla funzionalità delle intersezioni stradali.

In particolare tre aspetti fondamentali giocano un ruolo importante nella propensione all'utilizzo dello schema a rotatoria quale soluzione progettuale di intersezioni critiche rispetto ad altre tipologie di intersezioni:

- l'incremento di sicurezza per gli utenti, in particolare per quelli che utilizzano il trasporto motorizzato;
- la buona capacità ovvero l'elevato volume di domanda di traffico smaltibile nell'unità di tempo;
- un discreto livello di servizio percepito ovvero la qualità della circolazione percepita dagli utenti in relazione ai ritardi sperimentati.

Rimane da valutare caso per caso, in relazione alla collocazione territoriale ed al contesto urbano circostante, l'incidenza del traffico pedonale che potrebbe risultare discriminante rispetto alla effettiva fattibilità ed efficacia della nuova regolazione.

2.1.1. Sicurezza

L'aumento del livello di sicurezza nelle intersezioni a rotatoria è legato essenzialmente ai seguenti aspetti:

- a) Le intersezioni regolate a rotatoria presentano un minore e diverso tipo di punti di conflitto rispetto ad una intersezione a raso di tipo convenzionale. Le immagini riportate in Figura 1 mostrano il numero ed il tipo di punti di conflitto per intersezioni a quattro bracci regolate a precedenza ed a rotatoria. È immediato notare come passando da un'intersezione regolata con precedenza ad una con schema di circolazione rotatoria, il numero di punti di conflitto passa da 32 a 8, e si eliminano del tutto i punti di conflitto di attraversamento.
- b) Nelle intersezioni a rotatoria le manovre di immissione sull'anello, la percorrenza dello stesso e le manovre di uscita avvengono di norma a velocità ridotte rispetto a quanto accade nelle intersezioni ordinarie, riducendo la gravità dei sinistri.
- c) Le manovre più pericolose si riducono alle sole immissioni sull'anello. In tali manovre le velocità dei veicoli confluenti sono paragonabili e l'angolo di incidenza risulta di norma inferiore ai 90°. Pertanto a differenza di quanto accade negli altri tipi di

intersezione caratterizzati da differenze anche molto marcate delle caratteristiche cinematiche delle diverse correnti, lo schema a rotatoria contribuisce al contenimento dei danni in caso di sinistri.

- d) Lungo gli attraversamenti pedonali, posti sui bracci, i pedoni devono prestare attenzione solo alle due correnti del braccio da attraversare non preoccupandosi delle diverse manovre sugli altri rami dell'intersezione; di contro, se l'intersezione è regolata attraverso impianto semaforico, al pedone è garantita maggiore sicurezza in quanto l'abilitazione al passaggio pedonale è permessa solo quando le correnti opposte sono interdette.

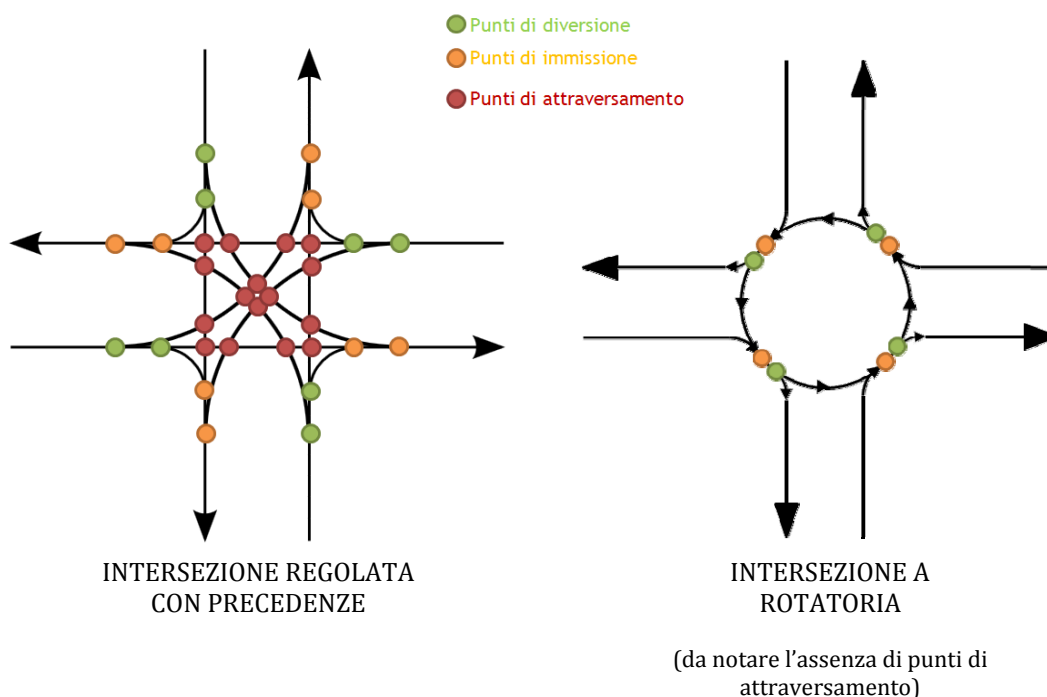


Figura 1 - Numero e tipologia di punti di conflitto in intersezioni a quattro bracci.

2.1.2. Capacità

Un ulteriore punto di forza delle intersezioni regolata con circolazione a rotatoria è rappresentato dalla buona capacità offerta (intesa come volume di traffico smaltibile nell'unità di tempo).

In generale la rotatoria garantisce una capacità maggiore rispetto alle intersezioni a raso regolate a precedenza ed in alcuni casi anche rispetto alle intersezioni semaforizzate a più di 2 fasi, avendo comunque rispetto a quest'ultime il vantaggio di fornire buone prestazioni al variare delle condizioni senza il bisogno di impianti.

Ad ogni modo nella progettazione delle rotatorie, come peraltro nella progettazione di qualsiasi tipo di intersezione, è necessario effettuare un corretto dimensionamento, che si traduce nella necessità di effettuare una stima preliminare della capacità dell'intersezione.

La capacità delle rotatorie è influenzata da diverse tipologie di fattori:

- a) **la struttura della domanda di trasporto:** valori dei flussi in ingresso e dei flussi di circolazione dell'anello, determinati dalla struttura della matrice o/d, composizione del traffico, % di mezzi pesanti, ecc.;
- b) **aspetti geometrici:** diametro esterno dell'anello, larghezza dell'anello, larghezza delle immissioni, raggi delle immissioni, angoli di incidenza tra immissioni e ed anello, distanziamento tra ingressi ed uscite di uno stesso braccio, ecc.;
- c) **aspetti comportamentali degli utenti:** velocità tenute dagli utenti in corrispondenza delle immissioni, della percorrenza dell'anello, in uscita, intervalli temporali accettati per le immissioni e tempi di sequenza, comportamenti cooperativi, ecc..

Ulteriori considerazioni sulla capacità delle rotatorie saranno effettuate nel § 3.

2.1.3. Livelli di Servizio

Il livello di servizio delle intersezioni è legato al ritardo accumulato dagli utenti rispetto ad una ideale percorrenza a rete scarica, in assenza di mutui condizionamenti tra veicoli. Il funzionamento continuo della rotatoria garantisce rispetto alle intersezioni semaforizzate dei tempi di fermata inferiori. Le code che si formano in prossimità degli approcci delle rotatorie sono in genere code dinamiche ovvero i veicoli pur rallentando notevolmente tendono a non arrestarsi del tutto adottando una cinematica molto "fluida". Ciò comporta una decisa riduzione del numero di "Stop and go" (fermate e ripartenze), oltre che una riduzione del tempo perso.

Rispetto alle altre tipologie di intersezioni si ha inoltre un annullamento della gerarchia delle strade convergenti nell'intersezione, ciò da un lato facilita le manovre di svolta dalle strade a gerarchia inferiore evitando per esse i lunghi tempi d'attesa caratteristici delle intersezioni regolate a precedenza tra assi gerarchicamente diversi caratterizzati da flussi molto squilibrati, dall'altro potrebbe incidere negativamente sul deflusso dell'arteria principale.

2.2. Limitazioni al ricorso delle intersezioni a rotatoria

A fronte di tali vantaggi esistono anche casi in cui il ricorso alla rotatoria quale soluzione progettuale di una intersezione risulta sconsigliato:

- struttura della domanda fortemente direzionata con una direzione prevalente sulla quale non si desidera abbassare il livello di servizio;
- struttura della domanda con elevate percentuali di svolte a sinistra tali da comportare un'eccessiva occupazione dell'anello della rotatoria e bassi livelli di servizio;
- struttura della domanda con elevate percentuali di mezzi pesanti tali da comportare un'eccessivo rallentamento nella percorrenza dell'anello;
- dimensione o configurazione dello spazio disponibile tale da non consentire la realizzazione di un anello che assicuri possibilità di manovra ai mezzi pesanti e/o una visuale sufficientemente libera;
- condizioni orografiche tali da non permettere la sistemazione della carreggiata anulare con delle pendenze trasversali accettabili;
- regolazione diretta del traffico: il controllo del traffico mediante impianti semaforici consente di attribuire la precedenza a determinate correnti veicolari a scapito di altre; poiché tutti i rami della rotatoria hanno la stessa importanza non è possibile incentivare o disincentivare uno specifico itinerario; la caratteristica di "non gerarchizzazione" delle rotatorie è contraria ai modi di gestione centralizzata del traffico;
- sequenza di intersezioni regolate da impianti semaforici coordinati (onda verde): l'inserimento di una rotatoria in una tale sequenza, in genere, ha effetti contrari alla strategia di realizzazione dell'onda verde;
- precedenza per le corsie riservate al mezzo pubblico: mentre è possibile predisporre corsie riservate al mezzo pubblico sino all'entrata nella rotatoria, l'immissione dei mezzi di trasporto pubblico nell'anello circolare non può usufruire di fasi riservate come invece avviene nelle intersezioni semaforizzate (a meno di non realizzare in aggiunta, sulla rotatoria un impianto semaforico attuato);
- intersezioni nelle quali i movimenti ciclo-pedonali sono numerosi e il traffico veicolare è elevato: in una situazione di questo tipo i pedoni potrebbero avere difficoltà ad attraversare la strada e potrebbe essere preferibile la realizzazione di un'intersezione semaforizzata.

Nel complesso quadro di vantaggi e svantaggi si collocano le scelte progettuali inerenti l'adozione o meno dello schema a rotatoria, ed in caso affermativo le scelte progettuali inerenti il corretto dimensionamento di tutti gli elementi e delle caratteristiche geometriche degli stessi.

3. CENNI SUI METODI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ DELLE INTERSEZIONI A ROTATORIA

L'incremento in Europa e nel mondo Occidentale in genere, del numero di rotatorie è stato accompagnato anche dallo sviluppo delle normative e delle linee guida per la corretta progettazione e costruzione. Oggi in letteratura sono presenti moltissime indicazioni che possono essere seguite dal progettista, e sono presenti normative ben sviluppate alle quali si può fare riferimento, quali ad esempio:

- in Europa, la normativa svizzera (Guide suisse des giratoires);
- la normativa australiana (Austroad);
- negli USA, la normativa dello Stato dell'Oregon (Modern roundabouts for Oregon), che riassume ed integra le normative statali di Maryland, Florida e California.

In Italia le uniche indicazioni in merito, sono contenute nel D.M. 19 aprile 2006, Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 170 del 24 luglio 2006.

Oggi le intersezioni a rotatoria sono numerose e costituiscono una soluzione progettuale molto valida. Tuttavia l'utilizzo delle rotatorie non dovrebbe essere considerato come una soluzione sempre valida, nel senso che, quando si studia un intervento di riorganizzazione del layout di intersezioni, la scelta della rotatoria come tipo di intersezione non dovrebbe essere decisa a priori, ma dovrebbe essere una delle diverse alternative da prendere in considerazione, e bisognerebbe comunque valutarne attentamente la fattibilità all'interno del contesto in cui si opera.

Nel progetto di una rotatoria, oltre a prestare attenzione agli aspetti geometrici, è fondamentale valutarne le prestazioni. Ed una questione fondamentale sulla quale focalizzare l'attenzione riguarda il calcolo della capacità.

Va infatti scongiurata l'eventualità di realizzare una rotatoria sottodimensionata dal punto di vista della capacità, il che produrrebbe livelli di servizio inaccettabili per l'utenza, e allo stesso tempo è opportuno evitare di realizzare rotatorie sovradimensionate per non generare problemi in fase di progettazione, costi di realizzazione più elevati, problemi di inserimento urbanistico ed elevati impatti (il tutto in assenza di benefici apprezzabili per l'utenza).

Per il calcolo della capacità delle singole entrate e per estensione dell'intersezione nel complesso, esistono due famiglie di modelli: i modelli empirici ed i modelli razionali.

É da tempo accertato che qualsiasi modello venga utilizzato, per avere risultati certi in termini di stima della capacità e di conseguenza di stima dei ritardi e del livello di servizio, andrebbe "calibrato" e adattato alle peculiarità territoriali, ambientali, comportamentali

proprie delle zone di applicazione. Inoltre, quasi tutti i modelli forniscono risultati accettabili quando applicati al caso di rotatorie con una corsia sull'anello ed una corsia sugli approcci.

Nel caso invece di rotatorie con entrate a due corsie la situazione i risultati forniti dalle due famiglie di modelli differiscono tra loro e dalle osservazioni (i modelli razionali forniscono risultati meno attendibili).

Questa anomalia è dovuta probabilmente alle mutue interazioni e condizionamenti che si verificano tra due conducenti affiancati sulla linea di dare precedenza in attesa di immettersi in rotatoria. In tali circostanze infatti non tutti i gap accettabili vengo effettivamente sfruttati, portando ad una riduzione della capacità a causa del mutuo disturbo.

3.1. Modelli empirici

Si tratta di modelli su base statistica ottenuti su regressioni effettuate su vastissime basi di dati, che legano la capacità a variabili di tipo geometrico (come per esempio il diametro della rotatoria). Tali modelli sono semplici da usare e forniscono in genere buoni risultati.

Appartengono a tale famiglia i seguenti modelli:

- modello britannico - Kimber et Hollis;
- modelli francesi - S.E.T.R.A., C.E.T.U.R.;
- modello svizzero - Bovy;
- modello tedesco - Brillon;
- modello israeliano.

3.2. Modelli razionali

Si tratta di modelli che hanno una forte base teorica nei quali si cerca di replicare il comportamento degli utenti, legando la capacità a variabili microscopiche di tipo comportamentale (generalmente al critical gap e al follow-up time).

Appartengono a tale famiglia i seguenti modelli:

- modello statunitense - HCM 2010;
- modello australiano - SR45;
- modello tedesco - Wu 1997.

4. ITER METODOLOGICO PER LA COSTRUZIONE E VERIFICA DELL'ABACO

Considerando le peculiarità delle caratteristiche del traffico della città di Roma, e tenendo presente le considerazioni espresse sui diversi modelli di calcolo della capacità delle rotatorie disponibili (cfr. § 3) nel presente studio le valutazioni sulla capacità e la stima dei ritardi per la definizione dei livelli di servizio delle intersezioni a rotatoria sono state effettuate adottando l'approccio della microsimulazione dinamica.

Nello specifico è stato impiegato il software di microsimulazione dinamica VISSIM che permette la rappresentazione e l'analisi dei movimenti dei singoli veicoli sulla rete, evidenziando qualitativamente e quantitativamente il formarsi di fenomeni di congestione.

Tenuto conto di quanto fin qui osservato, è stato seguito il seguente iter procedurale

- 1) microsimulazione di intersezioni reali individuate nel territorio romano: sono state individuate due intersezioni significative e sono stati simulati tre periodi d'analisi (ore di punta del mattino, del mezzodì e del pomeriggio) relativi a tre livelli di domanda; tali microsimulazioni sono state finalizzate oltre che alla stima di capacità e ritardi, alla calibrazione e validazione dei modelli;
- 2) costruzione a partire dai modelli calibrati e validati di modelli relativi a rotatorie di diverso diametro esterno, finalizzati alla stima di capacità e ritardi a diversi livelli di domanda (determinati a partire dai tre periodi d'analisi);
- 3) definizione del livello di servizio delle intersezioni (LOS);
- 4) costruzione di una abaco per la stima preliminare del LOS a partire dal livello di domanda e dal diametro esterno;
- 5) verifica dell'abaco di rotatoria opportunamente scelta sul territorio di Roma Capitale.

4.1. Microsimulazioni dello stato attuale

L'analisi di seguito riportata si basa sui dati acquisiti a seguito di una campagna di rilievo di traffico svolta presso due rotatorie, ovvero Piazza Oderico da Pordenone e Piazza Azolino Hazon.

Per ogni intersezione sono stati rilevati, tramite sistema di acquisizione video e decodifica automatica delle immagini, i flussi di traffico di un'intera giornata ferialle del mese di ottobre 2012. I flussi sono stati rilevati su ogni manovra e sono stati classificati secondo 5 classi di veicoli (autovetture, veicoli a due ruote, furgoni, mezzi pesanti e autobus). Dai rilievi sono state individuate 3 ore di punta, specifiche per ogni intersezione, quella del mattino (AM), del mezzodì (MD) e del pomeriggio (PM). Grazie alla tipologia di rilievo è stato inoltre possibile ricostruire le matrici OD di domanda delle intersezioni.

Sono inoltre stati rilevati per ciascun approccio e per ciascun periodo d'analisi i flussi pedonali di attraversamenti dei bracci in corrispondenza delle immissioni in rotatoria, e dove presenti in attraversamento dell'anello. Tali flussi sono risultati in genere inferiori ai 100 pedoni/ora.

Le stesse intersezioni sono state simulate con il software di microsimulazione PTV-VISSIM avendone ricostruita l'offerta, con l'implementazione del grafo di rete, degli elementi di controllo della circolazione, e domanda corrispondente a quella rilevata. Per la calibrazione dei modelli di microsimulazione si è operato sfruttando le immagini video raccolte in sede di rilievo dei flussi di traffico.

4.1.1. Intersezione di Piazza Oderico da Pordenone – Raggio Esterno pari a 18 metri

Dall'analisi dei rilievi video sono emerse diverse peculiarità del funzionamento dell'intersezione in merito al comportamento di guida degli utenti in corrispondenza degli ingressi ed in percorrenza dell'anello della rotatoria. In particolare è stato riscontrato che in corrispondenza dell'approccio di via G. Genocchi e talvolta dell'approccio di via R.G. Raimondi, si verificano ingressi sull'anello di due veicoli affiancati. Lungo l'anello la sosta è sporadica e la circolazione si presenta estremamente fluida con velocità basse, densità elevata ed accettazione di intervalli critici bassi in virtù della cooperazione dei veicoli con diritto di precedenza.

Si riportano di seguito (vedi Figura 2 e Figura 3) delle immagini catturate dai rilievi video confrontate con una serie di immagini catturate dalle simulazioni dinamiche effettuate con i modelli calibrati.

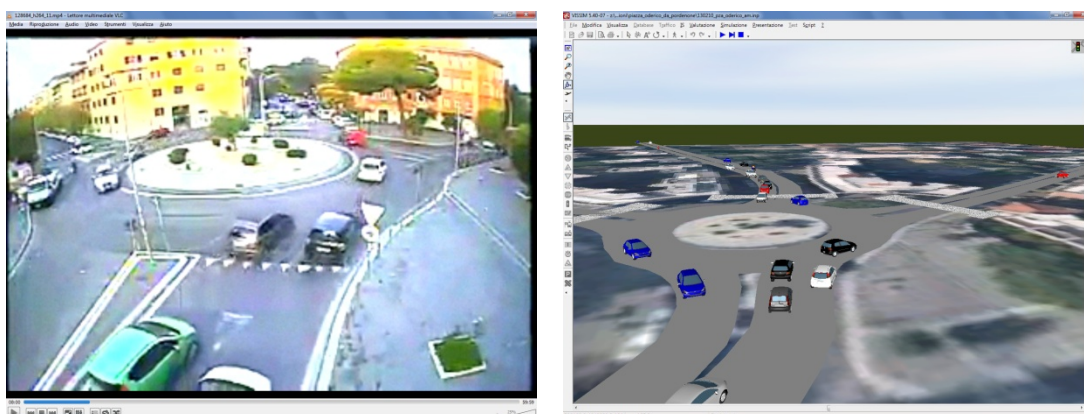


Figura 2 - Piazza Oderico da Pordenone, approccio via G. Genocchi – immissioni doppie.

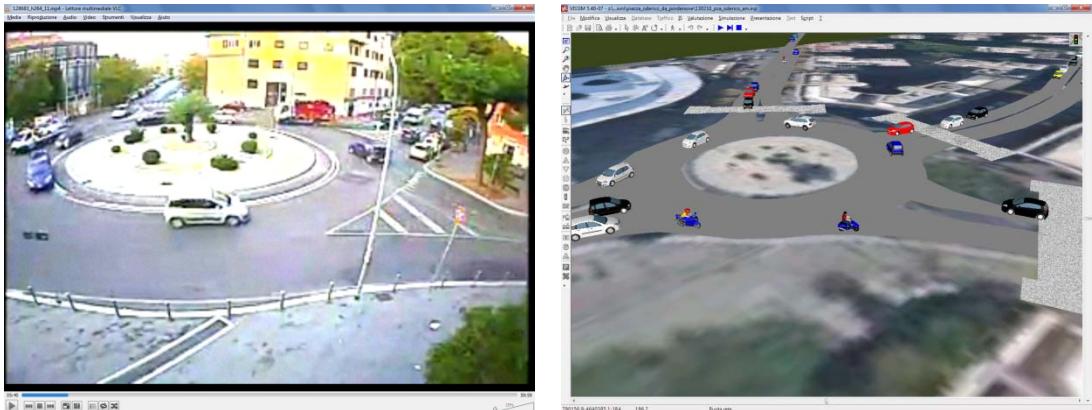


Figura 3 - Piazza Oderico da Pordenone, circolazione ad alta densità lungo l'anello.

Per quanto riguarda le velocità sono state riscontrate velocità comprese tra 12 e 15 km/h lungo l'anello e modellate sul simulatore tramite zone di rallentamento. In prossimità degli approcci sono state introdotte nel modello zone di rallentamento con velocità comprese tra 15 e 20 km/h per i veicoli leggeri e tra 12 e 15 km/h per i mezzi pesanti.

Le immagini in Figura 4 mostrano la modellazione dell'intersezione di Piazza Oderico da Pordenone:

1. assi degli archi e delle connessioni;
2. numero, larghezza e geometria delle corsie (compresi gli attraversamenti pedonali);
3. localizzazione delle aree di conflitto;
4. localizzazione delle zone di rallentamento.

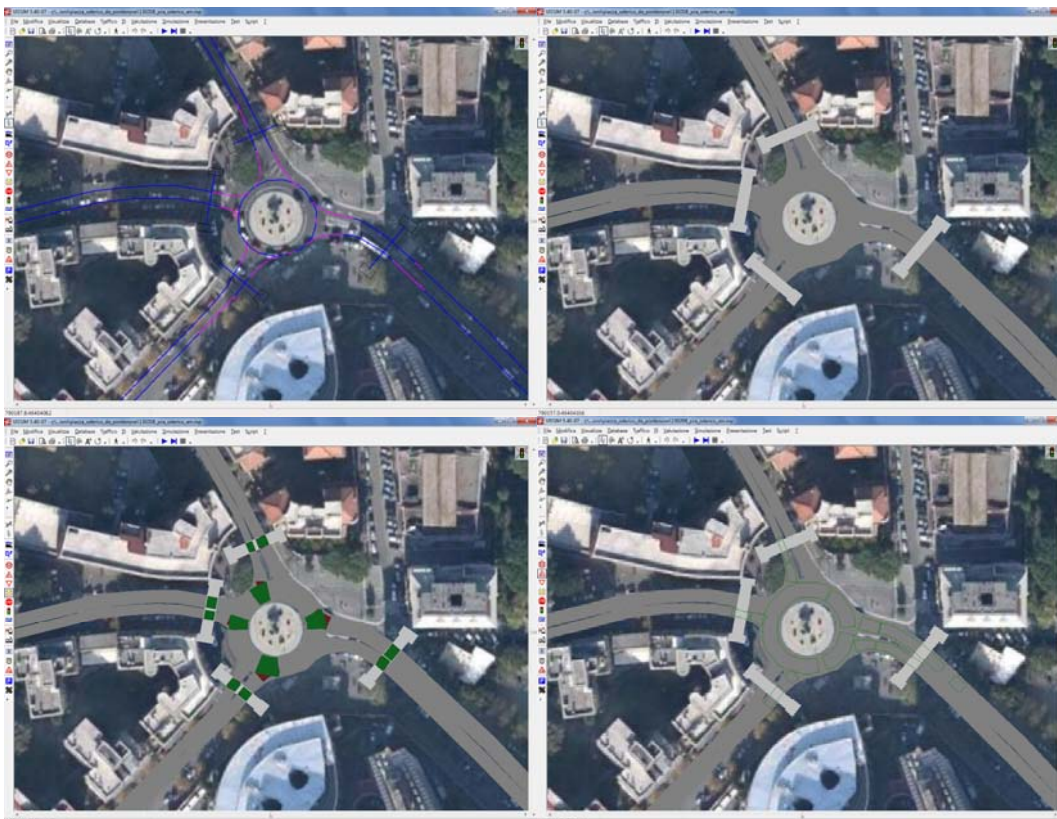


Figura 4 - Modellazione in ambiente VISSIM dell'intersezione di Piazza Oderico da Pordenone.

4.1.2. Intersezione di Piazza Azolino Hazon – Raggio Esterno pari a 36 metri

Dall'analisi dei rilievi video sono emerse diverse peculiarità del funzionamento dell'intersezione in merito al comportamento di guida degli utenti in corrispondenza degli ingressi ed in percorrenza dell'anello della rotonda. In particolare è stato riscontrato che in corrispondenza degli approcci A, B, e C si verificano spesso ingressi sull'anello di due veicoli affiancati, e lungo l'anello, nonostante la presenza quasi costante di veicoli in sosta sulla destra, la circolazione avviene con la capacità dei veicoli di disporsi su due corsie. In generale la circolazione si presenta molto fluida, con velocità basse ma costanti ed accettazione di intervalli critici bassi in virtù della cooperazione dei veicoli con diritto di precedenza.

Si riportano di seguito (vedi dalla Figura 5 alla Figura 11) delle immagini catturate dai rilievi video confrontate con una serie di immagini catturate dalle simulazioni dinamiche effettuate con i modelli calibrati.



Figura 5 - Piazza Hazon, approccio via Cina - immissioni doppie.



Figura 6 - Piazza Hazon, approccio via Cina - uso della corona con due veicoli affiancati.



Figura 7 - Piazza Hazon, approccio via Del Fiume Bianco - immissioni doppie.



Figura 8 - Piazza Hazon, approccio via Del Fiume Bianco - uso della corona con due veicoli affiancati.

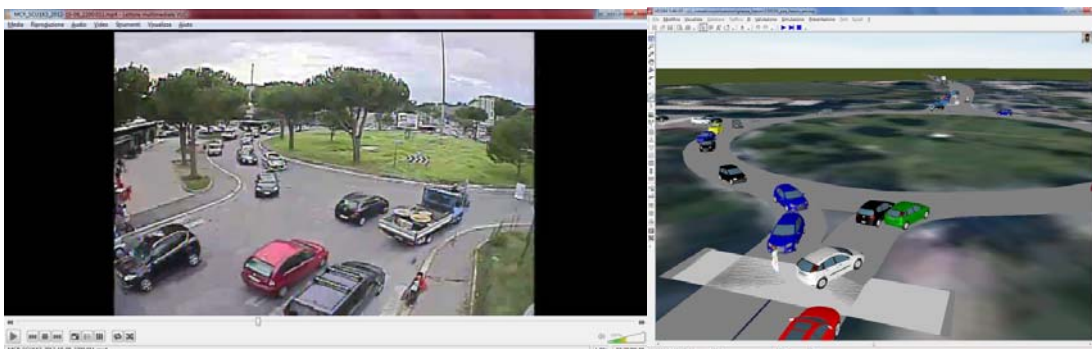


Figura 9 - Piazza Hazon, approccio viale Sabbatini Camillo - immissioni doppie.

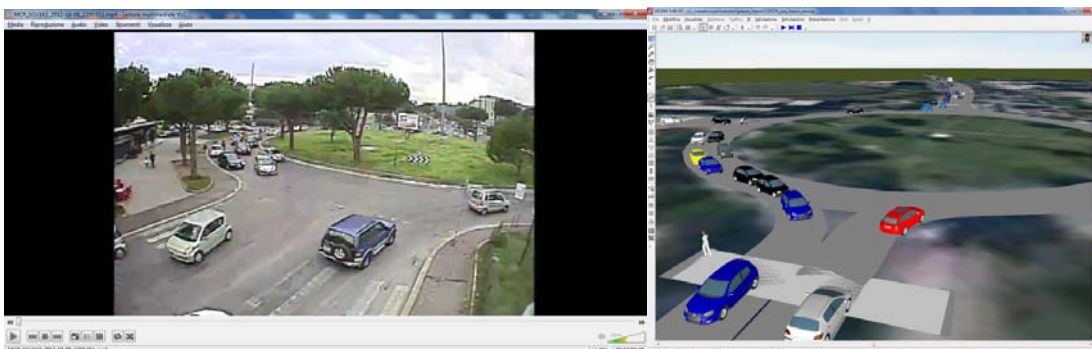


Figura 10 - Piazza Hazon, approccio viale Sabbatini Camillo - uso della corona con due veicoli affiancati.

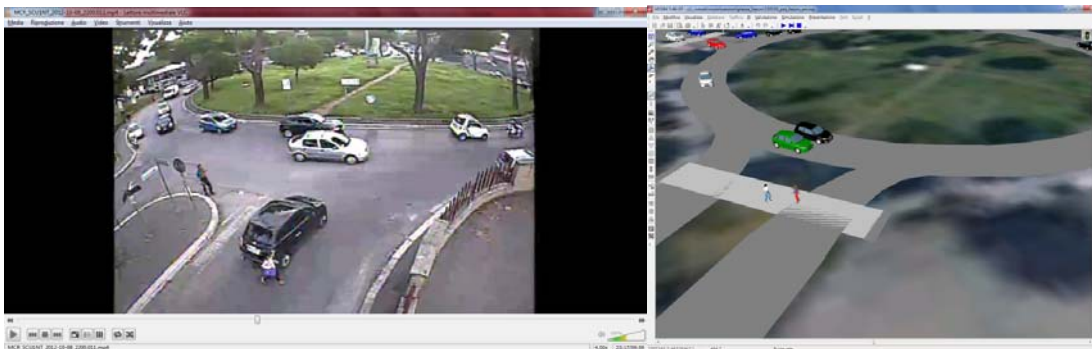


Figura 11 - Piazza Hazon, approccio via Domenico Sansotta – uso della corona con due veicoli affiancati.

Per quanto riguarda le velocità sono state riscontrate velocità comprese tra 12 e 15 km/h lungo l'anello (tra 15 e 20 km/h sulla corsia esterna dello stesso) e modellate sul simulatore tramite zone di rallentamento. In prossimità degli approcci sono state introdotte nel modello zone di rallentamento con velocità comprese tra 15 e 20 km/h per i veicoli leggeri e tra 12 e 15 km/h per i mezzi pesanti.

Le immagini in Figura 12 mostrano la modellazione dell'intersezione di Piazza Hazon:

1. assi degli archi e delle connessioni;
2. numero, larghezza e geometria delle corsie (compresi gli attraversamenti pedonali);
3. localizzazione delle aree di conflitto;
4. localizzazione delle zone di rallentamento.

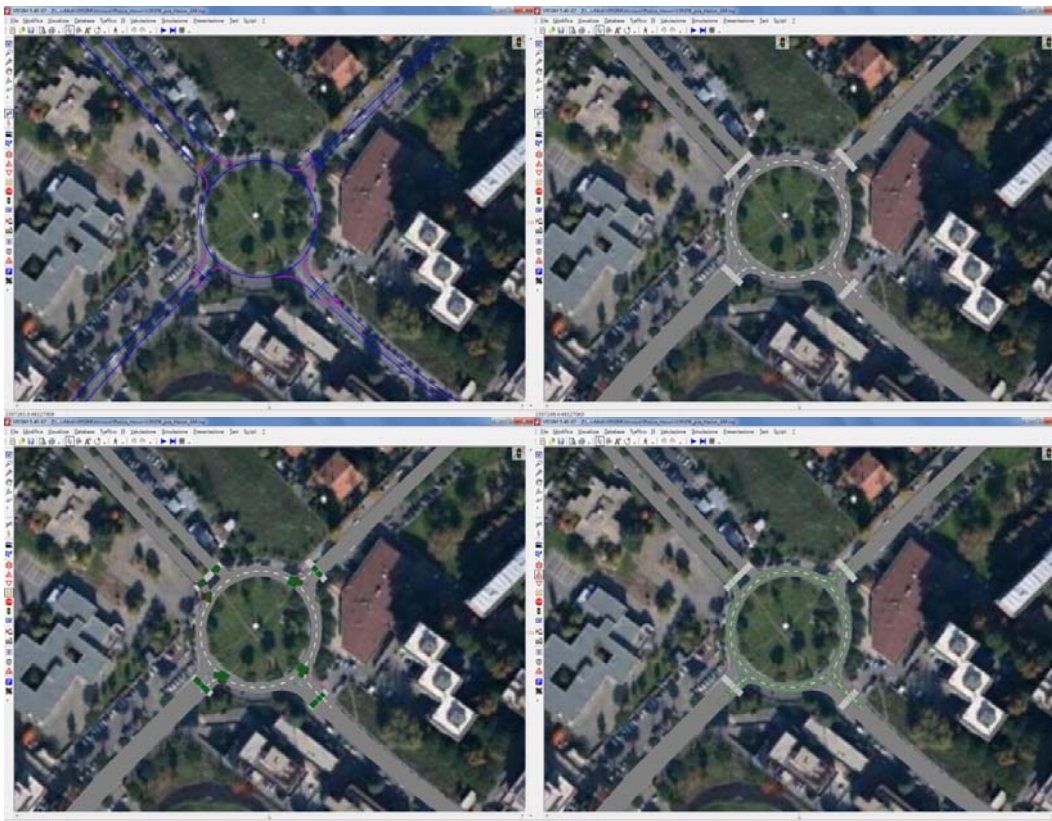


Figura 12 - Modellazione in ambiente VISSIM dell'intersezione di Piazza Hazon.

4.1.3. Risultati delle simulazioni relative allo stato attuale

Tra l'enorme mole di indicatori prodotti quali risultati delle simulazioni relative allo stato attuale (due rotatorie per tre periodi d'analisi) si è focalizzata l'attenzione sul ritardo medio per veicolo all'intersezione per ciascuna simulazione. Tale indicatore calcolato come media pesata dei ritardi di ciascuna manovra di svolta sul volume di ciascuna manovra, determina il livello di servizio dell'intersezione fornendo una valutazione qualitativa sul funzionamento della stessa nelle condizioni considerate (cfr. § **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Il grafico illustrato in Figura 13 riporta per ciascuna delle sei microsimulazioni riferite allo stato attuale il ritardo medio per veicolo ottenuto ed il corrispondente livello di servizio, in funzione del raggio esterno della rotatoria espresso in metri, e del livello di domanda complessiva interessante l'intersezione espresso in numero di veicoli equivalenti per ora.

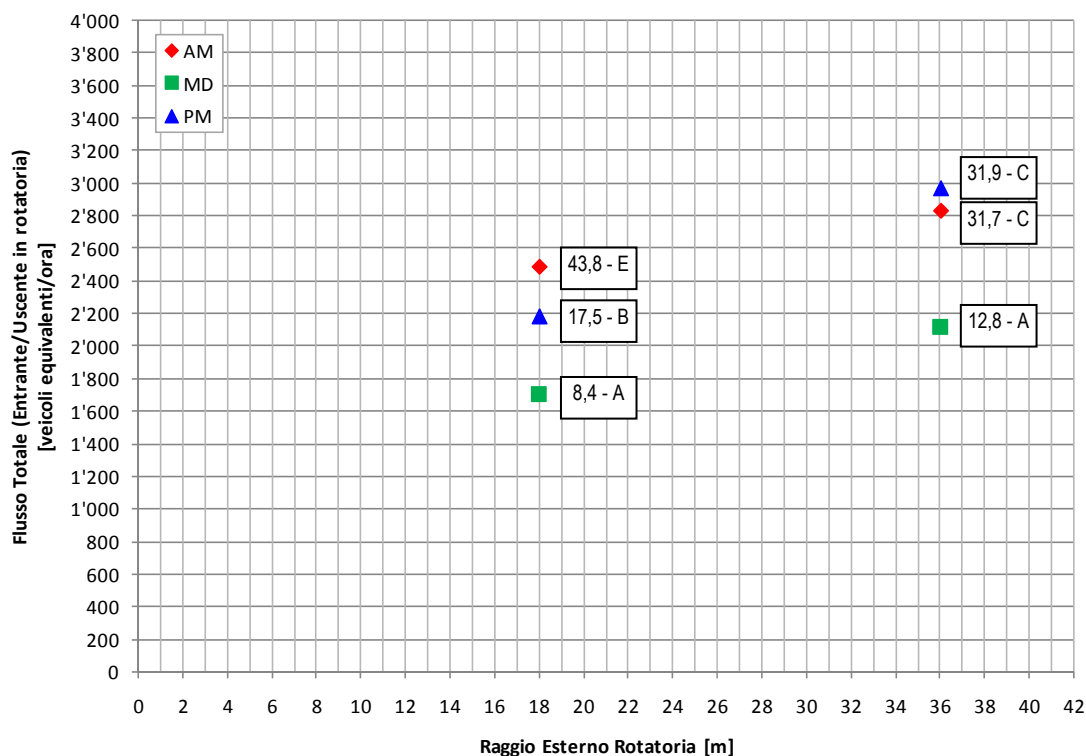


Figura 13 - Risultati delle microsimulazioni dello stato attuale: ritardo medio per veicolo e LOS in funzione del raggio esterno e volume di domanda oraria.

Dal grafico precedente è immediato osservare come al crescere della domanda, fissato il raggio esterno, cresca il ritardo medio e allo stesso tempo all'aumentare del raggio esterno il ritardo medio diminuisca.

La Tabella 1 e la Tabella 2 riportano per ciascuno scenario dello stato attuale simulato, le condizioni riscontrate in merito alle distribuzioni delle diverse manovre di svolta, e alla composizione del traffico veicolare.

Le condizioni limite delle simulazioni effettuate, che possono essere assunte quali limiti di validità dell'abaco da costruire, sono riassunte attraverso i valori minimi e massimi delle percentuali riportate nella Tabella 3.

Tabella 1 - Condizioni delle simulazioni dello stato attuale di Piazza Oderico da Pordenone.

Ripartizione Manovre	Svolta a destra	Attraversamento	Svolta a sinistra	Inversione a U
AM	4,6%	29,4%	55,1%	11%
MD	5,7%	26,2%	60,9%	7%
PM	5,8%	24,2%	61,0%	9%

Composizione Veicolare	Auto	Furgoni	Mezzi Pesanti	Bus	Moto
AM	91,6%	0,6%	0,2%	0,0%	7,6%
MD	90,1%	0,9%	0,5%	0,0%	8,5%
PM	92,2%	0,3%	0,2%	0,0%	7,3%

Tabella 2 - Condizioni delle simulazioni dello stato attuale di Piazza Azolino Hazon.

Ripartizione Manovre	Svolta a destra	Attraversamento	Svolta a sinistra	Inversione a U
AM	29,4%	48,5%	21,1%	0,9%
MD	28,9%	42,3%	28,7%	0,1%
PM	26,1%	37,9%	35,5%	0,5%

Composizione Veicolare	Auto	Furgoni	Mezzi Pesanti	Bus	Moto
AM	90,3%	1,3%	1,8%	0,6%	6,1%
MD	93,0%	0,4%	1,9%	0,0%	4,7%
PM	93,7%	0,5%	1,0%	0,0%	4,8%

Tabella 3 - Condizioni limite alla base della redazione dell'abaco.

Ripartizione Manovre	Svolta a destra	Attraversamento	Svolta a sinistra	Inversione a U
Min	4.6%	24.2%	21.1%	0.1%
Max	29.4%	48.5%	61.0%	11.0%

Composizione Veicolare	Auto	Furgoni	Mezzi Pesanti	Bus	Moto
Min	90.1%	0.3%	0.2%	0.0%	4.7%
Max	93.7%	1.3%	1.9%	0.6%	8.5%

4.2. Microsimulazione di scenari relativi a diverse configurazioni raggio esterno – volume di domanda

Al fine della valutazione del ritardo medio per veicolo al variare di raggio esterno e volume orario totale delle intersezioni, a partire dai sei scenari simulati, rappresentativi dello stato attuale, sono stati prodotti e simulati altri 19 scenari variando il raggio esterno ed il volume orario totale.

A partire dai modelli della rotatoria di piazza Oderico da Pordenone (Raggio esterno pari a 18 metri) lasciando inalterata la domanda (volume orario entrante nella rotatoria) sono stati simulati i seguenti dodici scenari, riducendo o incrementando il raggio esterno di tre, sei e nove metri:

- Scenario S1: raggio esterno=15 metri; volume orario entrante pari a circa 2'500 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mattino);
- Scenario S2: raggio esterno=15 metri, volume orario entrante pari a circa 1'700 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mezzogiorno);
- Scenario S3: raggio esterno=15 metri, volume orario entrante pari a circa 2'200 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del pomeriggio);
- Scenario S4: raggio esterno=21 metri, volume orario entrante pari a circa 2'500 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mattino);
- Scenario S5: raggio esterno=21 metri, volume orario entrante pari a circa 1'700 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mezzogiorno);
- Scenario S6: raggio esterno=21 metri, volume orario entrante pari a circa 2'200 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del pomeriggio);
- Scenario S7: raggio esterno=24 metri, volume orario entrante pari a circa 2'500 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mattino);
- Scenario S8: raggio esterno=24 metri, volume orario entrante pari a circa 1'700 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mezzogiorno);
- Scenario S9: raggio esterno=24 metri, volume orario entrante pari a circa 2'200 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del pomeriggio);
- Scenario S10: raggio esterno=27 metri, volume orario entrante pari a circa 2'500 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mattino);
- Scenario S11: raggio esterno=27 metri, volume orario entrante pari a circa 1'700 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mezzogiorno);
- Scenario S12: raggio esterno=27 metri, volume orario entrante pari a circa 2'200 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del pomeriggio).

A partire dalla rotatoria di piazza Hazon (Raggio esterno pari a 36 m) lasciando inalterata la domanda (volume orario entrante nella rotatoria) sono stati simulati sette scenari riducendo il raggio esterno di tre e sei metri:

- Scenario S13: raggio esterno=30 metri, volume orario entrante pari a circa 2'800 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mattino);
- Scenario S14: raggio esterno=30 metri, volume orario entrante pari a circa 2'500 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del pomeriggio ridotta proporzionalmente a 2'500 veic.eq./ora);
- Scenario S15: raggio esterno=30 metri, volume orario entrante pari a circa 2'100 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mezzodi);
- Scenario S16: raggio esterno=33 metri, volume orario entrante pari a circa 2'800 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mattino);
- Scenario S17: raggio esterno=33 metri, volume orario entrante pari a circa 2'500 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del pomeriggio ridotta proporzionalmente a 2'500 veic.eq./ora);
- Scenario S18: raggio esterno=33 metri, volume orario entrante pari a circa 2'100 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del mezzodi);
- Scenario S19: raggio esterno=36 metri, volume orario entrante pari a circa 2'500 veicoli equivalenti (domanda dell'ora di punta del pomeriggio ridotta proporzionalmente a 2'500 veic.eq./ora).

In aggiunta a tali scenari sono stati simulati una serie di scenari per verificare le condizioni di "domanda limite" e specificare senza dubbio il campo di validità dell'abaco che si intende realizzare.

La Tabella 4 riporta tutti gli scenari simulati, per i quali è stato determinato il ritardo medio per veicolo [s] relativo all'intera intersezione ed il conseguente livello di servizio LOS, in funzione del raggio esterno e del volume totale orario. Gli scenari indicati con la A (A1, A2, A3, A7, A8, A9) sono gli scenari di base corrispondenti alle simulazioni dello stato attuale delle rotatorie.

La Tabella 5 riporta, per tutti gli scenari simulati, il ritardo medio per veicolo [s]. Con la dicitura "limite di capacità" sono segnati i campi relativi a scenari che non garantiscono lo smaltimento dell'intera domanda nell'ora di simulazione.

Tabella 4 - Scenari simulati in funzione del raggio esterno [m] e della domanda totale entrante [veicoli equivalenti/ora].

		- Raggio esterno [m]							
		15	18	21	24	27	30	33	36
Volume orario totale [Veic. Eq. /Ora]	1'700	S2	A2	S5	S8	S11			
	2'100						S15	S18	A8
	2'200	S3	A3	S6	S9	S12			
	2'500	S1	A1	S4	S7	S10	S14	S17	S19
	2'700								
	2'800						S13	S16	A7
	3'000								A9
	3'200								

Tabella 5 - Ritardo medio per veicolo negli scenari simulati in funzione del raggio esterno [m] e delle domanda globale [veicoli equivalenti/ora].

		- Raggio esterno [m]							
		15	18	21	24	27	30	33	36
Volume orario totale [Veic. Eq. /Ora]	1'700	8,5	8,4	7,9	7,0	7,1			
	2'100						19,1	13,1	12,8
	2'200	18,1	17,5	15,0	14,1	13,8			
	2'500	44,2	43,8	40,2	34,8	30,4	17,6	17,3	16,8
	2'600	Limite capacità	Limite capacità	44,4					
	2'700	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	43,1	41,8			
	2'800	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	60,6	45,5	31,7
	3'000	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	65,4	48,6	31,9
	3'200	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità	Limite capacità

4.3. Definizione del livello di servizio delle rotatorie (LOS)

Per la definizione del livello di servizio (LOS) dell'intersezione, ci si rifà alla normativa svizzera SNV 640022, la quale definisce il LOS in funzione del ritardo medio e del rapporto tra flusso e capacità. La Tabella 6 riporta i valori soglia che definiscono i diversi livelli di servizio.

Tabella 6 - Definizione del Livello di Servizio.

Ritardo medio [s]	LOS
≤ 10	A
≤ 15	B
≤ 25	C
≤ 45	D
> 45	E
Flusso > Capacità	F

4.4. Costruzione di una abaco per la stima preliminare del LOS a partire dal livello di domanda e dal diametro esterno

Le simulazioni effettuate hanno riguardato rotatorie con raggio esterno pari a: 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 e 36 metri, quindi adottando un passo della variazione pari a 3 metri.

I valori di domanda utilizzati nelle simulazioni in termini di volume orario totale espresso in veicoli equivalenti sono (circa): 1'700, 2'100, 2'200, 2'500, 2'600, 2'700, 2'800 e 3'000 veicoli equivalenti/ora.

Per ciascun valore del raggio sono quindi disponibili i valori dei ritardi ottenuti in corrispondenza di tre o quattro valori di domanda.

Assumendo per l'abaco che si intende costruire un passo pari ad un metro per il raggio esterno e pari a 100 veicoli equivalenti/ora per il livello di domanda, e assumendo come limiti delle variabili 15 e 36 metri per il raggio e 1'600 e 3'200 veicoli equivalenti/ora per il livello della domanda, l'abaco si compone di 374 campi.

Partendo dai 30 valori di ritardo ottenuti dalle simulazioni è stata ricavata una funzione approssimante per la stima del ritardo a partire dal raggio esterno della rotatoria [m] e dal livello di domanda globale [veic. eq./ora].

La scelta di utilizzare una funzione approssimante per il popolamento dei campi dell'abaco comporta oltre che la possibilità di popolare tutti i campi anche il superamento di condizioni

dovute alla specificità delle singole microsimulazioni, conferendo continuità all'andamento dell'abaco.

La funzione utilizzata, calibrata sui 30 punti determinati tramite le microsimulazioni, presenta con gli stessi una correlazione pari al 94%, un errore quadratico medio pari a 34s (RMSE = 5.9s), fornendo un LOS diverso solo in 3 casi.

Ad ogni modo, accettando una certa indeterminatezza nelle condizioni di confine tra un LOS ed un altro, si ha una chiara indicazione delle condizioni di funzionamento:

- LOS A e B: condizioni di funzionamento soddisfacenti;
- LOS C e D: condizioni di funzionamento da verificare tramite microsimulazione dinamica;
- LOS E e F: condizioni di funzionamento non soddisfacenti.

Nelle pagine seguenti si riporta l'abaco predisposto sia in forma tabellare che in forma grafica.

5. L'ABACO

Il parametro scelto per la caratterizzazione geometrica delle rotatorie ovvero il raggio esterno rappresenta il principale parametro usato per definire il tipo di rotatoria: infatti all'interno di molte normative è presente una classificazione basata sul valore del diametro.

Il termine diametro si riferisce al diametro esterno di una rotatoria, cioè il diametro del cerchio inscritto all'interno delle linee di margine esterno della carreggiata dell'anello equivalente al doppio del raggio esterno.

Nella normativa italiana vengono definite le seguenti tre tipologie:

- mini-rotatorie: diametro compreso tra 14 e 25 metri;
- rotatorie compatte: diametro compreso tra 25 e 40 metri;
- rotatorie convenzionali: diametro compreso tra 40 e 50 metri.

L'abaco quindi copre il campo delle rotatorie compatte e convenzionali in ambito urbano, assumendo implicitamente che all'aumentare del raggio esterno si passi da una a due corsie sull'anello (dal modello di piazza Oderico da Pordenone al modello di Piazza Hazon utilizzati per la redazione dell'abaco) e da accessi ad una corsia ad immissioni doppie.

Inoltre, i dati a base della redazione dell'abaco sono specifici della realtà romana, caratterizzata da comportamenti di guida particolari. In merito ai comportamenti di guida osservati in fase di calibrazione e validazione dei modelli di microsimulazione è infatti possibile fare alcune considerazioni. Dall'analisi dei rilievi video sono emerse diverse peculiarità del funzionamento delle intersezioni in merito al comportamento di guida degli utenti in corrispondenza degli ingressi ed in percorrenza degli anelli delle rotatorie. In particolare è stato riscontrato che in corrispondenza degli approcci che presentano larghezza utile sufficientemente ampia o isola separatrice non materializzata, si verificano ingressi sull'anello di due veicoli affiancati. Lungo gli anelli talvolta sono presenti veicoli in sosta e la circolazione si presenta estremamente fluida con velocità basse e densità elevate. I veicoli in approccio alle immissioni si presentano con velocità moderate ed accettano intervalli critici piuttosto bassi in virtù della cooperazione dei veicoli con diritto di precedenza.

Nelle pagine seguenti si riporta l'abaco predisposto (in forma tabellare in Figura 14 ed in forma grafica alla pagina seguente) nel quale ad un determinato valore del raggio esterno espresso in metri e ad un determinato valore del livello di domanda globale che interessa l'intersezione espresso in veicoli equivalenti/ora, corrisponde il relativo LOS e/o ritardo medio per veicolo espresso in secondi.

Le celle della tabella dei livelli di servizio sono evidenziate con colori differenti per i diversi livelli di servizio come mostrato nella Tabella 7.

Tabella 7 - Associazione livelli di servizio-colori.

LOS	Ritardo medio [s]	Colore associato
A	≤ 10	
B	≤ 15	
C	≤ 25	
D	≤ 45	
E	> 45	
F	Flusso > Capacità	

Si ricorda che, per quanto riguarda la caratterizzazione della domanda sono state simulate sei condizioni operative relative a tre periodi d'analisi per due rotatorie con valori di raggio esterno diversi. Nel complesso le simulazioni effettuate coprono un campo di livello di domanda che va da 1'700 a 3'000 veic.eq./ora, e le condizioni limite che possono essere assunte quali limiti di validità dell'abaco redatto sono riportate nella Tabella 8.

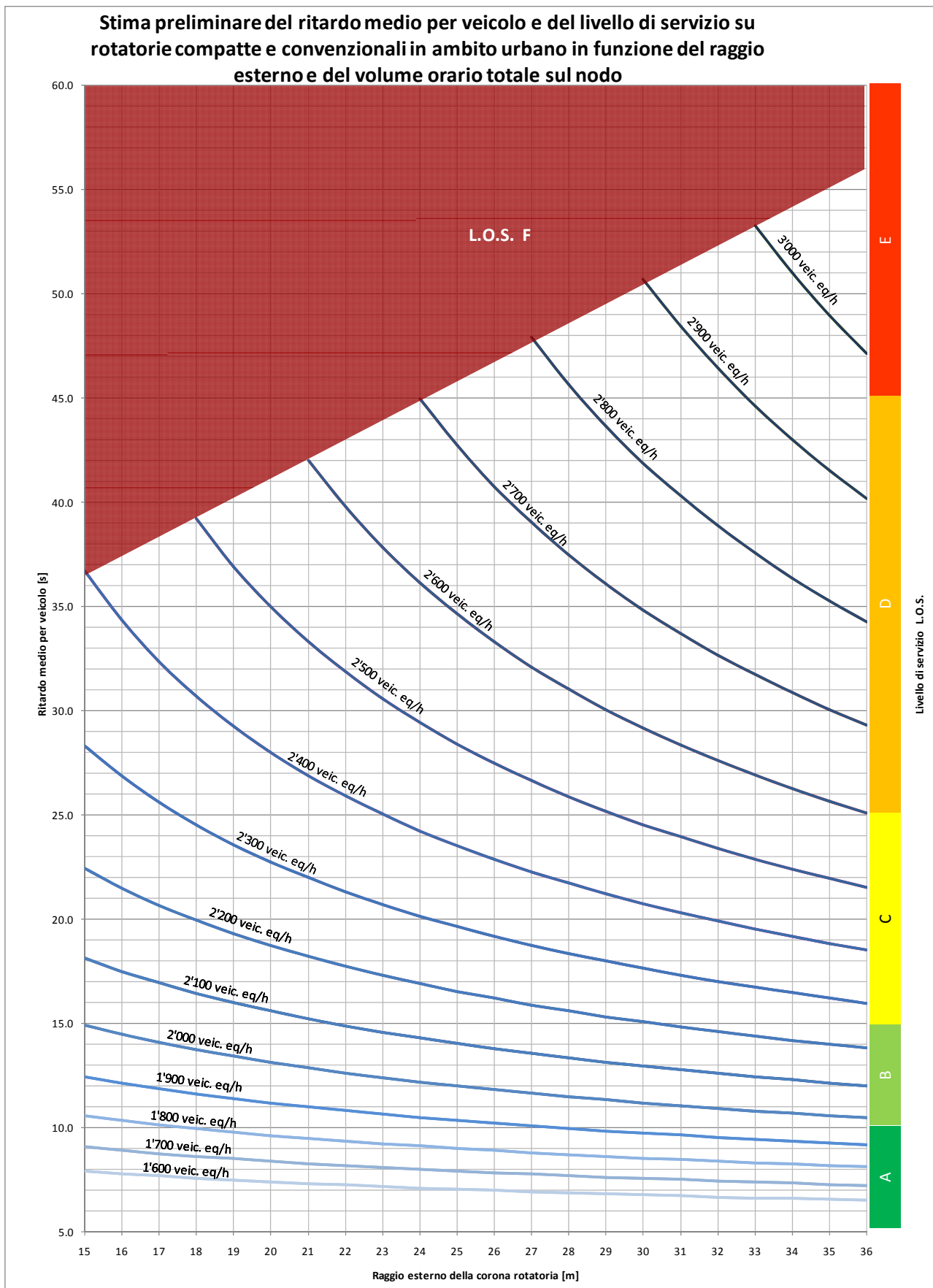
Tabella 8 - Condizioni limite alla base della redazione dell'abaco.

Ripartizione Manovre	Svolta a destra	Attraversamento	Svolta a sinistra	Inversione a U
Min	4.6%	24.2%	21.1%	0.1%
Max	29.4%	48.5%	61.0%	11.0%

Composizione Veicolare	Auto	Furgoni	Mezzi Pesanti	Bus	Moto
Min	90.1%	0.3%	0.2%	0.0%	4.7%
Max	93.7%	1.3%	1.9%	0.6%	8.5%

		Raggio esterno [m]																					
		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Volume orario totale [Veic. Eq. /h]	3'200	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
	3'100	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
	3'000	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	E	E	E	E	E	E	E
	2'900	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	E	E	E	E	D	D	D	D
	2'800	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	E	D	D	D	D	D	D	D	D
	2'700	F	F	F	F	F	F	F	F	F	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
	2'600	F	F	F	F	F	F	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
	2'500	E	E	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C
	2'400	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	2'300	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	2'200	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B
	2'100	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	2'000	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	1'900	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	1'800	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	1'700	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1'600	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	

Figura 14 - Abaco (in forma tabellare) per la stima preliminare del LOS delle rotonde urbane in funzione della domanda globale sul nodo[veic. eq./h] e del raggio esterno [m].



La Figura 15, infine, riporta una forma sintetica dell'abaco ottenuto a completamento dello studio in cui si ha che:

- **in verde** è rappresentata l'area delle combinazioni tra domanda e raggio esterno che garantiscono condizioni di funzionamento soddisfacenti;
- **in giallo** è rappresentata l'area delle combinazioni tra domanda e raggio esterno che indicano condizioni di funzionamento da verificare;
- **in rosso** è rappresentata l'area delle combinazioni tra domanda e raggio esterno che forniscono condizioni di funzionamento non soddisfacenti.

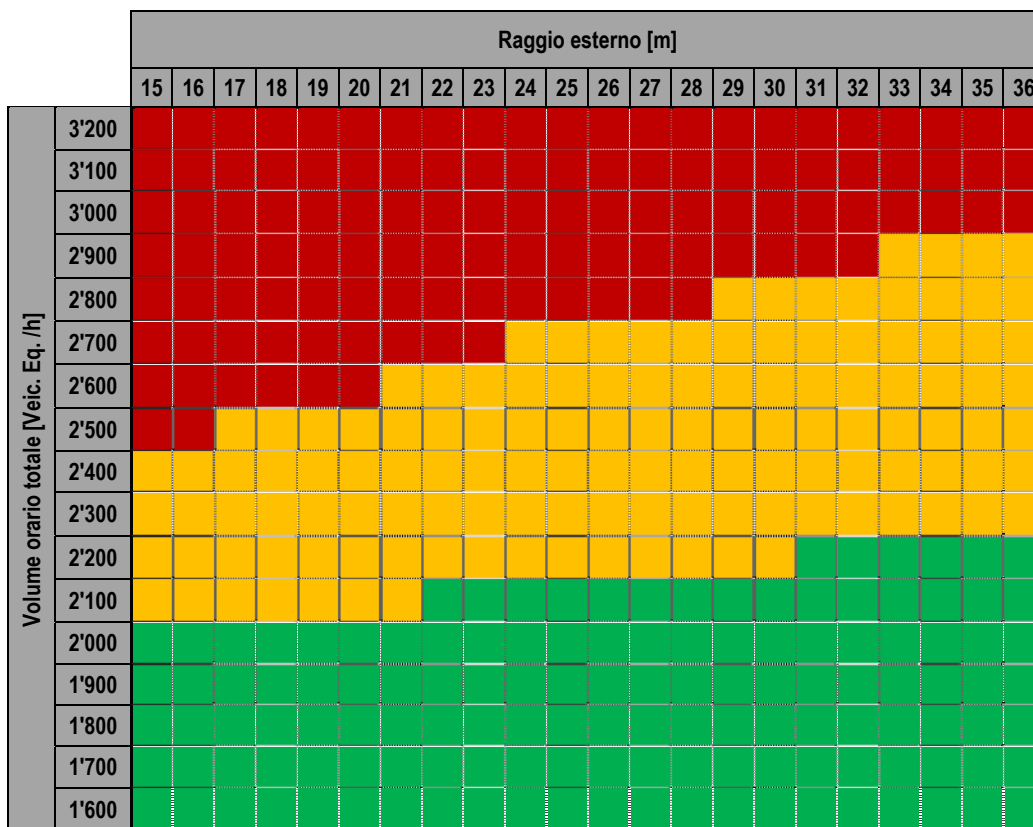


Figura 15 - Abaco per la determinazione preliminare del funzionamento delle rotonde urbane in funzione della domanda globale sul nodo [veh. eq./h] e del raggio esterno [m].

6. VERIFICA DELL'ABACO

Si è proceduto anche a verificare (in un certo senso a validare) la funzionalità dell'abaco redatto utilizzando una rotatoria presente in ambito urbano nel territorio di Roma Capitale. Tale verifica è stata effettuata secondo lo stesso iter metodologico seguito per la redazione stessa dell'abaco.

Nello specifico, come rotatoria di verifica è stata scelta l'intersezione tra viale Giotto e viale Baccelli, ovvero una rotatoria compatta presente sul territorio di Roma Capitale. Di questa rotatoria è stata valutata la domanda a partire dai rilievi di traffico ed è stato costruito un modello di microsimulazione dinamica. Infine, sono stati simulati tre scenari relativi alle tre ore di punta: del mattino, del mezzogiorno e del pomeriggio.

Successivamente, per ciascuno scenario sono stati calcolati una serie di indicatori trasportistici, il più importante dei quali "il ritardo medio per veicolo", al quale è legato anche il livello di servizio, indicatore che è stato confrontato con i risultati forniti dall'abaco.

6.1. Iter metodologico per la verifica dell'abaco

Considerando le peculiarità delle caratteristiche del traffico della città di Roma, e tenendo presente l'iter procedurale che ha portato alla redazione dell'abaco da verificare, le valutazioni sulla capacità e la stima dei ritardi per la definizione del livello di servizio dell'intersezione a rotatoria scelta per la verifica, sono state effettuate adottando l'approccio della microsimulazione dinamica.

Tenuto conto di quanto fin qui esposto, è stato seguito il seguente iter procedurale:

- individuazione sul territorio urbano di Roma di una rotatoria dalle caratteristiche compatibili con il campo di validità dell'abaco;
- analisi della domanda, individuazione delle tre ore di punta e ricostruzione delle matrici;
- microsimulazione in ambiente VISSIM dei tre scenari relativi alle tre ore di punta;
- calcolo degli indicatori trasportistici e confronto dei ritardi medi ottenuti dalle microsimulazioni con i risultati forniti dall'abaco.

L'intersezione individuata è la rotatoria tra viale Giotto, viale Baccelli e via Antonina. Si tratta di una rotatoria a tre bracci di 16 m di raggio esterno, dotata di una corsia dedicata per la svolta a destra per chi proviene da viale Giotto ed è diretto su via Antonina, a servizio del traffico prevalente.

Si tratta pertanto di una rotatoria compatta con anello ad una corsia, due approcci ad una corsia ed un approccio (viale Baccelli) a due corsie in uscita, una corsia in entrata ed una corsia per la svolta dedicata.

La domanda afferente sul nodo è elevata ma la maggior parte di essa utilizza la corsia per la svolta dedicata non gravando sul funzionamento della rotatoria in senso stretto.

6.2. Analisi dell'offerta di trasporto

6.2.1. Geometria dell'intersezione

Per ciascun approccio dell'intersezione sono state rilevate una serie di parametri caratterizzanti la geometria degli stessi (il numero di corsie sull'anello, il numero di corsie in ingresso ed in uscita dei singoli approcci, il diametro dell'isola centrale, la larghezza dell'anello, la lunghezza dell'eventuale isola spartitraffico, le larghezze utili di ingressi ed uscite (escluso l'eventuale spazio destinato o comunque occupato dalla sosta), la pendenza degli accessi, la lunghezza degli approcci (considerata a partire dall'intersezione a monte), la tipologia del tessuto edificato in cui si inseriscono le strade dell'approccio.

La Figura 16 illustra la planimetria della rotatoria scelta per la verifica dell'abaco. Com'è possibile notare da tale planimetria, è presente una corsia per la svolta in destra dedicata per la manovra di svolta in destra da viale Baccelli su via Antonina.

Tutti i dati sopra esposti hanno consentito di definire completamente le caratteristiche geometriche dell'offerta di trasporto da modellare in ambiente VISSIM.

Tuttavia ai fini della calibrazione dei modelli risulta necessario la determinazione per ciascun approccio di alcune grandezze che caratterizzano i singoli archi, ovvero flusso di saturazione e velocità a flusso libero. In mancanza di rilievi specifici sui bracci delle intersezioni oggetto di studio, tali grandezze sono state stimate utilizzando modelli della letteratura tecnica nazionale ed internazionale, ampiamente consolidati.

6.2.2. Stima dei flussi di saturazione

Il flusso di saturazione è stato determinato utilizzando il metodo proposto dall'HCM 2010:

$$FS = FS_0 * N * f_b * f_{pt} * f_i * f_p * f_B * f_a * f_u * f_{ped}$$

dove:

- FS = il flusso di saturazione;

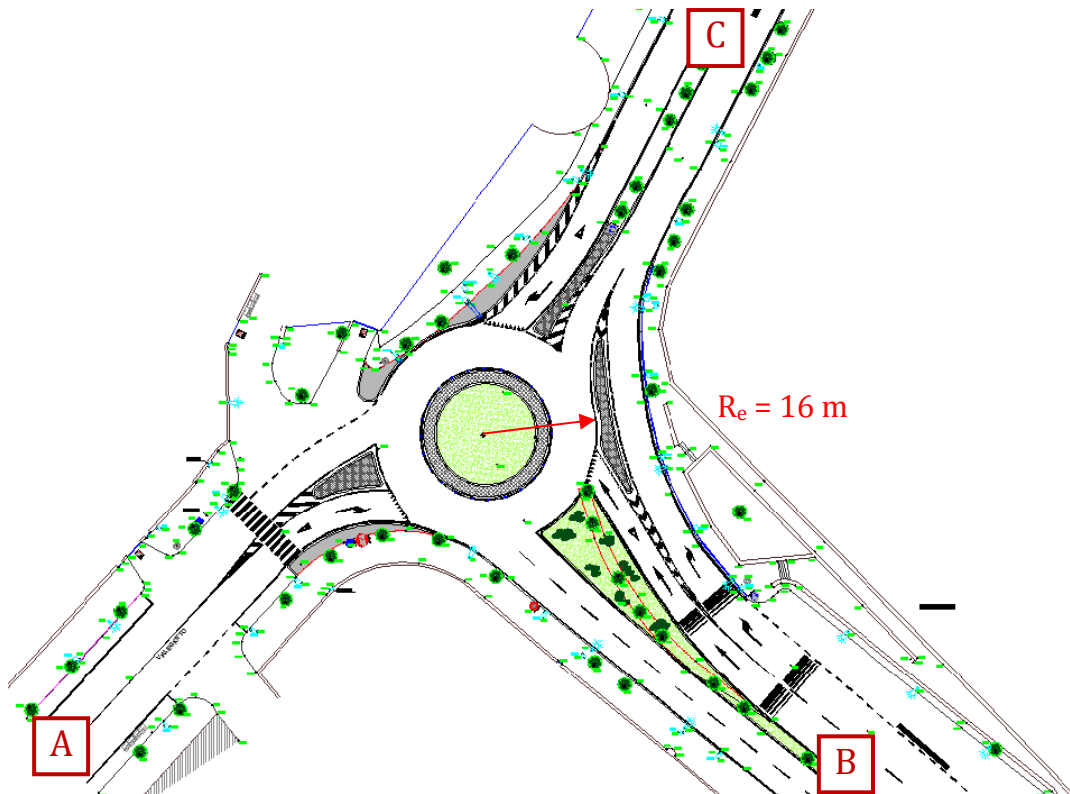


Figura 16 - Planimetria numerica della rotatoria di viale Giotto - viale Baccelli.

- FS_0 = il flusso di saturazione di base di una corsia in condizioni ideali e pari a 1900 veicoli/ora;
- N = numero di corsie dell'approccio;
- f_b = coefficiente di correzione che tiene conto della larghezza effettiva della corsie;
- f_{pt} = coefficiente di correzione che tiene conto della composizione veicolare del flusso;
- f_i = coefficiente di correzione che tiene conto della pendenza;
- f_p = coefficiente di riduzione che tiene conto della eventuale presenza di parcheggi sulla carreggiata;
- f_B = coefficiente di riduzione che tiene conto della eventuali fermate di bus;
- f_a = coefficiente di riduzione che tiene conto della tipologia del tessuto edificato in cui si inserisce l'approccio;

- f_u = coefficiente di riduzione che tiene conto della effettiva utilizzazione delle corsie (in caso di più corsie per approccio);
- f_{ped} = coefficiente di riduzione che tiene conto dell'entità dell'eventuale flusso pedonale in attraversamento.

In Tabella 9 si riportano per ciascun approccio i valori dei flussi di saturazione stimati per ciascun'ora di punta. La media tra i tre valori relativi ai tre periodi d'analisi è stato assunto come valore di riferimento per la calibrazione dei modelli di microsimulazione.

Tabella 9 - Stima dei flussi di saturazione degli approcci di viale Giotto, viale Baccelli e via Antonina.

	viale Giotto	viale Baccelli	via Antonina
Flusso di saturazione calcolato secondo l'HCM per l'ora di punta AM	1'774	2'929	2'086
Flusso di saturazione calcolato secondo l'HCM per l'ora di punta MD	1'773	3'554	2'066
Flusso di saturazione calcolato secondo l'HCM per l'ora di punta PM	1'770	3'522	2'066
Valore medio del flusso di saturazione	1'772	3'335	2'073

6.2.3. Stima delle velocità a flusso nullo

Per quanto concerne la stima della velocità sono presenti in letteratura relativamente poche formulazioni, relative a contesti urbani, con riferimento esplicito alle caratteristiche degli archi stessi.

Una ricerca condotta a partire da dati sperimentali raccolte nelle aree urbane di città italiane ha portato ad una formulazione per la stima delle velocità e delle deviazioni standard delle stesse (estensione all'ambito urbano del modello "Nuzzolo - Russo") in funzione delle seguenti variabili esplicative:

- L_u = larghezza utile [m];
- G = pendenza (rapporto fra la differenza di quota delle due sezioni estreme e la distanza tra le stesse);
- T = grado di tortuosità compreso tra 0 e 1 (0 per archi rettilinei);
- D = grado di disturbo compreso tra 0 e 1 (0 in assenza di disturbo);
- I = numero di intersezioni secondarie per unità di lunghezza [1/km].

La Tabella 10 riporta per ciascun approccio i valori delle velocità a flusso nullo e delle deviazioni standard delle stesse stimate secondo il citato modello.

Tabella 10 - Stima di V_0 e DS per i diversi approcci dell'intersezione.

	Viale Giotto - viale Baccelli- via Antonina		
Grandezze stimate	Approccio A	Approccio B	Approccio C
V_0 [km/h]	39	57	42
DS	6.7	7.7	7.5

6.3. Analisi della domanda

I rilievi di traffico sono stati elaborati per individuare le ore di punta del mattino (AM), del mezzodì (MD) e del pomeriggio (PM), calcolate in base alle autovetture equivalenti, sono quindi state ricostruite le matrici dell'intersezione.

Per l'intersezione tra viale Giotto e viale Baccelli sono state individuate le seguenti ore di punta:

- AM: 08:15-09:15;
- MD: 13:15-14:15;
- PM: 17:30-18:30.

Nella Tabella 11 si riportano le matrici dell'intersezione per ogni ora di punta e per ogni classe veicolare rilevata. I rami dell'intersezione sono stati codificati secondo quanto riportato nella precedente Figura 16.

6.3.1. Condizioni generali della domanda di traffico

La Tabella 12 riporta per ciascuno scenario dello stato attuale simulato, le condizioni riscontrate in merito alle distribuzioni delle diverse manovre di svolta, e alla ripartizione del traffico.

In tali elaborazioni si è tenuto conto del fatto che in generale, come rilevato dalle analisi dei rilievi video il 10% degli spostamenti Auto e Moto che effettuano la manovra B-C (da viale Baccelli a via Antonina) non utilizza la corsia di svolta dedicata, a causa della saturazione raggiunta da quest'ultima (soprattutto nell'ora di punta del mattino), ma entra in rotatoria.

Le condizioni limite dell'abaco, che rappresentano in un certo senso i limiti di validità dello stesso, sono riassunte attraverso i valori mini e massimi delle percentuali riportate nella Tabella 13.

Tabella 11 – Matrici OD delle ore di punta per le diverse classi veicolari.

AM 8.15-9.15				MD 13.15-14.15				PM 17.30-18.30			
	Auto				Auto				Auto		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
A	7	34	221	A	6	21	226	A	17	37	252
B	409	2	1407	B	322	3	766	B	406	3	1230
C	88	704	2	C	101	580	5	C	78	627	6
	Furgoni				Furgoni				Furgoni		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
A	0	1	3	A	1	0	5	A	0	0	0
B	5	0	13	B	5	1	7	B	1	0	4
C	2	11	0	C	0	3	0	C	2	1	0
	Mezzi pesanti				Mezzi pesanti				Mezzi pesanti		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
A	0	0	1	A	0	0	1	A	0	0	2
B	2	0	28	B	2	0	12	B	1	0	29
C	4	2	0	C	5	8	0	C	6	10	0
	Bus				Bus				Bus		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
A	0	0	0	A	0	0	0	A	0	0	0
B	0	0	0	B	0	0	0	B	0	0	0
C	0	0	0	C	0	0	0	C	0	0	0
	Motoveicoli				Motoveicoli				Motoveicoli		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
A	1	11	103	A	0	8	55	A	0	14	81
B	76	0	726	B	65	2	156	B	125	0	325
C	10	252	0	C	25	140	2	C	23	305	2

Pertanto per quanto riguarda il rispetto di tali condizioni limite possono essere fatte le seguenti considerazioni:

- Si registrano per la rotatoria oggetto di valutazioni una minor percentuale delle manovre di attraversamento e percentuali di manovre di svolta a sinistra di poco superiori al limite, dovuto al fatto che, a differenza delle rotatorie che hanno portato alla redazione dell'abaco, tutte a quattro bracci, la rotatoria analizzata nel presente studio è una rotatoria a tre bracci.
- Si registrano per la rotatoria oggetto di valutazioni una minor percentuale di auto ed una notevole percentuale di mezzi a due ruote.

Mentre il primo punto non dovrebbe alterare il confronto tra risultati ottenuti dalle microsimulazioni e risultati ottenuti tramite l'utilizzo dell'abaco, il secondo punto tendenzialmente dovrebbe portare ad ottenere ritardi mediamente più bassi rispetto a quelli scaturiti dall'utilizzo dell'abaco.

Tabella 12 – Condizioni della domanda riscontrate nelle diverse ore di punta.

Ripartizione Manovre	Svolta a destra	Attraversamento	Svolta a sinistra	Inversione a U
AM	19,2%	18,2%	62,1%	0,6%
MD	12,2%	23,6%	62,9%	1%
PM	16,7%	20,0%	61,9%	1%

Composizione Veicolare	Auto	Furgoni	Mezzi Pesanti	Bus	Moto
AM	72,4%	1,3%	1,5%	0,0%	24,8%
MD	80,1%	0,9%	1,1%	0,0%	17,9%
PM	74,0%	0,2%	1,3%	0,0%	24,4%

Tabella 13 – Condizioni limite di validità dell'abaco.

Ripartizione Manovre	Svolta a destra	Attraversamento	Svolta a sinistra	Inversione a U
Min	4,6%	24,2%	21,1%	0,1%
Max	29,4%	48,5%	61,0%	11,0%

Composizione Veicolare	Auto	Furgoni	Mezzi Pesanti	Bus	Moto
Min	90,1%	0,3%	0,2%	0,0%	4,7%
Max	93,7%	1,3%	1,9%	0,6%	8,5%

6.4. Modellizzazione dell'intersezione in ambiente VISSIM

Coerentemente con la classificazione veicolare adottata nella fase di analisi della domanda, all'interno dei modelli in VISSIM sono state rappresentate le seguenti classi di veicolo: auto, veicoli commerciali Leggeri, mezzi pesanti, bus, veicoli a due ruote.

Altro aspetto oggetto di specificazione riguarda la definizione delle distribuzioni di velocità desiderata: ad ogni flusso in ingresso sui tre rami dell'intersezione è stata associata una distribuzione relativa alla velocità desiderata in funzione delle V_0 calcolate nella fase di analisi della geometria delle intersezioni.

In particolare sono state costruite tre distribuzioni approssimate a distribuzioni di una variabile aleatoria di tipo gaussiana con media pari a 39, 57 e 42 Km/h e deviazione standard rispettivamente pari a 6,7, 7,7 e 7,5.

Discorso specifico merita la definizione dei parametri dei comportamenti di guida. Sono stati creati quattro comportamenti di arco specifici, uno valido per la circolazione sull'anello ed uno valido per gli archi e le connessioni di ciascun singolo braccio dell'intersezione.

Il modello utilizzato per la rappresentazione della rotatoria consente la ricostruzione della rete stradale e della disciplina di circolazione per cui si può tener conto dell'effettiva lunghezza dei tronchi di scambio, delle corsie d'immissione, d'uscita e di preselezione alle intersezioni, così come dei triangoli di visibilità, degli angoli tra le traiettorie conflittuali dei veicoli e dell'ampiezza delle aree di intersezione. Per le intersezioni sono stati inseriti i dati relativi al modo di risoluzione dei punti di conflitto modellato mediante l'utilizzo delle aree di conflitto.

Dall'analisi dei rilievi video sono emerse diverse peculiarità del funzionamento dell'intersezione in merito al comportamento di guida degli utenti in corrispondenza degli ingressi ed in percorrenza dell'anello della rotatoria. In particolare è stato riscontrato che in corrispondenza di tutti gli approcci talvolta si verificano ingressi sull'anello di due veicoli affiancati. I mezzi a due ruote inoltre, oltre ad effettuare manovre di sorpasso a destra e sinistra procedono, in assenza di autoveicoli, anche in gruppi di tre o quattro mezzi affiancati. Lungo l'anello la sosta è assente e la circolazione si presenta estremamente fluida con velocità basse, densità elevata ed accettazione di intervalli critici decisamente bassi in virtù della cooperazione dei veicoli con diritto di precedenza.

Per quanto riguarda le velocità sono state riscontrate e modellate tramite zone di rallentamento, velocità comprese tra 15 e 20 km/h lungo l'anello. In prossimità degli approcci, non risulta agevole la determinazione delle velocità dai video disponibili, pertanto sono state introdotte nel modello zone di rallentamento con velocità comprese tra 20 e 25 km/h per i veicoli leggeri e tra 15 e 20 km/h per i mezzi pesanti.

In Figura 17 sono riportate le schermate che mostrano la modellazione dell'intersezione:

1. assi degli archi e delle connessioni;
2. numero, larghezza e geometria delle corsie;
3. localizzazione delle aree di conflitto;
4. localizzazione delle zone di rallentamento.

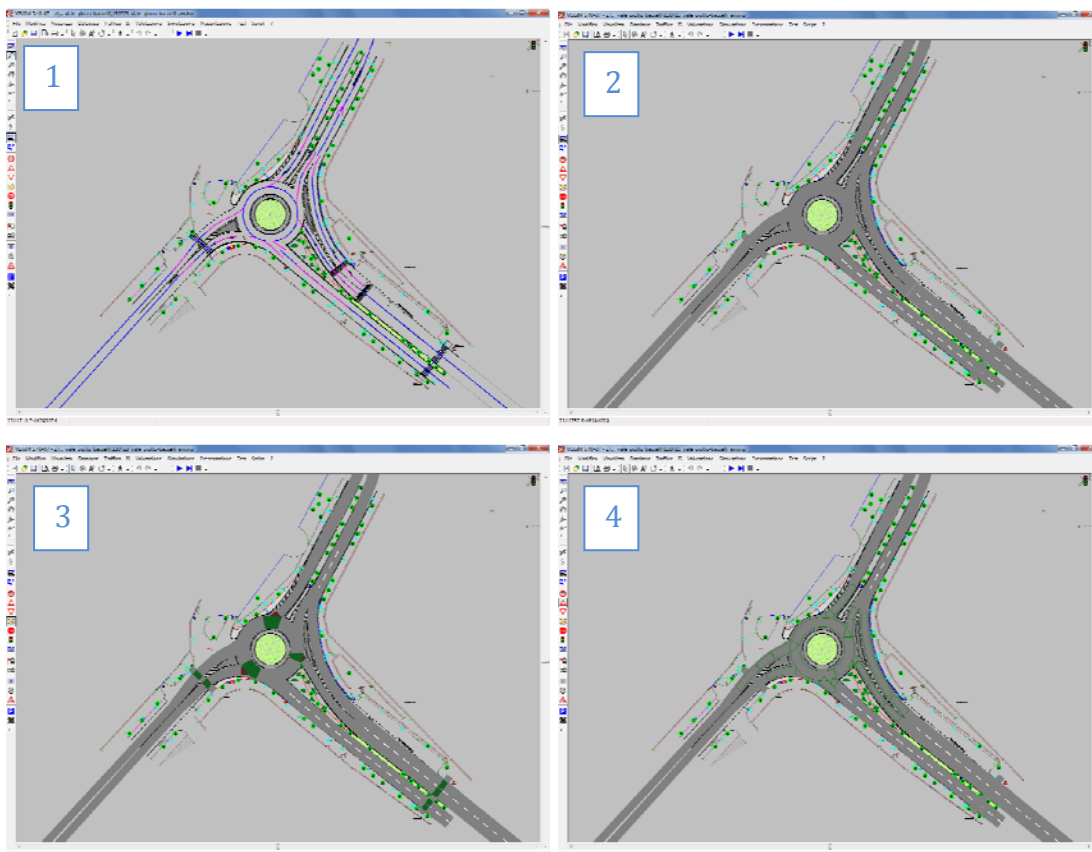


Figura 17 - Modellazione in ambiente VISSIM dell'intersezione tra viale Giotto e viale Baccelli.

6.5. Risultati delle simulazioni ed indicatori numerici

6.5.1. *Rappresentazioni grafiche delle microsimulazioni dinamiche*

Il modello di microsimulazione dinamica VISSIM permette la visualizzazione dei movimenti dei singoli veicoli sulla rete, evidenziando anche qualitativamente il formarsi di fenomeni di congestione. La sede stradale è rappresentata in grigio e viene visualizzata la segnaletica orizzontale in modo da comprendere, ove presente, la separazione tra le diverse corsie in sede corrente e in corrispondenza degli attestamenti.

I veicoli sono rappresentati con diversi colori assegnati in maniera probabilistica dal programma; le immagini riportate di seguito (dalla Figura 18 alla Figura 32) rappresentano le istantanee delle schermate video durante la microsimulazione dinamica dei modelli VISSIM.

Tali simulazioni hanno la durata di 3660 secondi, avendo simulato oltre l'ora relativa al periodo d'analisi, anche un intervallo di un minuto avente funzione di precarico della rete. Le istantanee sono state effettuate ad intervalli regolari di 15 minuti primi (per ciascuna simulazione sono state effettuate cinque istantanee: nell'istante iniziale del periodo d'analisi, al 15°, 30°, 45° e 60° minuto del periodo d'analisi).

Istantanee della micro simulazione relativa all'ora di punta del mattino (AM)

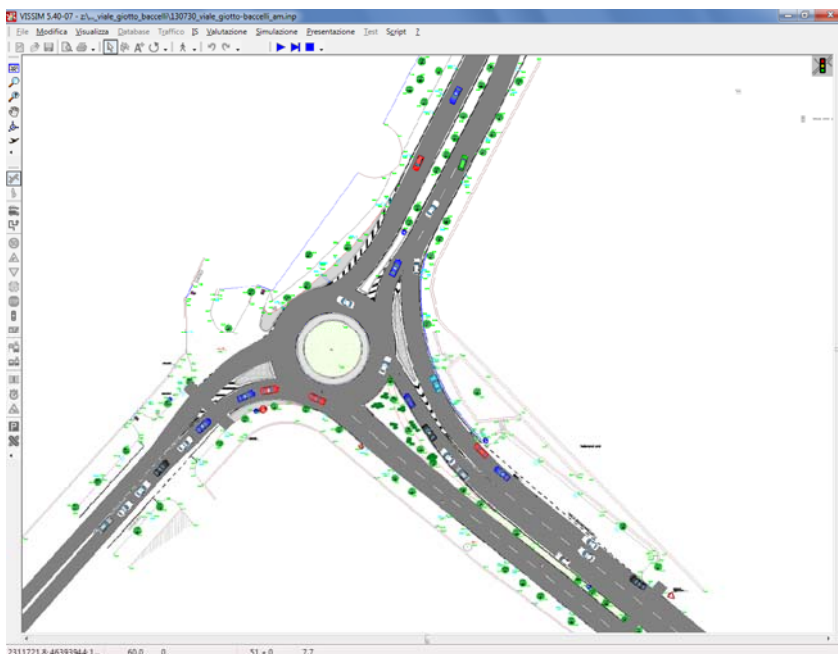


Figura 18 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mattino, istante iniziale.

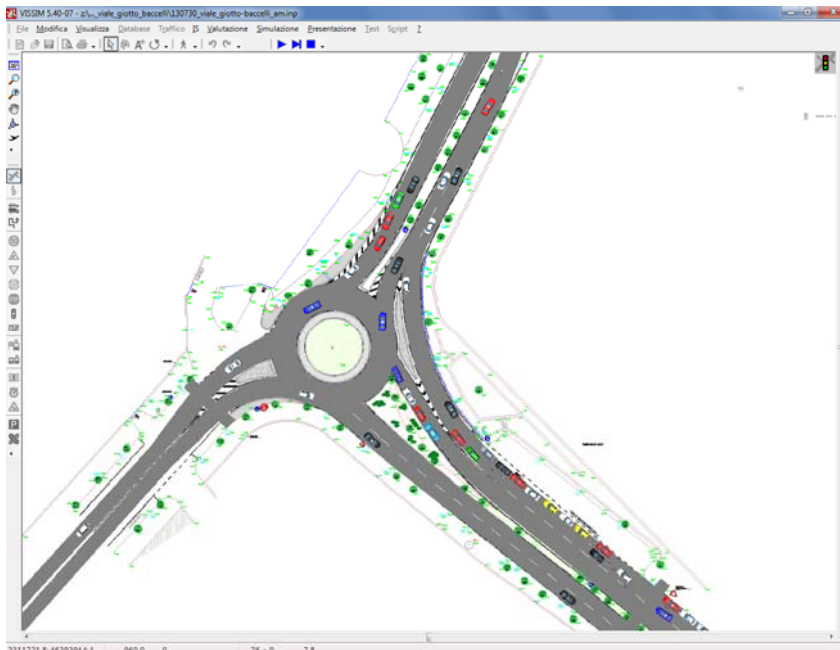


Figura 19 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mattino, 15° minuto.

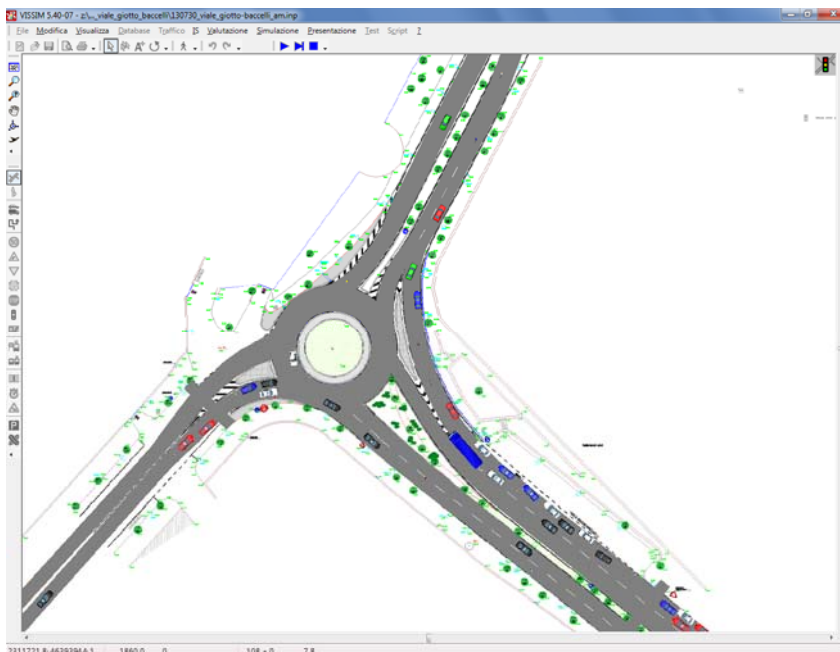


Figura 20 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mattino, 30° minuto.

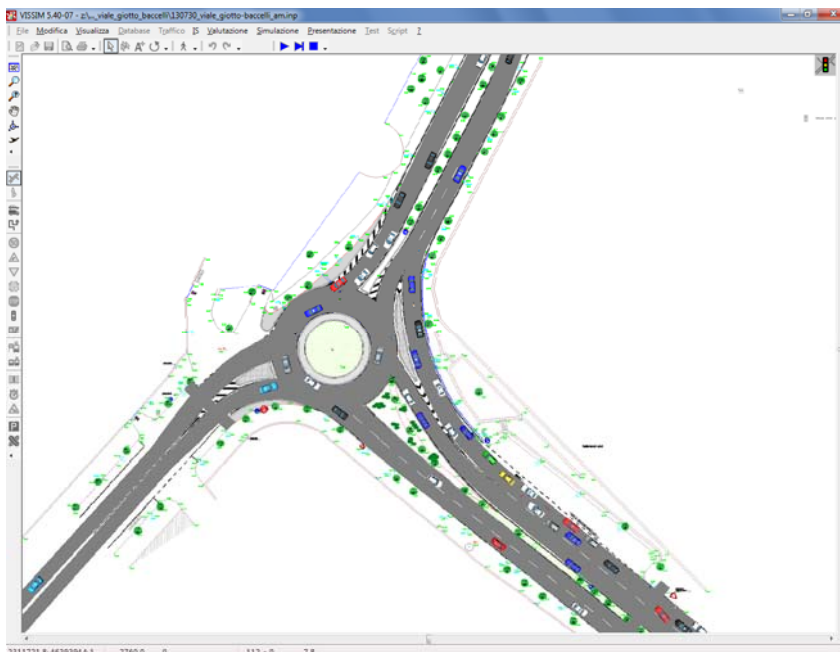


Figura 21 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Bacelli nell'ora di punta del mattino, 45° minuto.

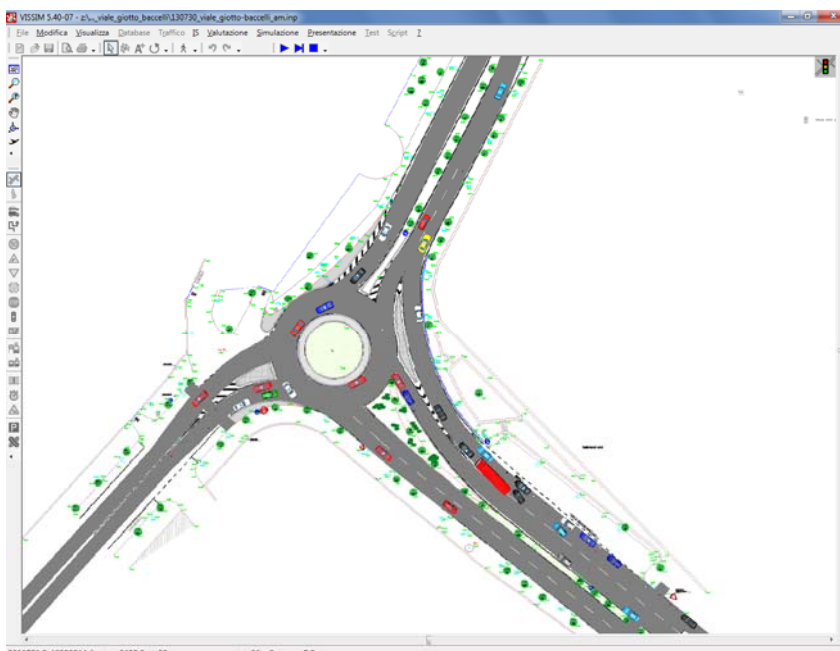


Figura 22 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Bacelli nell'ora di punta del mattino, 60° minuto.

Istantanee della micro simulazione relativa all'ora di punta del mezzodì (MD)

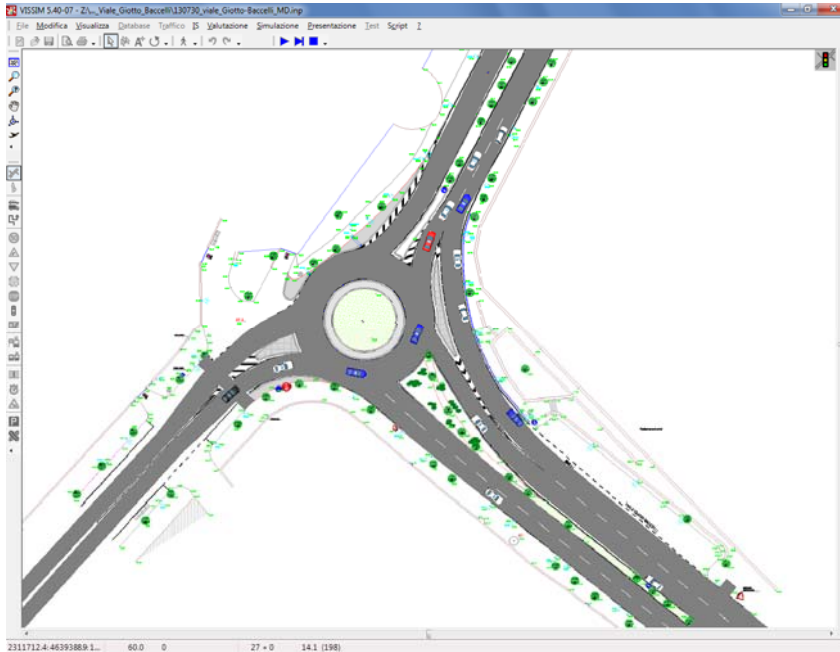


Figura 23 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mezzodì, istante iniziale.

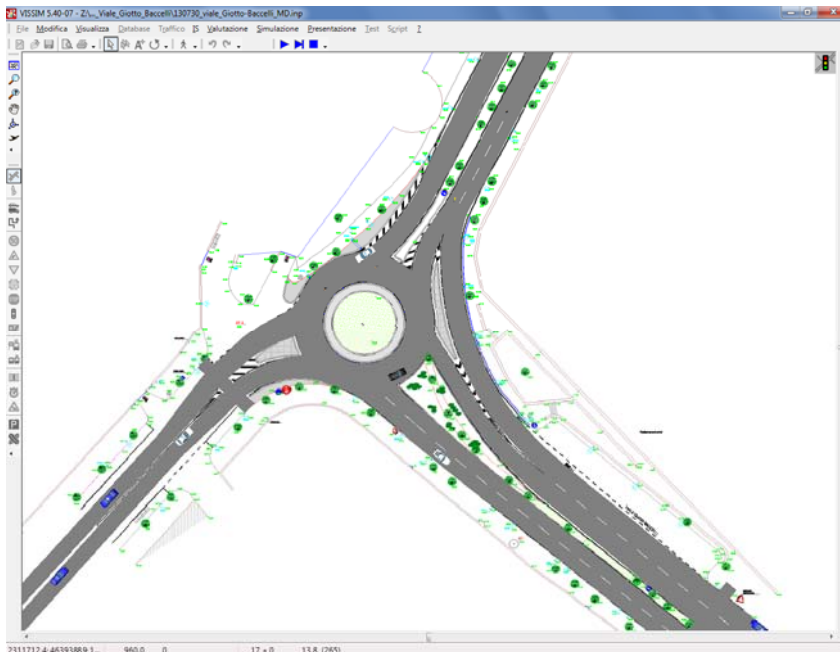


Figura 24 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mezzodì, 15° minuto.

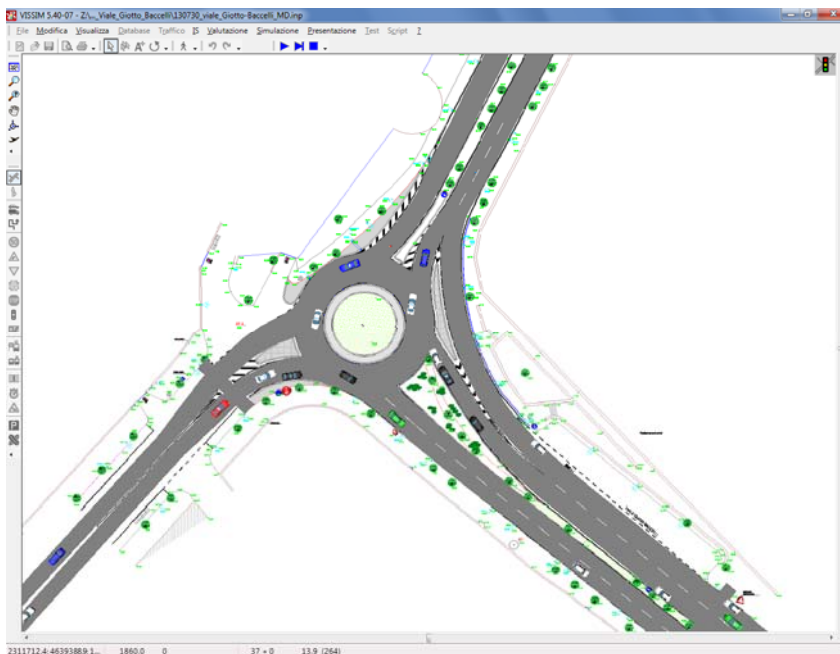


Figura 25 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mezzodì, 30° minuto.

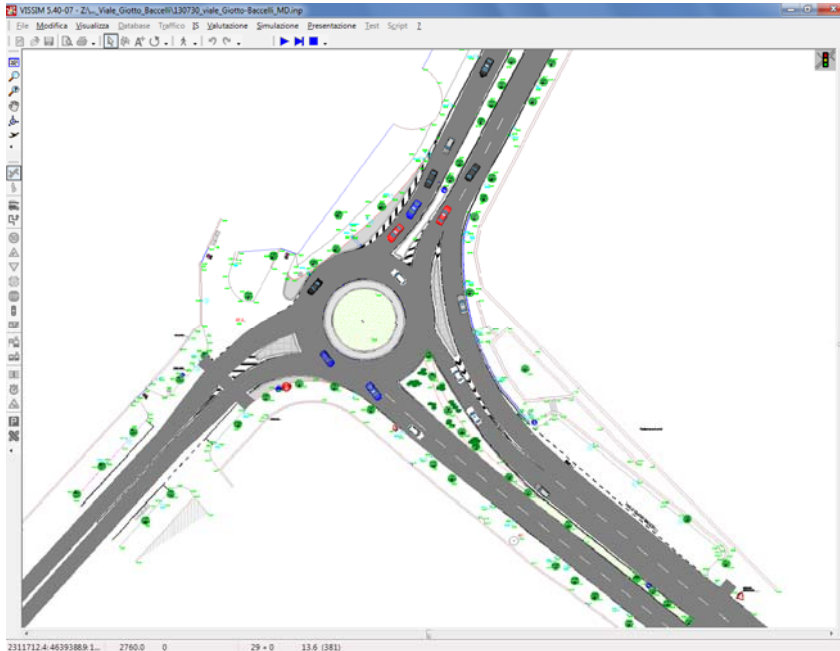


Figura 26 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mezzodì, 45° minuto.

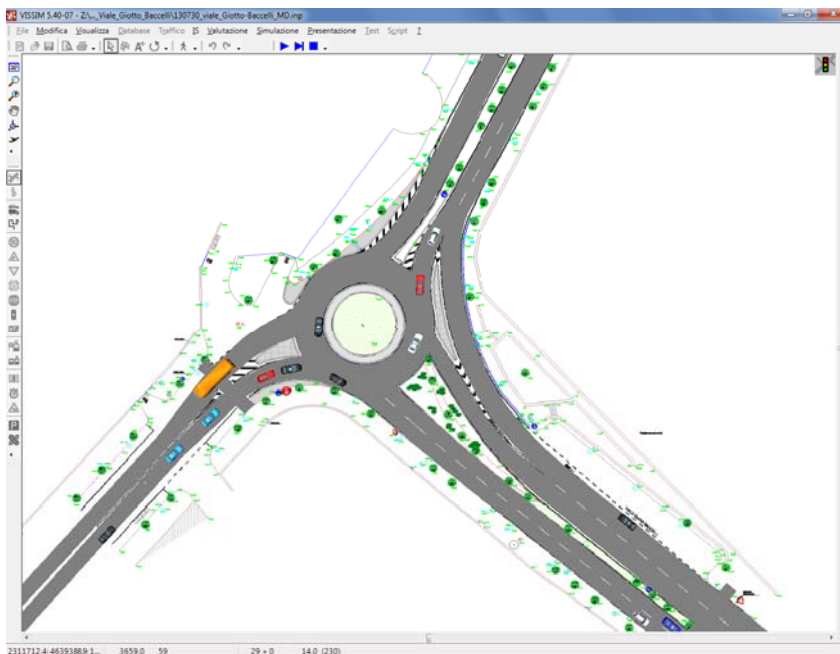


Figura 27 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del mezzodì, 60° minuto.

Istantanee della micro simulazione relativa all'ora di punta del pomeriggio (PM)

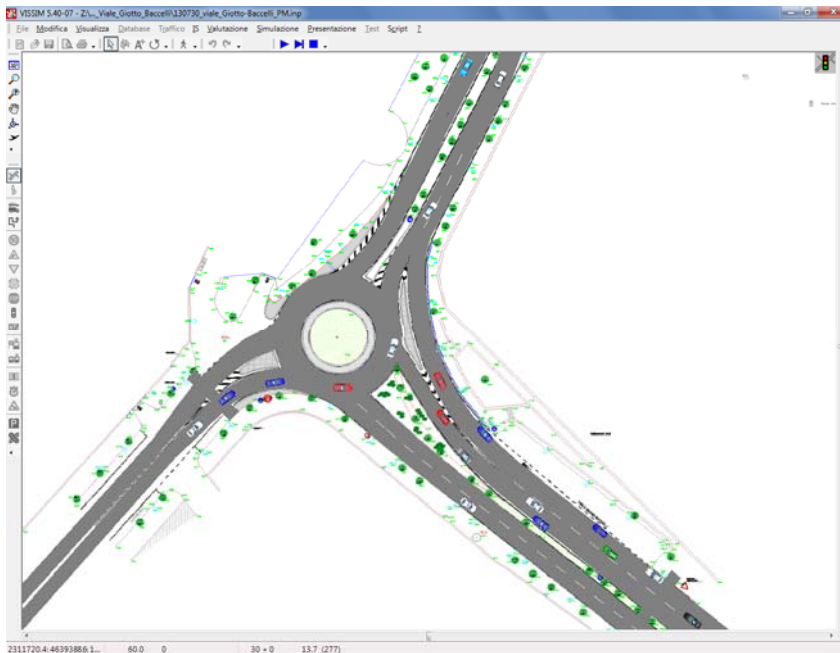


Figura 28 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del pomeriggio, istante iniziale.

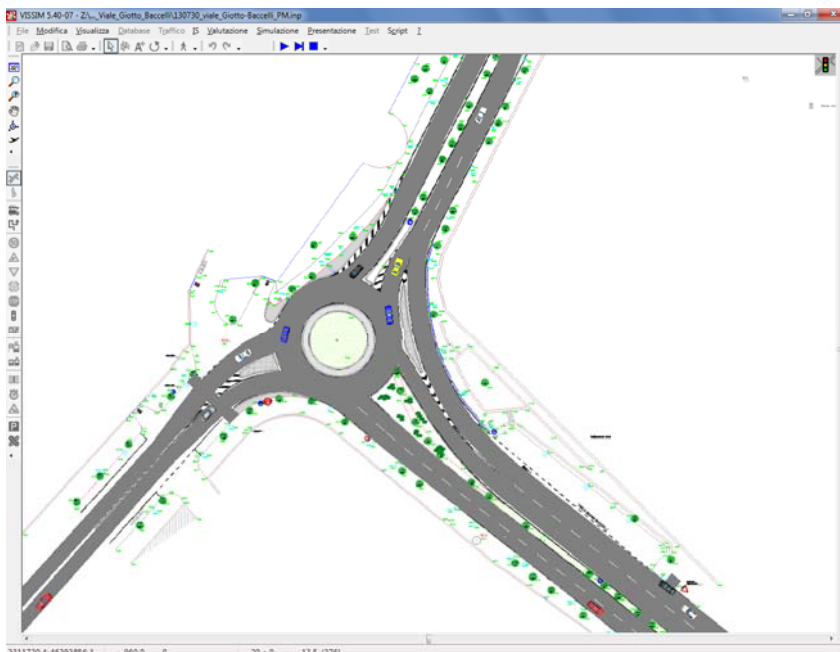


Figura 29 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del pomeriggio, 15° minuto.

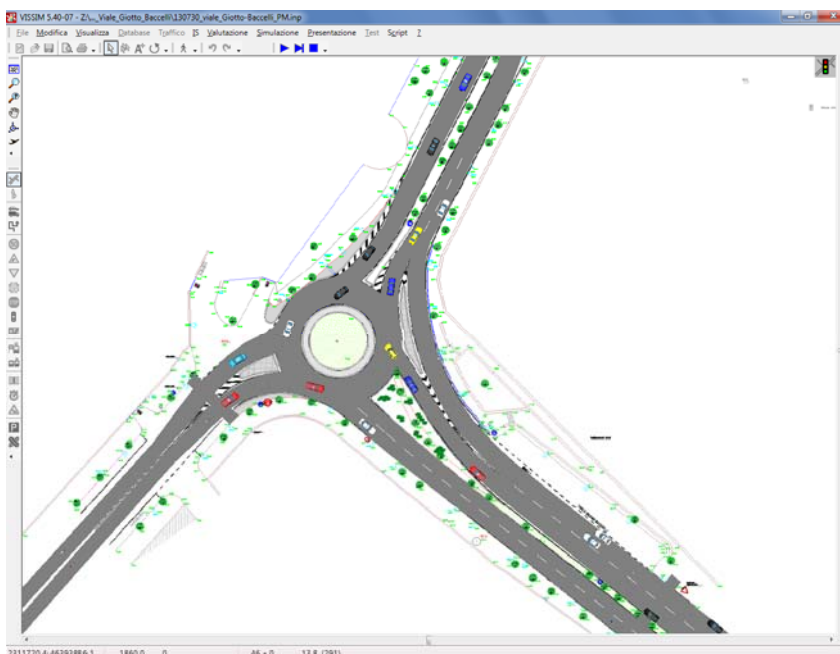


Figura 30 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del pomeriggio, 30° minuto.

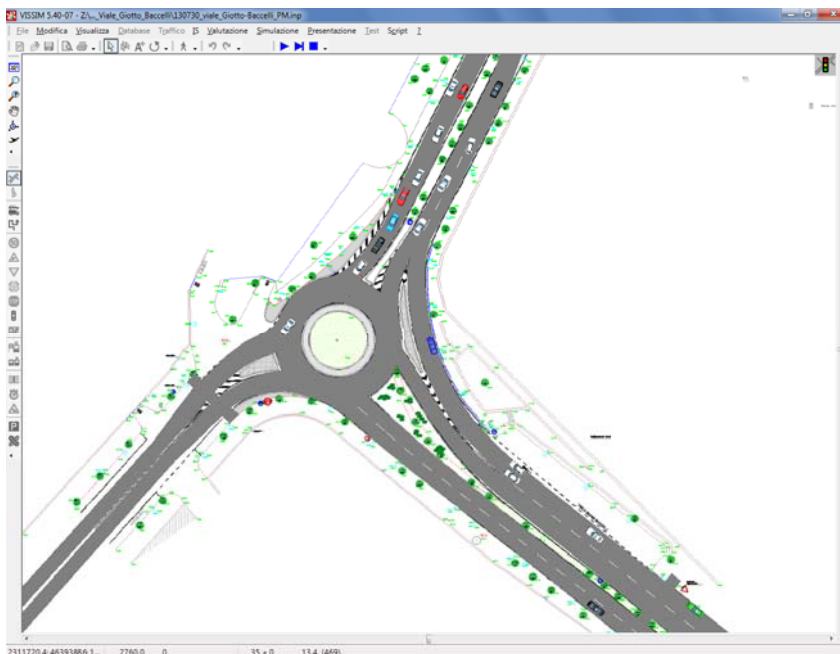


Figura 31 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del pomeriggio, 45° minuto.

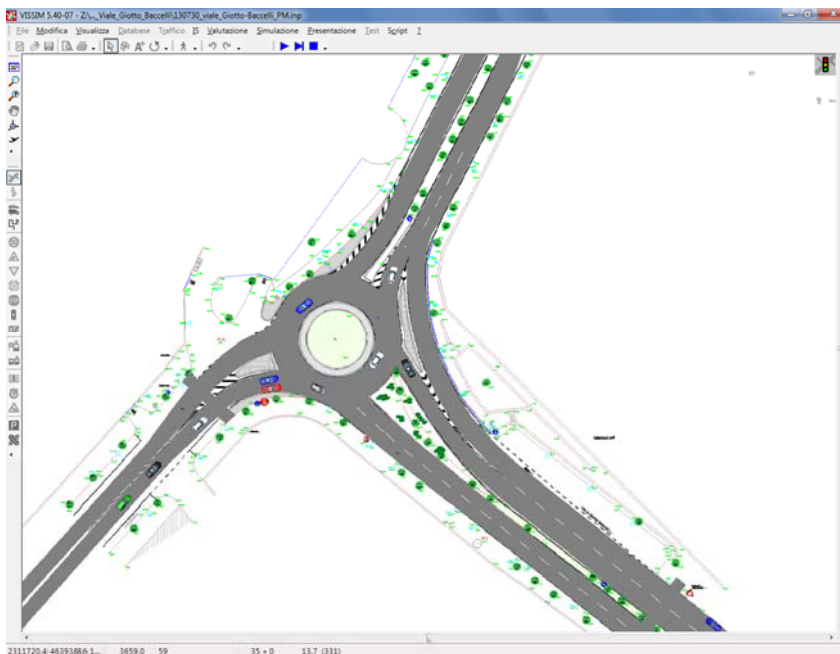


Figura 32 - Microsimulazione dinamica di viale Giotto - viale Baccelli nell'ora di punta del pomeriggio, 60° minuto.

6.5.2. Indicatori numerici

Nelle pagine seguenti sono riportati indicatori numerici sintetici dei risultati delle simulazioni che descrivono le performances dell'intersezione.

Tutti i rapporti numerici presenti in questa sezione, sono stati calcolati nell'intervallo di simulazione da 60 a 3660 secondi, escludendo l'intervallo iniziale (0-60 sec) poiché non rappresentativo. Infatti come accennato tale intervallo iniziale serve al modello per “caricare” in rete i flussi in ingresso e pertanto risulta poco significativo ai fini delle analisi delle ore di punta.

E' possibile valutare il livello di servizio delle intersezioni analizzando tutta una serie di indicatori forniti direttamente dal modello. Di seguito si riportano gli indicatori che permettono di valutare il livello di servizio a partire da informazioni relative a specifici itinerari o sezioni di rilievo della rete:

Gli indicatori, riportati nella Tabella 15 e nella Tabella 16, riguardano grandezze calcolate per itinerari e rappresentati sotto forma di matrici, tali indicatori sono:

- ritardo [s] rispetto al tempo di percorrenza a rete scarica;
- volume totale dei veicoli che si muovono su un itinerario;
- Il livello di servizio (LOS) calcolato come descritto di seguito.

I livelli di servizio sono definiti in funzione di parametri direttamente connessi alla qualità della circolazione. In base a tali parametri, i livelli sono distinti da 6 lettere (da A a F) in ordine decrescente di qualità di circolazione. Nello specifico il LOS è stato espresso in funzione del ritardo medio e del rapporto tra flusso e capacità. La Tabella 14 riporta i valori soglia che definiscono i diversi livelli di servizio.

Tabella 14 – Definizione del Livello di Servizio.

Ritardo medio [s]	LOS
≤ 10	A
≤ 15	B
≤ 25	C
≤ 45	D
> 45	E
Flusso > Capacità	F

In Figura 33 sono indicate le sezioni che definiscono gli itinerari. Tale scelta è stata effettuata tenendo conto della presenza di altre intersezioni a valle e a monte dell'intersezione in

analisi e tenendo conto delle variazioni di condizioni d'uso delle corsie e delle carreggiate specialmente in relazione alla presenza della corsia per la svolta dedicata.

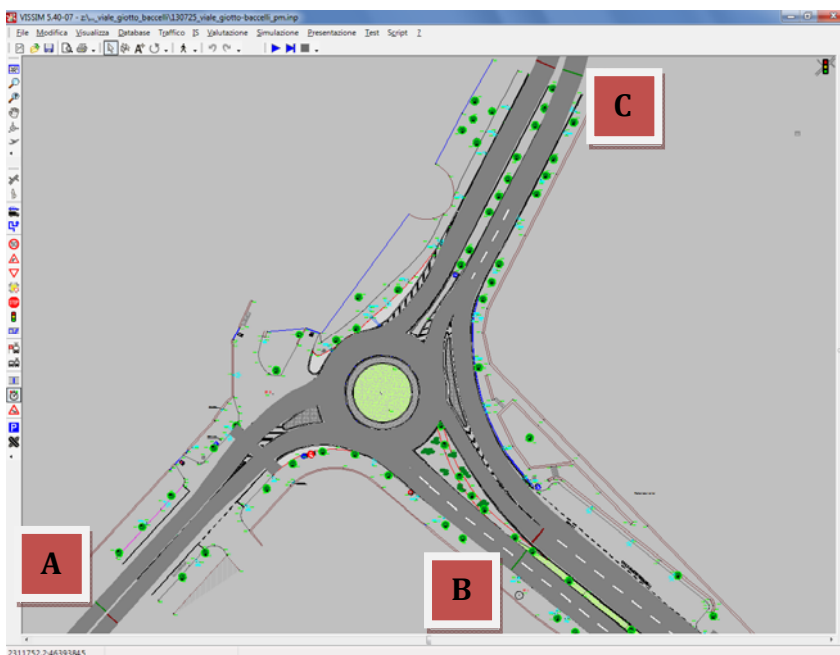


Figura 33 - Localizzazione delle sezioni di rilievo per la rotatoria di viale Giotto - viale Baccelli.

Tabella 15 - Indicatori numerici relativi alle simulazioni delle ore di punta.

Matrici dei ritardi [s]

		AM		
		A	B	C
A		18	24	32
B		10	14	11
C		14	12	0

		MD		
		A	B	C
A		7	10	5
B		3	3	3
C		4	3	4

		PM		
		A	B	C
A		6	10	7
B		6	2	3
C		5	4	6

Matrici dei volumi [veicoli/ora]

		AM		
		A	B	C
A		44	327	5
B		432	2	436
C		100	968	0

		MD		
		A	B	C
A		29	284	5
B		301	4	82
C		90	590	4

		PM		
		A	B	C
A		37	256	8
B		387	3	123
C		81	621	5

Tabella 16 - Indicatori numerici relativi ai singoli approcci dell'intersezione per le simulazioni delle ore di punta.

Approccio	AM	
	Ritardo medio [s]	L.O.S.
A	23	C
B	11	B
C	12	B
Intersezione	14	B

MD	
Ritardo medio [s]	L.O.S.
9	A
3	A
3	A
5	A

PM	
Ritardo medio [s]	L.O.S.
10	A
5	A
4	A
6	A

6.6. Utilizzo dell'abaco per la determinazione dei ritardi e dei livelli di servizio

6.6.1. Risultati forniti dall'utilizzo dell'abaco in forma grafica

Tenendo conto dei fattori di equivalenza per la trasformazione del traffico in veicoli equivalenti, e di quanto detto al punto 6.3.1. a proposito dell'utilizzo della corsia di svolta dedicata, i livelli di domanda di traffico che interessano l'intersezione (più precisamente il volume orario globale inteso come vetture che si immettono sull'anello della rotatoria) espressi in veicoli equivalenti per ora risultano essere:

- Ora di punta del mattino 08.15 - 09.15 (AM): 2'040 ~ 2'000 veic.eq./ora;
- Ora di punta del mezzodì 13.15 - 14.15 (MD): 1'528 ~ 1'500 veic.eq./ora;
- Ora di punta del pomeriggio 17.30 - 18.30 (PM): 1'718 ~ 1'700 veic.eq./ora.

Per tali valori di domanda, considerando che il raggio esterno della rotatoria è pari a 16 metri, l'utilizzo dell'abaco in forma grafica (cfr. Figura 34) fornisce i seguenti valori di ritardo medio per veicolo (i valori danno luogo ad intervalli assumendo come margine di tolleranza l'errore medio proprio dell'abaco pari a 5,9s):

- Ora di punta del mattino: 14,5 s, corrispondente all'intervallo 8,6s ÷ 20,4s
- Ora di punta del mezzodì: 5,0 s, corrispondente all'intervallo 0s ÷ 10,9s
- Ora di punta del pomeriggio: 8,9 s, corrispondente all'intervallo 3,1s ÷ 14,9s.

Per l'ora di punta del mezzodì, caratterizzata da una domanda oraria di circa 1'500 veicoli equivalenti/ora che è più bassa del limite inferiore dell'abaco è stato assunto come valore del ritardo medio relativo, un valore di ritardo minimo convenzionale pari a 5 secondi.

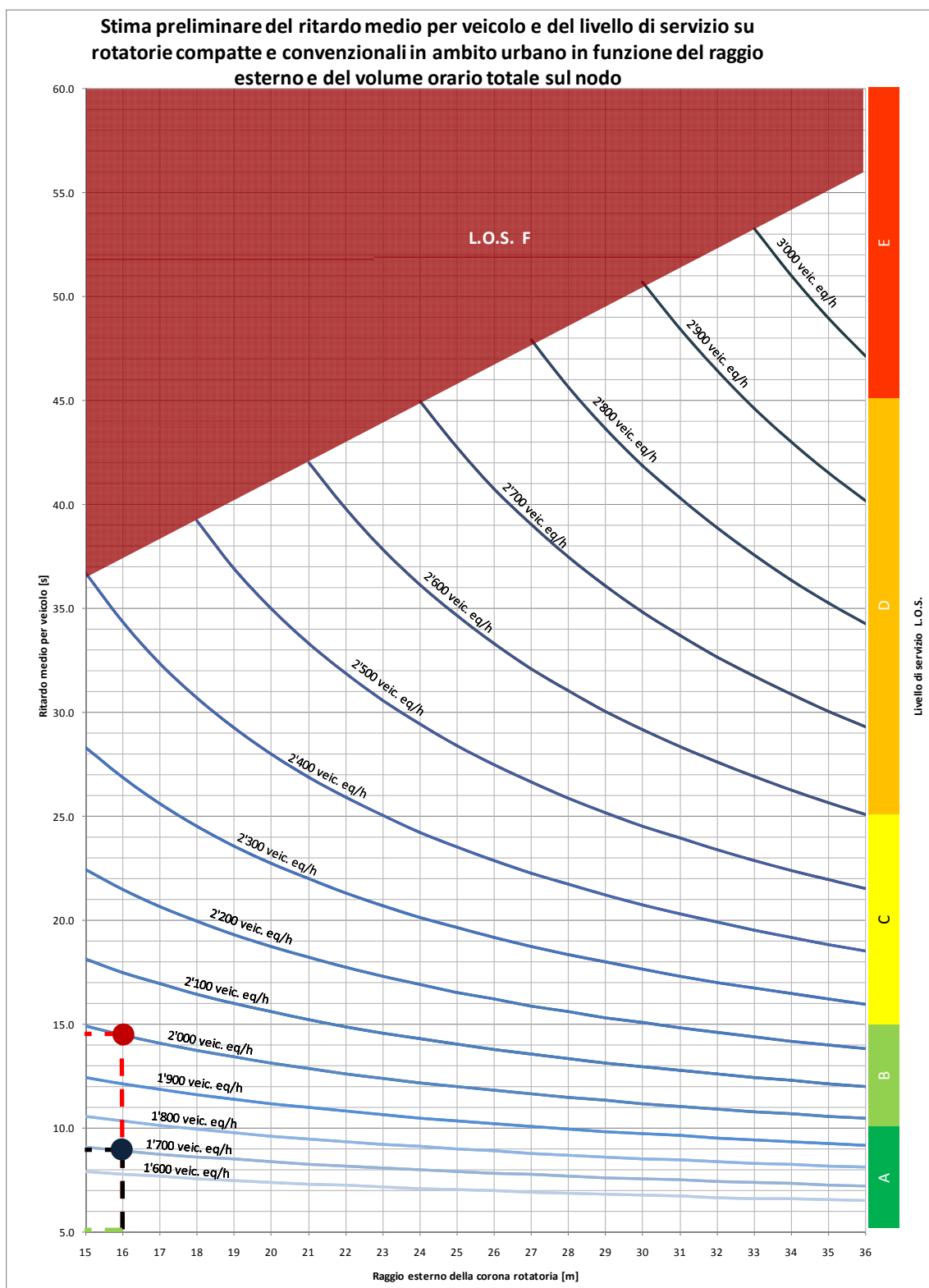


Figura 34 - Utilizzo dell'abaco in forma grafica per la determinazione dei ritardi medi e dei livelli di servizio.

6.6.2. Risultati forniti dall'utilizzo dell'abaco in forma tabellare

Di seguito, in Figura 35, si riporta l'abaco in forma tabellare, nel quale ad un determinato valore del raggio esterno espresso in metri e ad un determinato valore del livello di domanda globale interessante l'intersezione espresso in veicoli equivalenti/ora, corrisponde il relativo livello di servizio.

Volume orario totale [Veic. Eq./h] - Raggio esterno [m]	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
3'200	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
3'100	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
3'000	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	E	E	E	E	E	E	E
2'900	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	E	E	E	E	D	D	D	D
2'800	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	E	D	D	D	D	D	D	D
2'700	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
2'600	F	F	F	F	F	F	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
2'500	E	E	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C
2'400	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2'300	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2'200	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B
2'100	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
→ 2'000	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
1'900	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1'800	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
→ 1'700	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1'600	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Figura 35 - Utilizzo dell'abaco in forma tabellare per la determinazione dei livelli di servizio.

Com'è immediato osservare in corrispondenza del raggio esterno pari a 16 metri si ha, in corrispondenza dei livelli di domanda che caratterizzano la rotatoria nelle diverse ore di punta, i seguenti livelli di servizio:

- volume orario totale = 2'000 veic.eq./ora → LOS = B;
- volume orario totale = 1'700 e 1'500 veic.eq./ora → LOS = A.

6.7. Verifica dell'abaco

Nella Tabella 17 si riportano i ritardi ottenuti dalle tre microsimulazione effettuate, i ritardi ottenuti dall'utilizzo dell'abaco, i relativi intervalli considerando un errore medio di 5,9s.

La buona corrispondenza tra i ritardi medi forniti dall'abaco ed i ritardi medi ottenuti tramite le microsimulazioni dinamiche è dimostrata dal coefficiente di correlazione che sui tre punti determinati è pari a 94%. L'errore medio è di soli 3,5 secondi.

Tabella 17 - Confronto tra i ritardi ottenuti da microsimulazione con quelli indicati dall'abaco.

Ritardi da microsimulazione [s]	Ritardi da abaco [s]	Intervallo da abaco [s]
13,6	14,5	8,6 - 20,4
4,7	5,0	0 - 10,9
5,5	8,9	3,1 - 14,8

Grado di correlazione	Errore medio [s]
0,94	3,5

I ritardi da microsimulazione si avvicinano moltissimo ai ritardi stimati tramite l'abaco, e rientrano tutti nell'intervallo ottenuto dai valori dell'abaco sottraendo e aggiungendo 5,9 secondi.

Inoltre, i ritardi ottenuti dalle microsimulazioni e i ritardi stimati tramite l'impiego dell'abaco conducono ai medesimi livelli di servizio.

In conclusione, si può considerare pienamente soddisfatta la verifica sulla funzionalità dell'abaco redatto.