

ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI SICUREZZA DELLE MINI-ROTATORIE. DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI SERVIZIO ALLARGATO

Salvatore Leonardi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Università degli Studi di Catania

Viale Andrea Doria 6, 95125 Catania

Tel: +39 095.7382202 - Fax: +39.095.7382247 - E-mail: sleona@dica.unict.it

Giuseppina Pappalardo

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Università degli Studi di Catania

Viale Andrea Doria 6, 95125 Catania

Tel: +39 095.7382202 - Fax: +39.095.7382247 - E-mail: giusy.pap@dica.unict.it

SOMMARIO

Le rotatorie e, in particolare, le mini-rotatorie presenti in ambito urbano, manifestano una peculiarità di notevole rilievo: il miglioramento delle caratteristiche di sicurezza rispetto alle altre tipologie di intersezione (semaforizzate o regolate dai segnali di stop o di dare precedenza); tale incremento di sicurezza, evidenziato dai dati di incidentalità relativi alle situazioni “prima” e “dopo” la realizzazione della rotatoria, è principalmente imputabile alle basse velocità indotte dalla conformazione dell’incrocio. Molteplici studi e indagini sperimentali confermano, inoltre, come le mini-rotatorie presentino alcune prerogative, in termini di cause di incidentalità, strettamente legate sia alla geometria complessiva dell’intersezione, che all’entità dei flussi in immissione ed in circolo. Un ruolo non trascurabile è poi quello delle velocità operative sui rami d’accesso.

Con il presente studio, si vuole proporre una metodologia di validità generale che, basandosi su una serie di parametri di input (geometria, portate veicolari, velocità operative), permetta di caratterizzare le prestazioni, in termini di sicurezza, delle mini-rotatorie. In particolare si arriverà a definire il concetto di Livello di Servizio Allargato, utile a quantificare, attraverso opportuni indicatori forniti in output, il livello di funzionalità complessivo delle rotatorie (sia nei termini della qualità del servizio di trasporto che in quelli del livello di sicurezza).

ABSTRACT

Roundabouts and, especially, urban mini-roundabouts, present an important characteristic: the improvement of the safety characteristics with respect to other intersection typologies (signalized or stop – control); the safety increase, in the period "before" and "after" roundabout, is principally due to lower speeds, induced by the crossroad configuration. Moreover, many experimental studies confirm that the mini-roundabouts present some prerogatives bound both to the total geometry of the intersection and the entity of the entering and circulating flows. Then operative speeds on the approach lanes have an important role.

In this paper, we want to propose a general methodology which, basing on a series of inputs (geometry, vehicular flows, operative speeds), allow to characterize the performances, in terms of safety, of the mini-roundabouts. In particular we arrive to define the concept of Level of Widened Service, useful to quantify, through opportune outputs, the total functionality level of the roundabouts (transport service quality and safety level alike).

1. INTRODUZIONE

La valutazione della sicurezza delle intersezioni stradali è un problema ricorrente e determinante per stabilire le tecniche di intervento per la manutenzione, nonché per orientare le scelte progettuali da mettere in atto per le infrastrutture di nuova realizzazione.

Il confronto tra le intersezioni regolate con precedenza o con impianto semaforico e quelle regolamentate dalla circolazione rotatoria rappresenta una delle questioni che, a tutt'oggi, devono ancora essere chiarite e risolte. L'esperienza italiana, in tal senso, è ancora troppo limitata nel tempo per poter fornire giudizi definitivi sui reali vantaggi, in termini di sicurezza, delle rotatorie rispetto alle altre tipologie di incrocio.

In ambito internazionale, dove sono già state condotte rigorose indagini di tipo before-after, esiste già una discreta mole di dati che sembra evidenziare come le rotatorie si rivelino particolarmente efficaci nella riduzione del livello di rischio associato alla loro percorribilità [1].

Si osservi poi che, sia la letteratura nazionale che quella internazionale, adducono ormai da tempo una serie di motivazioni che tendono a mettere in risalto le prestazioni in termini di sicurezza delle rotatorie, prima fra tutte la bassa velocità dei veicoli imposta dalle stesse caratteristiche progettuali.

In tale contesto si inquadra l'obiettivo della presente ricerca, ossia quello di introdurre un parametro in grado di quantificare il livello di sicurezza potenzialmente garantito da un particolare tipo di rotatoria ormai di frequente "impiego" nei contesti urbani: ci si sta riferendo alle cosiddette mini-rotatorie le quali, differenziandosi dalle rotatorie propriamente dette per le caratteristiche funzionali indotte dalle dimensioni ridotte del diametro esterno, presentano proprie peculiarità anche per ciò che concerne gli scenari di sicurezza offerti alle varie categorie di utenti (automobilisti, ciclisti, pedoni, ecc.).

Con il presente contributo si intende creare i presupposti per espandere il concetto di Livello di servizio fino al punto da poter mettere in conto anche le prestazioni di sicurezza delle mini-rotatorie. Si vuole cioè contribuire alla costruzione di quello che alcuni autori [2] definiscono Livello di Servizio Allargato e che possiamo immaginare come una sorta di "scatola virtuale" contenente i diversi strumenti utili alla caratterizzazione delle performance offerte dai vari componenti la rete stradale.

2. MODELLI PREVISIONALI PER LA STIMA DEGLI INCIDENTI SULLE ROTATORIE

In letteratura sono presenti molti modelli che permettono la previsione degli incidenti sia sui tronchi che sulle intersezioni di una rete stradale. Tali modelli richiedono, seppur in base a diverse formulazioni, due categorie di parametri di input: i flussi di traffico e le caratteristiche geometriche degli elementi che definiscono il ramo o il nodo stradale. Riguardo specificatamente i modelli per la stima dell'incidentalità sulle intersezioni stradali, si deve notare come gran parte di essi riguardi le intersezioni a raso (semaforizzate e non), mentre risultano ancora pochi i modelli tarati ad hoc per le rotatorie.

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

Si tratta di un modello di origine sperimentale, basato sul valore del traffico giornaliero medio (TGM), che consente di stimare il numero di incidenti mortali e con feriti (A) su ogni ramo di accesso alla rotatoria.

La formulazione proposta da Maycock ed Hall si presenta sotto la seguente forma:

$$A = K \cdot Q_e^\alpha \cdot Q_c^\beta \cdot e^{\sum(b_i \cdot X_i)} \quad (1)$$

dove:

- K = coefficiente da stimare con una regressione;

- α, β = coefficienti da stimare sulla base del flusso;
- Q_e = flusso entrante (TGM);
- Q_c = flusso uscente (TGM);
- b_i = coefficienti da stimare tramite regressioni;
- X_i = variabili geometriche.

I risultati ottenuti con questo modello indicano nella larghezza dell'ingresso ed in quella dell'anello i fattori che influenzano maggiormente la sicurezza: in particolare, ampliando contemporaneamente la dimensione dell'entrata e quella dell'anello, si incrementa la frequenza degli incidenti [4].

Un modello più recente, specifico per la previsione degli incidenti sulle mini-rotatorie in ambito urbano, è quello di Kennedy, Hall e Barnard (1997). Anche questo è un modello di origine sperimentale che si riferisce agli incidenti tra i veicoli in entrata e quelli circolanti sull'anello.

L'espressione analitica di tale modello è formalmente identica alla (1). Anche i risultati forniti dal modello sembrano in accordo con quanto già trovato da Maycock ed Hall per le rotatorie di raggio elevato [5].

Un altro modello analitico per la stima degli incidenti sulle rotatorie è quello di Arndt e Troutbeck (1995), affinato successivamente dallo stesso Arndt [6], [3]. 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.

Le formulazioni proposte da Arndt consentono di stimare, per un periodo di riferimento di un anno, il numero sinistri associato ad ognuno dei sei seguenti tipi di incidenti:

- 1) incidenti relativi al veicolo isolato ($A_{sp} + A_{sa}$)
- 2) tamponamenti agli accessi (A_r);
- 3) urti tra veicoli entranti e veicoli circolanti (A_e);
- 4) urti tra veicoli uscenti e veicoli circolanti (A_d);
- 5) urti laterali (A_{SS});
- 6) altri tipi di incidenti che possono verificarsi sulle rotatorie (A_l).

Tale modello, pur essendo fondato su basi prettamente teoriche, ha fornito, laddove è stato applicato, risultati molto vicini a quelli reali; ciò ha indotto il presente gruppo di ricerca ad utilizzarlo per la procedura di valutazione del “Livello di Servizio Allargato”. La conferma della validità della nostra scelta ci è stata confermata quando, dopo l’applicazione delle relazioni proposte da Arndt, si è visto che gli output forniti si adattavano bene a simulare gli scenari incidentali delle mini-rotatorie.

Si rimanda agli articoli citati in bibliografia [6], [3], per il dettaglio della metodologia proposta da Arndt. In questo contesto ci limitiamo ad osservare che il modello in questione, mettendo in debito conto le traiettorie verosimilmente percorse dai veicoli, riesce a prevedere i possibili conflitti che possono verificarsi in quelle tipologie di intersezioni (per l’appunto, le mini-rotatorie) caratterizzate da curvature estremamente elevate.

3. ELABORAZIONE DELLA METODOLOGIA PER LA DETERMINAZIONE DEL LIVELLO DI SERVIZIO ALLARGATO

Il primo punto della procedura consiste nella valutazione di un indicatore sintetico adeguato a descrivere compiutamente il grado di sicurezza che può essere associato ad una mini-rotatoria.

In virtù delle considerazioni svolte ai paragrafi precedenti, si è ritenuto opportuno far riferimento al numero complessivo di incidenti attesi in un anno, valutato in base al modello teorico elaborato da Arndt.

Si è definito pertanto l’Indice di incidentalità (A), nel seguente modo:

$$A = A_{sp} + A_{sa} + A_r + A_e + A_d + A_{SS} + A_l \quad (2)$$

dove i sette addendi presenti al secondo membro sono quantificabili a mezzo delle relazioni proposte da Arndt nel suo modello [6], [3].

Per quel che riguarda la determinazione numerica delle diverse quantità che definiscono l’Indice di incidentalità, occorre riferirsi alle tre categorie di input del modello, ossia:

- la geometria delle mini-rotatorie e le conseguenti traiettorie di riferimento;
- i flussi veicolari (in termini di TGM);
- le velocità operative (riferite all’85° percentile).

Riguardo ai parametri geometrici, ricordiamo innanzitutto che, in funzione delle dimensioni della corona giratoria, le mini-rotatorie si possono suddividere nelle tre seguenti classi funzionali [7]:

➤ *Mini-rotatoria a isola centrale sormontabile*: diametro esterno da 14 a 20 metri.

➤ *Mini-rotatoria a isola centrale semi-sormontabile o non sormontabile*: diametro esterno da 18 a 24 metri.

➤ *Mini-rotatoria compatta*: diametro esterno da 24 a 35 metri.

Nell'ottica di una metodologia impostata per avere validità generale, si è previsto di valutare l'Indice di incidentalità (A) per un insieme di rotatorie che inglobasse completamente l'intervallo di appartenenza delle mini-rotatorie. In particolare:

- si sono scelte configurazioni geometriche caratterizzate da rotatorie a quattro rami disposti simmetricamente;
- si sono adottati raggi esterni variabili entro il range tipico delle mini-rotatorie (7 m, 8 m, 9 m, 10 m, 11 m, 12 m, 13 m, 14 m, 15 m, 16 m, 17.5 m);
- le conformazioni degli accessi sono state di volta in volta variate, in funzione del raggio prescelto per la corona giratoria, in modo tale che fossero sempre garantiti raggi di deflessione delle traiettorie veicolari (sia in ingresso che nella circolazione rotatoria) coerenti con le velocità previste;
- si sono scelte due configurazioni differenti in relazione al numero di corsie sull'anello: la corona giratoria ad una sola corsia e quella a due corsie. Nel caso di rotatoria a due corsie, la larghezza di ognuna di esse è stata scelta in funzione dello spazio disponibile sull'anello, adottando comunque un modulo minimo di 3.75 m per corsia; conseguentemente, lo studio delle mini-rotatorie a due corsie è stato possibile a partire da raggi esterni pari a 11 m.

Per quel che concerne i dati di traffico si è previsto di:

- riferirsi ad un flusso, in termini di TGM, complessivamente circolante su ogni mini-rotatoria, variabile entro un intervallo compreso tra 5000 e 50000 veicoli/giorno, con step successivi di 5000 veicoli/giorno (in totale: dieci flussi di riferimento);
- suddividere equamente ciascun flusso di riferimento sui quattro bracci che compongono l'intersezione. Ad esempio, se il TGM di riferimento è pari a 5000 veicoli/giorno, a ciascun ramo verrà associato un flusso di 1250 veicoli/giorno;
- ripartire uniformemente il flusso gravante su ciascun ramo, su ognuna delle tre possibili manovre (attraversamento, svolta a destra, svolta a sinistra). In corrispondenza di un flusso per singolo braccio pari a 1250 veicoli/giorno, si avrà pertanto, per ogni manovra, un valore di TGM uguale 416 veicoli/giorno.

Per quanto riguarda, infine, le velocità operative sui rami d'ingresso, si sono scelti due valori di riferimento, ossia:

- ◆ 40 km/h: limite generalmente imposto dal Codice della Strada per la percorribilità in ambito urbano;
- ◆ 50 km/h: velocità adottata con maggiore frequenza dagli utenti, nell'approccio alle mini-rotatorie realmente presenti nei contesti urbani.

Si sono adottati, inoltre, i seguenti criteri:

- ciascun valore della velocità di riferimento è stata attribuito, senza variazioni, a tutti e quattro i rami di accesso della mini-rotatoria presa in considerazione. Non sono state previste, cioè, disomogeneità nelle velocità di immissione;
- le variazioni delle velocità operative, a partire dal valore d'ingresso, sono state calcolate, in funzione della conformazione delle varie traiettorie veicolari, coerentemente con la procedura proposta da Arndt.

Dall'analisi della tabella 1, che riporta i parametri numerici inerenti all'iter procedurale esposto fino a questo punto, si evince che il numero complessivo di elaborazioni è stato pari a 360.

Numero di rotatorie [R]		Numero di flussi di riferimento ^(a) [F]	Numero di velocità di riferimento ^(b) [V]	Numero di elaborazioni [E] = [R] · [F] · [V]
<i>A 1 corsia</i>	11	10	2	220
<i>A 2 corsie</i>	7	10	2	140
<i>Elaborazioni complessive = 360</i>				

^(a) Flussi di riferimento: da 5000 a 50000 veicoli/giorno ad intervalli di 5000 veicoli/giorno

^(b) Velocità di riferimento: 40 km/h e 50 km/h

Tabella 1. Parametri di sintesi della procedura adottata

I risultati delle elaborazioni sono stati organizzati su quattro diagrammi riportati nelle figure 1, 2, 3 e 4. Tali diagrammi sono relativi, rispettivamente, a:

- gli Indici di incidentalità associati alle rotatorie ad una corsia, con velocità di riferimento pari a 40 km/h;
- gli Indici di incidentalità corrispondenti alle rotatorie a due corsie sull'anello, con velocità di riferimento pari a 40 km/h;
- gli Indici di incidentalità relativi alle rotatorie ad una corsia, con velocità di riferimento pari a 50 km/h;
- gli Indice di incidentalità corrispondenti alle rotatorie a due corsie sulla corona giratoria, con velocità di riferimento pari a 50 km/h.

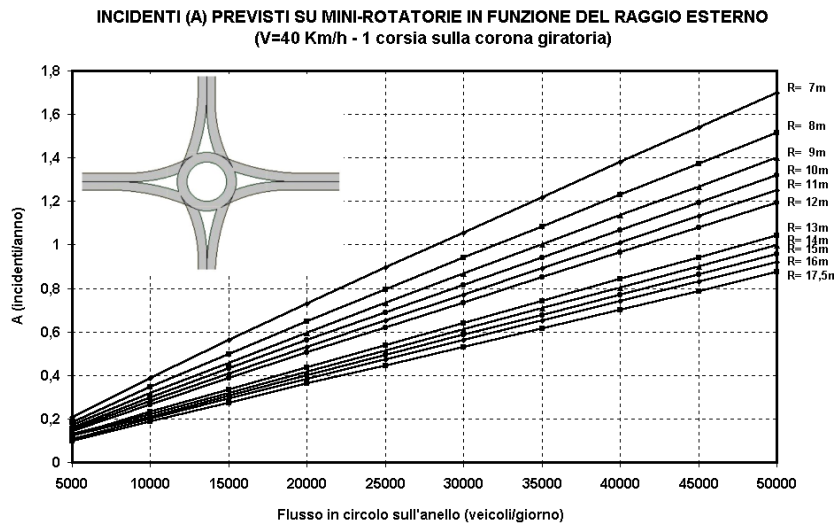


Figura 1. Indici di incidentalità su mini-rotatorie ad una corsia ($V = 40 \text{ km/h}$)

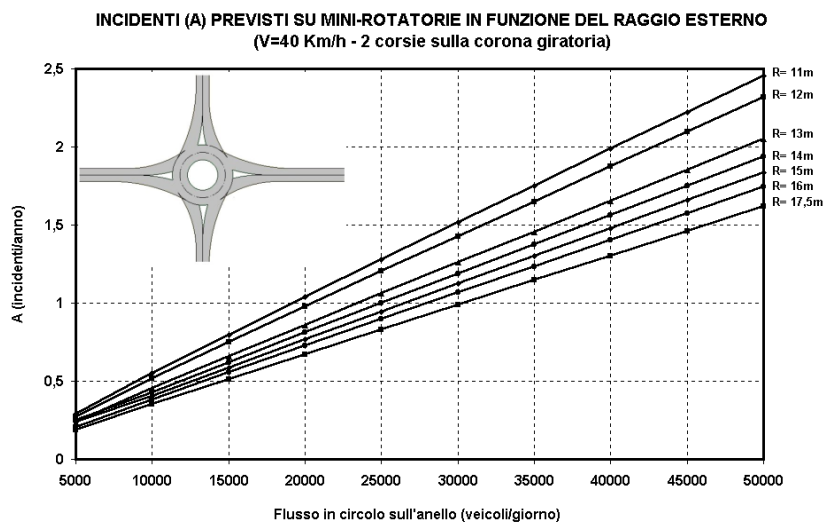


Figura 2. Indici di incidentalità su mini-rotatorie a due corsie ($V = 40 \text{ km/h}$)

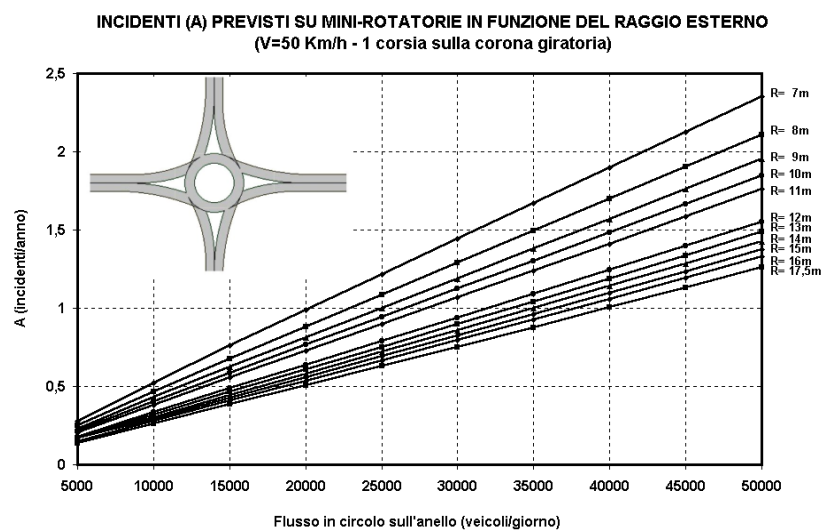


Figura 3. Indici di incidentalità su mini-rotatorie ad una corsia ($V = 50 \text{ km/h}$)

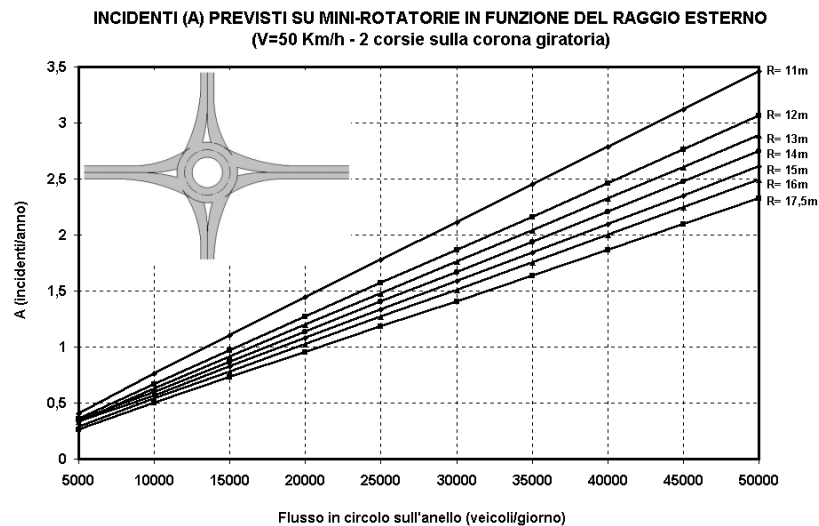


Figura 4. Indici di incidentalità su mini-rotatorie a due corsie ($V = 50 \text{ km/h}$)

Gli abachi rappresentati nelle figure precedenti costituiscono uno strumento di facile applicazione per dedurre immediatamente l'Indice di incidentalità (A), associato a qualsivoglia configurazione di mini-rotatoria. Prima di procedere con l'esposizione della procedura che ci condurrà alla definizione del Livello di servizio allargato, riteniamo utile commentare sinteticamente i risultati ottenuti; in particolare, si possono trarre due importanti conclusioni:

- 1) Le mini-rotatorie a due corsie sono più pericolose di quelle ad una corsia sulla corona giratoria. Se osserviamo, ad esempio, le configurazioni relative alla velocità di 50 km/h, possiamo notare come il valore massimo dell'Indice di incidentalità sia pari a 2.35 per le rotatorie a corsia singola, e pari a 3.45 per quelle a doppia corsia; si ha cioè un incremento del livello di pericolosità pari a circa il 47%. Si tratta di un risultato previsto, se si considera il gran numero di conflitti che si innescano sulle corone giratorie particolarmente ampie.
- 2) Il livello di pericolosità delle mini-rotatorie decresce al crescere del raggio esterno. Se analizziamo ad esempio, il diagramma di figura 1, relativo alle mini-rotatorie ad una corsia con velocità di riferimento uguale a 40 km/h, si può riscontrare come l'Indice di incidentalità assuma il valore di 1.7 quando il raggio della rotatoria è pari a 7 m, mentre lo stesso indicatore vale 0.87 in corrispondenza del valore più elevato del raggio ($R = 17.5$); si manifesta, quindi, un incremento del livello di rischio pari a circa il 95%. Si ritiene che questo risultato debba essere ulteriormente commentato. Osserviamo innanzitutto come dall'analisi dell'istogramma di figura 5, relativo al confronto tra tutti gli incidenti possibili nelle due mini-rotatorie suddette ($R = 7 \text{ m}$

ed $R = 17.5$ m), si evinca un discreto incremento del numero di incidenti a veicolo isolato sulla mini-rotatoria di raggio maggiore; per contro, si ha un sensibile aumento degli incidenti tra veicoli entranti e veicoli circolanti sulla rotatoria con raggio di 7 m. Quanto appena osservato trova una logica giustificazione nel fatto che le curvature elevate, tipiche delle mini-rotatorie, se da un lato garantiscono raggi di deflessione delle traiettorie che inducono gli utenti al rispetto delle velocità programmate, dall'altro facilitano l'insorgere di conflitti con i veicoli circolanti, già in corrispondenza degli accessi.

Al crescere del raggio, invece, si creano le condizioni per cui i veicoli in ingresso si vengono a trovare in una posizione maggiormente defilata rispetto ai veicoli circolanti. In particolare, per curvature molto ridotte, i veicoli che si immettono, lo fanno disponendosi quasi parallelamente ai veicoli circolanti; ciò è causa potenziale della riduzione degli incidenti tra i veicoli in ingresso e quelli circolanti.

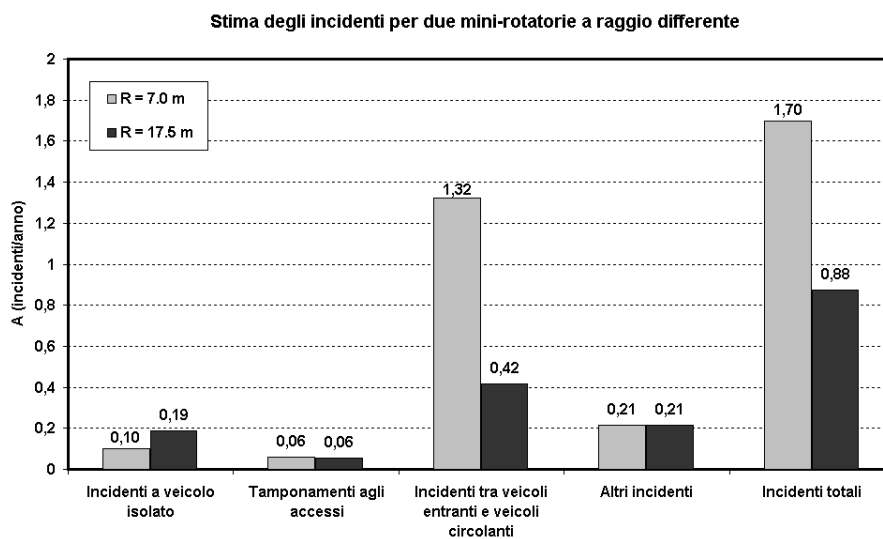


Figura 5. Indicatori di incidentalità per singola tipologia di sinistro

Torniamo adesso ad esporre la metodologia per la determinazione del Livello di servizio allargato. Ricordiamo che, tra le ipotesi che sono state adottate per il calcolo dell'Indice di incidentalità, c'era quella relativa all'uguaglianza delle velocità di riferimento su tutti i rami di accesso e quella riguardante l'uniformità nella distribuzione dei flussi.

Per quel che concerne la possibilità di considerare il transito a diverse di velocità sui rami d'ingresso di una stessa mini-rotatoria, si è pensato di ripetere tutte le elaborazioni già fatte, adottando il criterio di differenziare le velocità tra i due allineamenti che si possono individuare in una rotatoria a rami simmetrici. In pratica, si è voluta mettere in

conto l'ipotesi che tra le due direttrici di una rotatoria, quelle cioè individuate dai rami Nord-Sud e dai rami Est-Ovest, sussista uno scarto di velocità di 10 km/h.

I risultati delle nuove elaborazioni hanno così fornito altri 360 valori degli Indici di incidentalità, così suddivisi:

- 180 Indici di incidentalità associati alle configurazioni in cui la velocità sui rami di accesso era pari a 50 km/h per la direttrice principale, e pari a 40 km/h per quella secondaria;
- 180 Indici di incidentalità associati alle mini-rotatorie in cui la velocità sugli accessi corrispondenti alla direttrice principale era uguale a 60 km/h, mentre sulla direttrice secondaria la velocità di riferimento era pari a 50 km/h.

Dall'analisi dei dati ottenuti, si è notato che, in entrambi i casi, gli Indici di incidentalità erano praticamente proporzionali ai valori omologhi associati, rispettivamente, alle configurazioni caratterizzate dal valore costante della velocità di riferimento pari a 50 km/h, e a quelle per le quali si erano scelte velocità di ingresso uguali a 40 km/h.

Tali fattori di proporzionalità assumono i seguenti valori:

- circa 1.3 nel caso in cui le velocità di riferimento sono 50 km/h e 40 km/h;
- circa 1.2 nel caso in cui le velocità di riferimento sono 60 km/h e 50 km/h.

I fattori di proporzionalità ricavati, assumono, in definitiva, il ruolo di fattori correttivi (f_v) degli Indicatori di incidentalità deducibili dai quattro abachi riportati in precedenza.

La tabella 2 sintetizza la procedura di impiego di tali coefficienti.

Velocità di riferimento	40 km/h (direttrice principale)	50 km/h (direttrice principale)	60 km/h (direttrice principale)
40 km/h (direttrice secondaria)	$f_v = 1$	$f_v = 1.3$	
50 km/h (direttrice secondaria)		$f_v = 1$	$f_v = 1.2$

Tabella 2. Coefficienti correttivi (f_v) dovuti alla differenziazione delle velocità

Il secondo aspetto di cui si deve tener conto, riguarda l'eventualità che i flussi entranti in gioco non siano uniformemente distribuiti così come è stato ipotizzato.

Per il calcolo del fattore correttivo relativo alla distribuzione dei flussi, si è dapprima eseguita una serie di elaborazioni preliminari; dall'analisi dei risultati ottenuti è stato possibile evincere che:

- l'indice di incidentalità non varia significativamente al variare della distribuzione del flusso complessivo sui quattro rami della rotatoria;

- l'indicatore di incidentalità è fortemente influenzato da come il flusso, su ogni singolo ramo, va a ripartirsi sulle tre possibili manovre (svolta a destra, attraversamento, svolta a sinistra).

Si è pertanto agito nel seguente modo:

- si sono avviati 18 cicli di calcolo da 360 elaborazioni ciascuno, caratterizzati da differenti distribuzioni dei flussi, riportate in tabella 3, per uno solo dei rami componenti la mini-rotatoria. Durante l'esecuzione di ogni ciclo di calcolo, si sono mantenute costantemente uniformi le ripartizioni delle portate veicolari per le tre manovre associate a ciascuno degli altri tre rami;

	Distribuzione percentuale del flusso sulla manovra di svolta a destra	Distribuzione percentuale del flusso sulla manovra di attraversamento	Distribuzione percentuale del flusso sulla manovra di svolta a sinistra
1° ciclo di simulazioni	40 %	30 %	30 %
2° ciclo di simulazioni	30 %	40 %	30 %
3° ciclo di simulazioni	30 %	30 %	40 %
4° ciclo di simulazioni	50 %	25 %	25 %
5° ciclo di simulazioni	25 %	50 %	25 %
6° ciclo di simulazioni	25 %	25 %	50 %
7° ciclo di simulazioni	60 %	20 %	20 %
8° ciclo di simulazioni	20 %	60 %	20 %
9° ciclo di simulazioni	20 %	20 %	60 %
10° ciclo di simulazioni	70 %	15 %	15 %
11° ciclo di simulazioni	15 %	70 %	15 %
12° ciclo di simulazioni	15 %	15 %	70 %
13° ciclo di simulazioni	80 %	10 %	10 %
14° ciclo di simulazioni	10 %	80 %	10 %
15° ciclo di simulazioni	10 %	10 %	80 %
16° ciclo di simulazioni	90%	5 %	5 %
17° ciclo di simulazioni	5%	90 %	5 %
18° ciclo di simulazioni	5%	5 %	90 %

Tabella 3. Distribuzione dei flussi adottata per le manovre su ogni singolo ramo

- si sono confrontati i valori degli indici di incidentalità ottenuti con quelli corrispondenti alla situazione di base caratterizzata da flussi identici per ogni manovra. Da tale confronto, analogamente a quanto già osservato nel caso della procedura che ha portato alla definizione del coefficiente correttivo f_v , è emersa una proporzionalità diretta tra i valori degli indicatori di incidentalità. È stato possibile pertanto tabellare (Tab. 4) i fattori correttivi relativi alla distribuzione dei flussi (f_a) in funzione delle ripartizioni dei flussi ipotizzata per le tre manovre possibili (le notazioni simboliche riportate in tabella fanno riferimento allo schema di figura 6).

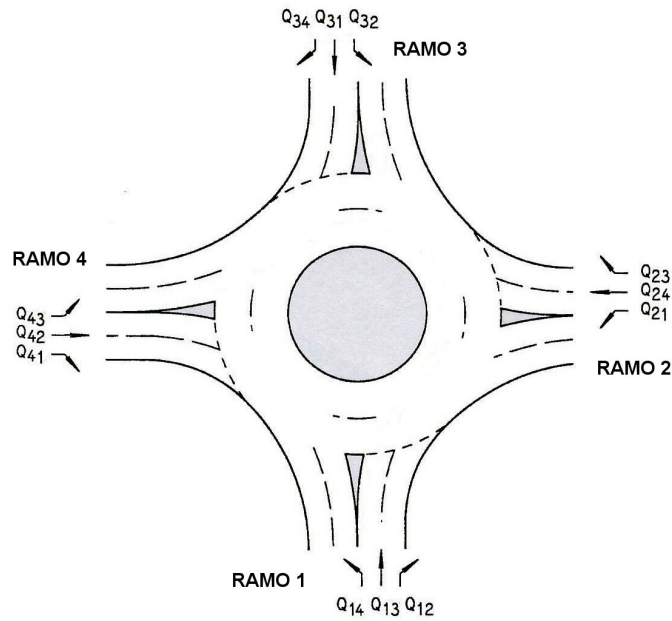


Figura 6. Schema di rotatoria e notazioni simboliche dei flussi

Distribuzione percentuale dei flussi			f_a
Q_{12}	Q_{13}	Q_{14}	
Q_{23}	Q_{24}	Q_{21}	
Q_{34}	Q_{31}	Q_{32}	
Q_{41}	Q_{42}	Q_{43}	
40 %	30 %	30 %	0.99
30 %	40 %	30 %	1
30 %	30 %	40 %	1.01
50 %	25 %	25 %	0.98
25 %	50 %	25 %	1
25 %	25 %	50 %	1.02
60 %	20 %	20 %	0.96
20 %	60 %	20 %	1
20 %	20 %	60 %	1.03
70 %	15 %	15 %	0.94
15 %	70 %	15 %	1
15 %	15 %	70 %	1.04
80 %	10 %	10 %	0.93
10 %	80 %	10 %	1
10 %	10 %	80 %	1.05
90 %	5 %	5 %	0.91
5 %	90 %	5 %	1
5 %	5 %	90 %	1.06

Tabella 4. Coefficienti correttivi (f_a) dovuti alla differente distribuzione dei flussi

Dall'analisi della tabella 4 si evince come i coefficienti correttivi individuino tre possibili situazioni:

- configurazioni “favorevoli” in cui f_a è minore dell'unità (si tratta delle situazioni in cui il flusso prevalente è quello che esegue la svolta a destra);
- configurazioni “sfavorevoli” in cui il coefficiente correttivo è maggiore del valore unitario (quando il flusso prevalente è quello che esegue la svolta a sinistra);
- configurazioni “neutre” caratterizzate dal fatto che il coefficiente f_a è proprio pari ad uno (quando il flusso percentualmente maggiore è quello che esegue la manovra di attraversamento).

Si è previsto, poi, di valutare gli indicatori di incidentalità nelle situazioni in cui, su due o più rami, i flussi risultano distribuiti sulle varie manovre secondo gli schemi di ripartizione riportati nella tabella 3. A tal fine si è proceduto avviando una serie di 10 cicli di calcolo (sempre da 360 elaborazioni per ciascuno), ognuno dei quali è stato impostato in modo tale da prevedere che tutti e quattro i rami delle mini-rotatorie avessero flussi disegualmente distribuiti sulle tre manovre. Ciascuno dei cicli di calcolo ha previsto la selezione casuale di quattro schemi di ripartizione (uno per ogni ramo) tra quelli indicati nella tabella 3.

Dall'analisi degli Indici di incidentalità ottenuti, e dal doppio confronto con gli indicatori relativi alle configurazioni precedenti (quelle cioè perfettamente equilibrate e quelle con un solo braccio “disuniforme”), è emerso che è possibile far riferimento ai coefficienti correttivi f_a , riportati nella tabella 4, anche nei casi in cui i rami squilibrati siano più di uno; *occorre però considerare di volta in volta un solo ramo squilibrato, dedurre i corrispondenti valori di f_a , e, infine, moltiplicare tra loro i fattori correttivi singolarmente ottenuti.*

In definitiva, sono adesso disponibili tutti i parametri necessari per la determinazione del coefficiente correttivo globale (f_{ag}) che tiene conto della diseguale distribuzione dei flussi sui singoli rami. Esso è dato dalla seguente relazione:

$$f_{ag} = f_{a1} \cdot f_{a2} \cdot f_{a3} \cdot f_{a4} \quad (3)$$

dove f_{a1} , f_{a2} , f_{a3} ed f_{a4} sono i valori di f_a associati a ciascuno dei rami che compongono la rotatoria. Nel caso in cui uno o più rami risultino equilibrati si avrà ovviamente che il corrispondente valore di f_a sarà pari all'unità. Siamo a questo punto in grado di introdurre il parametro che ci consente di quantificare il livello di servizio, in termini di sicurezza, offerto dalle mini-rotatorie. Si tratta del cosiddetto Indice di sicurezza delle

mini-rotatorie (I_{SMR}) definito nel seguente modo:

$$I_{SMR} = A \cdot f_v \cdot f_{ag} \quad (4)$$

Si è pensato di suddividere l'intervallo di variabilità di tale nuovo indicatore, in modo tale da diversificare i livelli di sicurezza potenzialmente associati alle caratteristiche complessive delle mini-rotatorie (geometria, traffico, velocità operative).

Sono stati pertanto individuati sei livelli di servizio in termini di sicurezza (LOS_S), che indicheremo con le lettere da A ad F, definiti in base a quanto specificato di seguito:

- $LOS_S = A \rightarrow 0 \leq I_{SMR} \leq 0.33$: il livello di servizio A è indicativo di condizioni ideali, in termini di sicurezza. Infatti, ricordando che l'indice I_{SMR} nasce come un indicatore di incidentalità riferito all'intervallo temporale di un anno, si ha che, per tale livello di servizio, la frequenza di incidente è teoricamente pari, al massimo, ad un solo sinistro ogni tre anni (tale frequenza, per un'intersezione, può essere normalmente imputata ad una quota di incidentalità "fisiologica" del tutto imprevedibile e praticamente ineliminabile).
- $LOS_S = B \rightarrow 0.33 < I_{SMR} \leq 0.5$: questo livello di servizio rappresenta condizioni favorevoli in relazione alla sicurezza dell'intersezione. L'incrocio è teatro, al massimo, di un incidente ogni due anni.
- $LOS_S = C \rightarrow 0.5 < I_{SMR} \leq 1.0$: il livello di sicurezza C individua già configurazioni di mini-rotatorie che non si possono considerare del tutto sicure. In effetti, il valore limite di 1 incidente all'anno è un indicatore di condizioni di rischio che non possono essere più imputabili alla componente fisiologica o a quella casuale.
- $LOS_S = D \rightarrow 1.0 < I_{SMR} \leq 2.0$: in corrispondenza di questo livello di servizio, si può ritenere che l'intersezione sia pericolosa a tal punto che devono essere presi opportuni provvedimenti (riduzione della velocità, variazione della geometria, limitazione dei flussi veicolari, ecc.) per la riduzione della probabilità che si inneschi qualche fenomeno sinistoso. Si ricorda che è consuetudine, in molti studi sull'incidentalità in ambito urbano, classificare come black spot quegli incroci stradali su cui si verificano almeno due incidenti all'anno.
- $LOS_S = E \rightarrow 2.0 < I_{SMR} \leq 3.0$: il livello di servizio E rappresenta la situazione limite dal punto di vista della pericolosità di un incrocio. Un'intersezione che, in fase di progetto, presenti questo livello di servizio, deve essere riprogettata. Una mini-rotatoria che, in fase di esercizio, si trova al livello di servizio E, deve essere urgentemente oggetto di adeguati interventi di potenziamento e/o riqualificazione.

- $LOS_S = F \rightarrow I_{SMR} > 3.0$: il livello di servizio F rappresenta il superamento della soglia limite; dal punto di vista teorico è indicativo dell'attingimento ad una riserva di sicurezza ormai esaurita, mentre, dal punto di vista operativo è un indicatore che paradossalmente non dovrebbe neanche essere preso in considerazione, in quanto l'estremo superiore del livello di servizio E (3 incidenti all'anno) rappresenta già la soglia d'allarme.

La definizione dei livelli di servizio in termini di sicurezza (LOS_S) per le mini-rotatorie, rappresenta, in definitiva, il raggiungimento dell'obiettivo che ci si era prefissati.

In effetti il LOS_S costituisce proprio quel parametro che, affiancandosi al "LOS trasportistico", consente di allargare il panorama degli indicatori di performance delle rotatorie.

In tale ottica, il Livello di servizio allargato non deve essere considerato come un unico parametro in grado di quantificare da solo i diversi aspetti che concorrono a definire il livello funzionale delle mini-rotatorie, ma deve essere inteso come una sorta di "contenitore" all'interno del quale si trova una serie di indicatori di performance. È proprio dall'analisi e dal reciproco confronto di tali indicatori, che devono scaturire le soluzioni (di progetto o di adeguamento) maggiormente appropriate per ottimizzare o per migliorare il livello multi-prestazionale delle mini-rotatorie.

In tale contesto, si ritiene che, con l'utilizzo della metodologia esposta nel presente paragrafo, si riesca ad allargare il concetto di livello di servizio fino al punto da inglobare, per il momento, il "parametro sicurezza".

Consapevoli dell'importanza di questo primo passo, riteniamo comunque opportuno proseguire nella ricerca, al fine di riuscire ad estendere il significato del livello di servizio anche agli aspetti direttamente connessi al comfort ed alla qualità ambientale.

4. APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA ELABORATA: VALUTAZIONE

DEL LIVELLO DI SERVIZIO ALLARGATO PER UNA MINI-ROTATORIA

Si è già notato come il concetto di livello di servizio allargato debba essere inteso nell'accezione più ampia di raccoglitore di indicatori prestazionali per le mini-rotatorie. Tali indicatori sono, allo stato attuale, il livello di servizio "trasportistico" (LOS) ed il livello di servizio in termini di sicurezza (LOS_S) su cui si è ampiamente dissertato nel precedente paragrafo.

In questo paragrafo si vuole svolgere un semplice esempio finalizzato a rendere meglio comprensibili sia la metodologia elaborata che i risultati che da essa scaturiscono.

Prima di procedere con l'esposizione dell'esempio applicativo, occorre specificare il metodo adottato per la valutazione del Livello di servizio trasportistico.

Il nostro gruppo di ricerca ha già avuto modo di osservare, in un precedente contributo [8], come siano ancora poco diffuse le procedure per il calcolo del livello di servizio delle intersezioni a circolazione rotatoria; ancor meno presenti sono, poi, i criteri per il calcolo del livello di servizio delle mini-rotatorie. In tale contesto, ci è apparso opportuno impiegare una metodologia da noi stessi elaborata la quale, come ampiamente spiegato in [8], nasce da considerazioni teoriche relative ai fenomeni di attesa supportate dai risultati di una serie di campagne sperimentali.

Il criterio in esame si fonda sulla valutazione del ritardo medio totale, per l'attraversamento di una mini-rotatoria, da parte dei veicoli accodati su uno dei rami di immissione. Tale ritardo viene determinato tramite la relazione seguente:

$$R_c = 2.984 \cdot e^{0.0004 \cdot Q_c} + \frac{\frac{Q_i}{3600} \cdot 8.904 \cdot e^{0.0008 \cdot Q_c}}{2 \cdot \left[1 - \frac{Q_i}{3600} \cdot 2.984 \cdot e^{0.0004 \cdot Q_c} \right]} \quad (5)$$

dove:

- ◆ R_c = ritardo totale per l'attraversamento, riferito al braccio di mini-rotatoria preso in considerazione [secondi/veicolo];
- ◆ Q_i = flusso in ingresso sul ramo in esame, omogeneizzato tramite i coefficienti riportati in tabella 5 [veic/h];
- ◆ Q_c = portata veicolare omogeneizzata (Tab. 5) in circolo sul tratto di corona giratoria adiacente all'ingresso considerato [veic/h].

Tipo di veicolo	Pendenza (%)				
	-4	-2	0	+2	+4
Motocicli	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Veicoli leggeri	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4
Mezzi pesanti privi di rimorchio	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0
Mezzi pesanti combinati ed autobus	1.2	1.5	2.0	3.0	6.0
Tutti i veicoli*	0.9	1.0	1.1	1.4	1.7

* Tali coefficienti correttivi devono essere utilizzati se la composizione dei veicoli non è nota.

Tabella 5. Veicoli leggeri equivalenti per le mini-rotatorie

Il ritardo medio complessivo per veicolo in una mini-rotatoria, può essere poi calcolato a mezzo della seguente espressione:

$$R_{c(\text{mini-rotatoria})} = \frac{\sum_{k=1}^n R_{ck} \cdot Q_{ik}}{\sum_{k=1}^n Q_{ik}} \quad (6)$$

dove:

- $R_{c(\text{mini-rotatoria})}$ = ritardo medio per veicolo sulla mini-rotatoria [sec/veic];
- Q_{ik} = portata veicolare corretta per l'accesso k [veic/h];
- R_{ck} = ritardo medio per veicolo per il ramo k [sec/veic].

La tabella 6 riassume infine i criteri di valutazione del Livello di Servizio Allargato.

LIVELLO DI SERVIZIO ALLARGATO		
	LOS (Livello di servizio trasportistico)	LOS_s (Livello di servizio in termini di sicurezza)
A	$R_c \leq 5.0$ sec/veic	$I_{SMR} \leq 0.33$ inc/anno
B	5.0 sec/veic < $R_c \leq 15.0$ sec/veic	0.33 inc/anno < $I_{SMR} \leq 0.5$ inc/anno
C	15.0 sec/veic < $R_c \leq 25.0$ sec/veic	0.5 inc/anno < $I_{SMR} \leq 1.0$ inc/anno
D	25.0 sec/veic < $R_c \leq 40.0$ sec/veic	1.0 inc/anno < $I_{SMR} \leq 2.0$ inc/anno
E	40.0 sec/veic < $R_c \leq 60.0$ sec/veic	2.0 inc/anno < $I_{SMR} \leq 3.0$ inc/anno
F	$R_c > 60.0$ sec/veic	$I_{SMR} > 3.0$ inc/anno

Tabella 6. Livello di servizio allargato per le mini-rotatorie

Nella figura 7 è visualizzato lo schema della rotatoria di cui si intende valutare i due parametri che contribuiscono alla definizione del livello di servizio allargato.

Si tratta di una mini-rotatoria ad isola centrale sormontabile, avente il diametro esterno di 14 m e con un'unica corsia sulla corona giratoria. Le velocità operative si suppongono differenziate tra due direttrici: quella principale, individuata dai rami 2 e 4, per la quale si ipotizza una velocità 50 km/h, e quella secondaria (rami 1 e 3) caratterizzata da una velocità di riferimento pari a 40 km/h.

La matrice dei flussi, riportata in tabella 7, evidenzia un forte squilibrio nella distribuzione delle portate veicolari fra le possibili manovre per ogni ramo. Si può infatti notare che, nella direttrice principale, i flussi veicolari maggiormente sostenuti sono quelli interessanti la manovra di attraversamento, mentre, nel caso dei due rami secondari, le portate maggiori (quasi il 90% del flusso totale per ramo) sono quelle relative alle manovre di svolta a sinistra.

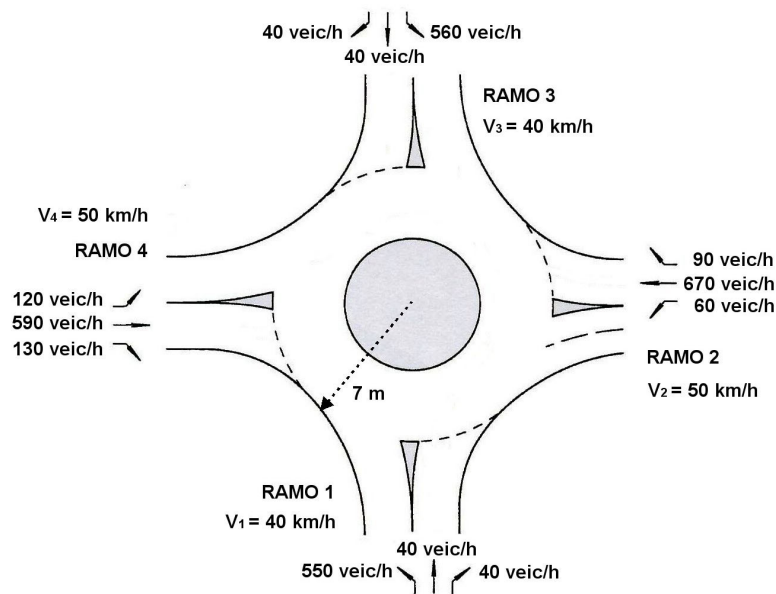


Figura 7. Geometria, flussi e velocità operative per la mini-rotatoria dell'esempio

RAMO	MATRICE DEI FLUSSI				Flussi entranti Q_i omogeneizzati (veic/h)	Flussi circolanti Q_c omogeneizzati (veic/h)
	1	2	3	4		
1	-	40	40	550	630	1270
2	60	-	90	670	820	710
3	40	560	-	40	640	1280
4	130	590	120	-	840	660

Tabella 7. Matrice dei flussi e flussi veicolari totali per la mini-rotatoria dell'esempio

Supponendo che i flussi presenti nella tabella 7 siano quelli dell'ora di punta corretti a mezzo dei coefficienti di equivalenza riportati in tabella 5, si è proceduto con il calcolo del Livello di servizio trasportistico (LOS) a mezzo dell'equazione (5). Ne emerge (Tab. 8) una situazione manifestamente favorevole: *tutti i rami della mini-rotatoria sono caratterizzati da un livello di servizio C*. Anche il ritardo complessivo per l'intersezione rientra, ovviamente, nel campo di esistenza definito dal LOS C.

RAMO	RITARDO TOTALE (sec/veic)	LIVELLO DI SERVIZIO (LOS)
1	21,25	C
2	22,40	C
3	24,17	C
4	22,75	C
RITARDO COMPLESSIVO DELLA MINI-ROTATORIA: 22.64 sec/veic		LIVELLO DI SERVIZIO COMPLESSIVO DELLA MINI-ROTATORIA: C

Tabella 8. Livelli di servizio "trasportistici" per la mini-rotatoria dell'esempio

In tale contesto, è opportuno rammentare che l'Highway Capacity Manual [9] propone l'utilizzo del Livello di servizio D come parametro di riferimento per il progetto delle intersezioni stradali presenti in ambito urbano. Si ribadisce, pertanto, che l'aver riscontrato un livello di servizio C, per la rotatoria del nostro esempio, è indicativo di condizioni di deflusso più che soddisfacenti.

La tabella 9 riassume, invece, tutti i risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia finalizzata alla deduzione del Livello di servizio in termini di sicurezza (LOS_s) per le mini-rotatorie.

FLUSSO COMPLESSIVO IN CIRCOLO (TGM) = 27000 veicoli/giorno						
DISTRIBUZIONE DEI FLUSSI					Fattori correttivi della distribuzione dei flussi	Fattore correttivo globale della distribuzione dei flussi
RAMO	1	2	3	4		
1	-	6 %	6 %	88 %	$f_{a1} = 1.06$	$f_{ag} = 1.124$
2	7 %	-	11 %	82 %	$f_{a2} = 1.00$	Fattore correttivo della velocità
3	6 %	88 %	-	6 %	$f_{a3} = 1.06$	
4	15 %	70 %	15 %	-	$f_{a4} = 1.00$	$f_v = 1.3$
INDICE DI INCIDENTALITÀ $\rightarrow A = 0.95$						
Indice di sicurezza delle mini-rotatorie					LIVELLO DI SERVIZIO (LOS_s) = D	
$I_{SMR} \approx 1.4$ incidenti/anno						

Tabella 9. Livello di servizio in termini di sicurezza per la mini-rotatoria dell'esempio

Tramite l'abaco di figura 1, relativo alle mini-rotatorie ad una sola corsia con velocità di immissione pari a 40 km/h, è stato possibile evincere l'Indice di incidentalità ($A = 0.95$) associato ad un TGM pari a 27000 veicoli/giorno (per il calcolo del TGM si è fatto riferimento ad una relazione empirica, proposta da Tesoriere [10], in base alla quale, per le infrastrutture urbane, il TGM può essere ricavato rapportando il flusso dell'ora di punta ad un coefficiente numerico variabile tra 0.11 e 0.19).

Il fattore correttivo relativo alla differenza di velocità tra gli accessi ai rami 2 e 4 e i bracci di immissione 1 e 3, risulta pari a 1.3 (Tab. 2). I fattori che tengono conto della diversa distribuzione delle portate veicolari sulle manovre associate ad ogni braccio (Tab. 4), sono rispettivamente pari a 1.06, per i rami della direttrice secondaria (fortemente squilibrati a vantaggio delle svolte a sinistra), e uguali all'unità per i due rami allineati secondo la direttrice principale (dove i flussi gravano principalmente sulla manovra di attraversamento). Conseguentemente si ha che f_{ag} è uguale ad 1.124.

In definitiva, dal calcolo dell'Indice di sicurezza delle mini-rotatorie ($I_{SMR} = 1.4$), è emerso che *il Livello di servizio in termini di sicurezza (LOS_S) è pari a D*.

La valutazione del LOS_S evidenzia, pertanto, una situazione diametralmente opposta a quella caratterizzata dalle condizioni estremamente favorevoli associate al livello di servizio trasportistico. Un livello di servizio in termini di sicurezza pari a D, è infatti rappresentativo del raggiungimento di un grado di pericolosità che, seppur non ancora intollerabile, richiede senz'altro immediati interventi di adeguamento. Tali interventi, nello specifico, potrebbero esplicitarsi, ad esempio, nella predisposizione di provvedimenti di moderazione della velocità per indurre il flusso sulla direttrice principale ad immettersi a velocità prossime ai 40 km/h oppure, se possibile, nel potenziamento dell'intersezione attraverso un incremento del diametro esterno.

Il vantaggio di aver potuto “allargare” l'intervallo di definizione del Livello di servizio, si palesa, dunque, nella possibilità di valutare meglio le “performance” delle mini-rotatorie, prevedendo eventuali azioni (progettuali o manutentive) della cui necessità e/o urgenza non ci si sarebbe accorti se si fosse considerato esclusivamente il tradizionale indicatore rappresentato dal Livello di servizio trasportistico.

5. CONCLUSIONI

Con il presente contributo si è voluto proporre un criterio in base al quale valutare le “prestazioni” non solo trasportistiche delle mini-rotatorie tipiche degli ambiti urbani.

La prima parte dello studio è stata impostata nei termini di una sintetica disquisizione sui modelli di previsione di incidentalità sulle rotatorie. In tale contesto, si è avuto modo di giustificare la scelta di adottare, per le elaborazioni necessarie alla caratterizzazione del grado di sicurezza delle mini-rotatorie, il modello teorico di Arndt che permette di simulare l'evoluzione nel tempo e al variare dell'entità dei flussi veicolari, dei sinistri classificati secondo sei categorie di incidentalità tipiche delle rotatorie.

Il passo successivo è stato quello di esporre la procedura per la determinazione del Livello di servizio allargato delle mini-rotatorie. Partendo dal supporto teorico costituito dal modello previsionale di cui si è detto, si è giunti alla definizione puntuale, tramite abachi di calcolo e tabelle riportanti coefficienti correttivi, di una metodologia preposta alla stima del cosiddetto Livello di servizio in termini di sicurezza delle mini-rotatorie. Un esempio di calcolo, realizzato per mettere a confronto i due livelli di servizio valutabili per le mini-rotatorie (quello trasportistico e quello associato alle prestazioni di sicurezza), ci ha permesso di ribadire la necessità di un “allargamento” del concetto di

Livello di servizio, al fine, soprattutto, di poter prevedere interventi progettuali o di adeguamento la cui necessità non è sempre riconducibile a problematiche legate esclusivamente alla densità veicolare.

Obiettivo futuro degli scriventi è quello di pervenire, entro breve termine, alla caratterizzazione sotto il profilo della sicurezza delle altre tipologie di intersezione (comprese le rotatorie di raggio elevato), in modo da poter disporre di ulteriori criteri di confronto, utili a discernere le soluzioni di progetto o di intervento maggiormente convenienti soprattutto quando ci si muove sotto condizioni operative equivalenti (o presunte tali).

BIBLIOGRAFIA

- [1] AA.VV. *Roundabouts: an informational guide*. Publication n° FHWA-RD-00-067. Department of Transportation. Federal Highway Administration. June 2000.
- [2] P. Colonna. *Proposta di determinazione della qualità del servizio di viabilità atteso ed offerto*. XXIII Convegno Nazionale Stradale AIPCR. Verona, Maggio 1998.
- [3] O. Arndt. *Roundabouts*. Chapter 14 in Road planning and design manual. Queensland Department of Main Roads. August 2000.
- [4] V. Curti. L. Marescotti. L. Mussone. *Rotonde. Progetto e valutazione per la sistemazione a rotonda delle intersezioni*. Libreria CLUP. Milano, Febbraio 2001.
- [5] C. Caliendo. *Valutazione dell'efficacia delle minirotatorie e confronto con le intersezioni ordinarie*. Atti del XXIV Convegno Nazionale Stradale dell'A.I.P.C.R. Saint Vincent (Aosta), 26/29 Giugno 2002.
- [6] O. Arndt, R. J. Troutbeck. *Relationships between roundabout geometry and accident rates*. 1st International Symposium. TRB. Boston, august 1995.
- [7] S. Canale, S. Leonardi, G. Pappalardo. *Mini-rotatorie urbane: ingressi a rischio*. Rivista Onda Verde. Novembre/Dicembre 2001.
- [8] S. Canale, S. Leonardi, G. Pappalardo. *Proposta di una metodologia per il calcolo del livello di servizio delle mini-rotatorie in ambito urbano*. Atti del XXIV Convegno Nazionale Stradale dell'A.I.P.C.R. Saint Vincent (Aosta), 26/29 Giugno 2002.
- [9] AA.VV. *Highway Capacity Manual*. Ed. Transportation Research Board. 2000.
- [10] G. Tesoriere. *Strade Ferrovie Aeroporti*. Vol. 1 - Il progetto delle opere d'arte. UTET. Torino, 1990.