
APPROCCIO TEORICO-SPERIMENTALE PER L'ANALISI DELLE CONDIZIONI OPERATIVE DI ROTATORIE URBANE NON CONVENZIONALI

Orazio Giuffrè - Università di Palermo, e-mail: ogiuffre@unipa.it

Anna Granà - Università di Palermo, e-mail: anna.grana@unipa.it

Tullio Giuffrè - Università di Palermo, e-mail: tullio.giuffre@polimi.it

Roberta Marino - Università di Palermo, e-mail: roberta.marino@unipa.it

ABSTRACT

I metodi tradizionali di analisi delle rotatorie cadono in difetto in presenza di schemi organizzativi dell'intersezione, nei quali l'organizzazione geometrica, unitamente alla molteplicità delle situazioni di traffico ed all'inserimento in contesti vincolati, induce comportamenti di guida anche molto distanti da quelli osservabili in rotatorie convenzionali. Quanto evidenziato interessa, in particolare, l'ambito urbano, dove le intersezioni a circolazione rotatoria risultano particolarmente diffuse e si caratterizzano per requisiti geometrico-funzionali spesso distanti da quelli propri delle rotatorie convenzionali. Uno dei maggiori ostacoli che si incontrano nell'analisi delle condizioni operative di questo tipo di intersezioni dipende dalla stessa molteplicità dei possibili schemi e dalla conseguente difficoltà di inquadrarne il funzionamento in un unico modello teorico.

A partire da queste considerazioni, il presente articolo mostra il percorso concettuale seguito per analizzare le condizioni operative di rotatorie non convenzionali di grandi dimensioni, per le quali i modelli basati sulla teoria del gap-acceptance non sono direttamente applicabili. Al contrario, le osservazioni di campo hanno suggerito un approccio teorico-sperimentale che, pur muovendo da una base empirica, non rinuncia alla possibilità di generalizzazione offerta dai modelli teorici. L'applicazione ad un caso studio permetterà di illustrare come derivare il modello analitico della capacità a partire dai dati osservati. I risultati ottenuti si dimostrano di particolare interesse per sviluppare lo studio delle rotatorie in contesti fortemente vincolati, per le quali la specificità dell'organizzazione infrastrutturale non permette l'analisi delle condizioni operative e la valutazione delle prestazioni a partire dai metodi proposti dalla letteratura, calibrati su sistemazioni solo parzialmente assimilabili a quelle in esame.

Keywords: rotatoria non convenzionale, grado di conflitto, capacità.

1. INTRODUZIONE

La flessibilità degli elementi compositivi delle rotatorie ha agevolato, particolarmente con l'introduzione della precedenza ai veicoli sull'anello, l'inserimento di questo tipo di intersezioni in nodi viari ad ogni livello della rete stradale.

In ambito urbano, in particolare, gli schemi impegnati da elevati volumi veicolari sono generalmente integrati in nodi complessi tra arterie a grande traffico, analogamente agli svincoli a rotatoria sulle autostrade, per servire il traffico di superficie. In questi

casi gli schemi rotatori presentano ampi diametri dell'isola centrale e due o più corsie in entrata e sulla carreggiata anulare e, a differenza dall'ambito autostradale, possono accogliere anche il traffico che proviene dalle strade laterali di servizio. L'impianto di intersezioni di questo tipo risulta spesso condizionato da vincoli urbanistici e/o topografici e si caratterizza per soluzioni di "compromesso" per uno o più elementi compositivi dello schema di intersezione, determinando una grande varietà di layout geometrici con condizioni di funzionamento spesso distanti da quelli osservabili nelle rotatorie convenzionali. Inoltre, le condizioni operative si caratterizzano per una componente fortemente casuale imputabile a comportamenti trasgressivi degli utenti (quelli che si immettono in intersezione ignorando il segnale di dare precedenza) ovvero alla volontaria modificazione delle regole di circolazione da parte degli utenti che cedono il proprio diritto di precedenza.

Queste considerazioni suggeriscono che l'interpretazione degli aspetti funzionali delle rotatorie non convenzionali (particolarmente la previsione delle condizioni operative e la valutazione della qualità dei movimenti veicolari) può risultare fortemente compromessa se si ricorre ai metodi proposti dalla letteratura, calibrati su sistemazioni solo parzialmente assimilabili a quelle qui considerate. In proposito, in un precedente articolo (Granà e Giuffrè T., 2005) è stato osservato che i metodi usuali per le rotatorie tradizionali (ovvero quelli basati sulla teoria del gap-acceptance) non possono essere applicati per l'analisi delle condizioni operative e dei parametri comportamentali delle rotatorie non convenzionali, in quanto possono condurre a risultati fortemente approssimati.

Tenuto conto di quanto detto, gli autori propongono in questo lavoro un modello generalizzato per analizzare, a partire dalle osservazioni macroscopiche delle condizioni di traffico, gli aspetti funzionali di rotatorie non convenzionali a grande diametro ed a più corsie in entrata e sulla carreggiata anulare. Questi schemi rotatori, che per caratteristiche geometrico-funzionali e condizioni operative risultano non convenzionali, ovvero non riconducibili a schemi tipici, sono stati denominati in un precedente lavoro (Giuffrè O. et al., 2007) con l'acronimo MLLD (Multilane-Large-Diameter Roundabouts). Lo sviluppo del predetto modello generalizzato, nota la domanda di traffico, è finalizzato alla stima della capacità per il tipo di rotatorie esaminate.

L'esame di un certo numero di intersezioni circolari con un'isola centrale di grandi dimensioni della rete viaria di Palermo ha permesso di evidenziare che le intersezioni considerate risultano caratterizzate da condizioni operative nelle quali gli utenti non rispettano il sistema di regolazione vigente, ma negoziano le precedenze secondo uno schema di consenso alternato tra i veicoli circolanti lungo la carreggiata anulare e quelli in entrata, similmente a quanto accade nelle intersezioni regolate dal segnale di dare precedenza su tutti i bracci (AWSC - All-Way-Stop-Controlled intersections). Tale tipo di intersezioni non ha finora trovato impiego in Italia, mentre è relativamente diffuso negli U.S.A. (HCM 2000).

Lo sviluppo del modello generalizzato ha richiesto preliminarmente il trattamento dei dati sperimentali tramite l'uso di tecniche di regressione empiriche per stimare i parametri comportamentali di base (cioè i distanziamenti temporali in condizioni di saturazione); questi ultimi sono difficilmente rilevabili direttamente attraverso misure di campo, dal momento che le condizioni di traffico in cui sono osservabili si verificano

raramente e, in ogni caso, non si protraggono per un tempo adeguato a permettere misure attendibili.

L'applicazione del modello generalizzato ad un caso studio ed il confronto degli indici prestazionali con quelli desumibili da modelli analitici esistenti, calibrati su sistemazioni che obbediscono a schemi convenzionali, forniscono gli elementi informativi di base per sviluppare lo studio funzionale delle rotatorie in contesti fortemente vincolati, per le quali la specificità dell'organizzazione infrastrutturale compromette la valutazione delle prestazioni a partire dai metodi proposti dalla letteratura.

2. LE CONDIZIONI OPERATIVE ALLE ROTATORIE MLLD

Per un certo numero di casi studio, le condizioni operative alle rotatorie non convenzionali sono state registrate e successivamente esaminate per identificare i fattori che possono influenzarne le prestazioni (Giuffrè O. et al., 2007). E' emerso che alcuni aspetti comportamentali sono significativi, particolarmente per quanto riguarda le frequenti inversioni del diritto di precedenza tra i veicoli in entrata ed i veicoli circolanti sulla carreggiata anulare anche se, secondo il sistema di regolazione vigente, questi ultimi godono del diritto di precedenza.

Più specificamente, le osservazioni dei comportamenti degli utenti hanno evidenziato che:

- i veicoli circolanti cedono la precedenza (o sono forzati a cedere la precedenza) ai veicoli in entrata e si fermano, prima di attraversare il braccio di ingresso, ad una linea di stop ideale non materializzata da segnaletica;
- i veicoli circolanti tendono a cedere la precedenza anche se i volumi veicolari in entrata sono modesti e si dispongono in file parallele prima di proseguire nella propria direzione;
- i veicoli in entrata forzano il flusso dei veicoli circolanti, anche se questi ultimi si caratterizzano per volumi consistenti.

In ogni caso, i veicoli in entrata, anche quando rispettano l'obbligo di dare precedenza, danno la priorità ai veicoli circolanti sulla carreggiata anulare attestandosi in posizione avanzata rispetto alla linea di stop materializzata sulla strada, dietro una linea di stop idealmente posta sulla carreggiata anulare.

Queste osservazioni hanno permesso di dedurre che le condizioni operative alle rotatorie MLLD sono simili a quelle che si verificano alle intersezioni AWSC prima descritte (in corrispondenza delle quali gli utenti devono fermarsi prima di procedere all'immissione) e seguono uno schema di negoziazione delle precedenze che si alterna tra i veicoli in entrata e quelli circolanti sulla carreggiata anulare. La principale conseguenza di quanto osservato è che le condizioni di traffico alle rotatorie esaminate non possono essere agevolmente interpretate attraverso modelli basati sulla teoria del gap-acceptance; di contro, un metodo di analisi delle condizioni operative può essere sviluppato a partire dalla metodologia descritta nel successivo paragrafo.

3. L'APPROCCIO TEORICO-SPERIMENTALE

Tenuto conto dell'inapplicabilità delle formulazioni di capacità degli schemi tipici alle rotatorie urbane non convenzionali, è stato sviluppato a partire dalle osservazioni di traffico un modello generalizzato per stimare gli indici prestazionali di capacità in ingresso per le intersezioni non convenzionali a grande diametro ed a più corsie in entrata e sulla carreggiata anulare (rotatorie MLLD). Per la specificazione del modello generalizzato di capacità in ingresso in corrispondenza delle intersezioni considerate sono state esplicitate le variabili rappresentative della configurazione geometrica dello schema, del traffico che ostacola l'immissione e del comportamento degli utenti. Relativamente a quest'ultimo aspetto, come peraltro anticipato, le condizioni operative si caratterizzano per un particolare schema di negoziazione reciproca delle precedenza tra i veicoli in entrata ed i veicoli circolanti sull'anello, similmente a quanto accade per le intersezioni All-Way-Stop-Controlled (cfr. HCM 2000, cap. 17).

Ciascun ingresso ad una rotatoria MLLD è analizzato secondo lo schema di funzionamento di una intersezione AWSC. Analogamente alle intersezioni AWSC, alle rotatorie MLLD il distanziamento tra veicoli che consecutivamente effettuano l'immissione dall'approccio considerato di riferimento (il ramo o la carreggiata anulare) dipende dal grado di conflitto che si attua con i veicoli dell'approccio antagonista (il ramo, se la carreggiata anulare è considerata come approccio di riferimento, ovvero la carreggiata anulare se il ramo è considerato come approccio di riferimento).

Le rotatorie MLLD si differenziano dalle intersezioni AWSC perché gli approcci sono a senso unico. Tuttavia l'analisi delle rotatorie MLLD è più complessa rispetto alle intersezioni AWSC sia perché gli utenti circolanti lungo la carreggiata anulare non sono tenuti ad arrestarsi prima di immettersi in intersezione, sia perché si verifica frequentemente l'inversione del diritto di precedenza tra i veicoli in entrata e quelli circolanti con una frequenza di comportamenti irregolari particolarmente elevata per i veicoli in entrata.

Inoltre, alcuni movimenti veicolari escludono il conflitto tra i veicoli in entrata e quelli circolanti; ciò riguarda i veicoli che percorrono la corsia più esterna del ramo, ovvero quelli sulla carreggiata anulare che avanzano lungo la corsia più prossima all'isola centrale. Infine, si è osservato che il comportamento degli utenti risulta influenzato dalla posizione occupata dal veicolo sia sull'approccio di riferimento sia sull'approccio antagonista.

3.1 Base metodologica

Le affinità tra le condizioni operative osservate alle rotatorie denominate MLLD ed alle intersezioni AWSC hanno suggerito che il funzionamento delle prime può essere modellato a partire da un numero discreto di valori di distanziamenti temporali in condizioni di saturazione, ciascuno dei quali rappresenta il grado di conflitto affrontato dal veicolo sul ramo di riferimento (cioè dal veicolo alla linea di stop in corrispondenza del ramo di ingresso, ovvero dal veicolo alla linea ideale di stop sulla carreggiata anulare in corrispondenza del ramo), in relazione ai veicoli presenti o meno sull'approccio antagonista.

A differenza delle intersezioni AWSC, ad un generico approccio di una rotonda MLLD due possibili casi di grado di conflitto possono essere incontrati dal veicolo in entrata (o sulla carreggiata anulare):

- il primo ($C_{1/0}$) si attua quando sull'approccio antagonista (il ramo o la carreggiata anulare di una rotonda MLLD) non sono presenti veicoli.
- il secondo ($C_{3/*}$) si attua quando sull'approccio antagonista sono presenti uno o più veicoli; esso si articola in diversi sotto casi in relazione al numero di veicoli presenti sull'approccio antagonista.

La Tabella 1 mostra i casi di grado di conflitto, corrispondenti alle diverse combinazioni possibili (in numero di otto) per una rotonda MLLD caratterizzata da tre corsie in entrata sul ramo e sulla carreggiata anulare.

Tabella 1 – Casi di grado di conflitto ad una rotonda MLLD

Caso di grado di conflitto		approccio			
		riferimento	antagonista		
			L_z	L_1	L_2
1	1/0	1	0	0	0
2	3/1 _a	1	1	0	0
3	3/1 _b	1	0	1	0
4	3/1 _c	1	0	0	1
5	3/2 _a	1	1	1	0
6	3/2 _b	1	1	0	1
7	3/2 _c	1	0	1	1
8	3/3	1	1	1	1

Note: 1 indica che è presente un veicolo nella corsia; 0 indica che non è presente alcun veicolo nella corsia

Il distanziamento tra due partenze successive di veicoli sull'approccio considerato di riferimento è il valore atteso della distribuzione dei distanziamenti temporali in condizioni di saturazione (Richardson, 1987; Kyte et al., 1997; HCM 2000) secondo la seguente espressione:

$$h_d = \sum_{i=1}^n P(i) \times h_{si} \tag{1}$$

in cui:

$P(i)$ = probabilità di accadimento dell'*i*-esimo caso di grado di conflitto;

h_{si} = distanziamento temporale in condizioni di saturazione per l'*i*-esimo caso di grado di conflitto, noti i volumi veicolari e la geometria dell'approccio;

i = generica combinazione degli *n* casi di grado di conflitto.

La probabilità di accadimento per ciascun caso di grado di conflitto può essere computata attraverso la relazione:

$$P(i) = \prod_{L_z} P(a_{L_z}) \tag{2}$$

in cui:

- L_z = rappresenta la generica corsia dell'approccio antagonista, ove $z = 1,2,3$ per una rotonda MLLD caratterizzata da tre corsie in entrata sul ramo e sulla carreggiata anulare;
- a_{Lz} = assume il valore 1 in presenza di un veicolo sulla generica corsia dell'approccio antagonista, o il valore 0 in assenza di veicolo;
- $P(a_{Lz})$ = probabilità che ci sia o meno un veicolo sulla generica corsia dell'approccio antagonista ed assume i valori riportati in Tabella 2, ove V_{Lz} rappresenta il tasso di flusso della generica corsia.

Tabella 2 - Probabilità di a_{Lz}

a_{Lz}	V_{Lz}	$P(a_{Lz})$
1	0	0
0	0	1
1	> 0	x_{Lz}
0	> 0	$(1 - x_{Lz})$

In accordo alla procedura descritta dall'HCM 2000 per le intersezioni AWS, in corrispondenza dell'approccio di riferimento, la probabilità che ci sia o meno un veicolo sulla generica corsia dell'approccio antagonista è calcolata a partire dal grado di utilizzazione (x) di ciascuna corsia dell'approccio antagonista; quando il tasso di flusso (V_{Lz}) per la generica corsia è noto, il grado di utilizzazione è espresso come segue:

$$x = \frac{V_{Lz} \times h_{d,Lz}}{3600} \quad (3)$$

Per una rotonda MLLD a tre corsie in entrata e sull'anello, la Tabella 3 riporta, i casi di grado di conflitto e le corrispondenti probabilità di accadimento.

Tabella 3 - Probabilità di accadimento dei casi di grado di conflitto

Caso di grado di conflitto	Probabilità di accadimento
1/0	$P(C_{1/0}) = (1-x_{L1}) \cdot (1-x_{L2}) \cdot (1-x_{L3})$
3/1 _a	$P(C_{3/1})_a = x_{L1} \cdot (1-x_{L2}) \cdot (1-x_{L3})$
3/1 _b	$P(C_{3/1})_b = (1-x_{L1}) \cdot x_{L2} \cdot (1-x_{L3})$
3/1 _c	$P(C_{3/1})_c = (1-x_{L1}) \cdot (1-x_{L2}) \cdot x_{L3}$
3/2 _a	$P(C_{3/2})_a = x_{L1} \cdot x_{L2} \cdot (1-x_{L3})$
3/2 _b	$P(C_{3/2})_b = x_{L1} \cdot (1-x_{L2}) \cdot x_{L3}$
3/2 _c	$P(C_{3/2})_c = (1-x_{L1}) \cdot x_{L2} \cdot x_{L3}$
3/3	$P(C_{3/3}) = x_{L1} \cdot x_{L2} \cdot x_{L3}$

In base a quanto sopra esposto, per il caso preso in considerazione (rotonda MLLD a tre corsie in entrata sul ramo e sulla carreggiata anulare, corrispondente ad otto combinazioni di casi di conflitto) il distanziamento tra due veicoli consecutivi che effettuano l'immissione dall'approccio di riferimento (il ramo o la carreggiata anulare) è espresso dalla seguente espressione (equazione 4):

$$(h_d)_{Lz} = \sum_{i=1}^8 P(i) \cdot (h_{si})_{Lz} = P(C_{1/0}) \cdot (h_{S1/0})_{Lz} + \sum_{i=2}^4 P(C_{3/1})_i \cdot (h_{S3/1})_{Lz,i} + \sum_{i=5}^7 P(C_{3/2})_i \cdot (h_{S3/2})_{Lz,i} + P(C_{3/3}) \cdot (h_{S3/3})_{Lz} \quad (4)$$

Per i motivi in precedenza esposti (cfr. paragrafo 1), le osservazioni macroscopiche delle condizioni di traffico emersa hanno messo in evidenza la difficoltà di rilevare direttamente i parametri comportamentali di base (cioè i distanziamenti temporali in condizioni di saturazione). Pertanto, la metodologia proposta per le rotatorie MLLD ha richiesto preliminarmente la stima dei parametri comportamentali incogniti, ovvero dei distanziamenti temporali in condizioni di saturazione per ciascuna corsia del sistema. A questo scopo, è stato sviluppato (Giuffrè et al., 2007) un modello marginale in ambiente GEE (Generalized Estimating Equations), basato sul grado di conflitto in cui incorre il conducente sull'approccio considerato di riferimento, calibrato a partire dalle osservazioni di traffico in corrispondenza delle corsie dell'approccio antagonista.

Per l'interpretazione analitica del modello si veda quanto riportato in Hardin e Hilbe (2003).

3.2 La metodologia proposta per il calcolo della capacità

Una volta determinati i distanziamenti in saturazione (cfr. paragrafo 3.1), per valutare la capacità di ciascun approccio in una rotatoria MLLD è stato implementato un algoritmo di calcolo; l'articolazione del procedimento in step computazionali successivi è affine a quella indicata dall'HCM 2000 (cap. 17) a proposito del modello di capacità delle intersezioni di tipo AWSC, ma differisce da questa per la necessità di una previa stima dei distanziamenti in saturazione a partire da osservazioni di campo.

Per un'assegnata matrice di domanda, il modello di capacità proposto richiede la stima dei distanziamenti (h_d) tra veicoli consecutivi in entrata dall'approccio considerato di riferimento (il ramo o la carreggiata anulare); la valutazione va effettuata per ciascuna corsia di ingresso o per ciascuna corsia della carreggiata anulare.

Gli step di seguito riportati mostrano le fasi computazionali dell'algoritmo di calcolo per valutare la capacità ad un approccio di una rotatoria MLLD (cfr. Figura 1):

1. dati di input: gli input essenziali alla stima degli $h_{d,Lz}$ comprendono: i) dati inerenti la configurazione geometrica di ciascun approccio in termini di numero di corsie in entrata sul ramo e sulla carreggiata anulare; ii) i volumi orari di traffico (totali e ripartiti per corsia); iii) la ripartizione dei dati di traffico per movimento servito, allorché sono presenti corsie condivise. La ripartizione dei dati di traffico per movimento servito (attraversamento, svolta a sinistra o a destra) è altresì utile per specificare i valori dei distanziamenti in condizioni di saturazione h_{si} . Questi ultimi, variabili da corsia a corsia e derivabili in accordo alla procedura descritta da Giuffrè O. et al. (2007), compendiano i distanziamenti di base in condizione di saturazione ed il fattore di aggiustamento dei distanziamenti in saturazione;
2. stati di probabilità: la fase computazionale prevede: i) l'individuazione dei casi di grado di conflitto; ii) la stima dei gradi di utilizzazione a corsia; iii) il calcolo della probabilità di ciascun caso di grado di conflitto;

3. il calcolo degli $(h_d)_{i,z}$ per ciascuna corsia dell'approccio di riferimento (ramo o carreggiata anulare): l'interdipendenza dei volumi veicolari agli approcci innesca un procedimento iterativo secondo cui l' h_d calcolato in ciascuna iterazione per un approccio (quando questo è considerato di riferimento) è utilizzato come h_d iniziale della successiva iterazione dell'altro approccio (quando questo a sua volta diventa di riferimento). Il calcolo degli h_d è ripetuto finché due successive iterazioni soddisfano ad un prefissato criterio di convergenza (ad esempio, $h_{d,i} - h_{d,i-1} \leq 0.1$ sec);
5. il calcolo della capacità dell'approccio: la capacità di una corsia, analogamente alle intersezioni AWSC, è definita come il massimo tasso di flusso sull'approccio antagonista. Il calcolo della capacità presuppone che la matrice di domanda si mantenga costante tranne che per il tasso di flusso che interessa la corsia di cui si vuole conoscere la capacità; quindi, il valore del tasso di flusso sulla corsia dell'approccio di riferimento di volta in volta considerata viene aumentato secondo un'assegnata ipotesi di incremento, mantenendo costanti i volumi delle corsie adiacenti e di quelle antagoniste, finché il grado di utilizzazione, x , è pari a 1. Quando ciò si verifica il valore finale del tasso di flusso corrisponde al massimo smaltibile dall'approccio di riferimento, ovvero alla capacità della corsia considerata.

Queste considerazioni suggeriscono che la capacità di una corsia di una rotonda MLLD, nota la geometria e la distribuzione dei volumi per corsia sugli approcci, è il massimo valore del tasso di flusso entrante oltre cui si verifica la congestione.

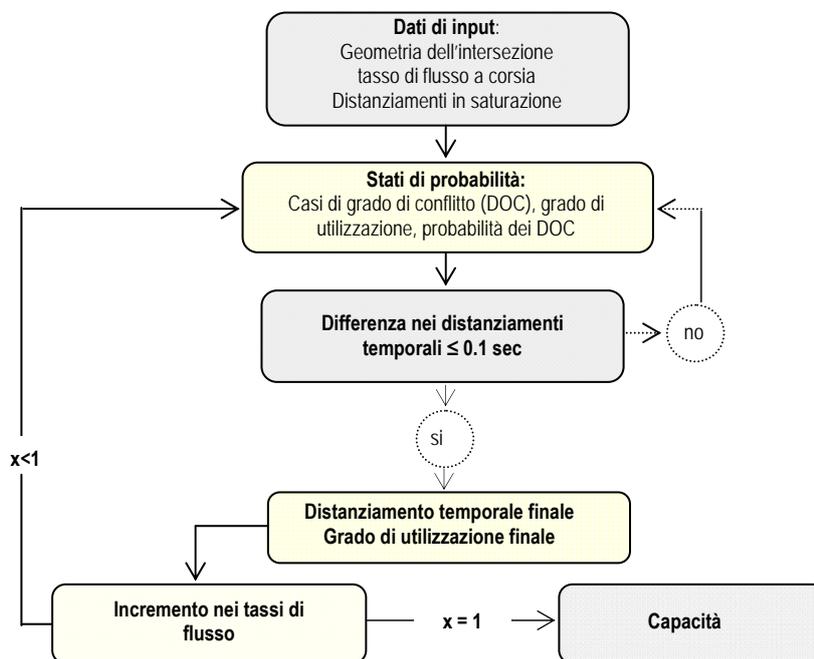


Figura 1 - Metodologia per il calcolo della capacità alle rotonde MLLD

4. APPLICAZIONE DEL MODELLO GENERALIZZATO AD UN CASO STUDIO

Per l'applicazione dell'algoritmo di capacità proposto è stata presa in considerazione una rotonda non convenzionale a grande diametro ed a più corsie in entrata e sulla carreggiata anulare (rotonda MLLD), appartenente alla rete viaria di Palermo. Le osservazioni di traffico e l'analisi dei dati di campo sono riportati in un precedente lavoro (Giuffrè et al., 2007). Lo stesso lavoro riporta, inoltre, la procedura sviluppata per determinare i parametri comportamentali incogniti dalle osservazioni di traffico (cioè la stima dei parametri del modello e la validazione del modello).

I distanziamenti temporali in condizioni di saturazione a corsia (h_{si}), stimati considerando come regressore la somma della probabilità di accadimento dei casi di grado di conflitto $(3/2)_i$ ($i = a, b, c$) e $(3/3)$, sono calcolabili ricorrendo alla seguente espressione:

$$h_{si, Lz} = h_{si-base, Lz} + h_{TH, Lz} P_{TH, Lz} \quad (5)$$

in cui:

$h_{si-base, Lz}$ = distanziamento temporale in condizioni di saturazione per l' i -esimo caso di grado di conflitto, a corsia;

$h_{TH, Lz}$ = fattore di aggiustamento per il traffico di attraversamento, a corsia;

$P_{TH, Lz}$ = aliquota del traffico che effettua manovra di attraversamento, a corsia.

I distanziamenti temporali in condizioni di saturazione in corrispondenza della rotonda non convenzionale selezionata come caso studio sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4 - Distanziamenti temporali in condizioni di saturazione.

DOC case	h_s	circulatory roadway			entry		
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₁	L ₂	L ₃
1/0 or (3/1) _i	$h_{si-base}$	1.99	1.42	1.13	1.73	1.16	0.87
	h_{TH}	-	-	-	-	-	-
(3/2) _i plus (3/3)	$h_{si-base}$	8.53	5.77	4.10	6.53	3.77	2.10
	h_{TH}	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73

L'applicazione della procedura iterativa proposta per il calcolo della capacità (cfr. paragrafo 3.2) ha permesso la rappresentazione del legame funzionale tra i valori di capacità di ciascuna corsia dell'entrata ed i veicoli circolanti, sia quando il ramo d'entrata è l'approccio di riferimento (cfr. Figura 2), sia quando l'approccio di riferimento è la carreggiata anulare (cfr. Figura 3). In considerazione della complessità della procedura per lo schema considerato, per la rappresentazione del suddetto legame funzionale sono state assunte le seguenti ipotesi esemplificative: i) tre corsie in entrata e tre corsie sulla carreggiata circolare; ii) la corsia esterna del ramo non è condizionata dai veicoli circolanti lungo la carreggiata anulare; iii) i tassi di flusso iniziali, sia in corrispondenza dell'entrata, sia in corrispondenza della carreggiata anulare, hanno lo stesso valore totale e sono egualmente ripartiti tra le corsie, ove i veicoli seguono uno schema di consenso alternato del diritto di precedenza.

I risultati di questa analisi esplorativa devono essere letti con attenzione. Considerando il grafico di Figura 2, a titolo d'esempio, quando il tasso di flusso veicolare in corrispondenza della corsia L₁ del ramo è uguale a 1870 veic/h il tasso di flusso corrispondente sulla carreggiata anulare è uguale a 500 veic/h; inoltre, quest'ultimo è equamente ripartito tra le tre corsie. Contemporaneamente, il tasso di flusso veicolare sull'altra corsia dell'approccio di riferimento (L₂) è costante ed uguale al valore iniziale (250 veic/h). In particolare, il grafico si riferisce solo alle due corsie dell'entrata (L₁, L₂) che si caratterizzano per un elevato grado di conflitto. L'analoga relazione per la corsia esterna del ramo d'entrata è stata trascurata perché lungo la stessa i veicoli seguono un altro schema funzionale, ovvero non risultano, come emerso durante le osservazioni di traffico, condizionati dai veicoli antagonisti.

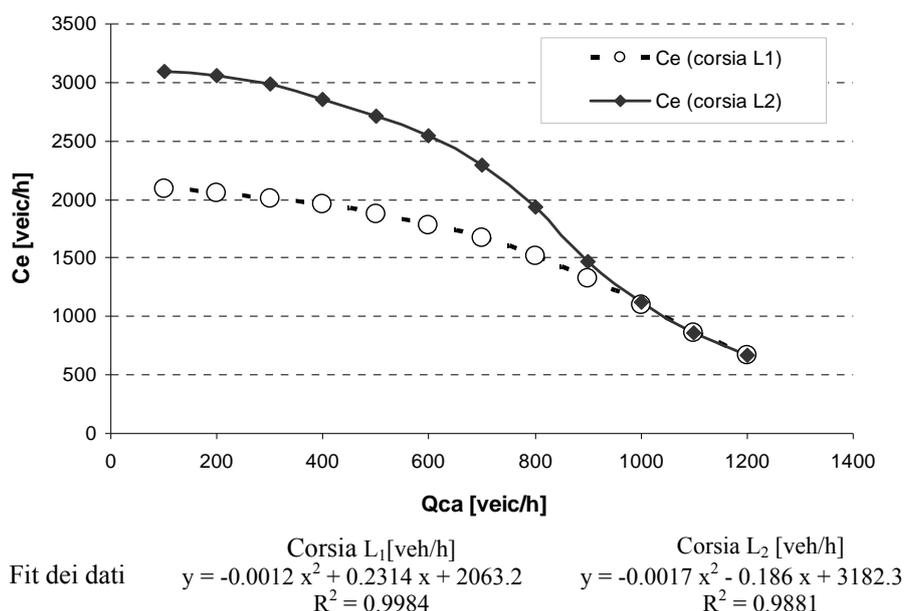
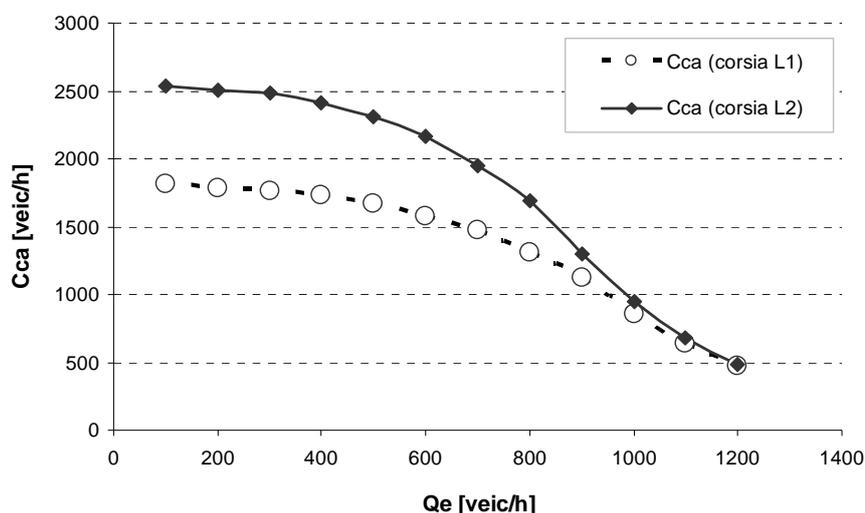


Figura 2 – Capacità del ramo d'entrata in funzione del tasso di flusso sulla carreggiata anulare ad una rotonda MLLD a più corsie

Nota: "e" in C_e è relativo all'entrata; "ca" in Q_{ca} è relativo alla carreggiata anulare

I casi mostrati in Figura 3 sono simili a quelli prima esaminati. In particolare, quando il valore di capacità è 1667 veic/h in corrispondenza della corsia L₁ della carreggiata anulare, il corrispondente tasso di flusso totale in entrata dal ramo, come riportato sull'asse delle ascisse è pari a 500 veic/h ed è equamente ripartito tra le corsie in corrispondenza delle quali gli utenti seguono lo schema operativo osservato. Inoltre, durante la crescita incrementale del tasso di flusso sulla corsia considerata dell'approccio di riferimento (corsia L₁ della carreggiata anulare), i flussi sulle altre corsie dello stesso approccio sono costanti e pari al valore iniziale. L'analoga relazione per la corsia più interna della carreggiata anulare è stata anche in questo caso trascurata,

poiché i veicoli in transito lungo la stessa non risultano condizionati dai veicoli antagonisti, ovvero dai volumi veicolari in entrata dal ramo.



	Corsia L ₁ [veh/h]	Corsia L ₂ [veh/h]
Fit dei dati	$y = -0.0013 x^2 + 0.4666 x + 1761.5$ $R^2 = 0.996$	$y = -0.0019 x^2 + 0.401 x + 2529.8$ $R^2 = 0.9913$

Figura 3 – Capacità della carreggiata anulare in funzione del tasso di flusso in entrata dal ramo ad una rotatoria MLLD a più corsie

Nota: “e” in C_e è relativo all’entrata; “ca” in Q_{ca} è relativo alla carreggiata anulare

Come di seguito mostrato, valori elevati di capacità corrispondono a valori contenuti dei volumi veicolari antagonisti. Inoltre, quando i volumi veicolari antagonisti aumentano, i valori di capacità diminuiscono più rapidamente rispetto al caso di una rotatoria convenzionale.

Ulteriori osservazioni macroscopiche delle condizioni di traffico in corrispondenza della rotatoria selezionata come caso studio hanno suggerito un’ulteriore analisi esplorativa al fine di considerare altri casi reali, ovvero i casi in cui dalla anche i veicoli circolanti sulla corsia più interna della carreggiata anulare (oltre a quelli che si immettono in rotatoria dalla corsia più esterna del ramo di ingresso) non sono condizionati dai rispettivi veicoli antagonisti. Per rappresentare il caso sopra descritto, si è ricorso a particolari ipotesi esemplificative, ovvero si è considerato: i) due corsie sul ramo e due corsie sulla carreggiata anulare; ii) i volumi veicolari in entrata dalla corsia più esterna del ramo e dalla corsia più interna della carreggiata anulare non influenzano i veicoli in transito sulle corsie adiacenti e, a loro volta, non ne sono influenzati; iii) i valori dei volumi veicolari sia sul ramo, sia sulla carreggiata anulare, hanno lo stesso valore totale e sono egualmente ripartiti tra le corsie. In questo caso i distanziamenti temporali in condizione di saturazione sono stati stimati attraverso la procedura proposta da Giuffrè et al. (2007) e sono riportati in Tabella 5.

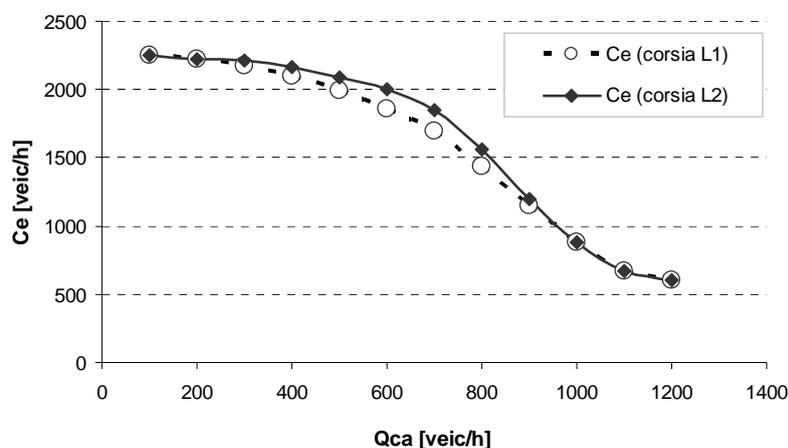
A partire da queste assunzioni, i grafici delle Figure 4 e 5 mostrano il legame funzionale tra i valori di capacità raggiunti in corrispondenza di ciascuna corsia, sia nel

Tabella 5 – Distanziamenti temporali in condizione di saturazione ad una rotondria MLLD a due corsie in entrata e sulla carreggiata anulare.

Caso di grado di conflitto	h_s	Carreggiata anulare		Ramo d'entrata	
		L_1	L_2	L_1	L_2
1/0 plus 3/1	$h_{si-base}$	1.61	1.61	1.61	1.61
	h_{TH}	-	-	-	-
3/2 plus 3/3	$h_{si-base}$	9.53	6.61	6.92	3.99
	h_{TH}	1.12	1.12	1.12	1.12

caso in cui il ramo d'entrata è l'approccio di riferimento (Figura 4), sia pure nel caso in cui l'approccio di riferimento è rappresentato dalla carreggiata anulare (Figura 5).

Considerando il caso di Figura 4 a titolo d'esempio, quando il tasso di flusso in corrispondenza della corsia L_1 del ramo d'entrata assume un valore di capacità pari a 1860 veic/h, il corrispondente valore del tasso di flusso sulla carreggiata anulare in corrispondenza della carreggiata anulare, come riportato sull'asse delle ascisse, è pari a 600 veic/h ed è equamente ripartito tra le due corsie. Inoltre, durante la crescita incrementale del tasso di flusso sulla corsia considerata dell'approccio di riferimento (corsia L_1 del ramo), il tasso di flusso sull'altra corsia dell'approccio di riferimento (corsia L_2) è costante e pari al valore iniziale (300 veic/h). Le analoghe relazioni per le corsie della carreggiata anulare, allorché è considerata a sua volta come approccio di riferimento, sono riportate in Figura 5.



	Corsia L_1 [veh/h]	Corsia L_2 [veh/h]
Fit dei dati	$y = -0.0012 x^2 + 0.1327 x + 2311.6$ $R^2 = 0.9862$	$y = -0.0016 x^2 + 0.4529x + 2233.7$ $R^2 = 0.9772$

Figura 4 - Capacità del ramo d'entrata in funzione del tasso di flusso sulla carreggiata anulare ad una rotondria MLLD a due corsie

Nota: "e" in C_e è relativo all'entrata; "ca" in Q_{ca} è relativa alla carreggiata anulare

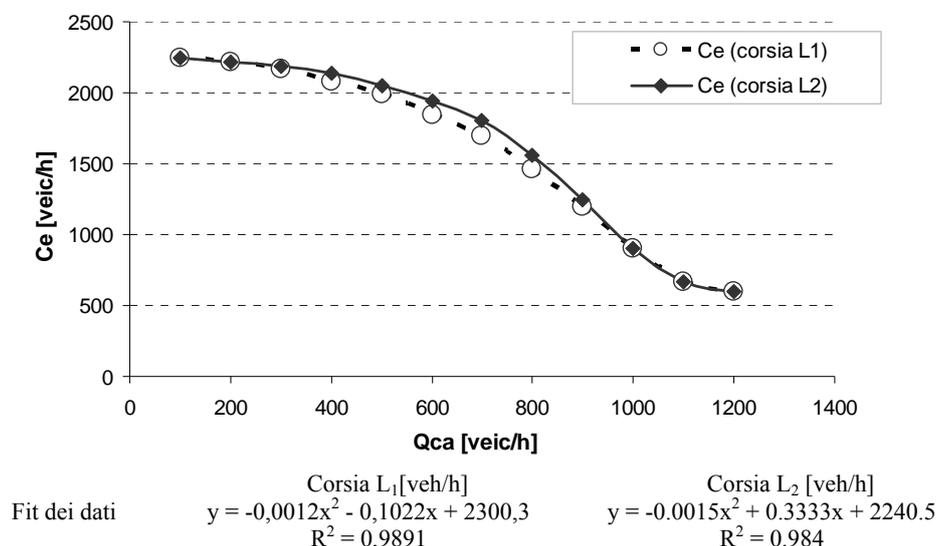


Figura 5 – Capacità della carreggiata anulare in funzione del tasso in entrata dal ramo ad una rotondella MLLD a due corsie

Nota: “e” in C_e è relativo all’entrata; “ca” in Q_{ca} è relativo alla carreggiata anulare

4.1 Confronto tra modelli di capacità

Come descritto nei paragrafi precedenti, la capacità di una corsia di una rotondella MLLD, in analogia a quanto si intende per le intersezioni all-way-stop-controlled intersections (cfr. HCM 2000), è definita come il massimo tasso di flusso smaltibile da un approccio, per un’assegnata distribuzione dei flussi veicolari a corsia sull’altro approccio dell’intersezione. La capacità dell’approccio viene calcolata nell’assunzione che i volumi che impegnano le corsie dell’approccio antagonista siano costanti. Il tasso di flusso sulla corsia dell’approccio di riferimento cresce secondo un’assegnata ipotesi di incremento, mantenendo costante il tasso di flusso nelle corsie adiacenti; quando il grado di utilizzazione in una qualunque corsia raggiunge il valore unitario, il valore finale del tasso di flusso rappresenta il massimo smaltibile o la capacità della corsia considerata.

Queste considerazioni consentono di definire la capacità di una corsia delle rotonde MLLD, nota la geometria e la distribuzione (per corsia) dei volumi veicolari che interagiscono con le correnti veicolari del ramo di riferimento, come il massimo tasso di flusso in entrata oltre il quale si manifesta il fenomeno di congestione.

Le Figure seguenti mostrano il confronto tra i valori di capacità del ramo per la rotondella MLLD a tre corsie in entrata e sulla carreggiata anulare considerata nei due esempi precedenti (cfr par. 4) ed i valori di capacità secondo:

- la formulazione di Kimber [Kimber, 1980] per la capacità delle rotonde di grande diametro;

- la formulazione di Brilon-Wu [1996], come riportata dal Manuale KREISEL e dalla norma HBS2001 (FGSV 2001).

Il confronto è stato effettuato sia nel caso di due corsie in entrata e tre corsie nella carreggiata anulare (cfr. Tabella 6), sia nel caso di due corsie in entrata e sulla carreggiata anulare (cfr. Tabella 7). I modelli utilizzati per il confronto utilizzano il flusso totale circolante per determinare la capacità dell'entrata. Il modello di regressione di Kimber stima valori più elevati del modello di capacità proposto da Brilon-Wu nell'intero campo di variazione del tasso di flusso totale sulla carreggiata anulare.

Tabella 6 - Confronto tra i modelli di capacità ed i valori sperimentali ad una rotatoria MLLD a tre corsie in entrata e sull'anello

Q_{ca}	C_e (corsia L_1)	C_e (corsia L_2)	Brilon-Wu	Kimber
100	2140	3140	2305	2708
200	2160	3160	2138	2624
300	2160	3140	1980	2540
400	2160	3060	1832	2456
500	2120	2960	1692	2373
600	2080	2840	1561	2289
700	2020	2640	1438	2205
800	1920	2340	1323	2121
900	1780	1920	1215	2037
1000	1600	1620	1114	1954
1100	1410	1410	1020	1870
1200	1270	1270	931	1786

Nota: I valori di capacità calcolati con il modello di Brilon-Wu (1996) sono relativi a $n_e/n_a = 2/3$

Legenda:

<i>valore minimo</i>	<i>I valore intermedio</i>	<i>II valore intermedio</i>	<i>valore massimo</i>
----------------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------

Come mostrato in Tabella 6, quando il tasso di flusso totale sulla carreggiata anulare (Q_{ca}), come riportato sull'asse delle ascisse, è uguale a 500 veic/h i corrispondenti valori di capacità del ramo sono uguali a 2120 veic/h e 2960 veic/h sulle curve sperimentali $C_e(1)$ e $C_e(2)$, rispettivamente. In particolare, il valore di 2120 veic/h è stato ottenuto sommando al valore di capacità raggiunto sulla corsia L_1 durante la fase di crescita incrementale e pari a 1870 veic/h al valore iniziale del tasso di flusso (250 veic/h), mantenuto costante sull'adiacente corsia L_2 dell'entrata. Considerazioni analoghe possono effettuarsi con riferimento alla curva sperimentale $C_e(2)$.

A partire da quanto indicato dai grafici, il guadagno di capacità imputabile allo schema di consenso del diritto di precedenza osservato tra i veicoli entranti e quelli in circolo sulla carreggiata anulare della rotatoria MLLD esaminata interessa valori dei flussi circolanti entro l'intero campo di variabilità degli stessi.

Tabella 7 - Confronto tra i modelli di capacità ed i valori sperimentali ad una rotatoria MLLD a due corsie in entrata e sull'anello

Q_{ca}	C_e (corsia L_1)	C_e (corsia L_2)	Brilon-Wu	Kimber
100	2300	2300	2305	2708
200	2320	2320	2135	2624
300	2320	2360	1975	2540
400	2300	2360	1822	2456
500	2240	2340	1678	2373
600	2160	2300	1542	2289
700	2050	2200	1413	2205
800	1840	1960	1291	2121
900	1600	1650	1177	2037
1000	1380	1380	1069	1954
1100	1220	1220	968	1870
1200	1200	1201	873	1786

Nota: I valori di capacità calcolati con il modello di Brilon-Wu (1996) sono relativi a $ne/na = 2/2$

Legenda:

valore minimo	I valore intermedio	II valore intermedio	valore massimo
---------------	---------------------	----------------------	----------------

5. CONCLUSIONI

I modelli sviluppati per le rotatorie convenzionali non consentono valutazioni attendibili delle condizioni operative per rotatorie che presentano difformità geometriche e modalità di funzionamento atipiche. In corrispondenza delle rotatorie oggetto dell'analisi si è osservato che gli utenti non rispettano la precedenza ma si comportano secondo uno schema alternato di negoziazione della precedenza con gli utenti degli approcci antagonisti.

L'analogia con le intersezioni all-way-stop-controlled ha permesso, seppure con i limiti dei casi analizzati, di interpretare i dati sperimentali e di sviluppare un modello di capacità in grado di quantificare e qualificare gli aspetti funzionali della rotatoria.

L'applicazione ad una rotatoria non convenzionale esaminata come caso studio ha permesso di illustrare come derivare il modello e di applicare l'algoritmo di calcolo per valutare le prestazioni ad un'entrata di una rotatoria MLLD attraverso la sua articolazione in successivi step computazionali.

Il metodo può essere adattato sia per tenere conto di specifici layout geometrici, per i quali i modelli ordinari basati sulla teoria del gap-acceptance non sono applicabili, sia per includere fattori che possono influenzare le condizioni operative in esame (corsia occupata dai veicoli agli approcci, presenza di veicoli pesanti, tipo di movimento, etc.).

L'accesso a tali parametri è la fase preliminare allo sviluppo di un modello analitico per stimare il livello di servizio sperimentato dagli utenti alle rotatorie non convenzionali.

BIBLIOGRAFIA

- Brilon, W. e Wu N. (1996). User Manual of KREISEL, Germany.
- FGSV 2001. Handbook for assessing road traffic facilities. Koln: Forschungsgesellschaft fur das Strassen und Verkehrswesen HBS 2001.
- Giuffrè O., Granà A., Giuffrè T., Marino R. (2007). "Modeling traffic operations and driver' behavioral parameters at not-conventional roundabouts. A theoretic-experimental approach". *Proceedings of the 86th TRB Annual Meeting*. pp. 1-16, Cd-rom. Transportation Research Board, national Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- Granà, A. and Giuffrè T. (2005). "Performance analysis of roundabouts in strongly constrained environment. Case studies in urban areas". *In National Roundabout Conference Compendium. Cd-rom*. TRB, Washington, D.C., U.S.A.
- Kimber R.M. (1980). "The traffic capacity of roundabouts", *TRRL Laborator, Report 942*, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Kyte, M. et al., (1997). Capacity and level of service at unsignalized intersections, *Final Report, Vol. 2, All-Way Stop-Controlled Intersections*, NCHRP Web Doc 6.
- Hardin, J. W. and J. M. Hilbe (2003). *Generalized estimating equations*. Chapman and Hall/CRC Press. Boca Raton, FL.
- HCM 2000, TRB Highway Capacity Manual. TRB - NRC, Washington, DC.
- "Merkblatt fur die Anlage von Kreisverkehren" (2006). FGSV Verlag GmbH, Koln.
- Richardson, A. (1987). A delay Model for Multiway Stop-Sign Intersections. In *Transportation Research Record 1112*, TRB, Washington, D.C., pp. 107-114.