

# **LE INTERSEZIONI A ROTATORIA: ANALISI TEORICO-SPERIMENTALE E MODELLI TEORICI PER LA STIMA DELLA CAPACITÀ**

*Nicolosi V.*

*Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" – nicolosi@uniroma2.it*

*Crisalli U.*

*Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" – crisalli@ing.uniroma2.it*

*D'Apuzzo M.*

*Università degli Studi di Cassino – dapuzzo@unicas.it*

## **SOMMARIO**

Le intersezioni a rotatoria da circa un decennio hanno trovato un crescente impiego in Italia, soprattutto in ambito urbano, in quanto in molti casi consentono di ottimizzare il deflusso veicolare e, rispetto ad altri sistemi di regolazione delle intersezioni, permettono di ridurre l'impatto ambientale. Le verifiche del funzionamento adottate in Italia per questo tipo di intersezioni, in termini di circolazione stradale, fanno riferimento ai criteri empirici sviluppati prevalentemente nei paesi anglosassoni ed in Francia, mentre le verifiche relative all'affidabilità di tali criteri nel contesto urbano Italiano risultano essere alquanto limitate. Un approccio alternativo ai metodi empirici è costituito dalle procedure di analisi di carattere teorico-statistico, che sono scarsamente utilizzate a causa della difficoltà di stimare i parametri connessi al comportamento degli utenti (p.e. intervallo critico, tempo di follow-up, ecc.). Questo studio ha l'obiettivo di fornire un contributo sia per quanto concerne la verifica dei modelli empirici, che riguardo all'analisi del comportamento degli utenti ed allo sviluppo di metodi teorici per il calcolo della capacità degli ingressi. In particolare è stata condotta un'analisi sperimentale, con l'ausilio di rilievi video, su alcune rotatorie in ambito urbano al fine di:

- analizzare e proporre modelli stocastici per rappresentare il comportamento degli utenti;
- effettuare misure di capacità degli ingressi per:
  - a) verificare l'attendibilità dei metodi di calcolo teorici ed empirici maggiormente impiegati;
  - b) verificare la possibilità di effettuare una calibrazione dei modelli in funzione del comportamento degli utenti riscontrato.

Keywords: Rotatoria, capacità, intervallo critico, tempo di follow-up

## INTRODUZIONE

Le rotatorie sono attualmente tra le soluzioni progettuali più frequentemente adottate in Italia per le intersezioni a raso in ambito urbano o sub-urbano, dopo essere state ampiamente impiegate nel ventennio precedente in ambito extraurbano. Le motivazioni di questa scelta sono da attribuire alle elevate prestazioni in termini di funzionalità ed alla maggiore sicurezza della circolazione che tale tipo di intersezione sembra offrire in un numero ampio di condizioni di impiego. Alla diffusione delle intersezioni a rotatoria ha fatto quindi riscontro una crescente domanda di affidabili strumenti di analisi, in grado di valutarne la capacità e le prestazioni funzionali (i.e. ritardo, lunghezza della coda, etc.), rendendo così possibile il confronto con differenti soluzioni progettuali. I metodi di analisi delle prestazioni funzionali delle rotatorie sono usualmente classificati in empirici o analitici, empirici o teorici, microscopici o macroscopici. Benché tali classificazioni rappresentino in realtà una semplificazione, e sia spesso difficile applicarle, nell'ambito di questo studio si utilizzerà la distinzione tra modelli teorici e modelli empirici, attribuendo a quest'ultima classe i modelli sviluppati sulla base di regressioni statistiche effettuate su dati sperimentali senza alcun riferimento a rappresentazioni teoriche del problema.

I modelli, siano essi empirici o teorici, necessitano di un'accurata calibrazione per essere considerati affidabili [NCHRP 2007]; infatti la capacità e le prestazioni funzionali delle intersezioni a rotatoria sono influenzate da numerosi fattori, tra cui i più significativi sono: le caratteristiche geometriche ed il comportamento degli utenti. Quest'ultimo varia in funzione delle abitudini di guida nonché delle politiche relative al controllo, e pertanto presenta significative differenze tra le varie nazioni. Inoltre il comportamento degli utenti risulta essere influenzato anche da altri fattori quali: il tipo di strada, l'ambito (urbano o extraurbano), le caratteristiche dei conducenti ed il tipo di veicolo. Le grandezze maggiormente significative ai fini della rappresentazione del comportamento degli utenti, o meglio dell'influenza di quest'ultimo sui parametri di prestazione funzionali delle intersezioni a rotatoria, sono sicuramente: il distanziamento temporale tra i veicoli in ingresso (follow-up headway) e l'intervallo critico (critical gap) [Akçelik 2005]. Per quanto concerne l'analisi di traffico delle intersezioni a rotatoria, la capacità ( $C$ ) è sicuramente il più importante tra i parametri di prestazione; tale parametro infatti individua innanzitutto i limiti operativi di impiego dell'intersezione, oltre ad influenzare la valutazione degli altri parametri di prestazione (ritardo, lunghezza della coda etc.), che in molti metodi di analisi sono funzione del grado di saturazione (rapporto tra portata e capacità) [Akçelik 2008].

L'importanza di procedere ad una calibrazione dei modelli, sia teorici che empirici, impiegati per la rappresentazione del funzionamento in termini di traffico delle intersezioni a rotatoria è stata più volte sottolineata in ambito internazionale ed è confermata dai numerosi programmi di ricerca svolti negli ultimi anni [NCHRP 2007 e Akçelik 1999].

Nel presente lavoro sono illustrati i risultati di una sperimentazione condotta su diverse intersezioni a rotatoria in ambito urbano con l'ausilio di tecniche di video-rilevamento, al fine di fornire indicazioni circa il comportamento degli utenti in corrispondenza delle

intersezioni a rotatoria, nonchè elementi per la calibrazione dei modelli teorici ed empirici impiegati per la valutazione della capacità degli ingressi. Attraverso questo studio si vuole pertanto fornire un contributo per la definizione di criteri e metodi di analisi delle prestazioni funzionali delle intersezioni a rotatoria nel contesto nazionale italiano, con specifico riferimento alla viabilità in ambito urbano.

## LE MISURE SPERIMENTALI

### Definizioni e criteri di analisi delle misure

La calibrazione dei modelli è effettuata attraverso l'analisi comparativa dei valori della capacità e dei parametri di prestazione, forniti dai modelli stessi, con i valori misurati sperimentalmente. In tale contesto va sottolineata l'importanza della consistenza dei parametri posti a confronto, dal punto di vista della definizione e dei conseguenti metodi di misura sperimentale impiegati per la loro valutazione.

La capacità, in particolare, può essere misurata sperimentalmente attraverso due metodologie:

- misurando la portata entrante durante i singoli intervalli maggiori dell'intervallo critico, che si presentano nella corrente principale, e la relativa porzione di tempo occupata da questi ultimi rispetto al tempo totale di osservazione;
- misurando le portate entranti da un ingresso in condizioni di saturazione con costante presenza di veicoli in attesa durante un periodo di osservazione sufficientemente lungo.

Il primo metodo è impiegato prevalentemente nell'analisi delle intersezioni semaforizzate, mentre trova scarso impiego nello studio delle intersezioni a rotatoria a causa della breve durata degli intervalli temporali della corrente principale (corrente circolante nell'anello) in cui si possono effettuare manovre di ingresso. Il secondo metodo è quello più diffusamente impiegato nell'analisi della capacità degli ingressi nelle intersezioni a rotatoria, vista la sua maggiore semplicità, anche se le misurazioni possono essere effettuate solo in condizioni di sovra-saturazione dell'ingresso.

Nella sperimentazione svolta, le misure di capacità sono state effettuate con quest'ultimo metodo, considerando come periodi di osservazione gli intervalli in cui il flusso nell'anello era stazionario. Per accertare la stazionarietà della realizzazione costituita dalla sequenza dei valori dei distanziamenti temporali  $t_1, \dots, t_{n1}, t_{n1+1}, \dots, t_{n1+n2}$  si è proceduto a verificare, con l'ausilio di test statistici, che due campioni in sequenza  $t_1, \dots, t_{n1}$  e  $t_{n1+1}, \dots, t_{n1+n2}$  possano essere ritenuti appartenenti alla stessa popolazione. I test sono stati applicati a partire dai primi due campioni di 25 valori ciascuno, procedendo ad aggregare i campioni in caso di esito positivo ed a confrontare il campione aggregato così ottenuto con il successivo campione di 25 valori, fino a quando l'ipotesi non è rifiutata [Cascetta 1986].

In ciascun intervallo temporale in cui i flussi sull'anello erano stazionari, oltre ai distanziamenti temporali nella corrente circolante sull'anello (gap), sono stati rilevati anche gli intervalli critici (critical headway), i tempi di sequenza (follow-up time), ed il numero di veicoli che effettuavano la manovra di immissione in corrispondenza di ciascun intervallo nella corrente principale (gap).

Gli intervalli critici  $t_c$  ed i tempi di sequenza  $t_f$  sono stati stimati sia attraverso l'approccio stocastico, che mira all'individuazione delle distribuzioni di probabilità teoriche dei due parametri, che attraverso la tecnica di regressione proposta da Siegloch [Troutbeck 2001]. In particolare, per quanto concerne l'individuazione della distribuzione statistica di  $t_c$ , è stata applicata la tecnica della massima verosimiglianza, proposta da Drew e Dawson, procedendo alla stima dell'intervallo critico attraverso l'osservazione del più elevato intervallo temporale rifiutato e dell'intervallo accettato da ciascun utente [Esposito 2003].

## Risultati sperimentali

Sono state analizzate, con l'ausilio di rilievi video, 3 rotonde appartenenti alle reti stradali urbane dei comuni di Roma, Frascati e Grottaferrata sulle quali sono state effettuate complessivamente oltre 16 ore di rilievo. Le caratteristiche geometriche delle rotonde e degli ingressi esaminati sono sinteticamente illustrate nel quadro sinottico di Tabella 1; è possibile osservare che le intersezioni prese in esame coprono un ampio spettro di configurazioni dalla rotonda di grande diametro ( $R=130m$ ) a quelle di medie e piccole dimensioni. Tutte le rotonde esaminate sono caratterizzate da ingressi con un'unica corsia, pertanto i dati rilevati sono riferiti all'unica corrente di traffico in entrata ed alla corrente in conflitto, che nel caso di rotonde con più corsie sull'anello è stata considerata quella circolante nella corsia esterna.

**Tabella 1 – Caratteristiche geometriche delle rotonde e degli ingressi su cui sono stati effettuati i rilievi sperimentali.**

	Rotatoria 1 Roma	Rotatoria 2 Roma		Rotatoria 3 Grottaferrata
	Ingresso via della Sorbona	Ingresso 1 Via Fosso di Santa Maura	Ingresso 2 Via Silicella	Ingresso Via Vittorio Veneto
Raggio esterno $R_{est}$ [m]	75	30.80	30.80	12.00
Raggio interno $R_{int}$ [m]	64.50	24.00	24.00	7
n° corsie anello	3	2	2	1
n° corsie ingresso	1	1	1	1
Larghezza ingresso ENT [m]	3.50	3.75	4.00	4.00
Larghezza anello ANN [m]	10.50	6.80	6.80	5.0
Larghezza isola separatrice SEP [m]	33.60	7.50	8.00	7.30

Il primo dato esaminato è rappresentato dai distanziamenti temporali nella corrente di traffico circolante nell'anello o gap (g), esso infatti è stato impiegato per individuare gli intervalli di misura in cui il flusso poteva essere considerato stazionario. Si è proceduto quindi all'analisi delle distribuzioni statistiche dei gap, in ciascuno degli intervalli con flusso stazionario, effettuando inferenze con le funzioni densità di probabilità usualmente impiegate, e verificando le bontà degli accostamenti attraverso il test statistico del  $\chi^2$ . A titolo di esempio, in Tabella 2 sono illustrati i dati relativi ai test effettuati per alcuni degli intervalli di analisi individuati (intervalli con flusso stazionario). Da questa analisi è emerso che la funzione esponenziale traslata è quella

che meglio rappresenta il fenomeno dei distanziamenti temporali tra i veicoli che percorrono l'anello della rotatoria (vedi Tabella 2).

Le seriazioni statistiche dei valori dell'intervallo critico (determinato attraverso il metodo suggerito da Draw e Dawson) e del tempo di sequenza, sono state analizzate in maniera analoga a quanto precedentemente svolto con riferimento ai gap. Le funzioni densità di probabilità teoriche di cui è stato verificato l'accostamento sono state la legge di probabilità esponenziale e quella Gamma (vedi Tabella 3). L'analisi dei dati sperimentali ha evidenziato che l'ipotesi di distribuzione secondo la funzione densità di probabilità Gamma è sempre verificata per i tempi di sequenza mentre risulta accettabile solo in un caso per quanto concerne l'intervallo critico. Quest'ultimo risultato può essere attribuito alla non elevata numerosità del campione ed all'approssimazione insita nella stima indiretta del parametro  $t_c$ .

**Tabella 2 – Alcuni risultati di test statistici ( $\chi^2$ ) relativi all'accostamento di varie fdp ai distanziamenti temporali nella corrente circolante sull'anello misurati.**

	esp. neg.			esp. neg. traslato			M3 ( $a=1-t_m q$ )	A=6	A=7	A=8	A=9
	$X_{c2}$	gdl	$\chi^2_{\alpha}$	$X_{c2}$	gdl	$\chi^2_{\alpha}$	$X_{c2}$				
			$\alpha=1\%$			$\alpha=1\%$					
Inter.	R 1										
2	20.24	6	16.81	<b>10.04</b>	5	<b>15.09</b>	21.25	3584.4	945.00	10390.0	17456.0
Inter.	R 2 Ingresso 2 (giorno 16/06/03)										
1	13.25	8	20.09	<b>8.10</b>	7	<b>18.48</b>	15.45	183.69	296.28	474.39	756.7
2	24.92	8	20.09	<b>14.04</b>	7	<b>18.48</b>	27.19	1576.3	2863.7	5176.2	9342.8
Inter.	R 2 Ingresso 2 (giorno 21/12/05)										
1	101.61	7	18.48	<b>6.60</b>	6	<b>16.81</b>	225.85	1241.4	2059.7	3373.2	5485.6
2	40.10	6	16.81	<b>2.75</b>	5	<b>15.09</b>	70.04	693.6	1208.5	2082.6	3571.0

Come precedentemente evidenziato si è proceduto alla stima dei parametri  $t_c$  e  $t_f$  anche attraverso il metodo della regressione proposta da Siegloch, i risultati ottenuti sono riassunti nel quadro sinottico di Tabella 4, mentre in Figura 1 sono rappresentate le funzioni lineari degli ingressi.

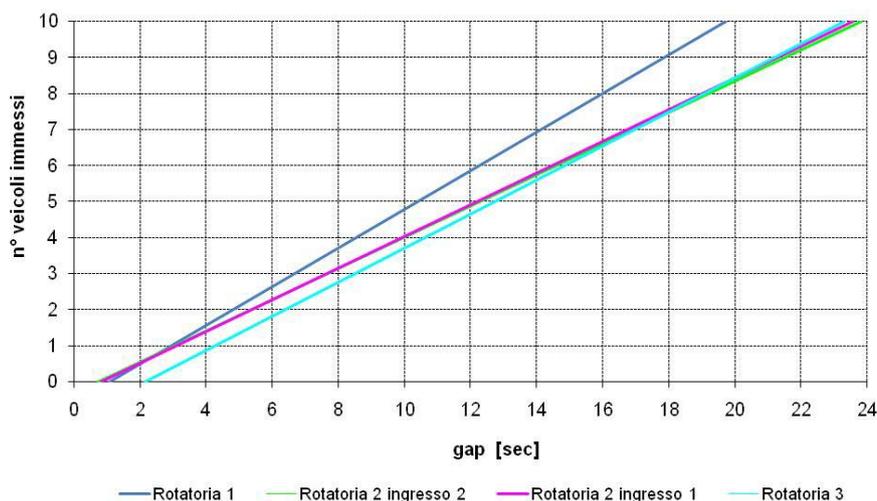
Per le rotatorie prese in esame, nel quadro di Tabella 5 sono riportati i valori medi degli intervalli critici e dei tempi di sequenza rilevati attraverso i due metodi precedentemente illustrati. Si osserva che i valori rilevati per i tempi di sequenza risultano essere simili a quelli suggeriti in letteratura, soprattutto se ci si riferisce al contesto nazionale francese che in misura maggiore sembra assomigliare a quello Italiano, fatta eccezione per la mini-rotatoria 3, nella quale le caratteristiche geometriche ridotte influenzano, evidentemente, in misura significativa il comportamento degli utenti. Gli intervalli critici misurati, invece, risultano essere generalmente bassi; essi evidenziano un'elevata aggressività degli utenti in ambito urbano in presenza di elevati flussi di traffico nella corrente circolante sull'anello. Quest'ultimo fenomeno è stato peraltro constatato anche in numerosi altri studi, nei quali è stata riscontrata una relazione pressoché lineare tra l'intervallo critico, il flusso circolante sull'anello e la larghezza dell'ingresso [Trouybeck 1989 e NHCRP 2007].

**Tabella 3 – Risultati del test statistico del  $\chi^2$  relativo all'accostamento della distribuzione statistica dei valori di  $t_f$  misurati ad una funzione  $\Gamma$ .**

		n. osservazioni	$X_{\chi^2}$	g	$\chi^2_{\alpha=0.01}$	$t_f$ medio [sec]
<b>ROTATORIA 1</b>		67	4.15	2	9.21	2.30
<b>ROT. 2</b>	<b>Via Fosso S.Maura</b>	200	11.10	3	11.34	2.46
	<b>Via Silicella</b>	159	8.74	2	9.21	2.50
<b>ROTATORIA 3</b>		386	7.04	4	13.28	3.15

**Tabella 4 – Parametri delle funzioni di regressione ottenute dai dati sperimentali rilevati su ciascuna rotatoria (numero di ingressi in funzione del gap).**

	Rotatoria 1	Rotatoria 2		Rotatoria 3
		Via Fosso di Santa Maura	Via Silicella	
<b>Coeff. angolare</b>	0.5359	0.4396	0.4330	0.4723
<b>Termine noto</b>	-0.5776	-0.3623	-0.3121	-1.0091
<b>R<sup>2</sup></b>	0.8750	0.6942	0.5896	0.5029
<b>Intercetta asse ascisse <math>t_0</math></b>	1.0778	0.8243	0.7208	2.1365
<b>Tempo di sequenza (follow-up time) <math>t_f</math></b>	1.8661	2.2750	2.3097	2.1172
<b>Intervallo critico <math>t_c</math></b>	2.0109	1.9618	1.8757	3.1951



**Figura 1 – Funzioni di regressione che forniscono il numero di veicoli in ingresso in funzione del distanziamento temporale dei veicoli circolanti sull'anello (gap).**

**Tabella 5 – Quadro sinottico dei valori medi dell'intervallo critico e del tempo di sequenza rilevati sperimentalmente e valori suggeriti nei metodi di calcolo della capacità [NCHRP 2007].**

Modello / Misura	Metodo	Stocastico	Metodo di	Regressione
	Intervallo critico $t_c$ (1) [sec]	Tempo di sequenza $t_f$ (1) [sec]	Intervallo critico $t_c$ [sec]	Tempo di sequenza $t_f$ [sec]
<b>DATI SPERIMENTALI</b>				
Rotatoria 1	2.94 (1.01)	2.30 (0.42)	2.01	1.87
Rotatoria 2 – ingresso 1	2.49 (0.35)	2.46 (0.50)	1.96	2.27
Rotatoria 2 – ingresso 2	2.46 (0.61)	2.50 (0.55)	1.87	2.30
Rotatoria 3	3.99 (1.13)	3.15 (0.59)	3.19	2.11
<b>MODELLI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ</b>				
HCM 2000	4.6	3.1		
Germania (Brilon)	4.4	3.2		
Francia	-	2.1		
Australia (2)	1.4 ÷ 4.9	1.8 ÷ 2.7		

Legenda: (1) tra parentesi sono riportati i valori delle deviazioni standard; (2) i valori suggeriti sono funzione del flusso circolante sull'anello, numero di corsie, diametro, e larghezza degli ingressi.

## **CALIBRAZIONE DEI MODELLI DI ANALISI DELLA CAPACITÀ**

I modelli di calcolo della capacità degli ingressi delle intersezioni a rotatoria possono essere sostanzialmente suddivisi in tre famiglie:

- a) I metodi teorici basati essenzialmente sulla teoria del gap (vedi Tabella 6) [Troutbeck 2001 e Wu 2001];
- b) I metodi empirico-teorici che fanno riferimento alle formulazioni teoriche ottenute con l'ausilio della teoria del gap ma contengono coefficienti correttivi valutati attraverso regressioni statistiche sui dati sperimentali (p.e. modelli contenuti nel software di analisi SIDRA) [Akcelik 1999];
- c) I metodi totalmente empirici basati sull'analisi dei dati sperimentali con l'ausilio di regressioni statistiche di tipo lineare o esponenziale (p.e. metodi del SETRA, CETUR ed ARCADY) [Louah 1993, SETRA 1987, CETUR 1999, CETUR 2000 e Kimber 1980].

Pertanto due sono sostanzialmente le procedure di calibrazione che possono essere effettuate, secondo che si faccia riferimento ai modelli empirici o a quelli teorici ed empirico-teorici:

- Per i modelli teorici (p.e. HCM 2000) o empirico-teorici (p.e. SIDRA) si procede a modificare i valori dei parametri  $t_c$ , e  $t_f$ , al fine di ottenere stime della capacità, e degli altri parametri di prestazione, che siano prossimi ai valori osservati;

- Per i modelli empirici (p.e. SETRA , CETUR e ARCADY) si procede spesso ad una traslazione rigida delle funzioni che forniscono la capacità in base al flusso circolante sull'anello (p.e. modificando l'ordinata all'origine delle funzioni lineari), al fine di ottenere un sostanziale accordo tra valori di capacità osservati e calcolati.

Nell'ambito di questo studio sono state innanzitutto analizzate le formulazioni teoriche riportate nel quadro di Tabella 6, assumendo i valori di  $t_c$  e  $t_f$  ottenuti dalle misure sperimentali, sia attraverso il metodo della regressione che attraverso l'analisi delle distribuzioni statistiche. Queste analisi hanno evidenziato che le formulazioni proposte da Siegloch ed Harders forniscono i valori della capacità che più si approssimano a quelli misurati; quest'ultima formulazione peraltro è utilizzata anche nel Manuale della Capacità (vedi Tabella 7).

**Tabella 6 – Metodi teorici per il calcolo della capacità degli ingressi presi in esame nello studio [Troutbeck 2001].**

		<i>Ipotesi relative alla funzione degli ingressi</i>	
$t_c$ e $t_f$	$f(t)$	<i>Funzione degli ingressi a gradini</i>	<i>Funzione degli ingressi continua</i>
Costanti	Esponenziale negativa	<b>Drew (1968), Major e Buckley (1962), e Harders (1968) - HCM 2000</b> $C = q_c \cdot \frac{\exp(-q_1 \cdot t_c)}{1 - \exp(-q_1 \cdot t_f)}$	<b>Siegloch (1973)</b> $C = \frac{1}{t_f} \exp(-q_c \cdot t_c)$
Costanti	Esponenziale negativa traslata	<b>Tanner</b> $C = \frac{q_c \exp(-\lambda (t_c - t_m))}{1 - \exp(-\lambda \cdot t_f)}$	
Costanti	Esponenziale negativa dicotomizzata	<b>Grossmann</b> $C = \frac{\alpha \cdot q_c \exp(-\lambda (t_c - t_m))}{1 - \exp(-\lambda \cdot t_f)}$ Tanner ha proposto $\alpha = 1 - q_c \cdot t_m$	<b>Jacobs</b> $C = \frac{\alpha \cdot q_c \exp(-\lambda (t_0 - t_m))}{\lambda \cdot t_f}$ Tanner ha proposto $\alpha = 1 - q_c \cdot t_m$
Variabili	Qualsiasi	<b>Plank e Cathpole</b> $C = \beta \frac{q_c \cdot \exp(-q_1 \cdot t_c)}{1 - \exp(-q_1 \cdot t_f)}$ $\beta = 1 + \frac{1}{2} q_1^2 \cdot \left[ \text{Var}(t_c) + \frac{\text{Var}(t_f)}{\exp(q_1 \cdot t_f) - 1} \right] + \eta_c + \eta_f$ Var( $t_c$ ) varianza del gap critico Var( $t_f$ ) varianza del distanziamento temporale medio $\eta_c$ incremento che tende a zero se Var( $t_c$ ) tende a zero $\eta_f$ incremento che tende a zero se Var( $t_f$ ) tende a zero.	

I valori di capacità misurati sperimentalmente sono stati inoltre confrontati con quelli calcolati con l'ausilio di alcuni tra i più diffusi metodi di calcolo empirici ed empirico-teorici, effettuando una calibrazione di questi ultimi attraverso i criteri precedentemente illustrati. Tale analisi comparativa ha evidenziato che per quanto concerne le rotatorie di piccolo diametro gli scarti riscontrati sono significativi in assenza di calibrazione, mentre quasi tutti i modelli forniscono scarti percentuali medi inferiori al 10% se si procede ad una calibrazione del modello stesso (vedi Tabella 8). Ciò evidenzia ancora una volta, qualora ve ne fosse bisogno, il ruolo della calibrazione quale elemento fondamentale per la corretta applicazione dei metodi di calcolo della capacità. I coefficienti di calibrazione individuati attraverso il metodo dei minimi quadrati sono riportati nel quadro sinottico di Tabella 9 insieme alle formulazioni adottate.

**Tabella 7 – Scarti percentuali tra capacità degli ingressi misurata e calcolata con l'ausilio di alcuni metodi teorici**

	<b>t<sub>c</sub> e t<sub>f</sub> tramite regressione</b>				<b>t<sub>c</sub> e t<sub>f</sub> attraverso distribuzione</b>				
	<b>Rot. 1</b>	<b>Rot. 2</b>	<b>Rot. 2</b>	<b>Rot. 3</b>	<b>Rot. 1</b>	<b>Rot. 2</b>	<b>Rot. 2</b>	<b>Rot. 3</b>	
		Ingr. 1	Ingr. 2			Ingr. 1	Ingr. 2		
<b>Drew, Major e Buckley</b>	65.5%	82.0%	111.1%	61.1%	1.7%	48.5%	83.3%	<b>5.4%</b>	
<b>Siegloch</b>	<b>27.0%</b>	20.5%	33.3%	25.4%	4.9%	<b>19.9%</b>	<b>36.6%</b>	28.5%	
<b>Grossmann</b>	<b>A = 6</b>	63.4%	30.8%	32.0%	29.0%	37.7%	45.6%	72.4%	15.1%
	<b>A = 7</b>	63.2%	29.4%	26.7%	29.1%	40.7%	46.2%	72.2%	14.6%
	<b>A = 8</b>	63.1%	28.1%	22.8%	29.1%	43.1%	46.5%	72.0%	14.2%
	<b>A = 9</b>	63.0%	27.1%	19.8%	29.1%	44.9%	46.7%	71.8%	14.0%
	<b>α (Tanner)</b>	64.1%	52.4%	74.6%	27.8%	<b>0.8%</b>	40.9%	74.5%	18.3%
<b>Tanner</b>	64.1%	65.1%	98.1%	26.8%	<b>0.8%</b>	40.5%	72.7%	19.0%	
<b>Jacobs</b>	<b>A = 6</b>	53.0%	22.2%	14.1%	29.3%	28.2%	40.3%	56.9%	14.6%
	<b>A = 7</b>	55.1%	22.5%	13.1%	29.3%	33.2%	43.1%	59.9%	14.3%
	<b>A = 8</b>	56.8%	22.8%	12.6%	29.2%	37.1%	45.3%	62.3%	14.0%
	<b>A = 9</b>	58.1%	23.0%	12.2%	29.2%	40.2%	47.1%	64.1%	13.9%
	<b>α (Tanner)</b>	25.9%	19.9%	22.4%	29.3%	24.1%	27.6%	40.8%	16.2%
<b>Plank e Catchpole</b>	75.6%	87.6%	115.7%	71.0%	7.6%	53.2%	88.7%	9.1%	

## CONCLUSIONI

Lo studio sperimentale condotto ha fornito le seguenti indicazioni circa il comportamento dei guidatori italiani nelle intersezioni a rotatoria in ambito urbano:

- i valori assunti dall'intervallo critico sembrano essere inferiori a quelli generalmente suggeriti in letteratura, evidenziando che esistono significative

differenze nel comportamento degli utenti nel contesto Italiano rispetto ad altre nazioni, almeno per quanto concerne l'ambito urbano;

- i valori dell'intervallo critico e del tempo di sequenza sembrano essere scarsamente influenzati dalle dimensioni dell'anello, per le rotatorie di caratteristiche geometriche medio grandi, mentre presentano variazioni sensibili per le rotatorie compatte;
- la fdp Gamma rappresenta in maniera soddisfacente la distribuzione dei tempi di sequenza, come evidenziato dai test statistici condotti.

Le analisi comparative condotte con riferimento ai valori della capacità hanno evidenziato che:

- generalmente i metodi di calcolo teorici mostrano scarti significativi rispetto ai valori misurati anche quando si utilizzano valori dei parametri  $t_c$  e  $t_f$  calibrati in base alle misure sperimentali condotte in sito;

**Tabella 8 – Differenze percentuali tra capacità degli ingressi misurata e calcolata con l'ausilio di alcuni metodi empirici ed empirico-teorici con e senza calibrazione.**

Rotatoria	Scarto %	MODELLI DI CALCOLO DELLA				CAPACITA'
		Empirici				Empirico-Teorici
		SETRA	CETUR	FHWA (2)	UK (Arcady)	SIDRA
R1 (1)		senza				calibrazione
	max	15.1%	3.9%	23.8%	33.6%	3.1%
	medio	15.1%	3.9%	<b>23.8%</b>	33.6%	3.1%
Ingresso 1		senza				calibrazione
	max	39.4%	82.4%	43.9%	36.6%	56.5%
	medio	21.2%	54.5%	<b>18.8%</b>	18.7%	27.8%
		con				calibrazione
	max	31.1%	31.1%	28.8%	29.9%	38.0%
	medio	21.0%	19.4%	18.3%	<b>18.6%</b>	24.1%
Ingresso 2		senza				calibrazione
	max	13.0%	70.4%	28.8%	20.4%	25.6%
	medio	12.4%	62.3%	19.3%	11.2%	17.8%
		con				calibrazione
	max	15.7%	10.7%	9.9%	9.2%	22.5%
	medio	12.8%	7.7%	<b>6.3%</b>	7.3%	16.0%
R3		senza				calibrazione
	max	73.8%	26.0%	33.8%	45.5%	30.5%
	medio	44.4%	12.3%	19.5%	34.8%	15.9%
		con				calibrazione
	max	16.2%	16.3%	14.4%	11.7%	18.2%
	medio	7.1%	6.6%	5.6%	<b>4.2%</b>	7.2%

Legenda: (1) per tale rotatoria essendo unico l'intervallo di misura disponibile la calibrazione fornisce sempre scarti nulli; (2) per la rotatoria 3 è stata impiegata la formulazione suggerita per le rotatorie urbane compatte.

- le formulazioni teoriche che meglio riproducono i dati sperimentali sono quelle di Sieglöch e di Harders;
- i metodi calcolo empirici ed empirico-teorici forniscono valori della capacità che si discostano in misura significativa dai valori rilevati sperimentalmente, con scarti percentuali che raggiungono il 60%;
- la calibrazione dei metodi empirici consente di ottenere errori percentuali generalmente inferiori al 10% .

Questo studio evidenzia inoltre la necessità di condurre indagini sperimentali di più ampia portata su campioni maggiormente significativi dal punto di vista statistico al fine di ottenere utili indicazioni circa la calibrazione dei modelli di calcolo delle prestazioni delle intersezioni a rotatoria con riferimento al contesto nazionale italiano ed all'ambito urbano.

**Tabella 9 – Coefficienti di calibrazione individuati in base alla sperimentazione effettuata per i metodi di calcolo della capacità empirici ed empirico-teorici presi in esame**

<b>METODO SETRA</b>			
$C = (1330 \cdot k - 0.7 \cdot Q_c) \cdot [1 + 0.1 \cdot (ee - 3.5)]$			
Rotatoria 1 (1)	Rotatoria 2 ingr. 1	Rotatoria 2 ingr.2	Rotatoria 3
0.91	0.96	0.99	1.18
<b>METODO CETUR</b>			
$C = n_s(1500 \cdot k - 0.83 \cdot Q_c)$			
Rotatoria 1 (1)	Rotatoria 2 ingr. 1	Rotatoria 2 ingr.2	Rotatoria 3
0.98	0.75	0.75	0.95
<b>METODO FHWA (2)</b>			
$C = (1210 \cdot k - 0.74 \cdot Q_c)$ (urbane compatte) ; $C = (1212 \cdot k - 0.5447 \cdot Q_c)$			
Rotatoria 1	Rotatoria 2 ingr. 1	Rotatoria 2 ingr.2	Rotatoria 3
1.18	0.91	0.90	1.10
<b>METODO U.K. (ARCADY)</b>			
$C = (A \cdot k - k_c \cdot Q_c)$			
Rotatoria 1 (1)	Rotatoria 2 ingr. 1	Rotatoria 2 ingr.2	Rotatoria 3
0.81	0.96	0.94	0.85
<b>METODO AUSTRALIA (SIDRA)</b>			
$t_f = k_f \cdot t_f ; t_c = k_c \cdot t_c$			
Rotatoria 1 (1)	Rotatoria 2 ingr. 1	Rotatoria 2 ingr.2	Rotatoria 3
$k_f=0.96; k_c=1.04$	$k_f=1.18 ; k_c= 0.78$	$k_f= 1.11 ; k_c= 0.95$	$k_f =0.89 ; k_c= 0.99$

Legenda: (1) unico intervallo di misura ; (2) per la rotatoria 3 è stata impiegata la formulazione suggerita per le rotatorie urbane compatte.

## BIBLIOGRAFIA

- Akçelik R. (2005), Roundabout model calibration issues and a case study, TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado U.S.A..
- Akçelik R. (2008), The relationship between capacity and driver behavior, Roundabout, TRB National Roundabout Conference, Kansas City, MO, U.S.A..
- Akcelik, R., E. Chung e M. Besley (1999), Roundabouts: Capacity and Performance Analysis, Research Report ARR No. 321, 2<sup>nd</sup> ed. ARRB Transport Research Ltd, Australia
- Cascetta E. e Nuzzolo A. (1986), Contributo sperimentale all'analisi del processo dei distanziamenti temporali sulle corsie, Le Strade n. 1226-1227 marzo-aprile 1986.
- CETUR (1999), Carrefours Urbains Guide, Bagneux, 01/1999.
- CETUR (2000), Conception des carrefours giratoires implantès en milieu urbain, Bagneux, 2000.
- Esposito T., Mauro, R. (2003), Fondamenti di infrastrutture viarie volume 2 – La progettazione funzionale delle strade, Hevelius Edizioni.
- HCM (2000), Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., U.S.A..
- Kimber R.M. (1980), The traffic capacity of roundabouts, Laboratory Report LR 942, Transport and Road Research Laboratory Crowthorne, Berkshire, United Kingdom.
- Louah, G. (1993), Panorama Critique des Modeles Francais de Capacite des Carrefours Giratoires, Proc., Roundabouts 92 Nantes, SETRA, Bagneux, France.
- NHCRP (2007), Roundabout in the United States, Natonal Cooperative Research Program – Report 537, Transporttion Research Board, Washington D.C., U.S.A. .
- SETRA (1987), Capacitè des carrefours giratoires interurbains, Note d'information n° 44, Bagneux, 08/1987.
- Troutbeck R. J. e Brilon W. (2001), Unsignalized Intersections Theory, Capitolo 8 del "Traffic Flow Theory – A State of the art" aggiornamento del Transportation Research Board Special Report n.165 "Traffic Flow Theory".
- Troutbeck R. J. (1989), Evaluating the performance of a roundabut, Special Report 45, Australian Road Research Board.
- Wu. N. (2001), A Universal Procedure for Capacity Determination at Unsignalized (priority-controlled) Intersections, Transportation Research B, No. 35, Issue 3. Elsevier Science Ltd., New York, Tokyo, Oxford.