



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA CIVILE**

METODO SPERIMENTALE PER LA STIMA DELLA RIDUZIONE DI CAPACITÀ  
DEGLI APPROCCI DI ROTATORIE PER EFFETTO DEI FLUSSI SUGLI  
ATTRAVERSAMENTI PEDONALI

RELATORE: CH.MO PROF. CLAUDIO MENEGUZZER

CORRELATORE: CH.MO PROF. RICCARDO ROSSI

LAUREANDA: SILVIA DAL ZUFFO

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

---

---

---

## Sommario

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE.....	5
CAPITOLO 2: IL CALCOLO DELLA CAPACITÀ DI UNA ROTATORIA .....	7
2.1 Metodi basati sulla teoria del Gap acceptance.....	7
2.1.1 Modello HCM 2000 .....	8
2.1.2 Modello Australiano (Tanner, 1962 e Troutbeck, 1989).....	12
2.1.3 Il metodo Brilon – Wu .....	16
2.2 Modelli empirici per la stima della capacità.....	18
2.2.1 Il metodo TRRL o di Kimber .....	18
2.2.2 Il metodo di Brilon – Bondzio .....	21
2.2.3 Il metodo FHWA (Robinson et al., 2000).....	22
2.2.4 Il metodo di Bovy (Bovy et al., 1991).....	24
2.2.5 Il metodo SETRA.....	27
2.2.6 Il metodo CERTU .....	29
2.2.7 Formula Girabase.....	30
2.3 Confronto tra i modelli empirici ed i modelli teorici .....	33
2.4 Calcolo della capacità delle uscite e dell’anello.....	33
2.5 Calcolo della capacità in presenza di attraversamenti pedonali.....	33
2.5.1 Formulazione di Marlow e Maycock .....	34
2.5.2 Formulazione di Brilon, Stuwe e Drews (1993).....	37
2.5.3 Formulazione del CETE dell’Ouest (Louah, 1992) .....	39
2.5.4 Osservazioni.....	41
2.6 Altri studi relativi all’argomento.....	41
2.6.1 Formulazione di Rodegerdts and Blackwelder.....	42
2.6.2 Simulation of Pedestrians Crossing a Street (Boenisch and Kretz, 2010).....	43
2.6.3 Effects of pedestrian crossing on roundabout capacity (Duran, 2010).....	43
2.6.4 Impact of Pedestrian Volumes on the Operational Performance of Modern Roundabouts (Alaa Sindi, 2011).....	44
2.6.5 Evaluating the impact of pedestrian crossings on roundabout entry capacity (C. Meneguzzer, R. Rossi, 2011).....	44
CAPITOLO 3: IL CASO DI STUDIO.....	48
3.1 Scelta dell’intersezione da analizzare e le sue caratteristiche geometriche.....	48
3.2 Posizionamento strumentazione .....	50

---

3.3 Raccolta ed analisi dei dati.....	51
3.4 Codifica dei filmati.....	51
3.4.1 Codifica del traffico pedonale.....	51
3.4.2 Codifica del traffico veicolare.....	54
3.5 Intervalli di saturazione.....	58
CAPITOLO 4: ELABORAZIONE ED ANALISI DEI DATI.....	61
4.1 Elaborazione dei flussi sull'attraversamento pedonale.....	61
4.1.1 Studio delle traiettorie all'interno dell'attraversamento.....	61
4.1.2 Calcolo della percentuale di occupazione del passaggio pedonale.....	65
4.2 Elaborazione dei dati relativi agli accodamenti veicolari sul ramo in ingresso.....	74
4.3 Elaborazione dei flussi veicolari.....	77
4.4 Aggregazione dei dati.....	80
4.5 Calcolo delle capacità della rotatoria.....	81
4.6 Calibrazione e validazione di modelli per il calcolo della capacità in presenza di un attraversamento pedonale.....	104
4.6.1 Calibrazione del modello 1.....	106
4.6.2 Calibrazione del modello 2.....	107
4.6.3 Calibrazione del modello 3.....	109
4.6.4 Validazione del modello 3.....	111
CAPITOLO 5: CONCLUSIONI.....	113
Riferimenti Bibliografici.....	115

## CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

Le rotatorie vengono utilizzate sempre più frequentemente in ambito urbano ed extraurbano, sia nella realizzazione di nuove intersezioni, sia nel miglioramento di intersezioni esistenti, per ridurre i tempi di attesa ed aumentare la sicurezza. Esistono in letteratura diversi metodi che permettono di stimarne la capacità in entrata, in presenza o assenza di un attraversamento pedonale in prossimità dell'intersezione. Generalmente i modelli che considerano una riduzione di capacità causata dai pedoni stimano un coefficiente riduttivo che dipende dal volume pedonale.

Questo lavoro presenta i risultati di uno studio sperimentale su una rotatoria situata a Padova, già oggetto di analisi in due tesi svolte precedentemente[15] [16]. L'obiettivo di questa tesi è quello di sviluppare un modello che rappresenti l'effetto di diminuzione della capacità causato dagli attraversamenti pedonali senza ricorrere alla determinazione di un coefficiente riduttivo. Si userà la percentuale di occupazione e/o il flusso pedonale insieme al flusso veicolare circolante ed uscente per calibrare un modello di stima della capacità in ingresso. Si pensa che la percentuale di occupazione possa rappresentare una variabile esplicativa che favorisce una stima più precisa della capacità in entrata della rotatoria.

Un altro obiettivo della tesi è quello di stabilire una relazione tra il flusso pedonale e la percentuale di occupazione.

Il modello sviluppato potrebbe essere applicato ad intersezioni geometricamente simili e con flussi veicolari e pedonali paragonabili a quelli rilevati.

La tesi è articolata in quattro capitoli:

- Nel capitolo 2 si riassumono i principali metodi presenti in letteratura per la stima della capacità delle rotatorie, a partire dai metodi che considerano solo i flussi veicolari di disturbo. Vengono successivamente presentati quelli più recenti che introducono un coefficiente riduttivo, generalmente funzione del flusso pedonale.
- Nel capitolo 3 si descrive la procedura di raccolta dei dati in sito tramite l'installazione di tre videocamere. Successivamente si tratta in dettaglio il sistema di codifica dei dati a disposizione sul flusso veicolare e pedonale.
- Il capitolo 4 tratta l'elaborazione e l'analisi statistica dei dati raccolti, la ricerca di relazioni funzionali tra le variabili in gioco e lo sviluppo di un metodo alternativo a quelli esistenti per la stima della capacità del ramo d'entrata, senza ricorrere al calcolo di un coefficiente riduttivo.
- Nel capitolo 5 si presentano le conclusioni che emergono dalle analisi svolte.



## CAPITOLO 2: IL CALCOLO DELLA CAPACITÀ DI UNA ROTATORIA

Si definisce *capacità semplice* del braccio di una rotatoria il più piccolo valore di flusso sul ramo di ingresso che determina la presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi.

Questo valore del flusso dipende dal flusso che percorre l'anello, e quindi dall'insieme dei flussi in ingresso e in uscita da tutti i bracci della rotatoria. Non si può quindi calcolare la capacità senza conoscere la matrice  $M$  origine-destinazione della rotatoria, il cui generico elemento  $(i,j)$  rappresenta il flusso in ingresso dal ramo  $i$  e che esce dal ramo  $j$ .

La capacità complessiva o totale è la somma dei valori dei flussi entranti da ogni ramo che determinano il raggiungimento contemporaneo della capacità su tutti i rami.

Il metodo di calcolo della capacità è stato oggetto di studio in molti Paesi negli ultimi decenni, seguendo le linee indicate da Kimber nel 1980, il quale ricavò la relazione che lega la capacità di un braccio al flusso che percorre l'anello ed alle caratteristiche geometriche della rotatoria attraverso l'analisi statistica, condotta con tecniche di regressione, di un gran numero di dati raccolti su rotatorie in Gran Bretagna, sia di tipo convenzionale che compatto, tutte con priorità all'anello. Egli dimostrò l'esistenza di una relazione lineare tra capacità di un braccio e flusso sull'anello e mise in evidenza che, tra le varie caratteristiche geometriche, quelle che influenzano maggiormente la capacità semplice sono la larghezza della sezione trasversale corrente del ramo d'ingresso e quella della sua sezione allargata in corrispondenza dell'immissione.

In letteratura esistono diversi metodi per il calcolo della capacità che si possono suddividere in tre tipi (si veda ad esempio Mauro, 2010):

- a) Metodi basati sulla teoria del Gap Acceptance (Es: HCM, Tanner)
- b) Metodi empirici (Es: Brilon, Kimber, Bovy, FHWA)
- c) Modelli di simulazione (Es: VISSIM, PARAMICS)

### 2.1 METODI BASATI SULLA TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE

Esistono tre diversi tipi di metodi appartenenti a questa categoria:

- Australiano;
- HCM 2000;
- Brilon-Wu.

### 2.1.1 MODELLO HCM 2000 [4][6]

La teoria del gap acceptance fu inizialmente proposta per la stima della capacità di una intersezione a priorità.

Si basa sul concetto che i veicoli della corrente secondaria devono trovare un intervallo temporale sufficiente all'interno della corrente principale per potersi immettere.

Questo intervallo dipende dalla distribuzione degli spazi interveicolari nella corrente principale.

Si usano due parametri per definire i gap:  $t_c$  e  $t_f$ , dove  $t_c$  è chiamato gap critico e rappresenta il minimo headway necessario perché un veicolo sull'approccio riesca ad immettersi nella corrente principale, mentre  $t_f$  è il tempo di follow-up, cioè il tempo necessario affinché un secondo veicolo riesca ad immettersi nella corrente principale durante il medesimo headway utilizzato dal primo. Si può quindi dire che il minimo tempo necessario per due veicoli accodati per fare la manovra è dato da:

$$t_c + t_f;$$

mentre, per N veicoli è dato da:

$$t_c + Nt_f$$

Nelle versioni più semplici della teoria del gap acceptance, la distribuzione degli arrivi dei veicoli circolanti all'anello, in corrispondenza del ramo d'entrata, avviene secondo Poisson e, di conseguenza, la distribuzione degli headway segue la legge esponenziale come evidenziato in *Figura 2.1*, e la probabilità che un headway sia maggiore di un certo valore  $t$  è data dalla formula:

$$P[T > t] = e^{-t\lambda} \quad (\text{Equazione 2.1})$$

dove:

$\lambda$ =valore medio degli arrivi per il flusso di disturbo (veh/h)

$t$ = dimensione headway (h)

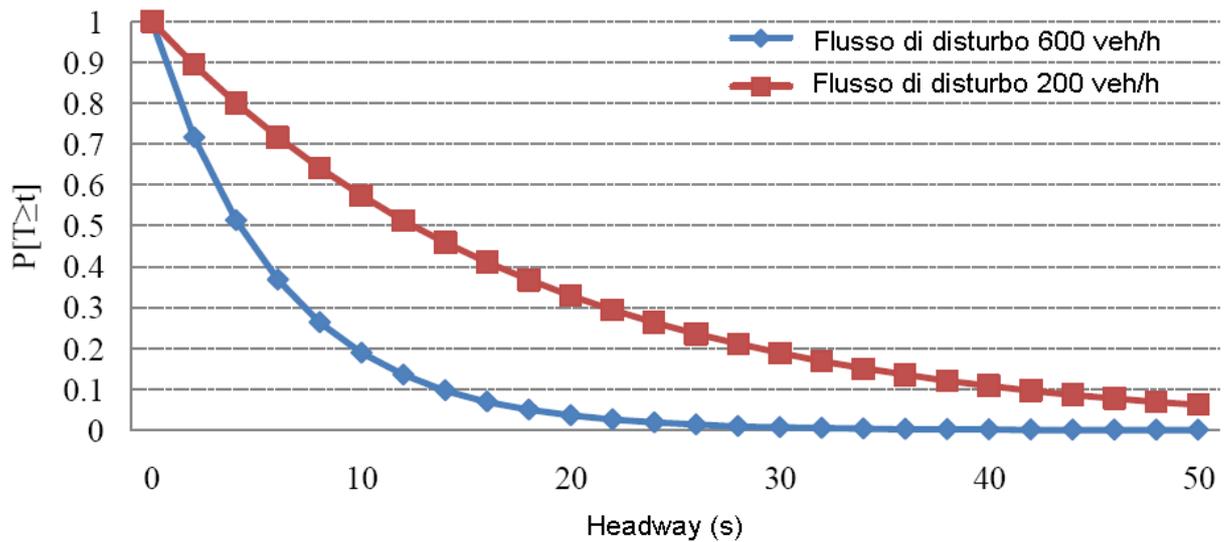


Figura 2.1 Distribuzione degli headway [4]

L'equazione 2.1 descrive la disponibilità dei gap nella corrente di conflitto, e insieme a  $t_f$  e  $t_c$  può essere usata per calcolare la capacità del ramo d'entrata che si ottiene con la seguente procedura:

- Si calcola la probabilità che un veicolo accetti il gap nel flusso circolante
- Si calcola la probabilità che un certo numero di veicoli accetti il gap
- Si moltiplica ciascuna probabilità per il numero di veicoli che accettano quel gap
- Si moltiplica questo numero per il numero degli arrivi
- Si sommano i prodotti

Dalla Figura 2.1 è evidente che la probabilità di osservare un headway più ampio di 1 secondo è maggiore della probabilità di osservare un headway più ampio di 10 secondi.

Altra osservazione che si può fare è che la probabilità di trovare un headway di una qualsiasi dimensione decresce all'aumentare dell'entità del traffico di conflitto.

L'equazione 2.2, contenuta nell'HCM 2000, è stata sviluppata per rappresentare questo effetto.

$$C_a = \frac{V_c e^{-V_c t_c / 3600}}{1 - e^{-V_c t_f / 3600}} \quad (\text{Equazione 2.2})$$

dove:

$C_a$ = capacità dell'approccio (veh/h);

$V_c$ = volume di conflitto (veh/h);

$t_c$ = gap critico (secondi);

$t_f$ = tempo di follow-up (secondi).

Il modello va calibrato con i valori del gap critico e del tempo di follow-up in base al comportamento dei guidatori e alla geometria della rotatoria.

In Tabella 2.1 sono riportati il limite inferiore e superiore di questi valori (stimati sulla base di osservazioni su guidatori USA) derivanti dallo studio di Rodegerdts et al., 2007 su rotatorie ad una e due corsie in ingresso.

	Gap critico (s)	Tempo di follow-up(s)
limite inferiore	4,1	2,6
limite superiore	4,6	3,1

Tabella 2.1

Sostituendo questi valori nell'Equazione 2.2 si ottiene un modello di capacità semplificato.

Capacità in entrata per una rotatoria ad una corsia:

$$C_a = 1130e^{-0.0010V_c} \quad (\text{Equazione 2.3})$$

Capacità in entrata per una rotatoria a due corsie:

$$C_a = 1130e^{-0.0007V_c} \quad (\text{Equazione 2.4})$$

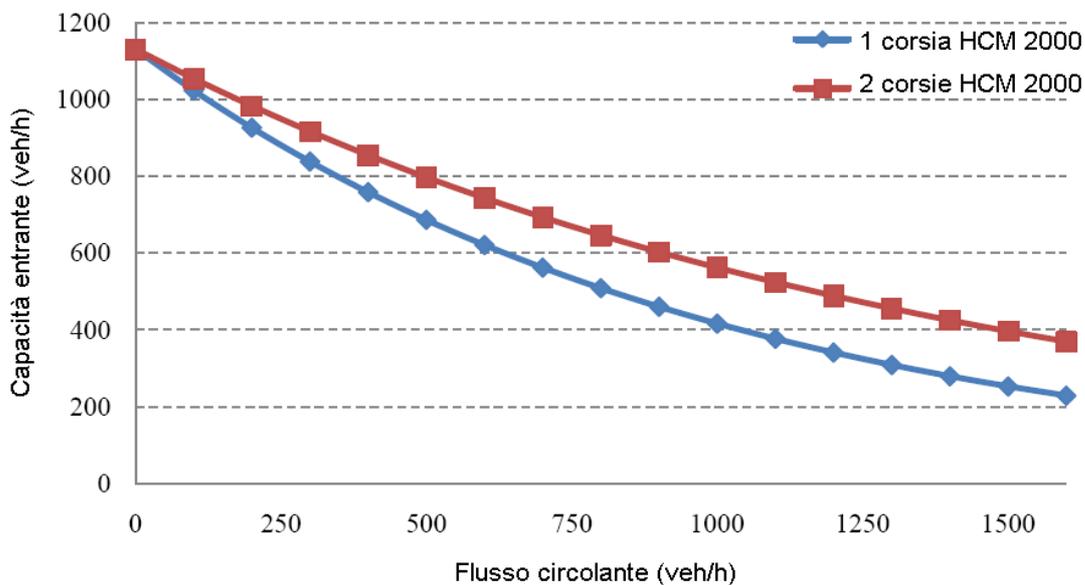


Figura 2.2 Capacità in entrata di una rotatoria secondo HCM 2000 [4]

Il ritardo medio dei veicoli può essere stimato sulla base del numero di veicoli che cercano di entrare in rotatoria e la capacità stimata con l'Equazione 2.2.

I modelli per il calcolo del ritardo sono nati per intersezioni a priorità e trattano l'intersezione come una coda di veicoli in cui gli arrivi seguono la distribuzione di Poisson, il tempo di servizio è distribuito secondo l'esponenziale negativa e la disciplina della coda è FIFO (First In First Out).

Per il calcolo del ritardo si utilizza la seguente formula:

$$d = \frac{3600}{C_{m,x}} + 900T \left[ \frac{V_x}{C_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_x}{C_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_{m,x}}\right) \cdot \left(\frac{V_x}{C_{m,x}}\right)}{450T}} \right] \quad (\text{Equazione 2.5})$$

dove:

d= ritardo medio dei veicoli all'approccio (s/veh)

$V_x$ = volume entrante (veh/h)

$C_{m,x}$ = capacità entrante (veh/h)

T= periodo di riferimento (h)

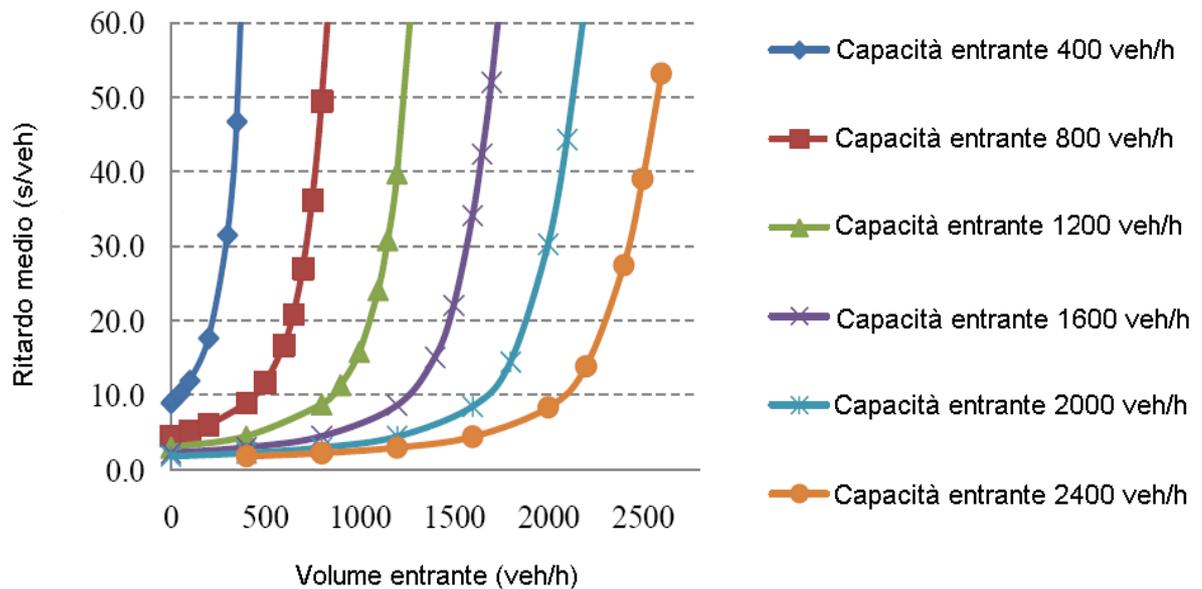


Figura 2.3 Ritardo medio dei veicoli in funzione del volume entrante per una rotatoria ad una corsia [4]

In Figura 2.3 è rappresentata la relazione che lega il ritardo medio dei veicoli al volume entrante calcolato con le Equazioni 2.5 e 2.3.

Si vede come il ritardo cresca in modo più che lineare in relazione al volume entrante.

Questo modello però è calibrato secondo ben precise caratteristiche geometriche che non possono essere cambiate; per questo non può essere usato per qualsiasi tipo di rotatoria.

Altro inconveniente è che i pedoni sono trattati come veicoli circolanti; quindi non si tiene conto dell'impatto dei pedoni sulla capacità di entrata e di uscita mentre attraversano le strisce pedonali.

### 2.1.2 MODELLO AUSTRALIANO (TANNER, 1962 E TROUTBECK, 1989) [4][13]

Il modello fu proposto per la prima volta da Tanner; egli assume una distribuzione degli arrivi e delle partenze secondo Poisson. Si suppone che i veicoli sul ramo d'entrata attendano che si presenti il minimo headway accettabile  $\Delta$  nel flusso circolante per tentare di immettersi nella rotatoria. Il gap minimo per il primo veicolo che utilizza questo headway viene indicato con  $T$ , mentre il tempo che serve per ogni veicolo supplementare che usa il medesimo gap è chiamato  $T_0$ .

$$Q_e = \frac{Q_c(1-\Delta Q_c)e^{-Q_c(T-\Delta)}}{1-e^{-Q_c T_0}} \quad (\text{Equazione 2.6})$$

dove:

$Q_e$ =flusso entrante (veh/h)

$Q_c$ = flusso circolante (veh/h)

$T$ = gap critico (s)

$T_0$ = tempo di follow-up (s)

$\Delta$ = headway minimo accettabile (s)

Come per l'HCM 2000, Tanner assume una distribuzione esponenziale per gli headway. Troutbeck (1989) ha modificato successivamente il modello di Tanner utilizzando la distribuzione M3 di Cowan (Mauro, 2010) per quanto riguarda l'arrivo dei veicoli nel flusso circolante. La distribuzione di Cowan (1975) è una funzione di distribuzione cumulativa definita da:

$$F(t) = 1 - \alpha e^{-(t-\Delta)} \quad (\text{Equazione 2.7})$$

dove:

$\Delta$ = headway minimo

$\alpha$ = percentuale di veicoli con headway maggiore di  $\Delta$

Il modello di Troutbeck è dato da:

$$Q_e = \frac{3600(1-\theta)Q_c e^{-\lambda(T-\Delta)}}{1-e^{-\lambda T_0}} \quad (\text{Equazione 2.8})$$

dove:

$Q_e$ = flusso entrante (veh/h)

$Q_c$ = flusso circolante (veh/h)

$\theta$  =percentuale di veicoli che seguono un veicolo leader, ossia la percentuale di veicoli che procede raggruppata in plotoni

$\Delta$  = headway minimo nel flusso circolante (si pone pari a 1 secondo per rotatorie a più corsie all'anello e pari a 2 secondi per rotatorie ad una corsia)

$T$ = gap critico (s)

$T_0$ = tempo di follow-up (s)

$$\lambda = \frac{(1-\theta)Q_c}{1-\Delta Q_c}$$

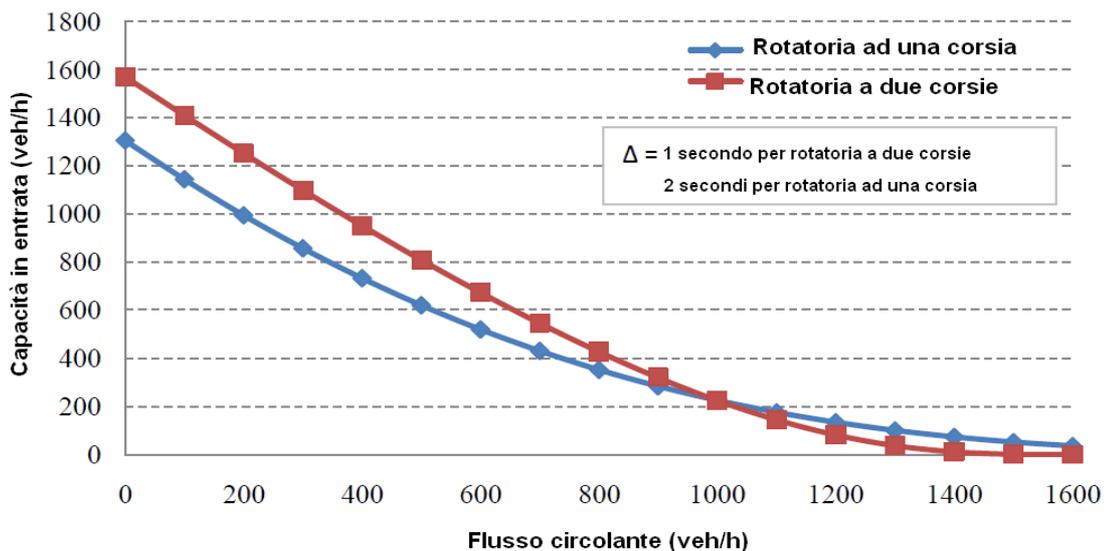


Figura 2.4 Capacità entrante secondo Troutbeck [4]

Troutbeck ha sviluppato un modello di regressione per stimare  $T$  e  $T_0$  in funzione della geometria della rotatoria e del flusso circolante.

Per il calcolo del tempo di follow-up della corsia più utilizzata, cioè con flusso entrante maggiore si utilizza la seguente formula:

$$T_{0,dom} = 3.37 - 0.000394Q_c - 0.0208D_i + 0.0000889D_i^2 - 0.395n_e + 0.388n_c \quad (\text{Equazione 2.9})$$

dove:

$T_{0,dom}$ = tempo di follow-up nella corsia più utilizzata (s)

$Q_c$ = flusso circolante (veh/h)

$D_i$ = diametro iscritto (m)

$n_e$ = numero di corsie dell'entrata

$n_c$ = numero di corsie all'anello

La seguente equazione è invece proposta per il calcolo del tempo di follow-up nella corsia meno utilizzata:

$$T_{0,sub} = 2.149 + 0.5135T_{0,dom} \frac{Q_{dom}}{Q_{sub}} - 0.8735 \frac{Q_{dom}}{Q_{sub}} \quad (\text{Equazione 2.10})$$

dove:

$T_{0,sub}$ = tempo di follow-up nella corsia meno utilizzata (s)

$Q_{dom}$ = flusso nella corsia più utilizzata (veh/h)

$Q_{sub}$ = flusso nella corsia meno utilizzata (veh/h)

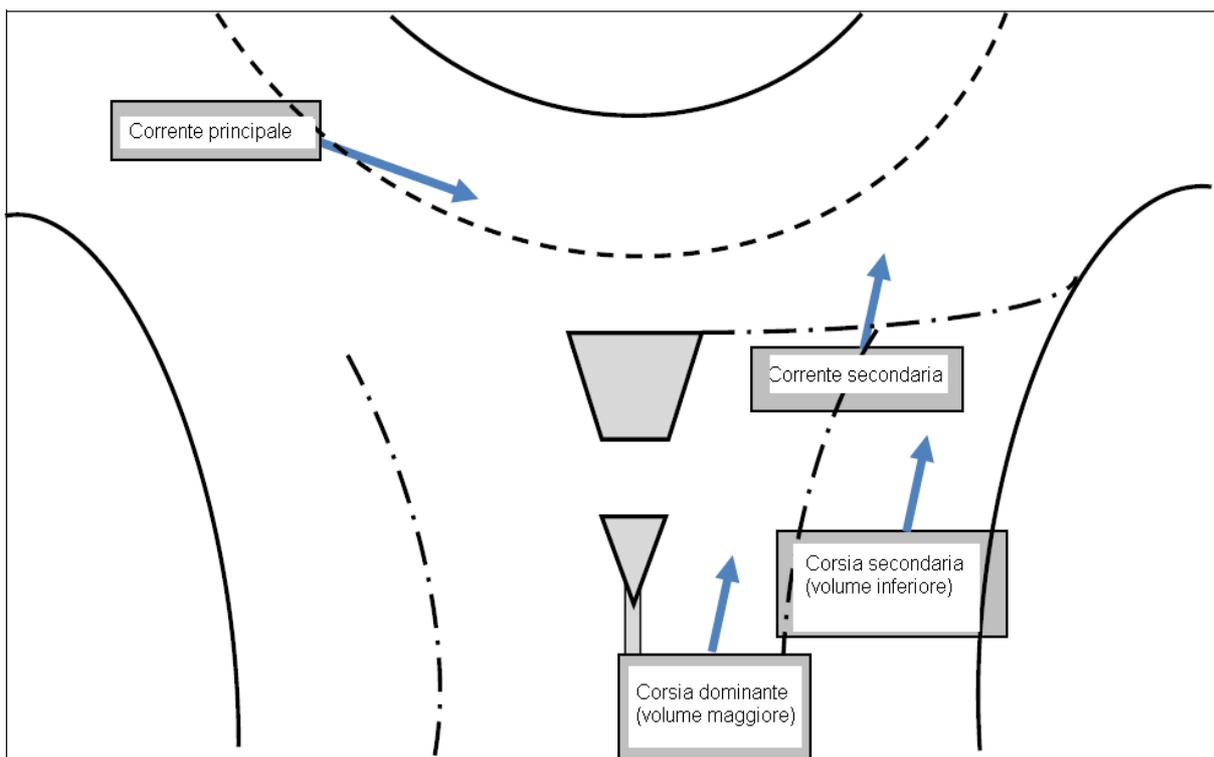


Figura 2.5 Rappresentazione delle grandezze considerate

Il gap critico T dipende dal tempo di follow-up, dal flusso circolante, dal numero delle corsie all'anello e dal numero delle corsie in entrata. L'aumento del flusso circolante e del numero delle corsie all'anello insieme a quelle in entrata, porta ad una diminuzione del rapporto tra gap critico e tempo di follow-up.

$$\frac{T}{T_0} = 3.6135 - 0.0003137Q_c - 0.3390n_e - 0.2775n_c \quad (\text{Equazione 2.11})$$

dove:

$T_0$ = tempo di follow-up (s)

T= gap critico (s)

$n_e$ = numero di corsie in entrata

$n_c$ = numero di corsie all'anello

In *Tabella 2.2* e *Tabella 2.3* sono riportati l'headway minimo e la percentuale di veicoli che seguono un capo plotone (Troutbeck 1989).

Volume circolante	Larghezza complessiva delle corsie all'anello			
	< 10 m		≥ 10 m	
	N° corsie	Headway (s)	N° corsie	Headway (s)
<1000 veh/h	1	2	2	1
>1000 veh/h	1 o(2)	2 o (1)	2	1

*Tabella 2.2* Headway minimo tra i veicoli nel volume circolante ( $\Delta$ )

N° corsie all'anello	1	2 o più corsie
Headway minimo (s)	2	1
Volume circolante		
0	0,25	0,25
300	0,375	0,313
600	0,5	0,375
900	0,625	0,438
1200	0,75	0,5
1500	0,875	0,563
1800	1	0,625
2000	-	0,667
2200	-	0,708
2400	-	0,75
2600	-	0,792

Tabella 2.3 Percentuale di veicoli che seguono un capo plotone ( $\theta$ )

### 2.1.3 IL METODO BRILON - WU [1][2]

Metodo tedesco, simile a quello australiano in quanto si basa sull'idea di Tanner, è stato proposto da Brilon-Wu (Brilon et al., 1997) e riporta una formula per il calcolo della capacità adottata poi anche dalla normativa tedesca HBS 2001:

$$C_e = 3600 \cdot \left(1 - \frac{\Delta \cdot Q_c / 3600}{n_c}\right)^{n_c} \cdot \frac{n_e}{T_f} \cdot \exp\left[\frac{-Q_c}{3600 \cdot \left(T_c - \frac{T_f}{2} - \Delta\right)}\right] \quad (\text{Equazione 2.12})$$

dove:

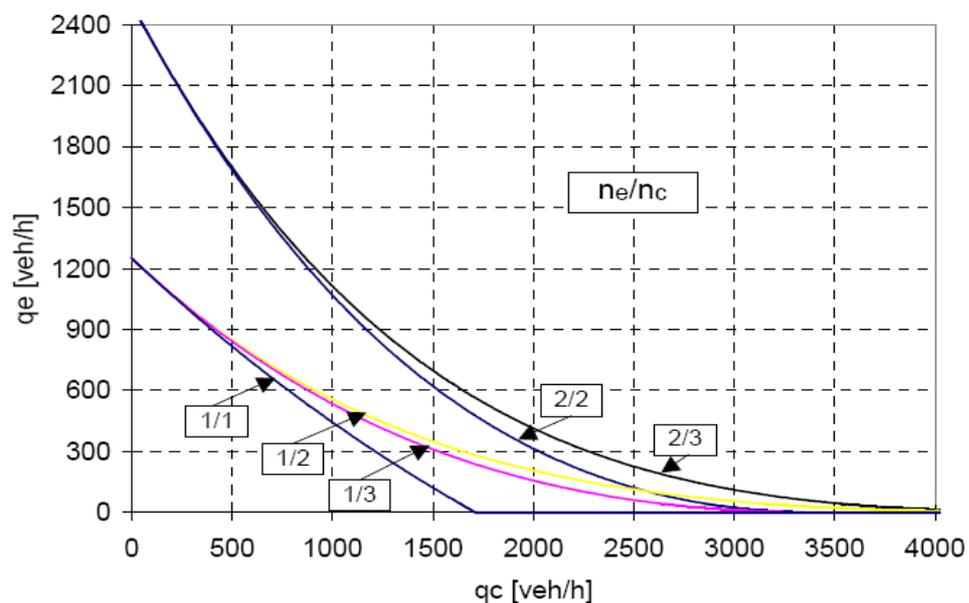
- $Q_c$  = flusso circolante all'anello in corrispondenza dell'ingresso (veh/h);
- $n_c$  = numero di corsie all'anello;
- $n_e$  = numero di corsie all'ingresso;
- $T_c$  = intervallo critico;
- $T_f$  = follow-up time;
- $\Delta$  = minimo distanziamento tra i veicoli circolanti all'anello.

In questa formulazione quindi, il calcolo della capacità  $C_e$ , è funzione del flusso circolante, del numero di corsie all'anello ed ai rami d'ingresso ed anche del comportamento degli utenti tramite l'intervallo critico, il tempo di follow-up ed il distanziamento tra i veicoli circolanti.

Brilon, nella taratura del modello, ha stimato:

- $T_c=4,1$  secondi
- $T_f=2,9$  secondi
- $\Delta=2,1$  secondi

In *Figura 2.6* sono riportati gli andamenti della capacità in funzione del flusso circolante nelle diverse configurazioni  $n_e/n_c$ .



*Figura 2.6* Andamenti della capacità in funzione del numero di corsie in ingresso e all'anello [1]

La *Figura 2.7* rappresenta il confronto tra il metodo di Brilon-Wu (recepito dalla norma tedesca HBS 2001) e l'HCM 2000; entrambi nella loro formulazione infatti, tengono conto dei tempi psicotecnici. L'HCM considera solo  $T_c$  e  $T_f$  ed è valido per rotatorie ad una corsia in ingresso ed una all'anello, per questo si considera questa configurazione anche per la formulazione tedesca.

Si nota che, a parità di condizioni geometriche, di traffico e di tipo di utenti, per valori di  $Q_c$  maggiori di 500 veh/h, la formula americana sovrastima la capacità rispetto a quella tedesca.

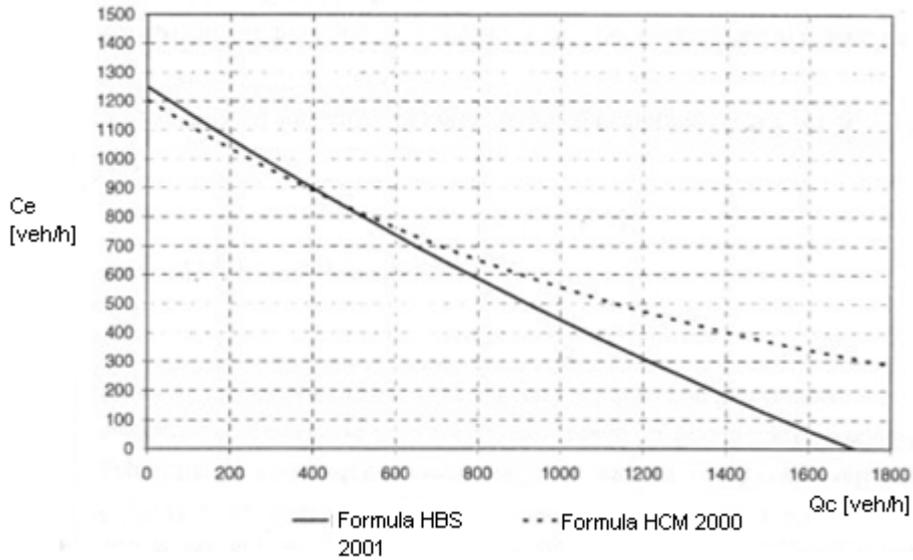


Figura 2.7 Confronto tra formulazione di Brilon-Wu e HCM 2000, nel caso di una corsia in ingresso ed una all'anello [1]

## 2.2 MODELLI EMPIRICI PER LA STIMA DELLA CAPACITÀ

Si tratta di modelli di regressione calibrati con dati raccolti in sito e che usano le proprietà geometriche delle rotatorie come variabili indipendenti.

I principali metodi empirici presenti in letteratura sono: Kimber, FHWA, Brilon-Bondzio, svizzero, e francese.

### 2.2.1 IL METODO TRRL O DI KIMBER [1][4][7]

Metodo sviluppato alla fine degli anni '70 in Gran Bretagna in base allo studio di 86 rotatorie.

La capacità di una entrata dipende dalle grandezze geometriche del ramo, dell'anello e del solo flusso circolante su quest'ultimo in corrispondenza dell'ingresso.

La capacità è stata ricavata con una regressione lineare:

$$C_e = k(F - f_c Q_c) \quad [veh/h] \quad (\text{Equazione 2.13})$$

$$\text{con:} \begin{cases} F = 303x \\ f_c = 0,210t_D(1 + 0,2x) \\ k = 1 - 0,00347(\Phi - 30) - 0,978\left(\frac{1}{r-0,05}\right) \end{cases}$$

dove:

$$t_D = 1 + \frac{1}{2 \left[ 1 + \exp\left(\frac{(D - 60)}{10}\right) \right]}$$

$$x = v + \frac{(e - v)}{(1 + 2S)}$$

$$S = \frac{1,6(e - v)}{l'} = \frac{(e - v)}{l}$$

Nella *Tabella 2.4* sono indicati i parametri geometrici ed i relativi simboli considerati nella procedura ed i loro campi di variabilità.

Parametro	Descrizione	Campo di variabilità
e	larghezza entrata	3,6 ÷ 16,5 m
v	larghezza corsia	1,9 ÷ 12,5 m
e'	larghezza entrata precedente	3,6 ÷ 15,0 m
v'	larghezza corsia precedente	2,9 ÷ 12,5 m
u	larghezza anello	4,9 ÷ 22,7 m
l, l'	lunghezza media svasatura	1,0 ÷ ∞ m
S	acutezza svasatura	0 ÷ 2,9 m
r	raggio curvatura entrata	3,4 ÷ ∞ m
Φ	angolo d'entrata	0° ÷ 77°
D=Dext	diametro cerchio inscritto	13,5 ÷ 171,6 m
w	larghezza tronco di scambio	7,0 ÷ 26,0 m
L	lunghezza tronco di scambio	9,0 ÷ 86,0 m

*Tabella 2.4* Parametri geometrici per il calcolo della capacità

In *Figura 2.8* sono riportate le grandezze geometriche considerate nel metodo di Kimber.

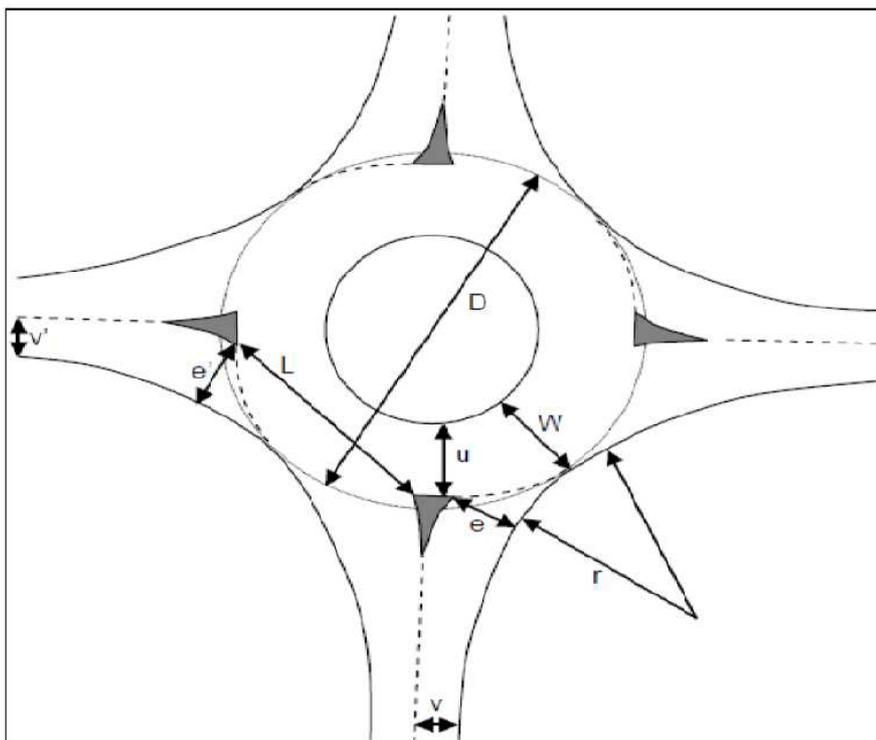


Figura 2.8 Rappresentazione grafica delle grandezze geometriche del metodo di Kimber [7]

In *Figura 2.9* è illustrata la differenza tra la capacità in entrata (per corsia) di una rotatoria con una o due corsie in ingresso.

I valori dei parametri geometrici da considerare quando si usa il metodo di Kimber per rotatorie ad una o due corsie in ingresso sono rispettivamente:

- $D=35\text{m}$ ;  $W=7\text{m}$ ;  $e=4\text{m}$ ,  $v=3\text{m}$ ;  $l'=7.5\text{m}$ ;  $\Phi=35^\circ$ ;  $r=20.8\text{m}$  [1]
- $D=56\text{m}$ ;  $W=8\text{m}$ ;  $e=8\text{m}$ ,  $v=6.5\text{m}$ ;  $l'=15.1\text{m}$ ;  $\Phi=35^\circ$ ;  $r=32.7\text{m}$  [1]

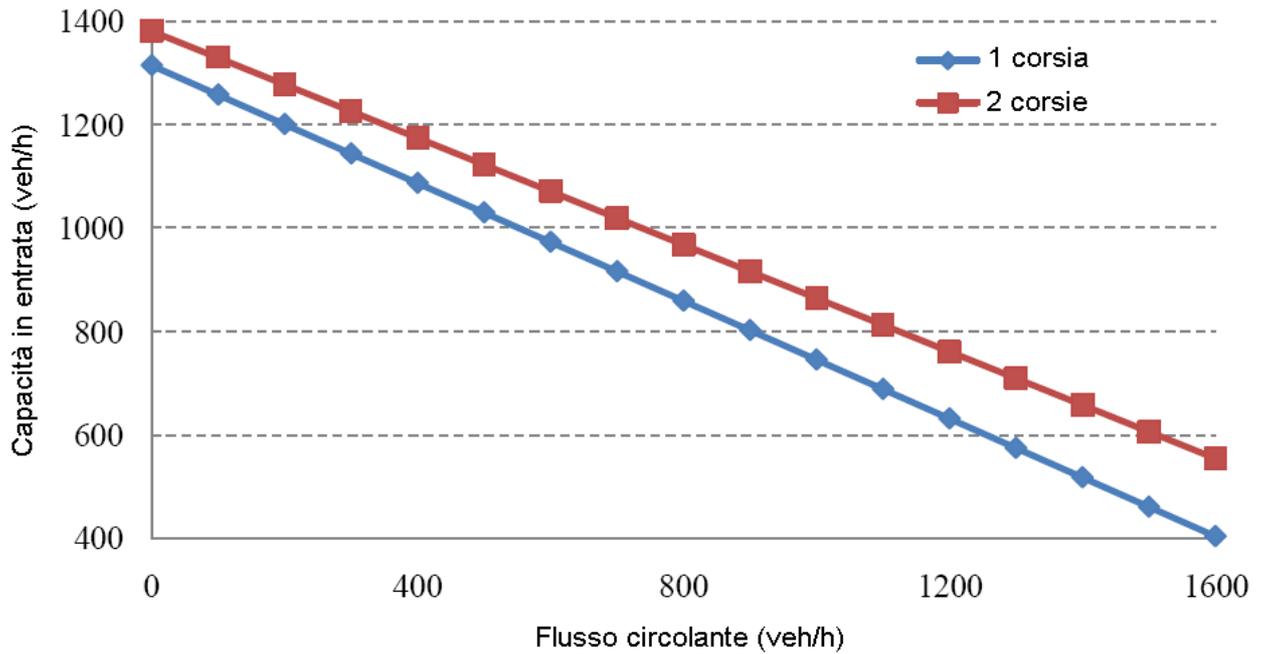


Figura 2.9 Capacità in entrata secondo metodo di Kimber [4]

### 2.2.2 IL METODO DI BRILON - BONDZIO [1][2][4]

Questa formulazione nasce in Germania da analisi condotte tra il 1988 ed il 1993 ed è valida per rotatorie con diametri esterni variabili tra i 28 ed i 100 metri.

Considera come variabili il numero di corsie agli ingressi ed all'anello, ed il flusso di disturbo è rappresentato dal solo flusso circolante in corrispondenza degli ingressi.

La formula per il calcolo della capacità è lineare:

$$C_e = A - B \cdot Q_c \quad [veh/h] \quad (\text{Equazione 2.14})$$

dove A e B sono dei parametri che variano in funzione del numero di corsie all'ingresso e all'anello. Il loro valore è riportato nella *Tabella 2.5* insieme al numero dei campioni, ossia il numero degli intervalli da 1 minuto di osservazione dei flussi reali a disposizione per ciascun tipo di rotatoria.

Numero di corsie all'anello	Numero di corsie all'ingresso	A	B	Numerosità dei campioni
3	2	1409	0,42	295
2	2	1380	0,50	4574
2-3	1	1250	0,53	879
1	1	1218	0,74	1504

Tabella 2.5 Parametri di Brilon-Bondzio in funzione del numero di corsie all'anello e all'ingresso

L'equazione per ricavare  $C_e$  è rappresentata in *Figura 2.10* per tutte le configurazioni geometriche per le quali è valida.

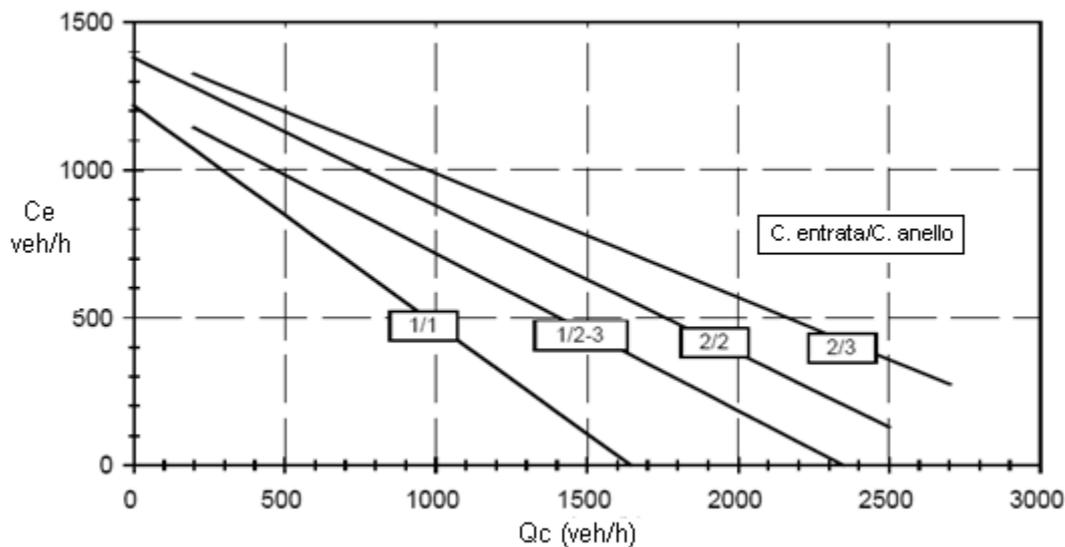


Figura 2.10 Andamento di  $C_e$  in funzione di  $Q_c$  secondo la formula di Brilon-Bondzio [2]

### 2.2.3 IL METODO FHWA (ROBINSON ET AL., 2000) [4][10]

Il metodo FHWA (Federal Highway Administration) si basa sul metodo di Kimber per rotonde con una o due corsie all'anello, e sul metodo di Brilon-Bondzio per rotonde urbane compatte. Di conseguenza si tratta di un metodo empirico.

La capacità in entrata ed il volume di conflitto sono legati da una relazione lineare inversamente proporzionale; all'aumentare del volume di conflitto si ha una riduzione della capacità in entrata.

In *Figura 2.11* è riportato l'andamento del flusso in entrata in funzione del flusso circolante.

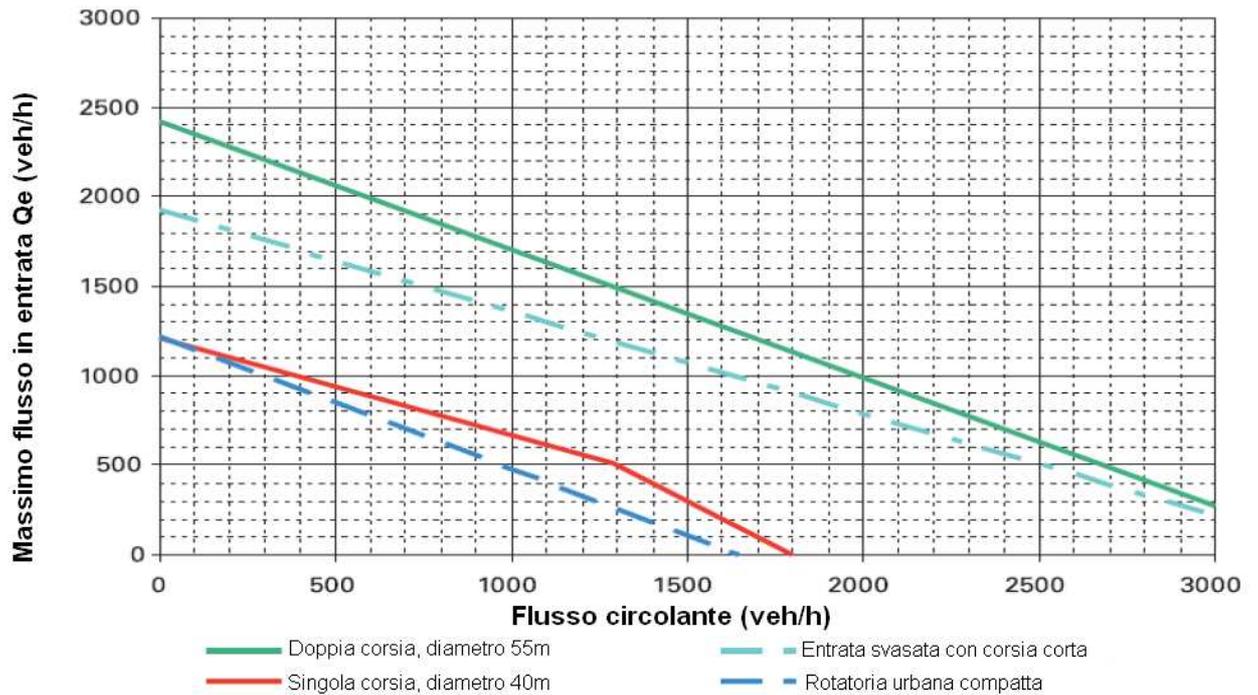


Figura 2.11 Capacità in entrata secondo il metodo FHWA [10]

Nelle rotatorie a due corsie, per flusso circolante nullo, la capacità in entrata è doppia rispetto alle rotatorie a corsia singola.

Nella *Tabella 2.6* sono riportati i parametri geometrici considerati nel metodo FHWA.

Parametri geometrici	Rotatorie a singola corsia	Rotatorie a doppia corsia	Rotatorie urbane compatte
D	40 m	55 m	Basato sul metodo di Brilon Equazione 2.14
$r_e$	20 m	20 m	
$\Phi$	30°	30°	
v	4 m	8 m	
e	4 m	8 m	
l'	40 m	40 m	
$Q_e$	$1212-0,5447Q_c$	$2424-0,71Q_c$	$1218-0,74Q_c$

Tabella 2.6 Parametri geometrici metodo FHWA

**2.2.4 IL METODO DI BOVY (BOVY ET AL., 1991) [1][4]**

Formulazione sviluppata in Svizzera sull'osservazione di rotatorie con diametro esterno compreso tra i 22 e i 35 metri. Il metodo è applicabile a rotatorie inserite in ambito urbano e sub-urbano con un'isola centrale invalicabile ed ingressi svasati con più corsie in corrispondenza della linea d'arresto. La capacità ed i flussi sono calcolati in autovetture equivalenti secondo i coefficienti di equivalenza di *Tabella 2.7*.

Tipo di veicolo	Coefficiente di equivalenza
1 ciclo o motociclo in ingresso	0,2 autovetture
1 ciclo o motociclo sull'anello	0,8 autovetture
1 mezzo pesante o autobus	2,0 autovetture

*Tabella 2.7 Coefficienti di equivalenza*

La capacità in ingresso si valuta con la relazione:

$$C_e = \frac{1}{\gamma} \left( 1500 - \frac{8}{9} Q_d \right) \quad [veh/h] \quad \text{(Equazione 2.15)}$$

dove  $\gamma$  è un parametro che consente di tener conto del numero di corsie all'entrata, i cui valori sono riportati in *Tabella 2.8*.

$\gamma$	n° corsie in ingresso
1,0	1
0,6-0,7	2
0,5	3

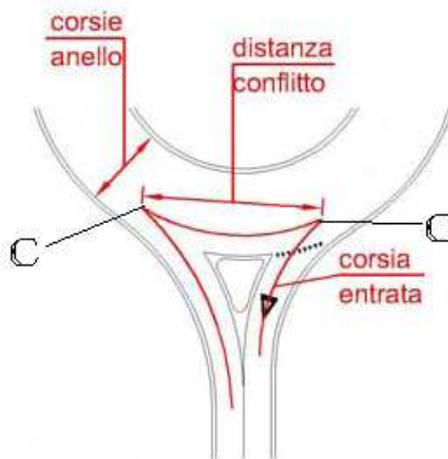
*Tabella 2.8 Valori del coefficiente  $\gamma$*

Il flusso di disturbo è calcolato come combinazione lineare del flusso uscente  $Q_u$  e del flusso circolante  $Q_c$ :

$$Q_d = \alpha Q_u + \beta Q_c \quad [veh/h] \quad \text{(Equazione 2.16)}$$

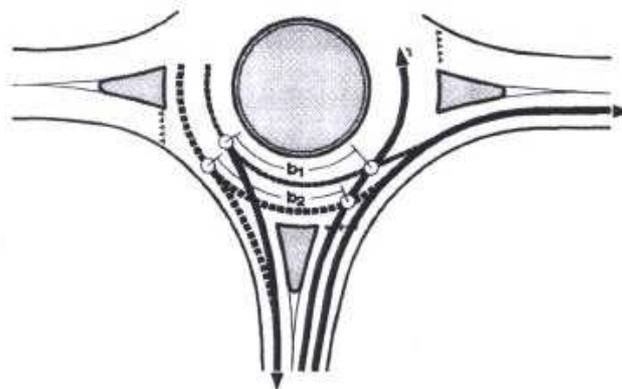
dove il parametro  $\alpha$  tiene conto della distanza  $b$  tra i punti di conflitto in uscita C e in entrata C' individuati come in figura 2.12 e della velocità del flusso sull'anello, mentre  $\beta$  tiene conto del numero di corsie sull'anello.

I punti di conflitto sono rappresentati in *Figura 2.12* per rotatorie con un'unica corsia all'anello ed in entrata.



*Figura 2.12* Punti di conflitto in rotatorie ad unica corsia

Se si hanno due o più corsie all'anello ed in entrata, aumenta il numero dei punti di conflitto, ma si considerano solo quelli con la distanza minore visto che è la più vincolante. (*Figura 2.13*)



*Figura 2.13* Punti di conflitto in rotatorie con due corsie

I valori di  $\alpha$  si determinano utilizzando l'abaco in *Figura 2.14* mentre quelli di  $\beta$  si trovano in *Tabella 2.9*

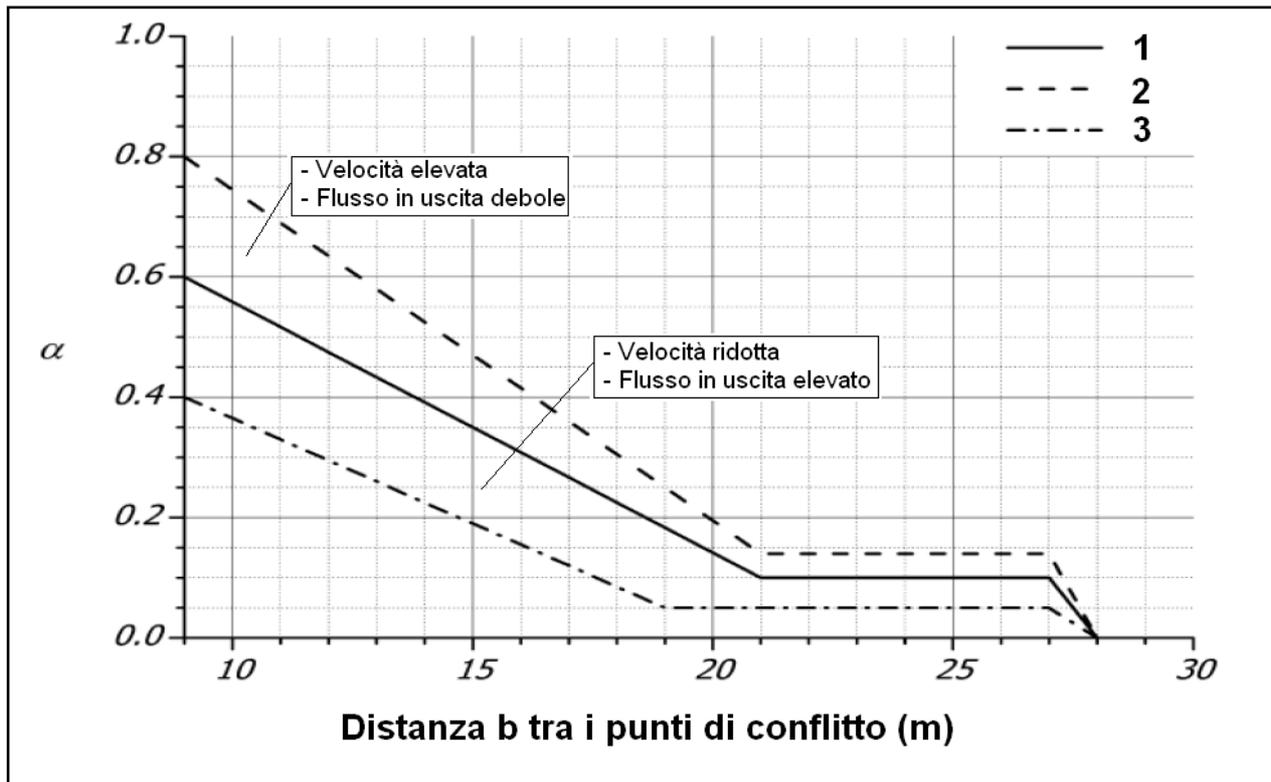


Figura 2.14 Valori del coefficiente  $\alpha$  [4]

La linea spezzata individua una velocità del flusso all'anello pari a 20÷25 km/h; la fascia superiore individua una velocità  $v > 20 \div 25$  km/h ed un flusso in uscita debole mentre, per quella inferiore, si ha una velocità  $v < 20 \div 25$  km/h ed un flusso in uscita elevato.

Si può notare come il valore di  $\alpha$  diminuisca all'aumentare della distanza  $b$ , fino ad un valore di  $\alpha = 0$  per  $b=28$  metri. Questo significa che per questa distanza tra i punti di conflitto il flusso di disturbo non dipende più dal flusso uscente ma dal solo flusso circolante.

$\beta$	n° corsie sull'anello
0,9-1,0	1
0,6-0,8	2
0,5-0,6	3

Tabella 2.9 Valori del coefficiente  $\beta$

Il valore di  $\beta$  diminuisce all'aumentare del numero di corsie all'anello; questo significa che all'aumentare delle corsie il flusso circolante influisce in maniera decrescente nella determinazione del flusso di disturbo.

Le Norme Svizzere sulle rotatorie recepiscono la formulazione di Bovy e riportano come indicatori di efficienza due indici capacitivi da calcolare sempre congiuntamente:

- Tasso di Capacità Utilizzata all'entrata :

$$TCU_e = \left( \frac{\gamma Q_e}{C_e} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Equazione 2.17})$$

- Tasso di Capacità Utilizzata al punto di conflitto:

$$TCU_c = \left( \frac{\gamma Q_e + \frac{8}{9} Q_d}{1500} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Equazione 2.18})$$

### 2.2.5 IL METODO SETRA [1]

Metodo francese degli anni '80 del Service d'Études Techniques des Route et Autoroutes (SETRA), messo a punto in base ad una campagna di indagine su 17 rotatorie extraurbane con un diametro di circa 40 metri. In totale si sono analizzati 56 ingressi.

Le grandezze geometriche utilizzate sono riportate in *Tabella 2.10* mentre in *Figura 2.15* ne vediamo una rappresentazione grafica insieme ai flussi considerati.

Sigla	Grandezza geometrica rappresentata e flussi
ANN	Larghezza dell'anello [m]
ENT	Larghezza della corsia d'entrata misurata a circa 6 metri dalla linea di precedenza [m]
SEP	Larghezza dell'isola spartitraffico [m]
$Q_c$	Flusso circolante [veh/h]
$Q_e$	Flusso entrante [veh/h]
$Q_u$	Flusso uscente [veh/h]

*Tabella 2.10* Grandezze geometriche e flussi considerati nel metodo SETRA

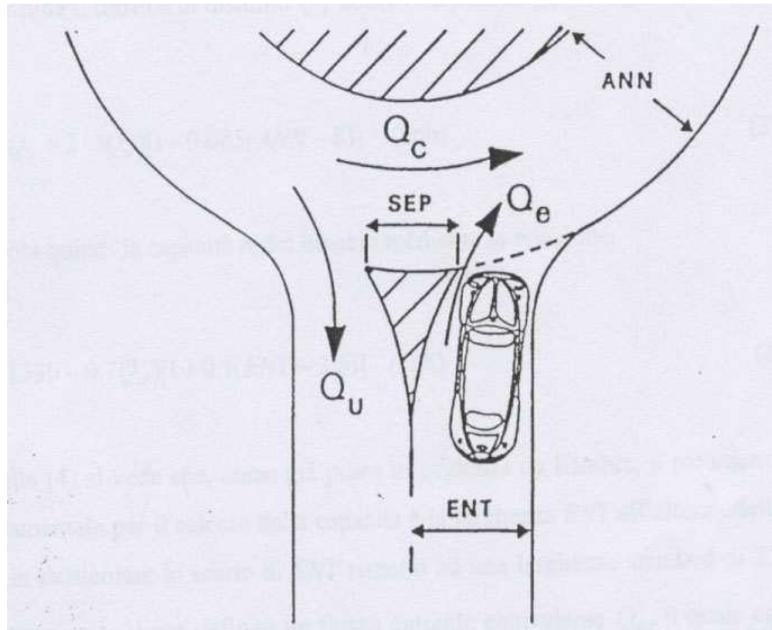


Figura 2.15 Grandezze geometriche e flussi considerati nel metodo SETRA

La capacità dell'ingresso è espressa in funzione del flusso di disturbo  $Q_d$  che si calcola come combinazione del flusso circolante  $Q_c$  ed uscente  $Q_u$ .

Il procedimento per il calcolo della capacità  $C_e$  è:

- Si ricava il flusso uscente equivalente  $Q_{ue}$

$$Q_{ue} = Q_u \frac{(15-SEP)}{15} \quad [veh/h] \quad \text{se } SEP < 15 \text{ m}$$

$$Q_{ue} = 0 \quad [veh/h] \quad \text{se } SEP \geq 15 \text{ m}$$

quindi il flusso uscente non è più di disturbo quando l'isola spartitraffico misura più di 15 metri.

- Si determina il flusso di disturbo  $Q_d$

$$Q_d = \left( Q_c + \frac{2}{3} Q_{ue} \right) [1 - 0.085(ANN - 8)] \quad [veh/h] \quad \text{(Equazione 2.19)}$$

- Si ottiene la capacità dell'ingresso dalla relazione:

$$C_e = (1330 - 0.7Q_d)[1 + 0.1(ENT - 3.5)] \quad [veh/h] \quad \text{(Equazione 2.20)}$$

La capacità dell'ingresso dipende quindi dal flusso di disturbo e dalla larghezza del ramo d'entrata a cui si sottraggono 3,5 metri (larghezza standard di una corsia). Si vede dall'Equazione 2.20 che per ogni metro di incremento della larghezza del ramo d'entrata si ha un aumento della capacità del 10%.

### 2.2.6 IL METODO CERTU [1]

Questo è un altro metodo francese proposto a fine anni '90 dal Centre d' Études sur les Réseaux, les Transport, l'Urbanisme et les constructions publiques. È basato sullo studio di alcune rotatorie urbane compatte e con diametri compresi tra i 30 e i 70 metri.

La capacità del ramo dipende dal flusso di disturbo che si calcola nel modo seguente:

$$Q_d = cQ_c + 0,2Q_u \quad [veh/h] \quad (\text{Equazione 2.21})$$

dove il coefficiente  $c$  varia in funzione della larghezza dell'anello e del raggio dell'isola centrale come indicato in *Tabella 2.11*

$c$	larghezza anello	raggio isola centrale
1,0	< 8 m	
0,9	$\geq 8$ m	< 20 m
0,7	$\geq 8$ m	$\geq 20$ m

*Tabella 2.11* Coefficiente  $c$

Infine la capacità si calcola con la seguente equazione:

$$C_e = \varepsilon \cdot \left(1500 - \frac{5}{6}Q_d\right) \quad [veh/h] \quad (\text{Equazione 2.22})$$

con  $\varepsilon = \begin{cases} 1,0 & \text{per ingressi ad una corsia} \\ 1,5 & \text{per ingressi a più corsie} \end{cases}$

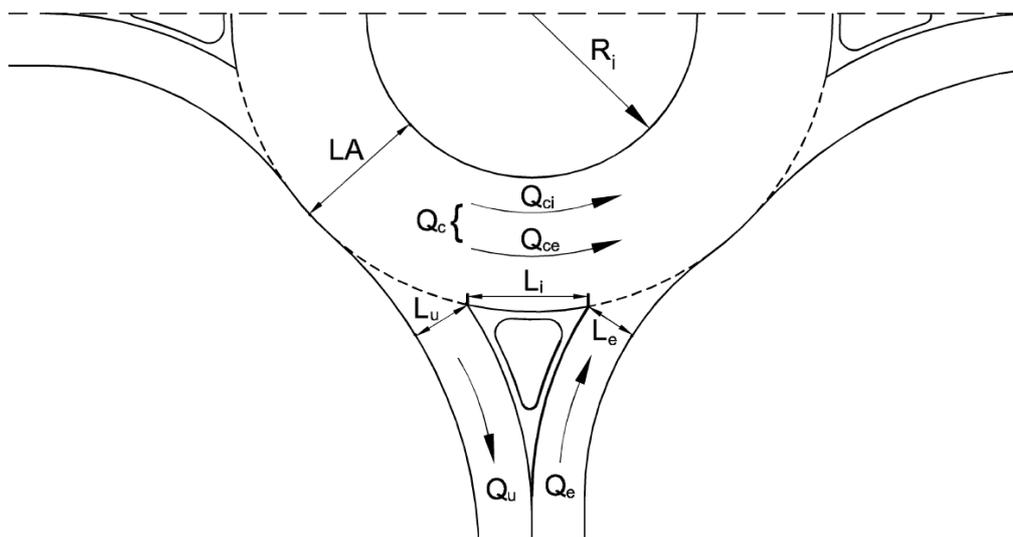
**2.2.7 FORMULA GIRABASE [1][4][8]**

Girabase è il nome di un software commerciale usato in Francia per determinare la capacità di una rotatoria. È stato sviluppato dal CETE de l'Ouest di Nantes ed accettato dal CERTU e dal SETRA.

La formula è stata sviluppata con tecniche di regressione utilizzando dati di traffico raccolti su rotatorie in esercizio in condizioni di saturazione. Lo studio comprende il conteggio di 63.000 veicoli durante 507 periodi saturi (dai 5 ai 10 minuti) in 45 rotatorie.

La procedura può essere utilizzata per tutte le rotatorie con un numero di bracci variabile da 3 a 8 e con 1, 2 o 3 corsie all'anello e agli ingressi.

In *Figura 2.16* sono rappresentate le grandezze geometriche considerate ed in *Tabella 2.12* sono riportati i campi di variabilità di queste grandezze.



*Figura 2.16* Flussi e grandezze geometriche del metodo Girabase

Parametro	Descrizione	Campo di variabilità
Le	larghezza entrata	3 ÷ 11 m
Li	Larghezza isola spartitraffico	0 ÷ 70 m
Lu	larghezza uscita	3,5 ÷ 10,5 m
LA	larghezza anello	4,5 ÷ 17,5 m
Ri	raggio isola centrale	3,5 ÷ 87,5 m

*Tabella 2.12* Campi di variabilità degli elementi geometrici nella procedura Girabase

La formula per valutare la capacità di un ingresso è:

$$C_e = A \cdot e^{-C_B Q_d} \quad (\text{Equazione 2.23})$$

con:

$$A = \frac{3600}{T_f} \left( \frac{L_e}{3.5} \right)^{0.8} \quad (\text{Equazione 2.24})$$

dove:

$T_f$ = tempo di follow-up= 2,05 s

$L_e$ = larghezza dell'entrata in prossimità della rotatoria, misurata perpendicolarmente alla direzione dell'ingresso(m)

$C_B$ = coefficiente che vale 3,525 per aree urbane e 3,625 per aree extraurbane

Il traffico di disturbo si calcola con:

$$Q_d = Q_u \cdot k_a \cdot \left( 1 - \frac{Q_u}{Q_c + Q_u} \right) + Q_{ci} \cdot k_{ti} + Q_{ce} \cdot k_{te} \quad (\text{Equazione 2.25})$$

dove:

$Q_d$ = traffico di disturbo in prossimità dell'ingresso considerato (veh/h)

$Q_u$ = flusso uscente (veh/h)

$Q_c = Q_{ci} + Q_{ce}$ = flusso di traffico circolante sull'anello in corrispondenza dell'ingresso considerato (veh/h)

$Q_{ci}$ = aliquota di traffico  $Q_c$  sulla semicarreggiata interna dell'anello (veh/h)

$Q_{ce}$ = aliquota di traffico  $Q_c$  sulla semicarreggiata esterna dell'anello (veh/h)

$$k_a = \begin{cases} \frac{R_i}{R_i + LA} - \frac{L_i}{L_{i,max}} & \text{per } L_i < L_{i,max} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove:

$R_i$ = raggio dell'isola centrale (m)

$LA$ = larghezza dell'anello (m)

$L_i$ = larghezza dell'isola spartitraffico ai bracci (m)

$$L_i = 4.55 \sqrt{R_i + \frac{LA}{2}}$$

$$k_{ti} = \min \begin{cases} \frac{160}{LA(R_i + LA)} \\ 1 \end{cases}$$

$$k_{te} = \min \begin{cases} 1 - \frac{(LA - 8)}{LA} \cdot \left( \frac{R_i}{(R_i + LA)} \right)^2 \\ 1 \end{cases}$$

In figura 2.17 sono riportati graficamente i risultati ottenuti con questo metodo per rotatorie ad una e due corsie in ingresso. La capacità è intesa sempre per corsia.

I parametri geometrici considerati per rotatorie ad una o due corsie in ingresso sono rispettivamente:

- $L_e = 4.5\text{m}$ ;  $L_i = 3\text{m}$ ;  $L_u = 4.5\text{m}$ ;  $LA = 7\text{m}$ ;  $R_i = 10\text{m}$ ; (1 corsia)
- $L_e = 8\text{m}$ ;  $L_i = 7\text{m}$ ;  $L_u = 8\text{m}$ ;  $LA = 8\text{m}$ ;  $R_i = 20\text{m}$ ; (2 corsie)

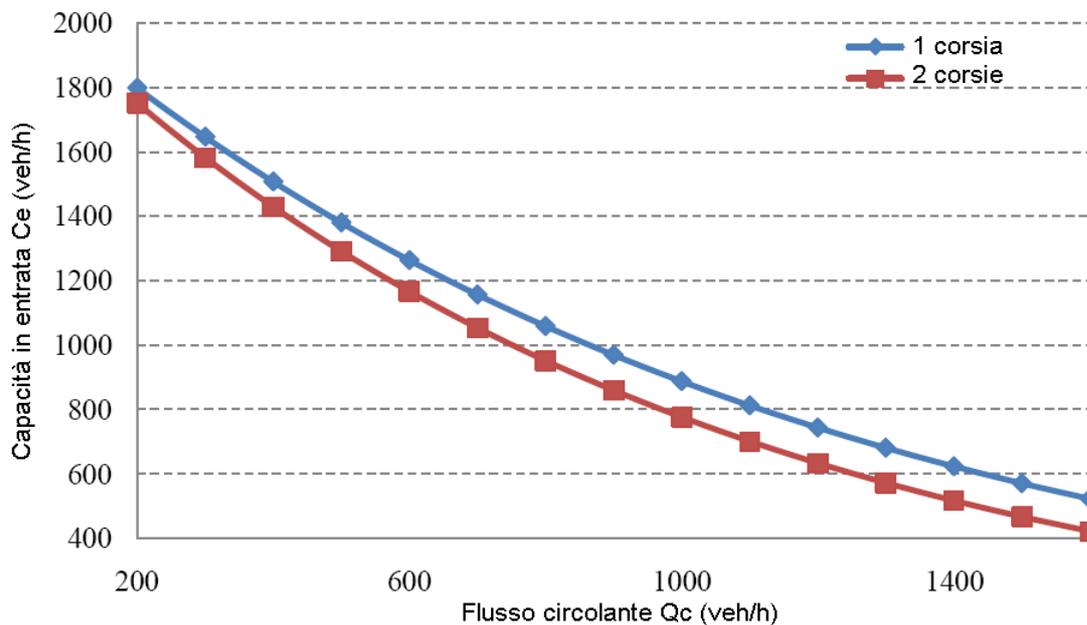


Figura 2.17 Capacità in entrata calcolata col metodo Girabase [4]

### 2.3 CONFRONTO TRA I MODELLI EMPIRICI ED I MODELLI TEORICI

Tutti questi metodi sono stati calibrati con i dati raccolti negli USA dal NCHRP (National Highway Cooperative Research Program) Report 572 (Rodegerdts et al., 2007) e confrontati sulla base del loro scarto quadratico medio. Lo studio di Rodegerdts si conclude con l'affermazione che il modello più accurato per la stima della capacità entrante negli USA, per una rotatoria ad uno o due rami in entrata, è il modello proposto dall'HCM 2000.

### 2.4 CALCOLO DELLA CAPACITÀ DELLE USCITE E DELL'ANELLO [1]

Da osservazioni sperimentali per le uscite, si sono ricavati valori del limite di capacità per corsia di 1200÷1400 veh/h.

Per quanto riguarda invece l'anello, da osservazioni su alcune rotatorie in esercizio in Germania, i valori ricavati per corsia sono riportati in *Tabella 2.13*

Tipo di rotatoria	Numero di corsie agli ingressi	Capacità dell'anello [veh/h]
Rotatorie ad 1 corsia all'anello (minirotorie e rotatorie compatte)	1	1600
Rotatorie compatte con 2 corsie all'anello	1	1600
	2	1600
Grandi rotatorie	1	2000
	2	2500

*Tabella 2.13* Limiti di capacità dell'anello secondo osservazioni su rotatorie in esercizio in Germania

### 2.5 CALCOLO DELLA CAPACITÀ IN PRESENZA DI ATTRAVERSAMENTI PEDONALI

La presenza di attraversamenti pedonali nelle rotatorie urbane causa una riduzione della capacità, in ingresso ed in uscita, proporzionale all'entità del traffico pedonale.

Esistono diversi metodi per valutare la riduzione della capacità in entrata e tutti si basano sull'ipotesi che i pedoni abbiano il diritto di precedenza sul traffico veicolare.

Non esistono metodi specifici per ricavare la riduzione di capacità in uscita, per questo si usano gli stessi criteri elaborati per le entrate con gli opportuni adattamenti.

Ci sono tre diverse procedure di calcolo in letteratura (Mauro,2010): una inglese (Marlow e Maycock, 1982), una tedesca (Brilon, Stuwe e Drews, 1992) ed una francese (CETE, Louah, 1992).

### 2.5.1 FORMULAZIONE DI MARLOW E MAYCOCK (1982) [1][4][9]

Il metodo si basa sulla teoria matematica delle code ed è quindi di origine teorica.

Inizialmente si calcola il valore di capacità  $C_{ap}$  in presenza del solo flusso pedonale  $Q_{ped}$  con la formula di Griffiths:

$$C_{ap} = \frac{Q_{ped}}{Q_{ped} \cdot \beta + (e^{\alpha \cdot Q_{ped}} - 1)(1 - e^{-\beta \cdot Q_{ped}})} \cdot 3600 \quad (\text{Equazione 2.26})$$

con

$Q_{ped}$  = flusso pedonale (ped/s)

$$\beta = \frac{1}{C_0} \quad (s)$$

$C_0$  = capacità con flusso pedonale e veicolare nulli (rotatoria completamente vuota)

$\alpha = \frac{B}{v_{ped}}$  = tempo necessario in secondi affinché i pedoni percorrano tutto l'attraversamento

dove B è la larghezza (m) della strada in corrispondenza dell'attraversamento e  $v_{ped}$  (m/s) è la velocità media del flusso pedonale.

La larghezza B deve essere definita separatamente per ciascun ingresso, in quanto caratterizza ciascuna entrata.

Per  $v_{ped}$  si assume il valore medio  $v_{ped}=1,4$  m/s in assenza di rilevazioni dirette.

Nota la capacità  $C_{ap}$ , la capacità  $C_{ped}$  dell'ingresso, in presenza di veicoli e pedoni, vale:

$$C_{ped} = C_e \cdot M \quad (\text{Equazione 2.27})$$

dove  $C_e$  è la capacità calcolata in assenza di pedoni ed M è un fattore di riduzione della capacità dell'ingresso a causa dell'attraversamento pedonale :

$$M = \frac{R^{n+2} - R}{R^{n+2} - 1} \quad (\text{Equazione 2.28})$$

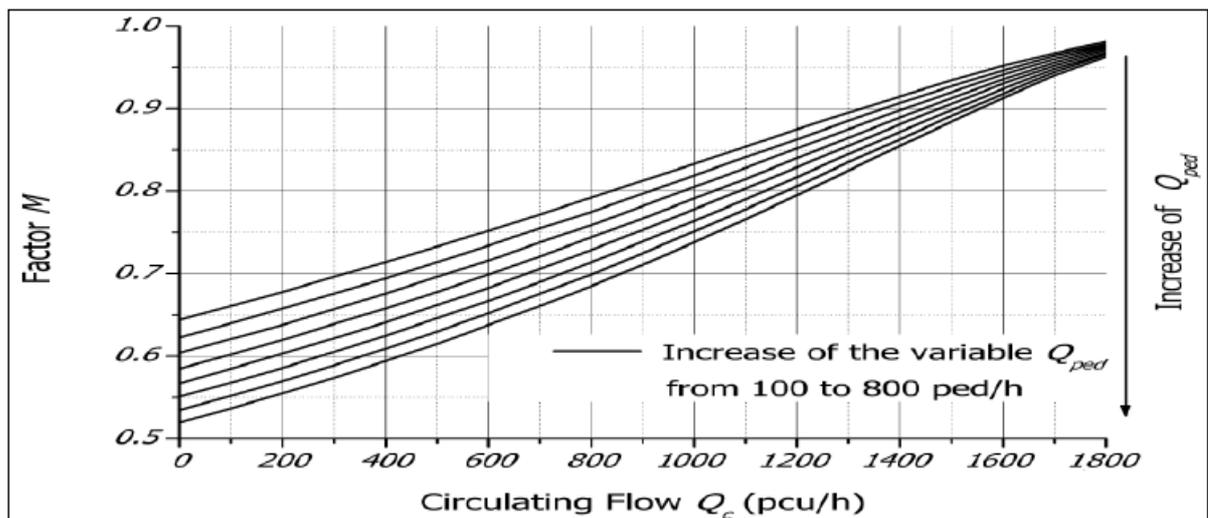
con:

$$R = \frac{C_{ap}}{C_e}$$

dove “n” rappresenta il numero di veicoli che possono trovarsi in coda nell’area compresa tra l’attraversamento pedonale e la linea di precedenza. Va determinato “n” per ciascuna entrata ed è in funzione dell’ingombro longitudinale medio di un veicolo (circa 5÷6 metri) e del numero di corsie dell’entrata.

Per esempio, nel caso di due corsie in entrata ed uno spazio di 5 metri tra linea di precedenza e attraversamento pedonale, si ha  $n=2$ .

Nelle figure seguenti (da *Figura 2.18* a *Figura 2.21*) sono riportati gli andamenti del fattore M in funzione del flusso circolante nel caso di una o due corsie in entrata e nel caso di due procedure di calcolo della capacità diverse: metodo di Kimber e metodo di Brilon. Tutti i grafici sono tracciati per valori crescenti del flusso pedonale  $Q_{ped}$  da 100 a 800 ped/h con incrementi di 100 ped/h.



*Figura 2.18* Andamento di  $M=M(Q_c)$  secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con 1 corsia in ingresso e con capacità  $C_e$  determinata con la procedura di Kimber [1]

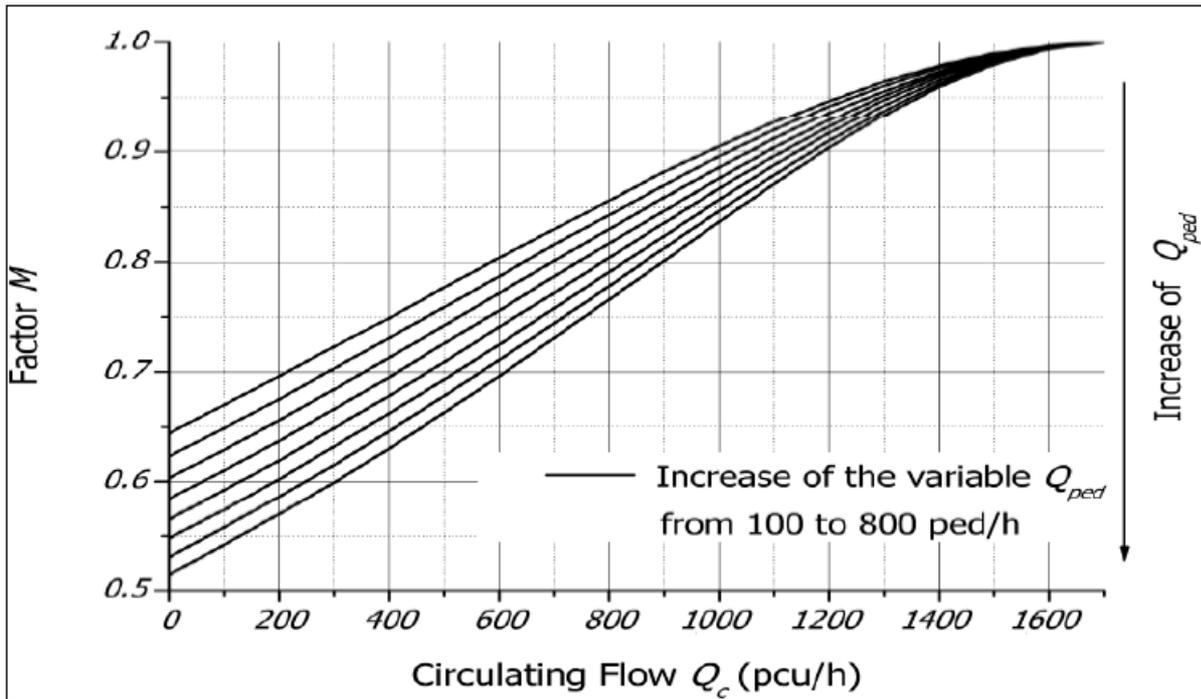


Figura 2.19 Andamento di  $M=M(Q_c)$  secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con 1 corsia in ingresso e con capacità  $C_e$  determinata con il metodo di Brilon-Wu [1]

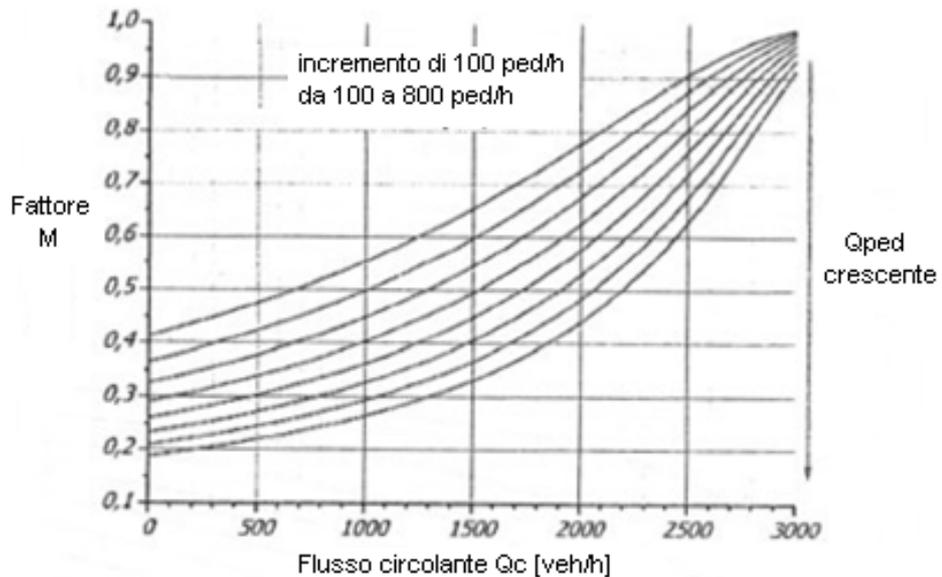


Figura 2.20 Andamento di  $M=M(Q_c)$  secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con 2 corsie in ingresso e con capacità  $C_e$  determinata con la procedura di Kimber [1]

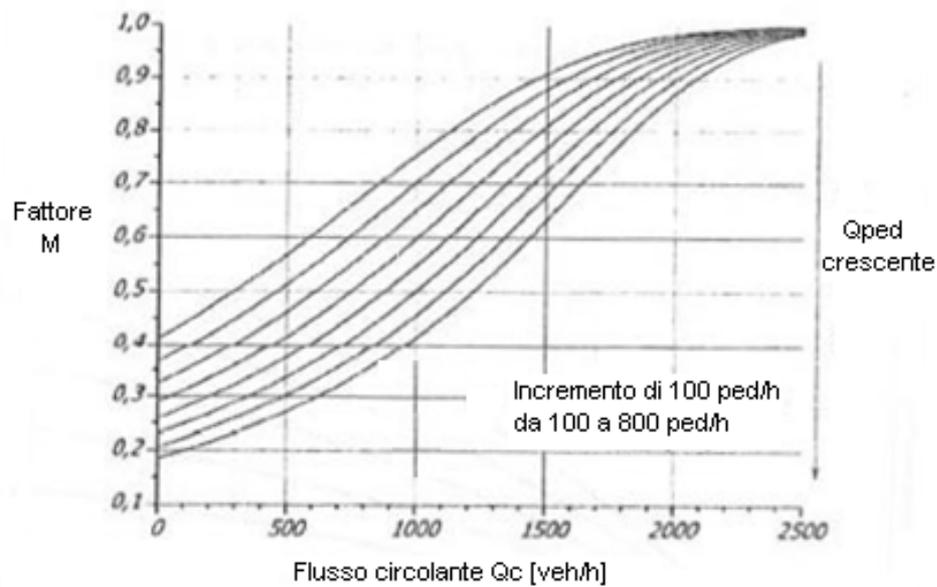


Figura 2.21 Andamento di  $M=M(Q_c)$  secondo Marlow e Maycock per una rotatoria con 2 corsie in ingresso e con capacità  $C_e$  determinata con il metodo di Brilon [1]

### 2.5.2 FORMULAZIONE DI BRILON, STUWE E DREWS (1993) [1][4]

Con questo metodo la capacità  $C_e$ , determinata con uno qualsiasi dei metodi che non considerano i pedoni, viene corretta col fattore  $M$  che ne considera invece l'influenza:

$$C_{ped} = C_e \cdot M \quad (\text{Equazione 2.29})$$

dove  $M$  dipende dalla configurazione degli ingressi:

- Entrata ad 1 corsia

$$M = \frac{1119,5 - 0,715Q_c - 0,644Q_{ped} + 0,00073Q_c Q_{ped}}{1069 - 0,65Q_c}$$

- Entrata a 2 corsie

$$M = \frac{1260,6 - 0,381Q_{ped} - 0,329Q_c}{1380 - 0,50Q_c}$$

con:

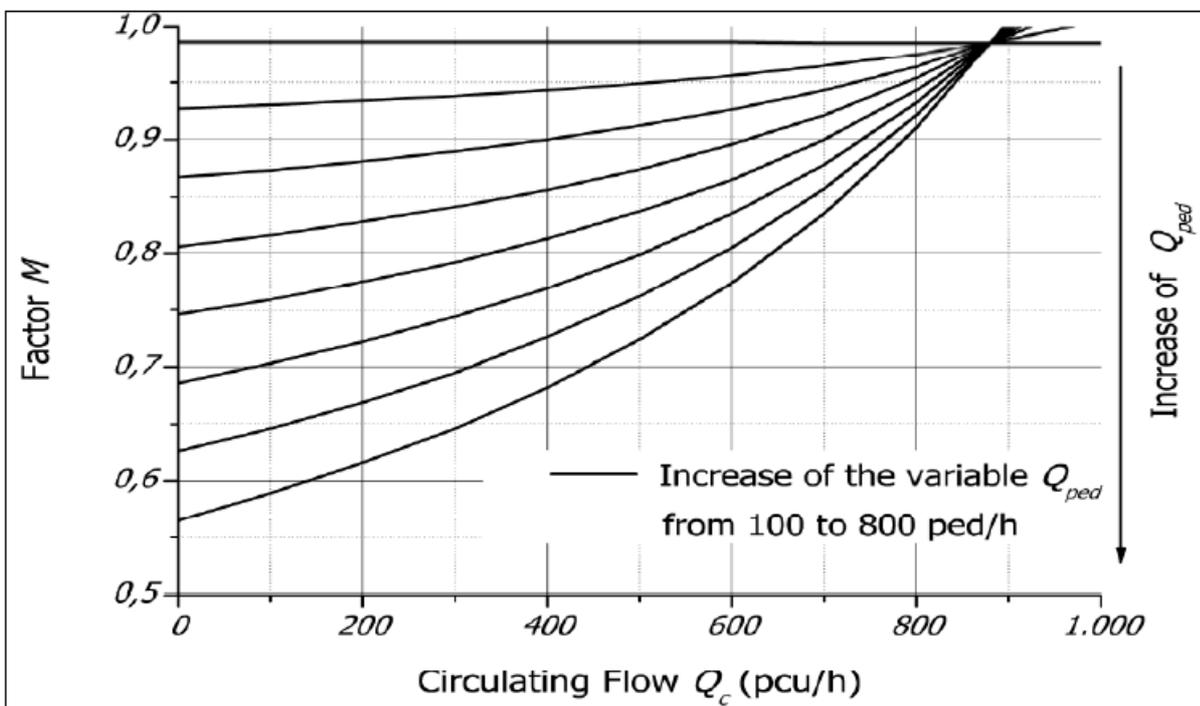
$Q_c$  = flusso circolante all'anello in prossimità dell'ingresso considerato (veh/h)

$Q_{ped}$  = flusso di traffico pedonale in attraversamento del braccio considerato (ped/h)

Le equazioni per determinare  $M$  possono fornire risultati non realistici al di fuori degli intervalli delle misure sperimentali. Per esempio, per rotatorie con una sola corsia in ingresso e con basso volume pedonale (<100 ped/h), le formule mostrano che, per un aumento marginale di  $Q_{ped}$ , anche la capacità tende ad aumentare. Bisogna quindi fare attenzione nell'utilizzo di questa procedura.

In *Figura 2.22* ed in *Figura 2.23* sono riportati gli andamenti di  $M$  per due rotatorie, una con unica corsia ed una con doppia corsia in ingresso.

Tutti i grafici sono tracciati per valori crescenti del flusso pedonale  $Q_{ped}$  da 100 a 800 ped/h con incrementi di 100 ped/h.



*Figura 2.22* Andamento di  $M=M(Q_c)$  secondo Brilon, Stuwe e Drews per una rotatoria con 1 corsia in ingresso [1]

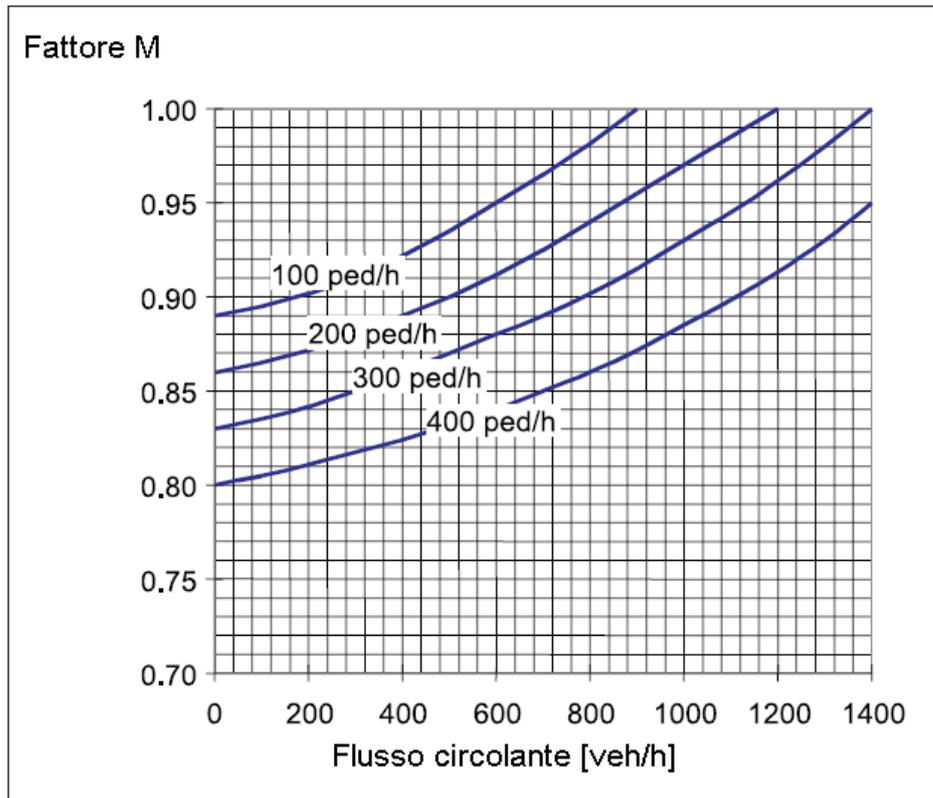


Figura 2.23 Andamento di  $M=M(Q_c)$  secondo Brilon, Stuwe e Drews per una rotatoria con 2 corsie in ingresso [10]

Questo metodo è citato anche dal Federal Highway Administration (FHWA) nella guida relativa alle rotatorie statunitensi.

### 2.5.3 FORMULAZIONE DEL CETE DELL'OUEST (LOUAH, 1992) [1][4][8]

Nella formulazione del CETE (Centre d' Études Techniques de l'Équipement), come nelle precedenti, la capacità dell'entrata  $C_e$  è ridotta attraverso un fattore  $F$  che tiene conto del flusso pedonale

$$C_{ped} = C_e \cdot F \quad (\text{Equazione 2.30})$$

con:

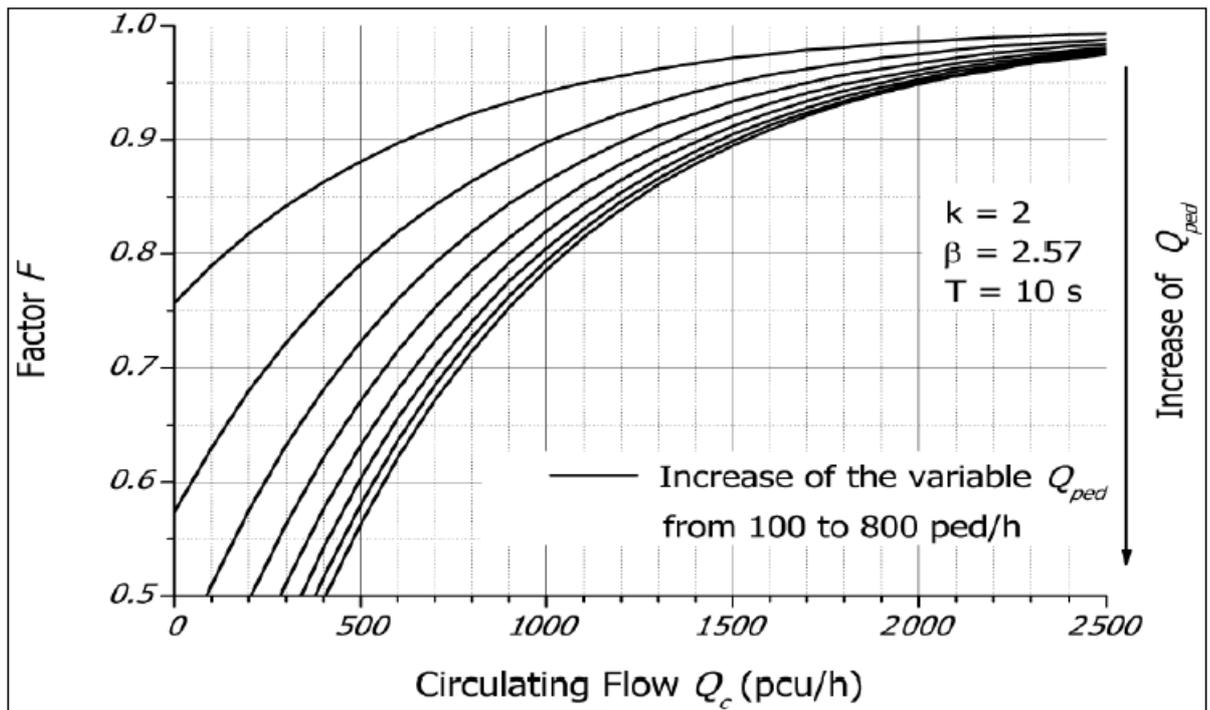
$$F = 1 - \exp(-k \cdot Q_d \cdot \beta) \cdot [1 - \exp(-Q_{ped} \cdot T)]$$

dove:

- $Q_d$  = traffico di disturbo in corrispondenza dell'ingresso considerato (veh/s), da calcolare secondo la formulazione di capacità  $C_e$  prescelta
- $Q_{ped}$  = flusso di traffico pedonale in attraversamento del ramo considerato (ped/s)
- $\beta = \frac{1}{c_0}$  (s)
- $C_0$  = capacità con flusso pedonale e veicolare nulli (rotatoria vuota)
- $K$  = numero di veicoli che si possono trovare in coda nell'area tra linea di precedenza e attraversamento pedonale
- $T$  = periodo di analisi (s)

In *Figura 2.24* è riportato l'andamento di  $F$  per valori crescenti del flusso pedonale da 100 a 800 ped/h con incrementi di 100 ped/h e dove:

- $K=2$
- $\beta=2,57$  s
- $T=10$  s

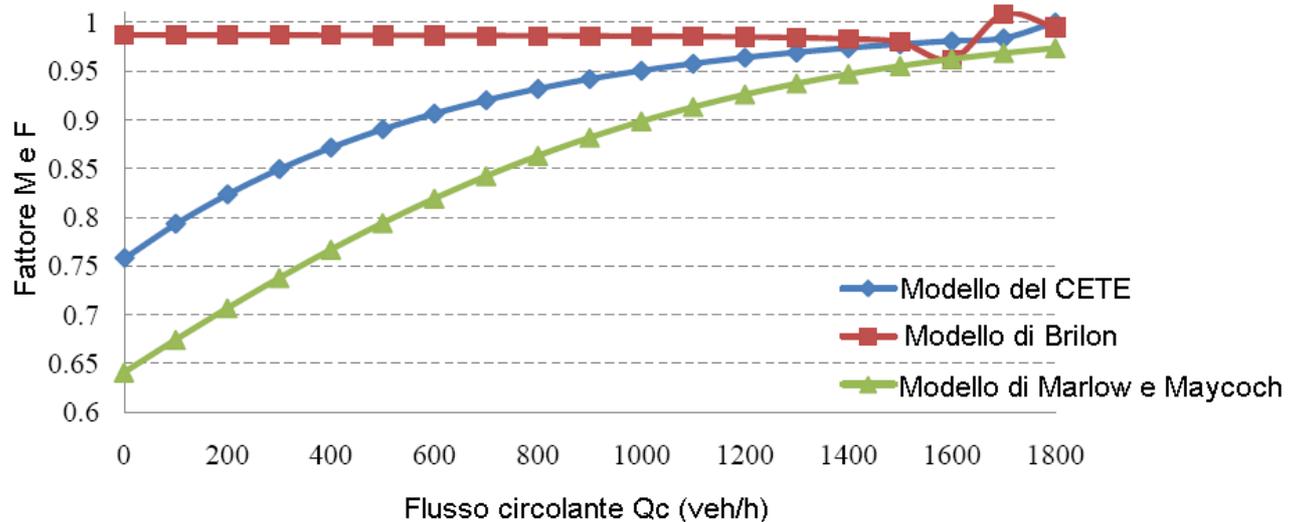


*Figura 2.24* Andamento di  $F=F(Q_c)$  secondo la formulazione del CETE [1]

#### 2.5.4 OSSERVAZIONI

Si possono fare alcune osservazioni sui tre metodi appena descritti:

1. Ciascun metodo è stato calibrato con i dati provenienti dal paese in cui è stato sviluppato.
2. I metodi di Marlow e Maycock e del CETE richiedono l'utilizzo di altri metodi per il calcolo della capacità in entrata in assenza di pedoni.
3. Forniscono stime differenti dell'impatto dei pedoni, come si vede in *Figura 2.25*



*Figura 2.25* Confronto tra i metodi considerati per un flusso pedonale pari a 100 ped/h [4]

4. Il modello di Brilon è stato raccomandato per l'uso negli USA (Rodegerdts, 2004).
5. Uno studio successivo (Rodegerdts et al., 2007) compara l'accuratezza dei modelli di stima della capacità usando lo scarto quadratico medio. Questo studio consiglia di utilizzare il metodo dell'HCM 2000 per il calcolo della capacità in assenza di pedoni negli USA.

#### 2.6 ALTRI STUDI RELATIVI ALL'ARGOMENTO

Ci sono altri studi in letteratura relativi a questo argomento:

1. Analytical Analysis of Pedestrian Effects on Roundabout Exit Capacity (Rodegerdts and Blackwelder, 2005).
2. Effects of pedestrian crossing on roundabout capacity (Duran, 2010).
3. Simulation of Pedestrians Crossing a Street (Boenisch and Kretz, 2010).
4. Impact of Pedestrian Volumes on the Operational Performance of Modern Roundabouts (Alaa Sindi, 2011)

5. Evaluating the impact of pedestrian crossing on roundabout entry capacity (C. Meneguzzer, R. Rossi, 2011)

### 2.6.1 FORMULAZIONE DI RODEGERDTS AND BLACKWELDER [4][11]

Metodo presentato nel 2005 da Rodegerdts e Blackwelder. Si tratta di un'analisi degli effetti dei pedoni sulla capacità della corsia di uscita di una rotatoria situata in una cittadina (Poway) vicino a San Diego, California.

Lo studio è stato effettuato per poter successivamente modificare la struttura della rotatoria a causa di un forte flusso pedonale su uno dei rami.

Le ipotesi alla base di questo metodo sono:

1. il flusso pedonale ha sempre la precedenza sul flusso veicolare;
2. il processo degli arrivi dei veicoli avviene secondo Poisson;
3. i veicoli si accodano ogni volta che c'è un pedone sull'attraversamento;
4. la velocità dei pedoni è costante;
5. quando una coda si propaga nell'anello tutti gli ingressi sono bloccati.

La probabilità che la coda raggiunga una lunghezza  $q$  è data da:

$$P_q(q) = \frac{e^{-V_E \left( T_B + \frac{3600 Q_{avg}}{S_E} \right)} \left[ V_E \left( T_B + \frac{3600 Q_{avg}}{S_E} \right) \right]^q}{q!} \quad \text{(Equazione 2.31)}$$

dove:

- $Q_{avg}$  = lunghezza media della coda [veh];
- $V_E$  = flusso veicolare in uscita [veh/h];
- $T_B$  = durata del blocco dovuto ai pedoni [s];
- $S_E$  = flusso di saturazione dei veicoli in uscita [veh/h];
- $q$  = lunghezza della coda [veh].

Definita  $Q_E$  la lunghezza massima che può raggiungere la coda senza bloccare l'anello, si calcola la durata media della coda con l'equazione:

$$t_{avg} = \sum_{q=0}^{q=\infty} P_q(q) \cdot t_q(q) \quad [s] \quad \text{(Equazione 2.32)}$$

dove  $t_q$  rappresenta il tempo di durata della coda di lunghezza  $q > Q_E$  [s].

Il tempo totale in cui la corona è bloccata è dato da:

$$t_{blocco} = n \cdot t_{avg} \quad [s] \quad (\text{Equazione 2.33})$$

dove  $n$  rappresenta il numero di volte in cui la circolazione risulta bloccata durante il periodo di osservazione.

Infine, la capacità dell'ingresso è data da:

$$C_{adj} = C_e \left( 1 - \frac{t_{blocco}}{3600} \right) \quad [\text{veh/h}] \quad (\text{Equazione 2.34})$$

dove:

- $C_{adj}$  = capacità dell'ingresso che considera l'effetto del blocco della circolazione all'anello [veh/h]
- $C_e$  = capacità dell'ingresso in assenza dei pedoni [veh/h]

Osservazione: il fatto che si consideri che la coda, appena interessa l'anello, blocchi tutte le entrate portando a zero la capacità, è molto restrittiva.

### 2.6.2 SIMULATION OF PEDESTRIANS CROSSING A STREET (BOENISCH AND KRETZ, 2010) [4]

Questo studio tratta la rappresentazione dei pedoni e dei veicoli nel modello di simulazione VISSIM. Si assume che i veicoli abbiano la precedenza sui pedoni. Lo studio si è svolto su una carreggiata a due corsie in cui non è presente un attraversamento pedonale.

Gli autori concludono che, nonostante i veicoli abbiano la precedenza, subiscono ugualmente ritardi a causa dei pedoni.

Si osserva infatti che i pedoni accettano headway insufficienti all'attraversamento della carreggiata senza causare rallentamenti o addirittura fermate ai veicoli in arrivo.

Altra osservazione fatta dagli autori è che i dati a disposizione sono insufficienti per calibrare il comportamento dei pedoni in assenza di un attraversamento pedonale.

### 2.6.3 EFFECTS OF PEDESTRIAN CROSSING ON ROUNDABOUT CAPACITY (DURAN, 2010) [4][5]

Questo studio usa il modello di simulazione VISSIM per rappresentare l'impatto del volume pedonale e della localizzazione delle strisce pedonali sulla capacità in entrata di una rotatoria.

Duran analizza quattro diversi volumi pedonali e posizioni delle strisce.

Lo studio evidenzia che la capacità stimata col modello HCM 2000 si avvicina molto a quella trovata col modello di simulazione VISSIM, però non sviluppa un modello per il calcolo del ritardo dei veicoli in funzione del flusso pedonale.

#### **2.6.4 IMPACT OF PEDESTRIAN VOLUMES ON THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF MODERN ROUNDABOUTS (ALAA SINDI, 2011) [4]**

L'autore propone un modello analitico per la stima del ritardo dei veicoli basandosi sulla teoria delle code.

Il modello è applicabile a rotatorie con una singola corsia in entrata ed è stato calibrato e validato con i ritardi ottenuti dalla micro simulazione con VISSIM.

La ricerca dimostra che i pedoni causano ritardi ai veicoli in quattro diversi modi:

1. I veicoli entranti danno la precedenza ai pedoni nel ramo d'entrata;
2. I veicoli uscenti danno la precedenza ai pedoni nel ramo d'uscita;
3. La coda nel ramo d'uscita si propaga all'anello causando ritardi ai veicoli circolanti;
4. La coda nell'anello si propaga andando ad interessare le altre entrate bloccandone i veicoli.

Per ciascuno di questi quattro casi l'autore va a modificare le formule già proposte dall'HCM 2000 in questo modo:

- Considera il volume di conflitto composto dai veicoli circolanti e dai pedoni che attraversano;
- Il gap critico  $t_c$  è l'insieme di due valori critici: uno relativo al tempo per immettersi nell'anello ed uno relativo al tempo per superare l'attraversamento;
- Il tempo di follow-up è composto anch'esso da due termini.

#### **2.6.5 EVALUATING THE IMPACT OF PEDESTRIAN CROSSINGS ON ROUNDABOUT ENTRY CAPACITY (C. MENEGUZZER, R. ROSSI, 2011) [3]**

Si tratta di uno studio empirico per la stima della capacità di una rotatoria in presenza di un elevato volume pedonale.

La rotatoria studiata è situata a Padova ed è la stessa nella quale sono stati rilevati i dati utilizzati in questa tesi.

L'impedenza dei pedoni è trattata come tempo di occupazione dell'attraversamento e non come volume pedonale. Si arriva quindi a determinare un indice di riduzione di capacità che porta ad una stima realistica della capacità in entrata della rotatoria in presenza di pedoni.

Usando la regressione non lineare su intervalli di un minuto, gli autori hanno stimato la seguente equazione:

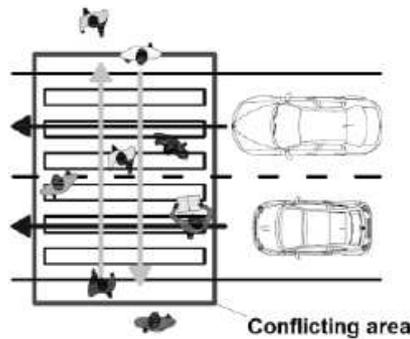
$$p_{occ} = 0.0052v_p^{0.699} \quad (\text{Equazione 2.35})$$

dove  $p_{occ}$  rappresenta la percentuale di occupazione dell'attraversamento pedonale e  $v_p$  il volume pedonale.

La percentuale di occupazione è la durata del generico intervallo in cui il passaggio pedonale è occupato da uno o più pedoni, rapportata all'unità di tempo. Nel caso di un singolo pedone è il tempo impiegato da quest'ultimo per attraversare il ramo.

Per semplicità si suppone che i veicoli aspettino finché tutti i pedoni non abbiano terminato la manovra di attraversamento.

In *Figura 2.27* è rappresentata l'area di conflitto.



*Figura 2.27* Area di conflitto

Si è poi determinata la capacità in entrata:

$$C_e = \sqrt{C_m^2 - \frac{C_m}{b} p_{occ}} \quad (\text{Equazione 2.36})$$

dove  $C_e$  rappresenta la capacità in entrata,  $C_m$  è la massima capacità in entrata in assenza di pedoni e  $b$  è un parametro positivo.

Nei due grafici seguenti è rappresentata la capacità in entrata in funzione della percentuale di occupazione (*Figura 2.28*) e del flusso circolante (*Figura 2.29*)

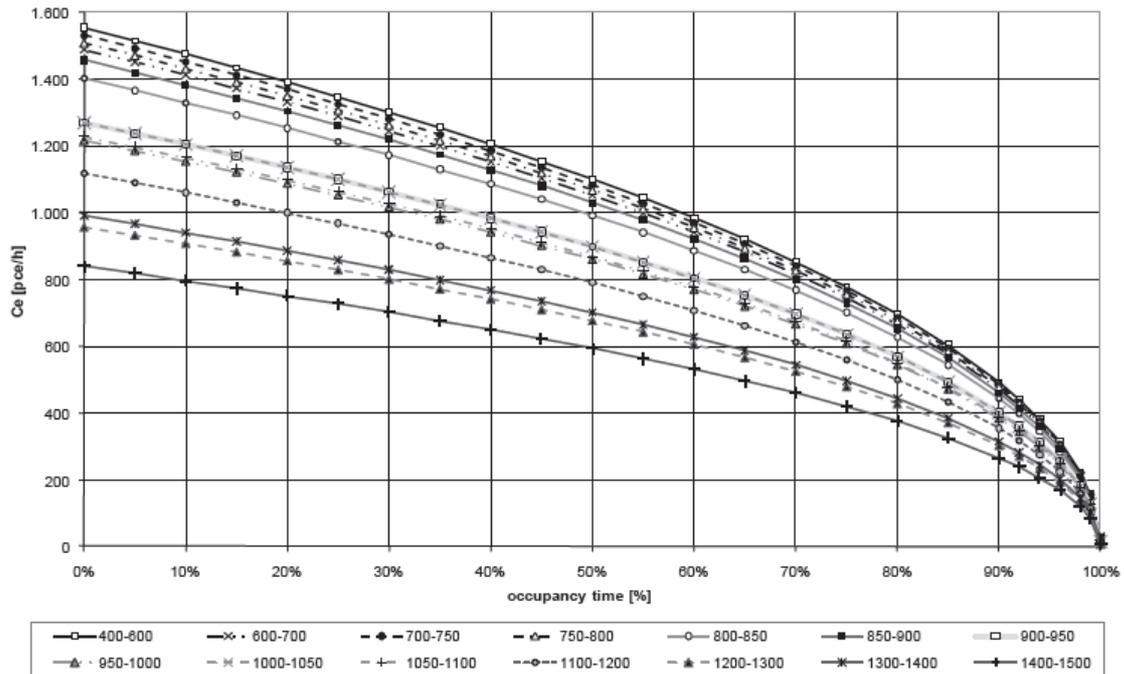


Figura 2.28 Capacità in entrata in funzione della percentuale di occupazione [3]

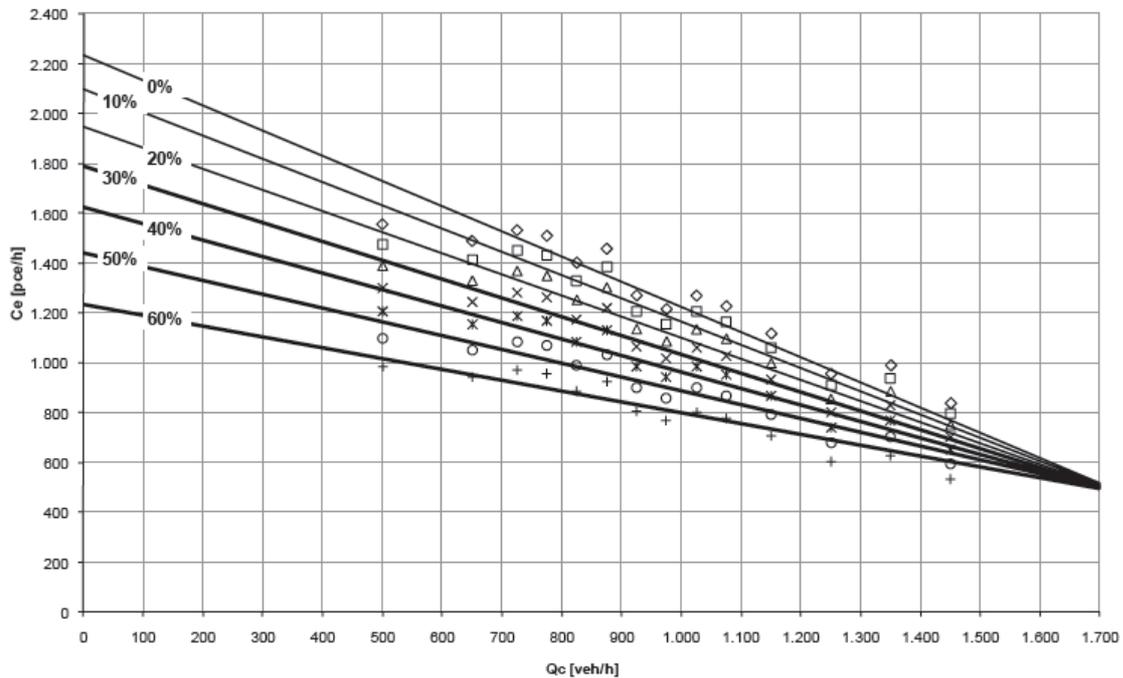


Figura 2.29 Capacità in entrata in funzione del flusso circolante [3]

L'andamento dell'indice di riduzione di capacità (CRI) in funzione del flusso circolante  $Q_c$  è rappresentato in *Figura 2.30*. Ciascuna curva corrisponde ad un diverso livello di percentuale di occupazione del passaggio pedonale.

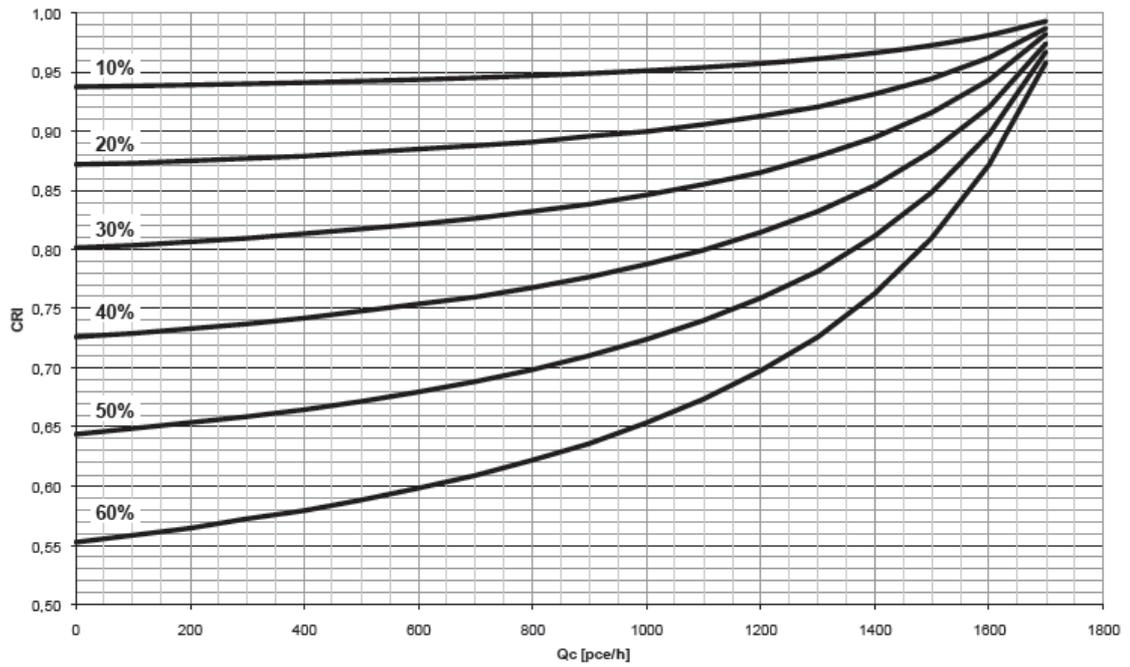


Figura 2.30 Indice di riduzione di capacità in funzione del flusso circolante per vari livelli della percentuale di occupazione [3]

## CAPITOLO 3: IL CASO DI STUDIO

### 3.1 SCELTA DELL'INTERSEZIONE DA ANALIZZARE E LE SUE CARATTERISTICHE GEOMETRICHE

La rotatoria presa in considerazione in questa tesi si trova a Padova lungo la circonvallazione del centro storico tra le vie Gattamelata, Giustiniani e Sografi, vicino al Policlinico Universitario.



Figura 3.1 Rotatoria del Policlinico Universitario [17]

Si è scelta questa intersezione perché era già stata utilizzata in due precedenti lavori di tesi [15], [16] svolti presso questa Università.

In *“Analisi sperimentale degli effetti degli attraversamenti pedonali sulla capacità dei rami di intersezioni a rotatoria”* [16] si spiegano i motivi per cui è stata scelta questa intersezione; il primo citato è che l'intersezione da analizzare dovesse avere caratteristiche simili a quelle utilizzate nei metodi sperimentali in letteratura, il secondo è che ci dovessero essere strutture verticali adeguate a collocare la strumentazione per le riprese del traffico veicolare e pedonale.

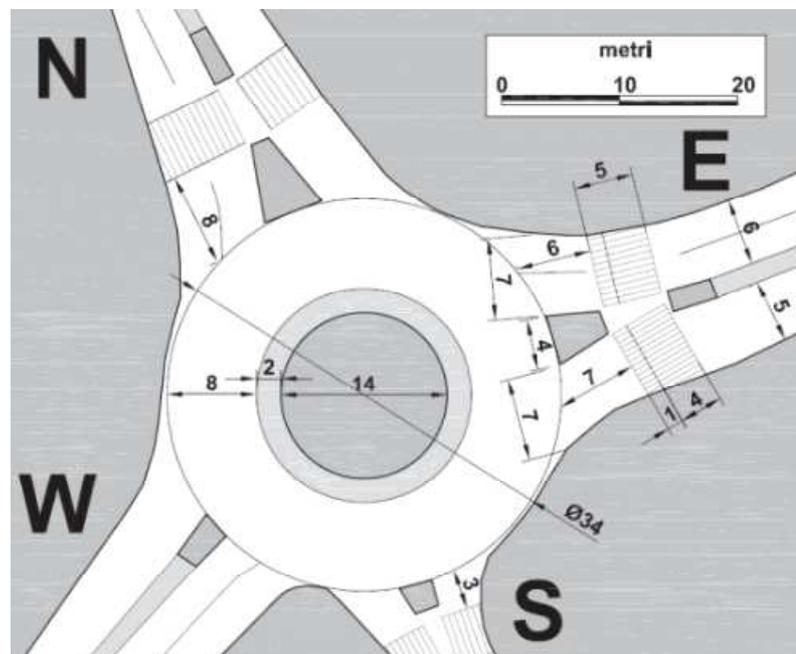
Altro motivo importante citato in *“L'effetto dei transiti pedonali sulla capacità dei rami di intersezioni a rotatoria. Evidenze sperimentali in contesti urbani”* [15] è che l'intersezione considerata non risente di effetti esterni indotti da intersezioni vicine, almeno per quel che riguarda le riprese effettuate.

Per quanto riguarda il traffico pedonale si è visto, dalle riprese effettuate, che l'attraversamento più utilizzato è quello del ramo est perché è l'unico disponibile sulla relazione nord-sud [15] ed è utilizzato sia dai pedoni che dai ciclisti.

Le caratteristiche dei rami sono:

- Ramo nord (Via Giustiniani, direzione centro storico): ingresso ed uscita configurate a due corsie con attraversamento pedonale arretrato di 8 metri dall'anello e poco utilizzato perché 200 metri a nord è disponibile un attraversamento semaforizzato di fronte all'ospedale.
- Ramo est (Via Gattamelata, direzione Stanga): è caratterizzato da due corsie in ingresso ed una in uscita. L'attraversamento si trova a 6 metri dall'approccio. Il flusso pedonale è molto intenso e causa rallentamenti ai veicoli in entrata ed i uscita.
- Ramo sud (Via Sografi, direzione Forcellini): è il ramo meno importante che serve una zona residenziale con una corsia in ingresso ed una in uscita. L'attraversamento è a 3 metri dall'anello. Spesso questa entrata è bloccata dai veicoli in uscita dal ramo est, che a causa dell'attraversamento dei pedoni, si accumulano nell'anello.
- Ramo ovest (Via Gattamelata, direzione Pontecorvo): ha due corsie in ingresso e due in uscita e non possiede un passaggio pedonale.

La rotatoria è rappresentata in *Figura 3.2*



*Figura 3.2* Schema e dimensioni principali della rotatoria e del ramo est [3]

### 3.2 POSIZIONAMENTO STRUMENTAZIONE

Dall'analisi dei vari rami quindi si è scelto di posizionare le videocamere nel ramo est. Per questo lavoro di tesi si è pensato di posizionare due videocamere in prossimità del passaggio pedonale, una per le riprese dell'attraversamento ed una per le riprese dell'anello, ed una terza videocamera arretrata di circa 30 metri rispetto all'approccio per individuare meglio i periodi di saturazione dell'approccio. In *Figura 3.3* sono individuate le posizioni delle videocamere.



*Figura 3.3* Posizione videocamere [17]

Le videocamere 1 e 2 sono state montate su un palo telescopico agganciato al palo della luce che si vede in *Figura 3.4* a destra del passaggio pedonale. Il palo poi è stato alzato ad una quota tale da rendere visibile l'intero attraversamento e tutta l'intersezione.



*Figura 3.4* Passaggio pedonale ramo est [17]

### **3.3 RACCOLTA ED ANALISI DEI DATI**

Le riprese sono state eseguite venerdì 25 maggio 2012, prima della chiusura estiva delle scuole, in condizioni di traffico ordinarie per il nodo, caratterizzate da condizioni di congestione almeno nelle ore di punta.

Le riprese sono state eseguite in due diversi momenti della giornata per individuare i periodi di morbida e di punta nell'arco della mattina e del pomeriggio. I filmati del mattino vanno dalle 7.30 alle 11.30 e quelli del pomeriggio dalle 15.30 alle 19.00 per un totale di sette ore e trenta minuti di riprese per ogni videocamera.

### **3.4 CODIFICA DEI FILMATI**

La fase successiva alla raccolta dati è stato il trasferimento dei filmati sul computer e la loro trasformazione da file.moi in file.avi per poterli utilizzare nei programmi di codifica.

Si è deciso di utilizzare soltanto i filmati del mattino perché nel pomeriggio si sono riscontrati pochi intervalli di saturazione.

Tutti i filmati sono stati codificati con applicazioni del Laboratorio Trasporti e già utilizzate nei precedenti lavori di tesi. Si tratta di applicazioni con una interfaccia grafica che permette di caricare il filmato desiderato e di registrare in un database una stringa di caratteri rappresentativa della manovra codificata.

#### **3.4.1 CODIFICA DEL TRAFFICO PEDONALE**

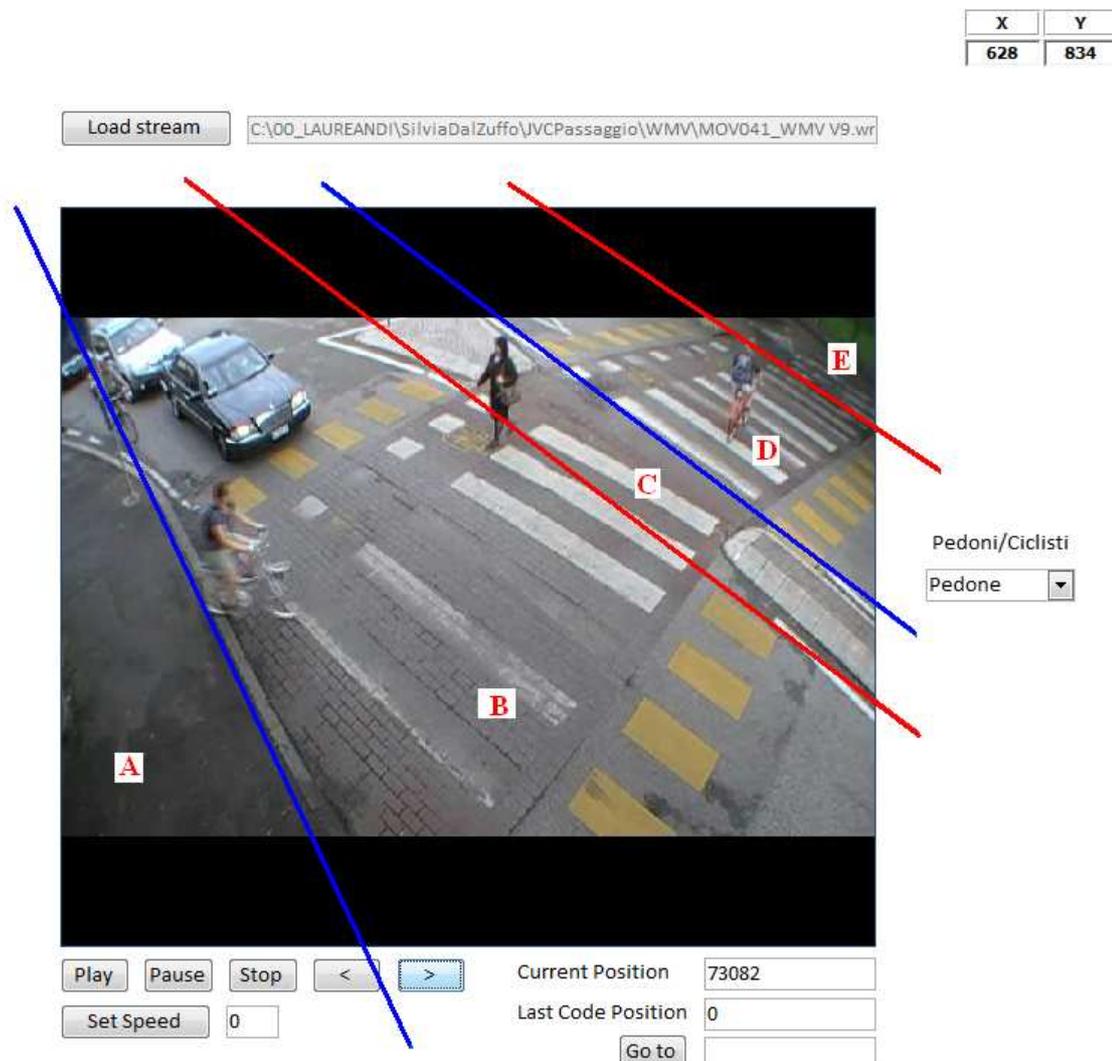
La codifica del traffico pedonale è stata fatta con un'applicazione che permette di registrare i dati in un database Microsoft Access.

Per la codifica si è suddiviso il passaggio pedonale in 5 aree diverse; quindi per ciascun pedone o ciclista si registrano 5 diverse posizioni corrispondenti a 5 diverse fasi dell'attraversamento.

Sono state individuate le seguenti zone di transito da parte dei pedoni (si veda figura 3.5):

- A. Marciapiede lato sud;
- B. Attraversamento pedonale sulla corsia di uscita del ramo est (tratto iniziale rispetto alla direzione di marcia dei pedoni);
- C. Isola spartitraffico;
- D. Attraversamento pedonale sulla corsia di entrata ramo est (tratto iniziale rispetto alla direzione di marcia dei pedoni);
- E. Marciapiede lato nord.

L'interfaccia del programma di codifica è di immediata comprensione e di facile utilizzo e la si vede in *Figura 3.5*.



*Figura 3.5* Interfaccia della codifica pedoni

Per la codifica basta avviare l'applicazione e caricare il filmato desiderato attraverso il pulsante in alto a sinistra "load stream". Una volta fatto questo si inizia la registrazione di ciascun passaggio in una tabella di Access.

Si deve innanzitutto selezionare il tipo di utente, pedone o ciclista, con il pulsante a destra dell'interfaccia. Si preme poi "Play" per far partire il filmato.

Ad ogni click effettuato si registrano nella tabella una serie di dati, comprese le coordinate (x,y) che individuano la posizione dell'utente all'interno dell'area, in questo modo si possono ricostruire le traiettorie di pedoni e ciclisti nell'attraversamento.

I passi codificati hanno una sequenza ben definita (A-> A->A; A->C; C->C; C->E) che si ripete per ciascun utente.

Non è possibile eseguire una codifica non sequenziale dei passi dell'utente in quanto il programma attiva il controllo della posizione e se l'area non è corretta (nel senso che non rispetta la logica sequenza delle aree lungo il percorso del pedone/ciclista) compare il messaggio "Area non corretta".

"Current position" indica il frame a cui si è arrivati nella visualizzazione del filmato, mentre "Last code position" indica il frame dell'ultima codifica correttamente eseguita.

Un esempio della tabella Access ottenuta si ha in *Tabella 3.1*.

ID	area	passo	classeUtente	frame	x	y
1	A	A->	1	31013	451	541
2	A	A->A	1	31473	445	545
3	C	A->C	1	36754	705	462
4	C	C->C	1	37744	733	449
5	E	C->E	1	42872	836	393
6	A	A->	1	31760	437	522
7	A	A->A	1	32263	439	525
8	C	A->C	1	37008	669	436
9	C	C->C	1	37893	700	433
10	E	C->E	1	43495	829	389
11	A	A->	2	40372	446	548
12	A	A->A	2	40372	446	548
13	C	A->C	2	42826	690	456
14	C	C->C	2	43201	722	456
15	E	C->E	2	46242	876	419
16	A	A->	2	54707	501	702

*Tabella 3.1* Esempio di tabella contenente i dati relativi a 5 passaggi di cui 2 pedoni (classe 1) e 3 ciclisti (classe 2).

Nella prima colonna c'è l'ID, un numero identificativo assegnato automaticamente dal programma all'utente in transito, la seconda colonna rappresenta l'area in cui si trova l'utente. La terza colonna invece indica il passo con delle sigle che significano:

- A->: indica l'arrivo nell'area A (l'utente è in procinto di eseguire l'attraversamento e si trova ancora sul marciapiede);
- A->A: indica la fase spazio-temporale in cui l'utente entra nell'attraversamento pedonale;
- A->C: indica l'arrivo dell'utente nell'area C e quindi l'attraversamento della retta di delimitazione 2;
- C->C: indica la partenza dall'area C e quindi l'attraversamento della retta di delimitazione 3;
- C->E: indica l'arrivo all'area E e l'attraversamento della retta 4.

La colonna "classe utente" contiene un numero che individua il tipo di utente:

1. Pedone
2. Ciclista

Nella quinta colonna viene registrato il frame che identifica il momento in cui l'utente compie i vari passi e nelle successive invece si hanno le coordinate (x,y) in pixel dei punti in cui transita.

Ogni senso di marcia è stato codificato separatamente; ogni filmato è stato quindi visualizzato due volte.

### **3.4.2 CODIFICA DEL TRAFFICO VEICOLARE**

Per questa codifica, come per la precedente, si è utilizzata un'applicazione software sviluppata presso il Laboratorio Trasporti.

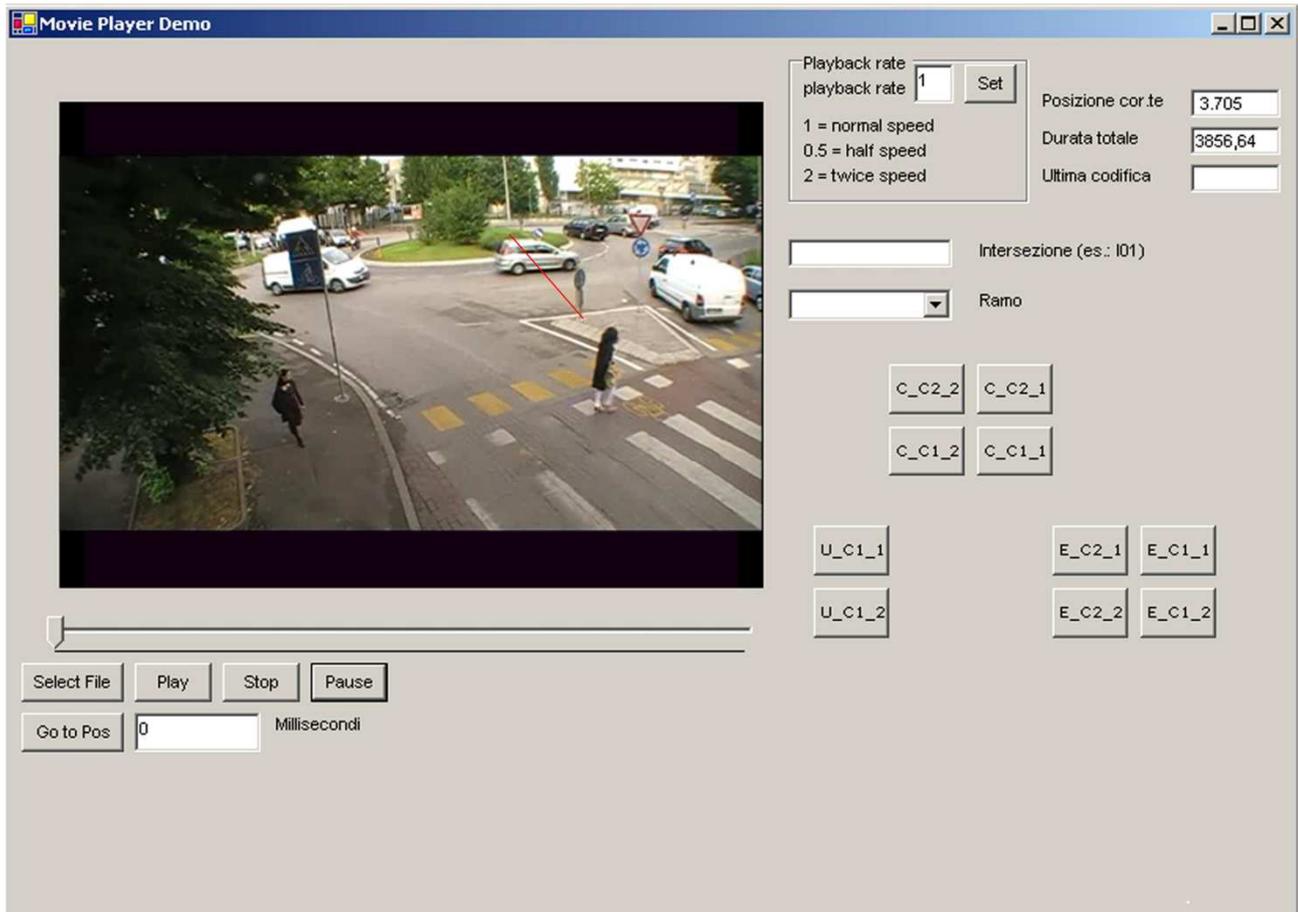


Figura 3.6 Interfaccia della codifica veicolare

Per questa codifica si utilizzano i filmati della seconda videocamera, montata sullo stesso palo telescopico ma orientata in modo tale da riprendere l'intera intersezione.

In questa applicazione è possibile anche selezionare la velocità di riproduzione del filmato per facilitare la codifica. Grazie a questa funzione è stato possibile codificare il flusso entrante e circolante su entrambe le corsie senza visualizzare lo stesso filmato due volte, è bastato infatti dimezzare la velocità per codificare in una volta sola entrambe le corsie. Per quanto riguarda il flusso uscente invece, essendoci un'unica corsia in uscita, è stato possibile visionare il filmato ad una velocità doppia rispetto a quella reale.

Anche in questa interfaccia viene indicata la posizione corrente del filmato, la sua durata totale ed il frame dell'ultima codifica.

Nei pulsanti sottostanti, la prima lettera indica il tipo di flusso, la seconda la corsia ed il numero indica se si tratta di veicoli leggeri (1) e pesanti (2):

- C\_C2\_2: flusso circolante, corsia interna dell'anello, veicolo pesante
- C\_C1\_2: flusso circolante, corsia esterna dell'anello, veicolo pesante
- C\_C2\_1: flusso circolante, corsia interna dell'anello, veicolo leggero
- C\_C1\_1: flusso circolante, corsia esterna dell'anello, veicolo leggero

- E\_C2\_2: flusso entrante, corsia sinistra del ramo, veicolo pesante
- E\_C1\_2: flusso entrante, corsia destra del ramo, veicolo pesante
- E\_C2\_1: flusso entrante, corsia sinistra del ramo, veicolo leggero
- E\_C1\_1: flusso entrante, corsia destra del ramo, veicolo leggero
- U\_C1\_2: flusso uscente, corsia unica, veicolo pesante
- U\_C1\_1: flusso uscente, corsia unica, veicolo leggero

Un esempio dei dati ottenuti è mostrato nella seguente tabella caratterizzata da un unico campo “evento” che contiene una stringa di caratteri:

tblEventi_ORA1
evento
I01;Est;U_C1_1;114983
I01;Est;U_C1_1;115723
I01;Est;U_C1_1;123088
I01;Est;U_C1_1;124665
I01;Est;U_C1_1;126640

Tabella 3.2 Esempio di registrazione dati

dove:

I01: nome dell’intersezione;

Est: ramo dell’intersezione studiato;

U: flusso uscente;

C1: corsia numero 1;

1: tipo di veicolo (leggero);

114983: frame codificato (in millisecondi dall’inizio del filmato).

L’utilizzo delle comuni funzionalità di un sistema di base di dati consente di trasformare i dati di codifica in viste di facile lettura.

La *Tabella 3.3* è un esempio di quello che si ottiene con una “query” a partire dai dati di codifica.

FLUSSO	CORSIA	CLASSE_VEICOLARE	FRAME
U	C1	1	114983
U	C1	1	115723
U	C1	1	123088
U	C1	1	124665
U	C1	1	126640
U	C1	1	128819
C	C2	1	771662
C	C2	1	773593
C	C2	1	774846
C	C1	1	775615
C	C2	1	779957
C	C1	1	793017
C	C2	2	811645
C	C1	1	817200
E	C1	1	3383185
E	C1	1	3383814
E	C1	1	3386127
E	C1	1	3386685
E	C2	2	3392691
E	C1	1	3393787
E	C1	1	3394461

*Tabella 3.3* Vista dei flussi veicolari in transito distinti per categoria di mezzo, tipo di manovra, corsia di appartenenza ed istante di passaggio.

Per la codifica del flusso circolante si è individuata una sezione in corrispondenza dell'isola spartitraffico per avere un riferimento fisso. Il pulsante veniva premuto nel momento in cui le ruote anteriori del veicolo passavano sulla riga rossa tracciata sulla *Figura 3.6*.

Durante la visione del filmato, e da una rapida lettura dei dati, è risultato evidente che i veicoli circolanti utilizzano per l'88% la corsia più interna dell'anello(C2). Questo è dovuto al fatto che la corsia esterna risulta occupata dai veicoli entranti che si immettono gradualmente nell'anello, senza fermarsi sulla linea di precedenza.

Questo tipo di comportamento ha causato alcuni problemi anche nella codifica del flusso entrante. La difficoltà sta nel fatto che gli utenti non si fermano prima della linea di precedenza per poi ripartire quando individuano un gap accettabile nella corrente principale, ma forzano l'entrata andando ad occupare la corsia esterna dell'anello. Si è deciso di codificare il momento in cui le ruote posteriori del veicolo superano la linea di precedenza, anche se in realtà non è questo il momento in cui il veicolo entra a far parte del flusso circolante, in quanto risulta essere ancora fermo, all'interno però dell'anello.

Così come per il flusso circolante, il flusso entrante utilizza per il 97% la corsia C1, ossia la corsia sinistra del ramo; questo probabilmente è dovuto al fatto che la corsia di destra è utilizzata esclusivamente da coloro che devono svoltare a destra.

Per quanto riguarda il flusso uscente, nonostante ci siano due corsie, qui si considera un'unica corsia in uscita, anche se entrambe sono utilizzate, soprattutto quando l'attraversamento pedonale è impegnato ed i veicoli sono costretti ad arrestarsi e ad accumularsi nella corsia di uscita tra l'attraversamento e l'anello. Essendo questo spazio limitato (circa 7 metri), i veicoli, nel caso di forte flusso in uscita, vanno a bloccare l'entrata sud.

L'applicazione utilizzata consente un conteggio classificato per due sole categorie veicolari, si sono però conteggiati separatamente i veicoli a due ruote in quanto sono una percentuale rilevante del traffico leggero.

I coefficienti di equivalenza adottati sono mostrati in *Tabella 3.4*.

tipo di veicolo	Coefficiente di equivalenza (autovetture equivalenti)
Veicoli a 2 ruote	0.5
Veicoli leggeri	1
Veicoli pesanti	2

*Tabella 3.4* Coefficienti di equivalenza

### 3.5 INTERVALLI DI SATURAZIONE

La visione dei filmati della terza videocamera ha permesso di individuare gli intervalli di saturazione, quindi gli intervalli temporali in cui sono state osservate code in ingresso alla rotatoria.

Sono stati individuati 74 intervalli di saturazione, dei quali 35 inferiori al un minuto.

Per ogni intervallo si calcolano poi i veicoli equivalenti usando i coefficienti di *Tabella 3.4* e successivamente il flusso orario equivalente con la formula:

$$Q_i = f \cdot \frac{1}{\Delta} \text{ [veh/h]}$$

dove:

$Q_i$ : flusso orario equivalente [veh/h]

$f$ : veicoli equivalenti conteggiati [veh]

$\Delta$ : durata dell'intervallo [h]

$$i = \begin{cases} e = \text{flusso entrante} \\ c = \text{flusso circolante} \\ u = \text{flusso uscente} \end{cases}$$



## CAPITOLO 4: ELABORAZIONE ED ANALISI DEI DATI

Una volta raccolti e codificati i dati si è passati alla fase successiva, cioè alla loro elaborazione ed analisi. L'elaborazione dati vera e propria è stata fatta con Microsoft Access<sup>®</sup>, mentre si è utilizzato Microsoft Excel<sup>®</sup> per la realizzazione dei grafici; per l'analisi statistica ci si è avvalsi del software IBM SPSS Statistics 20<sup>®</sup>.

I dati relativi ai flussi sul passaggio pedonale e quelli relativi alla rotatoria sono stati inizialmente trattati in due database differenti e poi riuniti in uno unico per le considerazioni conclusive sui modelli.

Tutti i dati sono stati elaborati con riferimento ad intervalli di osservazione da 1 minuto.

La prima elaborazione fatta su tutti i dati a disposizione (attraversamenti pedonali, flussi veicolari e accodamenti sul ramo d'ingresso), è stata quella di sincronizzare i filmati; infatti non partivano tutti esattamente allo stesso istante, ma per l'analisi era necessario che avessero tutti lo stesso *frame* d'inizio. Si è scelto di allineare tutti i filmati con quello relativo al passaggio pedonale.

### 4.1 ELABORAZIONE DEI FLUSSI SULL'ATTRAVERSAMENTO PEDONALE

#### 4.1.1 STUDIO DELLE TRAIETTORIE ALL'INTERNO DELL'ATTRAVERSAMENTO

Una prima elaborazione dei flussi pedonali è stata fatta per poter ottenere una tabella di partenza per tracciare le traiettorie dei pedoni e dei ciclisti durante l'attraversamento. In *Tabella 4.1* sono contenute le coordinate (x,y) della posizione di ciascun pedone o ciclista all'interno dell'attraversamento in entrambe le direzioni.

Coordinate (x,y)											
ID_Utente	classeUtente	xA	xAA	xAC	xCC	xCE	yA	yAA	yAC	yCC	yCE
1	1	451	445	705	733	836	541	545	462	449	393
2	1	437	439	669	700	829	522	525	436	433	389
3	2	446	446	690	722	876	548	548	456	456	419
4	2	501	506	735	765	846	702	700	499	472	400
5	2	443	447	672	728	839	538	537	446	438	398
6	2	436	459	744	780	857	537	564	498	479	396
7	2	453	450	733	797	879	553	549	496	489	413
8	2	444	465	744	776	852	577	588	495	485	403
9	2	445	450	739	765	846	568	567	485	479	400

Coordinate (x,y)											
ID_Utente	classeUtente	xA	xAA	xAC	xCC	xCE	yA	yAA	yAC	yCC	yCE
10	2	446	446	697	741	859	536	535	466	467	398
11	2	506	485	738	758	860	675	681	492	485	404
12	1	460	467	721	771	850	602	601	489	476	405
13	2	430	439	678	720	845	530	529	454	444	395
14	1	515	531	752	784	861	715	702	501	488	406
15	1	517	501	730	768	854	688	712	494	475	406
16	2	436	438	678	728	880	528	534	443	444	412
17	2	441	445	674	713	858	542	535	448	444	406

Tabella 4.1: Coordinate (x,y) di ciascun utente

Come si può vedere, ad ogni utente sono associati 5 punti corrispondenti alle aree di passaggio codificate.

Riportando questa tabella in Excel si è ottenuta una serie di grafici suddivisi per classe, sia in base al tipo di utente, sia in funzione del flusso misurato in ped/h. Per avere una visione immediata delle traiettorie più utilizzate, essendo il piano deformato a causa dell'angolo di ripresa, si sono sovrapposti i grafici ad un fotogramma del passaggio pedonale.

Nelle figure seguenti (da *Figura 4.1* a *Figura 4.4*) sono riportate le traiettorie di pedoni e ciclisti per la classe di flusso più bassa (60-120 ped/h) e quella più alta (1200-1260 ped/h).

Risulta evidente che per flussi bassi le traiettorie dei pedoni coprono l'intero attraversamento, mentre, per flussi più elevati, i pedoni tendono a coprire le due fasce esterne delle strisce pedonali, a seconda della direzione da cui arrivano. Anche per i ciclisti, per flussi bassi, si ha una maggiore dispersione delle traiettorie, mentre, per flussi elevati, queste diventano più compatte e rettilinee.

Questo risultato sperimentale è in accordo con la teoria secondo la quale, per forti flussi pedonali, i pedoni tendono a camminare su file parallele [3].

Si vedrà nel paragrafo successivo che, per la stessa percentuale di occupazione, si possono avere flussi pedonali di diversa entità, e questo è dovuto all'abitudine dei pedoni di procedere su file parallele nei periodi di flusso più elevato, che da luogo ad aumenti meno che proporzionali della percentuale di occupazione.

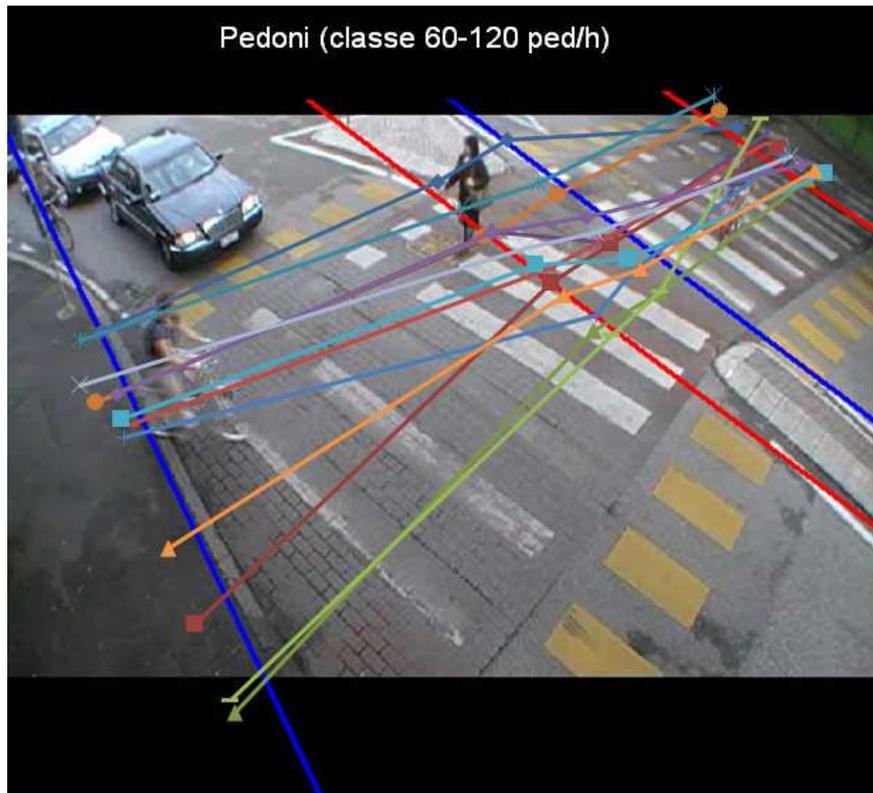


Figura 4.1 Traiettorie dei pedoni per la classe 60-120 ped/h

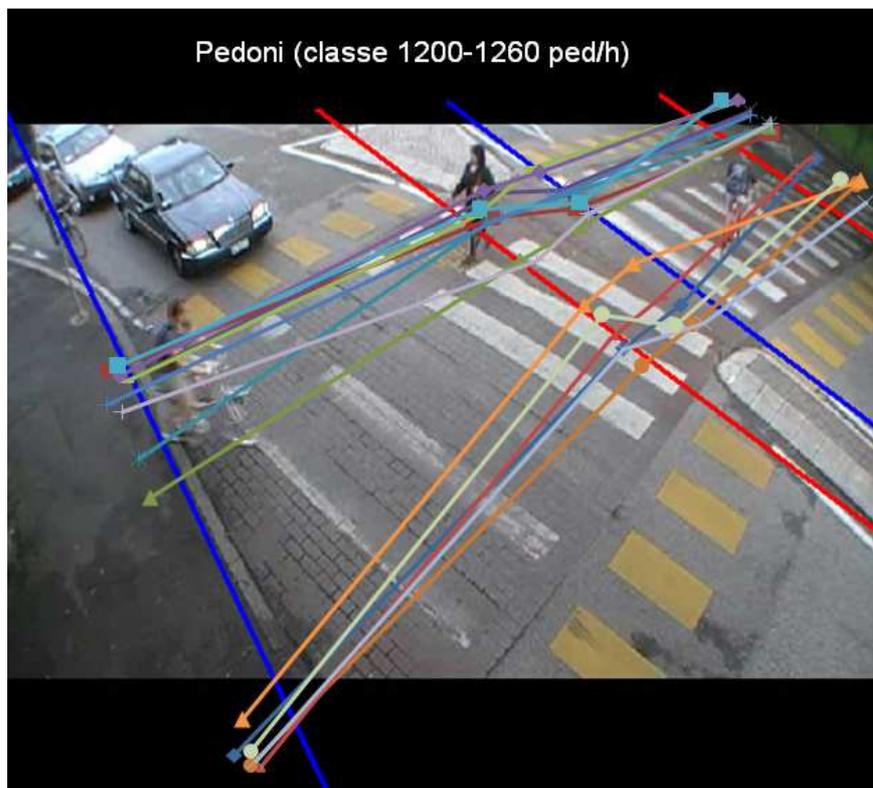


Figura 4.2 Traiettorie dei pedoni per la classe 1200-1260 ped/h

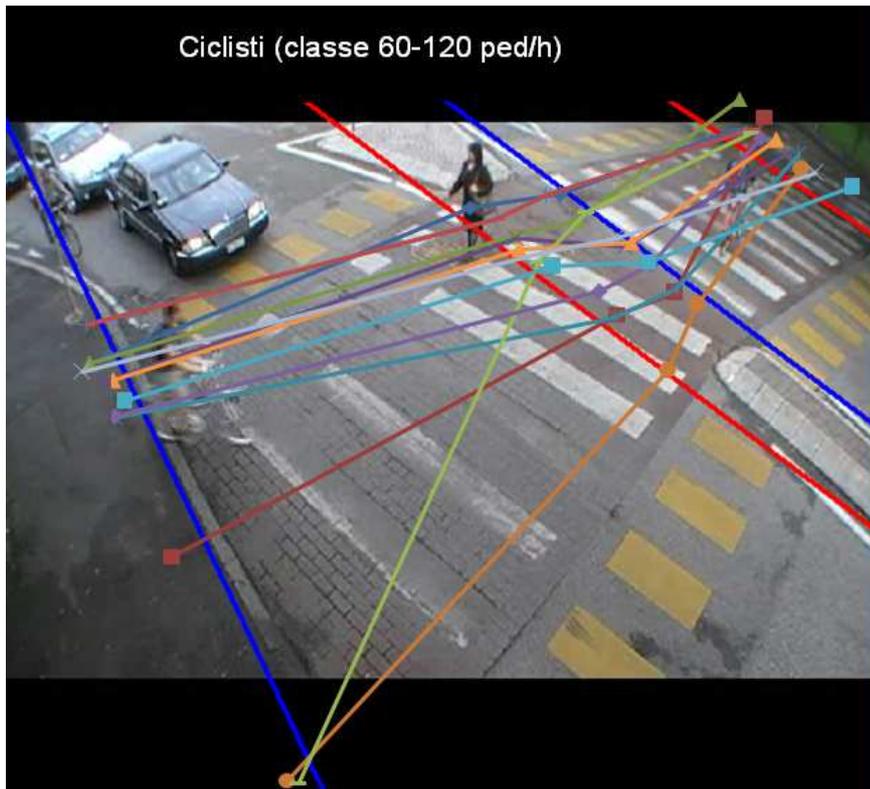


Figura 4.3 Traiettorie dei ciclisti per la classe 60-120 ped/h

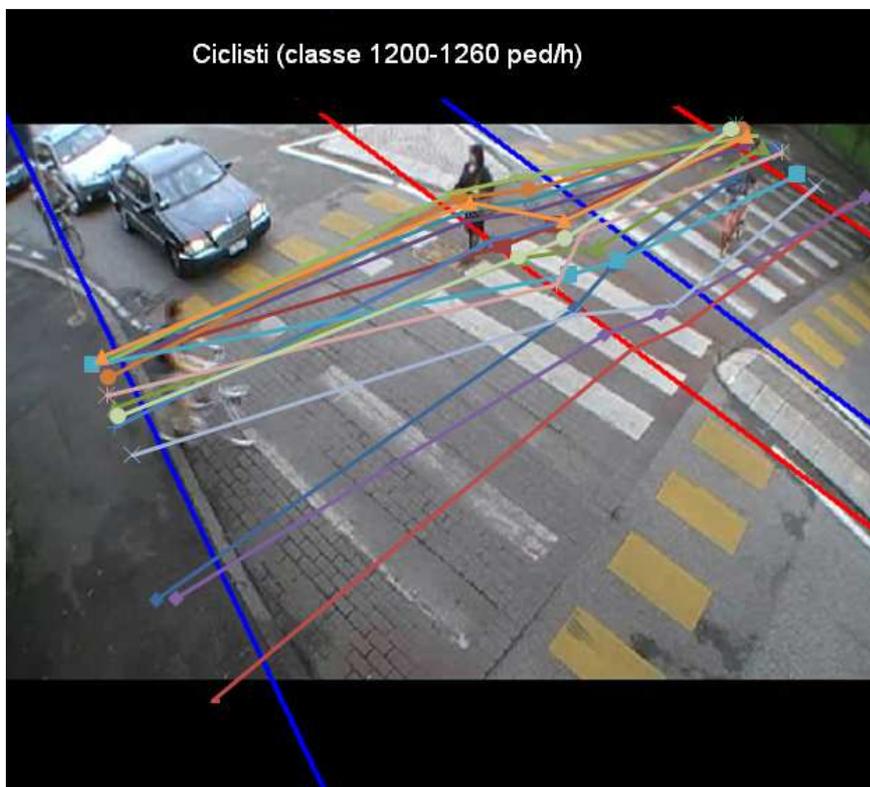
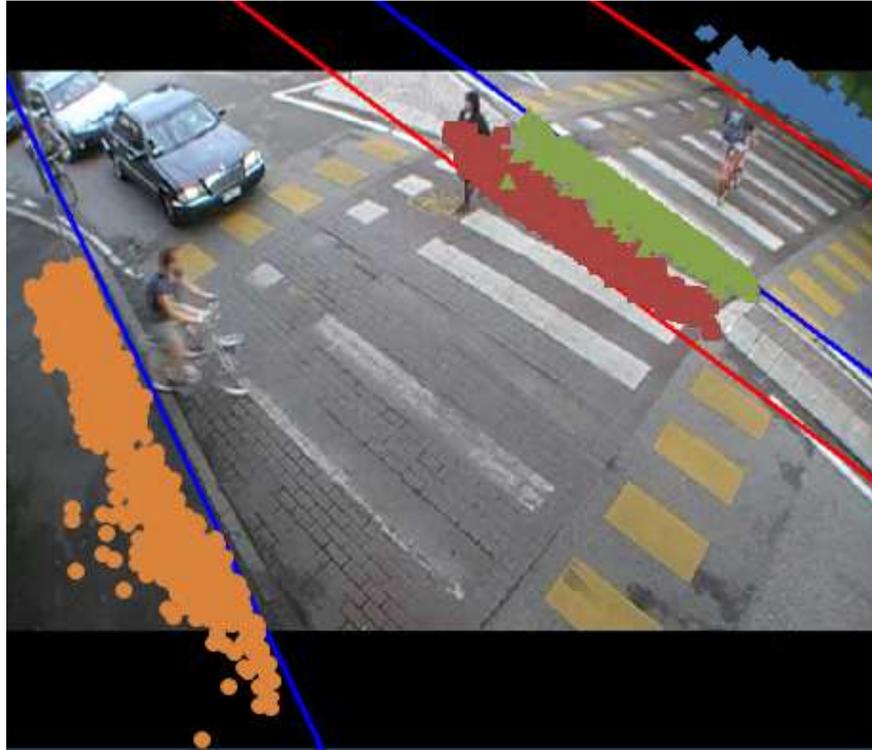


Figura 4.4 Traiettorie dei ciclisti per la classe 1200-1260 ped/h

In *Figura 4.5* è illustrata la distribuzione trasversale degli utenti nelle diverse aree del passaggio pedonale. Come si può vedere dalla nuvola di punti, entrambi i marciapiede e l'isola centrale sono ugualmente occupati, non ci sono zone più utilizzate di altre.



*Figura 4.5* Occupazione del passaggio pedonale

#### 4.1.2 CALCOLO DELLA PERCENTUALE DI OCCUPAZIONE DEL PASSAGGIO PEDONALE

Il calcolo della percentuale di occupazione è stato fatto solo nel tratto del passaggio pedonale che blocca il ramo d'ingresso della rotonda, visto che lo scopo della tesi è quello di calcolare la capacità in ingresso di quest'ultima.

Si è individuata inizialmente la successione dei periodi di blocco (B) e dei periodi liberi (L) per tutta la durata delle riprese. Dallo schema in *Figura 4.6* è evidente che la somma dei periodi di blocco e dei periodi liberi deve restituire il tempo totale di osservazione T secondo l'equazione:

$$\sum_{1}^{n} L_i + \sum_{1}^{k} B_j = T$$



Figura 4.6 Successione dei periodi di blocco e dei periodi liberi

I periodi di blocco sono stati poi suddivisi all'interno degli intervalli da 1 minuto grazie ad un programma in Visual Basic del Prof. Rossi. Il programma seleziona solamente i periodi di blocco il cui inizio e la cui fine cadono all'interno dell'intervallo considerato (si tratta di 955 periodi di blocco). Per differenza poi, con una query di Access, si trovano quegli intervalli il cui inizio sta in un intervallo temporale diverso dalla fine (si tratta di 73 periodi di blocco).

Questi 73 periodi di blocco sono stati poi suddivisi negli intervalli temporali interessati in base alla quota competente a ciascuno di essi, come evidenziato in *Tabella 4.2*.

La prima colonna contiene l'identificativo dell'intervallo temporale da 1 minuto, la seconda il frame di inizio del periodo di blocco e la terza il suo frame finale. Nella quarta colonna c'è l'identificativo del periodo di blocco e, nell'ultima, si legge la durata temporale del blocco.

Come si può vedere, uno stesso intervallo temporale può avere al suo interno una sequenza di periodi liberi e di blocco; per esempio l'intervallo temporale n° 138 ha al suo interno quattro diversi blocchi (5, 6, 7, 8), ed essendo che questo intervallo va dai 120.000 ai 180.000 millisecondi, la sua sequenza di periodi di blocco e periodi liberi sarà: L, B<sub>5</sub>, L, B<sub>7</sub>, L, B<sub>8</sub>, L, quindi inizia e finisce con un periodo libero.

Classifica periodi di blocco				
ID_intervallo_temporale	inizio	fine	ID_blocco	delta
138	132120	134692	5	2572
138	135721	139713	6	3992
138	140599	144466	7	3867
138	162306	164328	8	2022
139	183731	186139	9	2408
139	195717	197181	10	1464
139	198789	201858	11	3069

Classifica periodi di blocco				
ID_intervallo_temporale	inizio	fine	ID_blocco	delta
139	232112	234287	12	2175
140	243884	246933	13	3049
140	273380	276984	14	3604
140	276007	277626	15	1619
141	319007	323852	16	4845
141	349055	351623	17	2568
141	354590	356695	18	2105
142	367870	372331	19	4461
143	428996	434594	20	5598
143	445685	449181	21	3496
144	483727	485833	22	2106
144	531762	536498	23	4736
145	574535	578088	24	3553
145	599614	600000	25	386

Tabella 4.2 Intervalli di blocco classificati in intervalli temporali da 1 minuto

I periodi di blocco in totale sono 1028, e suddivisi all'interno degli intervalli da 1 minuto, permettono di calcolare la percentuale di occupazione di ciascuno di questi intervalli.

All'inizio di questo lavoro ci si proponeva di calcolare la capacità della rotatoria in assenza di pedoni sull'attraversamento, ma dopo questa elaborazione, si è visto che non è possibile perché tutti gli intervalli presentano, anche se in piccola parte, la presenza di pedoni. Esistono infatti solo due intervalli con una percentuale di occupazione inferiore al 10% su un totale di 252 intervalli (4 ore e 12 minuti di riprese).

In Tabella 4.3 si può vedere un esempio dell'output di Access. La prima colonna contiene l'identificativo dell'intervallo temporale, la seconda la durata del tempo di blocco in millisecondi e la terza la percentuale di occupazione calcolata con l'equazione:

$$\%OCC = \text{TotaleBlocco} / 60000$$

%Occupazione_min1		
ID_intervallo_temporale	TotaleBlocco	PercOccupazione
138	12453	0.20755
139	9116	0.1519333333333333
140	8272	0.1378666666666667
141	9518	0.1586333333333333
142	4461	0.07435
143	9094	0.1515666666666667
144	6842	0.1140333333333333
145	3939	0.06565
146	8619	0.14365
147	12461	0.2076833333333333
148	9756	0.1626
149	17947	0.2991166666666667
151	22431	0.37385
152	9480	0.158
153	4650	0.0775
154	13452	0.2242
155	12174	0.2029
156	13882	0.2313666666666667
157	4397	7.328333333333333E-02

Tabella 4.3 Percentuale di occupazione su base 1 minuto

A questo punto si è cercato di determinare una relazione tra flusso pedonale orario e percentuale di occupazione.

Innanzitutto si è provveduto ad estrarre un campione di dati casuale pari al 70% per la calibrazione su un totale di 252 intervalli di osservazione a disposizione.

Tramite il software statistico SPSS si sono studiate le curve che meglio si adattano a rappresentare i dati rilevati. Tramite la funzione Curve Fit si è visto che la curva migliore per l'interpolazione dei dati è di forma cubica.

L'intervallo di confidenza per la stima dei parametri è al 95% e porta ad un test di verifica d'ipotesi di significatività pari al 5% ( $\alpha=0.05$ ).

Considerando un livello di significatività  $\alpha=0.05$  (valore di default in SPSS), i valori limite della statistica F e t sono [18]:

- F=3.84
- t=1.96

Se i valori determinati dal software sono sempre maggiori, in valore assoluto, dei valori limite, allora si dovrà rifiutare l'ipotesi nulla, cioè che i coefficienti della relazione siano uguali a zero.

Altro parametro che permette di verificare se si rifiuta erroneamente l'ipotesi nulla è il P-value, ossia il livello di significatività.

Affinché una regressione sia statisticamente significativa, essendo  $\alpha=0.05$ , il P-value deve essere minore di 0.05.

Qui di seguito sono riportati gli output di SPSS per le seguenti forme: lineare, quadratica, cubica e potenza calcolata tramite regressione non lineare.

**Linear**

**Model Summary<sup>a</sup>**

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
,966	,933	,932	,079

The independent variable is Flusso\_ped\_orario.

a. The equation was estimated without the constant term.

**ANOVA<sup>a</sup>**

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	21,947	1	21,947	3481,332	,000
Residual	1,582	251	,006		
Total	23,530	252			

The independent variable is Flusso\_ped\_orario.

a. The equation was estimated without the constant term.

**Coefficients**

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Flusso_ped_orario	,000591	,000	,966	59,003	,000

La retta di regressione mostra un buon coefficiente di determinazione pari a 0.933 ed una statistica F molto superiore al valore limite, così come la statistica t.

Non sussiste quindi il pericolo di accettare l'ipotesi nulla. Anche i livelli di significatività sono ottimi, sia per la regressione, sia per la pendenza della retta.

L'equazione della retta di regressione ottenuta è:

$$\%OCC = 0.000591f_{ped}$$

**Quadratic**

**Model Summary<sup>a</sup>**

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
,976	,953	,952	,067

The independent variable is Flusso\_ped\_orario.

a. The equation was estimated without the constant term.

**ANOVA<sup>a</sup>**

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	22,416	2	11,208	2516,604	,000
Residual	1,113	250	,004		
Total	23,530	252			

The independent variable is Flusso\_ped\_orario.

a. The equation was estimated without the constant term.

**Coefficients**

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Flusso_ped_orario	,000821	,000	1,341	34,311	,000
Flusso_ped_orario <sup>**</sup> 2	-3,464E-007	,000	-,401	-10,261	,000

La forma quadratica mostra un R<sup>2</sup>=0.953, migliore rispetto alla forma lineare probabilmente perché riesce ad interpolare meglio i dati per flussi pedonali intorno ai 1000 ped/h.

Anche in questo caso, la statistica F dell'analisi Anova e la statistica t relativa ai coefficienti, mostrano valori assoluti maggiori dei valori limite.

Il livello di significatività della regressione e dei coefficienti è ottimo.

L'equazione ottenuta è:

$$\%OCC = 0.000821f_{ped} - 3.464 * 10^{-7}f_{ped}^2$$

**Cubic**

**Model Summary<sup>a</sup>**

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
,977	,954	,953	,066

The independent variable is Flusso\_ped\_orario.

a. The equation was estimated without the constant term.

**ANOVA<sup>a</sup>**

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	22,448	3	7,483	1723,041	,000
Residual	1,081	249	,004		
Total	23,530	252			

The independent variable is Flusso\_ped\_orario.

a. The equation was estimated without the constant term.

**Coefficients**

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Flusso_ped_orario	,000953	,000	1,557	17,654	,000
Flusso_ped_orario ** 2	-7,722E-007	,000	-,894	-4,820	,000
Flusso_ped_orario ** 3	3,000E-010	,000	,304	.	.

La forma cubica mostra un R<sup>2</sup>=0.954, di poco migliore rispetto alla forma quadratica.

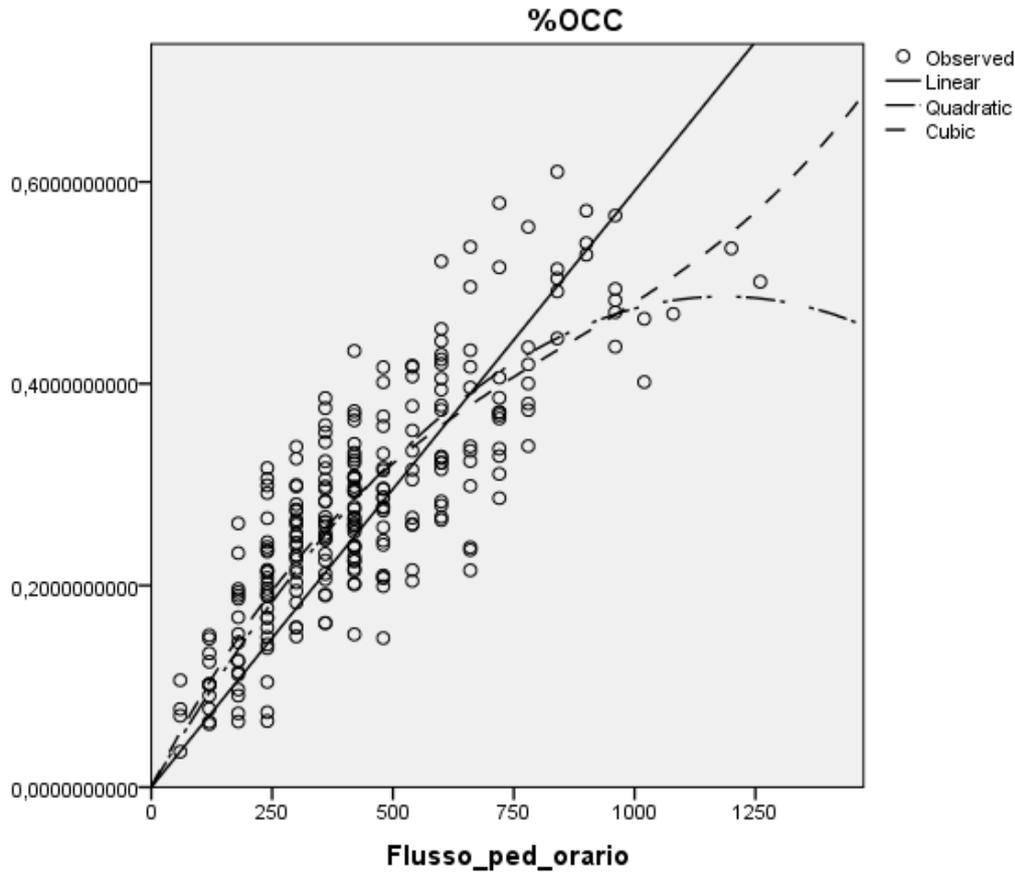
Anche in questo caso, la statistica F dell'analisi Anova e la statistica t relativa ai coefficienti, mostrano valori assoluti maggiori dei valori limite.

Il livello di significatività della regressione e dei coefficienti è inferiore ad α.

L'equazione ottenuta è:

$$\%OCC = 0.000953f_{ped} - 7.722 * 10^{-7}f_{ped}^2 + 3 * 10^{-10}f_{ped}^3$$

In *Figura 4.7* è riportato il grafico di output di SPSS.



*Figura 4.7* Confronto tra le curve di interpolazione dati

Per la rappresentazione della relazione tra flusso pedonale e percentuale di occupazione di questa intersezione, era stata proposta in precedenza una curva con equazione [3]:

$$\%OCC = 0.0052f_{ped}^{0.699}$$

ottenendo un  $R^2=0.7039$

Tramite regressione non lineare si è provato a tarare questa curva sui dati raccolti per questo lavoro, ottenendo il seguente output:

**Nonlinear Regression Analysis**

**Parameter Estimates**

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
A	,005561	,001	,003	,008
B	,649166	,030	,589	,709

**Correlations of Parameter Estimates**

	A	B
A	1,000	-,997
B	-,997	1,000

**ANOVA<sup>a</sup>**

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	22,464	2	11,232
Residual	1,066	250	,004
Uncorrected Total	23,530	252	
Corrected Total	3,364	251	

Dependent variable: %OCC

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = ,683.

Dall'analisi non lineare emerge che questa forma funzionale si adatta abbastanza bene ai dati, ma non tanto quanto le curve precedentemente trattate. Ha infatti un R<sup>2</sup> inferiore pari a 0.683.

I due coefficienti risultano inversamente correlati, con un grado di correlazione forte che comporta una difficoltà nello scindere gli effetti causati dalle due variabili se utilizzate entrambe in un modello di regressione.

Nel grafico in *Figura 4.8* sono rappresentate contemporaneamente tutte le curve di regressione analizzate per poterle confrontare anche visivamente.

La retta, nonostante abbia un coefficiente di determinazione elevato, per flussi pedonali bassi (<400 ped/h), sottostima la percentuale di occupazione, mentre per flussi alti (>800 ped/h), tende a sovrastimarla.

La forma cubica e la quadratica rappresentano bene la relazione per flussi medio-bassi, ma la cubica presenta un cambio di concavità che non descrive il fenomeno reale; quindi la curva che meglio segue l'andamento dei punti sperimentali è la potenza.

Si ha quindi la conferma che i pedoni, per volumi elevati, tendono a procedere su file parallele, inducendo un aumento meno che proporzionale della percentuale di occupazione.

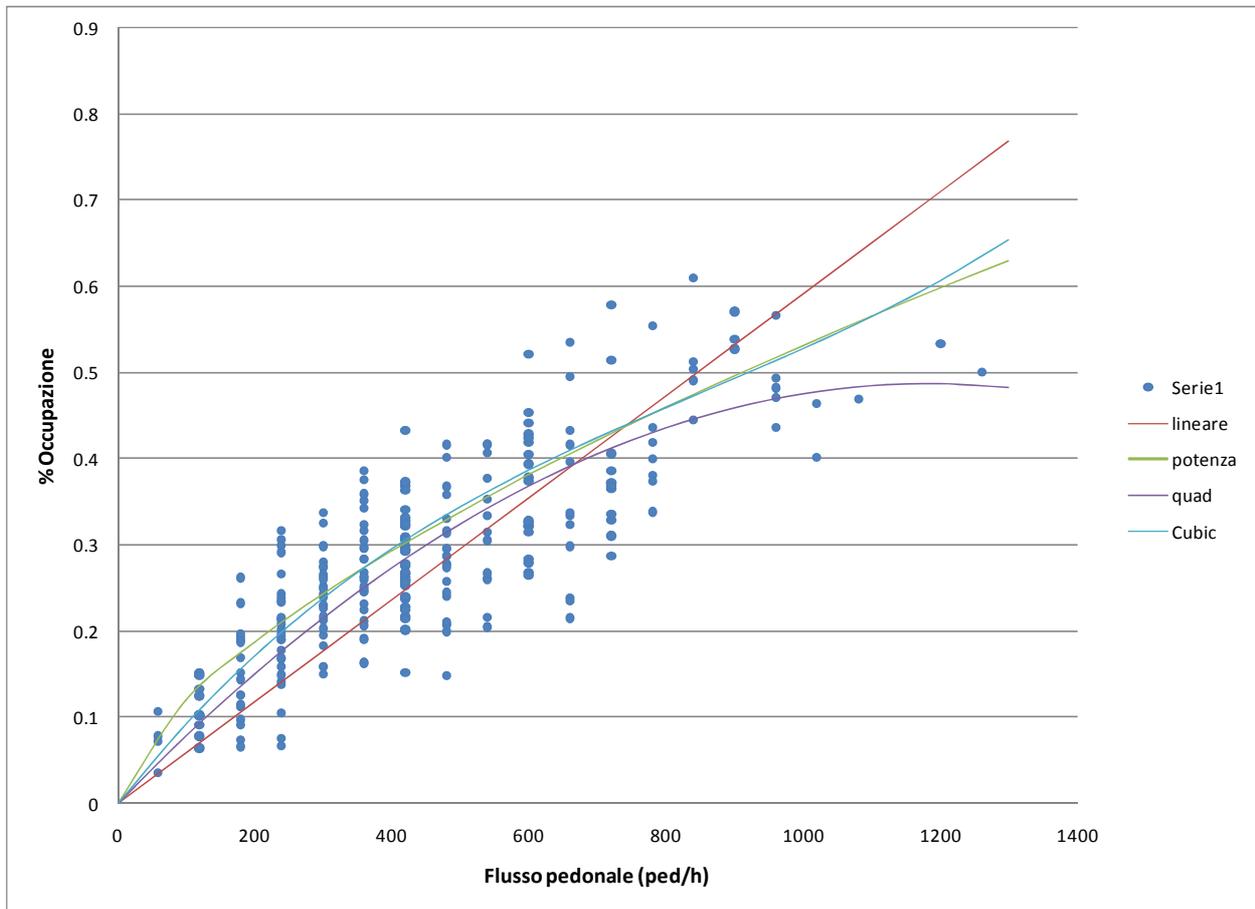


Figura 4.8 Rappresentazione grafica delle curve di regressione

#### 4.2 ELABORAZIONE DEI DATI RELATIVI AGLI ACCODAMENTI VEICOLARI SUL RAMO IN INGRESSO

I dati relativi all'accodamento dei veicoli sono stati trattati con Access, che ha permesso di suddividere i periodi di saturazione all'interno degli intervalli da 1 minuto.

Si definiscono intervalli di saturazione quei periodi temporali in cui c'è almeno un veicolo accodato dietro a quello in attesa di immettersi nella rotatoria.

Nelle 4 ore e 12 minuti di registrazione sono stati individuati 74 intervalli di saturazione, per una durata totale di circa 3 ore in cui c'era la presenza di veicoli accodati in prossimità dell'approccio.

Una volta codificati gli intervalli di saturazione sono stati suddivisi all'interno degli intervalli temporali di riferimento; il ragionamento adottato per la costruzione delle query è di tipo grafico ed è illustrato in Figura 4.9.

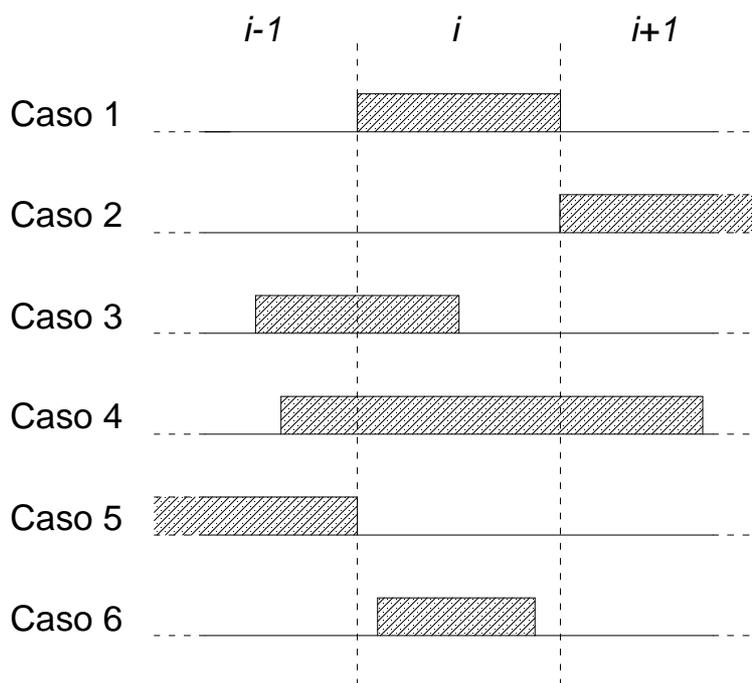


Figura 4.9 Casi individuati per gli intervalli di saturazione

Con riferimento al generico intervallo  $i$  di 1 minuto si sono identificati sei possibili casi:

- Caso 1: l'intervallo di saturazione inizia e finisce esattamente negli istanti di inizio e di fine dell'intervallo temporale  $i$  ed ha quindi durata pari a 60 secondi.
- Caso 2: l'intervallo di saturazione inizia nell'istante in cui finisce l'intervallo temporale  $i$  e termina nell'intervallo  $i+1$ .
- Caso 3: l'intervallo di saturazione inizia durante l'intervallo  $i-1$  e termina nell'intervallo  $i$  ed ha durata inferiore al minuto.
- Caso 4: l'intervallo di saturazione inizia durante l'intervallo  $i-1$  e termina nell'intervallo  $i+1$  ed ha durata superiore al minuto.
- Caso 5: l'intervallo di saturazione inizia durante l'intervallo  $i-1$  e termina con l'inizio dell'intervallo  $i$ .
- Caso 6: l'intervallo di saturazione inizia e termina nell'intervallo  $i$  ed ha quindi durata inferiore al minuto.

L'elaborazione con Access ha mostrato che nessun intervallo di saturazione appartiene ai casi 1, 2 e 5, mentre si hanno 21 intervalli che appartengono al terzo caso e 14 al sesto. Quindi in tutto ci sono 35 intervalli di saturazione con durata inferiore al minuto.

I restanti 39 periodi hanno durata superiore al minuto e devono essere suddivisi all'interno degli intervalli temporali per la quota che compete a ciascuno di questi.

La percentuale di saturazione di ciascun intervallo temporale si calcola, analogamente a quanto accade per l'occupazione pedonale, con l'equazione:

$$\%Saturazione = Durata\ coda / 60000$$

Un esempio dell'output ottenuto è in *Tabella 4.4* dove ID è l'identificativo dell'intervallo temporale da 1 minuto e la seconda colonna è la sua percentuale di saturazione.

%SATURAZIONE	
ID	perc_SAT
138	0
139	0
140	0,94315
141	1,78333333333333E-03
141	0,175116666666667
142	0,220483333333333
142	0,3558
143	0,339583333333333
143	0,536233333333333
144	0,175416666666667
144	0,673166666666667
145	1
146	0,717233333333333
147	0
148	0
149	0,77255
150	0,157783333333333
150	0,80405

*Tabella 4.4* Percentuale di saturazione per ogni intervallo temporale di 1 minuto

Il grafico che rappresenta le percentuali di saturazione (*Figura 4.10*) mostra la presenza di molti intervalli con valore pari al 100% nell'arco dell'intera mattinata. Si distinguono in particolare quattro periodi di durata considerevole tra le 8 e le 10 circa.

Il più lungo inizia alle 7 e 50 minuti e dura fino alle 8 e 36 minuti, quindi si hanno ben 46 minuti consecutivi in cui ci sono almeno due veicoli accodati in attesa di immettersi nel flusso circolante in rotatoria.

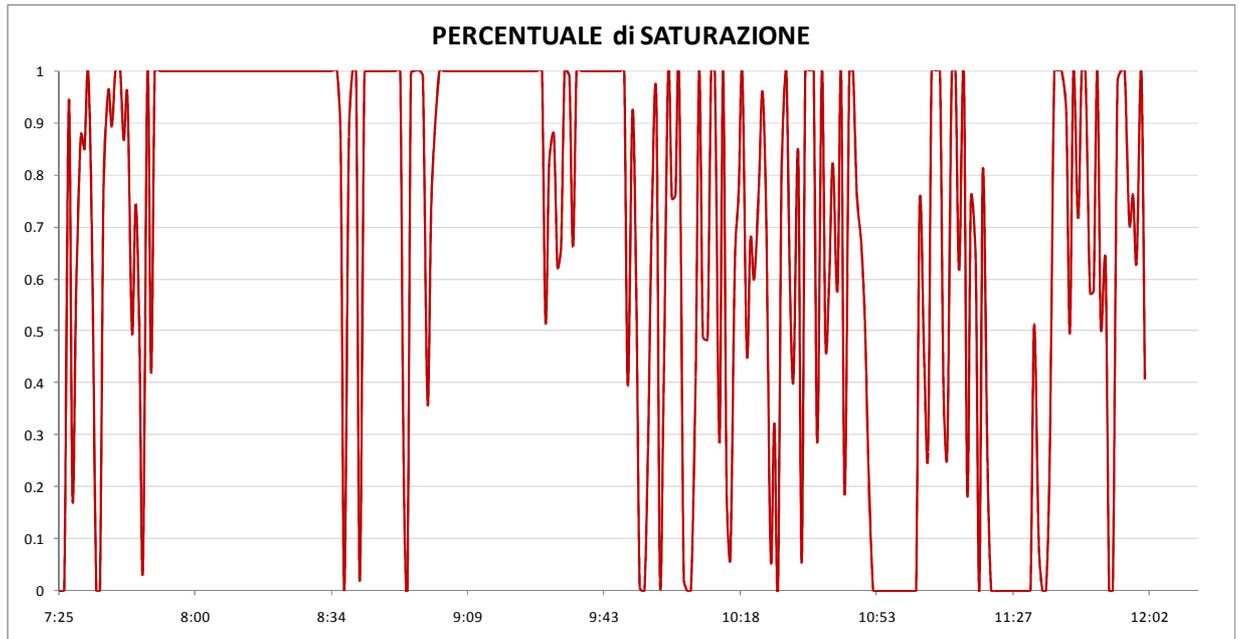


Figura 4.10 Andamento dei periodi di saturazione

Più avanti in questo capitolo andremo a confrontare questo andamento con quello del flusso circolante (Figura 4.12) per vedere se l'accodamento è dovuto all'aumento del flusso all'anello che rende difficile l'inserimento dei veicoli nella corrente principale, oppure se è causato anche da un aumento del volume pedonale e quindi della percentuale di occupazione (Figura 4.13).

### 4.3 ELABORAZIONE DEI FLUSSI VEICOLARI

La prima elaborazione fatta sui flussi veicolari, classificati in 3 categorie (vedi Tabella 3.4), è stata la determinazione dei flussi equivalenti calcolati per ogni intervallo di riferimento con l'equazione:

$$N_i = 0.5 * N_{i,moto} + N_{i,leggeri} + 2 * N_{i,pesanti}$$

dove:

- $N$  è il numero di veicoli equivalenti conteggiati (veh)
- $N$  indica il numero di motoveicoli, veicoli leggeri o pesanti conteggiati in quell'intervallo
- $i$  indica il flusso entrante, circolante o uscente.

Successivamente si è determinato il flusso equivalente orario con l'equazione:

$$Q_i = N_i * \frac{1}{\Delta}$$

dove:

- $Q_i$  è il flusso equivalente orario (veh/h)
- $\Delta$  è la durata dell'intervallo temporale (h)

Un esempio della tabella di Access che si ottiene è il seguente:

Flussi_eq_orari			
INT_TEMP	Qc	Qe	Qu
136	900	780	1020
137	900	540	1080
138	1260	720	1020
139	1200	1020	1080
140	1020	1380	960
141	1020	900	660
142	1560	720	1080
143	1620	1020	600
144	1200	1320	900
145	1200	900	1080
146	1080	1200	1080

Tabella 4.5 Flussi equivalenti orari

In *Figura 4.11* vengono riportati nello stesso grafico gli andamenti dei flussi circolante ed uscente.

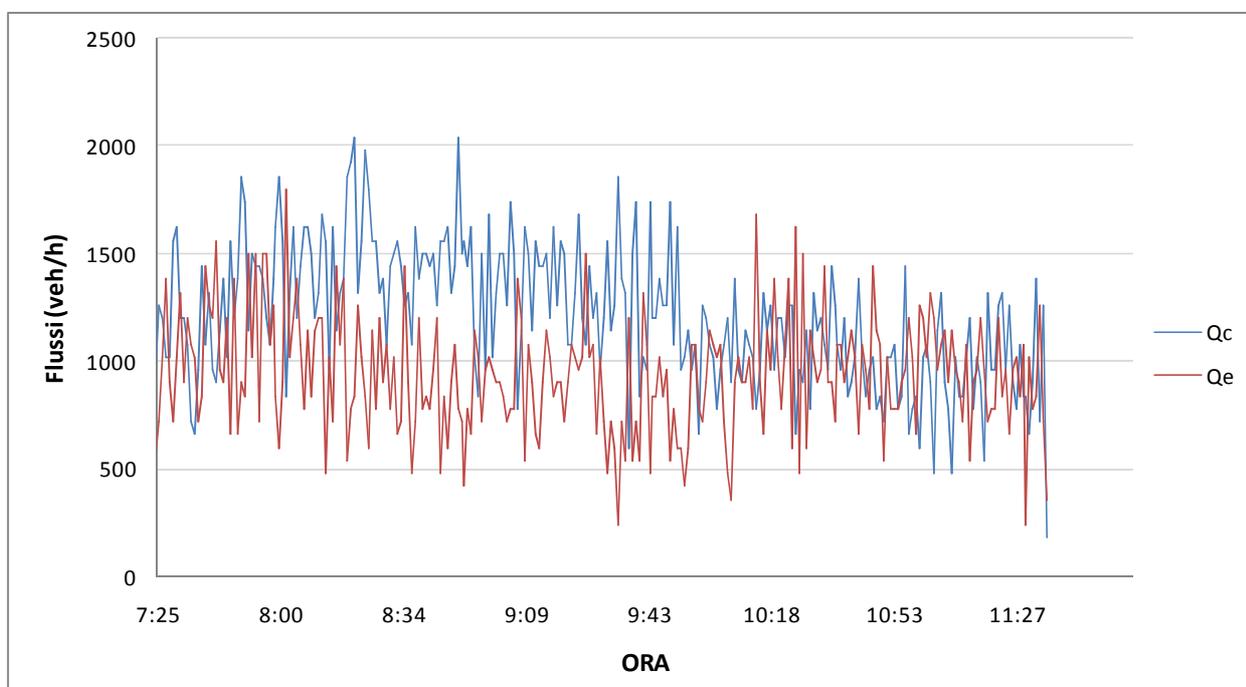


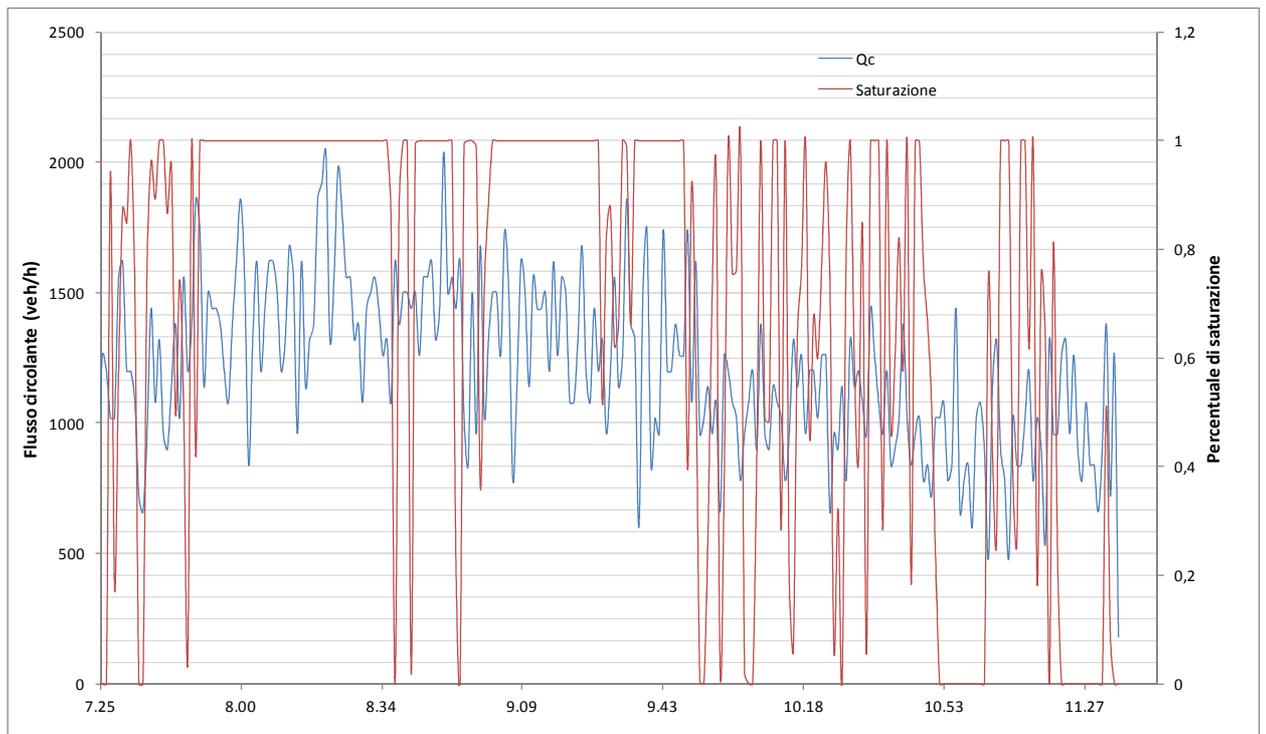
Figura 4.11 Andamento dei flussi circolante ed uscente

Il flusso circolante raggiunge i tre picchi massimi di circa 2000 veh/h tra le 8.15 e le 8.45, mentre, nel resto del periodo di osservazione, i valori arrivano al massimo a 1800 veh/h circa.

Nella prima parte della mattinata si nota un flusso circolante abbastanza elevato, con valori che si aggirano all'incirca tra i 1000 veh/h e i 2000 veh/h. A partire dalle 10.00 circa, si riscontrano dei valori che in media si aggirano attorno ai 1000 veh/h.

Confrontando il flusso entrante con quello circolante, osserviamo che, come ci si aspetta intuitivamente, in corrispondenza dei punti di massimo di  $Q_c$  si hanno i punti di minimo di  $Q_e$ . Solo a partire dalle 10.00 i valori del flusso entrante superano in alcuni intervalli quelli del flusso circolante.

In *Figura 4.12* sono rappresentati nello stesso grafico il flusso circolante e la percentuale di saturazione dell'ingresso in rotatoria.



*Figura 4.12* Andamento del flusso circolante e della percentuale di saturazione

In corrispondenza dei valori di flusso circolante più elevati vediamo che la saturazione è del 100%. Notiamo però anche dei periodi di saturazione in cui il flusso circolante è basso; in questi intervalli, probabilmente, la saturazione è causata dall'occupazione del passaggio pedonale.

Diventa utile quindi aggiungere la percentuale di occupazione pedonale al grafico per avere la conferma di questa ipotesi (*Figura 4.13*).

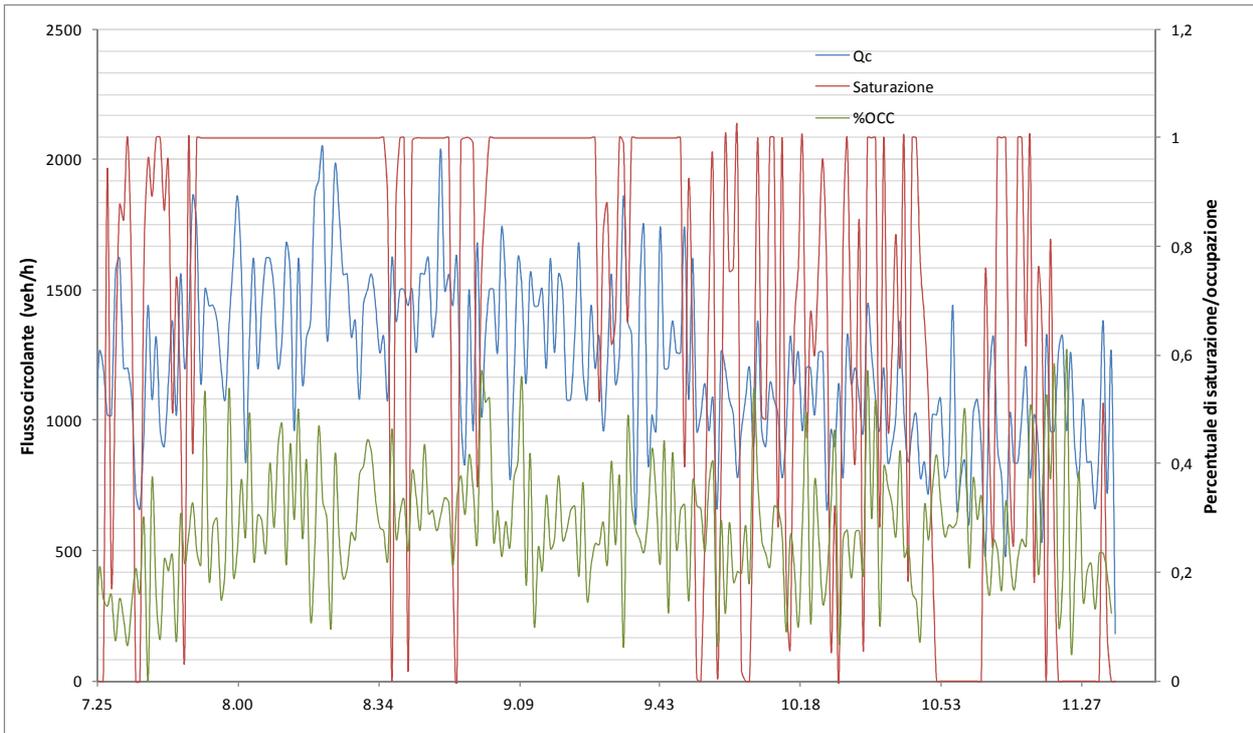


Figura 4.13 Andamento del flusso circolante, della percentuale di saturazione e di occupazione pedonale

La percentuale di occupazione pedonale varia dallo 0 al 61%, mostra parecchi picchi, ma ha un andamento del valore medio pressoché costante in tutto l’arco della mattinata. Non si notano, come avviene per il  $Q_c$ , degli abbassamenti dei valori massimi, e quindi della media.

Sembra ragionevole presumere che la saturazione sia dovuta alla combinazione dei due effetti, con pesi diversi a seconda dell’intervallo temporale di riferimento.

#### 4.4 AGGREGAZIONE DEI DATI

Una volta ottenuti tutti i dati relativi al traffico veicolare e pedonale, si è provveduto ad unirli in un’unica tabella che consente di fare un’analisi completa.

Qui di seguito viene inserito un piccolo esempio della tabella dati.

Tb1_DATI_COMPLETI						
ID	%OCC	Flusso_ped_orario	PERC_SAT	Qc	Qe	Qu
136	0,1680833333333333	240		0	900	780
137	3,518333333333333E-02	60		0	900	540
138	0,20755	480		0	1260	720
139	0,1519333333333333	180		0	1200	1020
140	0,1378666666666667	240	0,94315	1020	1380	960
141	0,1586333333333333	300	0,1769	1020	900	660

TbI_DATI_COMPLETI						
ID	%OCC	Flusso_ped_orario	PERC_SAT	Qc	Qe	Qu
142	0,07435	240	0,5762833333333333	1560	720	1080
143	0,1515666666666667	420	0,8758166666666667	1620	1020	600
144	0,1140333333333333	180	0,8485833333333333	1200	1320	900
145	0,06565	240	1	1200	900	1080
146	0,14365	180	0,7172333333333333	1080	1200	1080
147	0,2076833333333333	240	0	720	1080	1260

Tabella 4.6 Esempio della tabella dati completa

Ad ogni identificativo dell'intervallo temporale corrispondono sei valori diversi, che nell'ordine rappresentano:

1. la percentuale di occupazione dell'attraversamento pedonale, cioè il tempo in cui il passaggio risulta occupato in rapporto alla durata dell'intervallo;
2. il flusso pedonale orario (misurato in ped/h);
3. la percentuale di saturazione dell'intervallo, cioè la durata totale della coda rapportata alla durata dell'intervallo;
4. il flusso circolante;
5. il flusso entrante;
6. il flusso uscente.

#### 4.5 CALCOLO DELLE CAPACITÀ DELLA ROTATORIA

Per il calcolo della capacità della rotatoria si sono scelti solo quegli intervalli con saturazione pari al 100%. Gli intervalli utili si sono ridotti a 113 da un totale di 252.

Innanzitutto si è valutata la relazione esistente tra il flusso circolante ed il flusso entrante rilevati (Figura 4.14) per saturazione pari al 100% e per qualsiasi percentuale di occupazione.

Si vede che la relazione lineare ha un coefficiente di determinazione  $R^2$  pari a 0.5129, un valore non molto elevato che dimostra la scarsa correlazione tra variabile dipendente  $Q_e$  e la variabile indipendente  $Q_c$ .

Il fatto di non considerare nel modello di regressione altre variabili indipendenti quali flusso veicolare uscente, flusso pedonale o percentuale di occupazione, fornisce un modello incompleto che non è in grado di spiegare adeguatamente la variabilità della capacità in entrata.

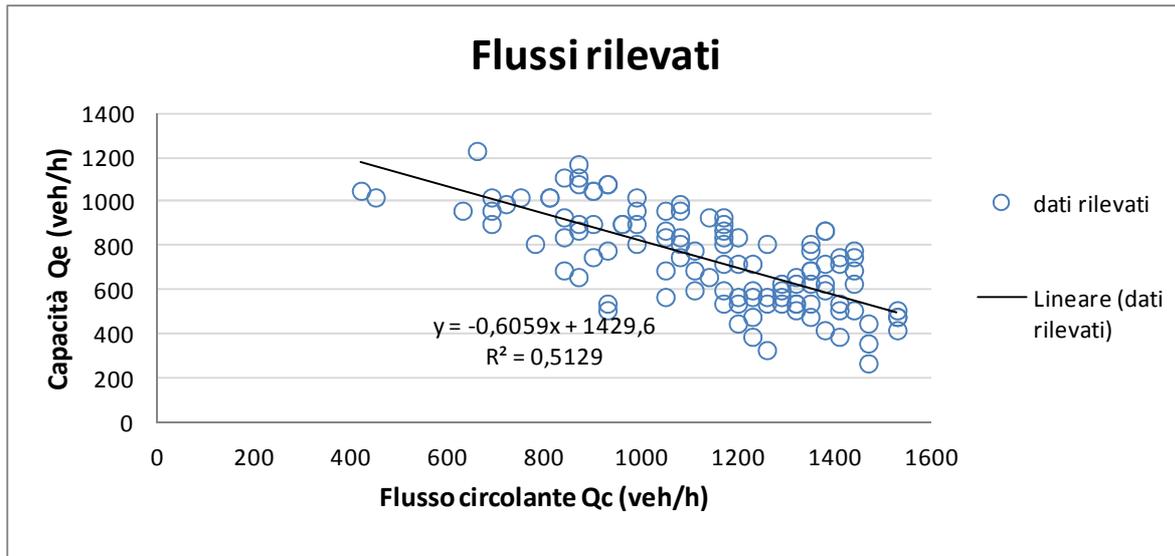


Figura 4.14 Grafico rappresentante le coppie (Q<sub>c</sub>, Q<sub>e</sub>) rilevate e relativa retta di regressione

L'intercetta con l'asse delle ordinate fornisce un valore di capacità in entrata di 1430 veh/h per Q<sub>c</sub>=0, mentre quella con l'asse delle ascisse fornisce un valore massimo di Q<sub>c</sub>=2360 veh/h.

L'output di SPSS per questa regressione viene riportato di seguito e fornisce altre informazioni oltre all'equazione della retta e a R<sup>2</sup>.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,716 <sup>a</sup>	,513	,508	148,325

a. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2571248,658	1	2571248,658	116,873	,000 <sup>b</sup>
	Residual	2442038,068	111	22000,343		
	Total	5013286,726	112			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	1429,618	64,946		22,012	,000	1300,923	1558,313
Qc_Eq	-,606	,056	-,716	-10,811	,000	-,717	-,495

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

L'analisi ANOVA indica una statistica F molto elevata con relativo livello di significatività inferiore ad  $\alpha=0.05$ , con conseguente rifiuto dell'ipotesi nulla.

Anche per i coefficienti la significatività è elevata e i limiti superiore ed inferiore dell'intervallo di confidenza sono abbastanza vicini.

Si è provato poi a vedere se l'aggiunta di una variabile indipendente potesse migliorare la capacità predittiva del modello.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qu_Eq, Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,736 <sup>a</sup>	,542	,534	144,498

a. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2716536,259	2	1358268,130	65,053	,000 <sup>b</sup>
	Residual	2296750,466	110	20879,550		
	Total	5013286,726	112			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardize	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	d Coefficients Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1199,404	107,794		11,127	,000	985,782	1413,027
	Qc_Eq	-,550	,059	-,650	-9,401	,000	-,666	-,434
	Qu_Eq	,202	,077	,182	2,638	,010	,050	,354

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Aggiungendo come variabile indipendente il flusso uscente, si ha un piccolo miglioramento del coefficiente di determinazione, ma anche questo modello spiega solo poco più di metà (il 54%) della variabilità della capacità in ingresso.

Utilizzando il metodo di Bovy per il calcolo del flusso di disturbo  $Q_d$ , funzione del flusso circolante e del flusso uscente, si può costruire il grafico di  $Q_e$  in funzione di  $Q_d$  (*Figura 4.15*).

$Q_d$  è calcolato con la formula:

$$Q_d = \alpha Q_u + \beta Q_c$$

dove i coefficienti, sulla base delle opportune considerazioni geometriche [16], valgono:

- $\alpha = 0.35$
- $\beta = 0.6$

Dal grafico si vede che, usando il modello di Bovy per calcolare il flusso di disturbo, si sovrastima (rispetto al caso in cui si considera il solo  $Q_c$ ) la capacità in entrata per  $Q_d=0$  e diminuisce  $R^2$  anche se si considerano due variabili indipendenti:  $Q_c$  e  $Q_u$ .

La spiegazione di questo risultato può essere il fatto che i parametri moltiplicativi dei due flussi sono vincolati a rispettare i limiti proposti da Bovy.

Il modello così costruito spiega solo il 32% della variabilità della capacità in ingresso.

Dall'output SPSS si vede che tutti i parametri della regressione sono significativi pur non essendo il modello in grado di produrre risultati soddisfacenti.

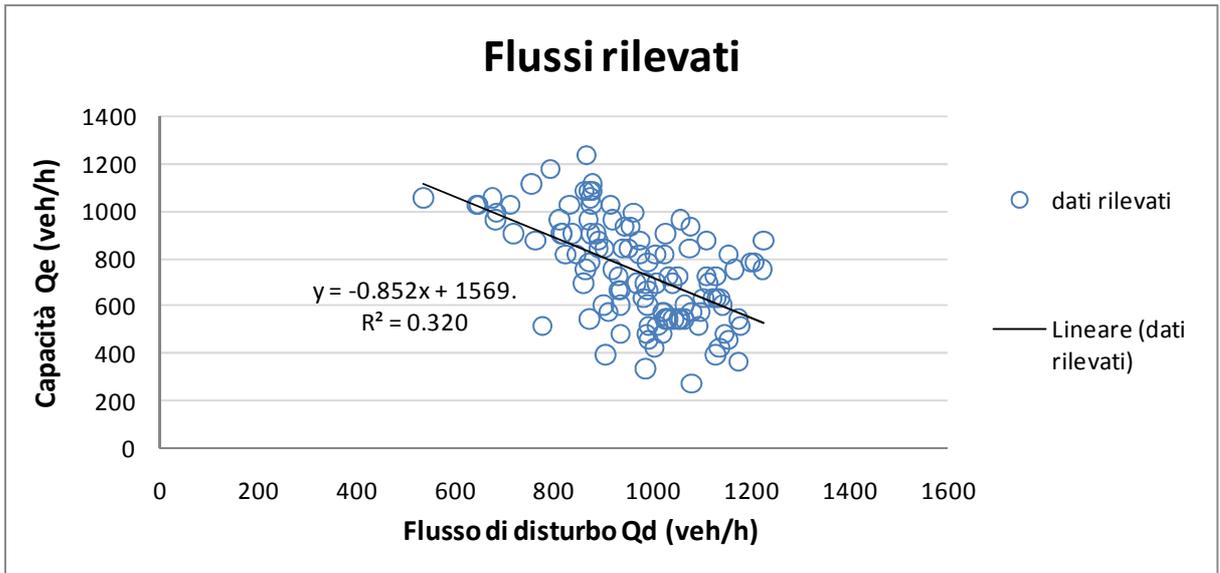


Figura 4.15 Grafico rappresentante le coppie  $Q_d$  calcolate secondo Bovy e  $Q_e$  osservati

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qd_Bovy <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,566 <sup>a</sup>	,320	,314	175,187

a. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1606623,977	1	1606623,977	52,349	,000 <sup>b</sup>
	Residual	3406662,749	111	30690,655		
	Total	5013286,726	112			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**Coefficients<sup>a</sup>**

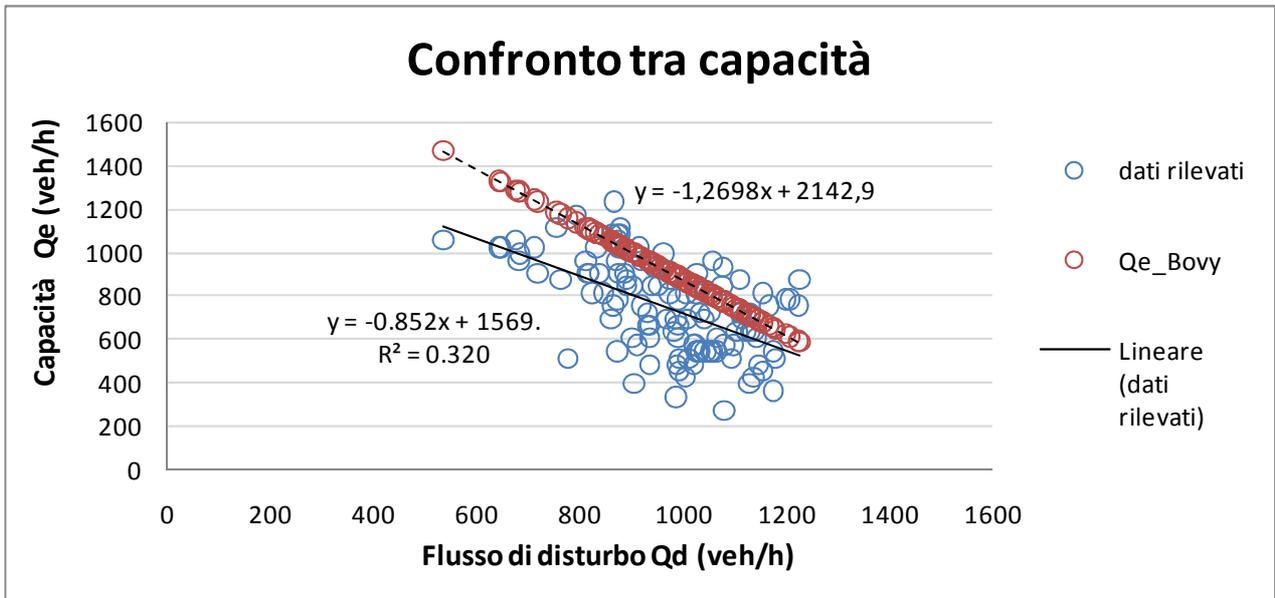
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error				Beta	Lower Bound
1 (Constant)	1569,494	115,292		13,613	,000	1341,036	1797,953
Qd_Bovy	-,852	,118	-,566	-7,235	,000	-1,085	-,619

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Se si confrontano questi dati con la capacità in entrata calcolata con Bovy:

$$C_e = \frac{1}{\gamma} \left( 1500 - \frac{8}{9} (\alpha Q_u + \beta Q_c) \right)$$

dove  $\gamma = 0.7$  si ottiene il grafico in *Figura 4.13*



*Figura 4.16* Confronto tra capacità rilevata e capacità calcolata con Bovy

Dal confronto tra capacità rilevata e capacità calcolata in funzione del flusso di disturbo, si osserva che nel caso di capacità calcolata con Bovy, si ha un notevole aumento sia della capacità a flusso di disturbo nullo, sia del coefficiente angolare della retta.

Tali differenze sono dovute alla presenza dell'attraversamento pedonale; infatti Bovy, non tenendo conto del volume pedonale, sovrastima sia la capacità a flusso di disturbo nullo, sia l'effetto di riduzione della capacità dovuto al flusso veicolare in rotatoria.

Altra osservazione che emerge dal confronto è che per flussi di disturbo crescenti, il modello di Bovy si avvicina sempre di più ai valori di capacità rilevati in sito; questo succede perché per flussi di disturbo medio-alti, l'entità del flusso pedonale influisce meno sulla capacità in ingresso.

Di seguito sono proposte le stesse analisi per quattro diverse soglie di percentuale di occupazione del passaggio pedonale: 20, 25, 30 e 35%.

Per una percentuale di occupazione al di sotto del 15% non ci sono dati sufficienti per poter costruire una regressione che dia risultati attendibili.

**1. Percentuale di occupazione inferiore al 20%**

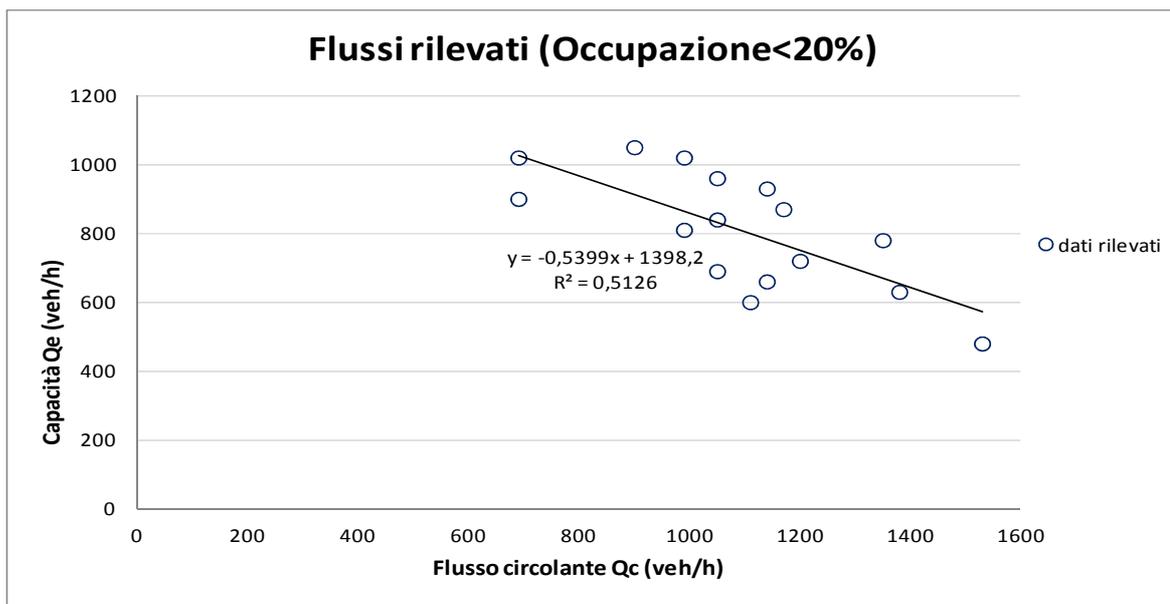


Figura 4.17 Coppie di valori  $Q_c$  e  $Q_e$  per occupazione pedonale inferiore al 20%

Il grafico in Figura 4.17 mostra che, nemmeno per livelli bassi di occupazione pedonale, è sufficiente introdurre come variabile indipendente nel modello il solo flusso circolante.

Qui sotto è riportato l'output di SPSS per il modello di regressione tra  $Q_e$  e  $Q_c$ .

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,716 <sup>a</sup>	,513	,478	121,869

a. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	218672,666	1	218672,666	14,723	,002 <sup>b</sup>
	Residual	207927,334	14	14851,952		
	Total	426600,000	15			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error				Beta	Lower Bound
1	(Constant)	1398,189	156,288		8,946	,000	1062,985	1733,393
	Qc_Eq	-,540	,141	-,716	-3,837	,002	-,842	-,238

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

L'analisi ANOVA mostra un buon livello di significatività della regressione con un P-value pari a 0,002 e una statistica  $F > 3.84$ .

Anche i valori della statistica t mostrano che è possibile rifiutare l'ipotesi nulla con un buon livello di significatività.

Provando ad introdurre il flusso uscente come variabile indipendente, si ha un miglioramento del modello di regressione, ma il coefficiente relativo a  $Q_u$  non è significativo, quindi in questo caso l'introduzione di  $Q_u$  non è giustificata. Anche l'intervallo di confidenza, avendo il limite inferiore negativo e quello superiore positivo, non ci permette di rifiutare l'ipotesi nulla.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qu_Eq, Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,720 <sup>a</sup>	,518	,444	125,725

a. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	221110,811	2	110555,405	6,994	,009 <sup>b</sup>
	Residual	205489,189	13	15806,861		
	Total	426600,000	15			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

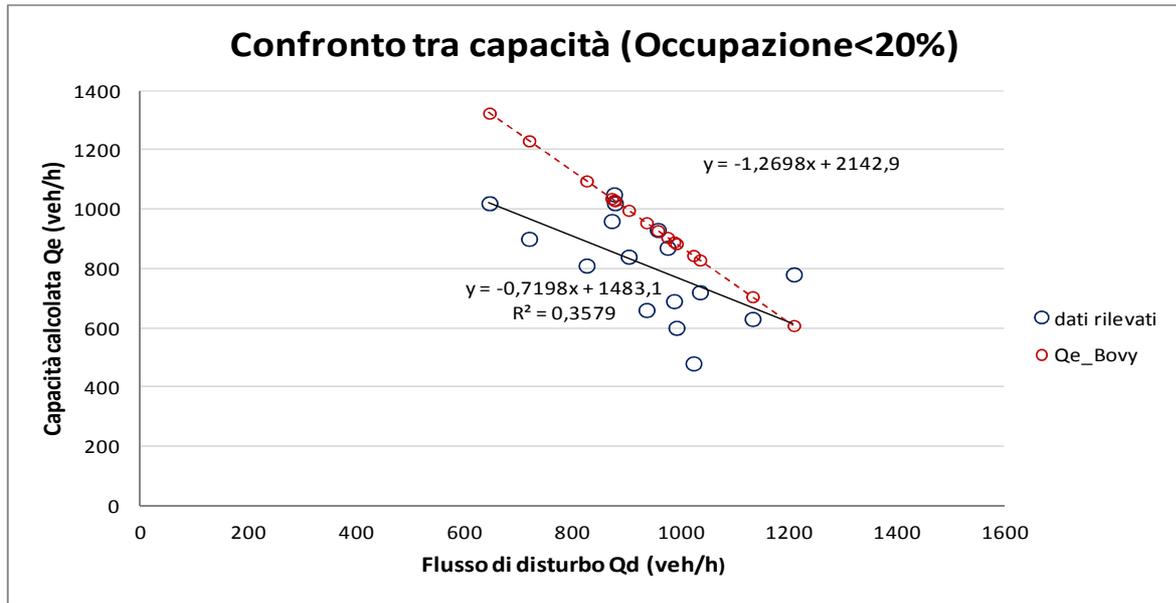
b. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardize	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	d Coefficients Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1333,586	230,335		5,790	,000	835,979	1831,193
	Qc_Eq	-,531	,147	-,704	-3,615	,003	-,848	-,214
	Qu_Eq	,068	,174	,077	,393	,701	-,307	,444

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

In *Figura 4.18* si confronta la capacità rilevata con la capacità calcolata con Bovy in funzione del flusso di disturbo e sotto viene riportato l'output SPSS.



*Figura 4.18* Confronto tra capacità rilevata e capacità calcolata con Bovy in funzione del flusso di disturbo

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qd_Bovy <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,598 <sup>a</sup>	,358	,312	139,915

a. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	152533,183	1	152533,183	7,792	,014 <sup>b</sup>
	Residual	274066,817	14	19576,201		
	Total	426600,000	15			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	1482,832	243,565		6,088	,000	960,438	2005,226
Qd_Bovy	-,719	,258	-,598	-2,791	,014	-1,272	-,167

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Anche in questo caso la capacità predittiva del modello diminuisce utilizzando il flusso di disturbo al posto del solo flusso circolante.

Oltre alla diminuzione del coefficiente di determinazione si osserva anche una perdita di significatività della regressione e della variabile  $Q_d$ , pur restando al di sotto del limite consentito.

## 2. Percentuale di occupazione inferiore al 25%

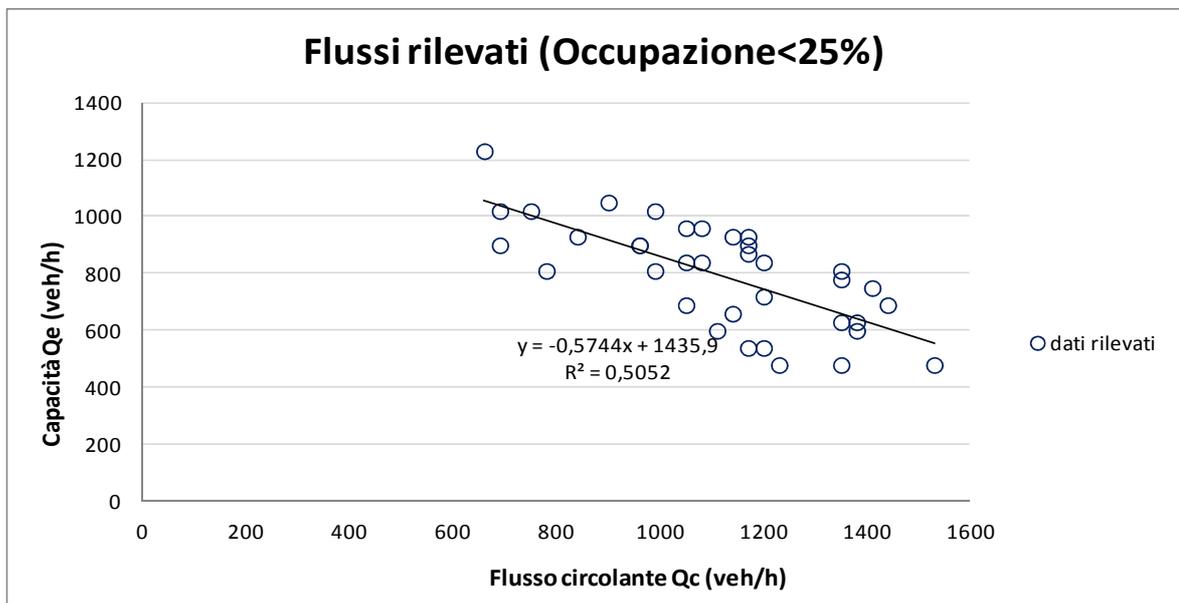


Figura 4.19 Coppie di valori  $Q_c$  e  $Q_e$  osservate per occupazione pedonale inferiore al 25%

Dalla regressione lineare, per questa percentuale di occupazione, vediamo un leggero peggioramento dell' $R^2$  rispetto al caso precedente, pur restando confrontabili i due dati.

L'output SPSS mostra una buona significatività del modello e dei coefficienti.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,711 <sup>a</sup>	,505	,491	130,916

a. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	594970,509	1	594970,509	34,714	,000 <sup>b</sup>
	Residual	582729,491	34	17139,103		
	Total	1177700,000	35			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1435,863	110,383		13,008	,000	1211,538	1660,188
	Qc_Eq	-,574	,097	-,711	-5,892	,000	-,772	-,376

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Provando nuovamente ad introdurre come variabile indipendente il flusso uscente, si ottengono gli stessi risultati di prima per quanto riguarda la significatività dei coefficienti, sia pure con un modesto aumento di R<sup>2</sup>. Quindi, nemmeno per questa percentuale di occupazione, l'introduzione di una seconda variabile apporta benefici al modello.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qu_Eq, Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,746 <sup>a</sup>	,556	,529	125,861

a. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	654947,504	2	327473,752	20,673	,000 <sup>b</sup>
	Residual	522752,496	33	15840,985		
	Total	1177700,000	35			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1210,197	157,200		7,698	,000	890,371	1530,022
	Qc_Eq	-,527	,097	-,652	-5,437	,000	-,724	-,330
	Qu_Eq	,199	,102	,233	1,946	,060	-,009	,407

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Dal confronto tra capacità calcolata con Bovy e capacità rilevata in funzione del flusso di disturbo (*Figura 4.20*), emerge ancora una volta che Bovy sovrastima la capacità della rotatoria.

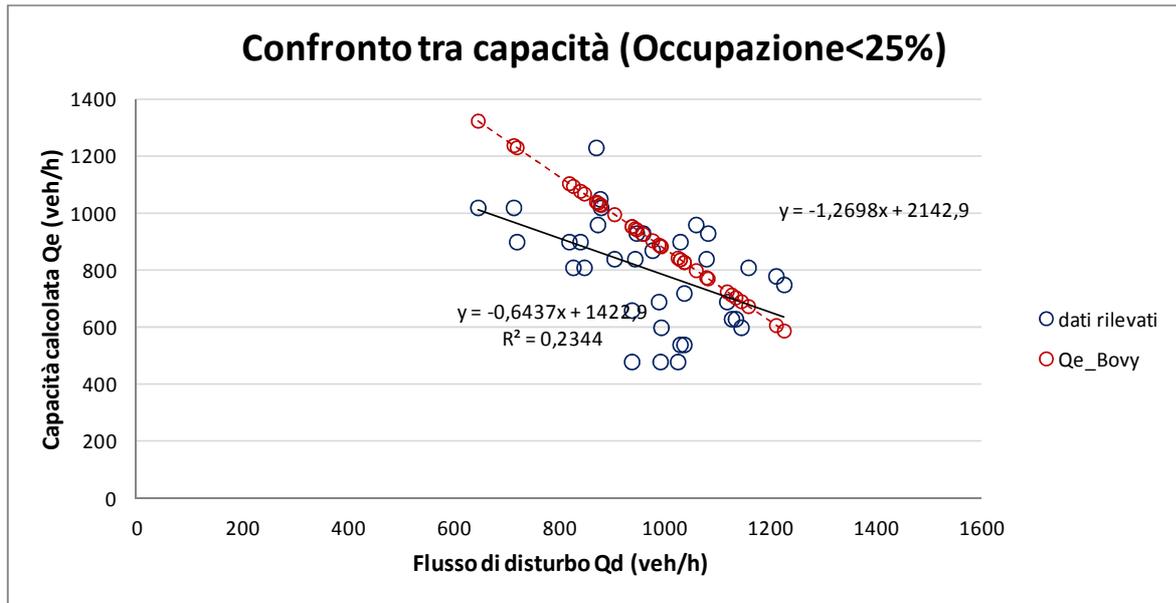


Figura 4.20 Confronto tra capacità rilevata e capacità calcolata con Bovy in funzione del flusso di disturbo

L'output SPSS evidenzia ancora una volta che, nonostante il coefficiente di determinazione sia più basso del caso con il solo flusso circolante, la regressione è significativa così come i coefficienti.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qd_Bovy <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,484 <sup>a</sup>	,235	,212	162,831

a. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

ANOVA<sup>a</sup>

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	276228,757	1	276228,757	10,418	,003 <sup>b</sup>
1 Residual	901471,243	34	26513,860		
Total	1177700,000	35			

- a. Dependent Variable: Qe\_Eq  
 b. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardize	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	d Coefficients Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1422,923	195,401		7,282	,000	1025,821	1820,026
	Qd_Bovy	-,644	,199	-,484	-3,228	,003	-1,049	-,238

- a. Dependent Variable: Qe\_Eq

3. Percentuale di occupazione inferiore al 30%

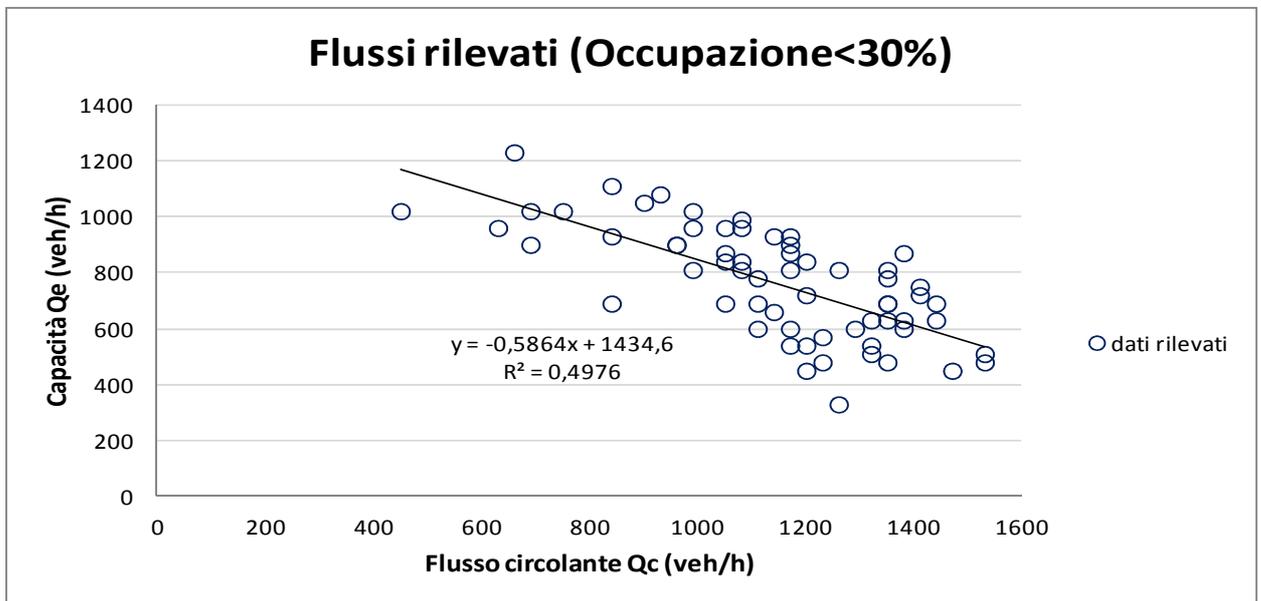


Figura 4.21 Coppie di valori Q<sub>c</sub> e Q<sub>e</sub> per occupazione pedonale inferiore al 30%

Dall'analisi dei dati per valori di occupazione pedonale inferiori al 30%, è evidente che, all'aumentare della percentuale di occupazione, si ha una progressiva diminuzione del coefficiente di determinazione.

L'analisi statistica mostra una buona significatività della regressione e dei coefficienti, sia nel caso di un'unica variabile dipendente ( $Q_c$ ), sia nel caso ne venga introdotta una seconda ( $Q_u$ ), a differenza dei due casi precedenti (Occupazione minore del 20% e occupazione minore del 25%).

L'introduzione della variabile indipendente  $Q_u$  comporta un aumento del coefficiente di determinazione rispetto al modello con la sola variabile  $Q_c$ .

Vengono riportati qui di seguito gli output per entrambi i modelli.

- Variabile indipendente  $Q_c$

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	$Q_c\_Eq^b$	.	Enter

a. Dependent Variable:  $Q_e\_Eq$

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,698 <sup>a</sup>	,487	,479	140,281

a. Predictors: (Constant),  $Q_c\_Eq$

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1157368,234	1	1157368,234	58,813	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1220080,204	62	19678,713		
	Total	2377448,437	63			

a. Dependent Variable:  $Q_e\_Eq$

b. Predictors: (Constant),  $Q_c\_Eq$

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error				Beta	Lower Bound
1	(Constant)	1413,166	86,019		16,429	,000	1241,217	1585,115
	$Q_c\_Eq$	-,570	,074	-,698	-7,669	,000	-,718	-,421

a. Dependent Variable:  $Q_e\_Eq$

- variabile indipendenti:  $Q_c$  e  $Q_u$

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qu_Eq, Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,727 <sup>a</sup>	,529	,513	135,554

a. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1256572,152	2	628286,076	34,192	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1120876,286	61	18375,021		
	Total	2377448,437	63			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1162,758	136,100		8,543	,000	890,609	1434,908
	Qc_Eq	-,514	,076	-,629	-6,780	,000	-,665	-,362
	Qu_Eq	,220	,095	,216	2,324	,023	,031	,410

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Dal confronto in *Figura 4.22* si vede, ancora una volta, che il modello proposto da Bovy non va bene per determinare la capacità di questa intersezione.

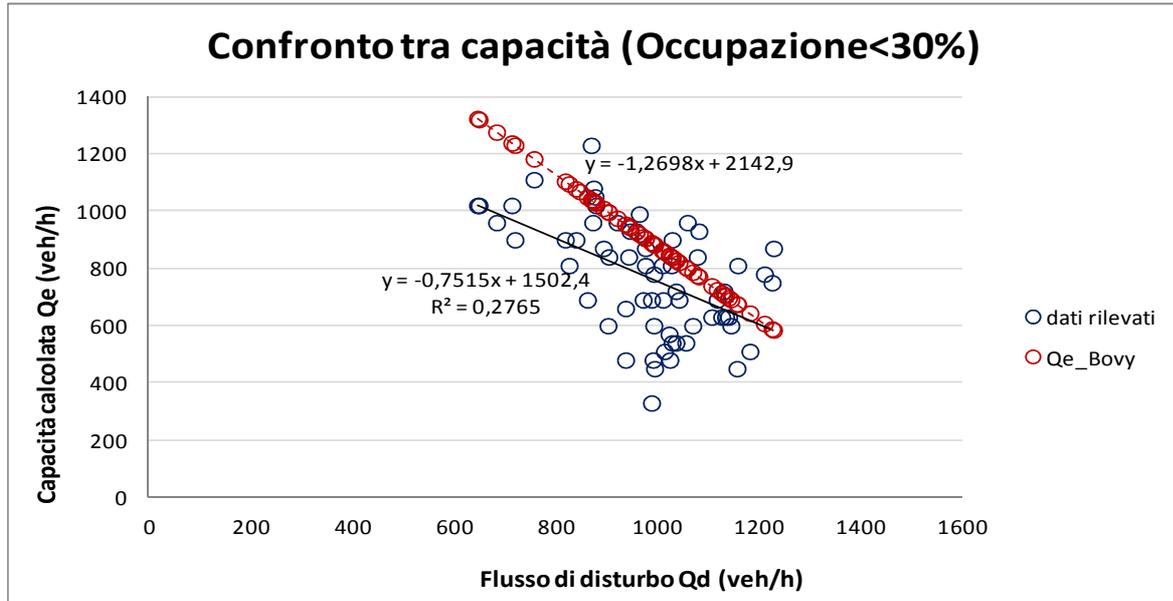


Figura 4.22 Confronto tra capacità rilevata e capacità calcolata con Bovy in funzione del flusso di disturbo

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qd_Bovy <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,525 <sup>a</sup>	,276	,264	166,653

a. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	655498,929	1	655498,929	23,602	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1721949,508	62	27773,379		
	Total	2377448,437	63			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error				Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	1495,154	151,253		9,885	,000	1192,803	1797,505
Qd_Bovy	-,745	,153	-,525	-4,858	,000	-1,052	-,438

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Anche l'output di SPSS conferma che il modello di Bovy è inadatto al calcolo della capacità, infatti, come nei casi precedenti, si ha una diminuzione dell'R<sup>2</sup>.

**4. Percentuale di occupazione inferiore al 35%**

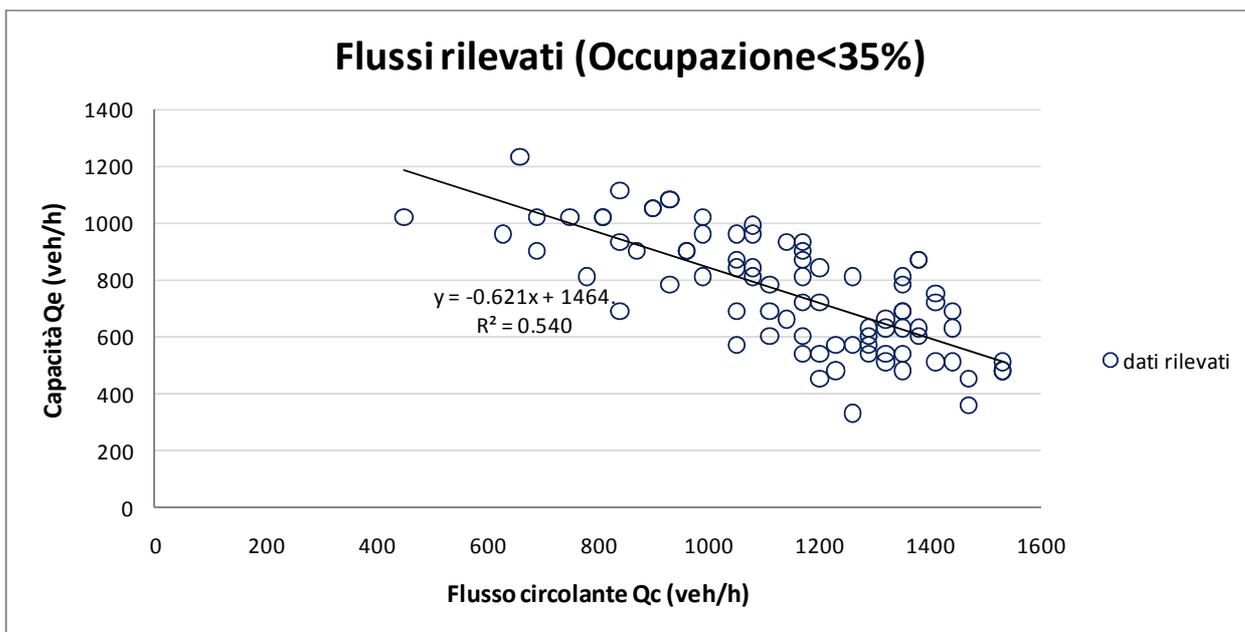


Figura 4.23 Coppie di valori Q<sub>c</sub> e Q<sub>e</sub> per occupazione pedonale inferiore al 35%

Per una percentuale di occupazione inferiore al 35%, il coefficiente di determinazione, nel caso di un'unica variabile indipendente, è paragonabile a quello dei casi precedenti.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,726 <sup>a</sup>	,527	,522	138,515

a. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1754955,767	1	1754955,767	91,469	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1573276,376	82	19186,297		
	Total	3328232,143	83			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1452,327	74,645		19,457	,000	1303,835	1600,819
	Qc_Eq	-,609	,064	-,726	-9,564	,000	-,735	-,482

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Dall'analisi statistica il modello risulta significativo così come i coefficienti stimati nel processo di regressione lineare.

Se si introduce una seconda variabile indipendente, il modello non è significativo, in quanto l'indice di significatività del coefficiente di  $Q_u$ , è maggiore di  $\alpha$  e l'intervallo di confidenza contiene il valore 0; non è quindi lecito rifiutare l'ipotesi nulla.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qu_Eq, Qc_Eq <sup>b</sup>		Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,740 <sup>a</sup>	,548	,537	136,321

a. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1822964,732	2	911482,366	49,048	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1505267,411	81	18583,548		
	Total	3328232,143	83			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1276,299	117,744		10,840	,000	1042,024	1510,573
	Qc_Eq	-,568	,066	-,678	-8,600	,000	-,700	-,437
	Qu_Eq	,155	,081	,151	1,913	,059	-,006	,317

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Dal confronto tra capacità osservata e calcolata (*Figura 4.24*) emerge ancora una volta che il modello di Bovy è inadeguato per la rappresentazione dei flussi reali.

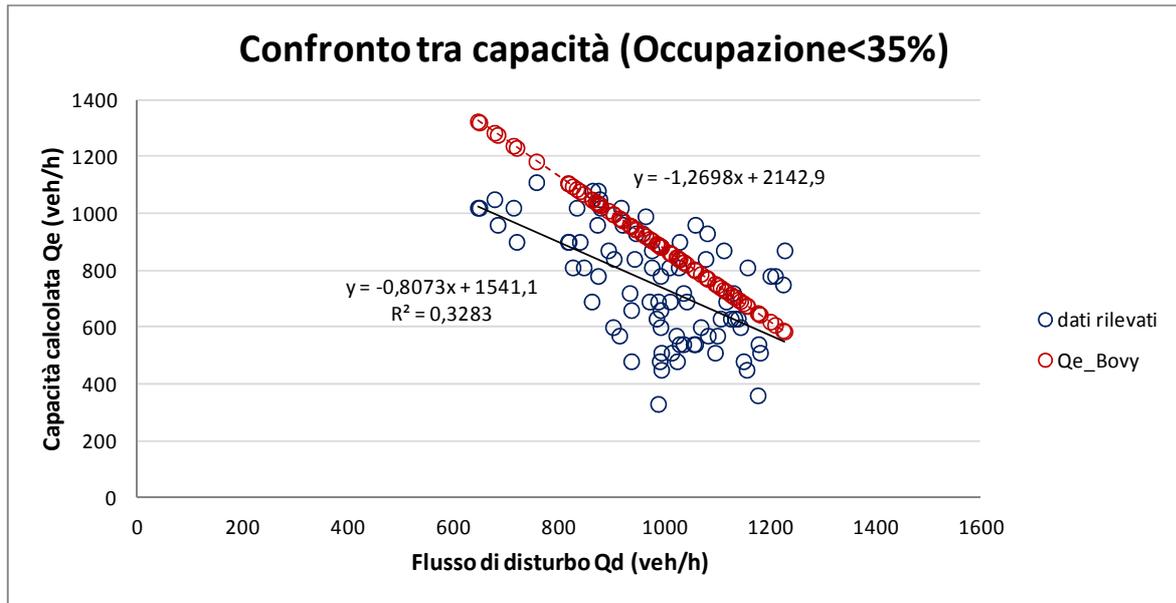


Figura 4.24 Confronto tra capacità rilevata e capacità calcolata con Bovy in funzione del flusso di disturbo

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qd_Bovy <sup>b</sup>	.	Enter

- a. Dependent Variable: Qe\_Eq
- b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,575 <sup>a</sup>	,330	,322	164,891

- a. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1098734,435	1	1098734,435	40,411	,000 <sup>b</sup>
	Residual	2229497,708	82	27188,996		
	Total	3328232,143	83			

- a. Dependent Variable: Qe\_Eq
- b. Predictors: (Constant), Qd\_Bovy

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	1573,143	130,230		12,080	,000	1314,074	1832,211
Qd_Bovy	-,835	,131	-,575	-6,357	,000	-1,097	-,574

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Per tutti i casi considerati, l'utilizzo del flusso di disturbo calcolato con Bovy al posto del solo flusso circolante, provoca un peggioramento del coefficiente di determinazione  $R^2$ . Possiamo quindi affermare che i limiti nei parametri proposti da Bovy per il calcolo del flusso di disturbo, non sono adeguati a rappresentare la realtà di questa intersezione.

Dal confronto tra capacità rilevata e capacità calcolata, si vede che, per flussi di disturbo medio-bassi, il modello di Bovy sovrastima la capacità, a causa del fatto che non tiene conto del flusso pedonale. Il fenomeno è presente anche per una percentuale di occupazione bassa (<20%).

Per tutte le percentuali di occupazione, la retta di regressione interseca i valori calcolati con Bovy per un  $Q_d$  di circa 1200 veh/h. Ciò conferma che, per flussi di disturbo medio-alti, il flusso pedonale influisce in misura minore sulla capacità in entrata.

Possiamo affermare che, nei casi in cui si pongono dei limiti alla percentuale di occupazione pedonale, il modello che introduce come ulteriore variabile indipendente il flusso uscente non risulta significativo, mentre, nel caso in cui non sia posto alcun limite, il modello apporta un miglioramento del modello di regressione.

In *Figura 4.25* si propone un confronto tra le rette di regressione per le varie percentuali di occupazione pedonale.

Si vede subito che sono confrontabili come ordine di grandezza le pendenze delle rette, le intercette con l'asse delle ordinate ed anche i coefficienti di determinazione.

Si potrebbe ottenere un miglioramento dell' $R^2$  diminuendo ancora la percentuale di occupazione, anche se ci sono pochi punti a disposizione. Si noti però che, tra i quattro casi precedenti, quello che ha  $R^2$  più alto è quello con soglia di occupazione del 35% (quindi sembra esserci una sorta di contraddizione, almeno concettualmente), anche se il l'aumento ottenuto non è molto significativo ed è dovuto probabilmente ad un miglioramento del fitting per l'aumento del numero di punti.

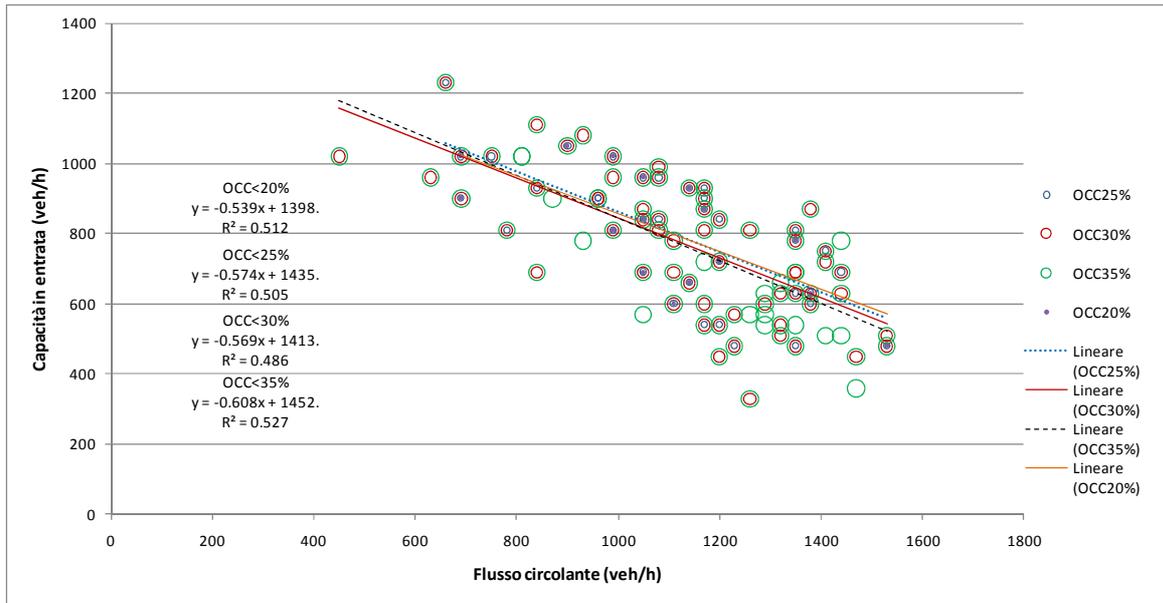


Figura 4.25 Confronto tra le regressioni per le diverse percentuali di occupazione pedonale

#### 4.6 CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DI MODELLI PER IL CALCOLO DELLA CAPACITÀ IN PRESENZA DI UN ATTRAVERSAMENTO PEDONALE

In letteratura esistono modelli di capacità “corretti” che considerano l’effetto del volume pedonale tramite un coefficiente riduttivo, chiamato M nelle formulazioni di Marlow e Maycock e di Stuwe e Brilon, oppure F nella formulazione del CETE.

In questo lavoro si è pensato di sviluppare tre diversi modelli per il calcolo della capacità che non stimano un coefficiente riduttivo, ma calcolano direttamente la capacità. Sono tutti modelli lineari in quanto, da prove fatte in questo lavoro di tesi con altri modelli non lineari (esponenziale negativo, quadratico), e in altri lavori precedenti [16], sono risultati i migliori:

1.  $Q_e = f(Q_c, Q_u, f_{ped})$
2.  $Q_e = f(Q_c, Q_u, \%OCC)$
3.  $Q_e = f(Q_c, Q_u, f_{ped}, \%OCC)$

dove:

$Q_e$ = capacità in entrata

$Q_c$ = flusso circolante

$Q_u$ = flusso uscente

$f_{ped}$ = flusso pedonale

$\%OCC$ = percentuale di occupazione del passaggio pedonale

Per quanto riguarda il terzo modello, si deve tener conto della forte correlazione che lega le due variabili rappresentative dell'effetto di impedenza provocato dai pedoni.

Per la calibrazione dei modelli, in Excel si sono estratti casualmente il 70% dei dati e sono stati poi importati in SPSS per l'elaborazione statistica. Con il restante 30% si è fatta la validazione.

Per valutare il miglioramento dei modelli una volta introdotte le variabili flusso pedonale e/o percentuale di occupazione, si presenta prima il modello con il solo flusso circolante ed uscente, il cui output SPSS è riportato qui sotto.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qu_Eq, Qc_Eq <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,719 <sup>a</sup>	,517	,508	145,523

a. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2625439,206	2	1312719,603	61,988	,000 <sup>b</sup>
	Residual	2456535,584	116	21177,031		
	Total	5081974,790	118			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	1180,423	98,034		12,041	,000	986,255	1374,592
Qc_Eq	-,525	,055	-,644	-9,494	,000	-,634	-,415
Qu_Eq	,185	,070	,178	2,623	,010	,045	,324

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Dall'analisi statistica emerge che il coefficiente di correlazione è pari a 0.517, la regressione è significativa (statistica F maggiore del valore minimo) così come entrambi i coefficienti delle variabili indipendenti (P-value  $<\alpha=0.05$ ). I limiti dell'intervallo di confidenza sono abbastanza vicini per Q<sub>c</sub> e Q<sub>u</sub>, quindi i relativi coefficienti sono stati determinati con accettabile precisione.

#### 4.6.1 CALIBRAZIONE DEL MODELLO 1

Il primo modello considera la capacità in funzione del flusso circolante, uscente e del flusso pedonale.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Qu_Eq, Flusso_ped, Qc_Eq <sup>b</sup>		Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,719 <sup>a</sup>	,517	,504	146,103

a. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Flusso\_ped, Qc\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2627160,646	3	875720,215	41,025	,000 <sup>b</sup>
	Residual	2454814,144	115	21346,210		
	Total	5081974,790	118			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Qu\_Eq, Flusso\_ped, Qc\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error				Beta	Lower Bound
1	(Constant)	1194,165	109,677		10,888	,000	976,915	1411,415
	Qc_Eq	-,526	,056	-,645	-9,449	,000	-,636	-,416
	Flusso_ped	-,017	,060	-,019	-,284	,777	-,136	,102
	Qu_Eq	,180	,073	,173	2,473	,015	,036	,324

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Si nota immediatamente che, aggiungendo una nuova variabile indipendente rispetto al modello precedente, il coefficiente di determinazione non cambia.

La significatività della regressione è buona, ma non si può dire altrettanto del coefficiente per il flusso pedonale che presenta un P-value molto superiore al limite accettabile  $\alpha=0.05$ . Non si può quindi rifiutare l'ipotesi nulla.

In definitiva il modello che introduce il flusso pedonale come variabile indipendente non si può utilizzare per spiegare il fenomeno osservato.

#### 4.6.2 CALIBRAZIONE DEL MODELLO 2

Il secondo modello considera la capacità in funzione del flusso circolante, uscente e della percentuale di occupazione del passaggio pedonale.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	%OCC, Qc_Eq, Qu_Eq <sup>b</sup>		Enter

- a. Dependent Variable: Qe\_Eq  
 b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,729 <sup>a</sup>	,531	,519	143,914

- a. Predictors: (Constant), %OCC, Qc\_Eq, Qu\_Eq

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2700181,216	3	900060,405	43,458	,000 <sup>b</sup>
	Residual	2381793,574	115	20711,248		
	Total	5081974,790	118			

- a. Dependent Variable: Qe\_Eq  
 b. Predictors: (Constant), %OCC, Qc\_Eq, Qu\_Eq

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B		
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	
1	(Constant)	1289,919	112,790		11,436	,000	1066,504	1513,334
	Qc_Eq	-,535	,055	-,656	-9,735	,000	-,643	-,426
	Qu_Eq	,155	,071	,150	2,179	,031	,014	,297
	%OCC	-247,265	130,162	-,124	-1,900	,045	-505,090	-10,560

- a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Introducendo questa nuova variabile indipendente, si ha un leggero miglioramento dell'R<sup>2</sup> rispetto ai due casi precedenti, inoltre la regressione è caratterizzata da una statistica F molto maggiore rispetto al valore limite e tutti i coefficienti risultano significativi.

Si può quindi affermare che, utilizzando la percentuale di occupazione invece del flusso pedonale, si ha un miglioramento del modello non tanto per quello che riguarda il coefficiente di correlazione, ma soprattutto perché tutte le variabili indipendenti risultano significative.

#### 4.6.3 CALIBRAZIONE DEL MODELLO 3

Il terzo modello introduce entrambe le variabili indipendenti che rappresentano l'effetto dei pedoni: flusso pedonale e percentuale di occupazione.

Si è consapevoli del fatto che così facendo insorge il rischio di avere un'elevata correlazione tra le due suddette variabili esplicative.

L'indice di correlazione di Pearson tra le due variabili è pari a 0.808; si parla quindi di forte correlazione essendo il limite inferiore pari a 0.7. Questo comporta la difficoltà di scindere gli effetti delle due variabili nel modello.

Aumentando però il numero delle variabili indipendenti, si ha anche un aumento dell' $R^2$  e questo non significa necessariamente che il modello sia migliore rispetto ai precedenti, ma solo che si è migliorato il *fitting*.

Per il confronto è quindi opportuno utilizzare l'indicatore  $R^2$  corretto, che penalizza i modelli con un elevato numero di variabili esplicative.

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Flusso_ped, Qc_Eq, Qu_Eq, %OCC <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,741 <sup>a</sup>	,550	,534	141,677

a. Predictors: (Constant), Flusso\_ped, Qc\_Eq, Qu\_Eq, %OCC

ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2793712,098	4	698428,024	34,795	,000 <sup>b</sup>
	Residual	2288262,692	114	20072,480		
	Total	5081974,790	118			

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

b. Predictors: (Constant), Flusso\_ped, Qc\_Eq, Qu\_Eq, %OCC

Coefficients<sup>a</sup>

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B		
	B	Std. Error				Beta	Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1286,199	111,050		11,582	,000	1066,209	1506,188
	Qc_Eq	-,534	,054	-,655	-9,877	,000	-,641	-,427
	Qu_Eq	,171	,071	,165	2,426	,017	,031	,311
	%OCC	-628,123	218,058	-,316	-2,881	,005	-1060,093	-196,153
	Flusso_ped	,213	,099	,238	2,159	,033	,018	,409

a. Dependent Variable: Qe\_Eq

Il modello con quattro variabili indipendenti mostra un R<sup>2</sup> maggiore rispetto a tutti gli altri, anche volendo considerare il suo valore corretto per il confronto.

La regressione risulta essere significativa ed anche tutti i coefficienti.

Il segno del coefficiente relativo al flusso pedonale è positivo, contrariamente a quanto ci si aspetta. Andando però a vedere i due modelli che introducono solo una delle due variabili, notiamo che il coefficiente della percentuale di occupazione è minore rispetto a questo; quindi probabilmente il flusso pedonale ha coefficiente positivo perché in qualche modo compensa il maggior peso della percentuale di occupazione. Come detto in precedenza, essendo le due variabili fortemente correlate, è difficile scindere gli effetti provocati nel modello di regressione.

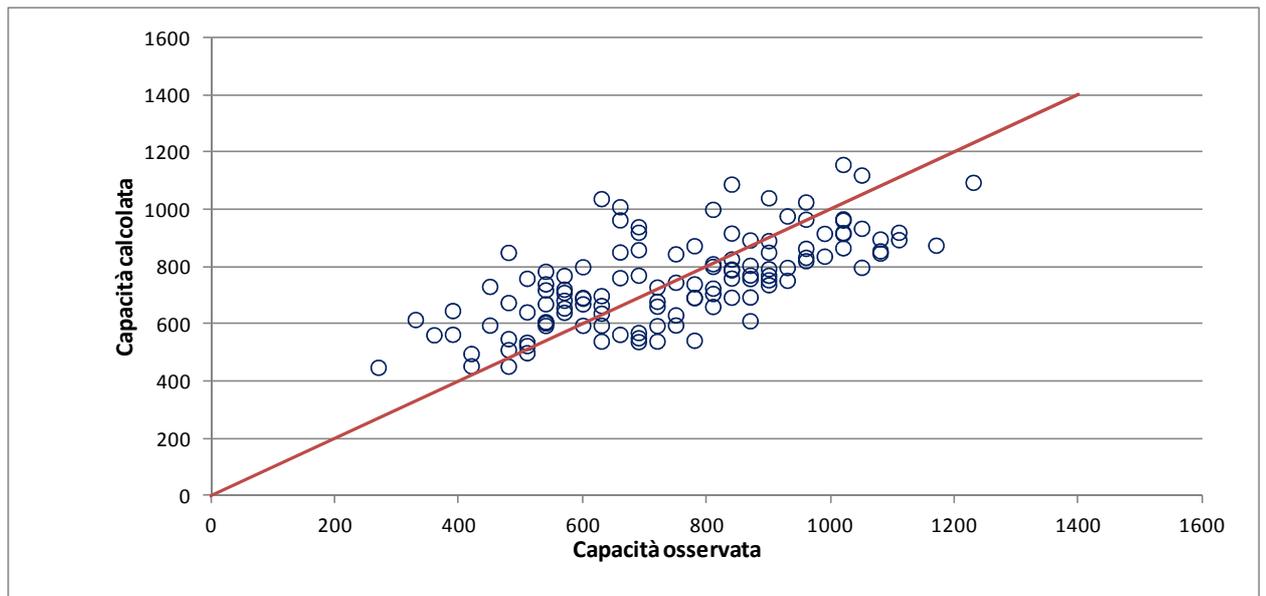
Si conclude quindi che il modello più rappresentativo per l'intersezione in esame è quest'ultimo ed ha la forma funzionale:

$$Q_e = 1286.199 - 0.534Q_c + 0.171Q_u - 628.123\%OCC + 0.213f_{ped}$$

#### 4.6.4 VALIDAZIONE DEL MODELLO 3

La validazione (fatta sul 30% dei dati) del modello viene fatta con il metodo grafico (*Figura 4.26*); si va a vedere come si collocano i punti attorno alla retta di equazione:

$$Y = X$$



*Figura 4.26* Validazione del modello

La nuvola di punti si colloca abbastanza bene attorno alla retta, ma per avere una conferma, si ipotizza che questa sia la retta che meglio si adatta ai dati e si calcola il coefficiente di determinazione:

$$R^2 = 0.583$$

Quindi la variabilità dei dati è spiegata dal modello nel 58% dei casi.



## CAPITOLO 5: CONCLUSIONI

In questo capitolo vengono riassunti i principali risultati ottenuti dalle analisi eseguite sui dati sperimentali.

La stima della capacità della rotatoria oggetto dello studio non può essere fatta utilizzando i modelli che non considerano il volume pedonale in quanto, essendo questo elevato sull'attraversamento del ramo d'entrata studiato, tali metodi tendono a sovrastimare la capacità in entrata. Nel capitolo 4 si è osservato che nei periodi di saturazione risultano elevati sia il flusso circolante sia il flusso pedonale sull'attraversamento, per cui non si può calcolare la capacità senza considerare il flusso pedonale, in quanto entrambi concorrono in misura significativa alla formazione della coda.

All'inizio del lavoro si era ipotizzato che la percentuale di occupazione potesse dare una stima migliore della capacità se utilizzata in luogo del flusso pedonale. Per questo motivo, è stata calcolata la percentuale di occupazione su intervalli da 1 minuto e si è cercata la sua relazione con il flusso pedonale orario.

La funzione che meglio rappresenta la nuvola di punti sperimentali è la potenza e rafforza l'ipotesi secondo cui, per volumi consistenti, i pedoni procedono su file parallele nell'attraversamento; si ha quindi un aumento meno che proporzionale dell'occupazione in funzione dell'aumento di flusso.

Si sono poi ricercati modelli empirici che possano rappresentare verosimilmente la capacità del ramo considerato, tenendo conto di tutte le variabili indipendenti che possono concorrere alla sua determinazione. Per la determinazione della forma funzionale più adatta da utilizzare si è fatto innanzitutto riferimento ad una tesi precedente, e si sono poi studiate altre soluzioni che, sottoposte ad analisi statistica, hanno dato risultati poco soddisfacenti. La forma adottata per la calibrazione del modello è quella lineare che, a seconda delle variabili introdotte, ha dato risultati diversi.

Si è innanzitutto stabilito quali flussi veicolari fosse opportuno utilizzare: circolante ed uscente oppure il cosiddetto "flusso di disturbo" calcolato con la formula di Bovy. Il modello risultato migliore utilizza entrambi i flussi rilevati, poiché il metodo di Bovy, a prescindere dalla percentuale di occupazione pedonale, sovrastima la capacità.

Il modello  $Q_e = f(Q_c, Q_u, f_{ped})$  è il meno appropriato, ha il coefficiente di correlazione più basso ed il coefficiente del flusso pedonale non è significativo.

Il modello  $Q_e = f(Q_c, Q_u, \%OCC)$  comporta un miglioramento del coefficiente di correlazione, ed inoltre tutti i coefficienti delle variabili indipendenti sono significativi; viene quindi confermata, almeno con riferimento al caso di studio, l'ipotesi secondo cui l'utilizzo della percentuale di occupazione invece del flusso pedonale implica un miglioramento del modello.

Il modello  $Q_e = f(Q_c, Q_u, f_{ped}, \%OCC)$ , nonostante la forte correlazione tra flusso e occupazione pedonale, è il più rappresentativo della realtà ed è il modello scelto per effettuare la validazione.

La validazione vera e propria è stata fatta graficamente rappresentando i dati nel piano ( $Q_e$  osservata,  $Q_e$  calcolata) e osservando come questi si dispongono in relazione alla retta di equazione  $Q_e^{oss} = Q_e^{calc}$ . I dati risultano essere abbastanza dispersi, quindi si è calcolato il coefficiente di correlazione per avere un parametro numerico a cui fare riferimento.

Possiamo affermare che il modello rappresenta in modo sufficiente la realtà osservata, ma sarebbero necessari ulteriori dati per poter calibrare e validare un modello migliore, in quanto i dati a disposizione relativi ai soli periodi di saturazione costituiscono un campione poco numeroso.

Un altro possibile sviluppo del presente lavoro riguarda la stima dell'impedenza dei pedoni sul flusso uscente dalla rotatoria. Con i filmati a disposizione è possibile studiare anche gli accodamenti sul ramo d'uscita che, a causa del poco spazio tra passaggio pedonale ed anello, si propagano all'interno dell'anello stesso andando a bloccare l'entrata a monte.

Infine, dato che pedoni e ciclisti sono stati codificati separatamente, sarebbe possibile indagare il diverso effetto che possono avere sulla capacità a causa della diversa velocità e del diverso ingombro.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Raffaele Mauro "*Il calcolo delle rotatorie*" (2010)
2. W. Brilon, N. Wu, L. Bondzio "*Unsignalized Intersections in Germany- a State of the Art 1997*" Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals, pp. 61-70, Portland, Oregon, USA, July 1997
3. C. Meneguzzer, R. Rossi "*Evaluating the impact of pedestrian crossings on roundabout entry capacity*", Science Direct, Procedia Social and Behavioral Sciences 20 (2011) 69-78
4. Alaa Sindi "*Impact of Pedestrian Volumes on the Operational Performance of Modern Roundabouts*" Waterloo, Ontario, Canada, 2011
5. C. Duran "*Effects of pedestrian crossing on roundabout capacity*" University of Texas, El Paso, USA, 2010.
6. HCM (2000), "*Highway Capacity Manual – 2000*" TRB Transportation Research Board, Washington, D.C., 2000
7. R. Kimber "*Traffic Capacity of Roundabouts*" Transportation and Research Laboratory, Laboratory Report LR942, Crawthorne, Berkshire, U.K., 1980.
8. G. Louah "*Panorama critique des modeles français de capacité des carrefours giratoires*" Actes du séminaire international "Giratoires 92," Nantes, France, 1992.
9. Marlow, M. and Maycock, G. (1982) "*The effect of zebra crossings on junction entry capacities*", Transport and Road Research Laboratory, SR 724 Monograph, 1982.
10. Robinson, B., Rodegerdts, W., Scrbrough, W., Kittelson, R., Troutbeck, W., Brilon, L., Bondzio, K., Courage, M., Kyte, J., Mason, A., Flannery, E., Myers, J., Bunker, J. and Jacquemart, G. (2000) "*Roundabouts: An informational Guide*" Federal Highway Administration – FHWA, Publication number FHWA-RD-00-067, Turner Fairbank Highway Research Center, McLean, Virginia, USA, 2000
11. Rodegerdts, L. and Blackwelder, G. (2005) "*Analytical Analysis of Pedestrian Effects on Roundabout Exit Capacity*" Transportation Research Circular, E-C083, Proceedings of the National Roundabout Conference, Vail, Colorado, May 22-25, 2005.
12. Rodegerdts, L., Blogg, M., Wemple, E., Myers, E., Kyte, M., Dixon, M., List, G., Flannery, A., Troutbeck, R., Brilon, W., Wu, N., Persaud, B., Lyon, C., Harkey, D. and Carter, D. (2007) "*Roundabouts in the United States*" TRB Transportation Research Board, NCHRP Report 572, Washington, D.C, 2007.
13. Tanner, J. (1962) "*A theoretical analysis of delays at uncontrolled intersection*" Biometrika, Vol. 49, No. 1 and 2, 1962, p. 163-170.
14. Troutbeck, R. (1989) "*Evaluating the Performance of a Roundabout*" Australian Road Research Report SR 45, 1989

15. Barbisan, E. *“L’effetto dei transiti pedonali sulla capacità dei rami di intersezioni a rotatoria. Evidenze sperimentali in contesti urbani”*
16. Cavararo L., *“Analisi sperimentale degli effetti degli attraversamenti pedonali sulla capacità dei rami di intersezioni a rotatoria”*
17. Sito internet: <http://maps.google.it/>
18. Montgomery, Runger, Hubele, edizione in lingua italiana 2004, *“Statistica per ingegneria”*, Egea