

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

*Il comportamento di gap-acceptance in intersezioni a rotatoria.
Simulazioni in ambiente virtuale.*

RELATORE: PROF. RICCARDO ROSSI

CORRELATORE: PROF. MASSIMILIANO GASTALDI

LAUREANDO: STEFANO BORGATO

MATRICOLA: 626651-IC

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Sommario

Introduzione	5
1. La teoria del gap-acceptance	6
1.1. Definizioni	6
1.2. Stima dei parametri di gap-acceptance	10
1.2.1 Tecnica di regressione	10
1.2.2 Approccio probabilistico	12
2. Capacità di un ramo d'accesso di una rotatoria	23
2.1 Definizione	23
2.2 Metodi per il calcolo della capacità di un ramo	23
2.3 Metodi basati sulla teoria del gap-acceptance	25
2.3.1 Metodo di Siegloch	25
2.3.2 Metodo di Harders	25
2.3.3 Metodo Australiano	26
2.3.4 Metodo Tedesco	29
2.3.5 Modello esponenziale proposto da Polus	32
2.3.6 Metodo proposto nell' HCM 2000	33
2.3.7 Metodo proposto nell' HCM 2010	37
3. I casi di studio	40
3.1 Rotatoria Mirano Taglio Sinistro	41
3.2 Strumentazione e metodologia di rilievo	43
3.2.1 Videocamere	43
3.2.2 Radar	46
3.3 Rilievo geometrico	51
3.4 Rotatoria Mirano Scaltenigo	52
3.5 Strumentazione e metodologia di rilievo	54
3.5.1 Videocamere	54
3.5.2 Radar	57
3.6 Rilievo geometrico	58
4. Codifica ed elaborazione dei dati	59

4.1 Codifica dei filmati	59
4.1.1 Rilevazione passaggi a monte della coda (codifica di monte).....	59
4.1.2 Rilevazione passaggi in corrispondenza della linea d'arresto dell'approccio (codifica di valle)	60
4.1.3 Osservazione e codifica dei comportamenti di gap-acceptance	62
4.1.4 Criteri di codifica	68
4.2 Stima dei parametri di <i>gap-acceptance</i>	70
4.2.1 Metodo della Massima Verosimiglianza	70
5. L'uso del simulatore di guida nella sperimentazione.....	71
5.1 Potenzialità del simulatore di guida	74
5.2 Sperimentazioni presso il Laboratorio di Trasporti DICEA	77
6. L'esperimento con il simulatore di guida	82
6.1 Metodologia.....	82
6.2 Strumentazione di laboratorio	82
6.3 Fase 1: Osservazione diretta sul campo, raccolta e codifica dati.....	86
6.4 Fase 2: Progettazione dell'ambiente 3D e dello script.....	86
6.4.1 Progettazione della Rotatoria "Mirano Taglio Sinistro".....	86
6.4.2 Progettazione della Rotatoria "Mirano Scaltenigo"	89
6.4.3 Progettazione del circuito di guida.....	93
6.4.4 Definizione dello script	94
6.4.5 Esecuzione degli esperimenti.....	97
6.5 Fase 3: Risultati dell'esperimento e test di validazione	103
6.5.1 Risultati Mirano Taglio Sinistro (rotatorie 1 e 2).....	103
6.5.2 Risultati Mirano Scaltenigo (rotatorie 3 e 4).....	107
7. Conclusioni	111
Appendice.....	113
A Cenni di statistica inferenziale. Il test "t"	113
A 1 Il t-test	113
Bibliografia	115

Introduzione

L'intersezione a rotatoria è divenuta negli ultimi anni uno strumento molto diffuso per la regolazione delle correnti interagenti in corrispondenza di un nodo di traffico. I comportamenti dei conducenti nelle rotatorie sono stati oggetto di osservazione ed interpretazione fin dagli anni '80 consentendo ai ricercatori di studiarne il funzionamento con vari metodi, molti dei quali basati sulla teoria del *Gap Acceptance*.

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo lo studio di un particolare parametro comportamentale, il *Gap Critico*, dapprima mediante l'osservazione sperimentale diretta del fenomeno e successivamente in ambiente virtuale, attraverso lo sviluppo e la validazione di un modello sviluppato con apposito software per mezzo del simulatore di guida del dipartimento.

In termini sintetici il presente lavoro si articola secondo la seguente struttura.

La prima parte è dedicata alla descrizione dei due casi di studio, della metodologia di rilievo dei dati e della tecnica di codifica adottata per la raccolta delle informazioni necessarie per la stima dei parametri comportamentali dei conducenti. Verrà richiamata la teoria del gap acceptance e i principali metodi per determinare il *gap critico*, nonché i principali utilizzi di tale parametro. Verranno illustrati i risultati così ottenuti.

La seconda parte del lavoro è dedicata alla descrizione del simulatore di guida, e dei software ad esso correlato. Si procederà quindi con l'illustrazione del modello, e del metodo di lavoro adottato.

La parte finale del lavoro sarà dedicata all'analisi comparativa dei risultati prodotti nelle due fasi precedenti, con relativi commenti.

1. La teoria del gap-acceptance

1.1. Definizioni

La teoria del *gap-acceptance* usata nell'analisi di un'intersezione a raso a regime di priorità è basata su un modello di scelta binario fondato sul concetto secondo cui un guidatore, nell'effettuare la manovra di immissione o attraversamento, si troverà a valutare i *gap* disponibili tra i veicoli appartenenti alla corrente principale (nel caso delle rotatorie si tratta dei veicoli che percorrono l'anello circolatorio) e sceglierà di accettare, effettuando l'immissione, quello avente una dimensione (spaziale o temporale) sufficientemente estesa per completare la manovra in condizioni di sicurezza (*Troutbeck, Brilon*).

Come affermano infatti Roebuck e Krogscheepers (1999), la performance di un'intersezione a priorità di qualsiasi genere essa sia, deve essere determinata dallo schema di *gap* disponibili (sequenze di *gap* rifiutati e/o accettati) del flusso di traffico principale come pure dalle caratteristiche dei conducenti nell'accettazione dei *gap* o *lag*.

Si illustra ora il significato di alcune grandezze normalmente misurate per l'applicazione dei metodi di stima della capacità basati sulla teoria del *gap-acceptance* con specifico riferimento al ramo d'ingresso di una rotatoria.

Lag si definisce come la parte residua di un *gap*, nello specifico si intende come l'intervallo temporale che intercorre tra l'arrivo di un utente all'approccio in corrispondenza della *yield line* o linea del "dare la precedenza" e il passaggio del primo veicolo sull'anello, quindi appartenente al flusso circolante in corrispondenza del punto di conflitto come è illustrato in figura 1:

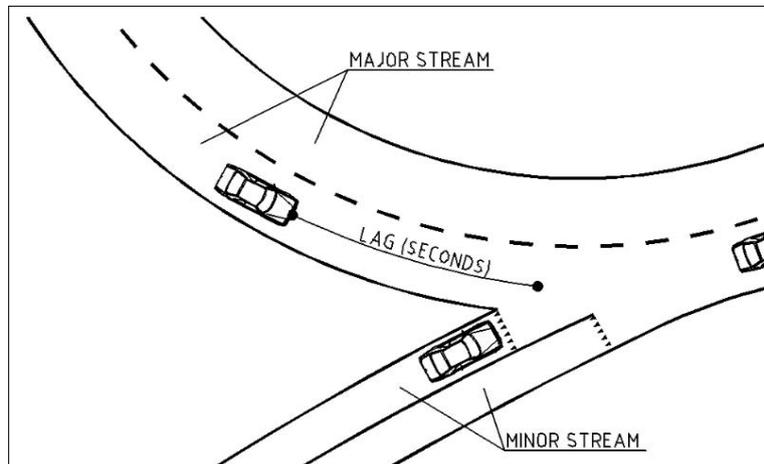


Fig. 1 - Definizione di lag

Gap è l'intervallo temporale netto tra l'arrivo di due successivi veicoli che procedono lungo la stessa direzione in corrispondenza del punto di conflitto come si può notare in figura 2:

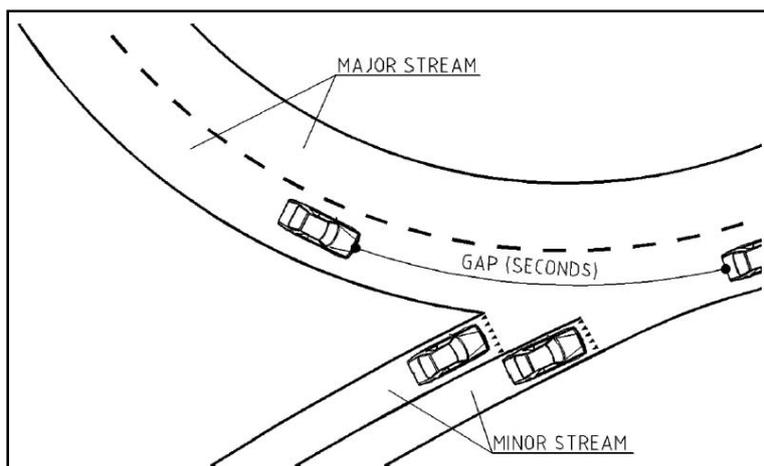


Fig. 2 - Definizione di gap

Gap Critico (t_c) è definito come l'intervallo temporale minimo tra i veicoli appartenenti alla corrente primaria considerato accettabile dal conducente per effettuare la manovra di immissione o attraversamento in condizioni di sicurezza. Il *gap critico* non è direttamente misurabile; per un certo conducente la sua ampiezza in termini temporali si può verosimilmente ritenere che sia compresa tra la dimensione del gap accettato e del più grande tra i gap rifiutati.

Vi possono essere diverse variabili che influenzano, in misura maggiore o minore, le decisioni di accettazione o di rifiuto di un conducente tra cui, secondo Polus et al. (2005):

- Ampiezza temporale e spaziale del gap;
- Velocità dei veicoli della corrente primaria;
- Tipologia del veicolo in conflitto;
- Caratteristiche del conducente (età, sesso, esperienza, passeggeri a bordo ecc);
- Caratteristiche del veicolo;
- Tempo di attesa (in coda e/o in testa alla coda);
- Caratteristiche costruttive della rotatoria (geometria, visibilità)

Follow-up time (t_f): definito come l'intervallo temporale misurato tra l'istante in cui un veicolo esegue la manovra di immissione (attraversamento della linea d'arresto) e l'istante in cui la manovra stessa viene effettuata dal veicolo che lo segue sull'approccio, nelle ipotesi in cui venga impiegato lo stesso *gap* da entrambi i veicoli e vi sia coda continua sull'approccio stesso, figura 3:

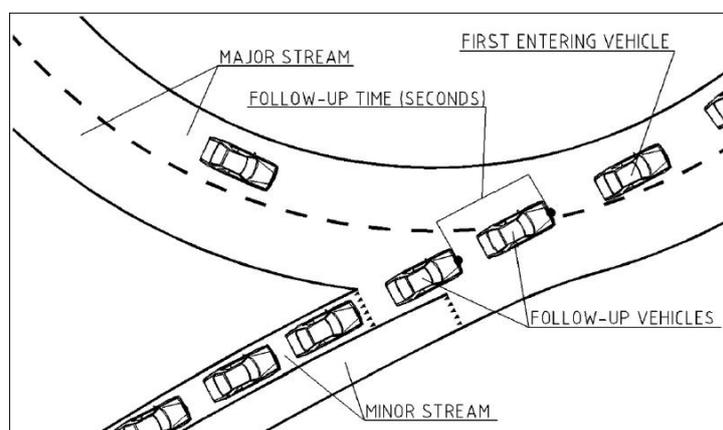


Fig. 3 - Definizione di follow-up time

Alla base dell'applicabilità della teoria del gap-acceptance vi sono le seguenti ipotesi:

- Tutti i conducenti sono omogenei: hanno caratteristiche simili;
- Tutti i conducenti sono coerenti: accettano *gap* di dimensioni maggiori dei *gap* rifiutati.

Queste ipotesi tuttavia nella realtà non sono sempre valide.

Hagring et al. (2003) hanno infatti dimostrato la frequente disomogeneità dei guidatori che tendono ad accettare *gap* più piccoli dei *gap* in precedenza rifiutati a causa di fattori esterni come il tempo di attesa in coda e il *service time*.

Troutbeck e Kako (1999) hanno dato prova che, in alcune situazioni la coerenza dei conducenti stessa può venir meno. Nel caso in cui il flusso circolante è fortemente congestionato, i veicoli secondari sono indotti a forzare la loro entrata costringendo i circolanti a rallentare, stravolgendo di fatto la regola di precedenza all'anello.

Nonostante queste confutazioni, dato che da un lato la disomogeneità può far ridurre la capacità e l'incoerenza la fa aumentare, l'assunzione di omogeneità e di coerenza per quanto non siano sempre presenti non portano grandi miglioramenti al modello.

Nel successivi paragrafi verranno illustrati alcuni dei modelli basati sulla teoria del gap acceptance e nelle ipotesi poste, dai primi proposti fino a quelli più recenti.

1.2. Stima dei parametri di gap-acceptance

I parametri di *gap-acceptance* t_c , e t_f possono essere stimati utilizzando varie tecniche che si possono collocare di fatto all'interno di due gruppi:

- Nel primo caso si basa su un'analisi di regressione tra il numero di utenti che accettano un intervallo e le dimensioni dello stesso
- Nel secondo la stima delle distribuzioni del *follow-up time* e del *gap critico* avvengono indipendentemente utilizzando un approccio di tipo probabilistico.

1.2.1 Tecnica di regressione

La tecnica proposta da Sieglöch (1973) che si utilizza nei casi di coda continua si può riassumere in questi passi successivi:

1. si memorizza l'ampiezza di ogni gap, t , sulla strada principale ed il numero n di veicoli che dalla secondaria impegnano l'intersezione durante tale gap;
2. per ognuno degli intervalli accettati da n utenti si calcola il gap medio, $E(t)$;
3. si utilizza la regressione lineare per i gap medi come illustrato in figura 4;
4. dal grafico si ricavano:
 - t_f rappresentato dal coefficiente angolare della retta e
 - t_o rappresentato dall'intercetta sull'asse delle ascisse .
5. si calcola quindi il *gap critico* come segue:

$$t_c = t_o + \frac{1}{2} * t_f$$

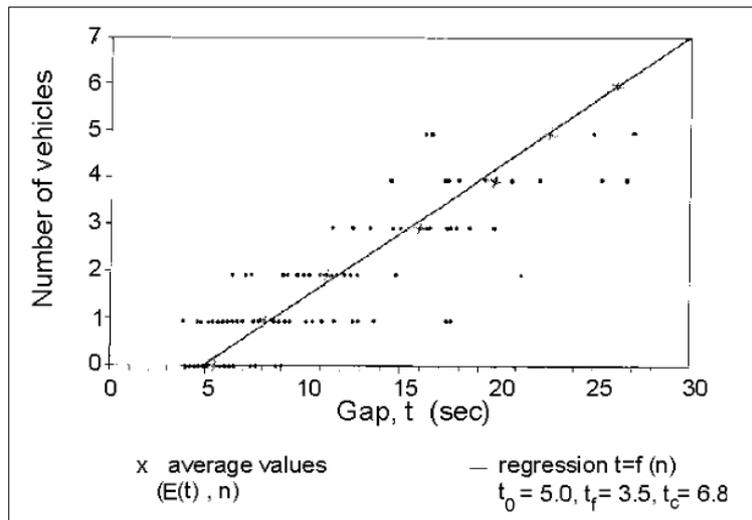


Fig. 4 – Esempio di stima di t_c e t_f secondo il metodo di Siegloch [Cap.8 – Unsignalized Intersection Theory, Troutbeck R.J., Brilon W.]

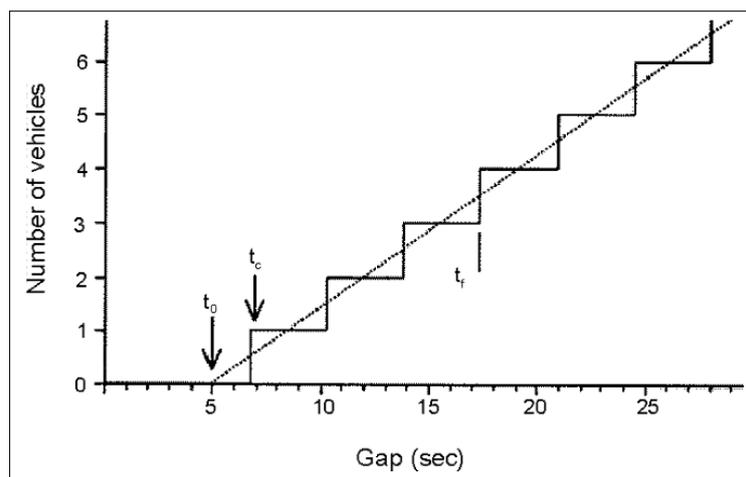


Fig. 5 - Esempio di regressione lineare [Cap.8 – Unsignalized Intersection Theory, Troutbeck R.J., Brilon W.]

Come si può osservare in figura 5, la regressione lineare è simile alla funzione a gradini.

1.2.2 Approccio probabilistico

Nei casi in cui la tecnica di regressione non può essere usata, il calcolo dei parametri di *gap-acceptance* può essere ottenuto con un approccio probabilistico.

Per quanto concerne la stima di *follow-up time* non vi sono grosse difficoltà in quanto per misurare detto parametro ci si basa di fatto sulle osservazioni sperimentali effettuate sul campo: osservando i veicoli accodati se ne estrapola il valore medio da misure dirette.

Per quanto riguarda, invece, la stima del *gap critico* la tecnica risulta piuttosto complessa poiché l'intervallo critico non è direttamente osservabile.

Relativamente alla sua determinazione se ne illustrano i seguenti metodi:

- Metodo di Raff
- Metodo di Ashworth
- Metodo della massima verosimiglianza
- Metodo Logit
- Metodo di Wu

1.2.2.1 Stima del follow-up time

Come precedentemente detto la stima di tale parametro viene fatta sulla base delle osservazioni dirette sul campo.

Supponendo quindi che, rifacendoci alla figura 6, sul ramo secondario vi siano tre veicoli implotonati che si immettono sull'anello sfruttando il medesimo *gap* di dimensione t , rispettivamente al tempo t_1 , t_2 e t_3 .

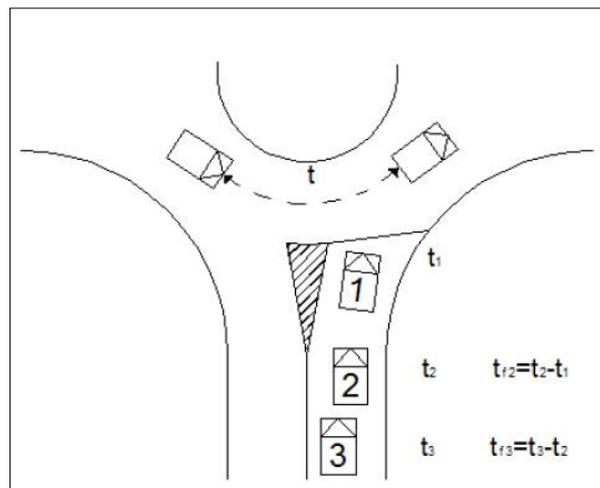


Fig. 6 - Stima del follow-up time

Si può definire che per il veicolo 2 il tempo di *follow-up time* è:

$$t_{f2} = t_2 - t_1$$

mentre per il veicolo 3 il tempo di *follow-up time* è definito come:

$$t_{f3} = t_3 - t_2$$

In generale quindi il *follow-up time* t_f si calcola come media aritmetica di tutti gli n *follow-up time* dei singoli utenti ottenuto come segue:

$$t_f = \frac{\sum_i^n t_{fi}}{n} \quad (\text{s}) \quad (31)$$

1.2.2.2 Stima del gap critico con il metodo di Raff

Il metodo di Raff è probabilmente il meglio conosciuto e il più semplice da utilizzare (Vasconcelos L. et al., 2011).

Raff propone questa formula per il calcolo del *gap critico*:

$$1 - F_r(t) = F_a(t) \quad (32)$$

in cui:

- t è il *gap* o meglio l'*headway* tra due veicoli successivi nella corrente circolante (s)
- $F_r(t)$ rappresenta la funzione di distribuzione cumulata dei *gap* rifiutati
- $F_a(t)$ rappresenta la funzione di distribuzione cumulata dei *gap* accettati.

In relazione a tale metodo, il *gap critico* rappresenta l'ampiezza di intervallo t , in corrispondenza del quale le due funzioni $1 - F_r(t)$ e $F_a(t)$ si intersecano come in figura 7.

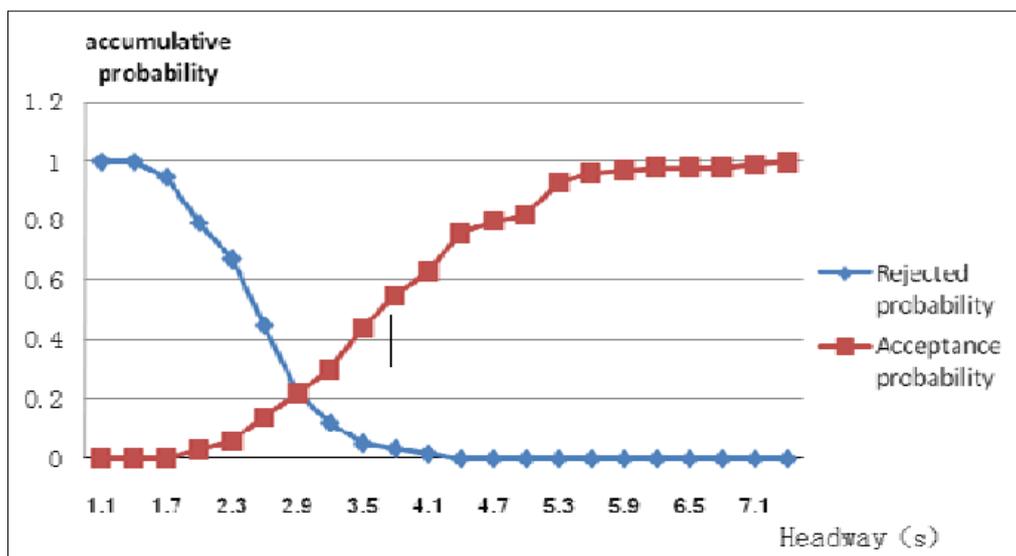


Fig. 7 - Stima del gap critico con il metodo di Raff [Guo R., Estimating Critical Gap of Roundabouts by different methods, 2010]

1.2.2.3. Stima del *gap critico* con il metodo di Ashworth

Ashworth propone la seguente formula per il calcolo del *gap critico* basato su misure statistiche in relazione ai dati sperimentalmente raccolti:

$$t_c = \bar{t}_a - V_p * \sigma_a^2 \quad (s) \quad (33)$$

in cui:

- t_c è il *gap critico* (s)
- V_p è il flusso primario espresso in (ae/h)
- \bar{t}_a è la media dei gap accettati (s)
- σ_a^2 la varianza dei valori accettati (s^2).

Tale metodo a differenza di Raff e del metodo che si illustrerà nel successivo paragrafo è l'unico che per la stima del *gap critico* utilizza unicamente i gap accettati, trascurando di fatto quelli rifiutati (Guo, 2010).

1.2.2.4. Stima del *gap critico* con il metodo della Massima Verosimiglianza

Il metodo della Massima Verosimiglianza si basa su due gap: i *gap* accettati a_i e il *gap* rifiutato di ampiezza massima a_r .

Il *gap critico* di un utente si troverà compreso tra il massimo *gap* rifiutato e il suo *gap* accettato.

Con tale metodo si assume che il *gap critico* segue una distribuzione probabilistica di tipo lognormale (Troutbeck, 1992).

Si introduce la seguente notazione:

- a_i = logaritmo del gap accettato dall' i -esimo utente
- $a_i = \infty$ se nessun gap è stato accettato
- r_i = logaritmo del gap più grande gap rifiutato dall' i -esimo utente
- $r_i = 0$ se nessun gap è stato rifiutato
- μ = media della distribuzione dei logaritmi dei gap critici degli utenti
- σ^2 = varianza della distribuzione dei logaritmi dei gap critici degli utenti
- $f(\cdot)$ = funzione di densità di probabilità per la distribuzione normale

- $F()$ = funzione di distribuzione cumulativa per la distribuzione normale.

La probabilità che il *gap critico* di un generico utente cada tra r_i e a_i è data da:

$$F(a_i) - F(r_i)$$

La probabilità relativa ad un campione di n utenti che hanno *gap* accettato a_i e massimo *gap* rifiutato r_i , è data da:

$$\prod_{i=1}^n [F(a_i) - F(r_i)] \quad (34)$$

La funzione logaritmo di verosimiglianza è data da:

$$L = \sum_{i=1}^n \ln[F(a_i) - F(r_i)] \quad (35)$$

I parametri μ e σ^2 che massimizzano la funzione logaritmo sono ottenuti dalla soluzione delle seguenti equazioni:

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma^2} = 0 \quad (37)$$

cioè:

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\partial F(a_i)}{\partial \mu} - \frac{\partial F(r_i)}{\partial \mu}}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma^2} = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\partial F(a_i)}{\partial \sigma^2} - \frac{\partial F(r_i)}{\partial \sigma^2}}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \quad (39)$$

Si può dimostrare che :

$$\frac{\partial F(x)}{\partial \mu} = -f(x) \quad (40)$$

$$\frac{\partial F(x)}{\partial \sigma^2} = -\frac{x-\mu}{2\sigma^2} f(x) \quad (41)$$

Ciò permette di risolvere iterativamente le due equazioni:

$$\sum_{i=1}^n \frac{f(r_i) - f(a_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{(r_i - \hat{\mu})f(r_i) - (a_i - \hat{\mu})f(a_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \quad (43)$$

dove:

- $\hat{\mu}$ è una stima di μ
- $f(r_i), f(a_i), F(r_i), F(a_i)$ sono funzioni di μ e di σ^2 .

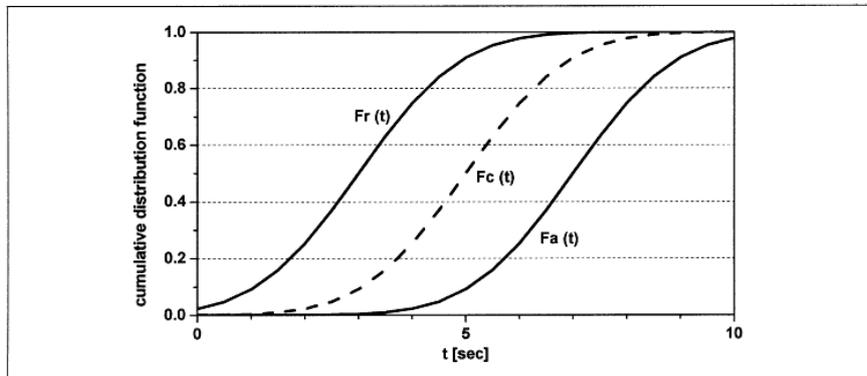


Fig. 8 - Distribuzione delle funzioni $F(a_i)$, $F(r_i)$ e $F(c_i)$ dei gap accettati, rifiutati e critici [Estimation of critical gaps and follow-up times at rural unsignalized intersections in Germany, Weinert]

Troutbeck (1992) ha sviluppato un processo iterativo per risolvere queste equazioni.

- con un valore iniziale di varianza σ^2_0 di tutti gli a_i e gli r_i si applica la (42) ottenendo μ_1 di prima approssimazione;
- con il valore μ_1 si applica la (43) ottenendo σ^2_1
- con σ^2_1 si applica la (42) per trovare μ_2 procedendo iterativamente fino a che non vi sia una convergenza di μ e σ^2 .

Ottenuta quindi la media μ della distribuzione degli intervalli critici e la loro deviazione standard σ^2 si possono ricavare la media del *gap critico* $E(t_c)$ e la varianza $Var(t_c)$ come segue:

$$E(t_c) = e^{\mu+0.5\sigma^2} \tag{44}$$

$$Var(t_c) = E(t_c)(e^{\sigma^2} - 1) \tag{45}$$

Il valore di gap critico ottenuto da tale metodo sarà pari alla sua media:

$$t_c = E(t_c) = e^{\mu+0.5\sigma^2} \tag{46}$$

1.2.2.5 Stima del gap critico con il metodo Logit

Polus et al. (2005) hanno dimostrato che il *gap critico* è influenzato dal tempo di attesa in coda detto *waiting time* in ingresso in rotatoria.

L'ipotesi iniziale è che più lunga è l'attesa da parte dell'utente nella selezione dei *gap*, più è disposto ad accettare un *gap* più piccolo e quindi effettuare la manovra con maggiore rischio.

Di conseguenza il *gap critico* tende ad accorciarsi all'aumentare del tempo di attesa.

Nelle rotatorie tuttavia tale effetto si può considerare trascurabile in quanto di norma il *waiting time* in un'intersezione di questo tipo è comunque minore rispetto che in una qualsiasi altra tipologia d'intersezione (Polus, 2005).

Si può esprimere la relazione in questo modo:

$$t_c = f(t_w) \quad (47)$$

in cui:

- t_c è il *gap critico* (s)
- t_w è il tempo di attesa in coda all'entrata o *waiting time* (s)

Il modello Logit proposto formula il problema di accettazione del *gap* come un modello di scelta binario in cui l'utilità di ciascuna alternativa (*gap* accettato o *gap* rifiutato) è dipendente dagli *headway* della corrente circolante ma anche da altri attributi come appunto il tempo di attesa in coda t_w , la corsia di destinazione ecc.

Il modello è definito in questo modo:

$$U_i = V_i + \varepsilon \quad (48)$$

con:

- U_i utilità percepita dal generico utente i
- V_i utilità sistematica
- ε residuo aleatorio

L'utilità sistematica V_i può essere scritta nel seguente modo:

$$V_i = \beta' * X \quad (49)$$

dove:

- X_i è il vettore degli attributi della generica alternativa i
- β è il vettore dei coefficienti.

Nel metodo Logit ε ha una distribuzione secondo Gumbel.

La probabilità di scegliere la generica alternativa i è così espressa:

$$p(i) = \frac{e^{(\mu V_i)}}{\sum_{i \in L} e^{(\mu V_i)}} \quad (50)$$

in cui:

- μ è il parametro di scala
- L è il campione delle possibili alternative.

Nel caso di un'entrata in rotatoria le due alternative saranno: accettare il gap o rifiutarlo.

Le componenti deterministiche delle funzioni di utilità sono definite come segue:

$$V_a = f(t_w, t_g) = \beta_1 + \beta_2 * t_w + \beta_3 * t_g \quad (53)$$

$$V_r = 0 \quad (51)$$

con:

- V_a componente deterministica dell'utilità del gap accettato
- V_r componente deterministica dell'utilità del gap rifiutato
- t_g durata dei gap (s)
- t_w tempo di attesa in corrispondenza della linea di arresto (s)
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ parametri stimati usando il metodo della Massima Verosimiglianza.

Nel modello Logit, la probabilità di scegliere una o l'altra alternativa dipende solo dalla differenza tra le utilità percepite.

Il *gap critico* con il seguente metodo è definito come quel gap che ha uguale probabilità di essere accettato o rifiutato, cioè è quello per il quale la probabilità di accettazione è del 50%.

1.2.2.6 Stima del gap critico proposto da Wu

Nel 2006 Wu ha proposto un nuovo metodo di stima del *gap critico* basato sulla probabilità di equilibrio tra i gap accettati e i gap rifiutati.

L'equilibrio è stabilito *macroscopicamente* ovvero dalle distribuzioni cumulative dei gap rifiutati ed accettati.

Si è dimostrato che tale metodo fornisce i medesimi risultati del metodo di Troutbeck (1992) cioè della Massima Verosimiglianza, ma soprattutto che fornisce in modo diretto la distribuzione empirica dei gap critici.

Questo nuovo modello non richiede specifiche condizioni, (come ad esempio coerenza ed omogeneità degli utenti) ed è di facile utilizzo.

La probabilità di equilibrio macroscopico dei *gap* accettati e rifiutati è definita nel seguente modo.

In relazione alla distribuzione della funzione di probabilità cumulata dei *gap* accettati $F_a(t)$ e quella dei *gap* rifiutati $F_r(t)$, la probabilità osservata che un *gap* di lunghezza t sia accettato è $1 - F_a(t)$ e se "non è accettato" è $F_a(t)$.

Mentre la probabilità osservata che un *gap* di lunghezza t sia rifiutato è $F_r(t)$, e se "non è rifiutato" è $1 - F_r(t)$.

In generale abbiamo che:

$$F_r(t) \neq 1 - F_a(t) \quad (52)$$

$$1 - F_r(t) \neq F_a(t) \quad (53)$$

in quanto un *gap* accettato nel flusso principale potrebbe non avere l'esatta ampiezza dell'effettivo *gap critico*.

Se con $F_{tc}(t)$ si definisce la distribuzione della funzione di probabilità cumulata dei gap critici, allora la probabilità $P_{r,tc}(t)$ che un *gap* di ampiezza t nel flusso principale venga rifiutato è $F_{tc}(t)$ e la probabilità $P_{a,tc}(t)$ che un *gap* di ampiezza t nel flusso principale venga accettato è $1 - F_{tc}(t)$.

Considerando le probabilità osservate sia delle accettazioni che dei rifiuti si stabilisce la probabilità di equilibrio in questo modo:

$$\begin{pmatrix} P_{r,tc}(t) \\ P_{a,tc}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_r(t) & F_a(t) \\ 1 - F_r(t) & 1 - F_a(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{r,tc}(t) \\ P_{a,tc}(t) \end{pmatrix} \quad (54)$$

Questa è l'esatta descrizione della condizione di equilibrio delle probabilità $P_{a,tc}(t)$ e $P_{r,tc}(t)$ come nel modello di Monte Carlo.

In questa formulazione:

- $\begin{pmatrix} P_{r,tc}(t) \\ P_{a,tc}(t) \end{pmatrix}$ è il vettore di stato
- $\begin{pmatrix} F_r(t) & F_a(t) \\ 1 - F_r(t) & 1 - F_a(t) \end{pmatrix}$ è la matrice di transizione.
- La condizione limite $P_{a,tc}(t) + P_{r,tc}(t) = 1$ viene mantenuta.

Ponendo $P_{r,tc}(t) = F_{tc}(t)$ e $P_{a,tc}(t) = 1 - F_{tc}(t)$ l'equazione (54) diventa:

$$\begin{pmatrix} F_{tc}(t) \\ 1 - F_{tc}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_r(t) & F_a(t) \\ 1 - F_r(t) & 1 - F_a(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{tc}(t) \\ 1 - F_{tc}(t) \end{pmatrix} \quad (55)$$

Risolvendo la (58) si ottiene che la distribuzione della funzione di probabilità cumulata dei gap critici $F_{tc}(t)$ diventa:

$$F_{tc}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} = 1 - \frac{1 - F_r(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} \quad (56)$$

La distribuzione della funzione di probabilità cumulata dei gap critici $F_{tc}(t)$ si mantiene sempre tra $F_r(t)$ e $F_a(t)$ come si può vedere in figura 9:

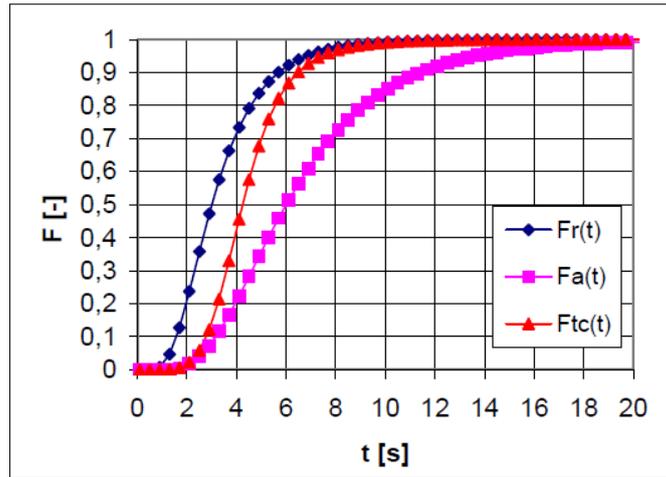


Fig. 9 - Andamento curve di $F_r(t)$, $F_a(t)$, $F_{tc}(t)$ [A new model for estimating critical gaps and its distribution at unsignalized intersection based on the equilibrium of probabilities, Wu N.]

In relazione alla definizione di Raff relativa al *gap critico* si ha che:

$$F_{tc}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t)+1-F_r(t)} = \frac{F_a(t)}{F_a(t)+F_a(t)} = 0.5 \quad (57)$$

Ciò dimostra che il *gap critico* stimato dal metodo di Raff rappresenta la misura della mediana ma non la media del *gap critico*.

2. Capacità di un ramo d'accesso di una rotatoria

In questo capitolo si vogliono illustrare i possibili utilizzi della teoria del gap-acceptance, al fine di mostrarne l'importanza in ambito applicativo. Il più importante è la determinazione della capacità di una manovra secondaria.

2.1 Definizione

Per capacità di un ramo di una rotatoria si intende, facendo riferimento alla definizione presa dall'*HCM 2000*, "il massimo numero di veicoli che possono ragionevolmente entrare in rotonda da uno qualunque dei suoi approcci durante un dato periodo di tempo sotto condizioni prevalenti di traffico e di geometria".

2.2 Metodi per il calcolo della capacità di un ramo

I metodi di stima della capacità conosciuti ed utilizzati oggi possono essere divisi, come già anticipato nell'Introduzione della tesi, in due grandi categorie:

- metodi empirici
- metodi teorico-empirici.

I metodi appartenenti alla prima categoria si basano su tecniche di regressione di dati osservati sperimentalmente: con l'ausilio di analisi di regressione, per esempio, si possono ricostruire le relazioni analitiche tra flussi entranti e circolanti tenendo in considerazione i parametri relativi alla geometria dell'intersezione.

In generale si esprimerà quindi la capacità in questo modo:

$$C_e = C_e(G, Q_e, Q_c)$$

con:

- C_e capacità entrante
- G caratteristiche geometriche
- Q_e flusso entrante
- Q_c flusso circolante

Tra i metodi empirici più noti si possono citare i seguenti:

- Metodo di Kimber
- Metodo SETRA
- Metodo CERTU
- Metodo di Bovy
- Metodo di Brilon

Alla seconda categoria cioè ai metodi teorici-empirici si riferiscono tutti quei metodi che si basano sulla teoria del *gap-acceptance*.

La teoria del *gap-acceptance*, partendo dall'osservazione dei comportamenti reali, cerca di interpretare e rappresentare il comportamento di selezione degli intervalli interveicolari da parte dei conducenti che si apprestano a compiere manovre di immissione e/o attraversamento a partire dal ramo secondario di un'intersezione regolata da segnale di stop o dare la precedenza.

L'obiettivo finale è quello di dare delle misure di capacità e ritardo associati alle manovre secondarie analizzate in funzione delle caratteristiche geometrico-funzionali dell'intersezione e soggettive dei conducenti.

In tal senso fondamentale è la definizione del *gap critico* o *headway critico* ovvero il minimo distanziamento temporale fra i veicoli della corrente circolante che consente ad almeno un veicolo della corrente secondaria di immettersi in rotatoria.

Fra i metodi appartenenti a questa categoria si può enunciare:

- Metodo Siegloch
- Metodo Harders
- Modello esponenziale proposto da Polus
- Metodo *HCM 2000*
- Metodo *HCM 2010*

2.3 Metodi basati sulla teoria del gap-acceptance

2.3.1 Metodo di Siegloch

Siegloch nel 1973 propose un modello per il calcolo della capacità in entrata, oggi giorno riferimento per le Linee Guida tedesche, basato su una distribuzione esponenziale negativa degli *headway* ed è espressa nel seguente modo:

$$Q_e = \frac{3600 * e^{-\frac{Q_c * t_0}{3600}}}{t_f} \quad (\text{ae/h}) \quad (16)$$

in cui:

- Q_c è il flusso circolante espresso in (ae/h)
- t_c è il gap critico in (s)
- t_f è il follow-up time espresso in (s)
- $t_0 = t_c - \frac{1}{2}t_f$

2.3.2 Metodo di Harders

L'espressione di calcolo della capacità in base alla relazione di Harders è:

$$Q_e = q_p * \frac{e^{-p(t_c)}}{1 - e^{-p t_f}} \quad (\text{ae/h}) \quad (17)$$

dove:

- Q_e è la capacità della corsia d'accesso espressa in (ae/h)
- $p = \frac{q_p}{3600}$
- q_p è la portata circolante espressa in (ae/h)
- t_c è il *gap critico* (s)
- t_f è il *tempo di follow-up time* (s)

2.3.3 Metodo Australiano

Gli studi condotti in Australia sono da attribuirsi ad Akçelik che negli anni ha approfondito i metodi per il calcolo della capacità in entrata delle rotatorie.

La sua formulazione, risalente al 1998, esprime la relazione tra il flusso entrante e il relativo flusso circolante il tutto legato ai parametri base della teoria del *gap-acceptance* cioè il *gap critico*, l'*headway* di saturazione tra i veicoli entranti, l'*headway* tra i veicoli circolanti.

Si definiscono dei valori sperimentali associati a:

<i>Minimum and maximum values of the follow-up headway and critical gap parameters for roundabouts</i>		
	Minimum	Maximum
Follow-up headway	1.2	4.0
Critical gap	2.2	8.0

Tab. 1 - Limiti superiori e inferiori del gap critico e del follow-up time [Roundabouts: capacity and performance analysis, Akçelik et al. (1998)]

Tale metodo introduce inoltre una classificazione del tipo di corsie d'entrata distinguendo corsie dominanti e sub dominanti.

In presenza, infatti, di due o più corsie d'entrata, una in genere domina sulle altre.

Si sceglie come corsia dominante quella interessata dal flusso maggiore.

L'equazione quindi della capacità si definisce come segue:

$$Q_e = \left(\frac{3600}{\beta}\right) \left[\left(1 - \frac{\Delta_c * Q_c}{3600}\right) + \left(\frac{1}{2}\beta\varphi_c \frac{Q_c}{3600}\right) \right] * e^{-\frac{\lambda(\gamma - \Delta_c)}{3600}} \quad (\text{ae/h}) \quad (18)$$

in cui:

- Q_e è la capacità della corsia d'accesso espressa in (ae/h)
- Q_c è la portata circolante espressa in (ae/h)
- γ è il *gap critico* espresso in (s/veic) e per un ramo d'entrata a due corsie vale:
- 3.5 s per corsie di ingresso a destra
- 4.5 per corsie di ingresso a sinistra.

Nello specifico si può calcolare nel seguente modo:

$$\gamma = \begin{cases} (3.6135 - 0.339w_L - 0.2775n_c - Q_c * 3.137 * 10^{-4})\beta & \text{con } Q_c \leq 1200 \text{ ae/h} \\ (3.2371 - 0.339w_L - 0.2775n_c)\beta & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (19)$$

dove :

- $1 \leq \frac{\gamma}{\beta} \leq 3$ e $\gamma_{min} \leq \gamma \leq \gamma_{max}$
- $\gamma_{min} = 2.2 \text{ s}$
- $\gamma_{max} = 8 \text{ s}$
- $w_L = \text{larghezza d'entrata media (m)}$

Δ è la spaziatura temporale tra i veicoli dei plotoni nell'anello definito come *headway* e vale 1.2 s per l'anello a due corsie.

ϕ_c è la percentuale di veicoli non implotonati nel flusso circolante espresso in decimali calcolata in due diversi modi a seconda che l'anello sia costituito da:

$$\text{una corsia } \phi_c = e^{-5\left(\frac{Q_{cr}+Q_{cl}}{3600}\right)}$$

$$\text{due corsie } \phi_c = e^{-3\left(\frac{Q_{cr}+Q_{cl}}{3600}\right)}$$

in cui:

- Q_{cr} è il flusso circolante all'anello in corsia di destra (ae/h)
- Q_{cl} è il flusso circolante all'anello in corsia di sinistra (ae/h).
- β è l'*headway di saturazione* tra i veicoli in entrata quando la coda si scarica, espresso in (s/veic) e per ingressi a due corsie vale:
 - o 3 s veicoli in corsia di destra
 - o 3.5 s per quelli in corsia sinistra.

β si differenzia anche in relazione al tipo di corsia in entrata, per la corsia dominante si calcola come segue:

$$\beta = \beta_d = \beta_0' - 3.94 * 10^{-4} * Q_c \quad \text{con } \beta_{min} \leq \beta_d \leq \beta_{max}$$

$$\beta_0' = 3.37 - 0.0208D_i + 0.889 * 10^{-4}D_i^2 - 0.395n_e + 0.388n_c \quad \text{con } 20 \leq D_i \leq 80$$

in cui :

- D_i diametro inscritto (m)
- n_e numero di corsie in entrata
- n_c numero di corsie circolanti
- $\beta_{\min} = 1.2$ s
- $\beta_{\max} = 4$ s

per la corsia subdominante si calcola come segue:

$$\beta = \beta_s = 2,149 + (0.5135\beta_d - 0.8735)r_{ds} \quad \text{con } \beta_d \leq \beta_s \leq \beta_{\max}$$

in cui :

- $r_{ds} = \frac{Q_d}{Q_s}$ percentuale di veicoli in entrata che usano entrambe le corsie
- n_e numero di corsie in entrata
- n_c numero di corsie circolanti
- $\beta_{\min} = 1.2$ secondi
- $\beta_{\max} = 4$ secondi

λ è il fattore di smorzamento della distribuzione dei gap temporali dei veicoli all'anello, pari al flusso circolante Q_c .

In figura 10 e in figura 11 si mostrano i grafici attraverso i quali, nel caso non sia richiesto un alto grado di accuratezza, si può stimare la capacità della rotatoria.

Essi si basano sulla relazione tra la capacità d'ingresso e il flusso circolante per diversi diametri esterni della rotatoria sia nel caso di corsia singola e sia nel caso di doppia corsia.

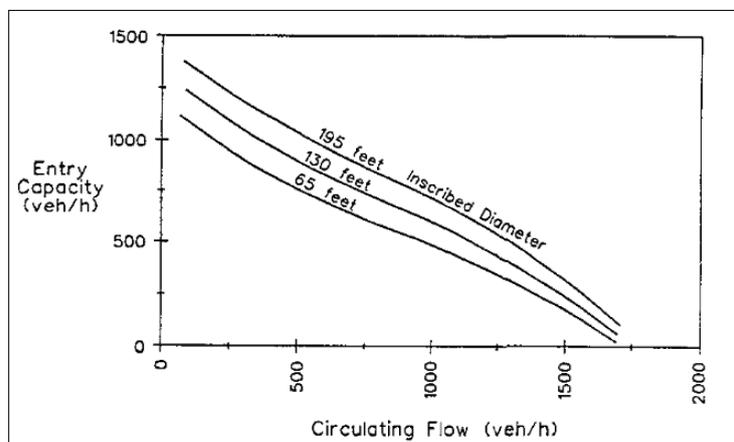


Fig. 10 - Capacità all'ingresso per una rotatoria a corsia singola [National Cooperative Highway Research Program, Synthesis 264].

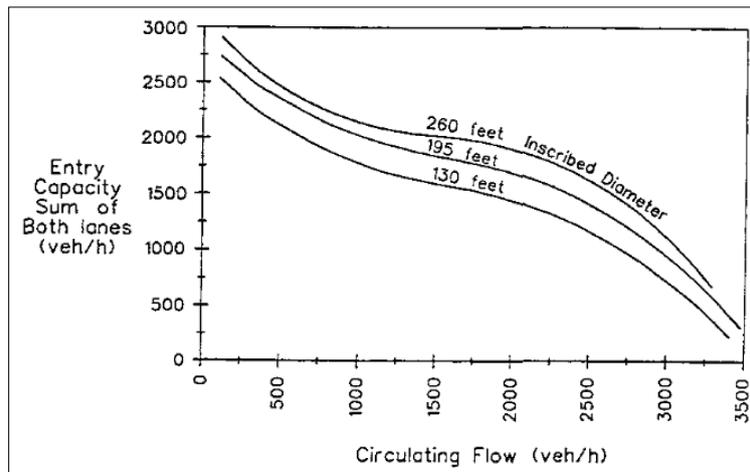


Fig. 11 - Capacità all'ingresso per una rotatoria a più corsie [National Cooperative Highway Research Program, Synthesis 264].

2.3.4 Metodo Tedesco

Il manuale tedesco propone un'equazione per il calcolo della capacità in rotatoria basata sull'equazione di Tanner per le intersezioni a raso e successivamente adottata da Wu nelle rotatorie.

La capacità in entrata è funzione del flusso circolante, del numero di corsie in ingresso e all'anello e dei parametri del *gap-acceptance* intesi come *gap critico*, *follow-up time* nel ramo in entrata e *gli headway* nell'anello circolante.

L'equazione della capacità (20) è calcolata misurando i volumi di flusso in autovetture equivalenti (ae/h) associando alle diverse categorie veicolari i seguenti coefficienti di omogeneizzazione:

- 0.5 per veicoli a due ruote
- 1.5 per veicoli pesanti
- 2 per veicoli pesanti articolati
- ed è qui proposta:

$$Q_e = 3600 * \frac{n_e}{t_f} * \left(1 - \frac{\Delta * Q_c}{3600 * t_f}\right)^{n_c} * e^{-\left[\frac{Q_c}{3600} * \left(t_c - \frac{t_f}{2} - \Delta\right)\right]} \quad (\text{ae/h}) \quad (20)$$

con:

- Q_e capacità in ingresso (ae/h)
- Q_c flusso circolante (ae/h)
- n_c numero di corsie all'anello con la condizione che $n_c \leq n_e$
- n_e numero di corsie nel ramo entrante
- Δ tempo di *follow-up time* nell'anello circolante
- t_f tempo di *follow-up time* in entrata
- t_c gap critico

A tale equazione (20) è associato un grafico, riportato in figura 12 che mostra le curve di capacità entranti a seconda del tipo di geometria del ramo entrante e dell'anello:

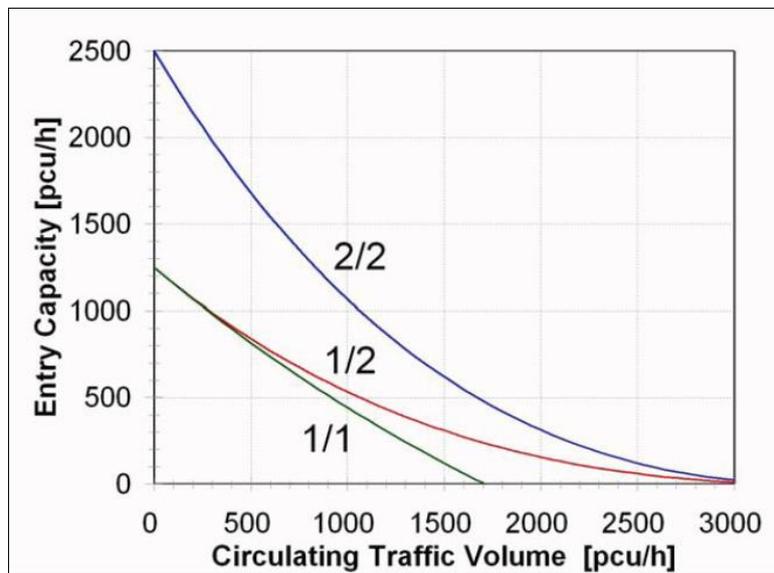


Fig. 12 - Capacità entranti in rotatoria calcolate sulla base del German Highway Capacity Manual (HSB 2001)

Da tale grafico si può osservare come tra tutte le curve, nel caso di una rotatoria ad una corsia in ingresso e una sola corsia nell'anello circolante la curva presenta un andamento pressoché lineare discostandosi dall'andamento tipicamente esponenziale negli altri casi.

Tale metodo è stato recentemente revisionato e successive calibrazioni hanno dimostrato molto chiaramente che un andamento lineare non era coerente a rappresentare i dati sperimentali osservati.

Si è quindi passati ad una semplificazione dell'equazione (20) alla seguente equazione :

$$Q_e = 3600 * \frac{n_e}{t_f} * e^{-\left[\frac{Q_c}{3600} * \left(t_c - \frac{t_f}{2}\right)\right]} \quad (\text{ae/h}) \quad (21)$$

che è l'equazione di Sieglöch, di cui nel seguito si riporta il grafico in figura 13:

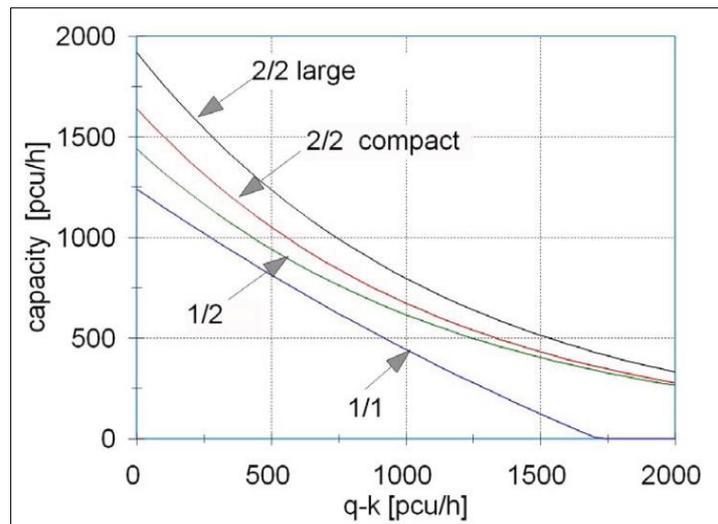


Fig. 13 - Capacità entranti in rotonda in relazione al numero di corsie in ingresso e all'anello (HSB 2001)

In relazione alla configurazione geometrica della rotonda, in relazione al numero di corsie in ingresso e all'anello si sono ottenuti sperimentalmente i valori associati ai parametri di *gap-acceptance* presenti in tabella 2:

	no. of circulating lanes	no. of entry lanes	n_z	t_g	t_f	t_{\min}	valid below q_k
1-lane	1	1	1	4.1	2.9	2.1	1600
2-lane compact RA (no lane marking on the circle)	2	1	1	4.3	2.5	0	1600
		2	1.14	4.3	2.5	0	1600
2-lane large RA (with marked lanes)	2	1	1	4.3	2.5	0	2000
		2	1.6	4.1	3.0	0	2500

Tab. 2 - Riepilogo parametri fondamentali per il calcolo della capacità in ingresso (HSB 2001)

2.3.5 Modello esponenziale proposto da Polus

Polus (2003) in una serie di studi compiuti in alcune rotatorie in Israele propose un modello di capacità di tipo esponenziale per la capacità in entrata.

L'equazione che individuò teneva conto sia della geometria e sia dei gap critici come parametri indipendenti per il calcolo della capacità in entrata

L'espressione che ne derivò è la seguente :

$$V_e = A * e^{-B*t_c*V_c} \quad (\text{ae/h}) \quad (22)$$

in cui:

- V_e rappresenta la capacità in entrata all'approccio (ae/h)
- V_c rappresenta la capacità circolante in (ae/h)
- t_c è il *gap critico* in (s)
- A è il parametro legato alla capacità in entrata quando il volume circolante è molto basso.

Quando infatti i volumi di flusso sono molto bassi , la capacità in entrata è determinata principalmente dalla geometria, nello specifico dal diametro D dell'isola centrale, ciò influenza il comportamento degli utenti che, con più o meno agilità, entrano liberamente in rotatoria senza alcun disturbo.

Dalla calibrazione ottenuta stabilì che tale parametro fosse definito come:

$$A = 396 * D^{0.31}$$

B e il t_c sono legati alla curvatura del modello, e danno una misura dell'impatto del flusso circolante sul flusso in entrata.

La curvatura osservata nelle diverse rotatorie studiate da Polus, non ha dimostrato valori diversi da una all'altra perciò decise di considerarne una media pari a 0.00095 da cui estrapolò il parametro B espresso come:

$$B = \frac{0.00095}{t_c}$$

2.3.6 Metodo proposto nell' HCM 2000

Tra i metodi semiprobabilistici si annovera il metodo dell' *Highway Capacity Manual (HCM)* pubblicato nel 2000 dopo alcune precedenti edizioni.

A differenza dei metodi empirici che richiedevano un certo numero di rotatorie congestionate per la calibrazione, i modelli basati sulla teoria del *gap-acceptance* si applicano in rotonde non congestionate in cui il flusso si può considerare "di morbida".

Inoltre tale procedura prevede che il funzionamento di ciascun ramo della rotatoria poteva essere analizzato indipendentemente dagli altri rami utilizzando informazioni relative ad un solo braccio.

Poiché i sistemi a rotatoria inducono i guidatori ad effettuare una sorta di manovra di svolta a destra, ci si aspetta che le caratteristiche di *gap-acceptance* legate ai guidatori siano simili a quelle dei guidatori che attraversano una semplice intersezione a T.

La metodologia per il calcolo della capacità di una rotatoria espressa come funzione esponenziale (J.Cheng, 2008) si fonda sui due fondamentali parametri di base:

- il *critical gap*, t_c (s)
- il *follow-up time* t_f (s).

I flussi di traffico che vengono considerati nel metodo *HCM 2000* per il calcolo della capacità sono illustrati in figura 14.

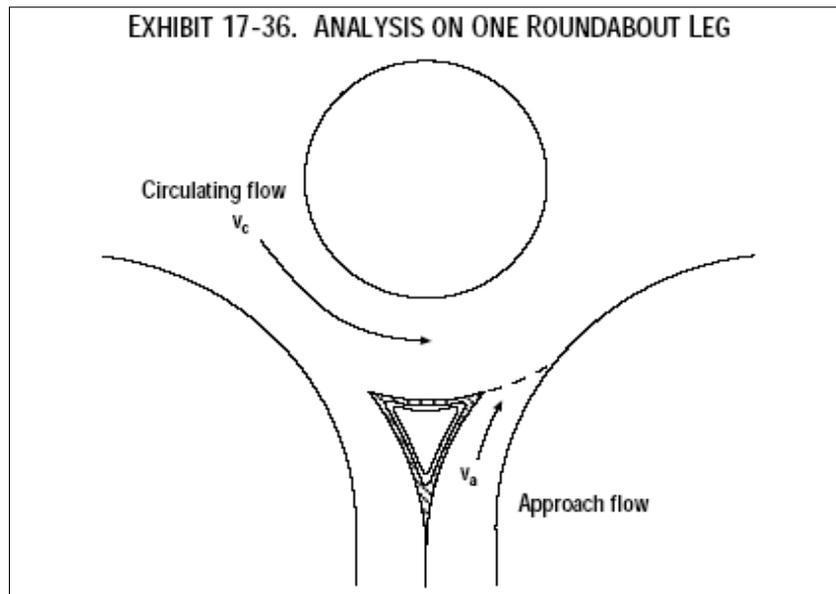


Fig. 14 - Flusso circolante V_c e flusso entrante V_e in un ramo di una rotatoria [HCM 2000]

in cui:

- V_c è flusso circolante espresso in (ae/h)
- V_e è flusso entrante espresso in (ae/h).

La stima della capacità di una rotatoria è data dalla seguente equazione:

$$C_a = \frac{V_c * e^{-\frac{V_c * t_c}{3600}}}{1 - e^{-\frac{V_c * t_f}{3600}}} \quad (\text{ae/h}) \quad (23)$$

in cui:

- C_a è la capacità del ramo d'approccio espresso in (ae/h)
- V_c è il flusso veicolare di conflitto definito come (ae/h)
- t_c è il *gap critico* espresso in (s)
- t_f è il *follow-up time* o tempo di scalamento in coda espresso anche quest'ultimo in (s).

Studi sperimentali effettuati negli Stati Uniti hanno indicato un range di validità per questi ultimi due valori.

I limiti accettabili sono indicati in tabella 3 sottostante in cui :

- *upper bound* sta per limite superiore
- *lower bound* sta per limite inferiore

	Critical Gap (s)	Follow-Up Time (s)
Upper bound	4.1	2.6
Lower bound	4.6	3.1

Tab. 3 - Valori di gap critico e di follow-up time [HCM 2000]

La relazione tra la capacità dell'approccio (*Approach Capacity, C_a*) e il flusso circolante (*Conflicting flow, V_c*) in riferimento ai limiti superiori e inferiori dei valori di *gap critico* e di *follow-up time* è qui sotto riportata:

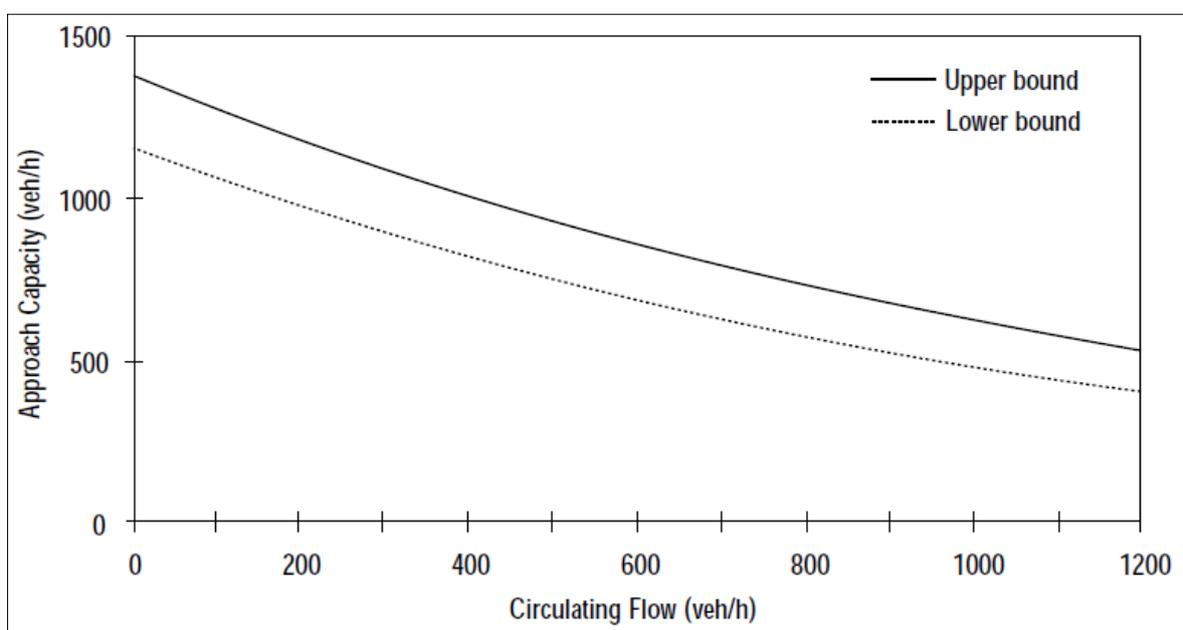


Fig. 15 – Metodo HCM 2000. Fuso accettabile di capacità del ramo d'accesso in rotatoria in funzione del flusso circolante. [HCM 2000].

I flussi circolanti sono calcolati su intervalli di 15 minuti.

Nel passare da un'intersezione a raso a quattro rami ad un'intersezione a rotatoria è necessario, nella pratica, convertire le manovre di svolta nel flusso circolante.

Se facciamo riferimento alla figura 16, e consideriamo il flusso circolante per il ramo a sud, cioè il ramo con i volumi di flusso 7, 8, 9 in entrata, esso è dato dalla somma dei seguenti volumi:

$$V_c = V_1 + V_2 + V_{10} \quad (24)$$

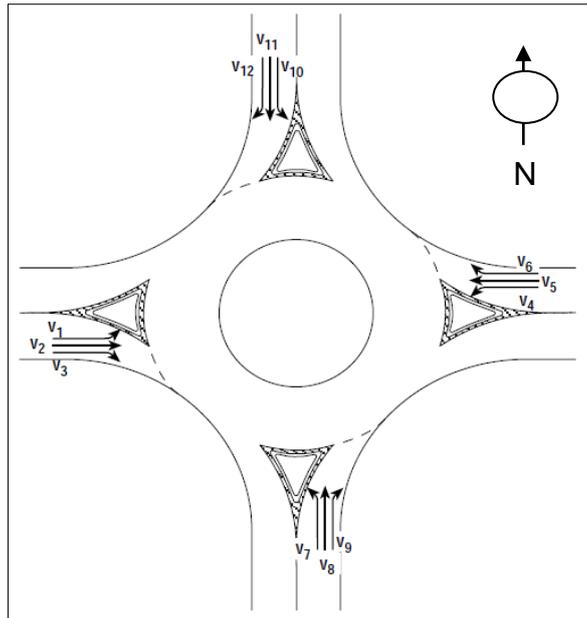


Fig. 16 - Definizioni dei flussi di traffico [HCM 2000]

Le rotonde possono essere solitamente usate per facilitare le inversioni a U i cui flussi interessati a tale manovra devono essere inclusi nel calcolo dei volumi come manovre vere e proprie.

La metodologia prevista nel manuale americano *HCM 2000* si riferisce a rotonde a singola corsia.

Esperienze sperimentali relative a rotonde a più corsie negli Stati Uniti sono insufficienti a supportare una procedura di analisi.

Negli altri paesi che contano invece esperienze di studio di tale genere hanno dimostrato come la capacità aumenta con l'aumentare del numero di corsie in entrata e nella corona circolare anche se non vi è rapporto lineare.

Un raddoppio della corsia in entrata non corrisponde ad un raddoppio della capacità.

Vi è un limite definito oltre al quale non è accettata l'applicazione del metodo: i flussi circolanti non devono superare i 1200 veic/h.

La procedura *HCM* prevede degli step seguire che sono qui riassunti:

1. definire la geometria e le condizioni di traffico per la rotatoria da studiare
2. definire i flussi di entrata per ciascun ramo dell'intersezione
3. determinare il volume di flusso circolante in relazione ad ogni braccio entrante.

Se in tale passaggio si ottengono volumi eccedenti il limite stabilito di 1200 veic\h si ferma la procedura

4. determinare la capacità d'entrata con l'Equazione (23).
5. Infine si studia la performance generale della rotatoria in relazione ai rapporti di v/c dai cui si ricavano informazioni relative alla lunghezza della coda per definire successivamente il *Livello di Servizio (LOS)*.

2.3.7 Metodo proposto nell' HCM 2010

La versione successiva al manuale del 2000 che è stata pubblicata un decennio più tardi con *l'Highway Capacity Manual 2010* propone un modello esponenziale per il calcolo della capacità per rotatorie a una o a due corsie in entrata.

L'*HCM 2010* afferma che tale modello nasce da una combinazione di un semplice modello di regressione lineare con un modello di *gap-acceptance*.

In altre parole il modello può essere visto contemporaneamente come un modello empirico, basato su regressione esponenziale legato alle caratteristiche geometriche e ai parametri di performance e un modello di *gap-acceptance* cioè un modello analitico fondato su misure legate al comportamento umano (Akçelik, 2010).

Come nella versione precedente la capacità in entrata si basa su i due valori di flusso, come in figura 14:

- V_e flusso entrante espresso in (ae/h)
- V_c flusso circolante espresso in (ae/h)

Il metodo propone diversi valori di capacità a seconda della tipologia di rotatoria cioè in base al numero di corsie in entrata e al numero di corsie all'anello.

L'espressione generale si può scrivere in questo modo:

$$C_e = A * e^{-B*V_c} \quad (\text{ae/h}) \quad (25)$$

in cui:

- $A = \frac{3600}{t_f}$ è definito anche come *tasso di saturazione*
- $B = \frac{t_c - \frac{1}{2} * t_f}{3600}$.

Per tali parametri come per quelli legati al *gap-acceptance* (t_c e t_f) l'*HCM 2010* propone dei valori riassumibili nella seguente tabella 4:

	A	B	t _f	t _c	t ₀	t _f / t _c
Single-lane circulating stream (n_c = 1)						
Single-lane entry (n _e = 1, n _c = 1)	1130	0.00100	3.19	5.19	3.60	0.615
Multi-lane entry (n _e > 1, n _c = 1): apply to all lanes	1130	0.00100	3.19	5.19	3.60	0.615
Multi-lane circulating stream (n_c > 1)						
Single-lane entry (n _e = 1, n _c > 1) *	1130	0.00070	3.19	4.11	2.52	0.776
Multi-lane entry (n _e > 1, n _c > 1)						
Dominant lane (Right lane for US driving)	1130	0.00070	3.19	4.11	2.52	0.776
Subdominant lane (Left lane for US driving)	1130	0.00075	3.19	4.29	2.70	0.744

n_e = number of entry lanes, n_c = number of circulating lanes.

Tab. 4 - Parametri dei modelli per il calcolo della capacità in rotonda [HCM 2010].

Di questo modello Akçelik nel 2010 ha proposto una modifica nella formulazione della capacità per una rotonda ad una corsia in ingresso esprimendola in questo modo:

$$Q_g = f_{HVe} * f_P * f_A * A * e^{-\left(\frac{B}{f_B}\right) * q_m} \quad (\text{ae/h}) \quad (26)$$

in cui:

- $A = \frac{3600}{t_f}$
- $B = \frac{t_c - \frac{1}{2} * t_f}{3600}$

f_{hve} è il fattore legato ai veicoli pesanti per la capacità in entrata calcolato come:

$$f_{HVe} = \frac{1}{[1 + (E_{HV} - 1) * P_{HV}]}$$

con:

- E_{HV} che definisce l'equivalente dei passeggeri/veicolo per i veicoli pesanti normalmente pari a 2.
- P_{HV} che è la percentuale di veicoli pesanti sul totale del flusso in entrata.
- f_p è il fattore legato ai pedoni per considerare l'effetto di impedenza creato dai pedoni che disturbano con il loro attraversamento l'entrata in rotatoria.
- f_A è un fattore di aggiustamento ambientale del parametro A
- f_B è il fattore di aggiustamento ambientale del parametro B
- q_m è il flusso circolante espresso in (ae/h)
- t_f è il *follow-up time* espresso in (s)
- t_c è il *gap critico* (s).

3. I casi di studio

Sono stati individuati due casi di studio, entrambi nel Comune di *Mirano* (VE).

Il primo verrà denominato come rotatoria “Mirano Taglio Sinistro”, l’altro come rotatoria “Mirano Scaltenigo”.

Viene qui di seguito proposta una vista aerea in cui sono localizzate le due rotatorie, per contestualizzarle all’interno del Comune di Mirano.

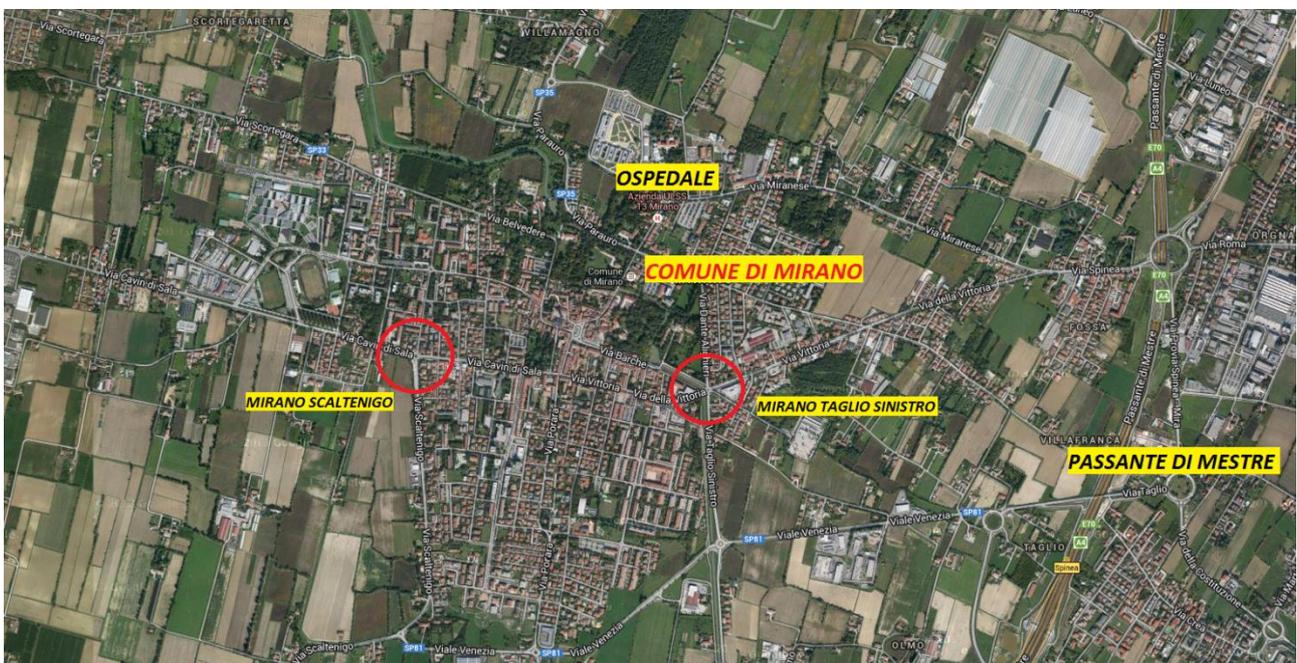


Fig. 17 – Vista aerea delle due rotatorie oggetto di studio.

3.1 Rotatoria Mirano Taglio Sinistro

Trattasi della rotatoria situata nella zona centrale del paese, nei pressi del teatro.
Regola i flussi tra: via Dante, via della Vittoria e via Taglio Sinistro.

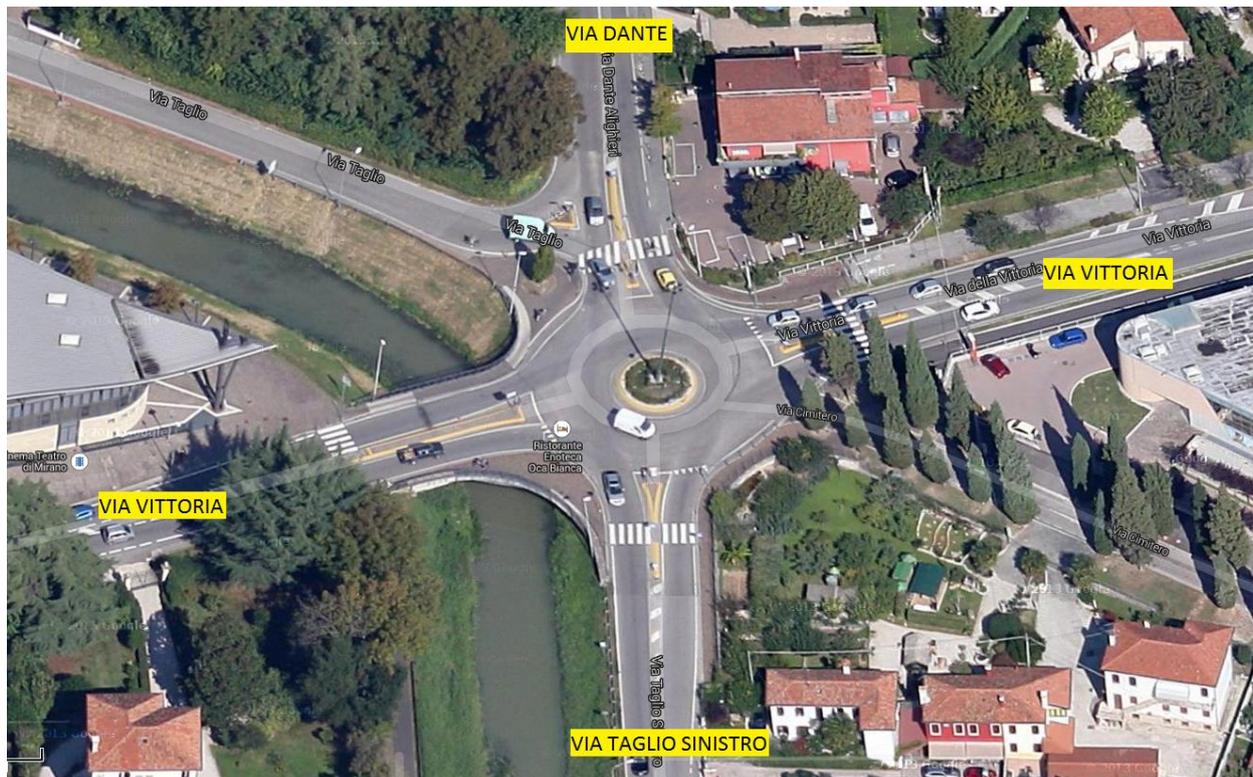


Fig. 18 – Rotatoria Mirano Taglio Sinistro.

Le maggiori criticità nelle ore di punta si hanno in via Taglio Sinistro, dove si ha formazione di coda, e in via della Vittoria, ramo est.

In questo lavoro si è studiato quanto accade in via Taglio Sinistro. In particolare modo l'analisi ha interessato i modelli basati sulla teoria del gap-acceptance, concentrando l'attenzione sulla stima di un indicatore fondamentale impiegato in tale modello ovvero il *gap critico t_c* .



Fig. 19 – Vista rotatoria da Via della Vittoria.



Fig. 20 – Vista approccio via Taglio Sinistro.



Fig. 21 – Via Taglio Sinistro.

3.2 Strumentazione e metodologia di rilievo

Tra le possibili strumentazioni oggi disponibili al fine di ottenere i dati necessari allo studio in esame si è scelto di utilizzare i seguenti strumenti:

- Videocamere
- Radar "Viacount Serie 2"

3.2.1 Videocamere

Le videocamere appartengono alla categoria dei sensori di rilevazione cosiddetti aerei per differenziarli da quelli intrusivi. Entrambi i sensori, siano essi aerei o intrusivi permettono di rilevare alcuni parametri della circolazione utili a diversi studi.

La differenza sostanziale tra le due categorie risiede nella tipologia d'installazione: i sensori aerei infatti sono posizionati lateralmente alle corsie o al di sopra della via senza ostacolare la circolazione, perciò non essendo posizionati sulla pavimentazione non richiedono né blocchi temporanei del traffico né l'intervento degli organi di Polizia per la loro installazione.

Le videocamere, usualmente, permettono di rilevare il numero di passaggi e l'istante temporale in cui avvengono, la lunghezza di veicoli, la categoria veicolare e, con opportuni accorgimenti, la velocità. Al fine di questo studio l'utilizzo delle videocamere ha permesso di rilevare altresì:

- i parametri di tempo, nello specifico il tempo di *follow-up time*, e le grandezze utili per la stima dell'*intervallo critico* t_c ;
- le traiettorie percorse dai veicoli allo scopo di individuarne i punti di conflitto.

Come ogni strumento agli aspetti positivi si affiancano anche degli aspetti negativi come ad esempio la quantità di tempo che è servito per estrapolare i dati: è stato infatti necessario un numero cospicuo di ore di osservazione e codifica dei filmati.

Il posizionamento, l'installazione e il numero necessario di videocamere non è standard ma ovviamente varia caso per caso. Parametri su cui viene fatta una scelta piuttosto che

un'altra sono normalmente la geometria (se la rotatoria è di grande o piccolo diametro), lo scopo dell'analisi (a seconda dei parametri da analizzare ed estrapolare) e non ultimo il contesto geografico e fisico.

Per la rotatoria oggetto di studio, allo scopo di rilevare il flusso su tutta la rotatoria e contemporaneamente analizzare le traiettorie dei veicoli circolanti ed entranti si è scelto di utilizzare tre videocamere. L'installazione è stata resa possibile dalla presenza in loco di alcuni piloni della luce che hanno permesso di garantire così un supporto al palo su cui si sono successivamente installate le videocamere.

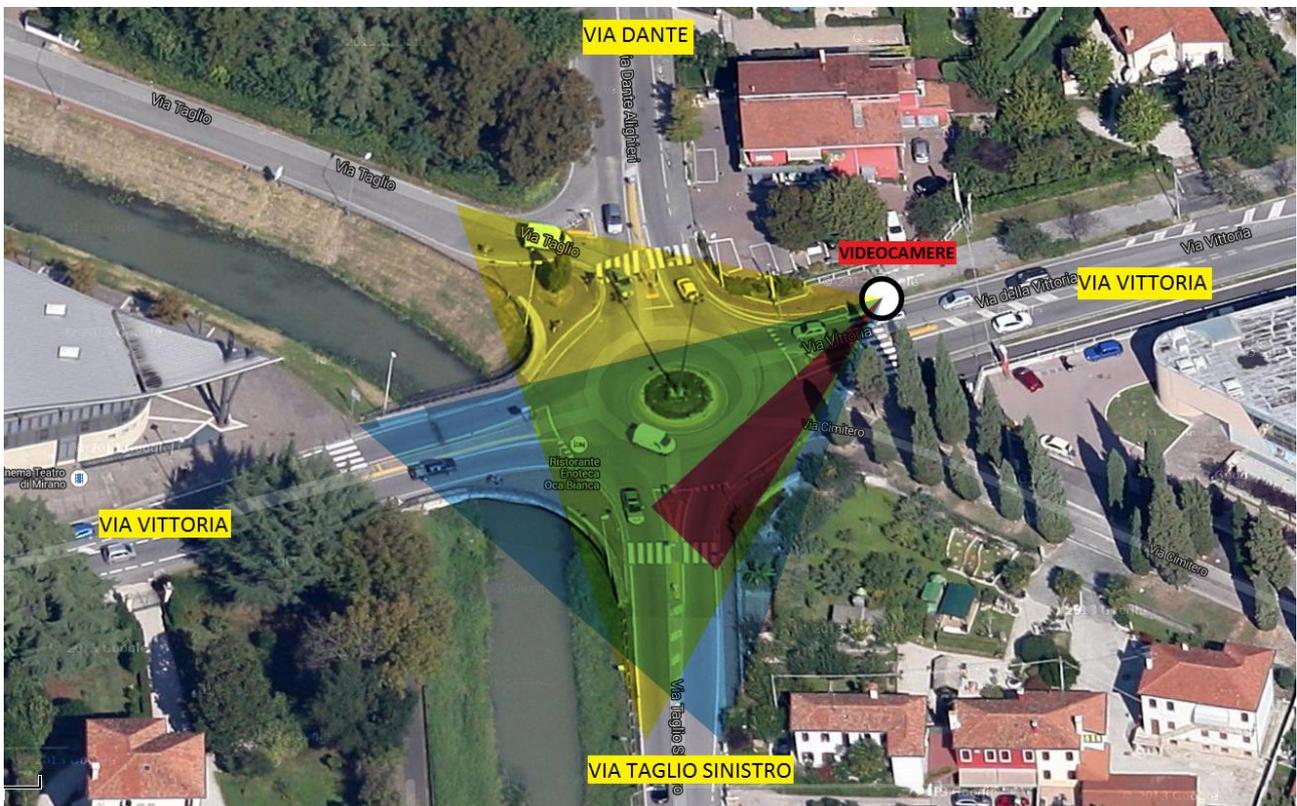


Fig. 22 – Coni visivi delle videocamere installate.

Nella fig.22 si può osservare come la videocamera n.1 sia stata installata in modo da riprendere l'intera rotatoria, la n.2 in modo da riprenderne metà, focalizzandosi sul lato di via Taglio Sinistro. Lo scopo è poter visualizzare i veicoli circolanti sull'anello, e quelli in ingresso da via Taglio Sinistro. La n.3 invece ha uno zoom sull'approccio di via Taglio Sinistro, per poter effettuare la codifica di valle, la cui utilità sarà spiegata nei prossimi capitoli.



Fig. 23 – Palo con videocamere, vincolato al pilone della luce.

Sono state utilizzate inoltre altre due videocamere: una in corrispondenza della sezione di monte di via Taglio Sinistro, posizionata su cavalletto, con lo scopo di riprendere il passaggio dei veicoli in tale sezione, e unitamente alla videocamera n.3 poter ricavare ulteriori parametri sulla coda formatasi. L'altra è una videocamera mobile, che seguiva l'andamento della coda lungo via della Vittoria.



Fig. 24 – Videocamera di monte per il rilievo della coda in via Taglio Sinistro.

3.2.2 Radar

Al fine di determinare la velocità tenuta dai veicoli lungo il tratto di ingresso in rotatoria (da sud a nord) sono stati installati 4 sensori *radar* ai margini della carreggiata. Questi dispositivi sono “*Viacount serie 2*” con le seguenti caratteristiche:

- radar doppler integrato con frequenza di lavoro a 24,125 Ghz,
- possibilità di rilevare informazioni in entrambe le direzioni,
- lo strumento è collaudato secondo gli standard EN 300440 e EN 301489 e omologato in Svizzera e Norvegia (paesi dell'Unione Europea dove non vi sono particolari limitazioni riguardanti il loro utilizzo),
- possibilità di classificare fino a 10 classi di velocità (con un range tra 1 e 255 km/h) e 6 classi di veicoli,
- possibilità di memorizzare informazioni di 360.000 veicoli (4 MB) ma espandibili a 8 MB,
- piccolo, compatto, facilmente trasportabile e flessibile nell'uso,
- durata della batteria che può arrivare a due settimane in funzione del consumo di corrente nel caso di 20 mA quando non sta operando e di 50 mA nel caso peggiore, questo grazie alla modalità risparmio energetico,
- impermeabilità all'acqua, dovuta al design e alla sua progettazione, con fori per evacuare la condensa posizionati alla base della scatola che contiene tutto l'apparato,
- non richiede un'elevata manutenzione se non il cambio delle guarnizioni degli sportelli e la pulizia risulta facile da eseguire con acqua e sapone,
- errori di misurazione (sottostima del numero di veicoli) dovuto al fatto che alcuni di questi transitano nella seconda corsia e possono essere mascherati da altri presenti nella prima.

In fase di installazione si rende necessario assegnare opportuni valori ad alcuni parametri nel dispositivo (calibrazione):

- ora del sistema con una precisione del secondo, data del sistema con formato 01.01.01, l'orologio funziona anche se la batteria principale è scarica,
- si deve impostare il giorno e l'ora d' inizio della rilevazione con possibilità di posticipare l'inizio di una settimana utilizzando la modalità risparmio energetico,

- scegliere la direzione rilevata (in arrivo, in partenza o bidirezionale),
- fattore di correzione da apportare alla velocità dovuto al fatto che può esserci un angolo diverso da quello definito dalla casa costruttrice come ottimale fra l'asse del moto e quello del fascio,
- raggio d'azione del radar settato di fabbrica pari al 25 %, da modificare solo se vi è il rischio di riflessioni da parte di veicoli parcheggiati o altri ostacoli.

Bisogna fare attenzione che nella fase di installazione vera e propria si verifichino le seguenti condizioni:

- visuale sgombra da ostacoli quali pali, alberi che possono falsare le misure a causa del riflesso,
- da posizionare solo in rettilineo e non in curva,
- posizione 1 (laterale ad altezza veicolo):
 - o altezza da terra compresa tra 50 cm e 1,00 m,
 - o parallelo alla direzione di marcia,
 - o distanza dalla carreggiata compresa tra 50 cm e 3,00 m,
 - o il “naso” della scatola orientato a 45° verso il flusso in arrivo,
 - o il rilevatore interno posto in posizione verticale,
- posizione 2 (laterale e sospesa):
 - o posizionato più in alto dei veicoli con altezza compresa tra 2,00 e 3,00 m,
 - o parallelo alla direzione di marcia,
 - o il rilevatore interno deve essere posizionato a 20°.

Questi radar sono stati posizionati, seguendo le indicazioni appena date, sui pali della luce o altri supporti verticali presenti a bordo strada, partendo da nord (rotatoria) e proseguendo verso sud.

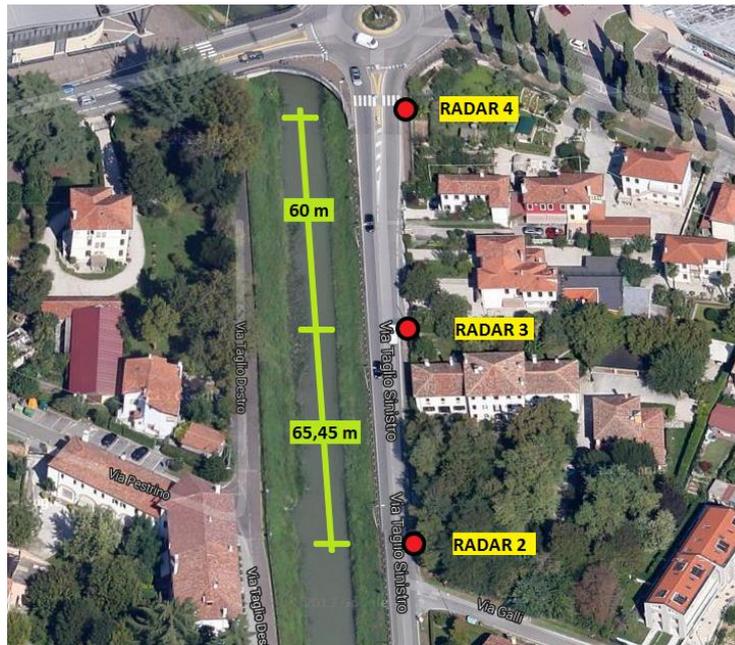


Fig. 25 – Posizione dei radar in via Taglio Sinistro.



Fig. 26 – Posizione dei radar in via Taglio Sinistro.



Fig. 27 – Radar n.4 nei pressi dell'approccio.



Fig. 28 – Radar n.3



Fig. 29 – Radar n.2



Fig. 30 – Radar n.1

3.3 Rilievo geometrico

E' stato effettuato un rilievo geometrico al fine di ottenere tutti i dati necessari per la rappresentazione della rotatoria.

Tale rilievo è stato effettuato con i seguenti strumenti:

- cordella metrica
- distanziometro laser
- ruota metrica

Dal punto di vista geometrico la rotatoria presenta le seguenti caratteristiche generali:

- Diametro esterno: 28 m
- Diametro isola centrale: 10 m
- Larghezza anello circolante: 9,50 m
- Numero corsie anello: 1

Nello specifico il ramo sud (via Taglio Sinistro) è costruito sulla base di tali elementi geometrici:

- Numero corsie in ingresso: 1
- Larghezza ramo d'ingresso: 3,50 m
- Angolo d'entrata tra flusso entrante e circolante: 21°

3.4 Rotatoria Mirano Scaltenigo

Trattasi della seconda rotatoria oggetto di studio.

Essa regola i flussi tra: via Cavin di Sala, via Scaltenigo e via Cesare Battisti.



Fig. 31 – Vista aerea della rotatoria Mirano Scaltenigo.

Le maggiori criticità nelle ore di punta si hanno in via Scaltenigo, dove si ha formazione di coda, e in via Cavin di Sala, ramo Ovest.

Lo studio si è focalizzato su via Scaltenigo. In particolare modo l'analisi ha interessato i modelli basati sulla teoria del gap-acceptance, concentrando l'attenzione sulla stima di un indicatore fondamentale impiegato in tale modello ovvero il *gap critico t_c* .



Fig. 32 – Vista rotatoria da via Scaltenigo.



Fig. 33 – Vista rotatoria da via Cavin di Sala.



Fig. 34 – Via Scaltenigo.

3.5 Strumentazione e metodologia di rilievo

Tra le possibili strumentazioni disponibili al fine di ottenere i dati necessari allo studio in esame si è scelto di utilizzare i seguenti strumenti:

- Videocamere
- Radar "Viacount Serie 2"

3.5.1 Videocamere

Allo scopo di rilevare il flusso su tutta la rotatoria e contemporaneamente analizzare le traiettorie dei veicoli circolanti ed entranti si è scelto di utilizzare tre videocamere. L'installazione è stata resa possibile dalla presenza in loco di alcuni piloni della luce che hanno permesso di garantire così un supporto ai pali su cui si sono successivamente installate le videocamere.

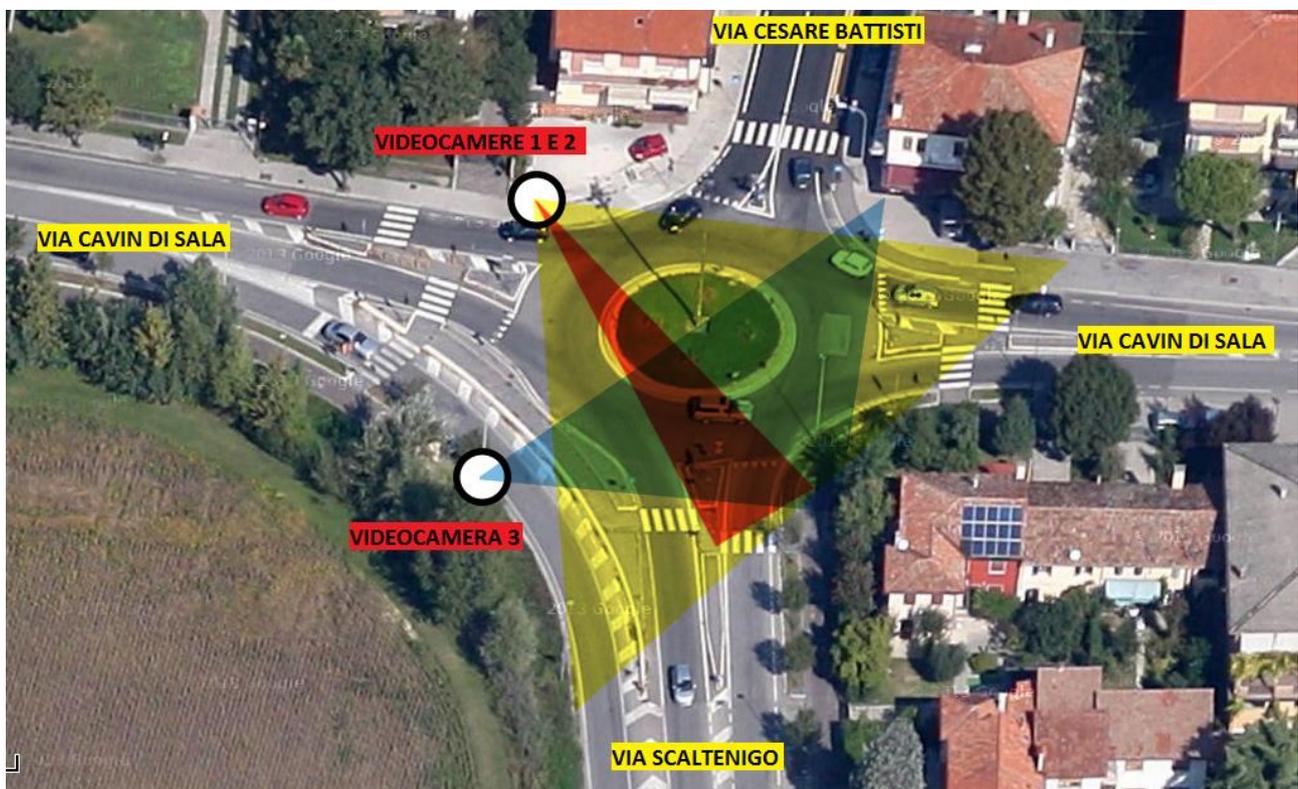


Fig. 35 – Coni visivi delle videocamere installate.

Nella fig.19 si può osservare come la videocamera n.1 sia stata installata in modo da riprendere l'intera rotatoria, la n.3 in modo da riprenderne metà, focalizzandosi sul lato di via Scaltenigo. Lo scopo è poter visualizzare i veicoli circolanti sull'anello, e quelli in ingresso da via Scaltenigo. La n.2 invece ha uno zoom sull'approccio di via Scaltenigo, per poter effettuare la codifica di valle, la cui utilità sarà spiegata nei prossimi capitoli.



Fig. 36 – Pali con videocamere, vincolati ai piloni della luce.



Fig. 37 – Videocamera 3.

Sono state utilizzate inoltre altre due videocamere: una alla sezione di monte di via Scaltenigo, posizionata su cavalletto, con lo scopo di riprendere il passaggio dei veicoli in tale sezione, e unitamente alla videocamera n.2 poter ricavare ulteriori parametri sulla coda formatasi. L'altra è ugual modo una videocamera posizionata su cavalletto, che riprendeva l'andamento della coda lungo via Cavin di Sala.

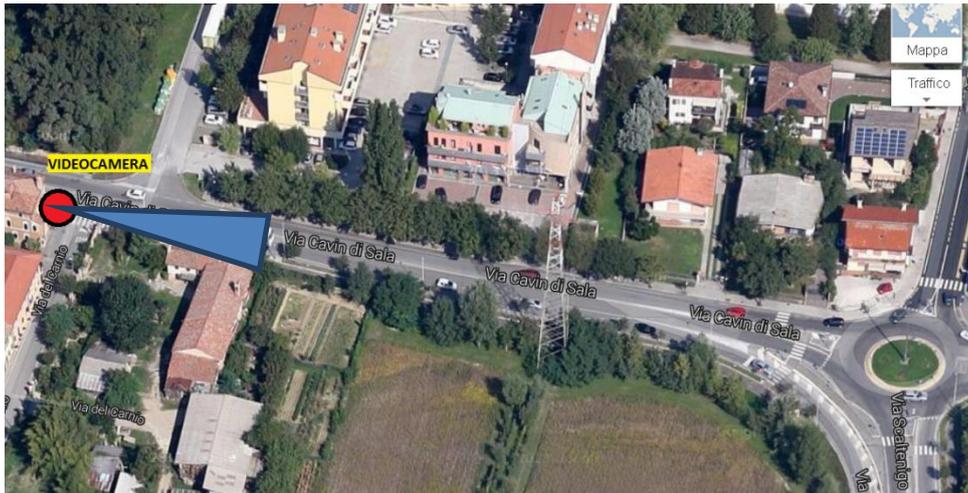


Fig. 38 – Videocamera per il rilievo della coda in via Cavin di Sala.



Fig. 39 – Videocamera di monte per il rilievo della coda in via Scaltenigo.

3.5.2 Radar

Al fine di determinare la velocità tenuta dai veicoli lungo il tratto di ingresso in rotatoria (da sud a nord) sono stati installati 4 sensori *radar* ai margini della carreggiata. Un quinto sensore è stato inserito nella corsia opposta di fronte l'ultimo per rilevare i passaggi e le velocità dei veicoli in direzione sud.

Questi radar sono stati posizionati, seguendo le indicazioni appena date, sui pali della luce o altri supporti verticali presenti a bordo strada, partendo da nord (rotatoria) e proseguendo verso sud.

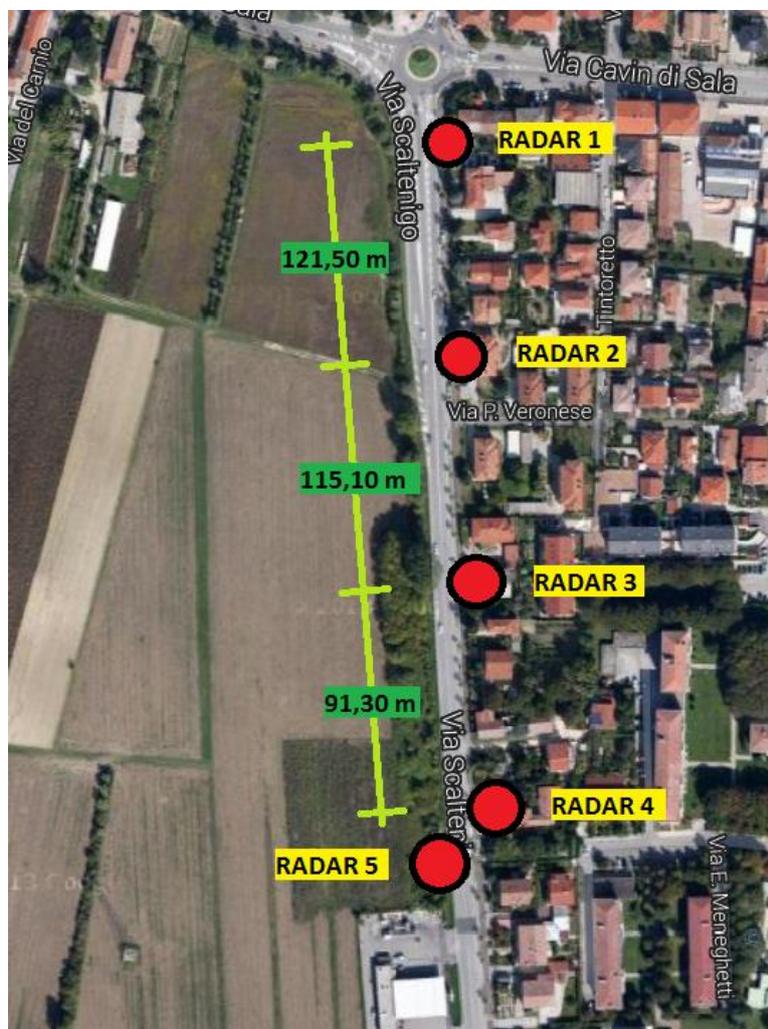


Fig. 40 – Posizione dei radar in via Scaltenigo.



Fig. 41 – Radar n.1 in via Scaltenigo.

3.6 Rilievo geometrico

E' stato effettuato, a seguito delle riprese, un rilievo geometrico al fine di ottenere tutti i dati necessari per la rappresentazione della rotatoria.

Dal punto di vista geometrico la rotatoria presenta le seguenti caratteristiche generali:

- Diametro esterno: 30 m
- Diametro isola centrale: 16,50 m
- Larghezza anello circolante: 7 m
- Numero corsie anello: 1

Nello specifico il ramo sud (via Scaltenigo) è costruito sulla base di tali elementi geometrici:

- Numero corsie in ingresso: 1
- Larghezza ramo d'ingresso: 4,50 m
- Angolo d'entrata tra flusso entrante e circolante: 23°

4. Codifica ed elaborazione dei dati

I rilievi sono stati eseguiti in due giornate differenti e nelle fasce orarie di punta del mattino:

Per quanto riguarda la rotatoria Mirano Taglio Sinistro:

- 07 Febbraio 2013 si è rilevato dalle 7:00 alle 9:00 del mattino;

Per la Rotatoria Mirano Scaltenigo:

- 27 Marzo 2013 si è rilevato dalle 7:15 alle 09:15 del mattino.

4.1 Codifica dei filmati

La codifica è avvenuta con gli stessi criteri per entrambe le rotatorie. Verranno di seguito descritte le procedure attuate, spiegando eventuali differenze tra una rotatoria e l'altra.

4.1.1 Rilevazione passaggi a monte della coda (codifica di monte)

I filmati video così ottenuti sono stati memorizzati su supporto digitale e, tramite un programma in Visual Basic messo a disposizione dal Laboratorio Trasporti del DICEA, è stata effettuata la codifica dei filmati mediante opportune procedure di analisi delle immagini.

In relazione alla tipologia veicolare sono state definite 3 classi :

1. autovetture
2. veicoli commerciali leggeri (fino a 7.5 m di lunghezza e\o 3.5 t di massa)
3. veicoli pesanti (oltre ai 7.5 m di lunghezza e\o 3.5 t di massa).

Si è stabilita la sezione di riferimento in corrispondenza della quale fissare l'istante di passaggio di ciascun veicolo.

Ciascun passaggio è stato archiviato in un database opportunamente predisposto associandovi i seguenti attributi:

- Istante di passaggio (data e ora espressa in millisecondi misurati dall'istante di inizio filmato)
- Tipologia veicolare
- Fotogramma descrittivo.

In totale sono stati codificati:

- Per via Taglio Sinistro: 908 veicoli;
- Per via Scaltenigo: 1115 veicoli.



Fig. 42 - Fotogramma all'istante di passaggio di un veicolo nella sezione di monte della coda per via Scaltenigo.

4.1.2 Rilevazione passaggi in corrispondenza della linea d'arresto dell'approccio (codifica di valle)

Per la successiva codifica dei veicoli del filmato, si è fissato come riferimento l'istante in cui il veicolo entrante in rotatoria arrivava in corrispondenza della linea di precedenza o *yield line* (sezione di valle) iniziando di fatto la selezione degli intervalli disponibili all'interno delle correnti che impegnavano l'anello circolatorio davanti all'approccio.

Tale codifica ha garantito la determinazione del tempo totale di percorrenza tra la sezione a monte degli accodamenti e la linea d'arresto dell'approccio.

In base all'immagine precedentemente registrata che classificava il veicolo in base al tipo di mezzo e al colore, quando lo stesso veicolo sopraggiungeva alla linea di precedenza se ne codificava l'istante di passaggio.



Fig. 43 - Fotogramma corrispondente all'istante di arrivo alla sezione di valle per via Scaltenigo

Da questa analisi si è potuto constatare che nella maggioranza dei casi si è mantenuta la medesima consequenzialità di passaggio; in alcuni casi, tuttavia, la sequenza è stata modificata per l'effettuarsi di sorpassi nel tratto in avvicinamento all'entrata in rotatoria.

Vi è poi un'ulteriore percentuale di veicoli, codificati a monte, che non sono stati rintracciati a valle: il motivo è da attribuire alla presenza, nel tratto compreso tra la videocamera posizionata a monte e quella di valle di una strada locale per quanto riguarda via Taglio Sinistro e di un'area di servizio dove molti guidatori si fermano o sostano per il rifornimento di carburante per quanto riguarda via Scaltenigo.

Di conseguenza in quest'ultimo caso l'intervallo di tempo tra l'istante di passaggio in coda (monte) e l'istante di raggiungimento della linea di precedenza (valle) è molto più ampio dell'intervallo medio di percorrenza del tratto o addirittura (in caso di parcheggio) non è stimabile (outlier).

Si sono codificati, nella sezione di valle:

- Per via Taglio Sinistro: 906 veicoli;
- Per via Scaltenigo: 1071 veicoli.

4.1.3 Osservazione e codifica dei comportamenti di *gap-acceptance*

La codifica più impegnativa è stata quella effettuata ai fini della stima dei due parametri fondamentali su cui si basano i modelli di *gap-acceptance*:

- *gap critico* t_c
- *follow-up time* t_f .

Per ottenere la stima di questi due parametri è stato necessario innanzitutto identificare per ciascun veicolo in ingresso i punti di conflitto con la corrente circolante nell'anello (caratterizzato da una corsia per entrambe le rotatorie oggetto di studio).

Questa codifica non è stata effettuata per tutti i veicoli entranti in rotatoria ma solo per quei veicoli per i quali valevano queste due condizioni:

- erano veicoli per i quali, nelle precedenti codifiche, si era riusciti ad associare il tempo di percorrenza tra la sezione a monte della coda e quella di valle;
- il flusso circolante non arrivava mai a situazioni di completo blocco dell'anello.

Fondamentale è stato individuare i cosiddetti *punti di conflitto* ovvero quei punti in cui la traiettoria del veicolo entrante in rotatoria va ad intersecare con la traiettoria dei veicoli circolanti sull'anello.

La codifica è stata quindi compiuta grazie all'utilizzo di un codice simile a quelli precedentemente utilizzati con l'ausilio di un marcatore utile ad identificare di volta in volta il corretto posizionamento del punto di conflitto.

La procedura utilizzata per la codifica si può quindi sintetizzare nei seguenti passaggi:

1. Identificazione del veicolo in corrispondenza della linea d'arresto e sua associazione al corrispondente record codificato per la determinazione del tempo di percorrenza, e caratterizzazione della categoria veicolare.

2. Identificazione della traiettoria di entrata nell'anello per la memorizzazione dei punti di conflitto con il flusso circolante. L'identificazione e codifica della manovra del veicolo entrante è stata distinta in:

- L1 (lane1) per la manovra di attraversamento;
- L2 (lane2) per la manovra di svolta a destra.

Si è quindi riavvolto il filmato all'inizio della selezione per concentrarsi unicamente sul flusso dell'anello e registrare la sequenza dei passaggi negli istanti in cui essi incrociavano il punto di conflitto stesso individuando i *lag* e/o i *gap* associati a ciascun veicolo entrante in rotatoria.

3. La sequenza si considerava conclusa con il veicolo che chiudeva il gap accettato.

Si riportano di seguito alcune fasi della procedura per un generico veicolo entrante per la rotatoria Mirano Taglio Sinistro:



Fig. 44 - Osservazione della traiettoria del veicolo entrante in rotatoria (Mirano Taglio Sinistro)

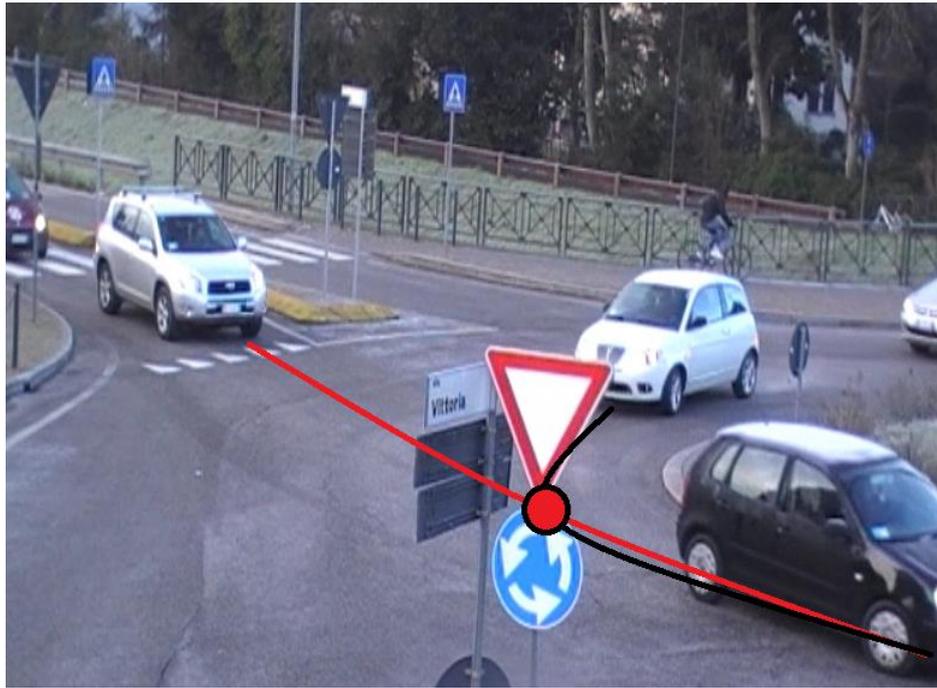


Fig. 45 - Individuazione del punto di conflitto con il veicolo circolante (Mirano Taglio Sinistro)



Fig. 46 - Istante di rilevazione del passaggio del primo veicolo circolante per il punto di conflitto (lag) (Mirano Taglio Sinistro)

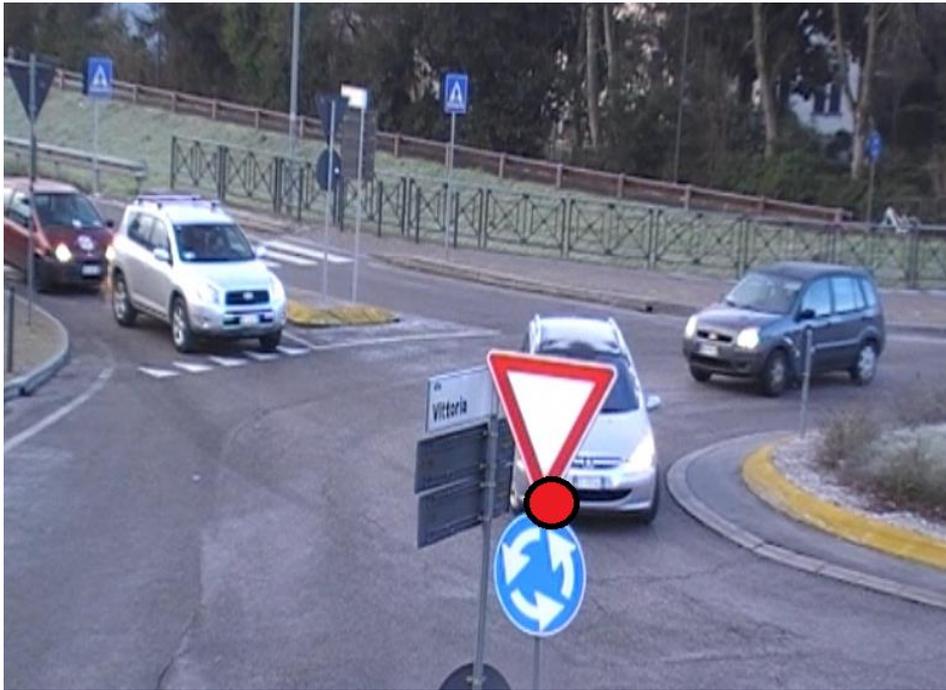


Fig. 47 - Istante di rilevazione del passaggio del successivo veicolo circolante per il punto di conflitto (gap rifiutato) (Mirano Taglio Sinistro)



Fig. 48 - Accettazione del gap da parte del veicolo entrante e relativa manovra di attraversamento (Mirano Taglio Sinistro)



Fig. 49 - Istante di rilevazione del passaggio dell'ultimo veicolo circolante per il punto di conflitto (gap accettato) (Mirano Taglio Sinistro)

Come già definito nel capitolo 1, con il nome di *lag* si intende l'intertempo tra l'istante di inizio selezione di un utente entrante all'approccio e il passaggio del primo veicolo sull'anello in corrispondenza del punto di conflitto (un esempio è proposto in figura 46).

Di tutti i *lag* codificati si sono verificate due situazioni:

- *Lag accettato*, codificato con 1, quando il conducente accetta il primo intervallo che si presenta.
- *Lag rifiutato*, codificato con 0, quando il veicolo rifiuta il primo intervallo per valutare quindi i successivi intervalli disponibili.

Con il termine *gap* (nonostante l'intervallo valutato sia più precisamente un *headway* poiché l'intervallo è stato definito tra i limiti di sagoma anteriore dei veicoli) si definisce l'intervallo temporale tra gli arrivi di due successivi veicoli che procedono lungo la stessa direzione in corrispondenza del punto di conflitto, come è mostrato in figura 47.

Nella codifica gli è stato assegnato il valore 0 nel caso di *intervallo rifiutato*, cioè di intervallo in cui il guidatore non si è immesso nell'anello ma è rimasto in attesa non considerandolo abbastanza ampio per effettuare la manovra di immissione o attraversamento in sicurezza.

Vi è poi il *gap accettato* con cui si intende l'intervallo tra gli arrivi di due successivi veicoli che procedono lungo la stessa direzione in corrispondenza del punto di conflitto che è stato utilizzato dal guidatore per immettersi nella corrente circolante.

A ciascun *gap accettato* è stato associato nella codifica il valore 1.

Tale codifica è stata effettuata per entrambe le rotatorie, entrambe le manovre (L1 e L2). Visto l'esiguo numero di manovre L2 (svolta a destra) per entrambe le rotatorie in rapporto alla manovra L1 (attraversamento), si è deciso di focalizzarsi sullo studio di quest'ultime, tralasciando le L2.

Durante questa operazione, alcuni dei veicoli registrati nella codifica di valle sono andati "persi". Il principale motivo di ciò è da attribuire a qualche momento di fortissima congestione in rotatoria durante il periodo di osservazione che hanno portato al blocco temporaneo della circolazione. Tale situazione di blocco è stata assai infrequente, per non dire trascurabile. In tali situazioni che possiamo definire critiche, non è possibile applicare la teoria del *gap-acceptance* in quanto vi mancano le basi per poterla attuare. Non si ha più un sistema a rotatoria che si "autogoverna" grazie alle scelte personali dei singoli utenti che rifiutano e accettano i gap in modo omogeneo e coerente. Gli utenti non sono più liberi di scegliere tra i gap ma, forzano la loro entrata compiendo manovre azzardate anche molto pericolose.

Per quanto riguarda la rotatoria Mirano Taglio Sinistro, dei 906 veicoli per i quali, nella codifica precedente, si era riusciti a trovare la corrispondenza con il corrispettivo veicolo in coda, con questa successiva codifica se ne sono "persi" 3, passando a 903 veicoli (823 per la sola manovra L1). Come si può notare, una perdita alquanto esigua.

Per quanto riguarda la rotatoria Mirano Scaltenigo, dei 1071 veicoli per i quali, nella codifica precedente, si era riusciti a trovare la corrispondenza con il corrispettivo veicolo in coda, con questa successiva codifica se ne sono "persi" 4, passando a 1067 veicoli (933 per la sola manovra L1). Anche in questo caso, la perdita è alquanto esigua.

4.1.4 Criteri di codifica

Al di là dei casi anomali che si è quindi deciso di non considerare, descritti nel paragrafo precedente, si definiscono di seguito i criteri di codifica adottati per garantire coerenza durante tutta la fase di codifica dei dati. In taluni casi il veicolo entrante in rotatoria non mostrava alcuna titubanza nella selezione del *lag* : si è quindi deciso che l'istante di inizio selezione lo si faceva coincidere con l'istante di passaggio sulla linea di precedenza o *yield line*.

A seguito quindi di tutte queste condizioni si è arrivati ad avere informazioni omogenee relativamente a:

Mirano Taglio sinistro

Si ha un campione di 823 veicoli entranti che effettuano la manovra di attraversamento L1.

Si riassumono nella seguente tabella i dati ottenuti:

-	LAG accettato	GAP accettato	TOTALI
n°	442	381	823
utenti			

Tab. 5 - Totalità di lag e gap accettati (Mirano Taglio Sinistro)

Dai valori in tabella si può quindi affermare che degli 823 veicoli su un totale di 1541 decisioni:

- 442 hanno accettato il primo *lag* disponibile non rifiutando alcun *gap*;
- 381 utenti hanno rifiutato 718 *gap* (ciascun veicolo entrante ha rifiutato in media circa 2 *gap*) prima di accettarne uno.

Mirano Scaltenigo

Si ha un campione di 933 veicoli entranti che effettuano la manovra di attraversamento L1.

Si riassumano nella seguente tabella i dati ottenuti:

-	LAG accettato	GAP accettato	TOTALI
n°	602	331	933
utenti			

Tab. 6 - Totalità di lag e gap accettati (Mirano Scaltenigo)

Dai valori in tabella si può quindi affermare che dei 933 veicoli su un totale di 1678 decisioni:

- 602 hanno accettato il primo *lag* disponibile non rifiutando alcun *gap*;
- 331 utenti hanno rifiutato 745 *gap* (ciascun veicolo entrante ha rifiutato in media circa 2 *gap*) prima di accettarne uno.

4.2 Stima dei parametri di *gap-acceptance*

Per entrambe le rotatorie e manovre studiate si è proceduto alla stima del *gap critico* t_c , impiegando il metodo probabilistico della massima verosimiglianza.

Per quanto concerne il tempo di *follow-up time* si è deciso di adottare un valore verosimile per entrambe le rotatorie di:

- Mirano Taglio Sinistro: $t_f = 2,7$ sec
- Mirano Scaltenigo: $t_f = 2,7$ sec

4.2.1 Metodo della Massima Verosimiglianza

Con riferimento ai valori di minimo intervallo accettato e il massimo intervallo rifiutato per ciascun veicolo entrante si è applicato il metodo della Massima Verosimiglianza descritto al capitolo 1, con l'ausilio di un opportuno software messo a disposizione dal Laboratorio di Trasporti dell'Università di Padova.

Da tale metodo, il valore di gap critico ottenuto è il seguente:

Rotatoria	Tc [s]	Varianza [s]
Mirano Taglio Sinistro	3,36	0,54
Mirano Scaltenigo	3,35	0,50

Tab. 7 - Valori di gap critico ottenuti a partire dai rilievi su campo

5. L'uso del simulatore di guida nella sperimentazione

L'uso di simulatori di guida per la progettazione di veicoli e per gli studi sulla percezione del conducente è in rapida espansione. Ciò è dovuto in gran parte al fatto che la simulazione, dal punto di vista ingegneristico, permette un notevole risparmio di tempo e un abbattimento dei costi. L'uso del simulatore permette di effettuare studi in un ambiente virtuale che garantisce il pieno controllo di tutte le caratteristiche del veicolo e del traffico, nonché delle condizioni atmosferiche e della pavimentazione, rendendo quindi virtualmente illimitato il numero di test eseguibili. Le simulazioni possono essere un prezioso aiuto per gli studi relativi al traffico e alla sicurezza stradale.

I simulatori di guida forniscono all'utente la maggior parte delle indicazioni visive che si presenterebbero durante una guida nel mondo reale. I segnali visivi vengono forniti da un generatore di immagini 3D che calcola in tempo reale le immagini dello scenario simulato (coerentemente con la posizione del guidatore) per poi proiettarle su uno schermo curvo o su più schermi piatti che circondano la postazione di guida (il cockpit) all'interno della quale l'utente controlla il mezzo. Esistono anche simulatori che fanno uso di display montati sul capo del guidatore (HMD), dotati di visione stereoscopica e di sensori che rilevano il movimento della testa. Lo svantaggio riguarda il campo visivo abbastanza ridotto. È stato dimostrato che per una corretta percezione della velocità è necessario un campo visivo orizzontale di almeno 120° (Jamson, 2000).

Il continuo movimento delle immagini di tutti gli oggetti di scena presenti nell'ambiente virtuale permette quindi di riprodurre un flusso ottico realistico o verosimile in termini di prospettiva, di texture-mapping e di illuminazione.

Altri effetti come la vista binoculare e l'effetto di parallasse dovuto allo spostamento della testa dell'osservatore sono invece spesso assenti nei simulatori, con eccezione dei sistemi HMD.

La loro implementazione aumenterebbe la complessità e il costo di generazione dell'immagine e delle attrezzature, ciò richiederebbe l'integrazione di dispositivi di

localizzazione della testa, ma permetterebbe di migliorare la percezione di profondità dello scenario (Peh 2002).

Alcuni simulatori di guida sono in grado di fornire, oltre alle informazioni visive, le sensazioni fisiche che l'utente percepirebbe alla guida in un ambiente reale:

- le vibrazioni del veicolo sul terreno,
- il senso di accelerazione e decelerazione frontale,
- il senso di accelerazione laterale e verticale,
- la pendenza,
- il rollio.

Il sistema vestibolare presente nell'orecchio interno ha un ruolo non indifferente nel controllo di sterzo e velocità (Wierwille 1983, Reymond 2001).

Queste sensazioni inerziali vengono solitamente riprodotte attraverso l'uso di una serie di pistoni, generalmente 6, a formare una configurazione ad esapode alla base di una piattaforma mobile sulla quale è posto il cockpit con i controlli di guida.

Un aspetto da non trascurare nell'utilizzo dei simulatori di guida ai fini della ricerca è certamente la fedeltà della simulazione, che può variare in maniera consistente a seconda degli obiettivi dello studio e dei parametri di interesse che devono essere considerati. Quando le attività di guida non sono l'obiettivo principale dell'esperimento, un livello di fedeltà "relativo", che permetta solo alcuni tipi di confronto tra l'ambiente simulato e il mondo reale, potrebbe essere accettabile.

Alcuni esempi di studio sono quelli riguardanti:

- la prontezza di riflessi,
- la fatica alla guida,
- alcune analisi di carattere percettivo,
- l'utilizzo del simulatore a fini didattici e formativi (scuola guida).

Al contrario è necessaria una fedeltà di simulazione "assoluta" quando l'obiettivo degli esperimenti è lo studio del comportamento del conducente in funzione di condizioni stradali, visibilità, tipo di veicolo o caratteristiche del traffico.

Questo tipo di indagine richiede un'attenta analisi del set completo di variabili percettive cui viene sottoposto il tester.

Ad esempio la corretta percezione del distanziamento, spaziale e temporale, tra due veicoli che si susseguono è di fondamentale importanza per gli studi relativi al car-following, all'inserimento in una corrente veicolare in corrispondenza di un'intersezione o in presenza di sistemi di cruise control).

In riferimento a ciò, un'errata calibrazione di un semplice parametro quale "l'altezza degli occhi del conducente" potrebbe comportare una stima non corretta della distanza (la quale viene valutata anche sulla base dello scarto angolare tra orizzonte e punto osservato) e portare quindi a risultati non affidabili.

Con l'avanzare della tecnologia oggi i simulatori di guida hanno raggiunto un livello di dettaglio tale da permettere una comprensione più approfondita della percezione umana del movimento, specialmente per velocità ed accelerazioni superiori alla locomozione naturale, con notevoli benefici soprattutto nell'ambito degli studi relativi alla sicurezza.

5.1 Potenzialità del simulatore di guida

I simulatori di guida sono ormai uno strumento importante per l'analisi delle prestazioni del guidatore e del suo comportamento. Secondo due noti punti di riferimento, il Journal - Transportation Research Part F e Human Factors, si può vedere che gli studi basati sul simulatore costituiscono una parte importante dei lavori pubblicati in dominio di guida. Nel 2009, il 32 % (11 su 34) dei documenti pubblicati nel Transportation Research Part F erano basati su studi sperimentali al simulatore. Nello stesso anno, di 6 articoli pubblicati in Human Factors nel campo della "superficie dei mezzi di trasporto", 5 (83 %) sono stati prodotti partendo da ricerche effettuate mediante simulatore di guida.

Questo ha portato alla crescita dell'uso del simulatore in ambito sperimentale. Lo strumento (simulatore) e il metodo (esperimento) sono inestricabilmente collegati. Il simulatore è utilizzato per:

- l'indagine di manipolazioni sperimentali,
- confronto dell'efficacia dei trattamenti,
- scenari ipotetici relativi a nuovi sistemi e tecnologie,
- l'indagine di una varietà di disabilità, tra cui alcol, droghe, stanchezza e distrazione.

Questa preminenza del laboratorio nel mondo reale è piuttosto sorprendente. Con milioni di utenti e milioni di veicoli nel mondo reale, ci si potrebbe anche chiedere perchè usare un simulatore di guida per effettuare ricerche:

- sul comportamento del conducente,
- sulla sicurezza stradale,
- sulla progettazione di infrastrutture stradali,
- sull'impatto delle nuove tecnologie,
- sulle debolezze del conducente.

Il numero di simulatori di guida nelle università e negli istituti di ricerca è in costante crescita, e di anno in anno un notevole sforzo viene fatto per migliorare le loro capacità.

Infatti, i simulatori di guida su strada (moto, auto, veicoli commerciali leggeri e pesanti) non vengono usati molto per l'addestramento degli utenti perché si preferisce l'uso del veicolo

vero e proprio. In aviazione, trasporto marittimo e ferroviario, in cui i veicoli sono molto costosi in rapporto al costo di un simulatore, sono utilizzati principalmente per la formazione degli operatori.

Vediamo ora alcuni aspetti positivi riguardanti l'uso del simulatore:

- componenti fisiche e hardware migliori e più complete aiutano ad avere una simulazione più aderente alla situazione reale,
- le componenti del simulatore da ottimizzare devono essere scelte in funzione del tipo di studio che si vuole eseguire per ridurre i costi,
- è possibile controllare l'esperienza dei partecipanti e creare situazioni e scenari ripetibili, questo controllo crea un grado di efficienza negli esperimenti al simulatore non raggiungibile conducendo osservazioni nel mondo reale, in qualche decina di minuti è possibile realizzare uno studio che potrebbe richiedere mesi di guida reale,
- permette la selezione completa dei partecipanti e delle istruzioni, il controllo delle condizioni e degli eventi praticamente impossibili da eguagliare nel mondo reale,
- è possibile ridurre il numero dei partecipanti,
- si possono eseguire studi sulla distrazione dovuta a telefoni cellulari, agli effetti della fatica, all'alcool, ai farmaci da prescrizione, alle droghe illecite come la marijuana,
- si possono eseguire studi su individui privati del sonno, sull'impatto della compromissione cognitiva causato dal Morbo di Alzheimer,
- nessun rischio per l'utente visto che vengono messe al primo posto la salute e la sicurezza,
- un ambiente più elaborato sarà più realistico e più coinvolgente.

Vediamo ora alcuni aspetti negativi riguardanti l'uso del simulatore:

- i proiettori e i monitor hanno limitazioni per quanto riguarda la risoluzione e l'intensità luminosa limitata (non è possibile creare direttamente il vero effetto ottico di abbagliamento, anche se l'effetto alone può essere imitato),
- limitazioni sulla validità in particolar modo per quanto riguarda la motivazione dei partecipanti a uno studio di simulazione (non vi è la stessa pressione temporale dovuta al ritardo di congestione del traffico reale),
- i partecipanti possono obbedire ciecamente alle leggi e alle norme di guida oppure possono credere di essere liberi dai suddetti vincoli,

- vi è una certa differenziazione tra guida reale e quella al simulatore e bisogna essere cauti quando si suggeriscono le conclusioni, sulla base degli studi al simulatore, da applicare alla guida reale,
- la ripetizione di uno stesso scenario può portare ad acquisire una certa familiarità.

Si deve parlare allora di validità con una distinzione tra:

- validità fisica (ci si riferisce ai componenti fisici e sottosistemi di un simulatore),
- validità comportamentale (ci si riferisce alla vicinanza tra l'esperienza dei partecipanti allo studio sul simulatore e la conduzione di un veicolo reale sulle strade reali).

Per la validità si devono confrontare le differenze di prestazioni tra condizioni sperimentali nel simulatore e quelle in condizioni simili in macchina.

Quando queste differenze sono dello stesso ordine allora si può dire che il simulatore ha validità relativa. Se, inoltre, i valori numerici sono circa uguali si può dire che il simulatore ha validità assoluta.

Tuttavia, nel simulatore, le velocità sono generalmente più alte sui rettilinei, ma nelle curve strette tendono ad essere simili rispetto a quanto osservato sulla strada reale.

5.2 Sperimentazioni presso il Laboratorio di Trasporti DICEA

Nel 2010 è stato condotto un esperimento presso il Laboratorio di Trasporti dell'Università di Padova.

Il sistema di simulazione utilizzato era un simulatore di guida a base fissa prodotto da STSoftware. Che comprende un cockpit realistico, tre computer collegati in rete, cinque schermi ad alta definizione ed un sistema audio Dolby Surround.

Lo studio consisteva nella validazione di un modello al simulatore di guida riferito al comportamento di gap acceptance in un'intersezione a priorità (nello specifico un'intersezione a T). Lo scopo è stato quello di confrontare il valore di gap critico ottenuto da osservazioni sul campo con quello ottenuto dalle simulazioni, al fine di validare il modello.

La prima fase quindi è stata quella di osservare sul campo i comportamenti di gap acceptance (gap accettati e rifiutati) nell'intersezione a T, localizzata a Salzano (VE).

Le osservazioni hanno riguardato la manovra di svolta a destra da una strada secondaria controllata da un segnale di "Stop". I dati sono stati raccolti durante le ore di punta per mezzo di videocamere. I video sono stati elaborati utilizzando un software che permette di registrare l'arrivo del veicolo alla linea di arresto sulla secondaria e l'arrivo dei veicoli sulla primaria in corrispondenza del punto di conflitto, distinguendoli per categoria di veicolo (auto, furgone, camion, ecc). I dati sono stati organizzati in un database e quindi elaborati utilizzando una procedura che estrae le seguenti informazioni di gap acceptance per ogni decisione:

- tipo di intervallo di tempo (lag o gap)
- dimensioni dell'intervallo di tempo
- tempo di attesa del veicolo sulla secondaria in corrispondenza della linea di arresto
- categoria del veicolo sulla secondaria
- categoria dei veicoli sulla principale
- decisioni degli utenti (intervallo accettato o rifiutato)

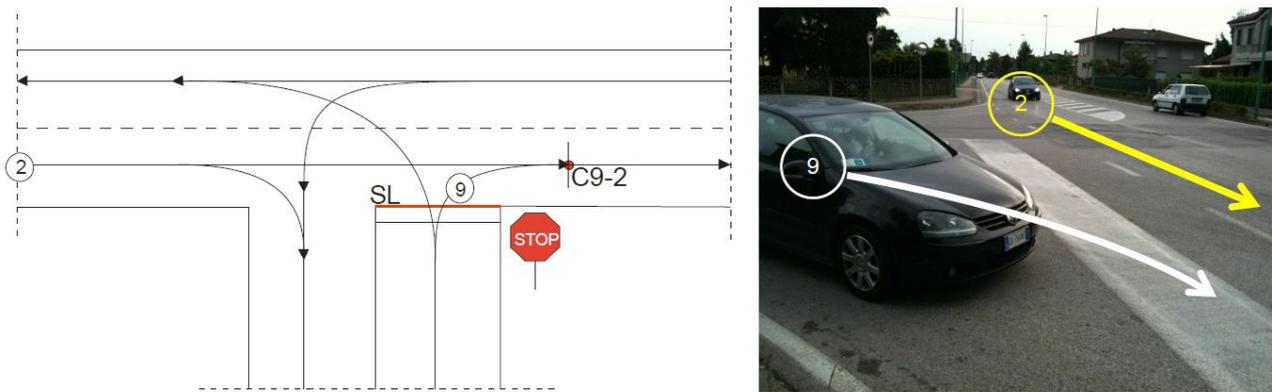


Fig. 50 – Salzano. Schema d'intersezione e manovra rilevata

Si sono ottenuti i seguenti risultati:

Maneuver	Observation period length (hours)	Average major street traffic flow (vph)	Type of interval	Acceptances	Rejections	Total
Right turn from minor	4.5	840	gap	327	938	1,265
			lag	312	327	639
			total	639	1,265	1,904

Tab. 8 - Dati di gap-acceptance derivati dalle osservazioni in situ. [Rossi, Gastaldi, Meneguzzer, Gecchele - Gap-Acceptance Behavior at Priority Intersection. Field Observations Versus Experiments With Driving Simulator]

La seconda fase è stata quella di ricreare lo scenario al simulatore mediante l'utilizzo di un apposito software per la creazione di elementi tridimensionali.

La situazione ricreata è risultata simile alla realtà dal punto di vista visivo e percettivo, e si è deciso di far arrivare i veicoli sulla principale con velocità costante in modo tale che i gap tra quest'ultimi fossero costanti dal momento di creazione. La sequenza di gap proposti è stata la stessa rilevata su campo.

L'esperimento è stato diviso in quattro parti:

- guida di prova (training di 10 minuti in ambiente rurale)
- riposo (5 minuti)
- guida nel circuito progettato

- intervista con il tester al fine di conoscerne le caratteristiche di guida



Fig. 51 - Manovra di svolta a destra: test driver in azione

I partecipanti sono stati 24 (bilanciati tra uomini e donne) tra studenti, personale dell'università e altre persone con le seguenti caratteristiche:

- nessuna esperienza precedente al simulatore di guida,
- almeno 3 anni di esperienza di guida effettiva,
- distanza media annua percorsa di almeno 5.000 km.

	Mean	Standard Deviation	Range
Age	25.5	1.87	23-40
Years of driving	7	2.45	3-10
Km driven per year	12,666	7,420	8,000-20,000

Tab. 9 - Caratteristiche dei Test Drivers [Rossi, Gastaldi, Meneguzzer, Gecchele - Gap-Acceptance Behavior at Priority Intersection. Field Observations Versus Experiments With Driving Simulator]

La prova prevedeva 4 giri di un circuito all'interno del quale ciascun partecipante approcciava all'intersezione effettuando la manovra richiesta per 6 volte a giro. Sono stati misurati i seguenti valori:

- arrivi dei veicoli della corrente principale al punto di conflitto
- arrivi dei veicoli della corrente secondaria (test drivers) alla linea d'arresto

A seguito dell'elaborazione dei dati, i risultati ottenuti sono stati:

Maneuver	Type of interval	Acceptances	Rejections	Total
Right turn	gap	366	442	808
from minor	lag	234	366	600
street	total	600	808	1,408

Tab. 10 - Dati di gap-acceptance rilevati al simulatore di guida [Rossi, Gastaldi, Meneguzzer, Gecchele - Gap-Acceptance Behavior at Priority Intersection. Field Observations Versus Experiments With Driving Simulator]

Dataset	Sample size	Mean critical gap (seconds)	Standard deviation (seconds)
Field observations	639	4.16	1.18
Driving simulator experiments	588	4.38	1.13
Percentage difference	-	5.29%	- 4.24%

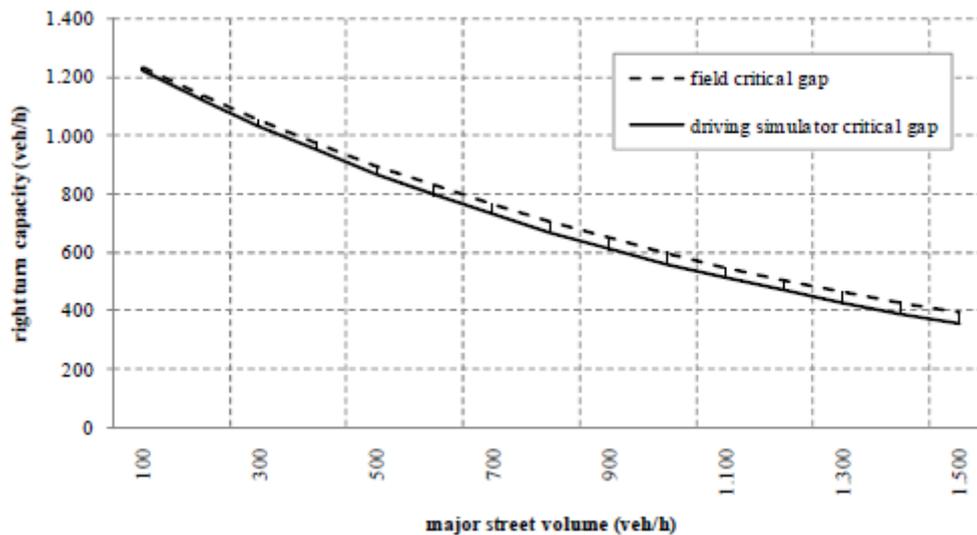
Tab. 11 - Confronto tra gap critici [Rossi, Gastaldi, Meneguzzer, Gecchele - Gap-Acceptance Behavior at Priority Intersection. Field Observations Versus Experiments With Driving Simulator]

Con i risultati ottenuti è stata fatta un'analisi di tipo descrittivo e un'analisi statistica.

La prima, rilevando che la differenza del 5% tra i gap misurati è significativa, ha portato ad un calcolo della capacità della manovra in questione per diversi valori di flusso sulla corrente principale. Si è fatto il confronto tra la capacità determinata con il gap critico osservato su campo e quella determinata con il gap critico misurato con le simulazioni. Il risultato è stato che per i valori di flusso reali la differenza tra i due valori di capacità è accettabile.

major street volume (veh/hour)	right turn maneuver capacity (veh/hour)		percentage deviation [(a-b)/a]
	CG _f [a]	CG _s [b]	
100	1,233	1,225	1%
200	1,140	1,125	1%
300	1,053	1,033	2%
400	972	948	3%
500	897	869	3%
600	828	797	4%
700	763	730	4%
800	703	668	5%
900	648	612	6%
1,000	597	560	6%
1,100	549	512	7%
1,200	505	468	7%
1,300	465	428	8%
1,400	427	391	9%
1,500	392	357	9%

Tab. 12 - Stime della capacità per la manovra di svolta a destra con formula di Harders. [Rossi, Gastaldi, Meneguzzi, Gecchele - Gap-Acceptance Behavior at Priority Intersection. Field Observations Versus Experiments With Driving Simulator]



Tab. 13 - Rappresentazione grafica delle stime di capacità con formula di Harders. [Rossi, Gastaldi, Meneguzzi, Gecchele - Gap-Acceptance Behavior at Priority Intersection. Field Observations Versus Experiments With Driving Simulator]

L'analisi statistica ha confermato con un T-Test che le differenze tra i due gap critici misurati sono statisticamente significative al 5%.

6. L'esperimento con il simulatore di guida

6.1 Metodologia

Lo studio ha riguardato il comportamento di gap-acceptance in intersezioni a rotatoria, con riferimento ai casi di studio descritti nel capitolo 3.

Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

- Osservazione diretta sul campo, raccolta e codifica dei dati di gap-acceptance di due casi reali;
- Sviluppo delle intersezioni in ambiente virtuale mediante il pacchetto STSoftware® ed esecuzione dei test di guida al simulatore;
- Test di validazione

6.2 Strumentazione di laboratorio

Il simulatore di guida utilizzato nella presente sperimentazione è situato presso il Laboratorio di Trasporti del DICEA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale) dell'Università degli Studi di Padova; esso, è un Jentig50 prodotto dalla olandese STSoftware®.

Il simulatore è costituito da:

- abitacolo (cockpit) realizzato in alluminio e plexiglass,
- volante con un diametro 36 cm e force feedback in grado di riprodurre vibrazioni e rigidità dello sterzo,
- pedaliera che comprende acceleratore, freno e frizione ad alta sensibilità,
- comandi di guida tra cui leva frecce/luci/clacson,
- cambio manuale/automatico a 5 marce e freno di stazionamento,
- sedile regolabile e cintura di sicurezza,
- 5 schermi al plasma da 50" che coprono un angolo di visuale orizzontale di oltre 300°,

- sistema audio surround 5.1 (3 altoparlanti frontali, 2 altoparlanti laterali posteriori e 1 subwoofer a lato dei pedali),
- 3 pc collegati in rete con processore "intel core 2 duo" che lavorano ad una frequenza di 3,16 Ghz, dotati di 2 moduli RAM DDR3 da 2 GB ciascuno, scheda video GeForce GTx260 e con Windows XP Service Pack 3 come sistema operativo.



Fig. 52- Simulatore di guida del laboratorio di trasporti DICEA

Lo schermo frontale ha una risoluzione di 1980 x 1080 (monitor hd) mentre gli schermi laterali e posteriori di 1360 x 768. La frequenza di aggiornamento delle immagini è di 60 Hz.

Il simulatore è di tipo fixed - base (statico) e non è in grado di restituire le sensazioni inerziali del corpo pertanto l'utente non può fare affidamento sul sistema vestibolare nell'elaborazione del movimento.

Per gli studi riguardanti la percezione visiva, l'effetto dovuto alla mancanza di questo tipo di informazione si può considerare entro certi limiti trascurabile, ed è possibile ovviare a

ciò facendo eseguire ai soggetti una sessione di guida di prova in modo da prendere confidenza con l'ambiente simulato e la risposta dei comandi.



Fig. 53 - Postazione di guida e strumentazione del simulatore

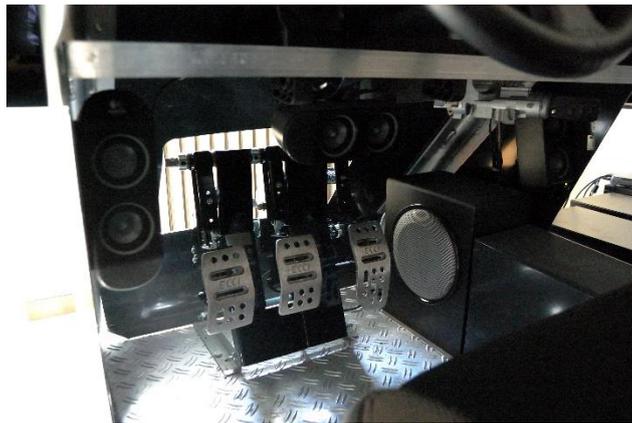


Fig. 54 - Postazione di guida e strumentazione del simulatore



Fig. 55 - Pc desktop per la gestione del simulatore

Il simulatore di guida è dotato di una serie di pacchetti software strettamente integrati.

Due pacchetti vengono utilizzati nella fase di progettazione offline dell'esperimento (StRoadDesign e StScenario), uno nella fase di controllo e scrittura dei dati di output (StDataProc) ed i restanti per l'elaborazione video e audio della simulazione, nonché il controllo delle condizioni di prova durante l'esperimento (StControl).

In particolare StRoadDesign è l'interfaccia che viene utilizzata per la creazione dell'ambiente 3D e di tutte le connessioni logiche che intercorrono tra gli elementi che compongono la rete stradale, mentre StScenario è il linguaggio di scripting attraverso il quale vengono di fatto generate le simulazioni e che permette di controllare le caratteristiche del veicolo condotto dal partecipante all'esperimento, del traffico e delle interazioni di questi ultimi con la pavimentazione.

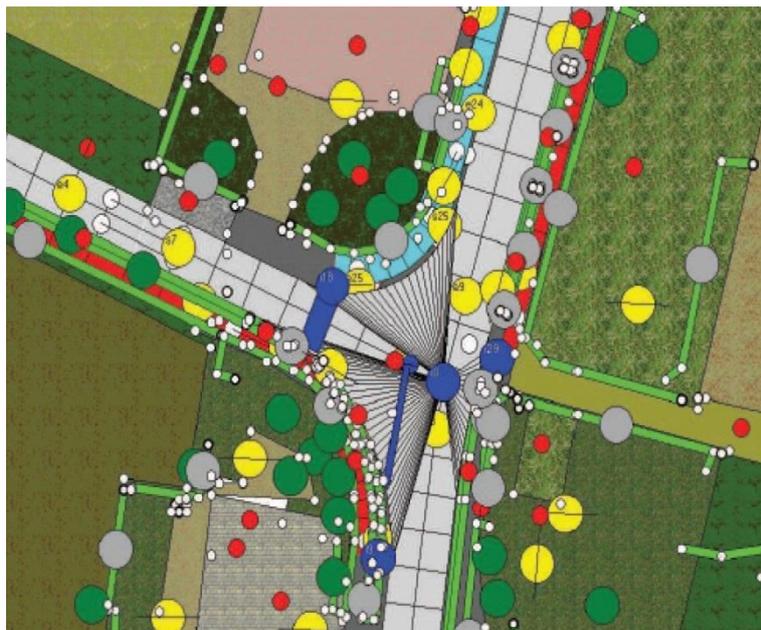


Fig. 56 - Elaborazione di un'intersezione restituita dal programma STRoadDesign

6.3 Fase 1: Osservazione diretta sul campo, raccolta e codifica dati

Su questa fase non c'è molto da dire in quanto l'argomento riguardante i casi di studio, la raccolta dei dati relativi ai comportamenti di gap-acceptance e la loro elaborazione, è già stato ampiamente trattato nei capitoli 3 e 4.

6.4 Fase 2: Progettazione dell'ambiente 3D e dello script

L'ambiente tridimensionale è stato ricreato attraverso StRoadDesign, del pacchetto StSoftware®. Particolare attenzione è stata posta al realismo della scena, compatibilmente con le potenzialità del software, al fine di riprodurre nel modo più fedele possibile quella che è la percezione dell'ambiente reale, a partire dai tratti in avvicinamento delle rotatorie.

A tal fine, si sono fatti rilievi geometrici e fotografici sul posto (cap.3.1, 3.3, 3.4, 3.6), si è progettato con l'ausilio di Street View di Google Maps, e per alcuni elementi particolari non disponibili nel software si è proceduto alla loro creazione ad hoc ed inserimento nel modello.

6.4.1 Progettazione della Rotatoria “Mirano Taglio Sinistro”

Sulla base dei rilievi geometrici e fotografici si è sviluppato il modello per la rotatoria “Mirano Taglio Sinistro”. Si è trattato di un lavoro particolarmente complesso, in ragione delle ridotte dimensioni della rotatoria e delle limitate capacità del software in questione. In particolare, al fine di aumentare il realismo del modello è stato riprodotto il teatro di Mirano e la farmacia, di cui ovviamente non avevano i loro corrispettivi modelli 3D all'interno del software.

Si riportano di seguito alcune immagini che illustrano il risultato ottenuto.

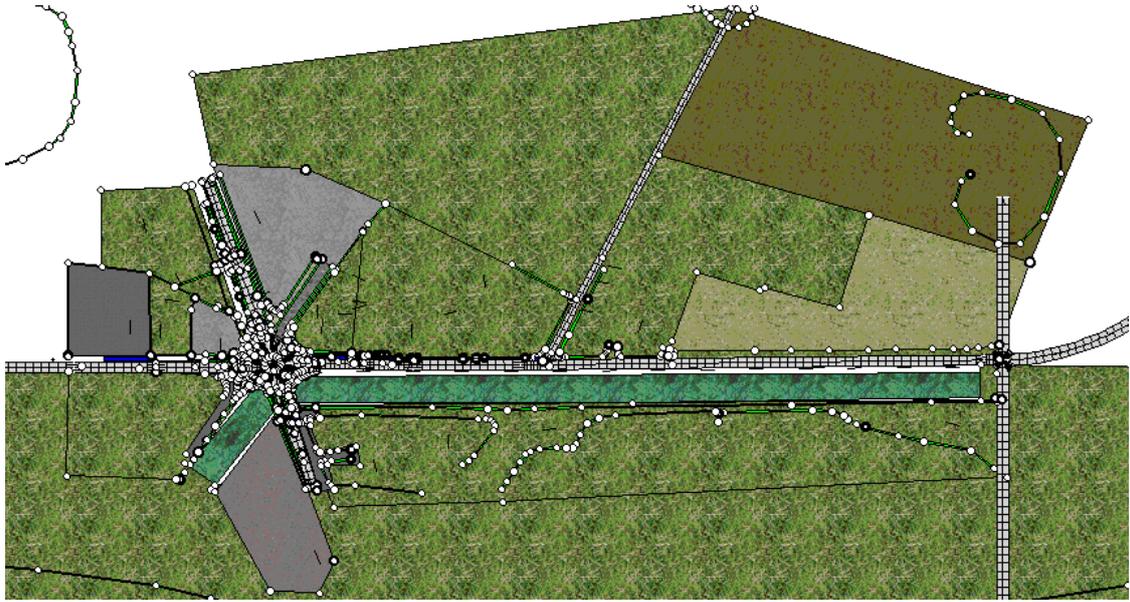


Fig. 57 - Planimetria (rotatoria e tratto in avvicinamento di via Taglio Sinistro)

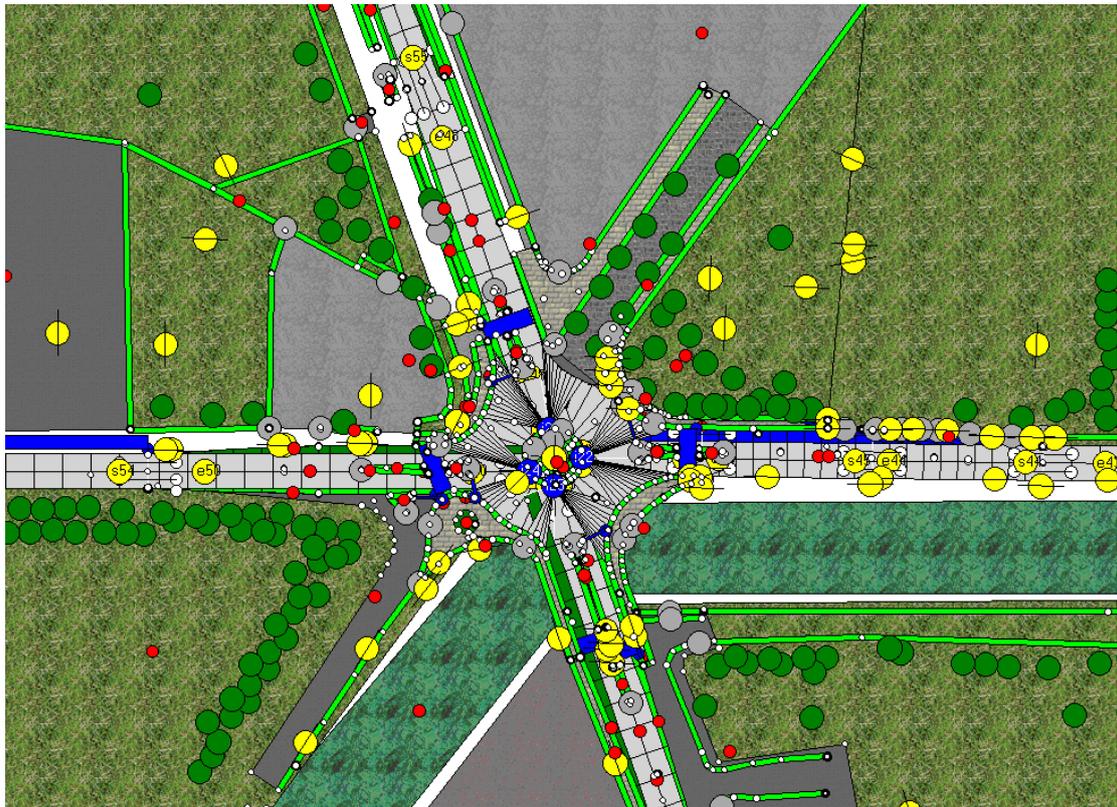


Fig. 58 - Planimetria (rotatoria Mirano Taglio Sinistro)



Fig. 59 - Vista 3D della rotatoria e del tratto in avvicinamento



Fig. 60 - Vista 3D della rotatoria Mirano Taglio Sinistro

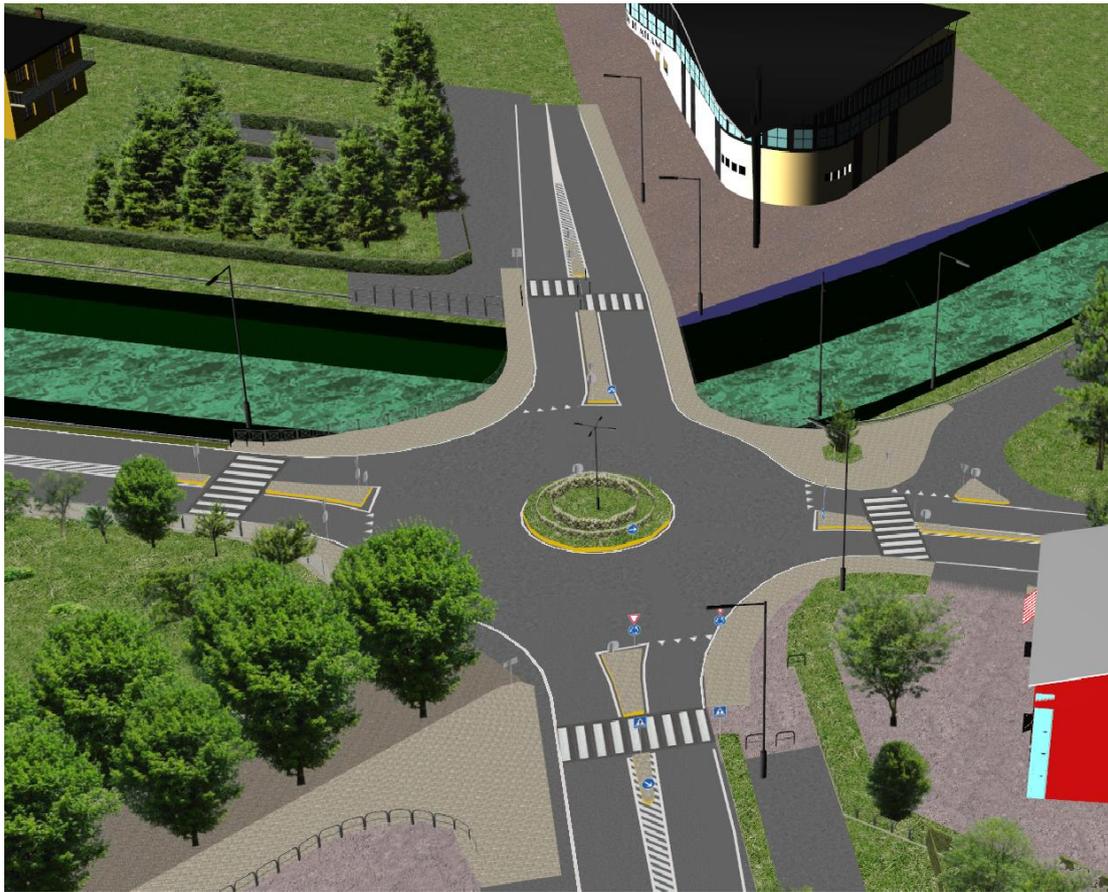


Fig. 61 - Vista 3D della rotatoria Mirano Taglio Sinistro

6.4.2 Progettazione della Rotatoria “Mirano Scaltenigo”

Sulla base dei rilievi geometrici e fotografici si è sviluppato il modello per la rotatoria “Mirano Scaltenigo”. Si è trattato di un lavoro particolarmente complesso, in ragione delle ridotte dimensioni della rotatoria e delle limitate capacità del software in questione. In particolare, al fine di aumentare il realismo del modello è stato riprodotto il capitello, che non aveva il suo corrispettivo modello 3D all’interno del software.

Si riportano di seguito alcune immagini che illustrano il risultato ottenuto.



Fig. 62 - Planimetria (Via scaltenigo e rotonda Mirano Scaltenigo)

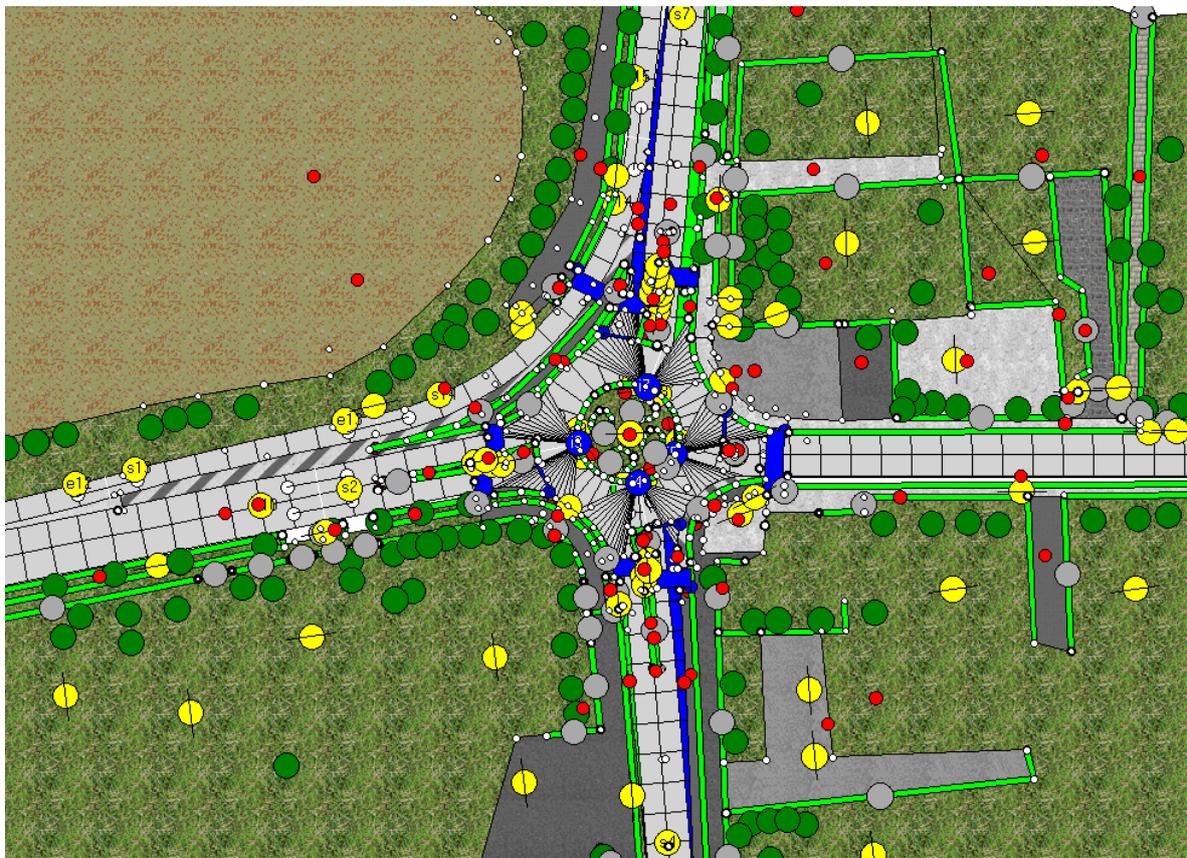


Fig. 63 - Planimetria (rotonda Mirano Scaltenigo)



Fig. 64 - Vista 3D della rotatoria Mirano Scaltenigo



Fig. 65 - Vista 3D della rotatoria Mirano Scaltenigo



Fig. 66 - Vista 3D della rotatoria Mirano Scaltenigo



Fig. 67 - Vista 3D della rotatoria Mirano Scaltenigo

6.4.3 Progettazione del circuito di guida

La progettazione del circuito è una parte fondamentale, esso infatti rappresenta il percorso che percorreranno i test drivers durante le simulazioni di guida. L'errata progettazione dello stesso può infatti indurre a comportamenti di guida molto diversi dalla realtà, e di conseguenza portare a risultati non attendibili.

Si è scelto di strutturare il circuito nel seguente modo:

- Ogni rotatoria è stata riproposta due volte in successione;
- Tra due rotatorie uguali è stato interposto un rettilineo di 1 Km

Si avranno quindi due rotatorie Mirano Taglio Sistro, definite come "Rotatoria 1" e "Rotatoria 2", e due rotatorie Mirano Scaltenigo, definite come "Rotatoria 3" e "Rotatoria 4".

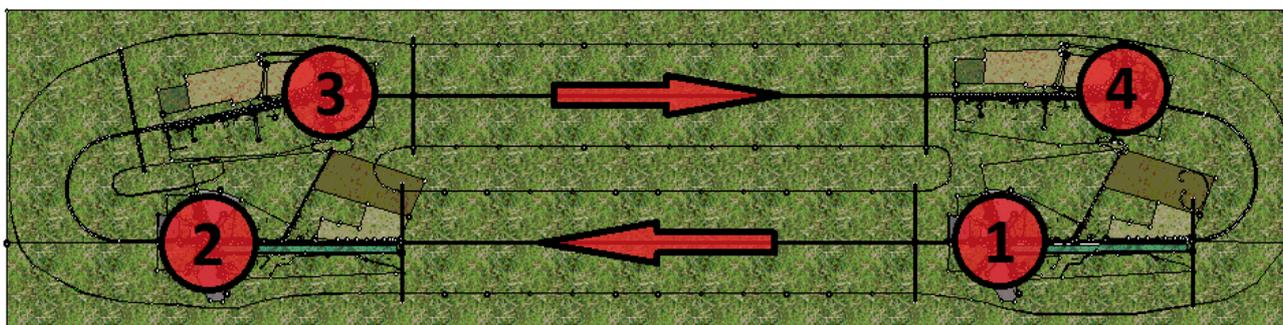


Fig. 68 - Definizione del circuito

Si è scelto di far percorrere il circuito ad ogni partecipante per un numero di giri pari a 6, ovvero si avranno un totale di 24 approcci in rotatoria per ogni prova, 12 per la rotatoria Mirano Taglio Sinistro e 12 per Mirano Scaltenigo.

I tratti rettilinei interposti tra le rotatorie 1 e 2, 3 e 4, prevedono una prova di car-following che non è stata oggetto di studio in questa tesi. Questi due rettilinei hanno inoltre il vantaggio di regolare la velocità di arrivo ai rispettivi tratti di avvicinamento in rotatoria in quanto conseguenza dell'azione di car-following. La stessa funzione è svolta dalle curve

successive alle rotonde 2 e 4, in quanto il partecipante è costretto a rallentare per non finire fuori percorso.

6.4.4 Definizione dello script

Lo script è stato scritto con il linguaggio StScenario, del pacchetto StSoftware®. Esso ha lo scopo di definire il funzionamento del circuito, la creazione e il comportamento dei veicoli circolanti (definiti come “agent”), la creazione e le caratteristiche del veicolo che verrà usato per la guida dal test driver (definito come “main target”) nonché tutte le caratteristiche dell’ambiente esterno e di interazione con la strada.

Sono state fatte una serie di scelte al fine di rendere il contesto virtuale il più fedele possibile alla realtà per quanto riguarda gli elementi oggetto di studio.

Con riferimento ai comportamenti di gap-acceptance, si è visto nel capitolo 4 che la manovra studiata per entrambe le rotonde è quella di “attraversamento”, e che quindi la corrente veicolare sulla principale (l’anello) che interferisce con quest’ultima è di fatto la corrente che va da A a B, come si può vedere qui sotto nelle figure.

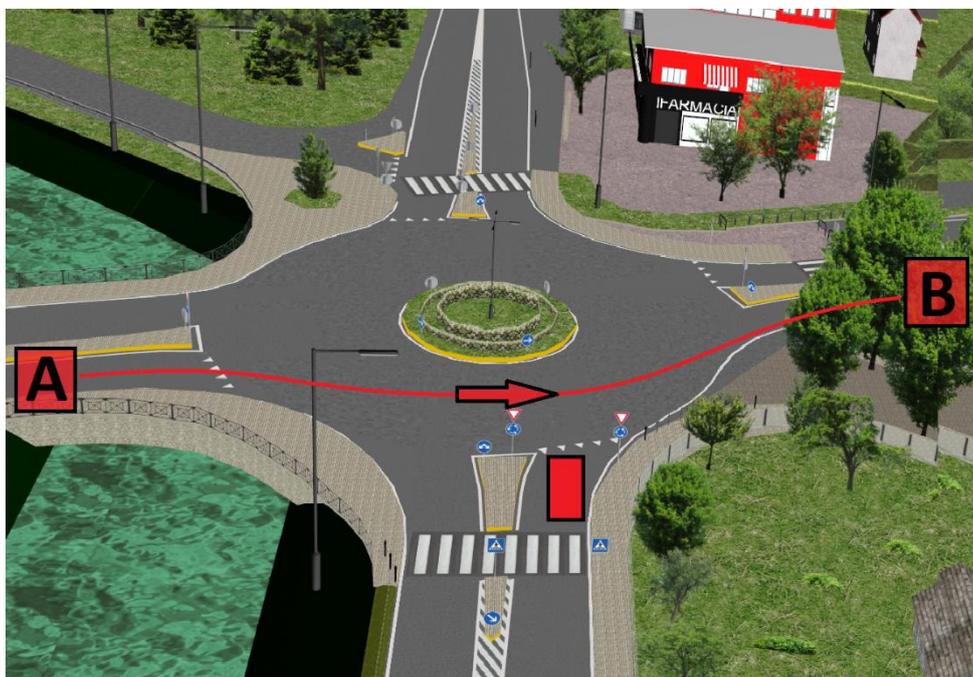


Fig. 69 - Percorso degli agent nelle rotonde 1 e 2 (Mirano Taglio Sinistro)

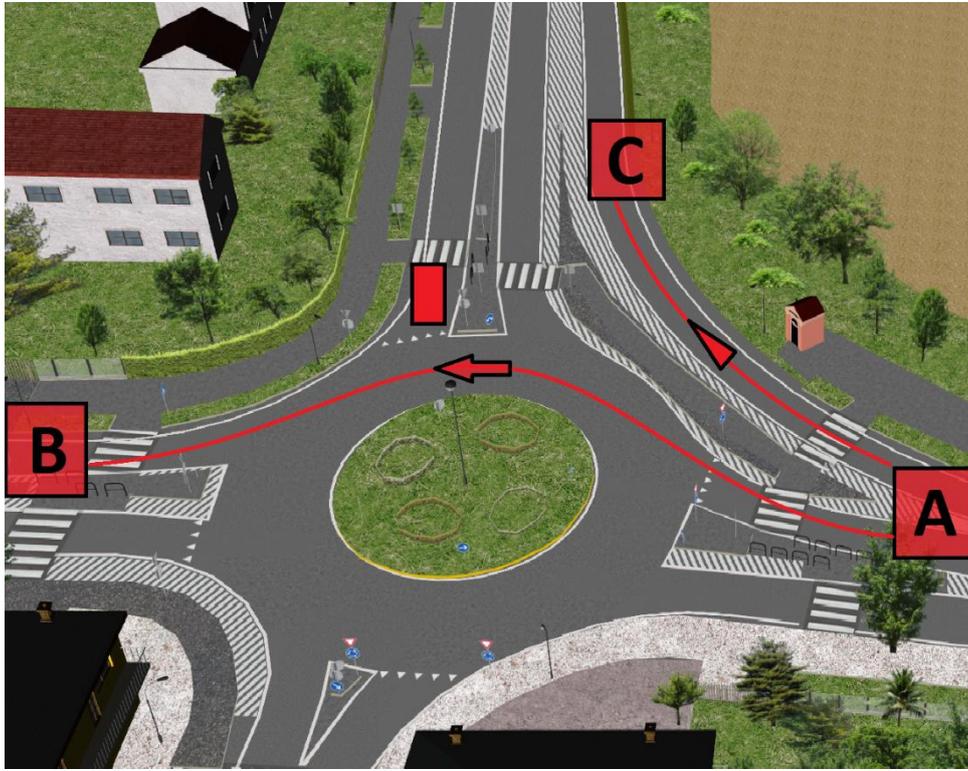


Fig. 70 - Percorso degli agent nelle rotatorie 3 e 4 (Mirano Scaltenigo)

Gli agent vengono generati ad una velocità di 8 m/s (28,8 Km/h). Tale velocità rimane costante per tutto il percorso da A a B, al fine di garantire il mantenimento degli headway decisi in fase di creazione. I punti A e B si trovano ad una distanza tale da risultare fuori dal campo visivo del main target.

Queste ipotesi sono state fatte per due ragioni: la prima è che in fase di codifica dei filmati per lo studio delle decisioni prese dagli utenti all'approccio non si è tenuto conto della destinazione dei veicoli sulla principale. Il loro scopo infatti era solo quello di "intralciare" la manovra di attraversamento di quest'ultimi. La seconda ragione è dovuta al fatto che creare degli agent che circolano su tutto l'anello autoregolandosi, fa cadere l'intento di mantenere costanti gli headway in quanto gli agent devono modificare la propria velocità. Questo fa sì che in fase di accettazione di un gap, il passaggio del main target tra i due veicoli causi una dilatazione di tale gap (il veicolo che chiude il gap rallenta), la cui misura

non sarà più il gap accettato, ma un altro valore, più grande, e quindi non corrispondente a quello effettivamente considerato dal conducente del veicolo della secondaria.

Le rotatorie 3 e 4 (Mirano Scaltenigo) hanno anche un flusso di veicoli che vanno da A a C con una velocità di 50 Km/h. Tali veicoli non interferiscono direttamente con il main target, ma contribuiscono a definire una più realistica percezione della rotatoria (è così anche nella realtà).

Le caratteristiche ambientali sono state impostate in modo da ottenere una visibilità ottima fino a 600 m.

Questa scelta rappresenta la realtà, in quanto tali erano le condizioni meteo i giorni dei rilievi (due fredde mattine d'inverno). Tale scelta inoltre è stata operata al fine di alleggerire il lavoro di cpu e scheda video, in quanto impedendo la visibilità oltre i 600 m si è potuto far sì che gli oggetti 3D venissero generati a partire da tale distanza, riducendo di fatto l'area di lavoro ad un raggio di 600 m. Questo ha permesso di migliorare problemi quali rallentamenti e sfarfallii degli schermi durante scenari particolarmente impegnativi per la cpu.

Lo script è stato impostato per rilevare i seguenti dati:

- Istante di arrivo e velocità del main target all'approccio delle rotatorie;
- Istante di arrivo e velocità del main target sul punto di conflitto;
- Istante di arrivo, tipo di veicolo e velocità degli agent sul punto di conflitto e su altre due sezioni poste in precedenza sul primo tratto dell'anello e nel tratto di avvicinamento a seguito della loro generazione (al fine di verificare il mantenimento della velocità costante).
- Tutti i parametri del moto del main target istante per istante con frequenza di 10 Hz.

6.4.5 Esecuzione degli esperimenti

Ciascun esperimento si è svolto nella seguente maniera:

- Intervista con il partecipante in cui si sono ricavate le informazioni di età, sesso, ed esperienza di guida reale (anno di conseguimento della patente e Km annui percorsi);
- Training di 10 minuti in due ambientazioni di prova con difficoltà progressiva.
- 5 minuti di riposo, nel frattempo si consegnavano e leggevano le istruzioni di guida al test driver;
- Esperimento vero e proprio con sessione di guida nel circuito progettato (6 giri per un totale di 40 min circa di guida)
- Somministrazione di un questionario per studi ulteriori non trattati in questa tesi.

Tutte le prove sono state svolte con le medesime condizioni di luminosità a ad una temperatura di circa 20° C.

La prima parte dell'esperimento è stata di fatto un test di calibrazione.

Gli agent che attraversano le rotatorie erano impostati con velocità di 6 m/s (22 Km/h) e venivano tutti generati con degli headway uguali in sequenza e valore a quelli rilevati sul campo. Tutti i valori di headway superiori a 6 secondi sono stati riportati a tale valore per evitare che il main target trovasse la rotatoria vuota (headway troppo grandi). Se ciò fosse accaduto infatti non si sarebbe potuto misurare il lag, inoltre si avrebbero avuto poche decisioni.

I soggetti testati sono stati 26 con le seguenti caratteristiche:

- 16 maschi e 12 femmine di età compresa tra i 21 e i 32 anni (età media 25 anni)
- Patente da almeno 3 anni (mediamente 7 anni)
- Km annui percorsi da 1000 a 36000 (mediamente 9500 Km/anno).

Il risultato di questa sessione di test non è stato buono in quanto i valori di gap critico ottenuti a seguito delle elaborazioni erano oltre i nove decimi di secondo superiori a quelli misurati sul campo, valori statisticamente non accettabili quindi.

Tale risultato probabilmente era imputabile ad un comportamento eccessivamente prudente dei tester, in particolare per quanto riguardava le decisioni sui gap da accettare. Parlando con i tester, si è potuto dedurre che le cause di questo risultato sono state la poca familiarità con il simulatore di guida (è come utilizzare un'auto diversa da quella cui si è abituati, con un mezzo diverso le prime volte si è più prudenti in quanto meno pratici), le difficoltà con l'uso del cambio per molti soggetti, ma soprattutto le sensazioni di stordimento/nausea all'arrivo all'approccio per via della mancata inerzia. Si è notata inoltre una tendenza dei soggetti ad accettare i gap più grandi nonostante in alcuni casi avrebbero potuto accettarne di più piccoli.

L'esperimento vero e proprio è stato eseguito dopo aver effettuato alcuni aggiustamenti:

- Aumento della velocità degli agent a 8 m/s (28,8 Km/h), questo comporta una maggior distanza spaziale tra due veicoli a parità di headway rispetto ad una velocità più bassa. In pratica si è migliorata la percezione degli spazi tra veicoli;
- Parametro di aderenza per consentire un più realistico approccio in rotatoria;
- Creazione di due sequenze di arrivi: una "Random" e una "Progressiva";
- Creazione di due script (A e B).

Si è di fatto migliorata la percezione delle distanze spaziali tra i veicoli in arrivo sulla corrente principale, favorendo inoltre l'utilizzo di lag per i soggetti un po' più aggressivi.

La sequenza di arrivi "Random" (R) è casuale per i soggetti che effettuano la prova, in realtà è la reale sequenza di headway misurata a partire dai dati rilevati sul campo. In tale sequenza, gli headway più grandi di 4 secondi sono stati ridotti a tale valore.

La sequenza di arrivi "Progressiva" (P) è una sequenza di veicoli creata con headway via via sempre più grandi, a partire da 1 secondo e aumentando di 0,2 sec ad ogni headway successivo, fino ad un massimo di 10 sec.

Lo script A ha la seguente sequenza per ogni giro:

Rotatoria 1 R

Rotatoria 2 P

Rotatoria 3 R

Rotatoria 4 P

Lo script B ha la seguente sequenza per ogni giro:

Rotatoria 1 P

Rotatoria 2 R

Rotatoria 3 P

Rotatoria 4 R

Di fatto quindi ogni tester farà 6 giri, approcciando 12 volte alla rotatoria Mirano Taglio Sinistro (6 con sequenza Random e 6 con sequenza Progressiva) e approcciando 12 volte alla rotatoria Mirano Scaltenigo (6 con sequenza Random e 6 con sequenza Progressiva).

I soggetti che hanno partecipato alla seconda fase dell'esperimento sono stati 30 con le seguenti caratteristiche:

- 20 soggetti con precedente esperienza di guida al simulatore (ma non esperti) di cui 17 che avevano partecipato alla sessione precedente di test, e 10 invece senza alcuna esperienza;
- 19 ragazzi e 11 ragazze di età compresa tra i 21 e i 32 anni (età media 26);
- Patente da non meno di 3 anni (mediamente 7 anni);
- Km annui percorsi da 1000 a 36000 (in media 9500 Km/anno).

15 soggetti sono stati testati con lo script A, e i restanti 15 con lo script B, per bilanciare la prova.



Fig. 71 - Test driver in azione



Fig. 72 - Fase di approccio alla rotatoria 1 (2)



Fig. 73 - Fase di decisione (rotatoria 1)



Fig. 74 - Fase di avvicinamento alla rotatoria 3 (4)



Fig. 75 - Fase di decisione (rotatoria 3)

6.5 Fase 3: Risultati dell'esperimento e test di validazione

I dati ottenuti con le simulazioni sono stati elaborati con appositi fogli di calcolo. Si è ricavata una lista contenente le decisioni prese da ogni guidatore ad ogni approccio alle rotatorie. In particolare tale lista contiene tutti i gap/lag accettati e i rispettivi massimi gap rifiutati.

Tra i dati ottenuti, tutti quelli che rappresentavano un comportamento incoerente dei soggetti (gap accettato più piccolo del massimo gap rifiutato), sono stati scartati. Si è quindi applicato il metodo della massima verosimiglianza, come già fatto per il calcolo del gap critico a partire dai dati osservati su campo (vedi § 4.2.1), ovvero con l'ausilio di un apposito software del Laboratorio.

Il confronto tra i gap critici ottenuti con i dati raccolti sul campo e i gap critici ottenuti con i dati ricavati dalle simulazione è stato considerato come test per validare il modello al simulatore di guida.

6.5.1 Risultati Mirano Taglio Sinistro (rotatorie 1 e 2)

Sequenza di arrivi	Lag Accettati	Gap Accettati	Totale Accettati
<i>R</i>	7	129	136
<i>P</i>	0	178	178
-	-	-	314

Tab. 14 - Lag e Gap accettati per le rotatorie 1 e 2 (Mirano Taglio Sinistro)

Sequenza di arrivi	Gap Critico [s]	Varianza [s]
<i>R</i>	3,39	0,22
<i>P</i>	2,68	0,21

Tab. 15 - Valori di Gap Critico calcolati con i dati simulati per le rotatorie 1 e 2 (Mirano Taglio Sinistro)

6.5.1.1 Analisi statistica

E' stata effettuata un'analisi statistica basata sul t-test per determinare se i gap critici ottenuti dalle simulazioni mostrano differenze statisticamente significative rispetto ai gap critici ottenuti dai dati rilevati su campo.

Il livello di significatività scelto è stato al 5%. Si sono definiti i gap critici nel seguente modo:

- $[Tc]_C$ = Gap critico ottenuto dai dati rilevati sul campo;
- $[Tc]_R$ = Gap critico ottenuto dai dati simulati per la sequenza "Random";
- $[Tc]_P$ = Gap critico ottenuto dai dati simulati per la sequenza "Progressiva".

Per quanto riguarda la sequenza di arrivi "Random", ovvero la più realistica, l'ipotesi nulla $H_0 : [Tc]_C - [Tc]_R = 0$ risulta accettata (statistica $T = 0,72 < T_\alpha = 1,96$).

Per quanto riguarda invece la sequenza di arrivi "Progressiva", l'ipotesi nulla $H_0 : [Tc]_C - [Tc]_P = 0$ risulta rifiutata (statistica $T = 16,06 > T_\alpha = 1,96$).

6.5.1.2 Implicazioni operative dei risultati

Visto che il test di validazione per la sequenza di arrivi "Progressiva" con l'analisi statistica non ha dato esito positivo, per vedere se la differenza è significativa anche dal punto di vista applicativo, si procederà determinando le capacità di manovra al variare del flusso sull'anello, in funzione dei gap critici ottenuti, e confrontando le curve così ottenute.

Dataset	Dimensione Campione	Gap Critico [s]	Deviazione Standard [s]
<i>Osservazioni sul campo</i>	810	3,36	0,54
<i>Simulazioni di guida [R]</i>	136	3,39	0,22
<i>Differenza</i>	-	0,03 (0,9%)	0,32 (59,2%)

Tab. 16 - Dati di campo vs dati dedotti dalle simulazioni, successione Random degli headway. Confronto tra i gap critici stimati.

Dataset	Dimensione Campione	Gap Critico [s]	Dev. Standard [s]
Osservazioni sul campo	810	3,36	0,54
Simulazioni di guida [P]	178	2,68	0,21
Differenza	-	0,68 (20,2%)	0,33 (61,1%)

Tab. 17 - Dati di campo vs dati dedotti dalle simulazioni, successione Progressivamente crescente degli headway. Confronto tra i gap critici stimati.

Per stimare la capacità di manovra è stata utilizzata la formula proposta dall’HCM 2010 (vedi § 2.3.7). Si ricorda che:

- $[Tc]_C$ = Gap critico ottenuto dai dati rilevati sul Campo;
- $[Tc]_R$ = Gap critico ottenuto dai dati simulati per la sequenza “Random”;
- $[Tc]_P$ = Gap critico ottenuto dai dati simulati per la sequenza “Progressiva”.

Capacità della manovra [veic/h]					
Vc [veic/h]	$[Tc]_C$ (a)	$[Tc]_R$ (b)	$[Tc]_P$ (c)	(a-b)/a	(a-c)/a
100	1260,93	1259,88	1284,97	0,1%	-1,9 %
200	1192,46	1190,47	1238,37	0,2%	-3,9 %
300	1127,70	1124,89	1193,45	0,2%	-5,8 %
400	1066,46	1062,92	1150,16	0,3 %	-7,8 %
500	1008,55	1004,36	1108,45	0,4 %	-9,9 %
600	953,78	949,03	1068,24	0,5 %	-12 %
700	901,99	896,74	1029,50	0,6 %	-14,1 %
800	853,01	847,34	992,16	0,7 %	-16,3 %
900	806,69	800,66	956,17	0,7 %	-18,5 %
1000	762,88	756,55	921,49	0,8 %	-20,8 %
1100	721,46	714,87	888,07	0,9 %	-23,1 %
1200	682,28	675,49	855,86	1 %	-25,4 %

Tab. 18 - Confronti tra le capacità calcolate con i gap critici stimati dai dati di campo e dalle simulazioni.

Il confronto tra le capacità di manovra mostra un'ottima corrispondenza per la sequenza "Random" (massima differenza relativa pari all' 1%), e una corrispondenza meno soddisfacente per la sequenza "Progressiva" (massima differenza relativa pari al 25,4%).

In particolare, per un volume di traffico sull'anello di 701 veic/h, che è il flusso osservato su campo e ricavato dalla matrice OD, la differenza relativa è pari allo 0,6 % per la sequenza "Random" (più che accettabile), e 14,1% per la sequenza "Progressiva", che non sembra trascurabile.

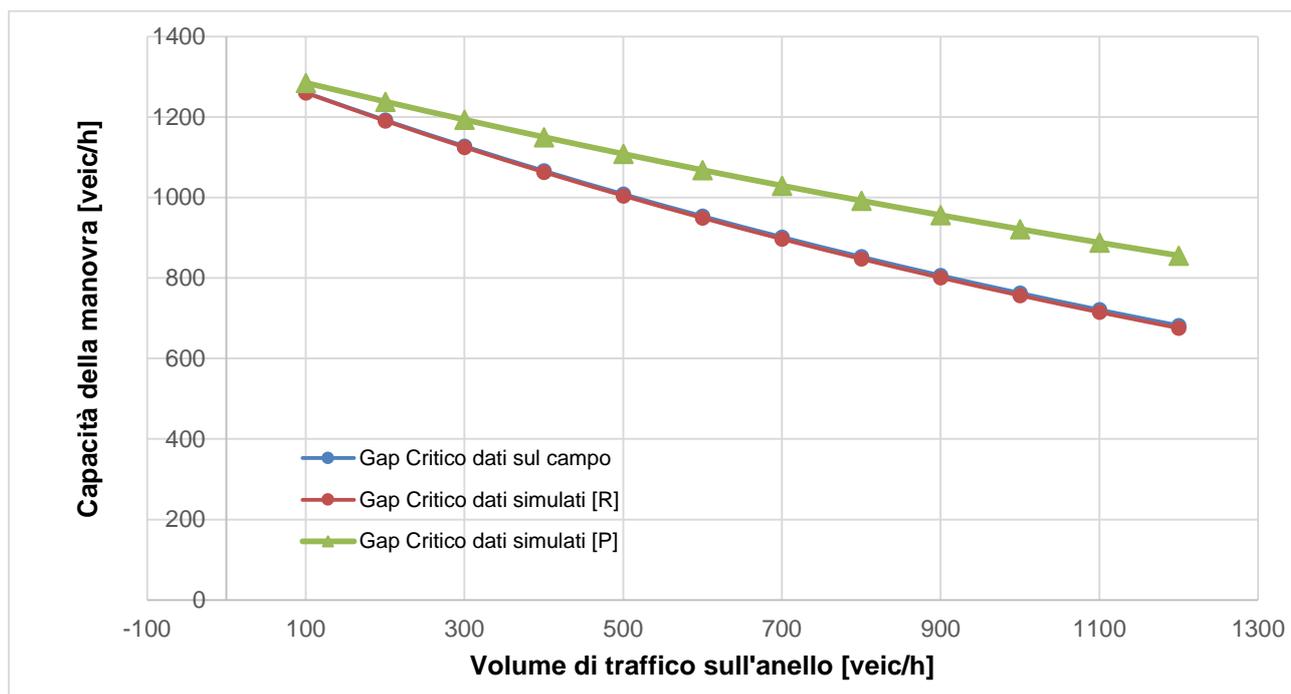


Fig. 76 – Metodo HCM 2010. Curve di capacità di manovra a confronto (Mirano Taglio Sinistro) in funzione dei valori di Tc stimati sul campo e nelle simulazioni.

Si può osservare come le curve di capacità ottenute a partire con i dati rilevati su campo e con la simulazioni di guida per la sequenza "Random" sono praticamente sovrapposte, per la sequenza "Progressiva" invece lo scostamento è più significativo e non trascurabile nei limiti del valore di flusso sull'anello reale (701 veic/h).

6.5.2 Risultati Mirano Scaltenigo (rotatorie 3 e 4)

Sequenza di arrivi	Lag Accettati	Gap Accettati	Totale Accettati
<i>R</i>	2	114	116
<i>P</i>	0	118	118
-	-	-	234

Tab. 19 – Lag e Gap accettati per le rotatorie 3 e 4 (Mirano Scaltenigo)

Sequenza di arrivi	Gap Critico [s]	Varianza [s]
<i>R</i>	3,68	0,13
<i>P</i>	2,99	0,21

Tab. 20 - Valori di Gap Critico stimati con i dati simulati per le rotatorie 2 e 3 (Mirano Scaltenigo).

6.5.2.1 Analisi statistica

Anche per questa rotatoria è stata effettuata un'analisi statistica basata sul t-test per determinare se i gap critici ottenuti dalle simulazioni mostrano differenze statisticamente significative rispetto ai gap critici ottenuti dai dati rilevati su campo.

Il livello di significatività scelto è stato al 5%. Si sono definiti i gap critici nel seguente modo:

- $[Tc]_C$ = Gap critico ottenuto dai dati rilevati sul Campo;
- $[Tc]_R$ = Gap critico ottenuto dai dati simulati per la sequenza "Random";
- $[Tc]_P$ = Gap critico ottenuto dai dati simulati per la sequenza "Progressiva".

Per quanto riguarda la sequenza di arrivi "Random", ovvero la più realistica, l'ipotesi nulla $H_0 : [Tc]_C - [Tc]_R = 0$ risulta rifiutata (statistica $T = 8,14 > T_\alpha = 1,96$) nonostante la differenza tra i gap critici di appena tre decimi di secondo.

Per quanto riguarda la sequenza di arrivi "Progressiva", l'ipotesi nulla $H_0 : [Tc]_C - [Tc]_R = 0$ risulta anch'essa rifiutata (statistica $T = 8,65 > T_\alpha = 1,96$).

6.5.2.2 Implicazioni operative dei risultati

Visto che il test di validazione per la rotatoria “Mirano Scaltenigo” non ha dato esito positivo con l’analisi statistica, per vedere se la differenza è “significativa” anche dal punto di vista applicativo, si procederà determinando le capacità di manovra al variare del flusso sull’anello, in funzione dei gap critici ottenuti, e confrontando le curve così ottenute.

Dataset	Dimensione Campione	Gap Critico [s]	Deviazione Standard [s]
<i>Osservazioni sul campo</i>	921	3,35	0,5
<i>Simulazioni di guida [R]</i>	116	3,68	0,13
<i>Differenza</i>	-	0,33 (9,8 %)	0.37 (74 %)

Tab. 21 - Confronto qualitativo tra i gap critici.

Dataset	Dimensione Campione	Gap Critico [s]	Dev. Standard [s]
<i>Osservazioni sul campo</i>	921	3,35	0,5
<i>Simulazioni di guida [P]</i>	179	2,99	0,21
<i>Differenza</i>	-	0,36 (10,7%)	0,29 (58 %)

Tab. 22 - Confronto qualitativo tra i gap critici.

Per stimare la capacità di manovra è stata utilizzata la formula proposta dall'HCM 2010 (vedi § 2.3.7):

Capacità della manovra [veic/h]					
Vc [veic/h]	[Tc] _c (a)	[Tc] _R (b)	[Tc] _P (c)	(a-b)/a	(a-c)/a
100	1261,28	1249,77	1273,96	0,9%	-1 %
200	1193,12	1171,44	1217,22	1,8%	-2 %
300	1128,64	1098,03	1163,01	2,7 %	-3 %
400	1067,65	1029,21	1111,22	3,6 %	-4 %
500	1009,95	964,71	1061,73	4,5 %	-5 %
600	955,38	904,25	1014,45	5,4 %	-6 %
700	903,75	847,58	969,28	6,2 %	-7 %
800	854,91	794,46	926,11	7,1 %	-8 %
900	808,71	744,67	884,87	7,9 %	-9 %
1000	765,00	698,00	845,46	8,8 %	-10,5 %
1100	723,66	654,25	807,81	9,6 %	-11,6 %
1200	684,56	613,25	771,83	10,4 %	-12,7 %

Tab. 23 - Confronti tra le capacità calcolate con i vari Gap critici.

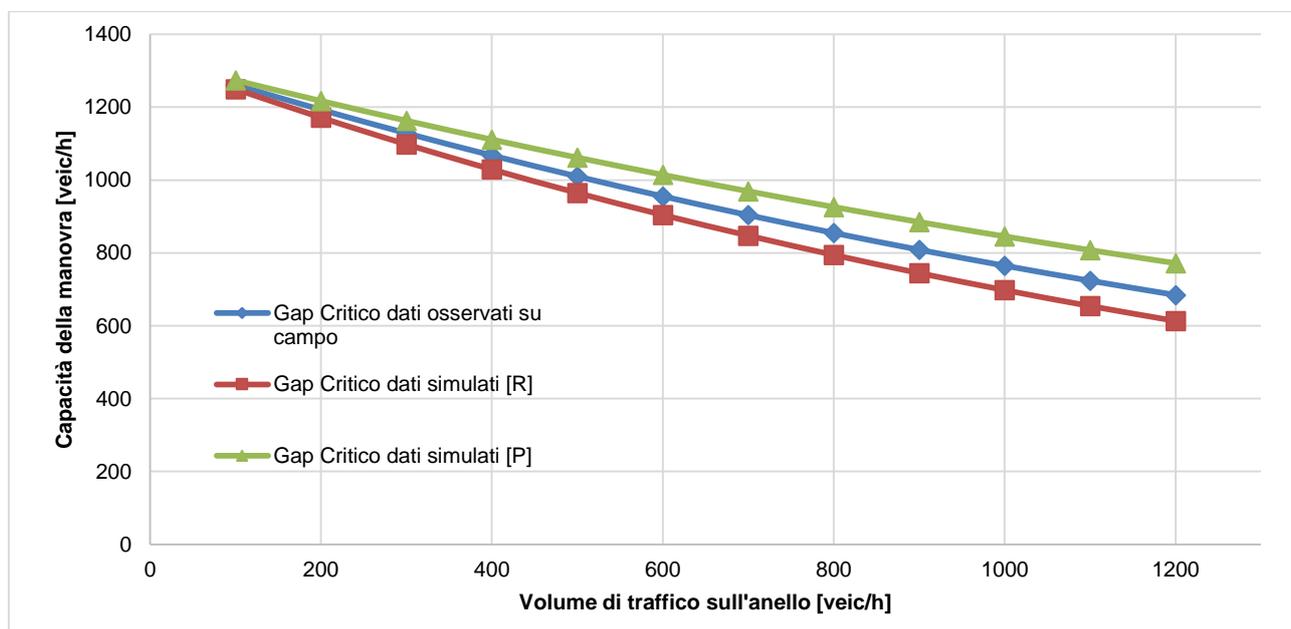


Fig. 77 - Metodo HCM 2010. Curve di capacità di manovra a confronto (Mirano Scaltenigo) in funzione dei valori di Tc stimati sul campo e nelle simulazioni.

Il confronto tra le capacità di manovra mostra una massima differenza relativa pari al 10,4 % per la sequenza “Random”, e 12,7% per la sequenza “Progressiva”.

In particolare, per un volume di traffico sull’anello di 746 veic/h, che è il flusso osservato su campo, la differenza relativa è pari al 6,6 % per la sequenza “Random”, e 7,7% per la sequenza “Progressiva”, che sembrano essere compatibili con i comuni errori di stima.

7. Conclusioni

I risultati di questo studio hanno permesso di osservare che:

- Per le sequenze di arrivi "Random", ovvero quelle che ripropongono gli stessi headway osservati nella realtà, con lo stesso ordine, i gap critici misurati a partire dai dati di simulazioni hanno tendenzialmente valori superiori rispetto ai gap critici misurati con i dati rilevati su campo.
- Esiste una differenza tra la percezione visiva nel mondo reale e quella nello scenario virtuale: sembra che nel contesto virtuale il comportamento di gap-acceptance sia più impegnativo. I guidatori si comportano più prudentemente perchè valutano le distanze dai veicoli che sorraggiungono come più piccole di quelle che sono in realtà. Si è notata inoltre una tendenza dei soggetti ad avere dei comportamenti incoerenti, ovvero accettare i gap più grandi nonostante in alcuni casi avessero potuto accettarne di più piccoli.

Questi aspetti sono stati più evidenti dai risultati della prima fase di test per la calibrazione, infatti si è dovuto intervenire sullo script per migliorare la percezione degli spazi tra veicoli nella realtà virtuale. In generale la poca familiarità con il simulatore porta a tenere un comportamento più prudente. Si consiglia di selezionare soggetti con un minimo di esperienza, e/o di fare un training pre-esperimento di durata maggiore. La mancata restituzione delle sensazioni d'inerzia da parte del simulatore causa in soggetti più sensibili delle sensazioni di nausea/stordimento. Questo influisce molto nelle situazioni in cui è necessario fermarsi e poi ripartire. Si è cercato di ridurre al minimo tale sintomo mantenendo per tutti i test una temperatura di 20° e lo stesso livello di luminosità.

Il valore di gap critico stimato a partire dai dati simulati per la rotatoria “Mirano Taglio Sinistro” non ha avuto differenze significative con quello ottenuto dai dati rilevati su campo. Per la rotatoria “Mirano Scaltenigo” il risultato è stato meno soddisfacente, ma comunque accettabile dal punto di vista applicativo per il calcolo della capacità di manovra.

- Per le sequenze di arrivi “Progressive” (ovvero gli arrivi di veicoli con headway a partire da 1 sec e con incremento di 0,2 sec alla volta) i confronti tra i gap critici ottenuti da dati simulati e quelli ottenuti da dati rilevati su campo hanno portato ad affermare che statisticamente le differenze sono significative. I risultati per entrambe le rotatorie sono stati più bassi rispetto ai gap critici ottenuti da dati reali. Questo vuol dire che i test drivers si sono comportati in modo più aggressivo. Tale variazione di comportamento è dovuta alla successione con cui si presentano i veicoli, che oltre a non essere quella reale osservata (è plausibile quindi aspettarsi un diverso risultato). I soggetti nella fase di selezione dei gap si rendono conto che gli headway crescono progressivamente e fanno una previsione del gap che accetteranno.
- La reale soglia critica dei soggetti con molta probabilità è quella stimata con le sequenze “Progressive”, in quanto nelle sequenze “Random” (così come nella realtà) i guidatori sono impreparati agli arrivi casuali dei veicoli. La conseguenza è che condizionando la sequenza di arrivi nella corrente principale è possibile condizionare il comportamento degli utenti che approcciano dalla secondaria, in questo caso portando ad un aumento della capacità.
- E’ plausibile pensare che possa esistere anche una differenza tra le caratteristiche dei soggetti (età, sesso, stile di guida) che hanno preso parte agli esperimenti in laboratorio e le caratteristiche dei soggetti osservati su campo. Di quest’ultimi infatti non si possiede alcuna informazione. L’interesse è comunque orientato allo studio dei comportamenti di soggetti giovani in relazione alla maggiore frequenza d’incidentalità che li caratterizza.

Appendice

A Cenni di statistica inferenziale. Il test “t”

Con il termine “statistica inferenziale” si intende quel complesso di metodi e procedure aventi lo scopo di dedurre le caratteristiche di una popolazione sulla base dell'osservazione di una parte di essa, detta campione, selezionata in maniera casuale.

I campioni considerati nelle analisi di tipo statistico hanno generalmente dimensione $n > 1$ e possono essere interpretati come n realizzazioni indipendenti di un certo esperimento di base, svolto ogni volta nelle medesime condizioni. La natura stocastica dell'esperimento rende inevitabile il coinvolgimento del calcolo delle probabilità.

Nell'ambito di quest'ultimo, noto il processo di generazione dei dati sperimentali, detto modello probabilistico, si è in grado di valutare la probabilità associata ad ognuno dei possibili risultati di un esperimento. Nel caso dell'inferenza statistica avviene, in un certo senso, il contrario di ciò. In questo caso infatti il processo di generazione dei dati sperimentali non è noto in modo completo ma spesso si rivela essere l'oggetto di indagine. Le tecniche inferenziali si prefiggono dunque di desumere le caratteristiche di tale processo sulla base dell'osservazione dei dati sperimentali da esso generati. Ciò rende possibile l'effettuazione di diversi tipi di operazioni quali stime per punti o intervalli, verifiche di ipotesi e previsioni.

A 1 Il t-test

Il t - test permette di effettuare verifiche di ipotesi relative alle medie di popolazioni indipendenti e aventi la medesima distribuzione. Il test si rivela particolarmente efficace se quest'ultima può essere approssimata alla normale, ma rimane comunque appropriato anche per altre distribuzioni, purché la numerosità delle osservazioni sia elevata.

Il t-test può assumere varie forme a seconda dell'oggetto di analisi (varianza o media). Nel nostro caso parleremo di t - test tra medie di due popolazioni indipendenti, che può essere usato quando il campione estratto dalla prima popolazione è indipendente da quello estratto dalla seconda. La dipendenza può essere dovuta alla scelta di campioni composti da individui che condividono una stessa caratteristica oppure si realizza quando vengono effettuate misurazioni ripetute sullo stesso insieme di individui. In entrambi i casi

l'attenzione si sposta dai singoli valori osservati nei campioni alle differenze tra i valori medesimi.

La statistica test t per la differenza tra le medie è:

$$t = \frac{\bar{\Delta} - \mu_{\Delta}}{\frac{S_{\Delta}}{\sqrt{n}}}$$

Con: $\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}$ $S_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}}$

I termini indicati con D rappresentano le differenze tra valori. La statistica test t segue la distribuzione t di Student con (n - 1) gradi di libertà.

Anche in questo caso definito un certo livello di significatività α , l'ipotesi nulla deve essere rifiutata se il valore osservato della statistica test è più piccolo del valore critico inferiore - t_{n-1} , o maggiore del valore critico superiore t_{n-1} , ricavabili tramite tabelle statistiche, della distribuzione t di Student a (n - 1) gradi di libertà.

Bibliografia

Sartori P., (a.a. 2005/2006), “Verifica sperimentale di modelli per l’analisi del funzionamento delle intersezioni a rotatoria”, Tesi Specialistica in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Padova.

Carollo S., (a.a. 2012/2013), “Analisi sperimentale della capacità di un ramo di un’intersezione a rotatoria mediante la teoria del Gap-Acceptance”, Tesi Specialistica in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Padova.

Zornetta M., (a.a. 2012/2013), “Contromisure percettive per la riduzione della velocità in curva. Validazione e simulazione in ambiente virtuale”, Tesi Specialistica in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Padova.

Roncada M., (a.a. 2011/2012), “L’uso dei delineatori di margine come misura percettiva per la riduzione della velocità: esperimenti mediante simulatore di guida”, Tesi Specialistica in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Padova.

Rossi R., Gastaldi M., Meneguzzo C., Gecchele G. “Gap-Acceptance Behavior at Priority Intersection. Field Observations Versus Experiments With Driving Simulator”, Transportation Research Board (2011) Annual meeting.

Bodrito O. (2010), “Rotatorie: analisi e progettazione”, Dario Flaccovio Editore.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2006), “Decreto Ministeriale 19/04/2006 – Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali” Gazzetta Ufficiale 27/07/2006

Federal Highway Administration, FHWA, (2000), "Roundabouts: An Informational Guide", U.S. Department of Transportation

Irvana J. Randhal S., (2010) "Analysis of gap-acceptance in a saturated two-lane roundabout and implementation of critical gaps in VISSIM" Thesis at the Department of Technology and Society at Lund Institute of Technology, Lund University.

Akcelik R. et al. (1998) "Roundabouts: capacity and performance analysis." ARRB Transport Research Ltd, Research Report ARR No.321, Vermont South, Victoria, Australia pp.1-150.

Akcelik R. (2007) "A review of Gap-Acceptance Capacity Models." 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2007), University of South Australia, Adelaide, Australia pp.1-24.

Akcelik R. (2011) "An assessment of the Highway Capacity Manual 2010 roundabout capacity model." International Roundabout Conference, Transportation Research Board, Carmel, Indiana, USA, pp.1-21.

National Cooperative Highway Research Program, "Modern Roundabouts Practise in the United States. A synthesis of Highway Practice" Transportation Research Board.

Polus A., Shmueli S. (1997), "Analysis and Evaluation of Capacity of Roundabouts", Transportation Research Record 1572 pp. 99-104.

Polus A., Shmueli S., Livneh M., (2003), "Critical Gap as function of waiting time in determining roundabout capacity", Journal of transportation engineering, ASCE, pp. 504-509.

Polus A., Shmueli S., Shiftan Y. (2005), "Evaluation of the waiting time effect on critical gaps at roundabouts by a Logit model", EJTIR, 5, No.1, pp. 1-12.

Brilon W. (2005), "Roundabouts: A state of Art in Germany" National Roundabout Conference, Vail, Colorado.

HCM 2000, Transportation Research Board 2000

HCM 2010, Transportation Research Board 2010

Troutbeck R.J., Brilon W., (1992) "Unsignalized Intersection Theory – Chapter 8", Revised monograph on traffic flow theory, U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration, pp 1-47

Troutbeck R., Kako S., (1999) "Limited priority merge at unsignalized intersections", Transportation Research Part A33, pp. 291-304.

Guo R. (2010), "Estimating Critical Gap of Roundabouts by Different Methods", The Sixth Advanced Forum on Transportation of China, pp. 84-89.

Weinert A. (2001), "Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times at Rural Unsignalized Intersections in Germany", Transportation Research Circular E-C018, 4th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Yokohama, Japan, pp. 1-10.

Wu N. (2006) "A new model for estimating critical gap and its distribution at unsignalized intersection based on the equilibrium of probabilities", Proceeding of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Yokohama, Japan, pp 1-10.

Weinert A. (2001), "Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times at Rural Unsignalized Intersections in Germany" Transportation Research Circular E-C018, 4th International Symposium on Highway Capacity, pp. 409-421.

Cheng J., Yang X., Deng W., Huang X., (2008), "driver's critical gap calibration at urban roundabouts: a case study in china", Tsinghua Science and technology, Vol.13, N.2, pp 237-242.

Hagring Ola, Rouphail N.M., Sorensen H.A. (2003), "Comparison of capacity models for two lane roundabouts", Transportation Research Record 1852, Paper no 03-4525, pp. 114-123.

Siegloch W., (1973), "Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten Ohne Lichtsignalsteuerung (Capacity unsignalized intersections. Calculations for unsignalized intersections). Schriftenreihe Strassenbau and Strassenverkehrstechnik" Vol. 154.

Vasconcelos L., Silva A.B., Seco A., Rouxinol G., (2011) "Estimation of critical headways at unsignalized intersections – a microscope approach" 3th international Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA, pp. 1-18.