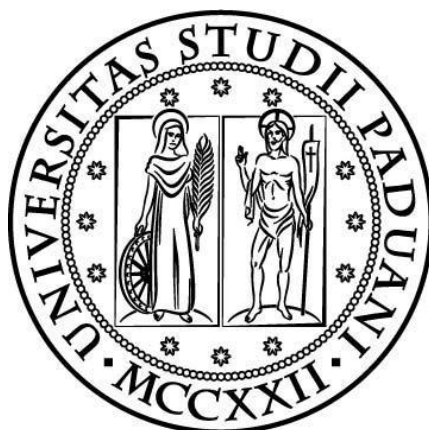




UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE ED AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

**Effetto della distribuzione degli arrivi veicolari sul
comportamento di gap acceptance. Esperimenti in
ambiente virtuale**

Relatore: Chia.mo Prof. RICCARDO ROSSI

Correlatori: Chia.mo Prof. MASSIMILIANO GASTALDI

Chia.ma Prof.ssa ROSA ARBORETTI

Laureando: FILIPPO GIUSEPPE SORGATO

Matricola: 1041100

Anno accademico 2014-2015

*Se vuoi l'arcobaleno
devi sopportare la pioggia
(tratto da “ Colpa delle Stelle”)*

SOMMARIO

SOMMARIO	5
INTRODUZIONE	9
CAPITOLO 1 – TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE	11
1.1 STIMA DEI PARAMETRI DI GAP ACCEPTANCE	14
1.1.1 TECNICA DI REGRESSIONE	14
1.1.2 TECNICHE DI STIMA IN CONDIZIONI DI SOTTOSATURAZIONE	16
1.1.2.1 METODO DI RAFF	18
1.1.2.2 METODO DI ASHWORTH	19
1.1.2.3 METODO DI HARDERS	19
1.1.2.4 METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA	20
1.1.2.5 METODO DELLA PROBABILITA' DI EQUILIBRIO	22
1.1.2.6 CONFRONTO TRA IL METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA ED IL METODO DELLA PROBABILITA' D'EQUILIBRIO (WU)	25
1.1.2.7 METODO LOGIT	31
1.1.2.8 METODO PROBIT	34
1.1.2.9 METODO DELL'ACCETTAZIONE CUMULATIVA	37
1.1.2.10 CONFRONTO TRA I METODI	38
1.2 DISTRIBUZIONE DEGLI HEADWAY NELLA TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE	40
1.2.1 DISTRIBUZIONE ESPONENZIALE NEGATIVA	40
1.2.2 DISTRIBUZIONE ESPONENZIALE NEGATIVA TRASLATA	41
1.2.3 DISTRIBUZIONE DICOTOMICA	41
2 CAPITOLO 2 - CAPACITA' PER INTERSEZIONI A ROTATORIA	43
2.1 TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE PER INTERSEZIONI A ROTATORIA	47
2.2 CAPACITA' DEL RAMO D'APPROCCIO DI UN'INTERSEZIONE A ROTATORIA	50
2.2.1 METODI EMPIRICI	51
2.2.1.1 METODO DI KIMBER	51
2.2.1.2 METODO SVIZZERO (DI BOVY)	53
2.2.1.3 METODO SETRA	55
2.2.1.4 METODO CETUR	56
2.2.2 METODI ANALITICI (TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE)	57
2.2.2.1 METODO DI SIEGLOCH	58
2.2.2.2 METODO DI HARDERS	59
2.2.2.3 METODO DI WU	59
2.2.2.4 METODO PROPOSTO DALL' HCM 2000	62
2.2.2.5 METODO PROPOSTO DALL' HCM 2010	65
2.2.2.6 METODO DI TANNER	66

3	CAPITOLO 3 – ESPERIMENTO IN AMBIENTE SIMULATIVO	67
3.1	IL SIMULATORE DI GUIDA : INTRODUZIONE	67
3.2	CREAZIONE DELLO SCENARIO VIRTUALE.....	71
3.3	CARATTERISTICHE DEL PERCORSO DI GUIDA	74
3.4	DISTRIBUZIONE DEGLI HEADWAY DI TIPO PROGRESSIVO CRESCENTE	80
3.4.1	TRAFFIC GENERATION FOR STUDIES OF GAP ACCEPTANCE	80
3.4.2	EFFECTS OF MAJOR-ROAD VEHICLE SPEED AND DRIVER AGE AND GENDER ON LEFT-TURN GAP ACCEPTANCE	83
3.4.3	AGE RELATED DIFFERENCES IN STREET CROSSING DECISIONS: THE EFFECT OF VEHICLE SPEED AND TIME CONSTRAINTS ON GAP SELECTION IN AN ESTIMATION TASK	86
3.5	ANALISI SPERIMENTALE IN AMBIENTE VIRTUALE	91
3.6	DEFINIZIONE DELLE CATEGORIE DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DEL GAP CRITICO	97
3.7	ELABORAZIONE DEI DATI.....	101
4	CAPITOLO 4 - DETERMINAZIONE DEL GAP CRITICO	105
4.1	METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA	105
4.2	METODO LOGIT	107
4.3	METODO PROBIT.....	110
4.4	METODO DELLA PROBABILITA' DI EQUILIBRIO (METODO DI WU).....	111
4.5	TABELLA RIASSUNTIVA	112
4.6	CONFRONTO TRA DUE CAMPIONI INDIPENENTI: APPLICAZIONE DEL TEST-T DI STUDENT	113
4.6.1	VALIDAZIONE DEI DATI DEI TEST AL SIMULATORE	117
4.7	CONFRONTO TRA LE CATEGORIE DI STUDIO	119
4.7.1	CONFRONTO DISTRIBUZIONE RANDOM/PROGRESSIVA	119
4.7.2	CONFRONTO TRA GENERE MASCHILE/FEMMINILE	127
4.7.3	CONFRONTO TRA CONDUCENTI PIU' E MENO ESPERTI	129
4.7.4	CONFRONTO TRA I TEST ESEGUITI AL MATTINO/POMERIGGIO	131
4.7.5	CONFRONTO DELLE MEDIE DEL GAP CRITICO FUNZIONE DELLE ROTATORIE PERCORSE	133
4.7.5.1	TEST-T A COPPIE CON LA CORREZIONE DI BONFERRONI	137
4.8	CONFRONTO TRA I METODI DI STIMA DEL GAP CRITICO	144
4.8.1	CONFRONTO TRA METODI CONSIDERANDO IL SOLO MAX GAP RIFIUTATO	148
5	CAPITOLO 5 – DETERMINAZIONE DELLA CAPACITA'	153

5.1	HCM 2000	154
5.2	SIEGLOCH	156
5.3	METODO DI WU	158
5.4	HCM 2010	160
5.5	CONFRONTO TRA I METODI DI STIMA DELLA CAPACITA'	162
5.6	CONFRONTO CON UN METODO DI STIMA EMPIRICO (CETUR)	163
6	CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI	167
6.1	POSSIBILI SVILUPPI	170
	BIBLIOGRAFIA	173
	RINGRAZIAMENTI	176

INTRODUZIONE

Lo studio del comportamento di gap acceptance nelle intersezioni a regime di priorità è stato ed è un argomento centrale nella letteratura della teoria e tecnica della circolazione.

I motivi che spingono ad analizzare il comportamento di gap acceptance nelle intersezioni a regime di priorità si possono sintetizzare nei seguenti punti:

- Aumento della sicurezza;
- Diminuzione del ritardo associato all'esecuzione della manovra al nodo;
- Ottimizzazione della capacità associata alla manovra;
- Diminuzione delle emissioni inquinanti da parte dei veicoli.

Questa tesi analizzerà il comportamento di gap acceptance nelle intersezioni a rotatoria. Si cercherà di stimare il valore del gap critico di un campione di conducenti mediante l'osservazione dei comportamenti in ambiente simulato.

Questo sarà possibile grazie al simulatore di guida messo a disposizione dal laboratorio di Trasporti del Dipartimento ICEA dell'Università degli studi di Padova. Si proporrà in un ambiente simulativo una rotatoria reale (nelle caratteristiche geometriche e del traffico circolante) da affrontare più volte, da parte di uno stesso soggetto, all'interno di un percorso opportunamente progettato. Verranno proposte due distribuzioni degli headway della corrente circolante nell'anello della rotatoria: la prima riprodurrà il traffico realmente registrato nell'intersezione di Mirano via Taglio sinistro (Ve) e sarà denominata come distribuzione "random"; la seconda è strutturata in modo che tra successivi headway della corrente di conflitto ci sia un incremento progressivo crescente di 0.2 secondi, partendo da gap di un 1 secondo (non accettabile perché di dimensioni troppo piccole), arrivando fino ad un limite massimo di gap di 10 secondi. Questa seconda distribuzione verrà chiamata "progressiva".

Si stimeranno la media e la varianza del gap critico del campione di soggetti testati, differenziando l'approccio della distribuzione "random" da quello della distribuzione "progressiva", per osservare se la struttura della distribuzione degli headway della corrente di conflitto possa influenzare il comportamento di gap acceptance descritto dal valore della media del gap critico.

Sarà necessario innanzitutto validare i risultati che si otterranno dagli esperimenti condotti al simulatore di guida con quelli tratti dal rilievo di traffico, tramite opportuni test statistici. Solamente se le medie del gap critico non saranno tra loro "significativamente differenti" si potranno validare i risultati tratti dagli esperimenti al simulatore di guida.

Ogni confronto sarà eseguito applicando opportuni test statistici (test-t di Student, ANOVA con test post-hoc eseguito con il test-t con correzione di Bonferroni).

Si testerà un campione di soggetti per poter poi stimare la media del gap critico del campione di popolazione tramite il metodo della massima verosimiglianza, sia per la distribuzione random che per la distribuzione progressiva.

La media del gap critico sarà determinata in funzione:

- Dell'insieme delle decisioni prese da tutti i soggetti (CASO 1);
- Delle medie relative alle decisioni di ogni singolo soggetto (CASO 2);
- Delle medie relative alle rotatorie affrontate all'interno del percorso virtuale.

Si approfondirà il CASO 2 in quanto si vuole capire come si correlano tra loro le medie ricavate dalla distribuzione random e da quella progressiva relativamente ad ogni soggetto.

Si eseguiranno dei confronti in relazione alla media del gap critico che si otterranno considerando ogni rotatoria affrontata all'interno dello scenario virtuale, con l'obiettivo di osservare se il gap critico possa variare con l'aumento della confidenza da parte dei soggetti con il simulatore di guida e con il tracciato.

Si eseguirà poi un confronto tra diversi sottogruppi in cui sarà possibile dividere il campione totale di soggetti testati, per studiare se determinati fattori o caratteristiche possano influire sul comportamento di gap acceptance dei guidatori. In particolare verrà eseguito un confronto tra le medie del gap critico del genere maschile e femminile, tra le medie del gap critico di conducenti più o meno esperti, tra le medie del gap critico in funzione dell'orario di guida all'interno della giornata (effetto del ritmo circadiano).

La media del gap critico, sia per la distribuzione random che per quella progressiva, verrà determinata con il metodo della massima verosimiglianza, il metodo Logit, Probit e della Probabilità d'equilibrio (metodo di Wu). Si confronteranno tra loro i risultati ottenuti e si valuterà quale sia il metodo che meglio rappresenta il valore della media del gap critico.

Si calcoleranno i valori delle capacità dei rami d'ingresso alle rotatorie utilizzando diversi metodi di stima analitici, basati sulla teoria del gap acceptance, (in particolare si useranno i metodi proposti dall'HCM 2000, HCM 2010, il metodo di Sieglösch e di Wu) per confrontare sia la media del gap critico ricavata dalle distribuzioni "random" con quella ricavata dalle distribuzioni "progressive" degli headway. In questo modo sarà possibile osservare come la media del gap critico calcolata in funzione della diversa struttura degli intertempi veicolari possa far variare il valore della capacità del ramo d'ingresso alla rotatoria.

Verrà eseguito un ultimo confronto tra la capacità al ramo d'ingresso di una rotatoria tra un metodo di stima analitico (HCM 2000, con la capacità stimata dalle distribuzioni random e progressive degli headway) ed uno empirico (CETUR, adatto alla stima della capacità di rotatorie urbane).

Si faranno delle considerazioni sui possibili sviluppi derivanti dalla stima del gap critico con distribuzione "progressiva" degli headway.

CAPITOLO 1 – TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE

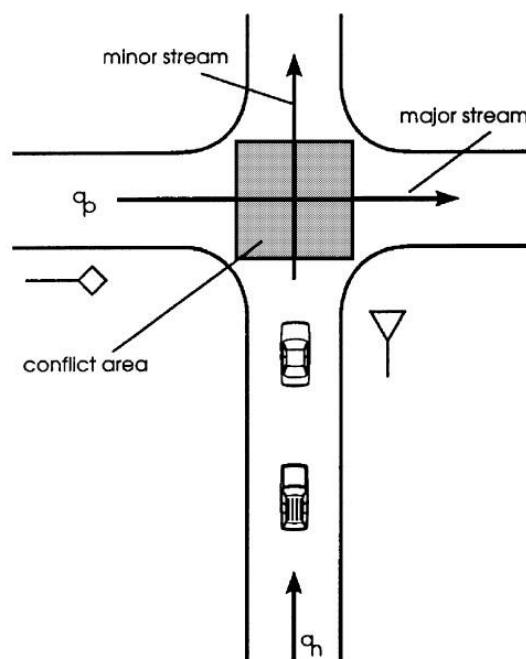


Figura 1 - Intersezione a regime di priorità

La teoria del gap acceptance esprime ipotesi e considerazioni sul caso generale delle intersezioni a regime di priorità per poi particularizzare lo studio alle intersezioni a rotatoria.

Nelle intersezioni a regime di priorità è il guidatore della corrente secondaria a decidere quando sia sicuro attraversare o immettersi nella corrente di traffico principale, giudicando quale gap sia più opportuno scegliere ((01) Brilon, 2000).

Per comprendere la teoria del gap acceptance è innanzitutto necessario conoscere le definizioni fondamentali. Concentrandosi nel caso più generale di intersezione a regime di priorità tra due strade a senso unico, sono ammesse due manovre: l'attraversamento sul ramo primario a cui è associato il volume q_p e l'attraversamento a partire dal ramo secondario a cui è associato il flusso q_n ((03) Brilon, 1999) (figura 1).

Il veicolo della corrente secondaria q_n esegue la manovra d'attraversamento quando giudica accettabile, in termini di sicurezza, il gap che separa due veicoli della corrente principale q_p (figura 2).

Il gap è definito come l'intervallo di tempo tra il passaggio di due successivi veicoli misurato in una sezione stradale dal paraurti posteriore del primo veicolo al paraurti anteriore del secondo veicolo.

Il *lag* è la parte residua del gap della corrente primaria che il veicolo della secondaria valuta se accettare o meno (figura 3).

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

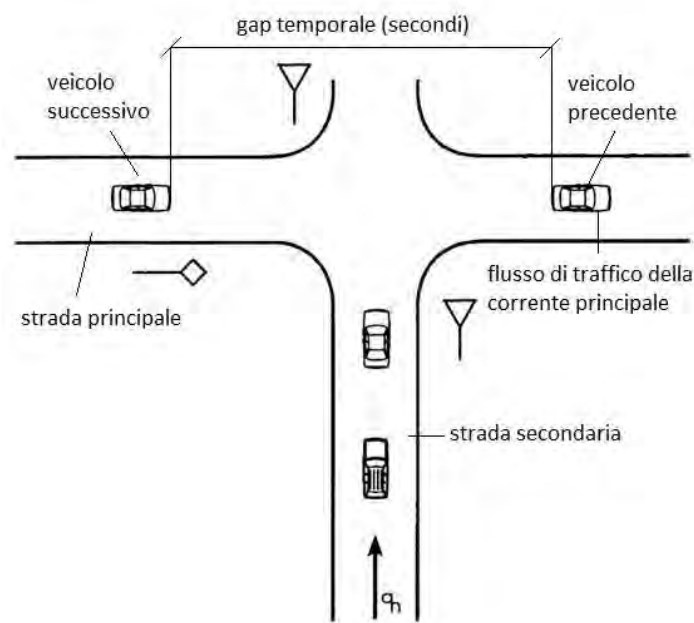


Figura 2 - Rappresentazione del gap per intersezioni a regime di priorità

Il *gap critico* t_c è il gap minimo della corrente principale che un guidatore della corrente secondaria è disposto ad accettare per attraversare o entrare in condizioni di sicurezza nell'area di conflitto.

Una seconda variabile per la caratterizzazione del comportamento dei conducenti della strada secondaria è il *follow-up time* t_f , definito come l'headway tra due successivi veicoli della corrente secondaria che entrano nell'area di conflitto dell'intersezione nello stesso gap della corrente primaria, nell'ipotesi che sul ramo secondario vi sia coda continua. Il follow-up time t_f è anche definito tempo di scalamento in coda.

L' headway è l'intervallo temporale tra il passaggio di due successivi veicoli misurato in una sezione stradale dal paraurti anteriore del primo veicolo al paraurti anteriore del secondo veicolo.

Le variabili che influenzano t_c e t_f , diverse per ogni soggetto, sono state oggetto di diversi studi e si possono riassumere nei seguenti punti:

- Tipologia di manovra
- Tipologia di controllo
- Angolo di approccio all'intersezione
- Tempo di attesa prima dell'immissione
- Aspetti psico-fisici del soggetto
- Velocità del flusso di conflitto

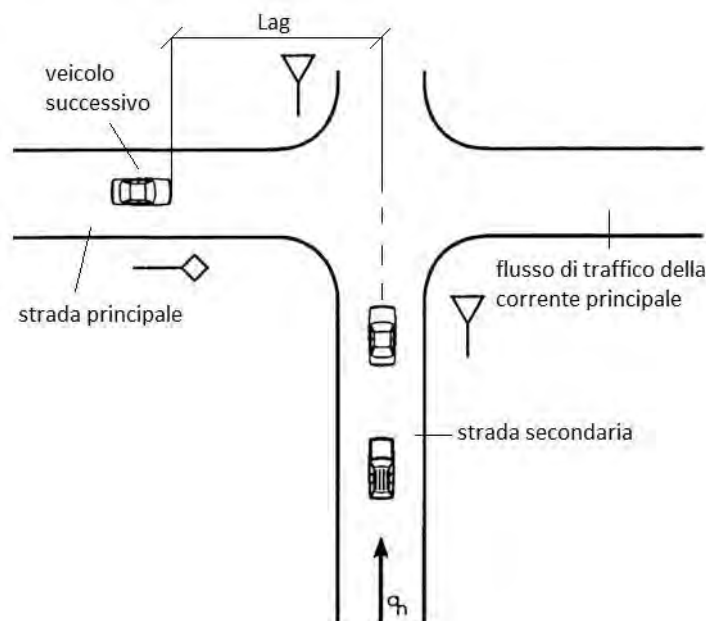


Figura 3 - Rappresentazione del lag per intersezione a regime di priorità

Lo stesso soggetto può avere comportamenti diversi in una stessa situazione in funzione dell'ora del giorno, del giorno della settimana o dello scopo del viaggio.

A causa di questa variabilità non c'è dubbio che il processo di gap acceptance sia di natura stocastica, e conseguentemente anche t_c e t_f possono essere viste come variabili casuali. In aggiunta, i parametri delle funzioni di distribuzione possono essere influenzati da ulteriori fattori esterni. E' necessario definire delle caratteristiche rappresentative per esprimere il comportamento medio dei guidatori, e si assumono allora come ipotesi fondamentali di partenza la *coerenza* e l'*omogeneità* dei guidatori che compongono la popolazione oggetto di studio.

Per *coerenza* si intende il mantenimento di uno stesso comportamento da parte di un guidatore ogni qual volta si presenti una stessa situazione. Questo significa che un soggetto con uno specifico valore di t_c non accetterà mai un gap minore di t_c e accetterà ogni gap della corrente principale maggiore di t_c .

Per *omogeneità* si intende l'uguaglianza delle caratteristiche soggettive dei conducenti di un sottogruppo della popolazione, definita dall'avere la stessa funzione di densità statistica e la stessa funzione di distribuzione cumulativa.

L'ipotesi di coerenza ed omogeneità della popolazione non è realistica, ma è stato dimostrato che i risultati trovati assumendo queste caratteristiche hanno differenze minime rispetto a quelli trovati senza queste ipotesi.

1.1 STIMA DEI PARAMETRI DI GAP ACCEPTANCE

I due parametri fondamentali oggetto di stima nella teoria del gap acceptance sono il gap critico t_c e il follow-up time t_f . Mentre il follow-up time è stimabile direttamente sul campo (è il tempo di scalamento in coda), il gap critico non può essere misurato direttamente. Il gap critico di ogni soggetto si troverà infatti all'interno di un intervallo temporale compreso tra il massimo gap rifiutato ed il gap accettato dal conducente stesso.

Le tecniche utilizzate per stimare questi due parametri si dividono essenzialmente in due gruppi:

1. Il primo gruppo è basato sull'analisi di regressione del numero di soggetti che accetta un gap di determinate dimensioni, ed è valido solamente in condizioni di saturazione del ramo secondario.
2. Il secondo gruppo stima la distribuzione di t_c e t_f indipendentemente, ed è valido anche in condizioni di sottosaturazione.

1.1.1 TECNICA DI REGRESSIONE

In presenza di coda continua sulla strada secondaria, la tecnica proposta ((04) Siegloch, 1973) produce risultati accettabili, purché i risultati rispecchino le ipotesi fondamentali assunte nella teoria del gap acceptance.

Per questa tecnica, come già sottolineato, deve esserci sempre almeno un veicolo accodato nel ramo secondario nel periodo di osservazione. Per sviluppare il procedimento si eseguono i seguenti passi:

- Si registra la dimensione di ogni gap t e il numero di veicoli n della corrente secondaria che entrano nella corrente primaria durante questo gap.
- Per ognuno dei gap che viene accettato da n guidatori si calcola il gap medio $E(t)$
- Si usa la regressione lineare sulle dimensioni medie del gap in funzione del numero di veicoli che sono entrati durante questo gap medio, n .

La pendenza della retta restituisce il valore del follow-up time t_f , mentre l'intercetta con l'asse delle ascisse restituisce lo zero gap t_0 , che è l'intercetta della retta con l'asse delle ascisse, ed è la stima del gap sotto il quale non ci sono state accettazioni.

$$t_f = \frac{gap}{n}$$

Il gap critico t_c è dato dalla formula:

$$t_c = t_0 + \frac{t_f}{2}$$

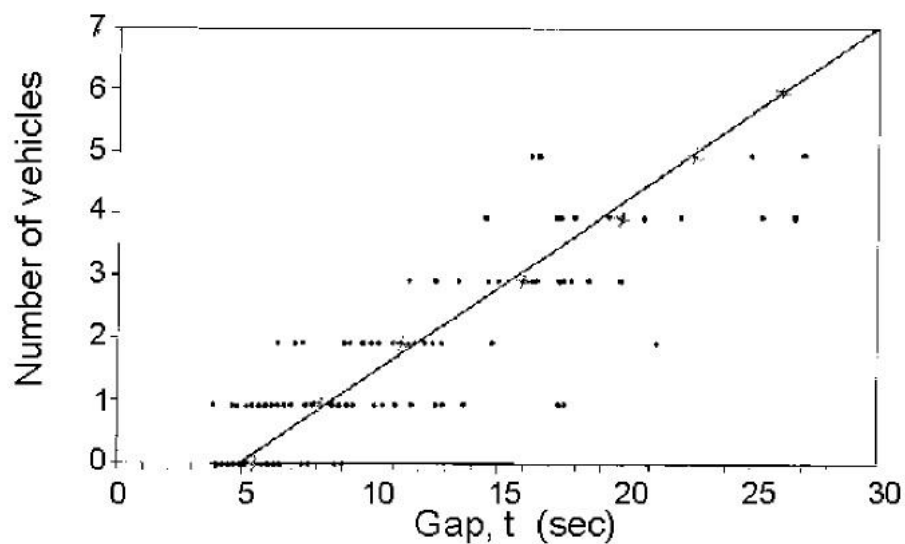


Figura 4 - Illustrazione del metodo di Sieglöch. I punti rappresentano i valori osservati del numero di veicoli che entrano nella corrente principale in funzione della dimensione del gap (t). Fonte: ((01) Brilon, 2000)

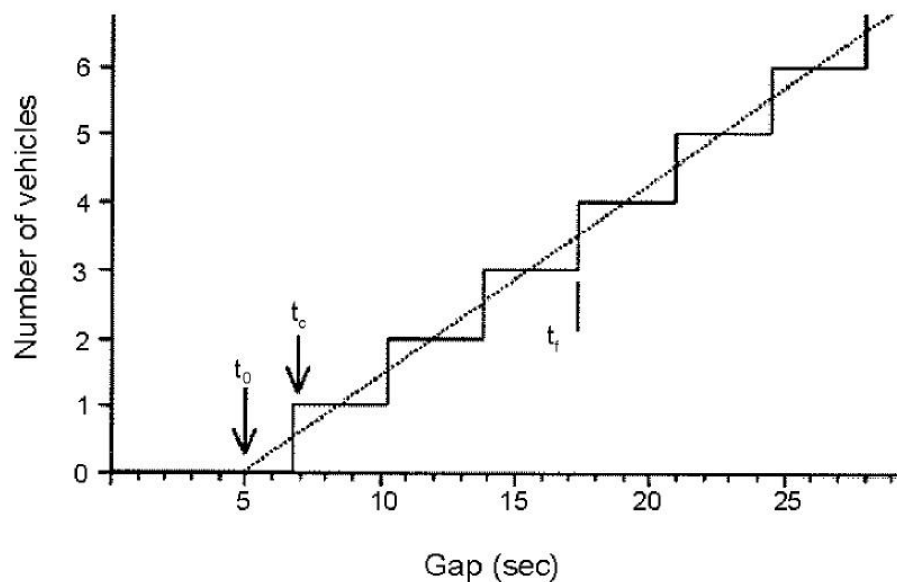


Figura 5 - Retta di regressione lineare e identificazione dello zero gap t_0 dato dall'intercetta della retta con l'asse delle ascisse, del gap critico t_c e del follow-up time t_f dato dalla pendenza della retta, secondo il metodo di Sieglöch. Fonte: ((01) Brilon, 2000)

1.1.2 TECNICHE DI STIMA IN CONDIZIONI DI SOTTOSATURAZIONE

La stima del follow-up time viene fatta sulla base delle osservazioni dirette sul campo.

Supponendo che sul ramo secondario vi siano tre veicoli accodati che si immettono nell'area di conflitto sfruttando il medesimo gap temporale di dimensione t e definendo:

- t_1 : istante temporale di immissione nell'area di conflitto del veicolo 1;
- t_2 : istante temporale di immissione nell'area di conflitto del veicolo 2;
- t_3 : istante temporale di immissione nell'area di conflitto del veicolo 3.

Allora:

- Il follow-up time per il veicolo 2 sarà: $t_{f2} = t_2 - t_1$

- Il follow-up time per il veicolo 3 sarà: $t_{f3} = t_3 - t_2$

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

$$t_f = \frac{\sum_i^n t_{fi}}{n}$$

La stima del gap critico t_c da osservazioni di traffico è più complicata in condizioni di sottosaturazione. Un guidatore che deve compiere la manovra di attraversamento o immissione dal ramo secondario compie una scelta binaria in funzione del gap che gli si presenta di fronte: accettazione o rifiuto. Ci si domanda: "Quali gap rifiutati includere nella distribuzione?". E poi: "E' migliore una rappresentazione della funzione di distribuzione statistica dei gap accettati $F_a(t)$ o una dei gap rifiutati $F_r(t)$?".

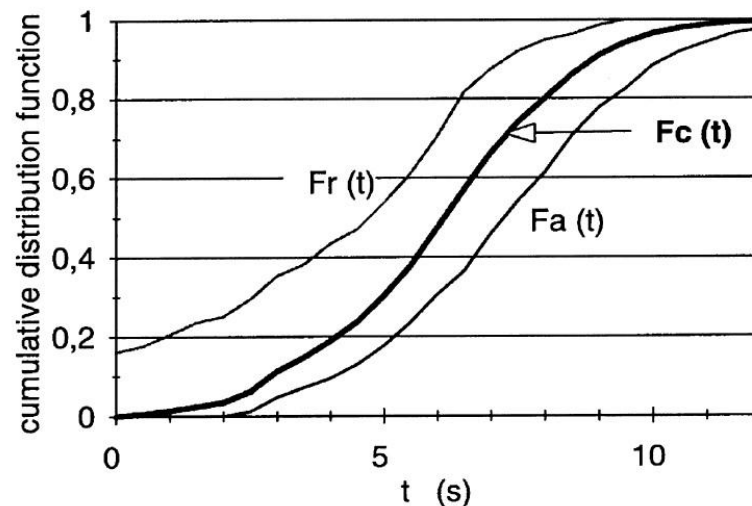


Figura 6 - La funzione di distribuzione $F_c(t)$ dei gap critici deve essere situata tra la funzione di distribuzione dei gap rifiutati $F_r(t)$ e dei gap accettati $F_a(t)$. Fonte: ((03) Brilon, 1999)

E' possibile distinguere vari casi:

- Nessun gap rifiutato è tenuto in considerazione, si valutano solo gli accettati (Ashworth, cumulative acceptance method).
- Solo il massimo gap rifiutato è incluso nella distribuzione ,e nel caso il conducente della secondaria accettasse il lag allora o si esclude il dato dalla procedura o si pone il gap rifiutato relativo al soggetto uguale a zero (Raff, metodo della massima verosimiglianza)
- Tutti i gap rifiutati sono tenuti in considerazione, inserendo anche un lungo elenco di gap nel caso il conducente della secondaria ne rifiutasse molti in serie (Harders, Probability equilibrium method, metodo Logit, metodo Probit)

Avendo posto le condizioni di coerenza per ogni guidatore si avrà $t_r < t_c < t_a$. E proprio perché la funzione di distribuzione $F_c(t)$ non può essere stimata direttamente, lo scopo delle procedure che seguiranno sarà di stimare quanto più fedelmente possibile $F_c(t)$, o di valutare in alternativa i suoi parametri tipici come la media μ e la varianza σ^2 .

Di seguito si elencano le principali tecniche di stima dei parametri del gap acceptance in condizioni di sottosaturazione:

1.1.2.1 METODO DI RAFF

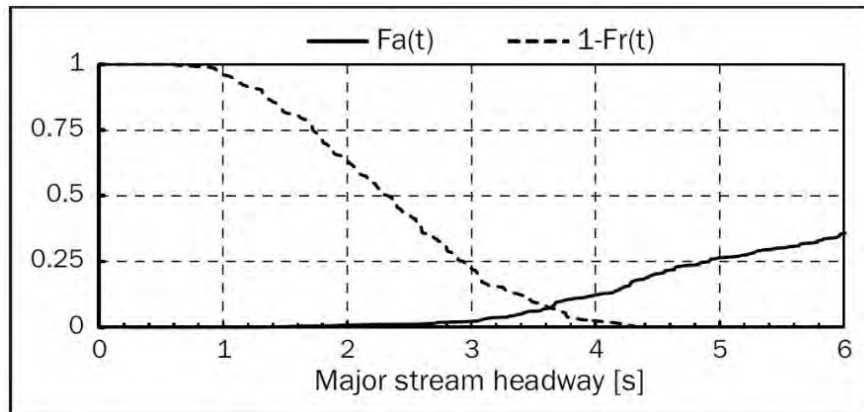


Figura 7 – Determinazione del gap critico mediante il metodo di Raff. Fonte : ((43) Vasconcelos Silva, 2012)

Il metodo più datato per la stima dei gap critici sembra essere quello di ((05) Raff, 1950). Il gap critico t_c è definito come quel valore di t per il quale le funzioni $(1-F_r(t))$ e $F_a(t)$ si intersecano, cioè dove vale la seguente uguaglianza:

$$1 - F_r(t) = F_a(t)$$

Dove :

- t : gap temporale della corrente primaria;
- $F_r(t)$: funzione di densità cumulativa dei gap rifiutati;
- $F_a(t)$: funzione di densità cumulativa dei gap accettati, basata su guidatori che rifiutano almeno il lag.

Il punto d'intersezione secondo ((06) Wu, 2012) corrisponde alla mediana e non alla media.

$F_r(t)$, per ridurre il peso dei guidatori prudenti nel modello, considera solamente il massimo gap rifiutato da ogni conducente.

1.1.2.2 METODO DI ASHWORTH

Nell'ipotesi di gap della corrente principale con distribuzione esponenziale, indipendenza statistica tra gap consecutivi e distribuzione del gap critico di tipo lognormale, ((07) Ashworth, 1968) determinò t_c come:

$$t_c = \mu_a - p \sigma_a^2$$

Dove:

- t_c : gap critico (s)
- μ_a : media dei gap accettati t_a (s)
- p : volume di traffico della corrente principale (ae/s)
- σ_a^2 : deviazione standard dei gap accettati (s^2)

Questo metodo è uno dei pochi (assieme al metodo dell'accettazione cumulativa) che utilizza solamente i gap accettati, trascurando i rifiutati. Se i gap accettati non sono distribuiti normalmente la soluzione diventa più complicata.

((02) Miller, 1972) propone una correzione al metodo nel caso il gap critico t_c segua la distribuzione gamma:

$$\begin{cases} t_c = t_a - V_p \sigma_c^2 \\ \sigma_c = \sigma_a \frac{t_c}{t_a} \end{cases}$$

t_c e σ_a sono ottenuti per successive iterazioni.

1.1.2.3 METODO DI HARDERS

((08) Harders, 1968) ha sviluppato una metodologia per la stima del gap critico divenuta alquanto popolare in Germania. La pratica per le intersezioni a regime di priorità fino a qualche anno fa faceva ancora riferimento a questo metodo per la stima del gap critico t_c .

Innanzitutto i lag non vengono utilizzati tra i dati. Il tempo è diviso in intervalli di durata costante di 0.5 secondi, e il centro di ogni intervallo i è nominato t_i . Per ogni veicolo in coda nella strada secondaria si osservano tutti i gap della corrente principale che si presentano al guidatore, oltre naturalmente al gap accettato. Da qui si calcola:

$$a_i = \frac{A_i}{N_i}$$

Dove:

- A_i : Numero di gap accettati di dimensione i
- N_i : Numero di gap di dimensione i presentati al veicolo dalla secondaria

La curva generata da questa procedura ha la forma di una funzione di distribuzione cumulativa trattata come la funzione $F_c(t)$, sebbene la funzione a_i non abbia relazioni matematiche valide con $F_c(t)$.

1.1.2.4 METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA

Il metodo della massima verosimiglianza (chiamato semplicemente MLM – Maximum Likelihood Method) per la stima del gap critico trova le sue radici in ((09) Miller, 1968) e ((02) Miller, 1972), ma è descritto dettagliatamente da ((10) Troutbeck, 1992).

Il metodo della massima verosimiglianza è basato sull'ipotesi che il gap critico di un conducente è maggiore del suo massimo gap rifiutato e minore di quello accettato e i dati da assumere sono proprio il massimo gap rifiutato ed il gap accettato da ogni soggetto. Il primo passo è assumere una distribuzione probabilistica dei gap critici, per la maggioranza dei casi può essere assunta una distribuzione lognormale. La distribuzione ha valori non negativi ed è ragionevolmente utilizzabile per la maggior parte degli studi. Per il MLM si assume che:

- a_i : gap accettato dall'i-esimo guidatore
- r_i : gap rifiutato dall'i-esimo guidatore, posto uguale a zero se nessun gap è stato rifiutato, o meglio se è stato accettato il primo lag.

Il MLM calcola la probabilità che il gap critico t_c sia compreso tra r_i ed a_i .

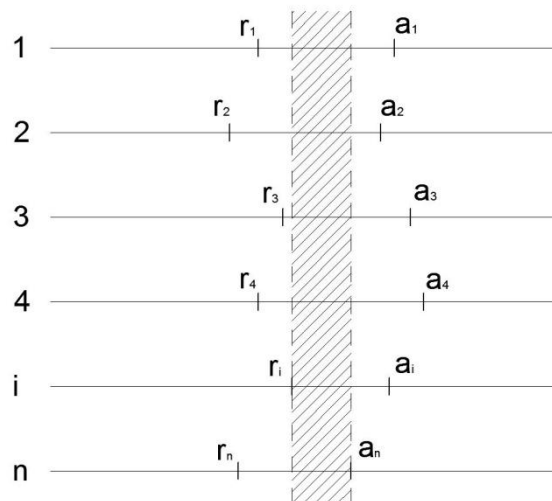


Figura 8 - Rappresentazione grafica dei massimi gap rifiutati e dei gap accettati per ogni soggetto e dell'area compresa all'interno della quale potrà essere stimato il gap critico.

Per stimare questa probabilità è necessario specificare la forma generale della funzione $F_c(t)$ del gap critico della popolazione e assumere che tutti i guidatori siano coerenti.

Si distinguono:

- $f(x)$: funzione di densità di probabilità della distribuzione dei gap critici
- $F(x)$: funzione di distribuzione cumulativa della distribuzione dei gap critici

La probabilità che un guidatore abbia un gap critico t_c compreso tra r_i ed a_i è quindi:

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

I parametri ottimi della distribuzione (media μ e varianza σ^2) sono quelli che massimizzano la funzione di verosimiglianza L^* per il campione di n conducenti osservati, anche se è preferibile massimizzare il logaritmo L della verosimiglianza L^* , che fornisce calcoli più efficienti.

$$L^* = \prod_i^n [F(a_i) - F(r_i)]$$

$$L = \sum_i^n \ln[F(a_i) - F(r_i)]$$

Assumendo quindi che i gap critici dei conducenti abbiano una distribuzione lognormale con media μ e varianza σ^2 è possibile massimizzare quest'ultima funzione sviluppando contemporaneamente le sue derivate:

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \sigma^2} = 0$$

Sviluppando queste derivate è possibile ricavare delle equazioni che risolte iterativamente forniscono μ e σ^2

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

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

Il processo iterativo per risolvere queste equazioni segue questi passi:

- Si inserisce un valore iniziale di σ^2_0 nella prima equazione trovando un μ di prima approssimazione
- Si inserisce μ nella seconda equazione ottenendo σ^2_1
- Si inserisce σ^2_1 nella prima equazione e si procede iterativamente fino alla convergenza di μ e σ^2 .

E' possibile ora ricavare la media del gap critico $E(t_c)$ e la varianza $Var(t_c)$ con le seguenti formule:

$$E(t_c) = e^{\mu + 0,5\sigma^2}$$

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

Il valore del gap critico così trovato sarà pari alla sua media.

1.1.2.5 METODO DELLA PROBABILITA' DI EQUILIBRIO

Il metodo della probabilità d'equilibrio (definito come PEM – Probability Equilibrium Method) è stato sviluppato da ((11) Wu, 2006)(per questo chiamato anche “Metodo di Wu”) e si basa sulla probabilità di equilibrio tra i gap accettati e quelli rifiutati da un conducente che deve immettersi o attraversare la corrente di flusso principale dal ramo secondario di un'intersezione. Il modello fornisce direttamente la funzione di distribuzione di probabilità dei gap critici.

Il metodo della probabilità d'equilibrio, secondo Wu, presenta i seguenti vantaggi e caratteristiche:

- a) Si fonda su una teoria solida (quella della probabilità d'equilibrio);
- b) Produce risultati robusti;
- c) Ha la possibilità di tenere in considerazione tutti i gap rilevati (non solo i massimi gap rifiutati come nel metodo della massima verosimiglianza);
- d) Ha la possibilità di raggiungere direttamente la funzione di distribuzione di probabilità empirica dei gap critici;
- e) Sviluppa una procedura con calcoli semplici, senza iterazioni (il metodo può essere implementato in un foglio di calcolo, per esempio Excel).

La base teorica del nuovo modello proposto da Wu è la probabilità d'equilibrio tra i gap rifiutati e quelli accettati, equilibrio stabilito macroscopicamente dalla distribuzione cumulativa dei gap accettati e rifiutati.

Questo metodo propone risultati simili al metodo della massima verosimiglianza e produce direttamente la distribuzione empirica dei gap critici.

Wu paragona il metodo della massima verosimiglianza con il metodo della probabilità d'equilibrio e afferma che il metodo proposto da Troutbeck è svantaggioso perché si fonda su due ipotesi fondamentali: distribuzione lognormale dei gap critici e comportamento dei conducenti omogeneo e coerente.

La probabilità osservata che un gap di lunghezza t sia rifiutato è $F_r(t)$, che sia non rifiutato è $1 - F_r(t)$.

In generale avremo che:

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

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

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 nel flusso principale venga accettato è $1 - F_{tc}(t)$.

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

$$\begin{cases} P_{r,tc}(t) = F_r(t)P_{r,tc}(t) + F_a(t)P_{a,tc}(t) \\ P_{a,tc}(t) = (1 - F_a(t))P_{r,tc}(t) + (1 - F_r(t))P_{a,tc}(t) \end{cases}$$

L'equazione può essere riscritta nella seguente forma matriciale:

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

Dove:

$\begin{pmatrix} P_{r,tc}(t) \\ P_{a,tc}(t) \end{pmatrix}$ 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 diventa:

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

La distribuzione della funzione di probabilità cumulata dei gap critici $F_{tc}(t)$ diventa:

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

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

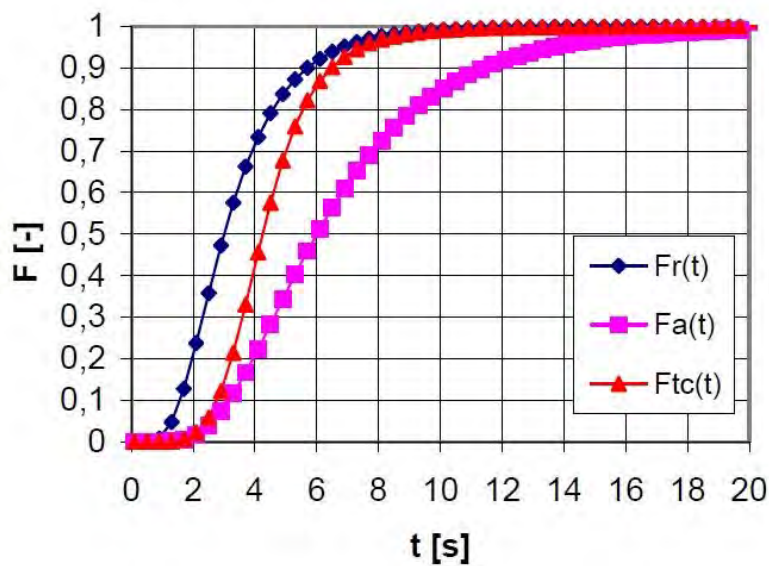


Figura 9 - Distribuzione della funzione di probabilità dei gap accettati, rifiutati e critici. Fonte : ([06]Wu, 2012)

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

$$F_{tc}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} = 1 - \frac{F_a(t)}{F_a(t) + F_a(t)} = 0,5$$

Ciò dimostra che il gap critico stimato da Raff rappresenta la misura della mediana ma non la media del gap critico.

Il modello non richiede funzioni di distribuzione del gap critico predefinite, né considera la coerenza e l'omogeneità dei guidatori. In particolare il modello tiene in considerazione tutti i gap rilevanti e non solo i massimi rifiutati come nel MLM, e questo produce le maggiori differenze con il modello di Troutbeck. Se si utilizzassero solo i massimi gap rifiutati il gap critico medio del modello della probabilità d'equilibrio produrrebbe gli stessi risultati del modello della massima verosimiglianza. Prendendo invece in considerazione tutti i gap rifiutati, la stima del gap critico sarà più bassa.

Si riporta di seguito la procedura del PEM da implementare in un semplice foglio di calcolo:

1. Inserire tutte le misure rilevanti dei gap t nella colonna 1
2. Denominare i gap rifiutati con "r" (o "0") e i gap accettati con "a" (o "1") nella colonna 2
3. Mettere in ordine crescente tutti i gap con la relativa denominazione
4. Calcolare la frequenza d'accumulazione dei gap rifiutati nella colonna 3.
Per la riga j : se il gap è "r" allora $n_{rj} = n_{rj} + 1$; altrimenti $n_{rj} = n_{rj}$, con $n_{r0} = 0$
5. Eseguire la stessa procedura per i gap accettati, nella colonna 4.
Per la riga j : se il gap è "a" allora $n_{aj} = n_{aj} + 1$; altrimenti $n_{aj} = n_{aj}$, con $n_{a0} = 0$
6. Calcolare la funzione di densità di probabilità dei gap rifiutati $F_j(r)$ nella colonna 5.
Per la riga j : $F_r(t_j) = n_{rj} / n_{r,max}$ con $n_{r,max}$ = numero di tutti i gap rifiutati
7. Calcolare la funzione di densità di probabilità dei gap accettati $F_a(r)$ nella colonna 6.
Per la riga j : $F_a(t_j) = n_{aj} / n_{a,max}$ con $n_{a,max}$ = numero di tutti i gap accettati
8. Calcolare la funzione di densità di probabilità dei gap critici $F_{tc}(t_j)$, nella colonna 7.
Per la riga j : $F_{tc}(t_j) = \frac{F_a(t_j)}{[F_a(t_j) + 1 - F_r(t_j)]}$
9. Calcolare la frequenza dei gap critici stimati tra la riga j e la riga $j-1$, nella colonna 8.
 $p_{tc}(t_j) = F_{tc}(t_j) - F_{tc}(t_{j-1})$
10. Calcolare la classe media $t_{d,j}$ tra la riga j e la riga $j-1$, nella colonna 9.
 $t_{d,j} = (t_j + t_{j-1}) / 2$
11. Calcolare il valore medio e la varianza dei gap critici:

$$t_{c,medio} = \text{Sum}[p_{tc}(t_j) * t_{d,j}]$$

$$\sigma^2 = \text{Sum}[p_{tc}(t_j) * t_{d,j}^2] - [\text{Sum}(p_{tc}(t_j) * t_{d,j})]^2$$

La lista dei metodi di stima del gap critico non è ancora terminata, ma già arrivati a questo punto ci si chiede a quale approccio sia più giusto affidarsi, visto che Wu scredita il metodo della massima verosimiglianza in favore dell'approccio da lui proposto, cioè il metodo della probabilità d'equilibrio.

1.1.2.6 CONFRONTO TRA IL METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA ED IL METODO DELLA PROBABILITA' D'EQUILIBRIO (WU)

((12) Troutbeck, 2014) risponde alle osservazioni mosse da Wu nel meeting annuale TRB del 2014.

Troutbeck confronta il MLM ed il PEM con una simulazione effettuata su 100 guidatori, ripetuta per ogni soggetto con diverse condizioni del flusso di conflitto. Più precisamente, per capire lo svolgimento dell'esperimento, si presentano i contenuti raggruppandoli in passi:

1. Vengono registrate le caratteristiche di tutti i 100 guidatori, assegnando a ciascun soggetto il proprio gap critico e follow-up time.
2. Viene simulato un flusso di traffico con assegnate distribuzioni degli headway. Nel modello proposto da Troutbeck è stato utilizzato un modello Cowan M3.
3. I guidatori accettano o rifiutano i gap nella simulazione di traffico come se stessero affrontando una situazione reale. Viene registrata la durata di ogni gap accettato e rifiutato.
4. Utilizzando questi dati viene calcolata con varie tecniche la media e la deviazione standard del gap critico.
5. L'ordine dei soggetti è casuale e gli stessi soggetti compiono varie simulazioni, ognuna delle quali con condizioni del flusso di conflitto diverse, sempre in ordine casuale.

Questo processo viene ripetuto (dal passo 2 al passo 5) per ognuno dei 100 soggetti e genera 100 stime della media e del gap critico per ogni condizione di flusso di conflitto.

Il primo esperimento è stato condotto con una distribuzione lognormale dei gap critici e una distribuzione degli headway della corrente principale alla Cowan M3.

Il PEM è fortemente dipendente dal flusso di traffico della corrente principale, mentre il MLM non lo è. Nelle figure 9 e 10 vengono riportate la media μ e la deviazione standard σ^2 .

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

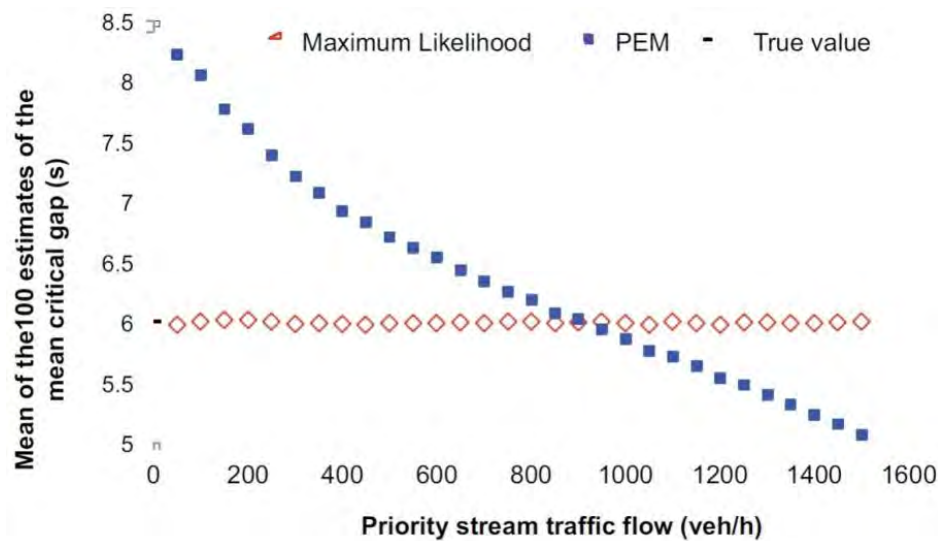


Figura 10 - Media del gap critico del MLM e del PEM basata su 100 stime del gap critico medio di 500 guidatori.
Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

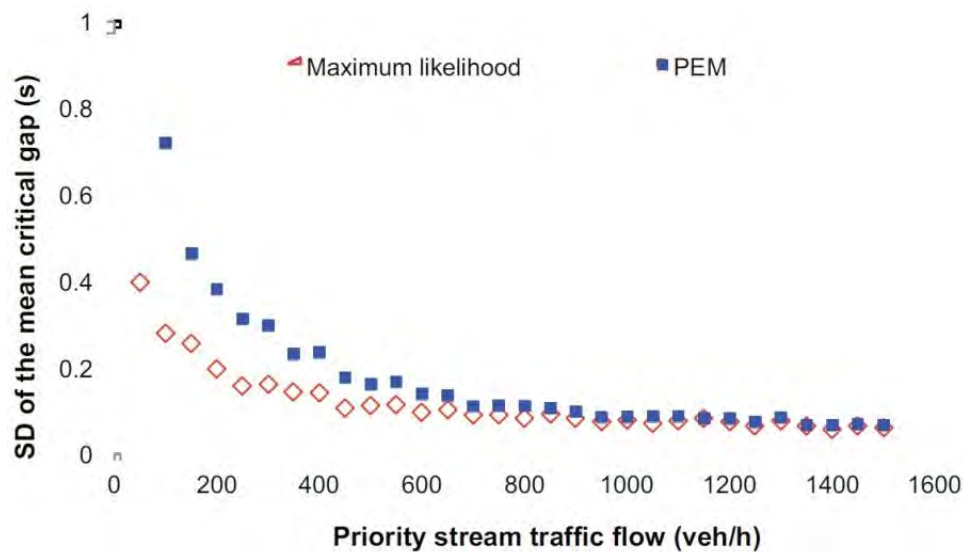


Figura 11 - Deviazione standard di 100 stime del gap critico medio in funzione del flusso di traffico nella corrente principale. Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

Dai dati raccolti dall'analisi di 500 guidatori, nell' ipotesi di coerenza dei conducenti (che accettino quindi tutti i gap maggiori del loro gap critico), il PEM non solo produce valori della deviazione standard più bassi, ma questi sono anche influenzati dal volume di traffico della strada principale. L'osservazione è visibile graficamente in figura 11.

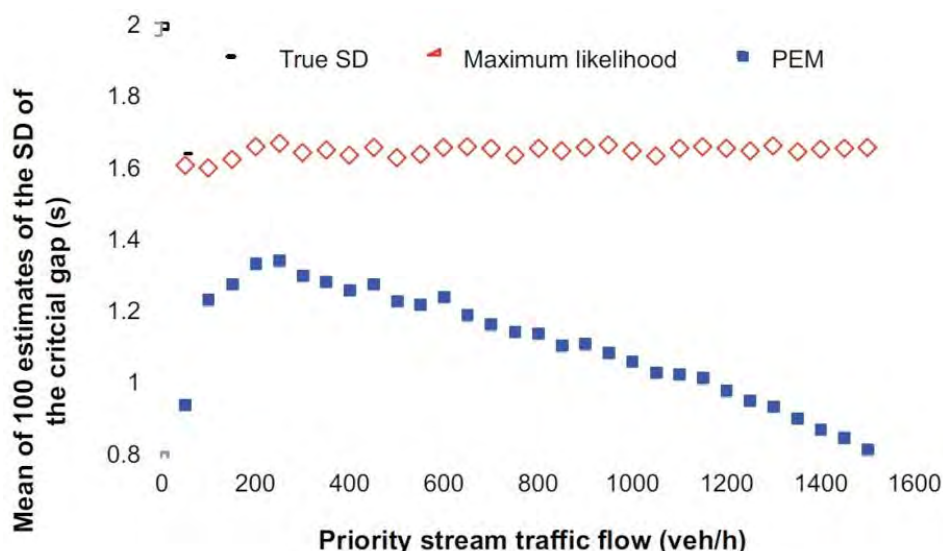


Figura 12 - Media di 100 stime della deviazione standard della distribuzione del gap critico e flusso di traffico della corrente principale (basate sui risultati di 500 guidatori). Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

1.1.2.6.1 EFFETTO DELL'INCOERENZA DEI SOGGETTI

Una criticità del MLM è da trovarsi nel caso di incoerenza dei soggetti, alla quale viene suggerito di riassegnare al più grande gap rifiutato un valore appena più basso dell'accettato, cosa fatta per la seconda verifica effettuata nello studio di Troutbeck (si ricorda che Wu invece non compie nessuna modifica per l'incoerenza, mantiene la dimensione dei gap invariata). Per simulare l'incoerenza una parte dei gap compresa tra il gap critico e due volte il gap critico è stata posta come rifiutata, sebbene fosse stata accettata, frazione che si precisa non era influenzata dal tempo d'attesa. I gap maggiori di due volte il gap critico venivano comunque posti come accettati. Si mostrano quindi i risultati nei quali il 5% ed il 10% dei gap accettati compresi tra il gap critico e due volte il gap critico sono stati posti come rifiutati.

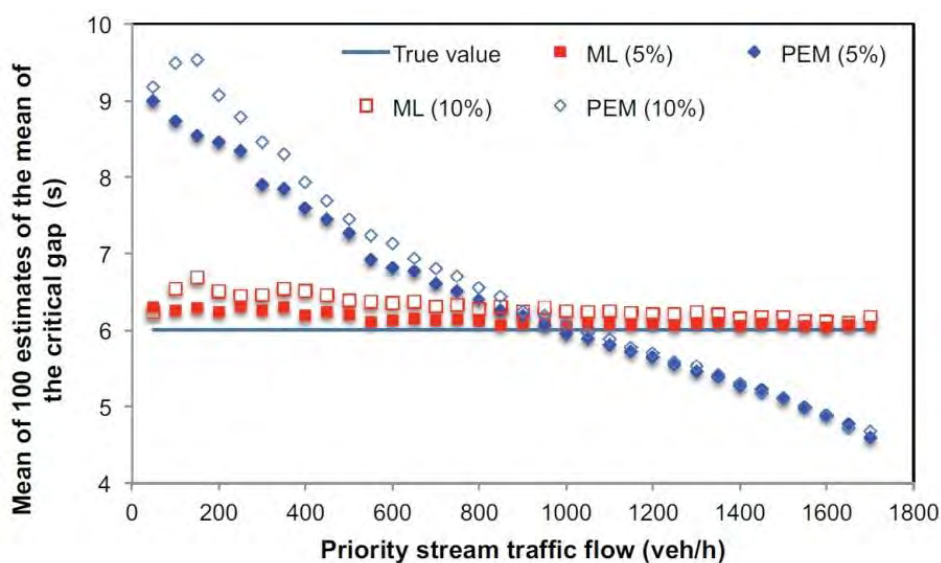


Figura 13 - Media di 100 stime della media della distribuzione del gap critico e flusso di traffico nella corrente principale (basato su 100 conducenti incoerenti). Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

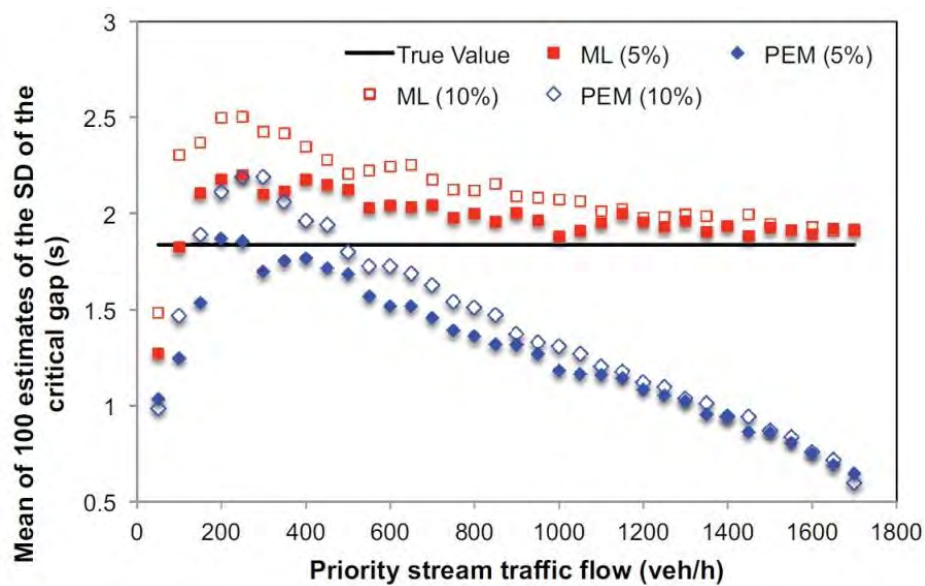


Figura 14 - Media di 100 stime della deviazione standard della distribuzione del gap critico e flusso di traffico nella corrente principale (basato su 100 conducenti incoerenti) . Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

1.1.2.6.2 EFFETTO DELLA DISTRIBUZIONE LOGNORMALE DEL GAP CRITICO

Il PEM non ha bisogno di alcuna funzione di distribuzione predefinita, a differenza del MLM che necessita di una distribuzione lognormale, che può creare limitazioni alla valutazione.

Troutbeck confronta la media e la deviazione standard del gap critico t_c assumendo una distribuzione lognormale per il metodo della massima verosimiglianza, in quanto precisa che non conoscendo la distribuzione in fase di raccolta dati, è un'assunzione lecita, e utilizzando per il PEM la procedura consigliata da Wu.

Il MLM produce valori alquanto più vicini alla media e alla deviazione standard rispetto al PEM.

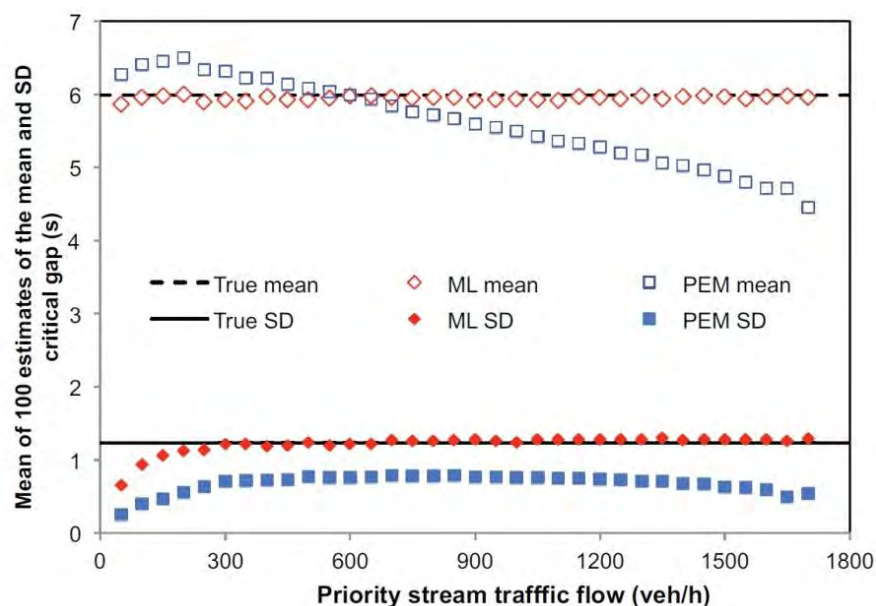


Figura 15 - Media di 100 stime della media della distribuzione del tc e flusso di traffico nella corrente principale.
Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

1.1.2.6.3 UTILIZZO DEL METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA CON DATI

LIMITATI

In figura 15 si mostra la differenza tra MLM e PEM in funzione del numero di osservazioni compiute:

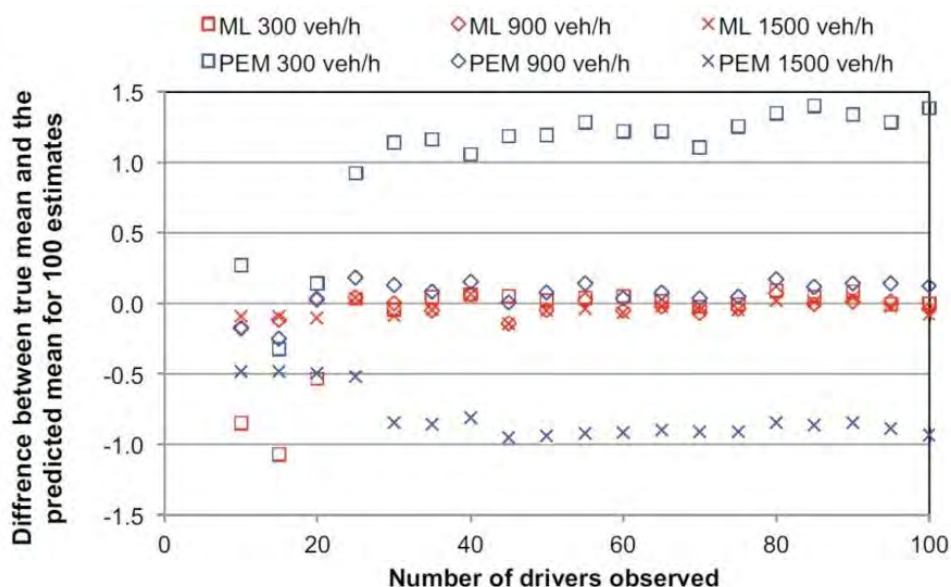


Figura 16 - Differenza della media di 100 stime della media del gap critico e il "vero" valore del gap critico per diversi valori di soggetti osservati. Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

Il MLM fornisce valori attendibili quando il numero di soggetti osservati è maggiore di 25/30. Il PEM per più di 30 osservazioni produce una stima del gap critico più inaffidabile.

UTILIZZO DEL SOLO MASSIMO GAP RIFIUTATO CON IL PEM

Il PEM utilizza tutti i gap rifiutati, e usando il solo massimo gap rifiutato si viola la teoria del PEM. Nonostante questo il PEM viene utilizzato anche con il solo massimo gap rifiutato. Si riportano in figura 16 i valori di μ e σ^2 nel caso di PEM con il solo massimo gap rifiutato. La stima della media e della deviazione standard nel PEM differiscono di valori non trascurabili rispetto al MLM.

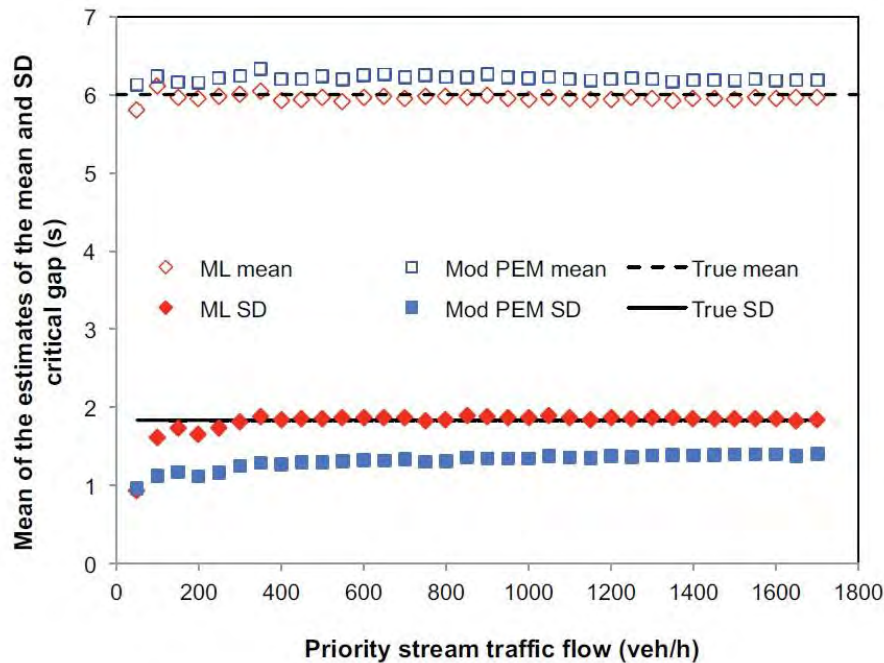


Figura 17 - Media di 100 stime della media e della deviazione standard della distribuzione del gap critico, e flusso di traffico della corrente principale, utilizzando il massimo gap rifiutato nel PEM. Fonte : ((12) Troutbeck, 2014)

1.1.2.6.4 OSSERVAZIONI FINALI TRA MLM E PEM

Il metodo della massima verosimiglianza stima la media μ e la deviazione standard σ^2 della distribuzione del gap critico in maniera affidabile, con valori molto vicini ai valori “reali” e stime consistenti. L’assunzione di una distribuzione lognormale non pregiudica l’accuratezza dei risultati, e il numero di osservazioni necessarie per un’analisi ragionevole non è elevato (deve essere maggiore di 25-30).

Il metodo della probabilità d’equilibrio è fortemente dipendente dal flusso di traffico della strada principale e non produce stime migliori del metodo della massima verosimiglianza nel caso di soggetti incoerenti.

1.1.2.7 METODO LOGIT

Il modello Logit per la stima del gap critico è da ricondurre a ((13) Ben-Akiva, 1987) e ((14) Cassidy, 1995), e viene approfondito da ((15) Polus, 2005) per il caso di intersezione a rotatoria.

Affrontando il caso più generale di intersezione a regime di priorità, il conducente che si appresta a compiere la manovra d'attraversamento dal ramo secondario compie una scelta binaria: per ogni gap il guidatore deve decidere se accettarlo ed entrare nella zona di conflitto o se rifiutarlo e aspettare il gap successivo. Il processo continua fino a che il guidatore accetta un gap ed entra nella zona di conflitto. Per ogni caso il conducente trae utilità dall'accettazione o dal rifiuto del gap. L'utilità dall'accettazione di un gap risulta dall'evitare un ulteriore ritardo per l'attesa di ingresso nell'intersezione, mentre l'utilità di un gap rifiutato è la maggiore sicurezza risultante dal non aver accettato un gap troppo piccolo o rischioso.

I fattori (attributi) che influenzano la scelta includono il gap spaziale e temporale, la velocità e il tipo di veicolo nella corrente principale, le caratteristiche del conducente e del veicolo nella corrente secondaria, il tempo di attesa precedente la decisione e tutte le caratteristiche geometriche dell'intersezione.

((01) Brilon, 2000) spiega che ogni conducente della corrente secondaria che attende un gap di dimensioni sufficienti deve scegliere tra due alternative:

i = accetta il gap e compie la manovra di attraversamento

j = rifiuta il gap

Un guidatore, nella sua situazione decisionale d , si aspetta un'utilità specifica dalla propria decisione. Questa utilità è data da una combinazione di sicurezza da un lato e basso ritardo dall'altro. L'utilità totale U_{id} dell'accettazione di un gap sarà quindi la somma di un termine deterministico V_{id} e di un residuo aleatorio ε_{id} . U_{jd} è invece l'utilità derivante dal rifiuto di un gap.

$$\begin{aligned} U_{id} &= V_{id} + \varepsilon_{id} \\ U_{jd} &= V_{jd} + \varepsilon_{jd} \end{aligned}$$

Si assume che la componente deterministica V_{id} possa essere calcolata dai dati ricavati dalle tecniche di osservazione sperimentali. Si propone una funzione di utilità lineare come possibile soluzione:

$$\begin{aligned} V_{id} &= \alpha + \beta_1 \cdot x_{id1} + \beta_2 \cdot x_{id2} + \dots + \beta_k \cdot x_{idk} \\ V_{jd} &= \alpha + \beta_1 \cdot x_{jd1} + \beta_2 \cdot x_{jd2} + \dots + \beta_k \cdot x_{jdk} \end{aligned}$$

Dove:

$\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ = parametri

x_{idk} = valore del k-esimo attributo nella situazione d nel caso di accettazione

x_{jdk} = valore del k-esimo attributo nella situazione d nel caso di rifiuto

K = numero degli attributi

La componente aleatoria ε_{id} include tutti i fattori di influenza che non possono essere valutati precisamente o che sono il risultato di elementi casuali del processo di decisione.

Noi tuttavia assumiamo che i conducenti compiano decisioni razionali dalle quali trarre la più alta utilità. La probabilità $p_i(t)$ di un conducente i di accettare un gap di dimensioni t è:

$$p_i(t) = p(U_{id} > U_{jd})$$

$$p_i(t) = p(\varepsilon_{jd} - \varepsilon_{id} \leq V_{id} - V_{jd})$$

Per la component aleatoria ε_{id} si assume una distribuzione alla Gumbel ((13) Ben-Akiva, 1987).

La differenza $\varepsilon_d = \varepsilon_{jd} - \varepsilon_{id}$ ha una distribuzione del tipo:

$$F_{\varepsilon_d}(x) = \frac{1}{1 + e^{-\mu x}}$$

$$f_{\varepsilon_d}(x) = \frac{\mu e^x}{(1 + e^{-\mu x})^2}$$

Dove μ è un parametro della distribuzione. L'equazione può essere riscritta come:

$$p_i(t) = F_{\varepsilon_d}(V_{id} - V_{jd}) = \frac{1}{1 + e^{-\mu(V_{id} - V_{jd})}}$$

Il fattore μ può essere incluso nei parametri α e β e nel caso speciale in cui si osservi solo un attributo (K=1):

$$p_i(t) = \frac{1}{1 + e^{-\beta(x_{id} - x_{jd})}}$$

Come attributi possiamo usare la dimensione del gap presente, il tempo che il conducente della corrente secondaria trascorre in coda, la velocità dei veicoli della corrente principale, la direzione di arrivo del veicolo nella corrente primaria nel caso in cui si abbia una strada a doppio senso di circolazione.

Se invece inseriamo nella penultima equazione proposta i valori di V_{id} e V_{jd} troviamo:

$$p_i(t) = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta_1 x_{d1} + \beta_2 x_{d2} + \dots + \beta_k x_{dk}}}$$

Per K=1 e x_d = gap t della corrente principale avremo:

$$p_i(t) = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta t}}$$

Per determinare il gap critico t_c poniamo $p_i(t)$ (probabilità che un conducente nella situazione d accetti un gap di dimensione (t)) come una funzione di densità statica per la variabile casuale T . Il

gap critico è definito come la mediana della variabile casuale T , cioè come il gap per il quale la probabilità di accettazione, in accordo col modello Logit, è uguale al 50%:

$$\int_0^{t_c} p_i(t) dt = 0,5$$

Infine i parametri β , $\beta_1, \dots, \beta_k$ sono stimati con il metodo della massima verosimiglianza. Per risolvere il modello si deve determinare la funzione di log-verosimiglianza:

$$L(\alpha, \beta) = \sum_{d=1}^n \left[\ln \left(\frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta t_d}} \right) + \alpha + \alpha y_d + \beta t_d - \beta y_d t_d \right]$$

Dove:

$$\begin{cases} y_d = 1 & \text{se il conducente nella situazione } d \text{ accetta il gap} \\ y_d = 0 & \text{se il conducente lo rifiuta} \end{cases}$$

n = numero di decisioni osservate

t_d = dimensione del gap che si presenta al conducente nella corrente secondaria nella situazione d (s).

Il massimo di $L(\alpha, \beta)$ può essere determinato sviluppando le derivate e uguagliandole a zero:

$$\frac{\delta L}{\delta \alpha} = \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{1 + e^{\alpha + \beta t_d}}{1 + e^{\alpha + \beta t_d}} \right) + 1 - y_d \right] = 0$$

$$\frac{\delta L}{\delta \beta} = \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{1 + e^{\alpha + \beta t_d}}{1 + e^{\alpha + \beta t_d}} \right) + t_d - t_d y_d \right] = 0$$

Queste due equazioni possono essere risolte iterativamente. Dalla massimizzazione di $L(\alpha, \beta)$ si ricavano i valori di α e β , e l'integrale può essere risolto per t_c come media della distribuzione:

$$t_c = \frac{\alpha}{\beta}$$

La varianza del gap critico può essere stimata come:

$$\sigma_{t_c}^2 = \frac{\alpha^2}{3\beta^2}$$

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

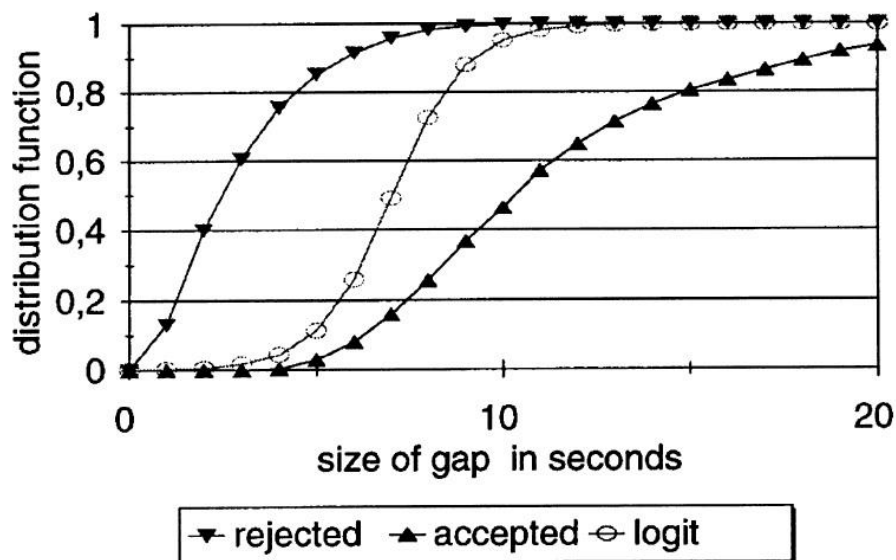


Figura 18 - Esempio di stima per il modello Logit. Fonte : ((03) Brilon, 1999)

1.1.2.8 METODO PROBIT

Il metodo Probit per la stima del gap critico è stato utilizzato già da ((16) Solberg, 1966) e da ((02) Miller, 1972). La procedura e le formulazioni proposte nel metodo Probit sono abbastanza simili al Logit.

Per determinare la distribuzione dei gap critici, la decisione di un guidatore di accettare o rifiutare un gap è considerata come un processo di scelta binario. Come per il Logit, la scelta di accettazione corrisponde all'entrata nell'intersezione, quella di rifiuto consiste nell'attesa alla testa della coda del gap successivo.

In questo modello ((17) Hamed, 1997) l'utilità che un soggetto trae dall'accettazione o dal rifiuto del gap può essere correlata a vari aspetti, che si completano poi nella scelta binaria del modello, come per esempio:

- Le caratteristiche socio-economiche del guidatore
- Il tempo di attesa all'intersezione
- La velocità della corrente primaria
- Lo scopo del viaggio
- L'ora del giorno

Sebbene il modello Logit sia più famoso del Probit, le differenze tra i due modelli riguardano la funzione di distribuzione cumulativa usata per definire la probabilità di scelta. A differenza del modello Logit, nel Probit la funzione di distribuzione cumulativa è proposta con una forma integrale, e per questo è più difficile lavorare con quest'ultimo modello. Tuttavia molti software sono in grado di calcolare l'integrale, colmando la maggiore difficoltà dello sviluppo del Probit.

Per stimare la probabilità di accettazione e di rifiuto utilizzando il modello Probit introduciamo i seguenti termini:

$$t_i = \begin{cases} 1 & \text{se il gap è accettato} \\ 0 & \text{se il gap è rifiutato} \end{cases}, \text{gap temporale}$$

P_{i1} è la probabilità che t_i assuma il valore di 1 (cioè la probabilità che il gap sia accettato).

La funzione di probabilità può essere scritta come:

$$f(t_i) = P_{i1}^{t_i} (1 - P_{i1})^{1-t_i}$$

Le utilità derivanti dall'accettazione e rispettivamente dal rifiuto di un gap sono scritte come:

$$\begin{aligned} V_{i1} &= v_{i1} + \varepsilon_{i1} \\ V_{i0} &= v_{i0} + \varepsilon_{i0} \end{aligned}$$

Dove:

v_{i1}, v_{i0} : componente deterministica dell'utilità di accettazione e rifiuto del gap disponibile

$\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i0}$: componenti aleatorie dell'accettazione e del rifiuto del gap disponibile

La componente deterministica v_i dell'accettazione di un gap può essere scritta come:

$$v_{i1} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

Dove:

$x_1, \dots, x_n$: variabili deterministiche come la dimensione del gap temporale, il tempo di attesa, le caratteristiche socio-economiche, lo scopo del viaggio, ecc.

$\beta_0, \dots, \beta_n$: parametri da determinare

Si suppone che ε_{i1} e ε_{i0} siano entrambi normali con media zero e varianza σ_1^2 e σ_0^2 rispettivamente.

Allora la probabilità Probit di accettare un gap sarà:

$$\begin{aligned} P_{i1} &= P_r(\varepsilon_{i0} - \varepsilon_{i1} \leq v_{i1} - v_{i0}) \\ P_{i1} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(V_{i1}-V_{i0})/\sigma} \exp(-0.5u^2) du \\ P_{i1} &= \Phi \left[\frac{(V_{i1} - V_{i0})}{\sigma} \right] \\ \sigma &= (\sigma_1^2 + \sigma_0^2 - 2\sigma_{10})^{1/2} \end{aligned}$$

Dove:

Φ : distribuzione normale cumulativa standard

σ_{10} : covarianza di ε_{i1} e ε_{i0}

Come suggerito da ((18) Patil, 2011), l'equazione può essere riscritta come:

$$P_{i1} = \Phi \left[\frac{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}{\sigma} \right]$$

Dopo aver trovato la probabilità di accettazione e rifiuto di un gap, si determina la distribuzione dei gap critici per la popolazione di conducenti.

((19) Mahmassani & Sheffi, 1981) proposero un modello Probit che teneva conto del tempo d'attesa all'intersezione, in cui il numero di gap rifiutati prima dell'accettazione è posto come parametro del modello. Un problema riscontrabile nei modelli Probit riguarda la funzione di distribuzione normale, che potrebbe non essere sempre adeguata come distribuzione del gap critico.

1.1.2.9 METODO DELL'ACCETTAZIONE CUMULATIVA

Il metodo dell'accettazione cumulativa (Cumulative Acceptance Method) è stato descritto da ((20) Currin, 2000). Il principio alla base del metodo è quello di identificare un gap che sia accettabile dal 85% dei guidatori. Il calcolo viene eseguito dividendo i gap in intervalli distanti tra loro 0.25 secondi. Per ogni intervallo viene poi tabulata la percentuale cumulativa. Secondo il metodo, il gap critico è definito come quella lunghezza temporale per la quale la percentuale cumulativa è maggiore o uguale al 15%.

Il metodo utilizza solamente i gap accettati e non quelli rifiutati: è quindi richiesto un maggior numero di dati per trarre delle conclusioni ragionevoli. I dati utilizzabili per questo metodo richiedono che tutti i gap maggiori di 12 secondi vengano esclusi. Il gap stimato con questo metodo è simile a quello prodotto con altri procedimenti, ed è di semplice implementazione.

Si propone in figura 16 un esempio di questo metodo:

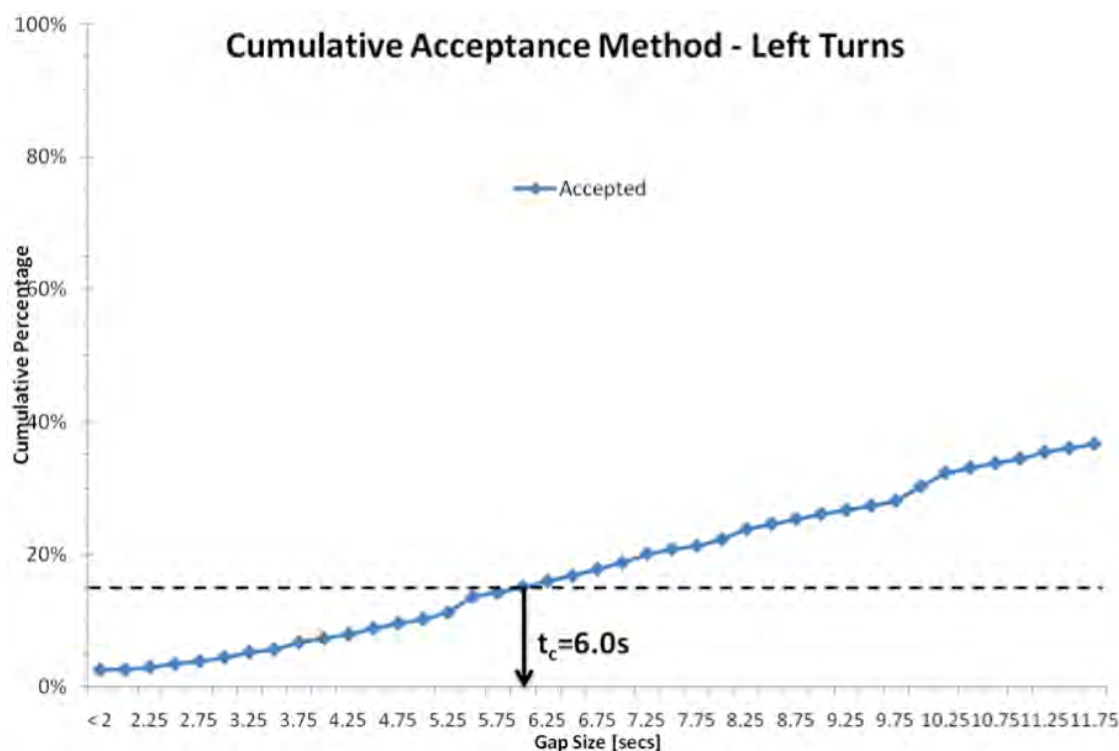


Figura 19 - Esempio di stima del gap critico tramite il metodo dell'accettazione cumulativa

1.1.2.10 CONFRONTO TRA I METODI

Si vuole condurre un confronto tra i metodi finora elencati, tramite una tabella riassuntiva, per comprendere quale sia più opportuno applicare o quale produca le stime più attendibili.

Tabella 1 - Confronto tra i vari metodi di stima del gap critico. Vengono riportati le tipologie di gap da prendere in considerazione, la tipologia di funzione di distribuzione cumulativa di rappresentazione del gap critico, la facilità di utilizzo, la quantità di dati necessari per l'implementazione e l'affidabilità del risultato.

METODI	GAP	FUNZ DISTRIB CUMULATIVA GAP CRITICO	FACILITA' UTILIZZO	QUANTITA' DATI	RISULTATO
RAFF	Accettato e max rifiutato	Normale	Facile	Media	Sufficiente
ASHWORTH	Solo accettato	Lognormale	Facile	Bassa	Sufficiente
HARDERS	Accettato e tutti rifiutati, lag scartati	Normale	Facile	Elevata	Sufficiente
MASSIMA VEROSIMIGLIANZA	Accettato e max rifiutato	Lognormale	Difficile	Elevata	Buono
PROBABILITA' D'EQUILIBRIO	Accettato e tutti rifiutati	No funzioni di base	Facile	Media	Discreto
LOGIT	Accettato e tutti rifiutati	Lognormale	Difficile	Elevata	Discreto
PROBIT	Accettato e tutti rifiutati	Lognormale	Difficile	Elevata	Discreto
ACCETTAZIONE CUMULATIVA	Solo accettati <12secondi	Normale	Facile	Media	Sufficiente

I risultati di Ashworth saranno i maggiori in termini di valore del gap critico in quanto utilizza solo i gap accettati. E' semplice da calcolare ma gli headway della corrente principale devono seguire una distribuzione esponenziale e i gap accettati una distribuzione normale.

Il metodo di Raff è semplice da implementare e i risultati sono graficamente apprezzabili e facili da interpretare.

Il metodo di Harders appare essere il meno consigliato in quanto non ha delle forti basi matematiche.

Il metodo dell'accettazione cumulativa accetta solamente i gap minori di 12 secondi, il che porta a delle chiare variazioni rispetto al considerare qualsiasi gap. Il metodo richiede una larga quantità di dati da analizzare, produce risultati simili agli altri metodi ed è di facile utilizzo.

Il metodo della massima verosimiglianza è trattato come metodo di stima del gap critico in diversi manuali (HCM 2000) e produce risultati attendibili.

Il metodo della probabilità d'equilibrio è fortemente influenzato dal flusso di traffico della corrente principale.

I metodi probabilistici del Logit e del Probit per la stima del gap critico non sono di semplice implementazione ma producono risultati solidi e attendibili. In questi metodi si usano tutti i gap/lag accettati e rifiutati; questo porta alla distorsione dei risultati di cui parla Ashworth dovuta alla sovra rappresentazione dei conducenti prudenti. In letteratura non si accenna alla possibilità di implementazione del metodo con il solo massimo gap rifiutato.

In alcuni articoli si consiglia una stima preliminare del gap tramite il metodo di Raff e una successiva verifica tramite il metodo della massima verosimiglianza, a patto di avere un numero elevato di campionamenti.

1.2 DISTRIBUZIONE DEGLI HEADWAY NELLA TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE

La distribuzione dei gap tra i veicoli nelle diverse correnti di traffico ha un effetto determinante sulle performance delle intersezioni a regime di priorità. Esistono varie funzioni per approssimare le distribuzioni degli headway di una corrente di flusso: si espongono di seguito le 3 distribuzioni principali ((01) Brilon, 2000).

1.2.1 DISTRIBUZIONE ESPONENZIALE NEGATIVA

La distribuzione comunemente utilizzata per la rappresentazione degli headway della corrente di traffico della strada principale è la distribuzione esponenziale negativa.

Nella distribuzione i veicoli sono distanziati casualmente senza nessuna dipendenza dal tempo d'arrivo del veicolo precedente. La distribuzione deriva dall'assumere la seguente ipotesi:

la distribuzione di Poisson che restituisce la probabilità che n veicoli siano distanziati da un intertempo t è:

$$P(n) = (qt)^n \frac{e^{-qt}}{n!}$$

Dove: q : flusso (veic/s)

La probabilità che l'headway h sia maggiore del tempo t è:

$$P(h > t) = e^{-qt}$$

La funzione di probabilità cumulativa degli headway è:

$$P(h \leq t) = 1 - e^{-qt}$$

Si può così determinare la funzione di distribuzione esponenziale negativa delle probabilità:

$$f(t) = \frac{d[P(h \leq t)]}{dt} = qe^{-qt}$$

Il parametro q è stimato direttamente dall'osservazione del flusso o dal reciproco della media degli headway.

Per esempio: se sono stati osservati 228 headway in mezz'ora allora il flusso espresso in veic/s è:

$$q = \frac{228}{1800} = 0.127 \text{ veic/s}$$

La probabilità che nella corrente di traffico sia presente un gap maggiore di 5 secondi è:

$$P(h > 5) = e^{-qt} = e^{-5 \cdot 0.127} = 0.531$$

Il difetto della distribuzione esponenziale negativa è che rispetto alla distribuzione reale sovrastima gli headway molto piccoli e di dimensione abbastanza grande e sottostima gli headway di dimensione media. La distribuzione esponenziale negativa è irragionevole per il fatto che la massima probabilità di occorrenza si ha per gap di dimensione nulla.

1.2.2 DISTRIBUZIONE ESPONENZIALE NEGATIVA TRASLATA

Per correggere l'errore dovuto alla sovrastima degli headway di piccole dimensioni si ricorre alla distribuzione esponenziale negativa traslata. Questa distribuzione ipotizza l'esistenza di un headway minimo t_m tra i veicoli considerato come quell'intertempo veicolare nel quale nessun veicolo della corrente secondaria riesce ad inserirsi senza modificare la velocità di viaggio della corrente principale. La distribuzione della probabilità cumulativa degli headway è quindi:

$$F(h) = 1 - e^{-\lambda(h-t_m)}$$

$$\lambda = \frac{q}{1 - qt_m}$$

La distribuzione è concettualmente migliore dell'esponenziale negativa ma non tiene conto dei plotoni che possono presentarsi in un flusso ad elevata densità. Una distribuzione degli headway dicotomica restituisce risultati più soddisfacenti.

1.2.3 DISTRIBUZIONE DICOTOMICA

Nella maggior parte dei flussi di traffico è possibile distinguere due casi: veicoli accodati (o che sono influenzati nelle velocità di viaggio dal veicolo che li precede) e veicoli liberi (che viaggiano senza interazioni con il traffico stradale e che mantengono la velocità desiderata).

Esistono varie distribuzioni dicotomiche, ma secondo ((01) Brilon, 2000) il miglior modello di distribuzione degli headway per la teoria del gap acceptance è il modello M3 proposto da Cowan (1975). In questo procedimento non si modellano gli headway tra i veicoli accodati (che generalmente non sono accettati dai veicoli della strada secondaria) bensì si concentra sui gap di dimensioni maggiori. La distribuzione di probabilità cumulativa è:

$$p(h \leq t) = \begin{cases} 1 - \alpha e^{-\lambda(t-t_m)}, & t > t_m \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Dove: α : i veicoli liberi (non accodati)

$$\lambda = \frac{\alpha q}{1 - t_m q}$$

Il modello di Cowan rappresenta il caso generale per quanto riguarda la distribuzione degli headway nella corrente principale. Per ottenere la distribuzione esponenziale negativa traslata basta porre $\alpha=1$, per ottenere l'esponenziale negativa invece bisogna porre $\alpha=1$ e $t_m=0$.

Cowan restituisce anche la distribuzione proposta da Tanner (1962) ponendo $\alpha = 1 - t_m q$.

Brilon (1988) suggerisce di stimare la proporzione di veicoli liberi utilizzando l'equazione:

$$\alpha = e^{-Aq_p} \quad \text{con } 6 \leq A \leq 9$$

2 CAPITOLO 2 - CAPACITA' PER INTERSEZIONI A ROTATORIA

Le Rotatorie sono intersezioni canalizzate nelle quali il traffico ruota attorno ad un'isola centrale ((21) O'Flatherty, 1997). Nelle rotatorie non ci sono correnti principali e secondarie come nelle intersezioni convenzionali, bensì tutti i veicoli in entrata sono secondari, mentre quelli all'interno dell'anello circolatorio appartengono alla corrente principale. Le caratteristiche peculiari della rotatoria sono il rispetto del "dare la precedenza" dei veicoli appartenenti alla corrente secondaria.

Le Rotatorie sono quindi esempi di intersezioni nelle quali interagiscono solo due correnti di traffico.

La ((22) FHWA-Federal Highway Administration, 2000)", ha proposto una guida in cui sono proposte considerazioni sulla progettazione, sull'operabilità, sulla sicurezza, sulla geometria.

Nel capitolo 1 della guida proposta dalla FHWA vengono introdotti gli elementi compositivi e geometrici dell'intersezione a rotatoria. Si ripropongono qui le figure e le definizioni caratteristiche, tralasciando le dimensioni geometriche, che sono specifiche in funzione della tipologia di rotatoria presa in esame.

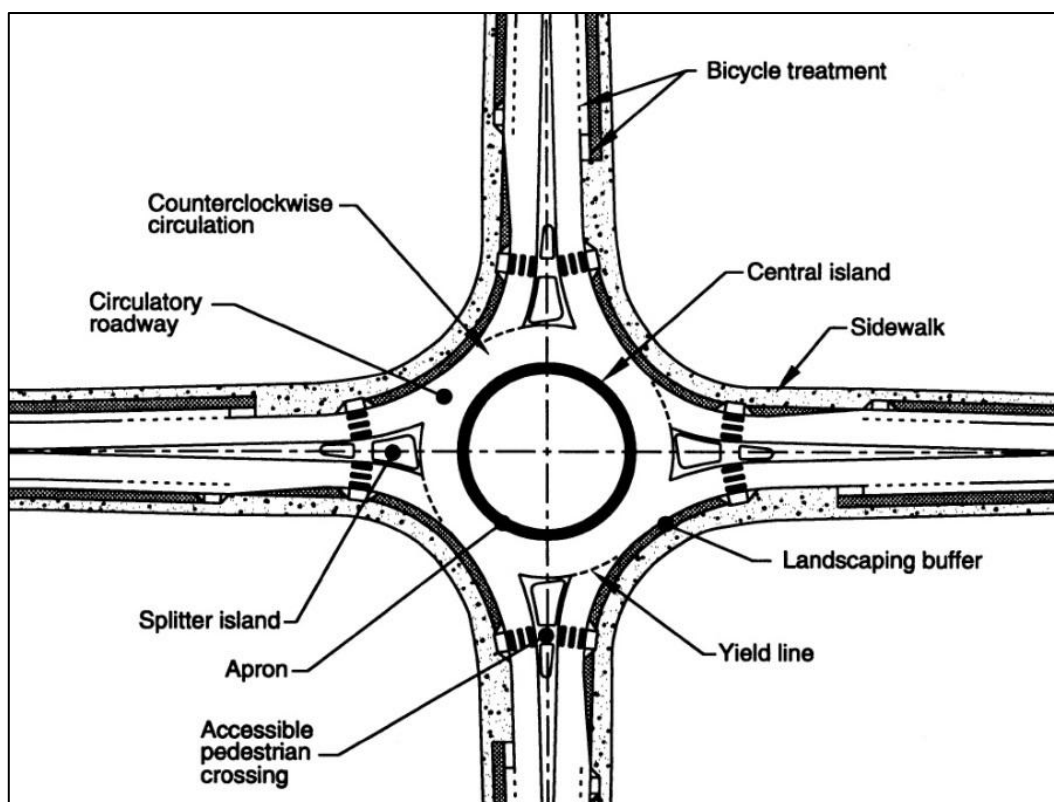


Figura 20 - Elementi caratteristici di una rotatoria. Fonte : ((22) FHWA-Federal Highway Administration, 2000)

Gli elementi compositivi più importanti dell'intersezione a rotatoria sono:

- Isola centrale (central island) : è l'area centrale circolare rialzata della rotatoria, attorno alla quale circola il traffico.

- Isola di traffico (splitter island) : è un' area rialzata o dipinta nella pavimentazione stradale nel ramo di approccio alla rotatoria, utilizzata per separare il flusso entrante e quello uscente, per deviare e rallentare il flusso entrante e per fornire uno spazio d'attesa ai pedoni che attraversano la strada.
- Anello circolatorio (circulatory roadway): è il percorso circolare, in cui si ha diritto di precedenza, che si sviluppa attorno all'isola centrale.
- Pavimentazione sormontabile (apron): è una porzione sormontabile dell'isola centrale adiacente all'anello circolatorio, utilizzata dai veicoli pesanti nelle rotatorie di piccole dimensioni quando la manovra sia di difficile esecuzione.
- Linea di precedenza (yield line): è la segnaletica orizzontale utilizzata per individuare il punto d'ingresso dal ramo d'approccio all'anello circolatorio, ed è generalmente posta lungo la circonferenza esterna dell'anello circolatorio. I veicoli in ingresso devono dare la precedenza ai veicoli nell'anello circolatorio che provengono da sinistra.

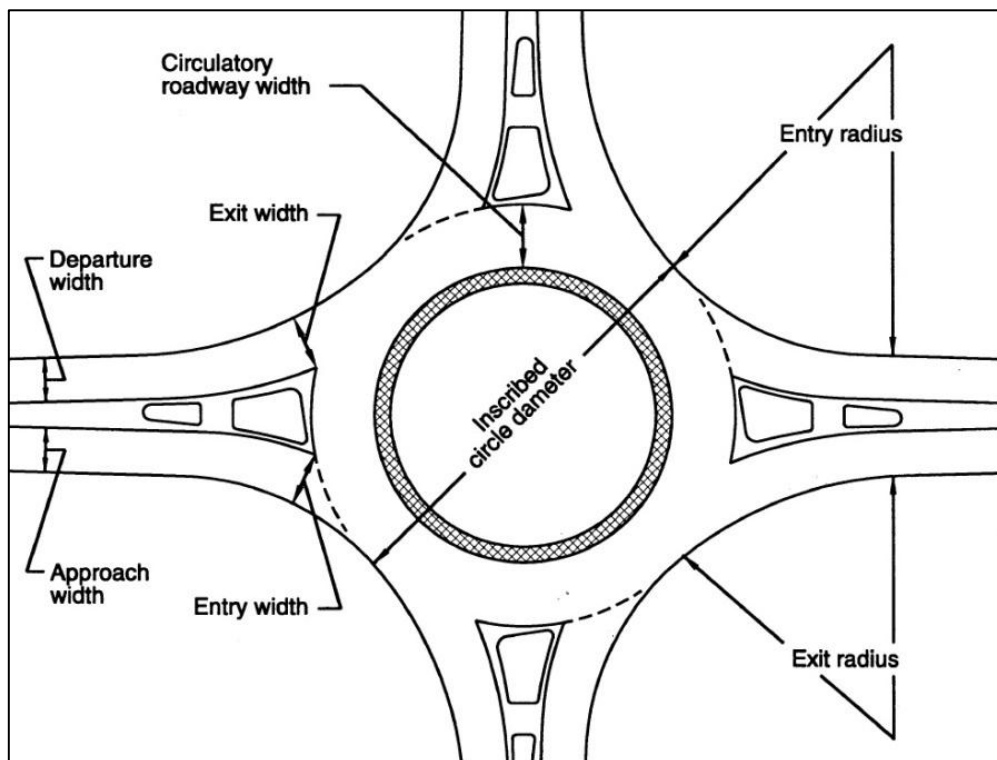


Figura 21 - Definizione delle dimensioni caratteristiche di un'intersezione a rotatoria

Le dimensioni caratteristiche principali di un'intersezione a rotatoria sono:

- Diametro della rotatoria (inscribed circle diameter): è il parametro base per definire la dimensione di una rotatoria. E' misurato tra i bordi esterni dell'anello di circolazione.
- Larghezza dell'anello circolatorio (circulatory roadway width): definisce la larghezza della strada per la circolazione dei veicoli. E' misurata tra il bordo esterno dell'anello e l'isola centrale. Non include la larghezza di nessuna pavimentazione sormontabile.
- Larghezza all'approccio (approach width): è la larghezza della strada all'approccio prima di ogni cambiamento associato alla rotatoria.

- Larghezza entrante (entry width): definisce la larghezza all'ingresso dove l'approccio incrocia l'anello. E' misurata perpendicolarmente tra il bordo destro del ramo d'approccio e il punto d'intersezione tra il bordo sinistro del ramo d'ingresso e l'anello circolatorio.
- Larghezza uscente (exit width): definisce la larghezza del ramo d'uscita dall'anello circolatorio. E' misurata perpendicolarmente tra il bordo destro del ramo d'uscita e il punto d'intersezione tra il bordo sinistro del ramo d'uscita e l'anello circolatorio.
- Raggio entrante (entry radius): è il raggio minimo di curvatura della curva esterna del ramo d'approccio.
- Raggio uscente (exit radius): è il raggio minimo di curvatura della curva esterna del ramo d'uscita.

E' interessante capire le motivazioni che spingono alla scelta di un'intersezione a rotatoria rispetto ad altre tipologie di intersezione. Si riportano i punti salienti dei motivi di scelta dell'intersezione a rotatoria, elencati nel secondo capitolo della guida alle rotatorie della FHWA:

- Una rotatoria ben progettata incoraggia la riduzione di velocità;
- Con la riduzione di velocità c'è un potenziale aumento della sicurezza, con una riduzione della gravità degli incidenti per pedoni e ciclisti (vedi figura 22);
- In condizioni di sotto saturazione nelle intersezioni a rotatoria c'è una riduzione dei tempi di attesa per l'immissione, quindi un aumento della capacità alla manovra;
- I punti di conflitto di un'intersezione a rotatoria sono minori rispetto a quelli di un'intersezione a regime di priorità (vedi figura 23). In un'intersezione a regime di priorità a 4 rami i punti di conflitto sono 32, mentre nella rotatoria sono 8. La pericolosità degli incidenti inoltre diminuisce perché si eliminano i conflitti di attraversamento;
- Nelle intersezioni a rotatoria c'è una maggiore flessibilità degli itinerari (è possibile eseguire l'inversione di marcia);

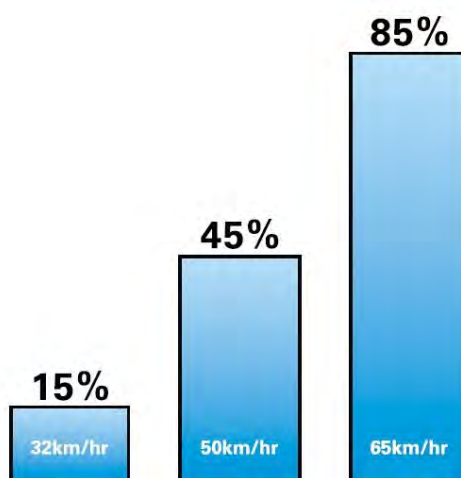


Figura 22 - Probabilità di morte di pedoni investiti in funzione della velocità del veicolo. Fonte : ((22) FHWA-Federal Highway Administration, 2000)

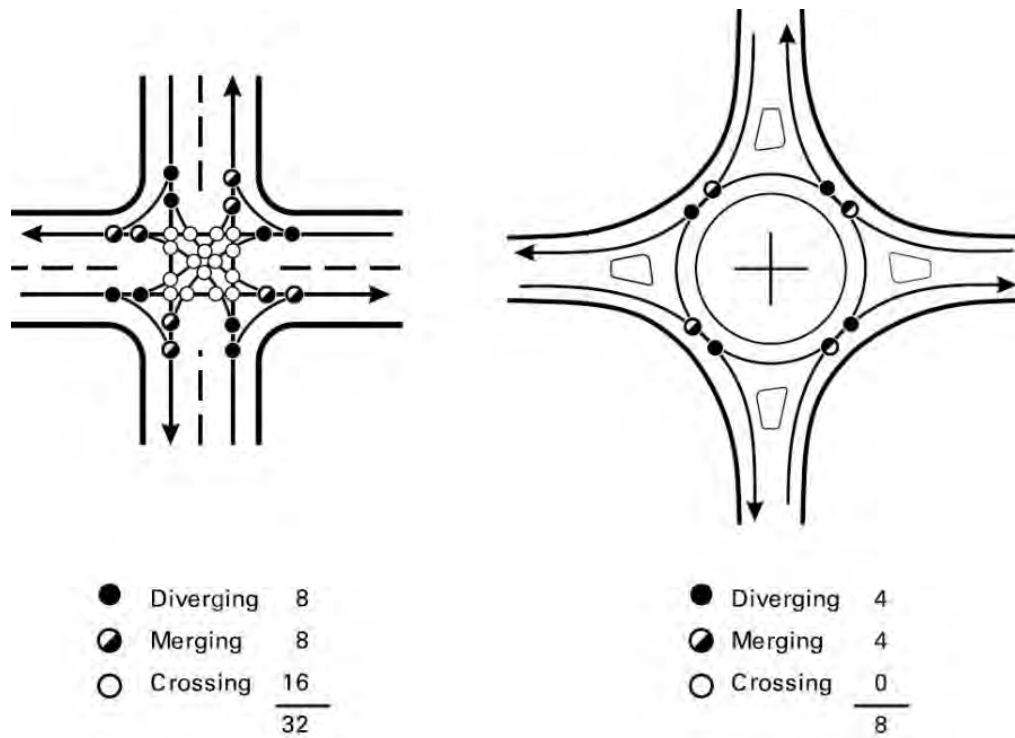


Figura 23 - Confronto dei punti di conflitto di un'intersezione a regime di priorità e di un'intersezione a rotatoria.
Fonte : ((22) FHWA-Federal Highway Administration, 2000)

Di contro, l'intersezione a rotatoria è sconsigliata:

- Dove lo spazio è insufficiente, in quanto bisogna rispettare opportune caratteristiche geometriche come diametro, angolo di visibilità, raggio di curvatura in ingresso ed in uscita;
- Dove si abbia un andamento piano-altimetrico: le rotatorie devono essere fatte in piano, sia per l'anello circolatorio che per gli approcci;
- Dove si voglia preservare l'ordine gerarchico della strada principale rispetto alla secondaria;
- In vicinanza di intersezioni semaforiche può determinare effetti indesiderati, per esempio sulle strategie di coordinamento semaforico;
- Quando voglio avere corsie dedicate (nella rotatoria non si possono inserire corsie riservate, per esempio per i mezzi pubblici).

2.1 TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE PER INTERSEZIONI A ROTATORIA

La teoria del gap acceptance per intersezioni a rotatoria non cambia rispetto alle intersezioni a regime di priorità.

Come descritto da ((23) Polus, 2002), la funzionalità di una rotatoria è direttamente correlata all'abilità dei conducenti che si apprestano ad immettersi nell'anello circolatorio di selezionare un gap appropriato nel flusso di traffico circolante. Il gap critico è riferito ad un gap sufficientemente grande che un guidatore accetta per effettuare la manovra in sicurezza, che invece rifiuta se questo è troppo piccolo.

Il **gap** tra due veicoli è la distanza tra il paraurti posteriore del primo veicolo e il paraurti anteriore del secondo veicolo, usualmente misurato in secondi.

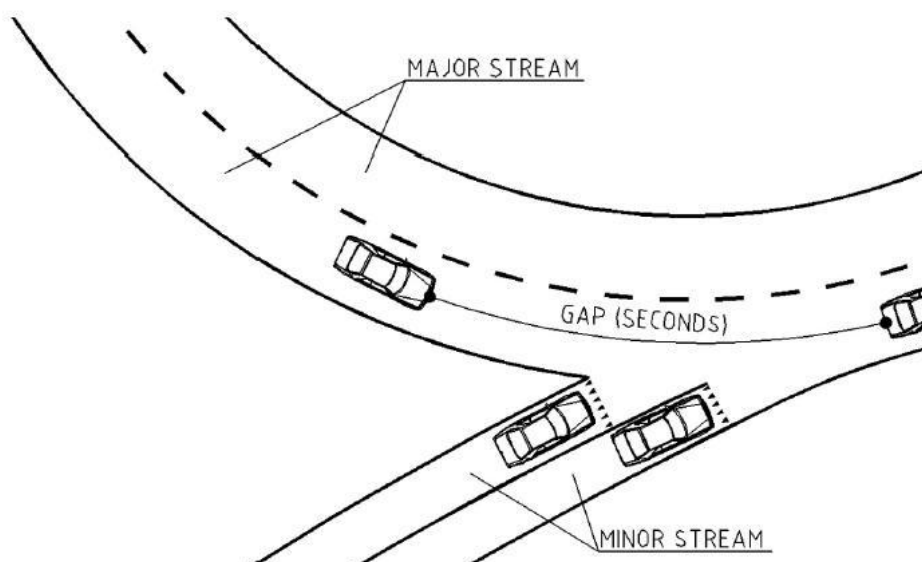


Figura 24 - Rappresentazione grafica del gap per intersezione a rotatoria. Fonte : ((44) Randahl Irvana, 2010)

Il **lag** è una parte residua di gap, definita come l'intervallo temporale che intercorre tra l'arrivo di un utente all'approccio in corrispondenza della *yield line* e il passaggio del primo veicolo sull'anello in corrispondenza del punto di conflitto.

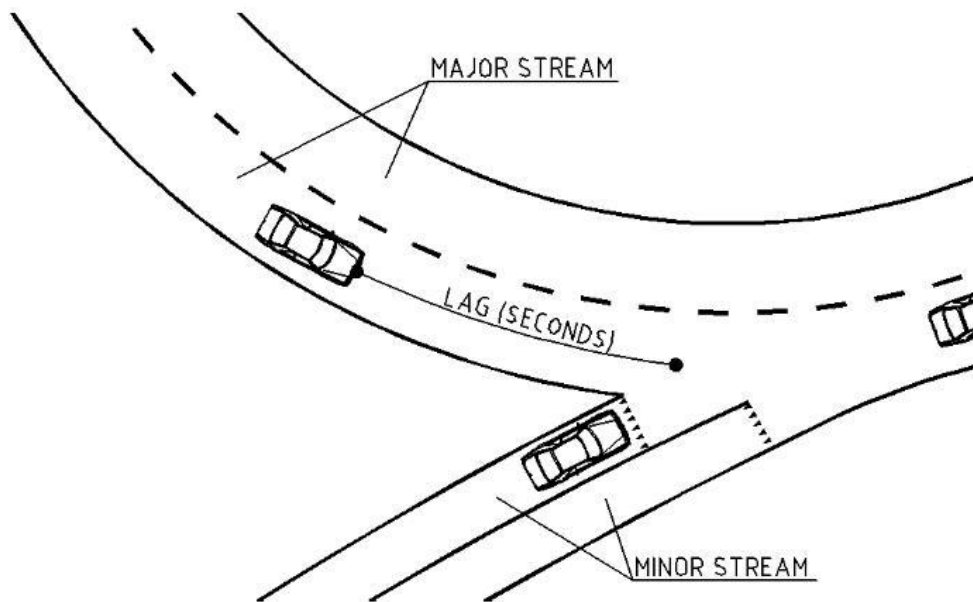


Figura 25 - Rappresentazione grafica del lag per intersezione a rotatoria. Fonte : ((44) Randahl Irvana, 2010)

L'**Headway** è l' intervallo temporale tra due veicoli consecutivi misurato tra il paraurti anteriore del primo veicolo ed il paraurti anteriore del veicolo che segue.

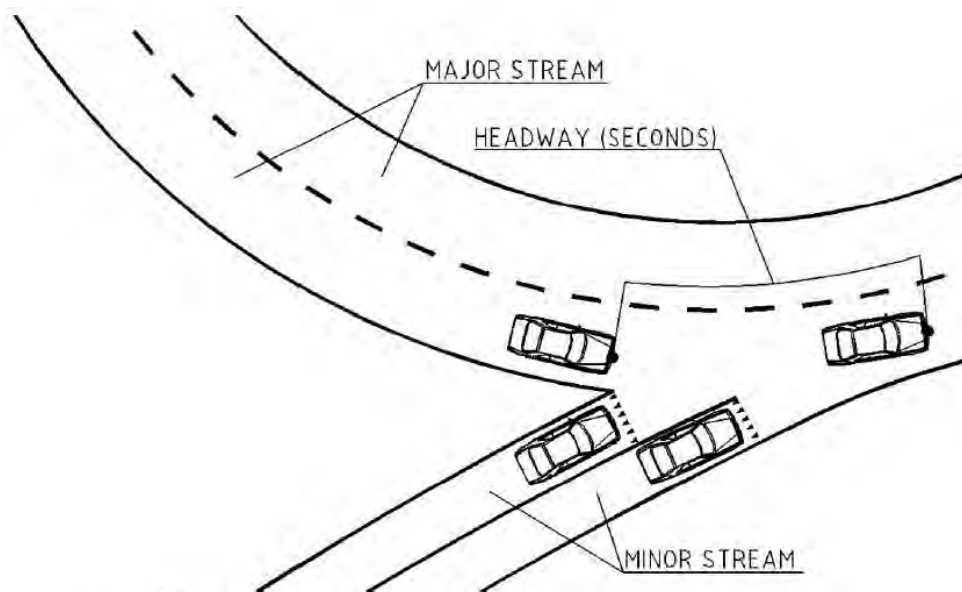


Figura 26 - Rappresentazione grafica dell'headway nel caso di intersezione a rotatoria. Fonte : ((44) Randahl Irvana, 2010)

Il **follow-up time t_f** (tempo di scalamento in coda) è l' headway che intercorre tra l' immissione di un veicolo dal ramo all'approccio e l' immissione del successivo veicolo che usa il medesimo gap, nell' ipotesi che sul ramo d'approccio vi sia una coda continua.

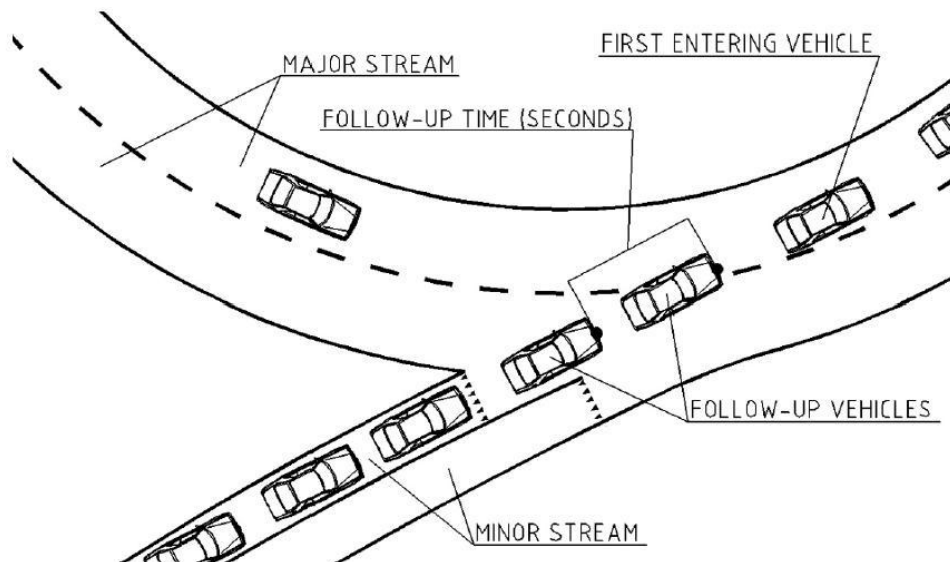


Figura 27 - Rappresentazione grafica del follow-up time nel caso di intersezione a rotatoria. Fonte : ((44) Randahl Irvana, 2010)

I parametri gap critico t_c e follow-up time t_f sono stimati con gli stessi metodi descritti per le intersezioni a regime di priorità. E' solamente necessario pensare alla strada secondaria e alla strada principale dell'intersezione a regime di priorità come rispettivamente al ramo d'ingresso e all'anello circolatorio della rotatoria.

Si espongono ora i metodi più utilizzati per il calcolo della capacità di un ramo d'ingresso di un'intersezione a rotatoria.

2.2 CAPACITA' DEL RAMO D'APPROCCIO DI UN'INTERSEZIONE A ROTATORIA

Per capacità di un ramo d'approccio di un'intersezione a rotatoria si intende il massimo numero di veicoli che possono ragionevolmente entrare nell'anello circolatorio da uno qualunque dei suoi approcci durante un dato periodo di tempo sotto condizioni prevalenti di traffico e geometria.

Secondo quanto riportato nel capitolo 17 del ((24) Highway Capacity Manual - HCM 2000, 2000) i modelli di analisi di intersezioni a rotatoria ricadono generalmente in due categorie: modelli empirici e modelli analitici.

I modelli empirici si basano su dati raccolti per sviluppare relazioni tra le caratteristiche geometriche e le misure di performance come capacità e ritardo.

I modelli analitici sono basati sulla teoria del gap acceptance

La scelta di un approccio rispetto all'altro è dettata dai dati di calibrazione disponibili. I modelli empirici richiedono i dati di numerose rotatorie congestionate per la calibrazione. I modelli analitici basati sulla teoria del gap acceptance, invece, possono essere sviluppati da rotatorie non congestionate. L' HCM 2000 propone un modello analitico per il calcolo della capacità.

Tra i metodi empirici i più importanti per il calcolo della capacità si possono citare:

- Metodo di Kimber
- Metodo di Bovy (metodo svizzero)
- Metodo di Brilon (metodo tedesco)
- Metodo Setra (metodo francese)
- Metodo Certu (metodo francese per rotatorie urbane)

I metodi analitici più importanti basati sulla teoria del gap acceptance, in cui la capacità di una rotatoria può essere stimata utilizzando i parametri del gap critico t_c e del follow up time t_f , sono:

- Metodo di Sieglöch
- Metodo di Harders
- Metodo di Wu
- Metodo HCM 2000
- Metodo HCM 2010

2.2.1 METODI EMPIRICI

2.2.1.1 METODO DI KIMBER

((25) Kimber, 1980) sviluppa l'equazione per la capacità di rotatorie urbane a corsia singola per il Regno Unito. L'ipotesi alla base dello studio della capacità è che:

$$Q_e \leq C_e$$

Dove: Q_e : flusso del ramo di ingresso alla rotatoria (ae/h)

C_e : capacità all'approccio (ae/h), è funzione delle caratteristiche geometriche della rotatoria e del flusso circolante all'anello Q_c .

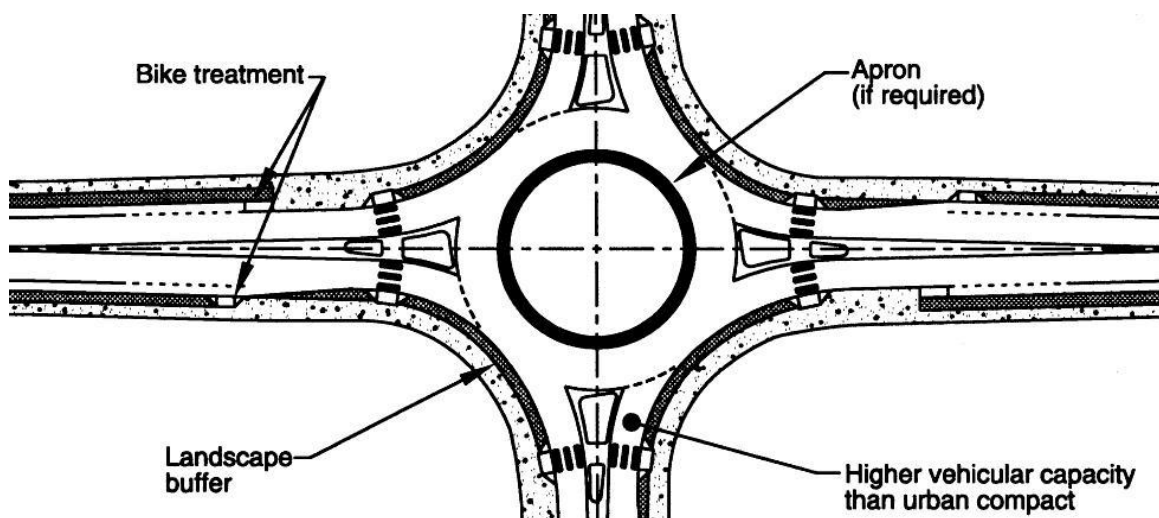


Figura 28 - Rappresentazione di una rotatoria urbana a singola corsia. Fonte : ((22) FHWA-Federal Highway Administration, 2000)

In particolare l'equazione di Kimber è basata sulla relazione lineare tra la capacità entrante e quella circolante nell'anello, ed è data dalla formula:

$$C_e = k(F - f_c Q_c)$$

Dove:

$$F = 303x$$

$$f_c = 0.210 t(1 + 0.2x)$$

$$k = 1 - 0.00347(\Phi - 30) - 0.978 \left[\frac{1}{r} - 0.05 \right]$$

Φ : angolo tra la tangente alla curva del ramo di ingresso e la retta che rappresenta la traiettoria di ingresso dei veicoli.

$$t^* = 1 + \frac{1.50.5}{1 + \exp\left(\frac{D - 60}{10}\right)}$$

D : diametro della rotatoria;

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

v : larghezza all'approccio della corsia del ramo d'approccio alla rotatoria;

e : larghezza entrante della corsia del ramo d'approccio alla rotatoria;

$$S = \frac{1.6(e - v)}{L'}$$

S: snellezza svasatura;

L': corrisponde alla Flare length (vedi figura 29) ed è la distanza tra l'inizio della curva entrante ed il punto d'intersezione tra la fine della curva entrante e l'anello circolatorio.

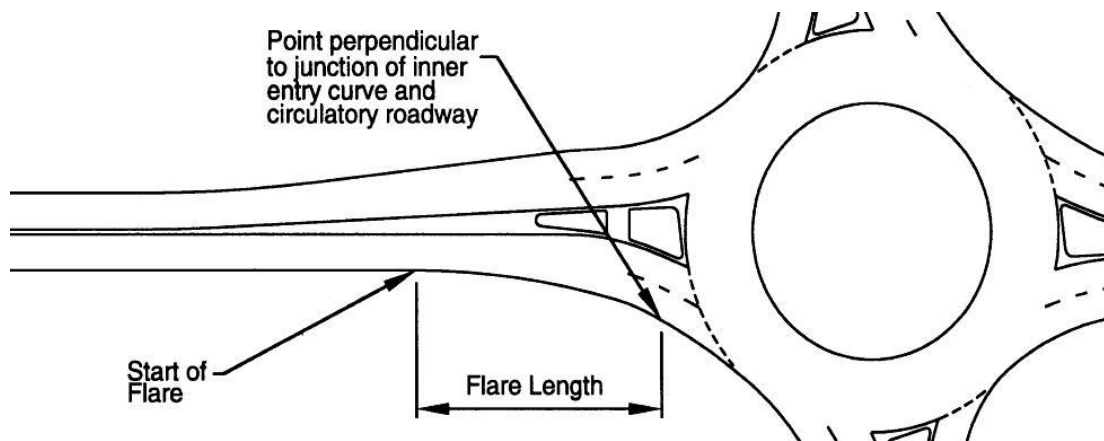


Figura 29 - Rappresentazione grafica della Flare Length. Fonte : ((44) Randahl Irvana, 2010)

Questi parametri geometrici possono essere fissati a priori per una rotatoria urbana a singola corsia in:

$$D = 40 \text{ m} ; \Phi = 30^\circ ; v = 4 \text{ m} ; e = 4 \text{ m} ; L' = 40 \text{ m}$$

In questo modo l'equazione di Kimber viene ridotta nella seguente forma:

$$Q_e = 1212 - 0.5447Q_c$$

L'equazione di Kimber presenta una formula semplificata per il calcolo della capacità anche per le rotatorie urbane con ramo d'ingresso a due corsie. Si assumono i seguenti parametri geometrici:

$$D = 55 \text{ m} ; \Phi = 30^\circ ; v = 8 \text{ m} ; e = 4 \text{ m} ; L' = 40 \text{ m}$$

Come nel caso di rotatorie a singola corsia questi parametri sono stati scelti per ridurre l'equazione di Kimber ad una forma più semplice. L'equazione della capacità di una rotatoria con ramo d'ingresso a due corsie è:

$$Q_e = 2424 - 0.7159Q_c$$

2.2.1.2 METODO SVIZZERO (DI BOVY)

Questa formula è raccomandata per rotatorie (urbane e sub-urbane con un'isola centrale non sormontabile) di piccole dimensioni (diametro massimo interno: 20 metri).

Il metodo utilizza una relazione matematica tra il flusso di conflitto Q_{co} e la capacità all'approccio C_{en} . Nel 1991 Bovy modificò leggermente la formula proposta dall'ente Cetur in:

$$C_{en} = \frac{1500 - \frac{8}{9} Q_{co}}{\gamma}$$

$$Q_{co} = \beta Q_{ci} + \alpha Q_{ex}$$

Dove:

- C_{en} : Capacità all'approccio (veic/h)
- Q_{co} : Flusso di conflitto prima dell'approccio (veic/h)
- Q_{ci} : Flusso circolante all'approccio stesso (veic/h)
- Q_{ex} : Flusso uscente dall'anello circolatorio prima dell'approccio (veic/h)
- α : fattore di influenza tra Q_{ex} e C_{en}
- β : fattore funzione del numero di corsie nell'anello circolatorio
- γ : fattore funzione del numero di corsie all'approccio (al ramo di ingresso)

Il fattore α varia con KK' nel seguente modo:

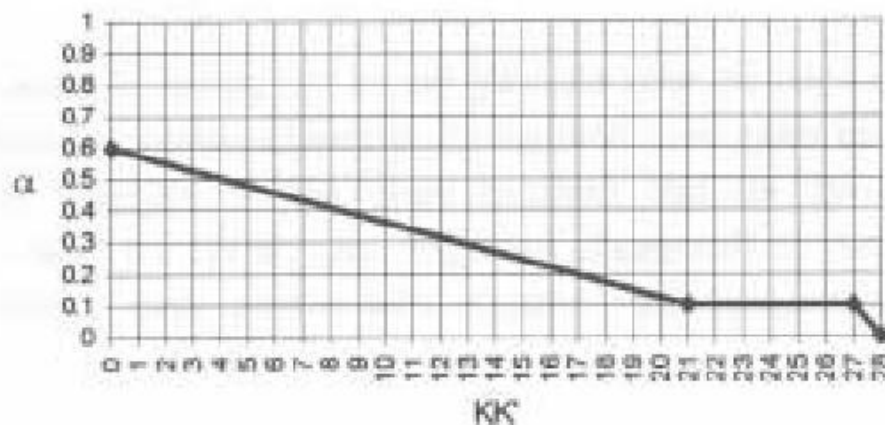


Figura 30 - Valore del parametro α in funzione della distanza KK' . Fonte : ((22) FHWA-Federal Highway Administration, 2000)

Dove KK' è la distanza in metri rappresentata in figura:

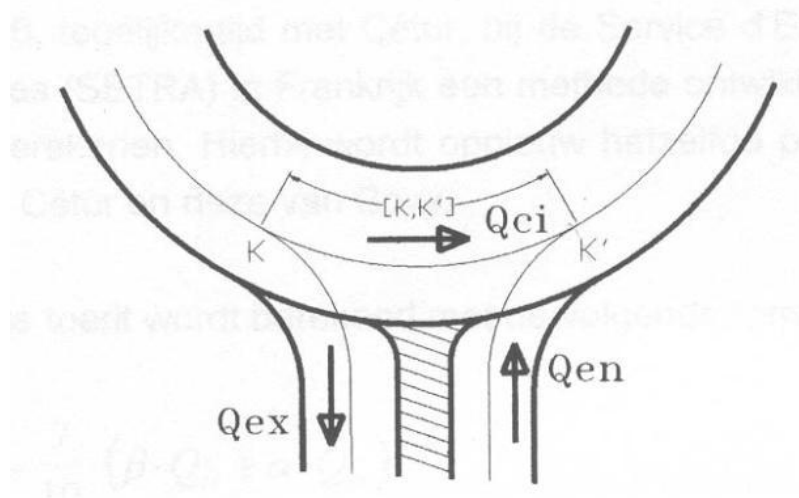


Figura 31 - La distanza KK' è misurata tra il punto di conflitto uscente K e quello entrante K' . Fonte : ((22) FHWA-Federal Highway Administration, 2000)

I fattori β e γ assumono i seguenti valori:

- Per una corsia nell'anello circolatorio : $0.9 \leq \beta \leq 1$
- Per due corsie nell'anello circolatorio : $0.6 \leq \beta \leq 0.8$
- Per tre corsie nell'anello circolatorio : $0.5 \leq \beta \leq 0.6$
- Per una corsia nel ramo d'approccio : $\gamma = 1$
- Per due corsie nel ramo d'approccio : $0.6 \leq \gamma \leq 0.7$
- Per tre corsie nel ramo d'approccio : $\gamma = 0.5$

La capacità dell'intera rotatoria può essere definita dalla sommatoria delle capacità di ogni singolo approccio.

2.2.1.3 METODO SETRA

Questo metodo è stato sviluppato dall'ente francese ((26) Setra, 1987), ed è valido per rotatorie extraurbane con un diametro minimo di 40-45 metri.

La capacità del ramo di ingresso alla rotatoria è funzione di:

$$C_e = f(Q_u, Q_c, SEP, ANN; ENT)$$

Dove:

- ANN : larghezza dell'anello circolatorio (m);
- SEP : larghezza dell'isola spartitraffico (m);
- ENT : larghezza del ramo d'approccio (m);
- Q_u : Flusso uscente dall'anello circolatorio (veic/h);
- Q_c : Flusso circolante nell'anello circolatorio (veic/h);

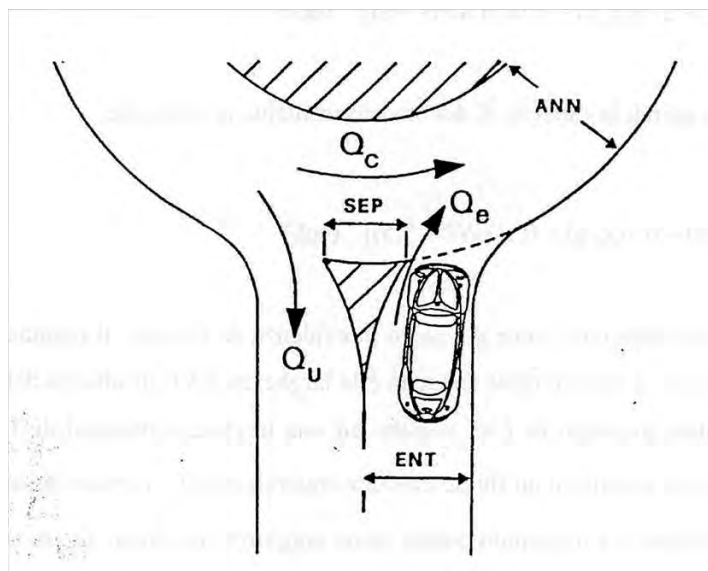


Figura 32 - Rappresentazione grafica dei parametri della formulazione proposta da SETRA. Fonte : ((26) Setra, 1987)

Di seguito si presentano le formule per il calcolo della capacità del ramo d'ingresso:

$$\begin{cases} Q_u^* = Q_u \left(\frac{15 - SEP}{15} \right) & \text{se } SEP < 15m \\ Q_u^* = 0 & \text{se } SEP \geq 15m \end{cases}$$

$$Q_g = \left[Q_c + \frac{2}{3} Q_u^* \right] [1 - 0.085(ANN - 8)]$$

$$C_e = (1330 - 0.7Q_g)[1 + 0.1(ENT - 3.5)]$$

Dove:

- Q_u^* : traffico uscente equivalente (veic/h)
- Q_g : traffico complessivo di disturbo (veic/h)
- C_e . Capacità in ingresso (veic/h)

2.2.1.4 METODO CETUR

Questo metodo è stato proposto in Francia agli inizi degli anni dall'ente ((27) CETUR, 1990) ed è adatto al calcolo della capacità del ramo di ingresso di rotatorie urbane.

Si espongono di seguito le formule proposte dal Cetur:

$$C_e = \gamma(1500 - 0.83Q_g)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{se ramo di ingresso ad 1 corsia} \\ 1.5 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$Q_g = bQ_c + 0.2 Q_u$$

$$b = \begin{cases} 1 & \text{se } ANN < 8 \text{ m} \\ 0.9 & \text{se } ANN \geq 8 \text{ m e } D < 40 \text{ m} \\ 0.7 & \text{se } ANN \geq 8 \text{ m e } D \geq 40 \text{ m} \end{cases}$$

Dove:

- ANN : larghezza dell'anello circolatorio (m)
- D : Diametro rotatoria (m)
- Q_g : Flusso di disturbo (veic/h)
- Q_u : Flusso uscente dall'anello circolatorio (veic/h)
- Q_c . Flusso circolante nell'anello circolatorio (veic/h)
- C_e : Capacità del ramo d'ingresso (veic/h)

2.2.2 METODI ANALITICI (TEORIA DEL GAP ACCEPTANCE)

Prima di esporre il calcolo della capacità relativo ad un ramo di ingresso di una rotatoria, è bene introdurre il caso generale della capacità alla manovra per un'intersezione a regime di priorità.

Dopo aver stimato il gap critico t_c ed il follow-up time t_f è possibile ricavare la capacità alla manovra secondaria. Si ipotizza quanto segue:

1. I veicoli della corrente principale non subiscono rallentamenti.
2. I veicoli della corrente secondaria potranno eseguire la manovra di immissione o attraversamento solo se si renderà disponibile loro un gap maggiore o uguale al loro gap critico.
3. Il veicolo in coda che accetta lo stesso gap del veicolo di testa entra nell'intersezione t_f secondi dopo l'entrata del veicolo che lo precede.

Consideriamo un gap di dimensioni t , e diamo la seguente definizione di capacità alla manovra secondaria in relazione al gap di dimensione t :

$$c(t) = 3600 q_p f(t) g(t)$$

- q_p : flusso della corrente principale (veic/h);

- $f(t)$: probabilità di avere un gap di dimensione t , espressa dalla funzione di densità di probabilità per la distribuzione dei gap nella corrente principale (veic/h);

- $g(t)$: numero di veicoli del ramo secondario che possono immettersi (o attraversare) nel ramo principale in un gap di dimensioni t (veic/h);

$$g(t) = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n(t)$$

- $p_n(t)$: probabilità che n veicoli della corrente secondaria utilizzino un gap di dimensione t

$$p_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{per } t_c + (n-1)t_f \leq t < t_c + nt_f \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Dalla capacità relativa al singolo gap è necessario passare alla capacità della totalità del flusso di corrente di del ramo secondario. Si riporta di seguito la formula per eseguire questo calcolo:

$$q_m = q_p \int_0^{+\infty} f(t) g(t) dt$$

- q_m : capacità alla manovra secondaria totale (veic/h)

Si introducono ora i metodi di stima analitici per il calcolo della capacità nel ramo di ingresso di una rotatoria.

2.2.2.1 METODO DI SIEGLOCH

Il metodo di ((04) Siegloch, 1973) per lo studio della capacità in entrata assume una funzione esponenziale negativa degli headway, ed è espresso dalla seguente formula:

$$Q_e = \frac{3600 e^{-\frac{Q_c t_0}{3600}}}{t_f}$$

- Q_e : flusso in entrata (ae/h)
- Q_c : flusso circolante (ae/h)
- $t_0 = t_c - 0,5 t_f$, definito come parametro di gap zero
- t_f : follow-up time

Questo metodo richiede condizioni di coda nel ramo entrante fino a quando il gap critico t_c ed il follow-up time t_f sono rilevanti per la stima della capacità. Il metodo è implementato facendo osservazioni sulle code nel ramo di ingresso alla rotatoria, registrando gli headway dei veicoli e calcolando la media dei gap accettati da n veicolo. Si trova infine la retta di regressione lineare della media dei gap in funzione del numero degli n veicoli che hanno accettato il gap.

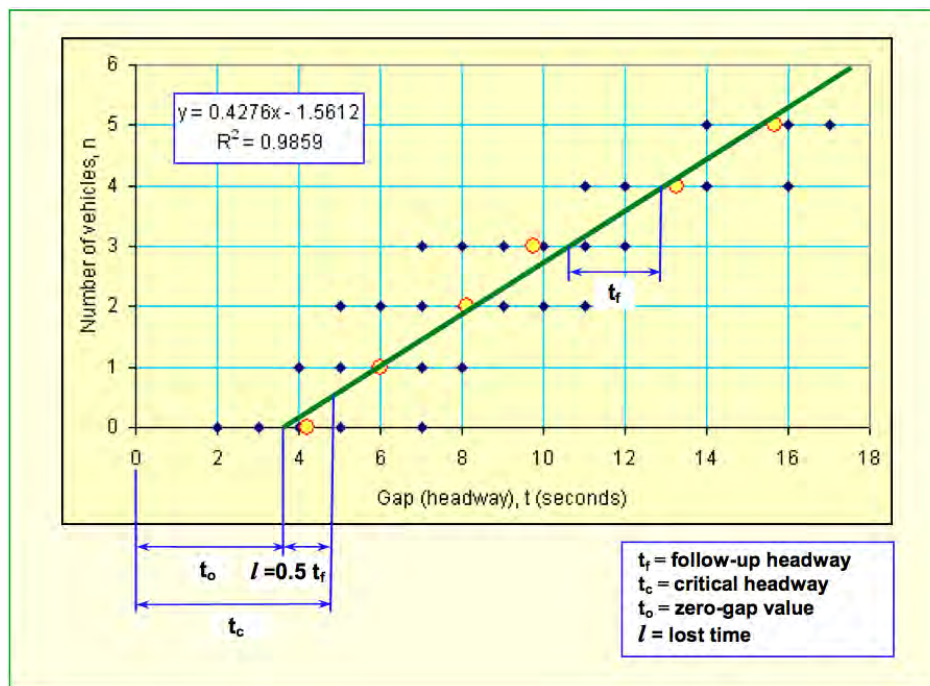


Figura 33 - Rappresentazione grafica della retta di regressione lineare del gap medio scelto da n veicoli

2.2.2.2 METODO DI HARDERS

L'espressione di calcolo della capacità in base alla relazione di ((08) Harders, 1968) è:

$$Q_e = Q_c \frac{e^{-p(t_c)}}{1 - e^{-p(t_f)}}$$

- $p = (Q_c / 3600)$
- Q_e : flusso in entrata (ae/h)
- Q_c : flusso circolante (ae/h)
- t_c : gap critico (s)
- t_f : follow up time (s)

2.2.2.3 METODO DI WU

In Germania le capacità delle rotatorie sono state studiate sia con la teoria del gap acceptance che con i metodi empirici di regressione lineare. Inizialmente furono preferiti i metodi empirici di regressione lineare perché la capacità all'approccio dipendeva dal flusso circolante a seconda del numero di corsie (in entrata e nell'anello circolatorio). Tuttavia questa soluzione non ebbe molto successo in quanto i parametri di calibrazione alla base della teoria cambiavano da caso in caso e le equazioni di regressione lineare portavano a valutare in modo sbagliato i valori dei parametri da utilizzare nella pratica.

((28) Wu, 1997) modifica l'idea base proposta da ((29) Tanner, 1962) per la stima della capacità per i rami di ingresso ad una rotatoria (sia ad una che a due corsie) proponendo la seguente formula:

$$Q_e = 3600 \left(1 - \frac{t_{min} q_k}{3600 n_k} \right)^{n_k} \frac{n_z}{t_f} e^{-\frac{q_k}{3600} \left(t_c - \frac{t_f}{2} - t_{min} \right)}$$

dove:

- Q_e : capacità all'approccio del ramo di ingresso (ae/h)
- q_k : traffico di conflitto (nell'anello circolatorio) (ae/h)
- n_k : numero di corsie nell'anello
- n_z : numero di corsie nel ramo di ingresso
- t_{min} : gap minimo tra successivi veicoli nell'anello (s)

I volumi di traffico sono misurati in autovetture equivalenti, nelle quali i mezzi pesanti = 1,5 ae; un camion articolato = 2ae; una bicicletta = 0,5 ae.

La capacità all'approccio dipende quindi dal traffico di conflitto q_k e dal numero di corsie all'approccio n_z e nell'anello n_k . Non sono stati valutati importanti altri dettagli geometrici come la larghezza delle isole spartitraffico o i raggi di curvatura, invece presenti nelle precedenti formule empiriche.

L'equazione sopra è illustrata dalla figura che rappresenta curve con indicati rispettivamente i numeri di corsie all'approccio/nell'anello.

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

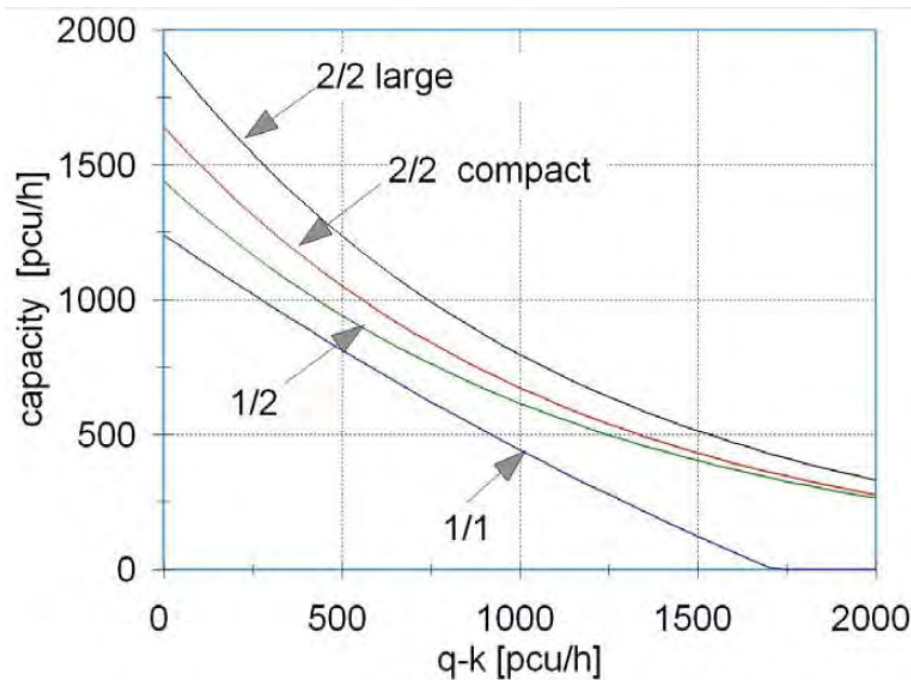


Figura 34 - Rappresentazione grafica della capacità in funzione del flusso e del numero di corsie all'approccio e nell'anello

Con questo metodo è possibile determinare il massimo volume giornaliero per tutta la rotatoria, in funzione delle corsie all'approccio e nell'anello circolatorio, secondo la tabella seguente:

Tabella 2 - Volume giornaliero della rotatoria in funzione delle corsie all'approccio e nell'anello circolatorio

	Lanes entry / circle :	1/1	compact 2/2	large 2/2	signalized 2/2
a	can be applied without additional capacity calculations below →	15 000	16 000	20 000	
b	has a maximum capacity of →	25 000	32 000	35 000 - 40 000	50 000 - 60 000
		veh/d			

I dati indicano chiaramente che una funzione lineare delle curve (come nel caso della curva 1/1) non rappresenta la realtà in modo veritiero. Invece una regressione lineare dell'equazione ha provato che l'approssimazione è molto più vicina alla realtà, soprattutto per rotatorie a più corsie. In questi casi è permesso porre $t_{min} = 0$. L'equazione può essere quindi semplificata nel seguente modo:

$$Q_e = 3600 \frac{n_z}{t_f} e^{-\frac{q_k}{3600} \left(t_c - \frac{t_f}{2} \right)}$$

che non è altro che l'equazione sulla capacità proposta da Sieglöch. In funzione della configurazione delle corsie della rotatoria, i parametri ottenuti dalle analisi statistiche portano ai seguenti valori:

Tabella 3 - Valori del flusso q_k in funzione del tipo e delle caratteristiche della rotatoria

	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

Le equazioni proposte sono state originariamente ottenute dalla teoria del gap acceptance, ma in questo contesto sono solamente usate come regressione lineare con i parametri stimati da dati osservati.

2.2.2.4 METODO PROPOSTO DALL' HCM 2000

Nel capitolo 17 dell' HCM 2000 sono presentate le procedure per le analisi delle rotatorie.

La capacità in una rotatoria è stimata utilizzando la teoria del gap acceptance con i parametri base del gap critico e del follow-up time. Nel modello proposto dall' HCM 2000 le performance di ogni ramo della rotatoria possono essere analizzate indipendentemente dagli altri rami. I percorsi origine-destinazione influenzano notevolmente la capacità della rotatoria: in presenza di un piccolo raggio della rotatoria, con la manovra di svolta a sinistra i conducenti viaggeranno più lentamente, più lontani dall' anello circolatorio e si avranno maggiori headway tra plotoni (e quindi un minore flusso di saturazione). Il maggior headway tra plotoni ridurrà quindi l'opportunità per i guidatori di immettersi nella rotatoria, e la capacità si ridurrà di conseguenza.

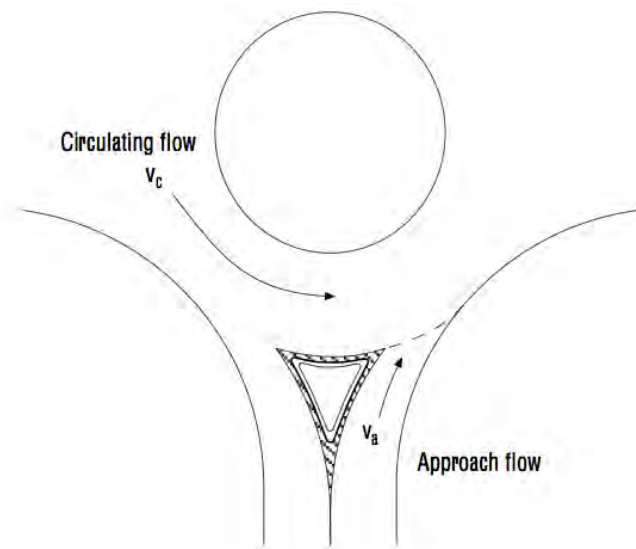


Figura 35 - Analisi di un ramo della rotatoria

Poiché le intersezioni a rotatoria, nella canalizzazione che precede l'anello circolatorio, invitano i guidatori a fare una sorta di svolta a destra, ci si aspetta che le caratteristiche del gap acceptance siano le stesse o molto simili a quelle di svolta a destra di un'intersezione a T. I concetti descritti per rotatorie con ramo di ingresso ad una corsia sono assimilabili quindi a quelli delle intersezioni a T. Per le rotatorie con più corsie si creano molte più interazioni di traffico, che influenzano il comportamento dei conducenti e rendono l'approccio per intersezione a T inapplicabile.

La stima della capacità di una rotatoria è data dall'equazione:

$$c_a = \frac{v_c e^{-v_c t_c / 3600}}{1 - e^{-v_c t_f / 3600}}$$

- c_a : capacità del ramo d'approccio (ae/h)
- v_c : flusso circolante nell'anello (di conflitto) (ae/h)
- t_c : gap critico (s)
- t_f : follow-up time (s)

L'intervallo raccomandato per i valori di gap critico t_c e follow-up time t_f , con la specificazione dei limiti inferiori e superiori, è riportato nella tabella seguente:

Tabella 4 - Valori limite di gap critico e follow-up time per un'intersezione a rotatoria

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

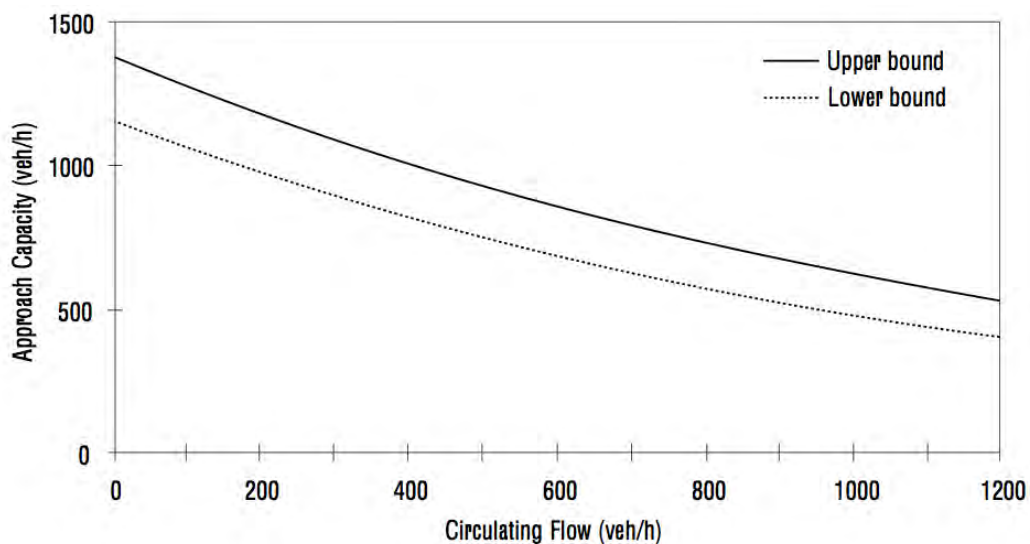


Figura 36 - Rappresentazione grafica del limite superiore ed inferiore della capacità all'approccio in funzione del flusso di conflitto

I flussi circolanti sono calcolati su intervalli di 15 minuti. Nel passare da un'intersezione a raso a 4 rami ad un'intersezione a rotatoria è necessario, nella pratica, convertire le manovre di svolta nel flusso circolante.

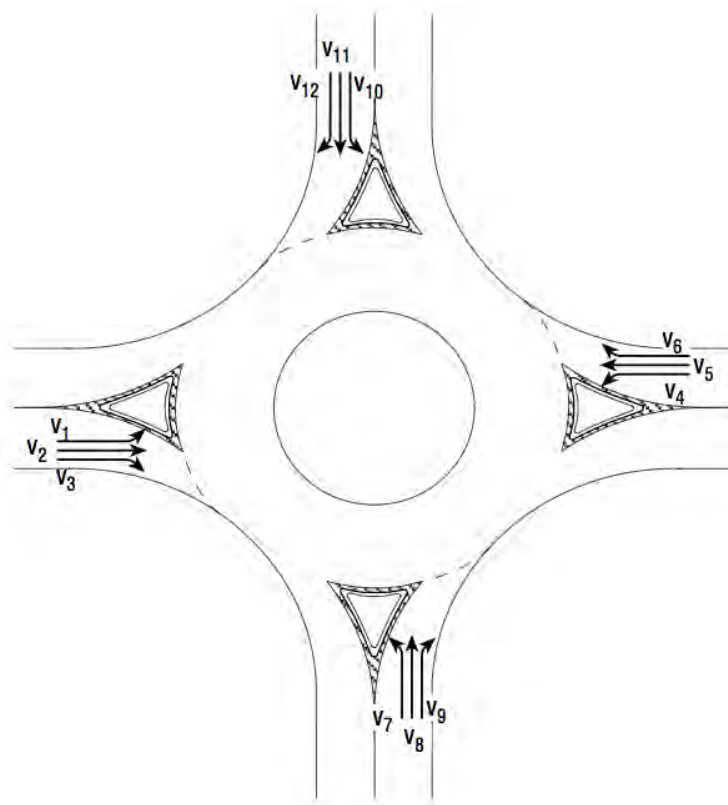


Figura 37 - Definizione dei flussi di traffico in funzione della manovra

Per esempio, il traffico di conflitto ai flussi v_7 , v_8 , v_9 è rappresentato dai flussi v_1 , v_2 , v_{10} .

Di conseguenza:

$$v_c = v_1 + v_2 + v_{10}$$

Le rotatorie sono anche spesso usate per le inversioni di marcia, le quali devono essere quindi incluse nel volume di traffico di conflitto.

La metodologia prevista nel manuale si riferisce ad una singola corsia. Nei paesi che contano esperienze di studio su rotatorie a più di una corsia, si è dimostrato come la capacità aumenti con l'aumentare del numero di corsie in entrata e nell'anello circolatorio, sebbene non vi sia un rapporto lineare tra la crescita del numero di corsie e la crescita della capacità.

I passi richiesti per l'analisi della rotatoria sono i seguenti:

1. Definire la geometria esistente e le condizioni di traffico per la rotatoria di studio. Per ogni ramo, definire i flussi di entrata.
2. Determinare il flusso di conflitto per ogni ramo della rotatoria. Se il flusso circolante supera i 1200 veic/h si ferma la procedura.
3. Determinare la capacità dei rami di ingresso utilizzando l'equazione prima citata.
4. Studiare la performance della rotatoria in funzione del rapporto v/c

2.2.2.5 METODO PROPOSTO DALL' HCM 2010

L'edizione del 2010 dell'Highway Capacity Manual ha introdotto nuovi modelli per il calcolo della capacità per rotatorie a singola corsia e multi corsia. Questi modelli sono una combinazione di regressioni lineari e modelli di gap acceptance e derivano dai modelli di capacità sviluppati nel precedente HCM 2000.

Per rotatorie a corsia singola il modello proposto dall'HCM 2010 è:

$$c_{e,pce} = 1130e^{-(0.001v_{c,pce})}$$

- $c_{e,pce}$: capacità della corsia (ae/h)
- $v_{c,pce}$: flusso di conflitto (ae/h)

Un confronto tra l'HCM 2010 e altri importanti modelli utilizzati negli USA rivelano che in assenza di calibrazione il modello proposto dall'HCM 2010 stima generalmente una capacità minore, specialmente per condizioni di traffico medio/basse (<800ae/h).

L'HCM 2010 raccomanda quindi calibrazioni locali dei modelli di capacità che rispecchino il comportamento reale dei conducenti, per le seguenti ragioni:

- E' probabile che la capacità della rotatoria cresca con l'aumentare della familiarità al suo utilizzo.
- Nei luoghi con un'alta concentrazione di rotatorie la capacità sarà maggiore.
- Nei luoghi in cui il comportamento dei conducenti è aggressivo la capacità sarà maggiore.

La formula più generale per la stima della capacità proposta dall' HCM 2010, basata su un semplice metodo di calibrazione delle variabili di stima, è:

$$c_{pce} = Ae^{-(Bv_c)}$$

Dove:

- $A = \frac{3600}{t_f}$
- $B = \frac{t_c - 0.5t_f}{3600}$
- c_{pce} : capacità della corsia di ingresso alla rotatoria (ae/h)
- v_c : flusso di conflitto nell'anello circolatorio (ae/h)

2.2.2.6 METODO DI TANNER

Soluzioni più generale per la stima della capacità alla manovra sono state ottenute sostituendo la distribuzione esponenziale degli headway con distribuzioni più realistiche, come quella dicotomica. L'equazione generale è:

$$q_m = \frac{\alpha q_p e^{-\lambda(t_c - t_m)}}{1 - e^{-\lambda t_f}}$$

Dove:

$$\lambda = \frac{\alpha q_f}{(1 - t_m q_f)}$$

Se si pone:

$$\alpha = 1 - q_p t_m$$

l'equazione sopra descritta si riduce all'equazione di ((29) Tanner, 1962):

$$q_m = (1 - q_p t_m) \frac{q_p e^{-q_p(t_c - t_m)}}{1 - e^{-q_p t_f}}$$

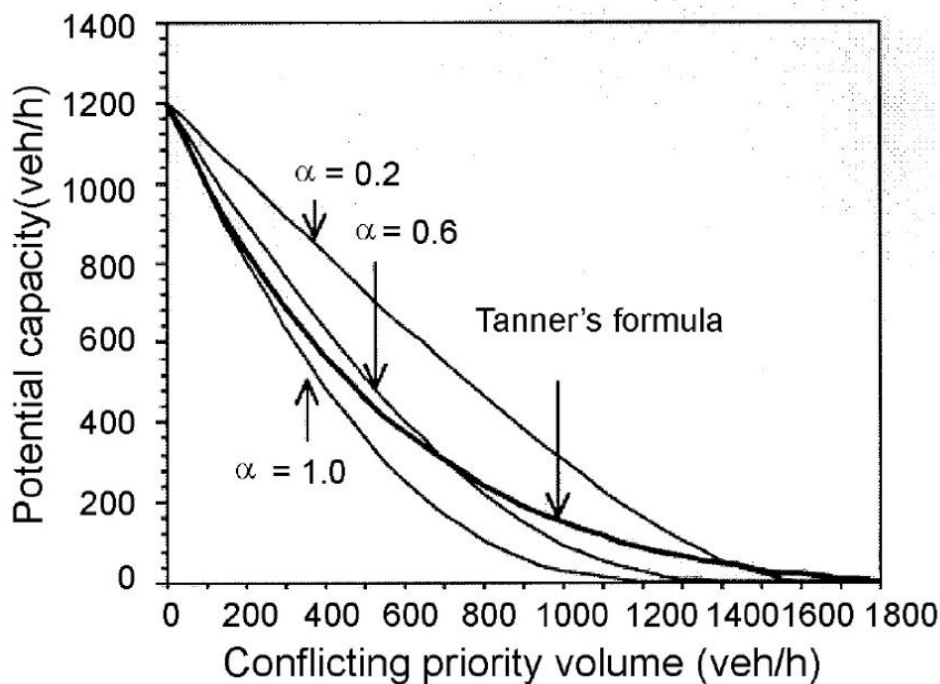


Figura 38 - Effetto del cambiamento di α nell'equazione generale ed equazione di Tanner

3 CAPITOLO 3 – ESPERIMENTO IN AMBIENTE SIMULATIVO

3.1 IL SIMULATORE DI GUIDA : INTRODUZIONE

I dati analizzati in questo progetto di Tesi sono stati prodotti da un software, tramite l'impiego di un simulatore di guida, nel quale è stato possibile riproporre virtualmente ambiente e caratteristiche di traffico rilevate in una situazione reale.

((30) Rossi Meneguzzer Gastaldi Gecchele, 2011), propongono le motivazioni per l'utilizzo di un simulatore per l'analisi del comportamento dei guidatori in specifici ambiti di studio rispetto alle misurazioni su campo (rilievi di traffico).

Eseguire un esperimento in un contesto reale risulterebbe molto complesso e costoso per la raccolta dei dati di traffico, e difficilmente realizzabile nel caso si vogliano riproporre per successivi esperimenti le medesime condizioni ambientali e condizioni di flusso.

Con un simulatore di guida è invece possibile riprodurre scenari virtuali con le specifiche condizioni ambientali e precisi flussi di traffico, garantire efficienza, un minor costo ed un risparmio di tempo rispetto ai rilievi su campo. Gli ambiti nei quali è opportuno utilizzare un simulatore di guida sono principalmente quelli della ricerca e dell'insegnamento ad un corretto utilizzo del veicolo (scuola guida, ambito aerospaziale ed aeronautico).

Nell'ambito della ricerca i vantaggi offerti dall'utilizzo del simulatore di guida, come descritto da ((31) Rossi Gastaldi Meneguzzer Gecchele, 2011) possono essere:

- l'osservazione del comportamento dei guidatori in condizioni sperimentali;
- la determinazione di parametri non osservabili sul campo come per esempio le caratteristiche socio-economiche dei guidatori, l'età, l'esperienza di guida;
- Il controllo delle caratteristiche di traffico come per esempio la distribuzione degli headway nella strada principale, le diverse condizioni di visibilità che possono presentarsi nell'arco di una giornata o che possono essere causate da precise condizioni meteorologiche, la tipologia del traffico, le condizioni della pavimentazione, le caratteristiche del veicolo che si guida;
- l'esecuzione di particolari test che su strada non sarebbe possibile (o opportuno) proporre, come per esempio scenari ipotetici relativi a nuovi sistemi e tecnologie, o sulle caratteristiche psicofisiche di soggetti in specifiche situazioni (stanchezza, distrazione, assunzione di alcool).

Le domande che sorgono spontanee ad una persona estranea al simulatore di guida, e a cui si cercherà di dare una risposta, sono le seguenti:

- Gli esperimenti al simulatore di guida rappresentano in maniera veritiera la realtà?
- I dati di output ottenuti dall'esperimento sono confrontabili con quelli che si otterrebbero da uno studio su campo?

Prendendo in considerazione la prima domanda, si può affermare che la fedeltà della simulazione può variare in maniera considerevole in funzione degli obiettivi dello studio e dei parametri di interesse che devono essere studiati.

Per esempio, nel caso si debba determinare il comportamento di guida di un soggetto in risposta alle condizioni di visibilità, alle condizioni stradali o alle caratteristiche del traffico (compresa la tipologia veicolare) è necessaria una precisione elevata, con una rappresentazione dettagliata ed una risoluzione video e una percezione prospettica realistiche.

Negli studi relativi alla teoria del gap acceptance la percezione del distanziamento spaziale e temporale tra veicoli successivi è fondamentale per poter scegliere correttamente il gap da accettare per l'immissione, l'attraversamento o il sorpasso in condizioni di sicurezza.

Se l'obiettivo non riguarda aspetti ambientali o caratteristiche del traffico o della pavimentazione è possibile un livello di fedeltà minore, che permette il confronto tra l'ambiente simulato e il mondo reale, in prove come:

- Distrazione alla guida;
- Prontezza di riflessi;
- Analisi percettive;
- Scopi didattici o formativi.

Per quanto riguarda l'attendibilità dei risultati, l'assenza di rischio deve essere considerata una delle più significative differenze rispetto alla realtà. E' necessario validare gli esperimenti condotti al simulatore confrontandoli con un contesto reale, comparando se possibile i valori dei dati di output derivanti dall'esperimento al simulatore di guida con dei valori reali noti o ricavati da rilievi di traffico sul campo.

Non sempre la validazione può portare a risultati accettabili: in questo caso gli output prodotti dalla prova al simulatore non possono ritenersi attendibili.

Il simulatore di guida in dotazione al Laboratorio Trasporti è un simulatore statico avanzato, costituito dalle seguenti componenti:

- Abitacolo realizzato in alluminio e plexiglass, volante del diametro di 36 cm in grado di riprodurre vibrazioni, cambio manuale a 5 marce, pedaliera (acceleratore, freno, frizione), freno di stazionamento, leva di azionamento degli indicatori di direzione e di accensione delle luci, sedile regolabile, cintura di sicurezza;
- Sistema audio composto da 6 altoparlanti (3 frontali, 2 in posizione laterale posteriore all'altezza della testa del conducente, uno collocato a lato pedaliera);
- 5 display al plasma da 50 Pollici con risoluzione in pixel di 1920x1080;
- 3 PC (collegati in rete) con processore Intel Core 2 Duo, frequenza 3.16 GHz, 2 moduli RAM DDR3 da 2 GB ciascuno, scheda video Nvidia GeForce GTx260 e sistema operativo MS Windows XP (Service Pack 3);

Si presentano delle immagini relative all'abitacolo e alle componenti costituenti il simulatore di guida:



Figura 39 - Abitacolo del simulatore di guida



Figura 40 - Abitacolo, pedaliera, volanti e comandi del simulatore di guida

Ai PC sono demandati i seguenti compiti :

- Controllo dei comandi dell'abitacolo e del comportamento del veicolo simulato;
- Generazione e controllo degli altri veicoli che interagiscono con il veicolo simulato;
- Riproduzione dei suoni e creazione grafica 3D dell'ambiente virtuale. Le immagini 3D vengono proiettate, coerentemente con la posizione del guidatore all'interno dello scenario virtuale, nei 5 schermi piatti che circondano la postazione di guida, dalla quale l'utente controlla il mezzo. Gli schermi posti in questo modo coprono un angolo di visuale orizzontale di 300° rispetto al guidatore.



Figura 41 - Visione d'insieme del simulatore di guida: abitacolo, schermi, PC

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 (simulatori dinamici):

- Le vibrazioni sul terreno;
- Il senso di accelerazione e decelerazione frontale;
- Il senso di accelerazione laterale e verticale;
- La pendenza;
- Il rollio.

Il simulatore statico in dotazione al laboratorio Trasporti utilizzato per l'esperimento non è in grado di restituire le sensazioni inerziali dovute al movimento 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 tester una sessione di guida di prova in modo da prendere confidenza con l'ambiente simulato e la risposta dei comandi.

3.2 CREAZIONE DELLO SCENARIO VIRTUALE

Per lo sviluppo dello scenario di traffico e dell'ambiente simulato si utilizzano una serie di pacchetti software (messi a disposizione dall'azienda ST Software) che formano le componenti del simulatore di guida: l'ambiente virtuale in tutti i suoi aspetti, il traffico, il controllo del veicolo all'interno dello scenario tramite i comandi di guida posti nell'abitacolo del simulatore.

Vengono utilizzati due pacchetti nella fase di progettazione (StRoadDesign e StScenario), un pacchetto nella fase di controllo e scrittura dei dati di output (StDataProc) ed i restanti per l'elaborazione video e audio della simulazione e per il controllo delle condizioni di prova durante l'esperimento (StControl).

Nel dettaglio sono disponibili i seguenti moduli:

- StRoadDesign : permette di creare i database grafici delle strade e l'ambiente tridimensionale, in tutti i suoi particolari. Offre cioè la possibilità di impostare le caratteristiche del percorso stradale (larghezza delle corsie e delle banchine, numero di corsie, segnaletica orizzontale, segnaletica verticale, tipologia di intersezione, etc.) e dell'ambiente (edifici, alberi, arredo urbano, segnaletica stradale, etc.) in ogni suo dettaglio. Di seguito si presenta un esempio relativo alla costruzione della rotatoria all'interno del percorso nello scenario virtuale.

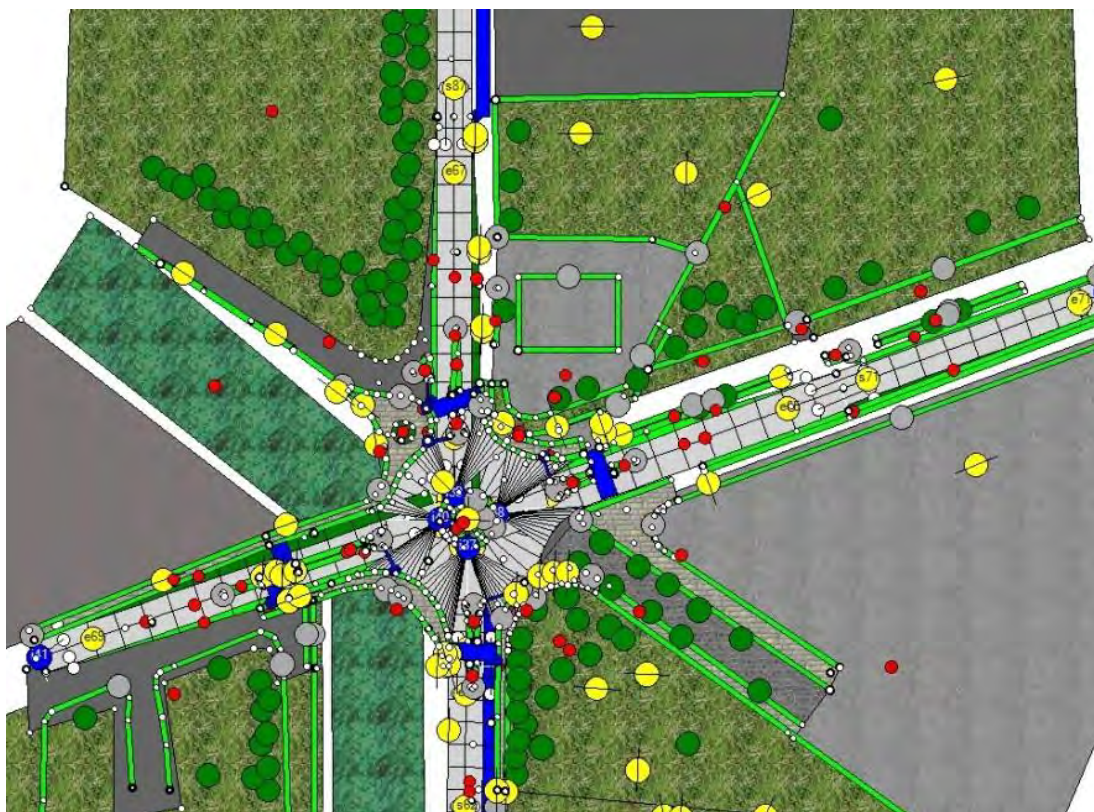


Figura 42 - Dettaglio riguardante la creazione dello scenario virtuale tramite il pacchetto StRoadDesign

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

- StScenario : le simulazioni vengono generate attraverso questo linguaggio di script. Tramite l'implementazione di precisi comandi, con questo pacchetto è possibile definire ogni aspetto degli agent (cioè del traffico circolante nell'ambiente simulato), come per esempio la tipologia veicolare, la velocità, il punto ed il momento di creazione, le interazioni con la pavimentazione, etc.
- StControl : è l' interfaccia grafica che permette di configurare in tempo reale il sistema (è possibile impostare predefinite condizioni meteo o agire su alcuni comandi del simulatore come variare il cambio da manuale ad automatico, visualizzare parametri di guida durante l'esperimento come la velocità, i giri del motore, etc.). Si riporta un'immagine dell'interfaccia grafica relativa a questo modulo.

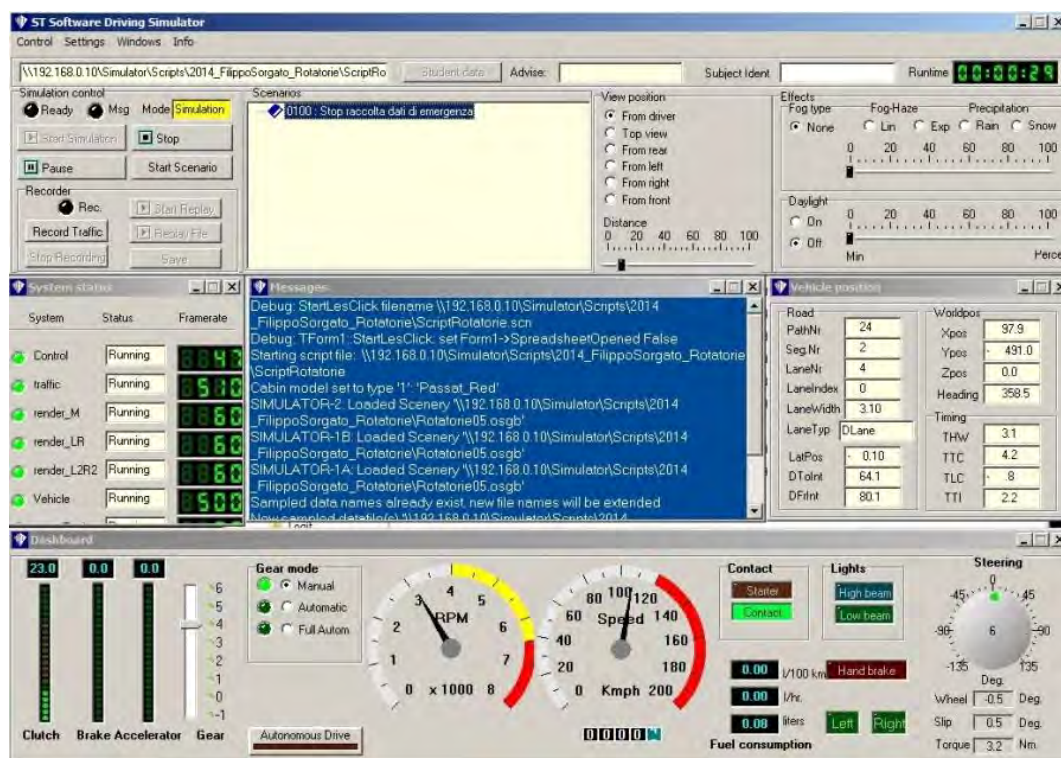


Figura 43 - Interfaccia grafica del pacchetto StControl

- StRender : è il pacchetto render configurabile in tempo reale nel quale è possibile impostare le diverse visuali di guida visibili negli schermi che circondano l'abitacolo durante la simulazione (vista dell'auto dall'alto, da specifiche angolazioni, dalla postazione del conducente).

Un esempio dello scenario che questo pacchetto propone e che si presenta ad un soggetto nel momento della guida al simulatore è il seguente:



Figura 44 - Scenario virtuale durante una fase dell'esperimento al simulatore

In particolare per l'esperimento in esame si è fatto uso di un percorso nel quale sono stati riprodotti fedelmente una rotatoria (la rotatoria di Milano, via Taglio Sinistro), in tutte le sue dimensioni e caratteristiche) e l'ambiente che la circonda (teatro di Milano, edifici, arredo urbano, segnaletica stradale).

Questo scenario è stato sviluppato in una precedente di tesi ((41) Borgato, 2012) e riproposto in questo lavoro con modifiche e con obiettivi diversi.

Nella precedente tesi si era eseguito un rilievo di traffico reale dal quale è stato possibile ricavare, grazie all'installazione di apparecchi radar e videocamere, la distribuzione degli headway nella rotatoria e la sequenza di accettazioni e rifiuti dei gap da parte dei veicoli che dovevano compiere la manovra di immissione nell'anello circolatorio.

Questa distribuzione di headway misurata nel campo è stata riproposta come flusso di conflitto nell'intersezione a rotatoria ai soggetti coinvolti nell'esperimento. Questa distribuzione degli headway della corrente di conflitto verrà chiamata "random".

In funzione dei gap accettati e di quelli rifiutati (o del massimo gap rifiutato, nel caso del metodo della massima verosimiglianza) è possibile stimare il gap critico sia nel caso reale, che in quello simulato, e confrontare il valore delle due stime. Questo confronto sarà di assoluta importanza, in quanto solamente dalla vicinanza delle stime del gap critico reale e di quello simulato sarà possibile validare i risultati degli esperimenti al simulatore di guida. Per eseguire questo confronto sarà necessario affidarsi a test statistici, che affronteremo in dettaglio successivamente, i quali restituiscono la probabilità che le medie di due o più gruppi siano significativamente differenti tra loro.

Nel caso in cui i risultati prodotti dal simulatore non fossero confrontabili con quelli ricavati dal campo sarebbe necessario controllare la corretta calibrazione dei parametri e validare nuovamente i risultati. Se l'esito fosse nuovamente negativo non sarebbe possibile utilizzare i risultati prodotti dai test al simulatore di guida in quanto non rispecchierebbero la realtà.

L'inidoneità dello scenario potrebbe essere dovuta ad errori nello sviluppo delle componenti del tracciato stradale o sull'impostazione di qualche parametro all'interno dello script. L'errore potrebbe essere attribuibile anche ai soggetti che compiono il test : i soggetti potrebbero valutare diversamente il rischio rispetto alla realtà, percepire distanze e intertempi veicolari in modo diverso o anche non essere abituati ad affrontare scenari virtuali.

Essendo necessaria una validazione tra i dati ricavati nella realtà tramite il rilievo di traffico ed i dati che si otterranno dalla prova al simulatore, nell'esperimento al simulatore sono stati proposti gli stessi headway, e nello stesso ordine, misurati nel campo.

3.3 CARATTERISTICHE DEL PERCORSO DI GUIDA

Il percorso proposto, sviluppato con il pacchetto StRoadDesign, prevede 4 rotatorie a giro (e un totale di 7 giri per completare la prova), collegate tra loro da rettilinee e curve che ripropongono, come accennato precedentemente, sia in immissione che in uscita dalla rotatoria l'ambiente e le caratteristiche geometriche misurate sul campo. Infatti quanto più fedele è la rappresentazione della realtà, tanto più sarà possibile ricavare dati attendibili dai soggetti che guidano al simulatore di guida.

Si riportano le caratteristiche geometriche principali della rotatoria in esame:

- Diametro isola centrale : 10 metri;
- Larghezza anello circolatorio : 9.50 metri;
- Diametro esterno : 29 metri;
- Numero corsie anello : 1.

Il ramo d'approccio (via Taglio Sinistro) alla rotatoria, riproposto come ramo d'ingresso anche nello scenario virtuale, presenta i seguenti elementi geometrici:

- Numero corsie in ingresso : 1;
- Larghezza ramo d'ingresso : 3.50 metri;
- Angolo d'entrata tra flusso entrante e circolante : 21°.

Di seguito si propongono delle immagini relative al percorso dello scenario virtuale:

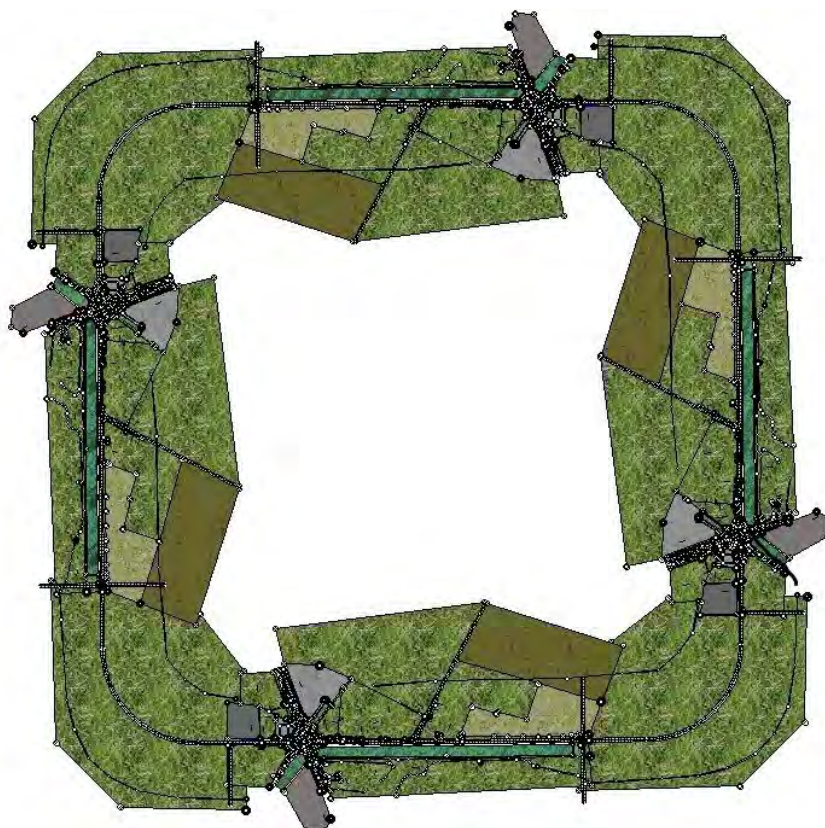


Figura 45 - Mappa del percorso virtuale che ogni soggetto dovrà percorrere. Si nota che il tracciato è composto da 4 rettilinei al cui termine è riproposta la stessa rotatoria (con condizioni alternate della distribuzione del flusso di traffico di conflitto)

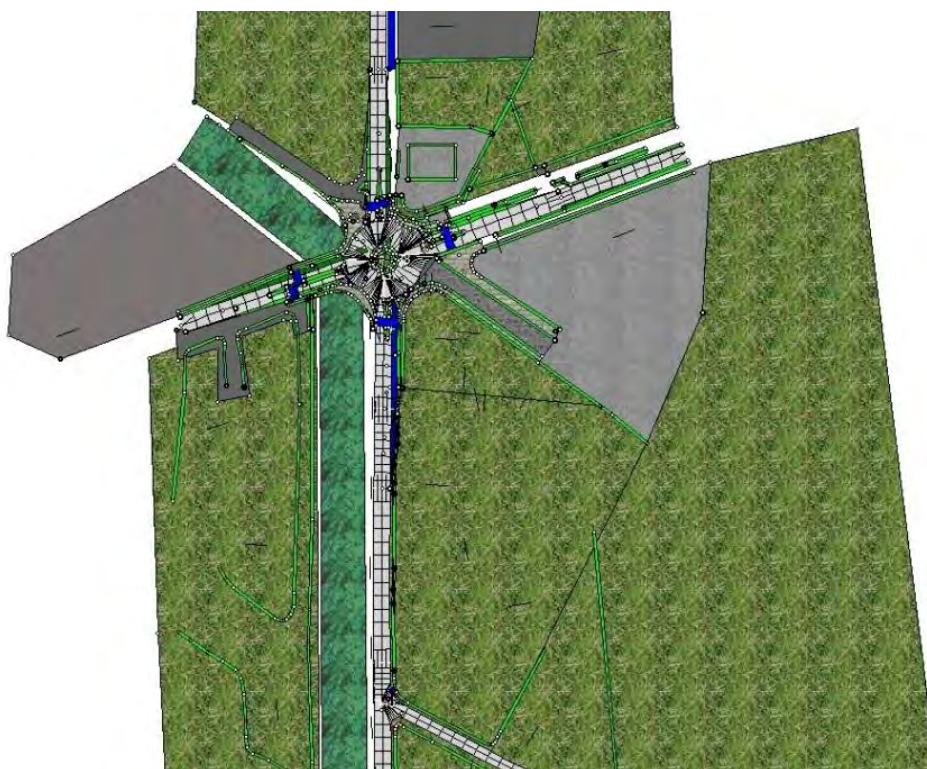


Figura 46 - Particolare della rotatoria e degli elementi compositivi circostanti

Grazie al pacchetto StScenario è stato possibile creare il traffico di conflitto nelle 4 rotatorie: sono state proposte 2 rotatorie con la sequenza degli headway della corrente del flusso di conflitto “random” (R), e le altre 2 rotatorie con la sequenza degli headway della corrente del flusso di conflitto “progressiva” (P).

La sequenza “random” (R) rispecchia gli headway realmente registrati nel campo. E’ quindi una sequenza “casuale”, che ogni conducente è abituato ad affrontare in situazioni reali. A questi intertempi è stato apportato un aggiustamento: tutti i valori maggiori di 4 secondi sono stati posti uguali a 4 secondi. Si è osservato infatti che 4 secondi è un limite attendibile oltre il quale, nel caso di intersezioni a rotatoria, vengono accettati headway con una percentuale molto elevata.

La sequenza di headway “progressiva” (P) della corrente del flusso di conflitto è stata pensata in questo modo: vengono proposti 15 headway della dimensione di 1 secondo (non utilizzabili per l’immissione) seguiti da headway che crescono progressivamente di 0.2 secondi per ogni successivo gap che si presenta al conducente del ramo secondario (quindi dopo il quindicesimo headway da 1 secondo si avranno degli intertempi veicolari di 1.2 s, 1.4 s, 1.6 s, ecc fino alla soglia limite di 10 secondi).

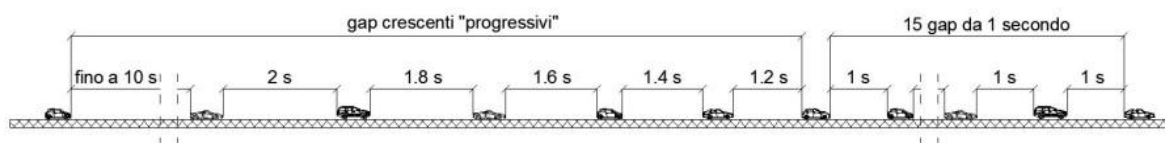


Figura 47 - Rappresentazione grafica della struttura della distribuzione "progressiva" degli headway della corrente di conflitto

In particolare, in questo lavoro di tesi, le rotatorie che ogni conducente dovrà affrontare saranno ordinate con le seguenti distribuzioni:

- Prima rotatoria: P (sequenza progressiva)
- Seconda rotatoria: R (sequenza random)
- Terza Rotatoria: P (sequenza progressiva)
- Quarta rotatoria: R (sequenza random)

E’ stata compiuta questa scelta in quanto precedentemente erano stati effettuati degli esperimenti sullo stesso scenario virtuale, dal collega Marco Roncada, con le medesime condizioni di traffico, proposte però nel seguente ordine:

- Prima rotatoria: R (sequenza random)
- Seconda rotatoria: P (sequenza progressiva)
- Terza Rotatoria: R (sequenza random)
- Quarta rotatoria: P (sequenza progressiva)

Si è quindi voluto “bilanciare” il primo esperimento proponendo la serie in modo invertito, per cercare di rendere ininfluyente l’ordine della tipologia di distribuzione di arrivi veicolari sul comportamento di guida dei conducenti che devono affrontare la rotatoria.

La creazione dei veicoli componenti il traffico all'interno dello scenario (chiamati "agent") per il flusso di conflitto nelle rotatorie (sia per quelle Random che per quelle Progressive) avviene secondo la seguente modalità: l'entrata del "main target" (ovvero il veicolo all'interno della simulazione, guidato dal conducente che sta effettuando la prova) in un determinato "path" (la denominazione "path", seguita da un numero, serve per identificare univocamente un tratto di strada) determina l'inizio della generazione degli agent.

Quando il main target entra in un preciso path, posto a circa 420 metri dall'intersezione, gli agent vengono creati da un "container" (una sorgente dalla quale si materializzano i veicoli) posto a 72 metri di distanza dalla rotatoria, nel ramo della rotatoria posto alla sinistra del main target. Ai veicoli generati da queste sorgenti vengono assegnati dei parametri ben definiti:

- Velocità costante di 8 m/s (28.8 Km/h) per tutti i veicoli facenti parte della sequenza, in modo tale che l'headway tra successivi agent rimanga sempre invariato lungo il percorso che devono compiere;
- Headway tra successivi veicoli prestabilito a seconda che la sequenza sia (R) o (P) come discusso precedentemente;
- Tipologia veicolare impostata tramite la stesura di un apposito script;
- Percorso prestabilito: gli agent dovranno eseguire una manovra di attraversamento e quindi uscire nel ramo posto alla destra del main target.

La sequenza di headway progressiva (P) ha la struttura descritta in precedenza di modo che il main target quando arriva alla rotatoria, dopo aver percorso un tratto rettilineo di 420 metri, mediamente (in funzione della velocità mantenuta) si ritrova a dover compiere la scelta di immissione partendo dall'undicesimo gap di un secondo. Quindi i conducenti vedranno sfilare davanti a loro qualche gap da 1 secondo (non utilizzabile in quanto di piccole dimensioni) e vedranno poi crescere progressivamente le dimensioni dei gap seguenti di 0,2 secondi alla volta, scegliendo infine quel gap che ritengono accettabile per eseguire la manovra in condizioni di sicurezza.

E' stato scelto di proporre una sequenza progressiva perché dovrebbe apportare i seguenti vantaggi rispetto alla sequenza random:

- Ridurre l'intervallo tra il gap accettato ed il massimo gap rifiutato. In questo modo il gap critico sarà definibile in modo molto più preciso, si troverà all'interno di un intervallo in cui la differenza tra il massimo ed il minimo è di 0.2 secondi. In distribuzioni random il gap critico può essere compreso in intervalli temporali maggiori e il conducente può prendere decisioni incoerenti;
- Evitare il problema della sovra rappresentazione dei conducenti prudenti, dando una stima diretta del gap critico. I guidatori accetteranno presumibilmente il primo gap giudicato di dimensioni idonee per attraversare la corrente principale. Questo schema progressivo dovrebbe assicurare che il gap accettato da un conducente sia il primo giudicato accettabile. Quindi il gap selezionato sarà il più basso tra i gap accettabili.

Per poter visualizzare, come file di output, la sequenza di gap (della corrente di conflitto) rifiutati e quello accettato dal main target per l'immissione nell'anello circolatorio si sono introdotte

delle “spire virtuali” nello scenario simulato (tramite il pacchetto StScenario) in precisi punti della rotatoria.

Per ogni rotatoria si sono introdotte le seguenti spire:

- una in corrispondenza del ramo di ingresso dal quale il main target deve eseguire la propria manovra di attraversamento. La Spira è posta a circa 1.5 metri dalla “yield line” ed è denominata 101 per la prima rotatoria, 202 per la seconda rotatoria, 303 per la terza rotatoria, 404 per la quarta rotatoria. Questa spira ha la funzione di rilevare il passaggio del main target in avvicinamento alla rotatoria. Dal momento in cui il main target passa sopra questa spira inizia la scelta di accettazione o rifiuto del gap da parte del soggetto.
- una seconda spira in corrispondenza del punto di conflitto tra la traiettoria di attraversamento del main target e la traiettoria di attraversamento della corrente di conflitto. La Spira è denominata 111 per la prima rotatoria, 222 per la seconda rotatoria, 333 per la terza rotatoria, 444 per la quarta rotatoria. Questa spira ha la funzione di registrare i passaggi degli agent e del main target nella rotatoria. E’ possibile distinguere quale veicolo sia passato sopra la spira in quanto ogni veicolo ha un proprio identificativo: gli agent sono identificati da un numero positivo, il main target è identificato con il valore “-2”. Dalla differenza degli istanti di passaggio degli agent sopra questa spira è possibile determinare il gap temporale tra due veicoli successivi. Quando il main target passerà in corrispondenza di questa spira (visibile dall’identificativo “-2”) vorrà dire che avrà accettato quel gap dato dalla differenza tra gli istanti temporali degli agent successivo e precedente al suo passaggio.
- Altre 2 spire, per verificare che gli agent mantenessero sempre lo stesso gap costante tra di loro (perché impostati a mantenere una velocità costante), poste nel ramo di ingresso alla rotatoria da parte degli agent. La prima spira è posta a 40 metri dal container, la seconda a 72 metri dal container. Queste spire sono state denominate 115 e 117 per la prima rotatoria, 225 e 227 per la seconda rotatoria, 335 e 337 per la terza rotatoria, 445 e 447 per la quarta rotatoria. Non sono fondamentali per la determinazione del gap critico, ma sono state inserite a scopo precauzionale come metodo di verifica.

In figura 48 si rappresentano graficamente le spire 101 e 111 (relative alla rotatoria numero 1):

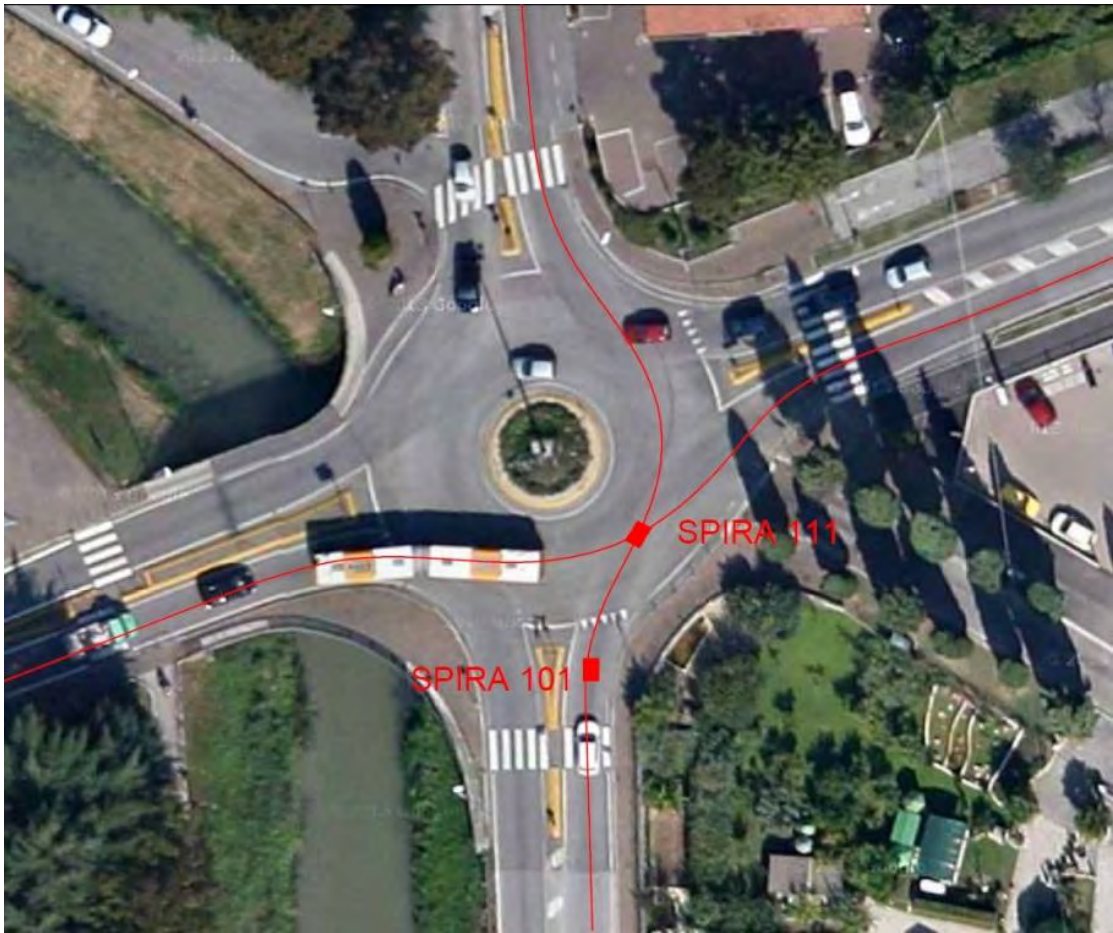


Figura 48 - Rappresentazione grafica del posizionamento delle spire virtuali, inserite nella rotatoria di Mirano via Taglio sinistro

Si riporta schematicamente il numero della rotatoria e l'identificativo delle spire corrispondenti:

Tabella 5 - Identificativo delle spire in funzione della rotatoria all'interno dello scenario virtuale

	SPIRA INGRESSO MAIN TARGET	SPIRA PUNTO CONFLITTO	SPIRE INGRESSO AGENT
ROTATORIA N.1	101	111	115, 117
ROTATORIA N.2	202	222	225, 227
ROTATORIA N.3	303	333	335, 337
ROTATORIA N.4	404	444	445, 447

3.4 DISTRIBUZIONE DEGLI HEADWAY DI TIPO PROGRESSIVO CRESCENTE

Una distribuzione degli headway di tipo “progressiva” (P), proposta con l’ausilio di un simulatore di guida, non è una novità nella letteratura della teoria della circolazione e nello studio del comportamento di gap acceptance. Si riportano a scopo informativo e conoscitivo gli articoli che la trattano, specificando obiettivi, procedure e risultati ottenuti.

3.4.1 TRAFFIC GENERATION FOR STUDIES OF GAP ACCEPTANCE

((32) Kerney Grechkin Cremer Plamert, 2006) hanno voluto dimostrare come la simulazione interattiva possa essere uno strumento valido per gli studi del comportamento di gap acceptance. In questo studio gli esperimenti sono stati condotti in un simulatore di guida nel caso di attraversamento da un ramo secondario di una strada da parte di ciclisti. Sono stati presentati una serie di scenari di complessità sempre più elevata con flussi di traffico in una o due corsie, unidirezionali e bidirezionali. Presentando gli stessi gap temporali in ogni condizione, si facilita il confronto tra le condizioni di attraversamento per meglio capire come la richiesta d’attenzione e le strategie di attraversamento influenzino la selezione del gap.

In particolare nell’esperimento proposto il simulatore è composto di un’apposita piattaforma con una bicicletta fissata a terra e degli schermi che riproducono virtualmente lo scenario reale.



Figura 49- Piattaforma con bicicletta per l'esperimento proposto da Kerney. Visuale di alcune fasi dell'esperimento

Gli studi iniziali si erano concentrati in una situazione relativamente semplice, dove il traffico della corrente principale è unidirezionale e concentrato in una sola corsia (siamo in presenza di due corsie per senso di marcia), dalla sinistra del soggetto che compie l’attraversamento. La velocità dei veicoli era costante di modo che i gap rimanessero costanti.

Il primo esperimento voleva studiare il comportamento del ciclista nell’approccio secondario quando a quest’ultimo si presentassero gap di dimensioni variabili secondo una sequenza crescente prestabilita (P, come nel caso di questo lavoro di Tesi). Il gap rappresenta un’opportunità di attraversamento. Durante questo periodo il soggetto deve immettersi nella zona di conflitto e attraversare completamente l’incrocio.

Per controllare la generazione dei gap, all'interno della simulazione di traffico, una "sorgente" (analoga al "container") produce veicoli che immette nella corrente principale. Inizialmente la sorgente produce un flusso continuo di traffico organizzato a blocchi. Ogni blocco contiene cinque diverse dimensioni di gap tra successivi veicoli con la seguente sequenza temporale : 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 e 5 secondi.

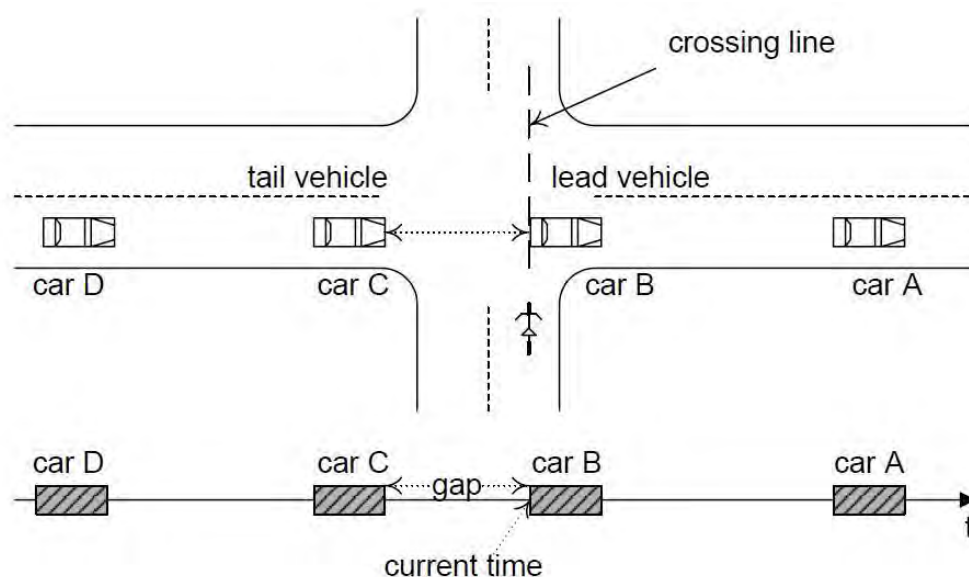


Figura 50 - Rappresentazione grafica dei gap e della manovra di attraversamento da parte dei ciclisti

Il secondo esperimento è servito per testare l'influenza dell'attesa sul comportamento dei soggetti che devono immettersi nella corrente principale. Per questo scenario è stata creata una nuova sorgente che producesse un flusso continuo di traffico con gap di dimensioni casuali tra veicoli successivi, ma tutti non oltrepassabili (tra 1.5 e 2 secondi, flusso ad alta densità). Il soggetto che si presenta all'intersezione vedrà 8-10 gap non oltrepassabili seguiti da due gap di dimensioni semi-accettabili e successivamente ancora da quattro gap non attraversabili. La dimensione dei gap attraversabili viene incrementata di volta in volta di una costante precisa, iniziando da un gap di 3 secondi e con l'aumento di 0.5 secondi per ogni sequenza.

L'analisi dei dati ha portato ai seguenti risultati:

I conducenti più cauti rifiutano i gap più piccoli rispetto ai conducenti più audaci. Questo significa che il contributo dei conducenti cauti è maggiore sui gap rifiutati. Le stime sulle dimensioni del gap critico della popolazione sono basati sulla curva d'accettazione, la rappresentazione di gap accettati suddivisi per intervalli, che sarà a favore dei gap di dimensione maggiore per il maggior numero di scelte compiute dai conducenti più prudenti.

I partecipanti nelle condizioni di traffico di alta densità sono portati a scegliere gap di dimensioni minori e affrontano l'intersezione seguente accettando gap di dimensioni minori rispetto alla precedente. I primi attraversamenti della strada nello scenario virtuale influenzano cioè il gap acceptance dei successivi approcci.

Una possibilità è che i soggetti abbiano migliorato il loro giudizio nell'affrontare l'attraversamento della seconda intersezione, dopo che nella prima si era presentata una

condizione di traffico ad alta densità. In aggiunta è possibile che abbiano imparato a coordinare maggiormente le loro azioni motorie, eseguendole più velocemente dopo che l'ultimo gap gli si è presentato di fronte. L'alternativa è che i soggetti siano disposti ad accettare un maggiore rischio, a causa dell'impazienza per l'attesa dell'immissione.

La relazione che intercorre tra l'assunzione del rischio e l'aumento dell'esperienza è probabilmente quella che il raggiungimento di un certo livello di abilità invita i soggetti a valutare ed accettare anche situazioni rischiose.

Esistono però due potenziali difetti in questo approccio.

Il primo è che i soggetti che aspettano per lungo tempo di attraversare l'incrocio sono disposti ad accettare gap di dimensioni minori. Quindi, il metodo con la sequenza "progressiva" potrebbe sottostimare il gap critico nel caso che conducenti che sono in attesa da lungo tempo vedano un gap attraversabile.

Il secondo è che se i guidatori sono informati della struttura di questo metodo potrebbero alterare il loro criterio di scelta perché sanno quale sarà il gap successivo che si presenterà loro di fronte. Questo potrebbe sovrastimare il gap critico. Con la conseguenza di dover fare un'ulteriore sperimentazione per determinare come questi fattori influiscano sulla selezione del gap.

3.4.2 EFFECTS OF MAJOR-ROAD VEHICLE SPEED AND DRIVER AGE AND GENDER ON LEFT-TURN GAP ACCEPTANCE

L'obiettivo prefissato nello studio di ((33)Yan Radwan Guo, 2006), è quello di valutare, attraverso l'utilizzo di un simulatore di guida, gli effetti della velocità della corrente principale, dell'età e del genere sul comportamento di gap acceptance per manovre di svolta a sinistra dal ramo secondario di un'intersezione a regime di priorità.

L'affinità con la tesi che qui si sta sviluppando, come detto precedentemente, è che anche questo articolo impiega una sequenza "progressiva" di gap.

L'obiettivo degli autori in questo articolo è quello di determinare il comportamento di guida dei vari soggetti, per genere ed età in funzione della velocità della corrente principale. Non è chiaro quale sia il metodo utilizzato per la determinazione del gap critico.

In questo esperimento la strada principale era costituita da due corsie ed era a doppio senso di marcia. Dopo essersi fermato all'intersezione, il soggetto doveva aspettare un gap appropriato per compiere la manovra di svolta a sinistra, e raggiunta la velocità della corrente veicolare della strada principale la simulazione era completata. Tutti i soggetti venivano testati in due scenari: scenario A con velocità della corrente primaria di 40.2 Km/h, scenario B con velocità della corrente primaria di 88.5 Km/h.

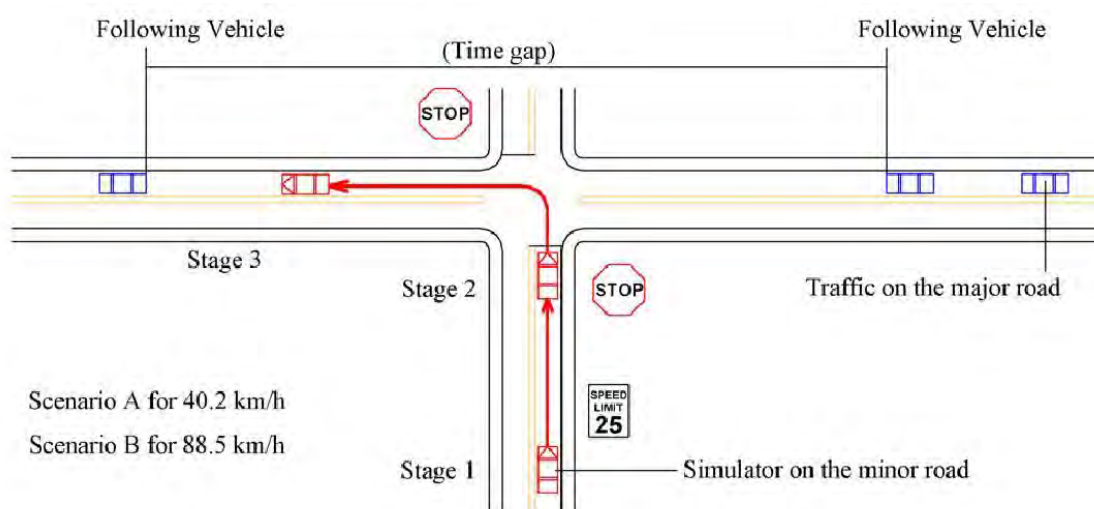


Figura 51 - Rappresentazione grafica della manovra da effettuare da parte dei soggetti del ramo secondario che devono immettersi nella corrente principale. Fonte : ((33)Yan Radwan Guo, 2006)

La distribuzione degli headway della corrente di traffico della strada principale è stata classificata in due categorie. La prima categoria era caratterizzata da un gap casuale tra successivi veicoli troppo piccolo per essere accettato dai conducenti della corrente secondaria (minore di 3 secondi). La seconda categoria consisteva in gap progressivi (P) di dimensioni crescenti, con una sequenza che prevedeva un aumento di un secondo rispetto al precedente gap. Le due categorie venivano presentate come in figura

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

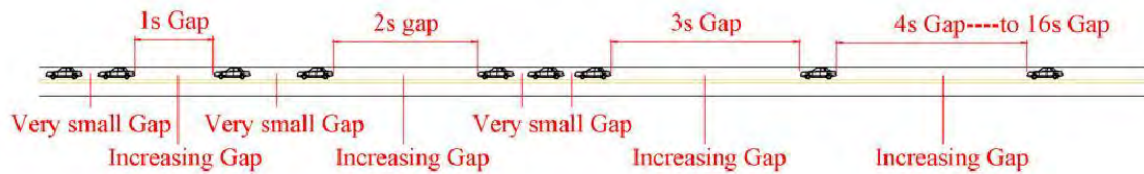


Figura 52 - Rappresentazione grafica della struttura di distribuzione "progressiva" degli headway della corrente di conflitto. Fonte : ((33)Yan Radwan Guo, 2006)

La sequenza di gap cresce da 1 a 16 secondi (anche se può ritenersi che oltre i 12 secondi non si abbiano più informazioni significanti sulla teoria del gap acceptance per intersezioni a regime di priorità). Anche in questa rappresentazione il conducente all'approccio secondario accetta, presumibilmente, il primo gap di dimensioni tali da essere attraversato.

Gli scenari venivano presentati in ordine casuale: A-B o B-A. Nella corrente primaria i veicoli provenivano solo dalla destra. E' interessante riportare i risultati dello studio effettuato:

Tabella 6- Valori delle medie del gap critico e della varianza stimati in funzione delle velocità del flusso della corrente principale, dell'età e del genere dei soggetti testati, nell'esperimento di Yan. Fonte : ((33)Yan Radwan Guo, 2006)

Factors	Parameter	GAP (s)
Speed		
40.2 km/h (N= 63)	Mean	7.44
	S.D.	2.08
88.5 km/h (N= 63)	Mean	5.82
	S.D.	1.46
Age		
Young (N= 56)	Mean	6.29
	S.D.	1.79
Middle (N= 42)	Mean	6.20
	S.D.	1.50
Old (N= 28)	Mean	7.94
	S.D.	2.38
Gender		
Female (N= 56)	Mean	6.93
	S.D.	2.02
Male (N= 70)	Mean	6.38
	S.D.	1.90
Total		
(N= 126)	Mean	6.63
	S.D.	1.97

In questo esperimento si è notato che la velocità del traffico nella corrente principale altera la scelta di accettazione di gap da parte dei conducenti all'approccio secondario. I soggetti sono portati ad accettare gap minori quando la velocità della corrente principale è maggiore. Questo implica che i conducenti mostrano minore sensibilità alla velocità di approccio del veicolo e

maggiore sensibilità alla distanza tra due veicoli successivi. Secondo ((34) Olson, 1996) infatti la velocità di avvicinamento all'approccio di un veicolo non è di facile percezione fino a che il veicolo non sia abbastanza vicino.

La scelta di accettare gap minori in correnti di traffico con velocità maggiori porta però a maggiori rischi di incidenti. Strade principali con limite di velocità elevato attraversate da strade secondarie con basso limite di velocità hanno maggiori problemi relativi alla sicurezza stradale ((35) Laberge, 2006).

Un'altra considerazione tratta dai risultati ottenuti è che i conducenti più anziani hanno abilità ridotte nel valutare con precisione la velocità di avvicinamento di un veicolo della corrente primaria all'approccio secondario. I soggetti con un'età più avanzata hanno scelto gap di dimensioni minori all'aumentare della velocità della corrente primaria, e questo comporta un maggiore rischio di collisione all'intersezione. I conducenti anziani, per gli effetti cognitivi, di percezione e di abilità motorie si sono dimostrati il gruppo più vulnerabile per le manovre di attraversamento.

3.4.3 AGE RELATED DIFFERENCES IN STREET CROSSING DECISIONS: THE EFFECT OF VEHICLE SPEED AND TIME CONSTRAINTS ON GAP SELECTION IN AN ESTIMATION TASK

Nello studio di ((36) Lobjois Cavallo, 2006), si è studiato il comportamento di gap acceptance di pedoni che devono attraversare una strada. In particolare si è osservato il comportamento in funzione della velocità dei veicoli, dell'età dei soggetti e del tempo di attesa prima dell'attraversamento. La particolarità è che anche in questo lavoro sono stati proposti esperimenti con sequenze di gap temporali crescenti (progressive, P), per ogni scenario proposto.

In questo esperimento, la simulazione prevedeva:

- Una rappresentazione virtuale creata da immagini proiettate su schermi, tale per cui il pedone avesse una visuale di 90° orizzontalmente e di 40° verticalmente, come mostrato in figura 53;
- Un sistema di registrazione del gap accettato dal soggetto consistente in un bottone da tenere in mano e da premere nel caso di accettazione del gap;
- La strada in questione era a senso unico e ad una corsia, con veicoli provenienti dalla sinistra del soggetto che deve compiere l'attraversamento;

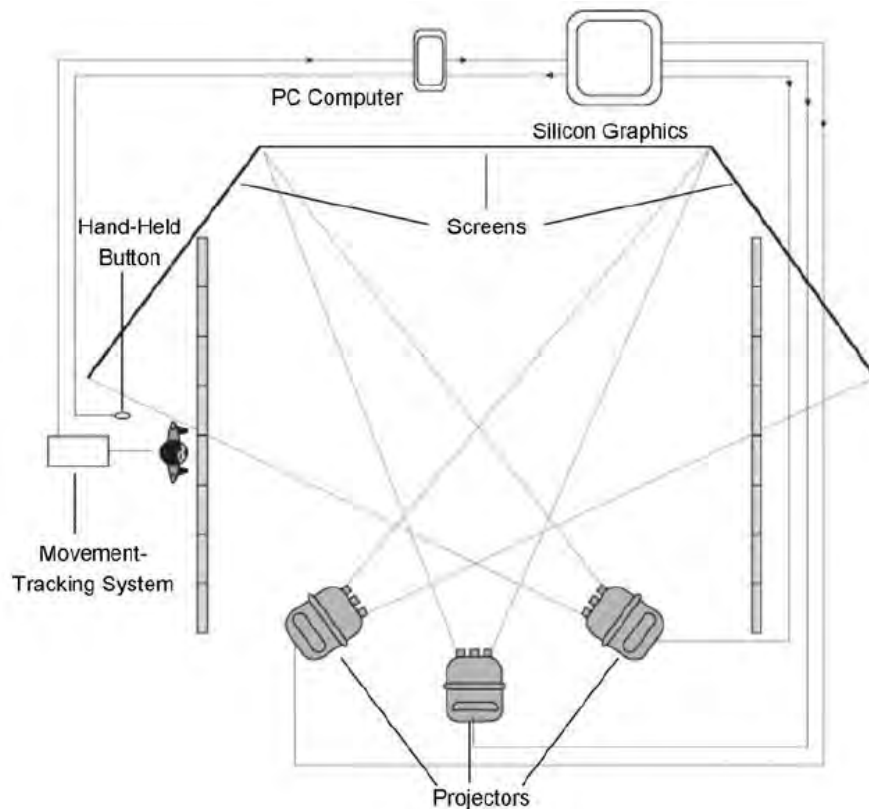


Figura 53- Rappresentazione grafica dell'esperimento proposto da Lobjois e Cavallo, in cui il pedone deve scegliere il gap che ritiene più opportuno per l'attraversamento stradale in sicurezza. Fonte: ((36) Lobjois Cavallo, 2006)

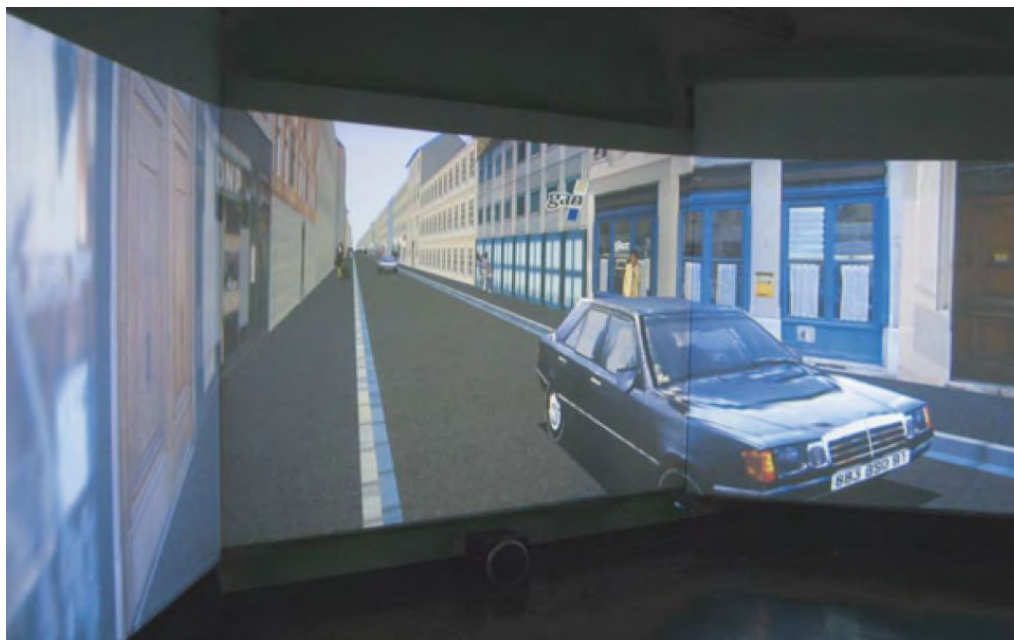


Figura 54 - Foto degli schermi e dello scenario che si presentava ai soggetti testati nell'esperimento. Fonte: ((36) Lobjois Cavallo, 2006)

La funzione $F(x) = \frac{1}{1+e^{-\left(x-\frac{\alpha}{\beta}\right)}}$ è stata utilizzata per determinare il punto di transizione tra la decisione di non attraversare e quella di attraversare (argomento α della funzione), in cui x esprime la distanza e β la pendenza al punto α . Con questa funzione si definisce la media del gap spaziale, e successivamente quella del gap temporale.

Lo scenario proponeva un rettilineo ubicato in un centro urbano, e 2 esperimenti.

L'esperimento 1 aveva come obiettivo quello di studiare l'impatto dell'età e della velocità dei veicoli sulla selezione del gap da parte dei pedoni.

Sono state proposte due velocità di marcia della corrente: 40 Km/h e 60 Km/h. Gli headway proposti come sequenza crescente sono compresi nell'intervallo tra 0.9 e 12.15 secondi per la velocità di 40 Km/h, tra 0.6 ed 8.1 secondi per la velocità di 60 Km/h. Si riporta di seguito il diagramma dei risultati relativi all'esperimento 1:

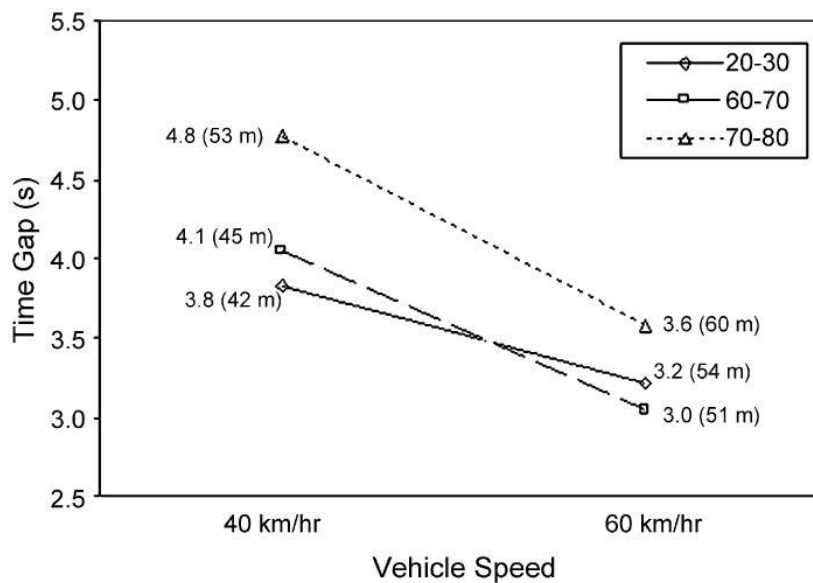


Figura 55 - Grafico che rappresenta la variazione del gap critico in funzione della velocità dei veicoli e dell'età dei pedoni. Fonte: ((36) Lobjois Cavallo, 2006)

I partecipanti accettano gap minori ad una velocità maggiore della corrente principale, cioè si hanno gap minori per la velocità di 60 Km/h rispetto ai 40 Km/h. L'errata valutazione della velocità è un importante fattore di rischio per i soggetti che compiono l'attraversamento. Si ritrovano le stesse conclusioni elaborate dal precedente studio di ((33)Yan Radwan Guo, 2006).

Nell'esperimento 2 si proponevano flussi di traffico a velocità costante. Le velocità scelte erano quelle di : 40, 50 o 60 Km/h. La distribuzione cresceva progressivamente di 1 secondo per ogni successivo gap (sequenza progressiva) partendo dal limite inferiore di gap di 1 secondo e arrivando al limite superiore di gap di 8 secondi tra due successivi veicoli. Questi gap temporali fissi per ogni velocità, hanno prodotto distanze interveicolari tra gli 11 ed i 88 metri per 40 Km/h, tra i 13 ed i 111 metri per i 50 km/h e tra i 16 ed i 133 metri per i 60 Km/h. E' possibile vedere i risultati dell'analisi nei tre grafici seguenti, in funzione della fascia d'età dei soggetti :

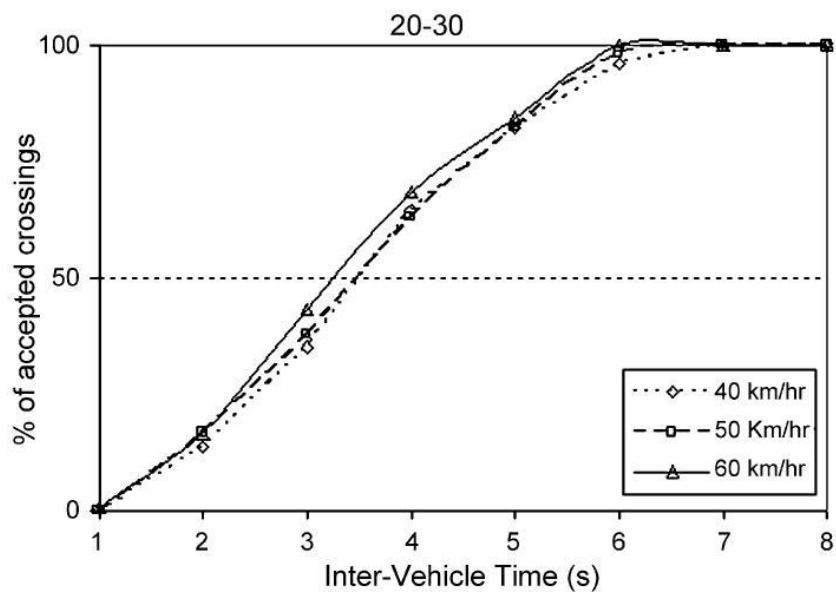


Figura 56 - Percentuale cumulativa delle accettazioni per la fascia d'età 20-30 anni in funzione della dimensione dei gap e della velocità delle auto nella corrente di traffico. Fonte: ((36) Lobjois Cavallo, 2006)

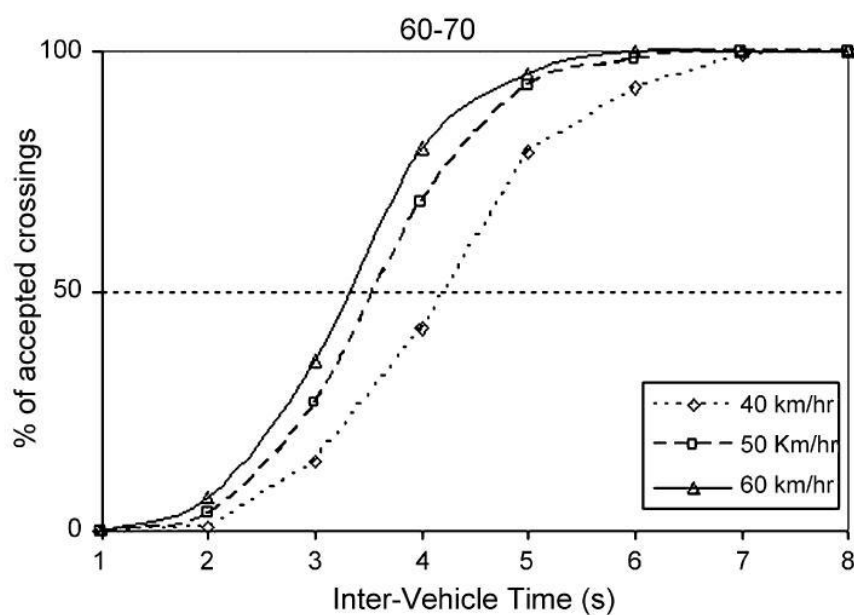


Figura 57 - Percentuale cumulativa delle accettazioni per la fascia d'età 60-70 anni in funzione della dimensione dei gap e della velocità delle auto nella corrente di traffico. Fonte: ((36) Lobjois Cavallo, 2006)

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

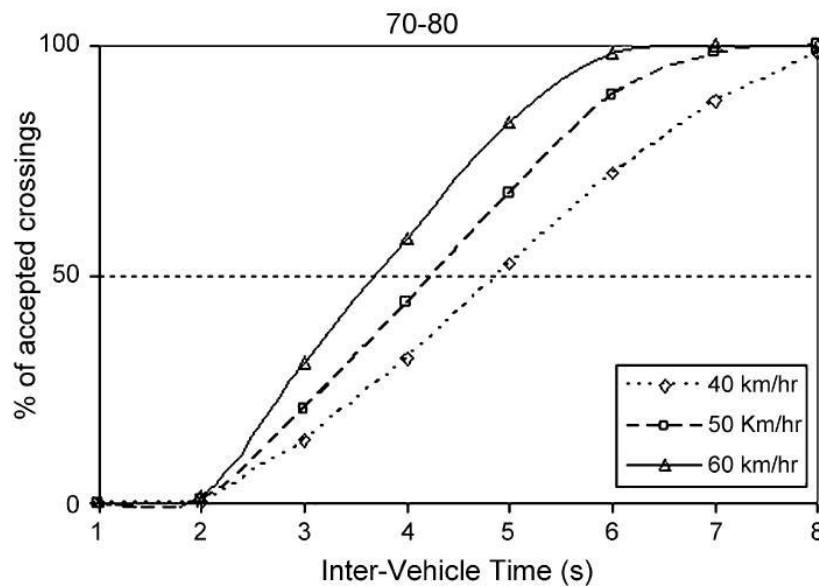


Figura 58 - Percentuale cumulativa delle accettazioni per la fascia d'età 70-80 anni in funzione della dimensione dei gap e della velocità delle auto nella corrente di traffico. Fonte: ((36) Lobjois Cavallo, 2006)

Si riporta in figura 59 la media dei gap accettati in funzione della velocità della corrente primaria, a seconda della fascia d'età dei soggetti:

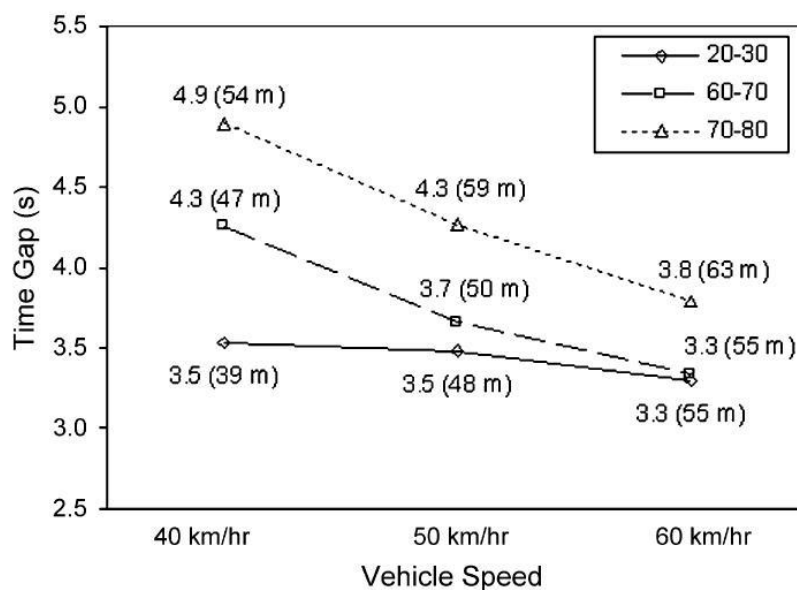


Figura 59 - Variazione del gap critico in funzione della velocità del flusso della corrente di traffico e delle fasce d'età. Fonte: ((36) Lobjois Cavallo, 2006)

Si nota come nelle fasce d'età 60-70 e 70-80 i soggetti accettino gap temporali minori all'aumentare della velocità, compiendo quindi scelte rischiose e non sicure. Le decisioni dei giovani non sono invece influenzate dalla velocità della corrente primaria.

In generale gli anziani selezionano gap temporali maggiori rispetto ai giovani, in modo da compensare la lenta velocità della camminata con il lungo attraversamento stradale.

3.5 ANALISI SPERIMENTALE IN AMBIENTE VIRTUALE

L'esperimento al simulatore di guida ha coinvolto un totale di 47 soggetti (i soggetti testati sarebbero stati 51 ma 4 non hanno portato a termine la prova e i dati raccolti da questi ultimi non sono stati presi in considerazione per l'elaborazione dei risultati). Ricordando che ogni soggetto portava a compimento la prova dopo 7 giri del percorso virtuale, ed in ogni giro si era tenuti ad affrontare 4 rotatorie, si precisa che:

- 24 soggetti sono stati testati nel percorso in cui le rotatorie, per ogni giro effettuato, erano ordinate con la sequenza degli headway della corrente di conflitto Progressiva-Random-Progressiva-Random (P-R-P-R) (esperimenti condotti in questo lavoro di tesi);
- I rimanenti 23 soggetti testati in precedenza dal collega Marco Roncada sono stati testati con le rotatorie ordinate con la seguente sequenza degli haedway della corrente di conflitto: Random-Progressiva-Random-Progressiva (R-P-R-P).

I 23 esperimenti compiuti nel precedente lavoro sono stati eseguiti in un arco temporale compreso tra il 31/03/2014 ed il 05/06/2014, mentre i 24 esperimenti compiuti per questo lavoro di tesi sono stati eseguiti tra il 17/12/2014 ed il 22/12/2014.

I dati di output delle 47 prove al simulatore di guida sono stati poi aggregati per avere un campionamento maggiore e più affidabile.

Si riportano di seguito le caratteristiche principali dei soggetti e delle prove:

- Soggetti testati: 47
- Genere: 35 Maschi, 12 Femmine
- Età media: 26 anni (minimo 22 anni, massimo 54 anni)
- Professione: 44 studenti, 2 lavoratori dipendenti, 1 lavoratore autonomo
- Tipo patente: 47 soggetti con patente B
- Patente conseguita: mediamente da 7,5 anni (minimo 1 anno, massimo 35 anni)
- Km annui percorsi: mediamente 9.563 Km/anno
con 27 soggetti che percorrono meno di 10.000 Km/anno
e 20 soggetti che percorrono più di 10.000 Km/anno
- Ora del test: 24 soggetti testati il mattino (prima delle 12:30, a partire dalle 09:00), 23 soggetti testati il pomeriggio (dopo le 12:30, fino alle 16:30)

Per tutti i soggetti si è posta particolare attenzione nel proporre la procedura di esecuzione del test allo stesso modo e cercando di mantenere specifiche caratteristiche dell'ambiente in cui era posto il simulatore di guida.

Precisamente si sono tenute le seguenti condizioni:

- Temperatura interna della stanza: 20 °C;
- Ambiente oscurato;
- Luminosità dei display al plasma impostata a 4 lux;

- Medesime condizioni acustiche intese come stesso numero di altoparlanti accesi e volume impostato alla stessa intensità per ogni prova;
- Medesime condizioni ambientali all'interno dello scenario virtuale (condizioni meteo serene).

Ad ogni soggetto sono stati chiesti i dati anagrafici e posti 2 questionari, non inerenti questo lavoro di tesi, ma da cui è possibile ricavare informazioni utili per un futuro:

- Il primo questionario riguarda delle domande a cui rispondere con un livello di gradimento che va da 1 (per nulla) a 6 (decisamente). Le domande interessano alcuni aspetti del comportamento di guida abituale del soggetto da cui è possibile stimare un valore di aggressività del conducente.
- Il secondo questionario riguarda lo stato psico-fisico del soggetto prima e dopo l'esperimento al simulatore di guida. Vengono posti anche in questo caso dei livelli in cui il soggetto può identificarsi per determinati sintomi, come per esempio: mal di testa, nausea, affaticamento agli occhi, stanchezza, sonnolenza. Da questo questionario si potranno ricavare i sintomi generali che provocano gli esperimenti al simulatore di guida ai soggetti testati.

Successivamente il tester viene istruito sui vari comandi presenti nel simulatore di guida, viene fatto accomodare nell'abitacolo e gli si sottopone uno scenario di prova all'interno del quale può prendere confidenza con il mezzo e con lo scenario virtuale. Il training dura qualche minuto e alla fine di questo si passa all'esperimento oggetto della Tesi.

Al tester vengono fornite le seguenti istruzioni:

- Cercare di guidare con naturalezza, come si stesse affrontando una situazione reale, e rispettando il codice della strada;
- Eseguire la manovra di attraversamento per ogni rotatoria che si affronterà (ovvero una volta all'interno dell'anello circolatorio imboccare la seconda uscita);
- Terminare la prova solamente quando verranno fornite istruzioni al riguardo (verranno fatti percorrere 7 giri).

Ogni soggetto ha affrontato quindi un totale di 28 rotatorie, 14 delle quali con una sequenza di arrivi veicolari random (R) e 14 con la sequenza progressiva (P).

Si presentano delle immagini relative ad una prova al simulatore di guida, nel caso specifico in cui si affronta una corrente di conflitto con distribuzione progressiva (P), proposta in varie fasi di guida: avvicinamento alla rotatoria, fase di decelerazione, selezione del gap per l'immissione ed uscita dall'anello circolatorio.



Figura 60 - Istantanea dell'esperimento al simulatore di guida. Fase di avvicinamento alla rotatoria



Figura 61 - Istantanea dell'esperimento al simulatore di guida. Fase di decelerazione



Figura 62 - Istantanea dell'esperimento al simulatore di guida. Fase di selezione del gap ottimale della corrente di traffico nell'anello circolatorio per eseguire la manovra di attraversamento in sicurezza



Figura 63 - Istantanea dell'esperimento al simulatore di guida. Fase di uscita in accelerazione dalla rotatoria

A prova terminata il file di output elaborato dal software descrive i dati relativi al main target. In funzione dell'istante temporale all'interno dello scenario virtuale (time) viene proposta:

- La posizione intesa come identificativo del path ("pathnum");
- La distanza dall'inizio e dalla fine del path in questione ("dfrint" - distance from intersection- e "dtoint" – distance to intersection);
- La posizione in coordinate x ed y all'interno dello scenario virtuale ("xpos" ed "ypos");
- La velocità e l'accelerazione ("velocity" ed "acc");
- Altri dati riguardanti la pressione di freno, acceleratore, frizione.

Questo file però non produce nessuna informazione riguardo ai passaggi veicolari degli agent, e quindi nemmeno riguardo alle distribuzioni degli headway, perciò non sarebbe possibile ricavare elementi utili per l'analisi del comportamento di gap acceptance.

E' necessario un secondo file nel quale siano visibili le sequenze dei gap della corrente di conflitto. Questo file verrà poi elaborato per distinguere i gap rifiutati e quelli accettati dal main target e per stimare il valore del gap critico con i vari metodi proposti in letteratura.

Il file di output contenente le informazioni dei passaggi veicolari sulle quattro rotatorie facenti parte del percorso, utilizza le "spire" per registrare, in funzione dell'istante temporale, il passaggio dei veicoli per quel determinato punto. Il file di testo prodotto dalla simulazione si presenta nella seguente forma:

Nr	18	Istante	95.151	Tipo	13	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	-2	Istante	95.477	Tipo	0	Vel	5.130	IdRot	101
Nr	19	Istante	96.753	Tipo	9	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	20	Istante	98.555	Tipo	2	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	21	Istante	100.559	Tipo	4	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	1	Istante	102.761	Tipo	13	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	2	Istante	105.164	Tipo	8	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	3	Istante	107.766	Tipo	7	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	4	Istante	110.567	Tipo	11	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	5	Istante	113.570	Tipo	5	Vel	8.000	IdRot	111
Nr	-2	Istante	114.681	Tipo	0	Vel	6.474	IdRot	111
Nr	6	Istante	116.773	Tipo	6	Vel	8.000	IdRot	111

Si spiegano le denominazioni del file sopra esposto:

- Nr : identifica i veicoli come agent (numeri interi positivi) o come main target (attraverso il numero negativo -2);
- Istante : identifica l'istante di passaggio sopra una determinata spira;

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

- Tipo : definisce il modello del veicolo che passa sopra le spire. Per rendere quanto più verosimile il traffico veicolare sono state introdotte varie tipologie di modelli veicolari;
- Vel : identifica la velocità di passaggio di un veicolo nell'istante in cui si trova sopra la spira (velocità espressa in m/s);
- IdRot : esprime l'identificativo della spira sopra il quale si trova il veicolo (agent o main target). Nell' esempio sopra riportato ci troviamo nella prima rotatoria in quanto gli identificativi sono 111 e 101.

Nel caso della prima rotatoria, dal momento in cui il main target arriva alla spira 101, si iniziano a registrare tutti i gap rifiutati fino all'accettazione che avviene quando il main target (Nr=-2) passa sopra la spira 111. Il gap accettato sarà dato dalla differenza tra l'istante di passaggio dell' agent successivo e dell' agent precedente all'istante di passaggio del main target.

3.6 DEFINIZIONE DELLE CATEGORIE DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DEL GAP CRITICO

Prima di procedere con la stima del gap critico è necessario specificare i gruppi per i quali si intende fare un confronto. Applicare i metodi all'intero set di dati (output del test al simulatore di guida) non avrebbe senso, in quanto si avrebbe una stima del gap critico dell'insieme delle rotatorie in cui gli headway della corrente di conflitto si presentano in modo casuale (R) (come nella realtà) e delle rotatorie in cui è stata impostata una corrente di conflitto con headway con sequenza progressiva crescente (P). Dividendo invece gli output proposti dalle prove al simulatore di guida in specifici sottogruppi sarà possibile stimare il gap critico delle famiglie desiderate inserendo i valori del massimo gap rifiutato (o della sequenza di gap rifiutati, a seconda del metodo di stima utilizzato) e del gap accettato in ogni rotatoria.

I primi raggruppamenti scelti hanno quindi riguardato la tipologia di distribuzione degli headway della corrente di conflitto al main target in approccio alla rotatoria. I raggruppamenti sono eseguiti con l'obiettivo di determinare la media del gap critico utilizzando un preciso metodo di stima (faremo qui riferimento al metodo della massima verosimiglianza, utilizzato come metodo "principale" per la stima del t_c). Come già detto precedentemente infatti è necessario validare le prove al simulatore di guida confrontando la media del gap critico del campione che ha effettuato il test, con la media stimata per il caso reale, ed è per questo motivo che la valutazione di questo raggruppamento di decisioni della distribuzione random è la più importante.

In questi primi due raggruppamenti (R e P) si è fatta un'ulteriore distinzione tra due casi, per cercare di calcolare la media nel modo più affidabile possibile:

CASO 1 : Si è deciso di raggruppare ogni decisione, dove per decisione si intende l'accoppiamento del massimo gap rifiutato e del gap accettato (come detto prima stiamo considerando il metodo di stima della massima verosimiglianza), compiuta da ogni soggetto per ogni rotatoria. Si avranno quindi 14 decisioni (sia nel caso Random che in quello progressivo) per ognuno dei 47 soggetti, raggruppate tutte assieme, per un totale di 658 decisioni (a cui però andranno tolte le incoerenze, cioè quei casi in cui un soggetto accetta un gap minore di un gap rifiutato precedentemente nella stessa sequenza di headway). Da queste 658 decisioni si calcolerà la media e la varianza del gap critico.

Il problema che sorge però con questo tipo di raggruppamento consiste nella presenza di dati longitudinali. I dati longitudinali sono un caso particolare di misure ripetute in cui le variabili d'interesse sono state misurate per ogni soggetto in diversi istanti di tempo successivi. La presenza di numerose osservazioni per ogni soggetto nei dati di tipo longitudinale permette di ottenere delle informazioni riguardanti le variazioni delle quantità di interesse al passare del tempo per lo stesso soggetto. L'obiettivo primario di questa tesi non è però quello di osservare come vari la risposta dei conducenti al simulatore di guida in funzione del tempo o delle rotatorie percorse in precedenza, bensì è quello di determinare un valore univoco del gap critico che non sia condizionato dalla dipendenza che esiste tra le osservazioni relative allo stesso soggetto. Per questo motivo si è pensato al successivo approccio.

CASO 2 : Per evitare la presenza di dati di tipo longitudinale si è pensato di determinare la media del gap critico per ogni soggetto ed eseguire successivamente una media delle medie per ricavare un valore univoco. Infatti per analizzare dati relativi a misure ripetute è necessario ottenere una statistica univariata per soggetto che contenga le informazioni di interesse e in seguito analizzare tale variabile. Questo metodo non tiene conto della correlazione dei dati appartenenti allo stesso soggetto. Il gap critico di ogni soggetto sarà stimato quindi come media (ottenuta col metodo della massima verosimiglianza) di 14 decisioni (relative alle 14 rotatorie random o alle 14 rotatorie progressive). Il difetto che potrebbe sussistere in questo approccio è che il metodo della massima verosimiglianza avrebbe bisogno di un elevato numero di dati per essere affidabile, e nel caso di scelte incoerenti da parte di un soggetto, le decisioni potrebbero essere anche minori delle 14 previste.

Si vuole precisare che il CASO 2 non vuole screditare a priori i risultati che si otterranno nel CASO 1, anzi si eseguirà un confronto tra i due approcci per osservare come possa variare la media del gap critico.

Si presenta una visuale schematica dei due casi all'interno dei raggruppamenti con distribuzione degli headway Random e Progressiva:

Tabella 7 - Rappresentazione della suddivisione eseguita per distribuzione random e progressiva degli headway.

DISTRIBUZIONE DEGLI HEADWAY	
RANDOM	PROGRESSIVA
CASO 1 : Media del t_c dalla aggregazione delle decisioni di tutti i soggetti	CASO 1 : Media del t_c dalla aggregazione delle decisioni di tutti i soggetti
CASO 2 : Media delle medie dei t_c relativi alle decisioni di ogni singolo soggetto	CASO 2 : Media delle medie dei t_c relativi alle decisioni di ogni singolo soggetto

Il gap critico sarà calcolato e distinto per quei gap rifiutati e accettati in cui la distribuzione degli arrivi veicolari è casuale (R) e per quella in cui gli arrivi seguono una sequenza crescente progressiva (P). Questa distinzione viene eseguita ed è fondamentale per due motivi:

- 1- E' necessario confrontare le stime del gap critico della distribuzione random dei dati ricavati dalle prove al simulatore di guida con quelle dei dati derivanti dai rilievi di traffico eseguiti per la rotatoria di Mirano. Solamente con un esito positivo del confronto sarà possibile considerare veritieri i dati ricavati dalle prove al simulatore di guida;
- 2- L'obiettivo dello studio è quello di osservare come una diversa distribuzione degli arrivi veicolari possa avere effetti sul valore di stima del gap critico. Per questo studio si

selezioneranno quindi le rotatorie con sequenza di arrivi veicolari progressivi (P) e si confronteranno poi con quelle con sequenza random (R).

I successivi sotto-raggruppamenti verranno fatti all'interno di queste due grandi famiglie appena descritte (distribuzione degli headway random (R) e progressivi (P)).

Uno dei vantaggi offerti dall'utilizzo del simulatore di guida rispetto ai rilievi su campo è quello di poter osservare come determinati parametri non misurabili in rilievi di traffico reali possano influire sullo stile di guida o sul comportamento del guidatore. Alcuni fattori come le caratteristiche socio-economiche dei guidatori, l'età e l'esperienza di guida possono essere presi in causa per raffrontare il gap critico di diverse famiglie della popolazione. In questo lavoro di tesi si sono confrontate le seguenti categorie:

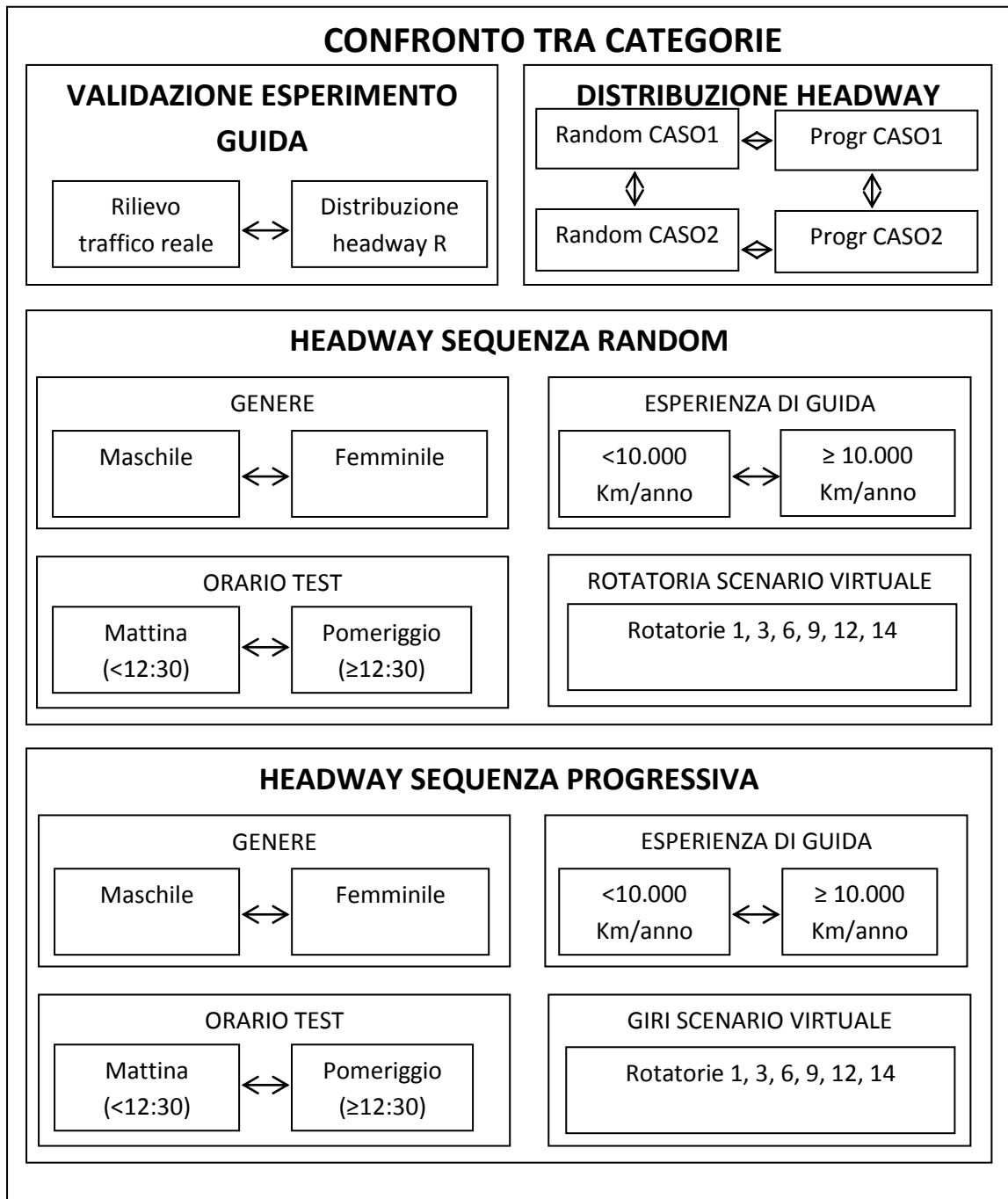
- Genere : Maschile/Femminile
- Esperienza nella guida : meno di 10.000 Km/anno percorsi ; più ($\geq$) di 10.000 Km/anno percorsi
- Orario del test al simulatore di guida : mattino (<12:30) / pomeriggio ($\geq$ 12:30)
Si è scelta questa categoria per valutare se l'orario di guida all'interno della giornata possa influenzare il comportamento di gap acceptance dei soggetti testati.
- Rotatoria all' interno del percorso dello scenario virtuale.

Si è scelta questa categoria in quanto si è notato che nonostante tutti i soggetti abbiano effettuato un training per prendere confidenza con il simulatore, i primi giri della prova sono stati effettuati con una prudenza maggiore rispetto ai giri successivi. Inoltre come prima accennato, questo è un esempio di dati longitudinali, cioè misure ripetute nel tempo da parte di uno stesso soggetto, ed è quindi interessante osservare come il trend di scelta del gap vari nel tempo.

Si vuole quindi esaminare come la poca familiarità nelle prime rotatorie o l'aumento di confidenza con il mezzo all'aumentare del numero di giri possa influire sulla stima della media del gap critico. Si raggrupperanno le decisioni prese da tutti i soggetti in funzione della rotatoria percorsa, avendo quindi 14 rotatorie all'interno delle quali si avranno 47 decisioni (relative ai 47 soggetti). Si sceglieranno infine delle rotatorie rappresentative per limitare il numero di confronti. Nel prossimo capitolo si entrerà nel dettaglio, ma il motivo che spinge a selezionare solamente alcune rotatorie è che minore è il numero di confronti eseguiti tra le medie del gap critico delle rotatorie e maggiore sarà la bontà dei risultati ottenuti tramite i test statistici. Nello specifico le rotatorie esaminate, sia per il caso Random che per quello Progressivo saranno la numero: 1, 3, 6, 9, 12, 14. Si è optato per queste rotatorie in modo da avere un campionamento abbastanza elevato rispetto al totale (6 rotatorie su 14) e un intervallo abbastanza regolare tra le stesse.

Nella tabella seguente si vuole schematizzare quanto esposto finora, evidenziando le categorie di confronto, racchiuse all'interno dello stesso rettangolo:

Tabella 8 - Rappresentazione delle famiglie in cui si è suddiviso l' intero campionamento. Per ogni famiglia si stimerà il comportamento di gap acceptance, in particolare con il calcolo della media e della varianza del gap critico. Le frecce indicano tra quali gruppi verrà eseguito il confronto statistico per determinare se esistano differenze significative.



3.7 ELABORAZIONE DEI DATI

Per poter eseguire una corretta elaborazione dei file di output della simulazione di guida, si sono raggruppati tramite una Query di accodamento (operazione resa possibile dal programma Microsoft Access) i file di tutti i soggetti testati.

Come descritto in precedenza il file di output di ogni test propone i seguenti dati:

- Identificativo del veicolo
- Istante di passaggio
- Tipo veicolo
- Velocità
- Identificativo della Spira in funzione della rotatoria affrontata

Con questi dati però non si riesce a stimare in modo compiuto il gap critico per le categorie obiettivo di studio. E' necessario introdurre per ogni rotatoria affrontata per ogni soggetto:

- Il massimo gap rifiutato ed il gap accettato (utili per sviluppare il metodo della massima verosimiglianza – MLM)
- La sequenza di gap rifiutati ed il gap accettato (utili per il metodo Logit, Probit ed il metodo della probabilità di equilibrio)

Per poter confrontare i vari sottogruppi scelti per lo studio è necessario creare una database nel quale inserire dei campi appropriati. Dopo aver intervistato i soggetti che dovevano effettuare il test e aver registrato i loro dati anagrafici e i dati relativi all'utilizzo del loro mezzo in un apposito database chiamato "Anagrafica", con l'operazione Join, in Microsoft Access, è stato possibile collegare i dati di ogni soggetto con le relative prove effettuate al simulatore di guida.

Ogni evento (per evento si intende la scelta compiuta dal soggetto di fronte ad un gap; per ogni gap affrontato infatti il conducente deve prendere una decisione: rifiutarlo ed aspettare un gap di dimensioni maggiori, che ritiene più conveniente accettare in termini di sicurezza, o accettarlo ed immettersi nell'anello circolatorio) sarà quindi descritto da una serie di campi che lo definiscono univocamente. Si riporta come esempio informativo uno specchietto dei campi utilizzati per poter sviluppare il metodo della massima verosimiglianza e il metodo Logit.

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

Scenario_Tes	ID_tester	ID_prova	ID_prova_sub	MaxRifiutato	Accettato	nodo	Ora_Test	Sesso	Km annu	sequenza
16	159	1112	3	3.756999999999995	4.001000000000009	444	10:55	M	5000	random
16	159	1112	4	2.701000000000002	3.562999999999987	444	10:55	M	5000	random
16	159	1112	5	3.740000000000001	4.004000000000013	444	10:55	M	5000	random
16	159	1112	6	2.008000000000004	4.001999999999995	444	10:55	M	5000	random
16	159	1112	7	2.321000000000014	4.004000000000013	444	10:55	M	5000	random
16	162	1097	1	3.001	3.202999999999999	111	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	2	2.601999999999998	2.804000000000003	111	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	3	2.601	2.803999999999997	111	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	4	2.403000000000002	2.601999999999998	111	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	5	2.201000000000002	2.403000000000002	111	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	6	2.202999999999997	2.402000000000004	111	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	7	1.802999999999988	2.001000000000002	111	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	1	4.002000000000001	4.003999999999999	222	13:45	F	3000	random
16	162	1097	2	2.461999999999999	3.616000000000004	222	13:45	F	3000	random
16	162	1097	3	1.712999999999997	4.003000000000004	222	13:45	F	3000	random
16	162	1097	4	2.578999999999995	4.001999999999995	222	13:45	F	3000	random
16	162	1097	5	2.742999999999994	4.002999999999993	222	13:45	F	3000	random
16	162	1097	6	1.828999999999995	4.001999999999995	222	13:45	F	3000	random
16	162	1097	1	2.604000000000001	2.801999999999999	333	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	2	2.402000000000004	2.602999999999995	333	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	3	2.201000000000002	2.404	333	13:45	F	3000	progressivo
16	162	1097	4	2.201000000000002	2.403000000000002	333	13:45	F	3000	progressivo

Figura 64 - Si osservano i campi necessari all'implementazione del metodo della massima verosimiglianza per la stima del Gap Critico. Applicando un opportuno filtro a specifiche colonne è possibile studiare il comportamento di gap acceptance di un preciso sottogruppo

Scenario	ID_tester	ID_prova	time	tipo_interval	accrifi	ID_prov	ampiezza	nodo	Ora_Tes	Sess	Km ann
16	399	1115	1534.105		1	0	7	1.461000000000001	222	13:30 M	20000
16	399	1115	1538.106		0	1	7	4.000999999999998	222	13:30 M	20000
16	400	1116	190.941		1	0	1	3.434	222	14:30 F	3000
16	400	1116	192.817		0	0	1	1.876	222	14:30 F	3000
16	400	1116	195.139		0	0	1	2.322	222	14:30 F	3000
16	400	1116	197.716		0	0	1	2.577	222	14:30 F	3000
16	400	1116	201.718		0	1	1	4.001999999999998	222	14:30 F	3000
16	400	1116	474.777		1	0	2	0.5380000000000011	222	14:30 F	3000
16	400	1116	478.78		0	1	2	4.002999999999999	222	14:30 F	3000
16	400	1116	725.15		1	0	3	0.7239999999999933	222	14:30 F	3000
16	400	1116	729.154		0	1	3	4.004000000000002	222	14:30 F	3000
16	400	1116	970.933		1	0	4	2.601	222	14:30 F	3000
16	400	1116	973.985		0	1	4	3.052000000000002	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1219.261		1	0	5	3.057999999999999	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1222.919		0	1	5	3.658000000000013	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1457.331		1	0	6	0.3409999999999895	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1459.973		0	0	6	2.642000000000005	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1462.397		0	0	6	2.423999999999998	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1463.644		0	0	6	1.247000000000007	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1466.303		0	1	6	2.659000000000011	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1700.097		1	0	7	0.2580000000000038	222	14:30 F	3000
16	400	1116	1704.101		0	1	7	4.004000000000013	222	14:30 F	3000
16	401	1119	206.513		1	0	1	0.5600000000000002	222	12:18 M	5000
16	401	1119	210.515		0	0	1	4.001999999999998	222	12:18 M	5000
16	401	1119	212.39		0	0	1	1.875	222	12:18 M	5000

Figura 65 - Campi necessari allo sviluppo del modello Logit, per la stima della media del Gap Critico

La struttura di queste tabelle permette quindi di studiare una determinata categoria (Maschi/Femmine, mattina/pomeriggio, Km annui, rotatoria affrontata) tramite la semplice imposizione di un filtro nello specifico sottogruppo in esame.

Le tabelle riportano i seguenti campi:

- Scenario: identifica con un valore numerico la tipologia di esperimento al simulatore di guida. In questo caso il valore 16 sta ad indicare il percorso composto dalle 4 rotatorie a giro e con distribuzioni random e progressive della corrente di conflitto;

- ID_tester: identificativo numerico del soggetto che compie il test al simulatore;
- ID_prova: descrive la prova identificandola con un valore numerico;
- ID_prova_sub : descrive il numero del giro all'interno del percorso per la prova in esame;
- Max_Rifiutato : descrive il massimo gap rifiutato da un soggetto per una determinata rotatoria in uno specifico giro (sec). E' presente solo nel caso di applicazione del metodo della massima verosimiglianza;
- Accettato : descrive il gap accettato dal conducente per una determinata rotatoria in uno specifico giro (sec);
- Ora_test, Sesso, Km_annui: identificano l'orario in cui è stato eseguito il test, il genere (maschile/femminile) del soggetto, e i Km percorsi mediamente in un anno dal soggetto. Queste caratteristiche sono riportate per ogni record, in quanto ogni evento è considerato unico;
- accrif : campo presente per i metodi Logit, Probit, e PEM, si riferisce alla decisione di rifiuto (0) o accettazione (1) del gap da parte del conducente.

E' interessante osservare il numero di eventi che caratterizza ogni categoria, per capire quale sia il campionamento a cui ci si riferisce ogni famiglia, per il successivo studio del gap critico, visibile nella tabella 9 a pagina seguente.

Tabella 9 – Numero di decisioni considerate relativamente all'applicazione del metodo della massima e dei metodi Logit, Probit e della Probabilità d'Equilibrio in relazione alla categoria di studio

LEGENDA R=RANDOM P=PROGRESSIVA	DECISIONI MLM (MAX RIF & ACC)	DECISIONI LOGIT, PROBIT, PEM (RIFIUTATI E ACC)	ACCETTAZIONI LOGIT, PROBIT, PEM
TOTALE (R + P)	1.208	9.463	1.301
R	557	1.948	649
P	651	7.515	652
R_M	425	1.428	485
R_F	132	520	164
P_M	486	5.770	487
P_F	165	1.745	165
R_KM<10,000	312	1.140	370
R_KM≥10,000	245	808	279
P_KM<10,000	371	4.522	371
P_KM≥10,000	280	2.993	281
R_MATTINA	298	952	335
R_POMERIGGIO	259	996	314
P_MATTINA	336	3.638	337
P_POMERIGGIO	315	3.877	315
R_ROTATORIE	47 per ogni rotatoria		
P_ROTATORIE	47 per ogni rotatoria		

Legenda:

- Tc : gap critico (secondi);
- R : headway della corrente di conflitto con sequenza random (R);
- P : headway della corrente di conflitto con sequenza progressiva crescente (P);
- M : soggetti di genere maschile;
- F : soggetti di genere femminile;
- KM<10,000 : soggetti che percorrono in media meno di 10,000 Km/anno;
- KM> 10,000: soggetti che percorrono in media più (≥) di 10,000 Km/anno ;
- MATTINA : test al simulatore di guida effettuato prima delle 12:30;
- POMERIGGIO : test al simulatore di guida effettuato dopo le 12:30 (compreso);
- ROTATORIE : valutazione del gap critico in funzione della rotatoria percorsa. Viene stimata la media del gap critico di ogni singola rotatoria, calcolata con il metodo della massima verosimiglianza, data dall'aggregazione delle decisioni di ognuno dei 47 soggetti per la specifica rotatoria.

4 CAPITOLO 4 - DETERMINAZIONE DEL GAP CRITICO

Dopo aver organizzato ed ordinato i dati di output derivanti dalle prove al simulatore di guida in specifici raggruppamenti è necessario determinare i valori di media e varianza del gap critico di ogni famiglia di studio. Solo in questo modo si potrà procedere alla validazione dei dati degli esperimenti e al confronto tra le diverse categorie.

A seguito delle considerazioni espresse nel Capitolo 2 riguardanti le descrizioni dei vari metodi di stima del gap critico t_c e l'attendibilità e la bontà dei risultati delle stime, per questo lavoro di tesi si è scelto di utilizzare i seguenti metodi:

- Metodo della massima verosimiglianza (MLM – Maximum Likelihood Method);
- Metodo Logit;
- Metodo Probit;
- Metodo della Probabilità di equilibrio o Metodo di Wu (PEM – Probability Equilibrium Method).

Si vuole spiegare come si è proceduto nell'applicare i vari metodi di stima, e si esporranno poi le stime del gap critico ottenute.

4.1 METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA

Il metodo della massima verosimiglianza è stato sviluppato con l'ausilio del software Aptech Gauss®, messo a disposizione dal Dipartimento ICEA (Ingegneria Civile, Edile, Ambientale).

Come spiegato nel capitolo 1 i dati necessari allo sviluppo del metodo sono il massimo gap rifiutato ed il gap accettato da ogni soggetto per ogni rotatoria affrontata, per i quali si ammette una distribuzione lognormale.

Assumendo che i gap critici dei conducenti abbiano una distribuzione lognormale con media μ e varianza σ^2 il software Gauss permette di massimizzare la funzione di massima verosimiglianza L sviluppando contemporaneamente le sue derivate:

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \sigma^2} = 0$$

I risultati producono valori del logaritmo naturale di μ e σ^2 , che trasformeremo in media $E(t_c)$ e varianza $Var(t_c)$ tramite le seguenti formule:

$$E(t_c) = e^{\mu + 0,5\sigma^2}$$

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

I risultati prodotti dallo sviluppo del metodo della massima verosimiglianza vengono riportati nella seguente tabella:

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

Tabella 10 - Decisioni, media e varianza del gap critico stimati con il metodo della massima verosimiglianza in funzione della categoria di studio

MLM	decisioni	media gap critico (s)	varianza gap critico
Tc_reali	810	3,360	0,540
Tc_rnd (CASO 1)	556	3,315	0,224
Tc_rnd (CASO 2)	44	3,379	0,114
Tc_progr (CASO 1)	651	2,376	0,215
Tc_progr (CASO 2)	47	2,377	0,111
Tc_rnd_M	424	3,301	0,239
Tc_rnd_F	132	3,352	0,182
Tc_progr_M	486	2,394	0,239
Tc_progr_F	165	2,324	0,146
Tc_rnd_Km<	244	3,323	0,240
Tc_rnd_Km>	312	3,309	0,211
Tc_progr_Km<	280	2,347	0,273
Tc_progr_Km>	371	2,398	0,166
Tc_rnd_mattina	298	3,270	0,238
Tc_rnd_pome	258	3,374	0,202
Tc_progr_mattina	336	2,299	0,185
Tc_progr_pome	315	2,459	0,234
Tc_rnd_rotatorie	14	3,389	0,048
Tc_progr_rotatorie	14	2,377	0,111

Legenda:

- Tc : media del gap critico (secondi) ricavata con il metodo della massima verosimiglianza. Per ogni voce verrà stimata la media del gap critico seguita dall'identificativo della famiglia di studio;
- reali : rilievo di traffico reale eseguito sul campo;
- rnd: headway della corrente di conflitto con sequenza random (R);
- progr : headway della corrente di conflitto con sequenza progressiva crescente (P);
- M : soggetti di genere maschile;
- F : soggetti di genere femminile;
- Km< : soggetti che percorrono in media meno di 10,000 Km/anno;
- Km> : soggetti che percorrono in media più ($\geq$) di 10,000 Km/anno ;
- mattina : test al simulatore di guida effettuato prima delle 12:30;
- pome : test al simulatore di guida effettuato dopo le 12:30 (compreso);
- rotatorie : Viene dapprima stimata la media del gap critico per ogni rotatoria, calcolata con il MLM, aggregando la decisione (massimo gap rifiutato e gap accettato) di ognuno dei 47 soggetti in funzione della rotatoria percorsa. Successivamente si esegue la media delle medie delle 14 rotatorie.

Il confronto tra le diverse categorie e le considerazioni in merito ai risultati ottenuti verranno affrontate di seguito.

4.2 METODO LOGIT

Il metodo Logit calcola il gap critico t_c ponendo $p_i(t)$ (la probabilità che un conducente nella situazione d accetti un gap di dimensione t) come una funzione di densità per la variabile casuale T . Il gap critico è definito come la mediana della variabile casuale T , cioè come il gap per il quale la probabilità di accettazione è uguale al 50%:

$$\int_0^{t_c} p_i(t) dt = 0,5$$

Per risolvere il modello si deve determinare la funzione di log-verosimiglianza:

$$L(\alpha, \beta) = \sum_{d=1}^n \left[\ln \left(\frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta t_d}} \right) \right]$$

I parametri α e β , sono le incognite del nostro problema. Per ricavarli si è utilizzato il programma Biogeme, il quale produce stime di modelli di scelta discreti e permette di valutare anche i parametri del modello Probit.

Nella guida di ((37) Bierlaire, 2009) sono spiegate in maniera esaustiva le componenti e le funzionalità del programma. Si riassumono i passaggi necessari allo sviluppo del modello :

- Trascrizione di un file dati (estensione .dat) contenente nella prima riga le etichette corrispondenti ai dati disponibili, e nelle successive righe valori numerici, nel quale ogni valore corrisponde ad un'osservazione.
- Trascrizione di un file in cui sia descritto il modello di specificazione (estensione .mod), Il file deve essere organizzato in varie sezioni, di cui si riportano le cinque che devono essere sempre presenti (le altre sono opzionali):
 1. Sezione Choice : sezione nella quale viene descritta la variabile dipendente che può essere trovata nel file. In questa sezione, come nelle successive, è necessario un corretto utilizzo della sintassi;
 2. Sezione Beta : sezione nella quale vengono descritti i coefficienti che devono essere stimati. La prima colonna contiene il nome dei coefficienti, la seconda un valore di default, la terza e la quarta i limiti inferiore e superiore del coefficiente, l'ultima indica se il coefficiente deve essere stimato (0) o se deve mantenere il valore di default (1);
 3. Sezione Utilities : Sezione nella quale la funzione di utilità viene specificata. La sezione è composta da più colonne ognuna delle quali ha un determinato compito:
la prima colonna descrive l'identificativo dell'alternativa, la seconda il nome dell'alternativa, la terza la condizione di disponibilità dell'alternativa, l'ultima descrive funzione di utilità in tutti i suoi coefficienti;
 4. Sezione Expressions : descrive come calcolare gli attributi non direttamente disponibile nel file dati;
 5. Sezione Model : descrive quale modello utilizzare per eseguire la stima dei dati.

Si riporta un esempio del file contenente il modello di specificazione (.mod) utilizzato per la stima del gap critico:

```
// Determinazione del gap critico con il modello Logit, 28/12/2014

[DataFile]

$COLUMNS = 3

[Choice]

choice

[Beta]

// Name Value LowerBound UpperBound status (0=variable, 1=fixed)

ALFA1      0.0      -100.0   100.0     1

ALFA2      0.0      -100.0   100.0     0

BETA_COST  0.0      -100.0   100.0     0

[Utilities]

// Id Name Avail linear-in-parameter expression (beta1*x1 + beta2*x2 + ... )

0  rif one  ALFA1 * one

1  acc one  ALFA2 * one + BETA_COST * Ln_gap

[Expressions]

// Define here arithmetic expressions for name that are not directly available from the data

one =1

[Model]

// Currently, only $MNL (multinomial logit), $NL (nested logit), $CNL (cross-nested logit) and

// $NGEV (Network GEV model) are valid keywords

$MNL
```

Il file dati deve presentare invece le seguenti colonne:

- Id : identificativo della decisione relativo al modello Logit;
- choice : identifica la scelta compiuta in ogni decisione. Con il valore numerico 0 si rappresentano i rifiuti, con il valore 1 le accettazioni del gap;
- Ln_gap : rappresenta il logaritmo naturale del gap accettato o rifiutato.

Una volta lanciato il programma, il file di output restituisce i valori di α , β , della deviazione standard e del t-test,

Eseguendo il rapporto di α su β si troverà il logaritmo naturale del gap critico t_c . Si calcola l'esponenziale del valore appena trovato e si determina così il valore in secondi del gap critico. Come verifica della correttezza dei valori trovati è possibile inserire α, β e il logaritmo naturale del gap critico all'interno della seguente formula:

$$\left(\frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta t_d}} \right) = 0,5$$

Se il risultato ottenuto è uguale a 0,5 allora la verifica è soddisfatta.

Si riporta di seguito la tabella contenente le stime delle varie categorie ottenute con il metodo Logit:

Tabella 11 - Decisioni, accettazioni, media e varianza del gap critico stimati con il metodo Logit

LOGIT	decisioni	accettazioni	media gap critico (s)	varianza
Tc_rnd (CASO 1)	1.948	649	3,40	0,50
Tc_progr (CASO 1)	7.515	652	2,98	0,40
Tc_rnd_M	1.428	485	3,35	0,49
Tc_rnd_F	520	164	3,52	0,52
Tc_progr_M	5.770	487	3,06	0,42
Tc_progr_F	1.745	165	2,72	0,33
Tc_rnd_Km<	1.140	370	3,45	0,51
Tc_rnd_Km>	808	279	3,34	0,49
Tc_progr_Km<	4.522	371	2,84	0,36
Tc_progr_Km>	2.993	281	3,17	0,44
Tc_rnd_mattina	952	335	3,31	0,48
Tc_rnd_pome	996	314	3,49	0,52
Tc_progr_mattina	3.638	337	2,8	0,35
Tc_progr_pome	3.877	315	3,08	0,42

Legenda:

- Tc : media del gap critico (secondi) ricavata con il metodo della massima verosimiglianza. Per ogni voce verrà stimata la media del gap critico seguita dall'identificativo della famiglia di studio;
- reali : rilievo di traffico reale eseguito sul campo;
- rnd: headway della corrente di conflitto con sequenza random (R);
- progr : headway della corrente di conflitto con sequenza progressiva crescente (P);
- M : soggetti di genere maschile;
- F : soggetti di genere femminile;
- Km< : soggetti che percorrono in media meno di 10,000 Km/anno;
- Km> : soggetti che percorrono in media più ($\geq$) di 10,000 Km/anno ;
- mattina : test al simulatore di guida effettuato prima delle 12:30;
- pome : test al simulatore di guida effettuato dopo le 12:30 (compreso);

4.3 METODO PROBIT

La probabilità di accettazione di un gap secondo il modello Probit è data dalla seguente equazione:

$$P_{i1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(V_{i1}-V_{i0})/\sigma} \exp(-0,5u^2) du$$

che può essere riscritta nella seguente forma:

$$P_{i1} = \Phi \left[\frac{(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}{\sigma} \right]$$

Dove:

Φ : distribuzione normale cumulativa standard

α, β_i : incognite del nostro problema

Anche in questo caso, come nel metodo Logit, sono stati utilizzati due parametri, α e β , per la determinazione della probabilità di accettazione del gap e sempre tramite il programma Biogeme si sono calcolati α e β , da cui è possibile ricavare il gap critico t_c .

Un'alternativa è data dall'utilizzo del software di calcolo Matlab, Ricavati i parametri α e β questo software permette di calcolare l'area sottesa dall'integrale il cui valore corrisponde a 0,5.

Si riportano di seguito le stime del gap critico determinate con il metodo Probit.

Tabella 12 - Decisioni, accettazioni, media e varianza del gap critico stimati con il metodo Probit

PROBIT	nr decisioni	accettazioni	media gap critico (s)	varianza
Tc_rnd (CASO 1)	1.948	649	3,38	0,50
Tc_progr (CASO 1)	7.515	652	3,02	0,40
Tc_rnd_M	1.428	485	3,32	0,49
Tc_rnd_F	520	164	3,51	0,52
Tc_progr_M	5.770	487	3,12	0,42
Tc_progr_F	1.745	165	2,75	0,33
Tc_rnd_Km<	1.140	370	3,43	0,51
Tc_rnd_Km>	808	279	3,3	0,49
Tc_progr_Km<	4.522	371	2,87	0,36
Tc_progr_Km>	2.993	281	3,25	0,44
Tc_rnd_mattina	952	335	3,28	0,48
Tc_rnd_pome	996	314	3,48	0,52
Tc_progr_mattina	3.638	337	2,85	0,35
Tc_progr_pome	3.877	315	3,14	0,42

Le denominazioni della tabella 13 sono le stesse riportate sia per la rappresentazione del metodo della massima verosimiglianza che del modello Logit.

4.4 METODO DELLA PROBABILITA' DI EQUILIBRIO (METODO DI WU)

Questo metodo è stato implementato grazie ad un foglio di calcolo (Excel) nel quale si è inserita la sequenza di gap rifiutati ed il gap accettato da ogni soggetto per ogni rotatoria e si è poi seguita la procedura esposta nel capitolo 1 di questo lavoro di Tesi. Si riportano i valori del gap critico delle categorie in cui si è suddiviso lo studio:

Tabella 13 - Decisioni, accettazioni, media e varianza del gap critico stimati con il Metodo di Wu

PEM (WU)	decisioni	accettazioni	media gap critico (s)	varianza
Tc_rnd	1.948	649	3,36	2,93
Tc_progr	7.515	652	2,09	1,09
Tc_rnd_M	1.428	485	3,33	3,08
Tc_rnd_F	520	164	3,44	2,51
Tc_progr_M	5.770	487	2,09	1,22
Tc_progr_F	1.745	165	2,09	0,66
Tc_rnd_Km<	1.140	370	3,43	1,05
Tc_rnd_Km>	808	279	3,30	3,21
Tc_progr_Km<	4.522	371	2,12	0,31
Tc_progr_Km>	2.993	281	2,06	1,43
Tc_rnd_mattina	952	335	3,29	3,00
Tc_rnd_pome	996	314	3,44	2,77
Tc_progr_mattina	3.638	337	2,03	0,96
Tc_progr_pome	3.877	315	2,15	1,16

4.5 TABELLA RIASSUNTIVA

Si riassumono nella tabella 15 la media e la varianza del gap critico t_c relativi ad ogni categoria e per ogni metodo di calcolo utilizzato, precisando che per i sottogruppi studiati in funzione del genere, dell'esperienza di guida e dell'orario in cui è stato svolto il test i metodi implementati fanno riferimento al CASO 1.

Tabella 14 - Media e varianza del gap critico stimati con il metodo della massima verosimiglianza (MLM), il metodo Logit, Probit ed il metodo della Probabilità d'Equilibrio (metodo di Wu) in funzione della categoria di studio

	MLM	var	LOGIT	var	PROBIT	var	WU	var
Tc_reale	3,36	0,54						
Tc_rnd (CASO 1)	3,32	0,22	3,40	0,50	3,38	0,50	3,36	2,93
Tc_progr (CASO 1)	2,38	0,11	2,98	0,40	3,02	0,40	2,09	1,09
Tc_rnd (CASO 2)	3,38	0,22						
Tc_progr (CASO 2)	2,38	0,11						
Tc_rnd_M	3,30	0,24	3,35	0,49	3,32	0,49	3,33	3,08
Tc_rnd_F	3,35	0,18	3,52	0,52	3,51	0,52	3,44	2,51
Tc_progr_M	2,39	0,24	3,06	0,42	3,12	0,42	2,09	1,22
Tc_progr_F	2,32	0,15	2,72	0,33	2,75	0,33	2,09	0,66
Tc_rnd_Km<	3,32	0,24	3,45	0,51	3,43	0,51	3,43	1,05
Tc_rnd_Km>	3,31	0,21	3,34	0,49	3,30	0,49	3,30	3,21
Tc_progr_Km<	2,35	0,27	2,84	0,36	2,87	0,36	2,12	0,31
Tc_progr_Km>	2,40	0,17	3,17	0,44	3,25	0,44	2,06	1,43
Tc_rnd_mattina	3,27	0,24	3,31	0,48	3,28	0,48	3,29	3,00
Tc_rnd_pome	3,37	0,20	3,49	0,52	3,48	0,52	3,44	2,77
Tc_progr_mattina	2,30	0,19	2,80	0,35	2,85	0,35	2,03	0,96
Tc_progr_pome	2,46	0,23	3,08	0,42	3,14	0,42	2,15	1,16

4.6 CONFRONTO TRA DUE CAMPIONI INDIPENDENTI: APPLICAZIONE DEL TEST-T DI STUDENT

La media del gap critico ricavato dalle sequenze di headway random (R), prodotto dai test al simulatore di guida, deve essere validato confrontandolo con la media del gap critico risultante dall'elaborazione dei dati di campo derivanti dal rilievo del traffico. In assenza di validazione non è possibile ritenere attendibili le stime della media del gap critico prodotte dalle simulazioni.

La domanda che ci si pone è: "la differenza fra le medie dei gap critici dei due campioni (caso reale e caso simulato random) è significativa?". Se la differenza fra le due medie fosse significativa non sarebbe possibile ritenere i dati di output derivanti dalle prove al simulatore di guida come rappresentanti la realtà. Nel caso invece le due medie siano confrontabili allora sarà possibile ritenere i dati delle prove al simulatore come dei dati reali.

Questo confronto è reso possibile grazie all'utilizzo di test statistici. Esistono due tipologie di test:

- Test parametrici, che si basano su una distribuzione normale dei dati componenti il campione d'osservazione;
- Test non parametrici, applicati a campioni dei quali non si conoscono i parametri relativi alla distribuzione (media, varianza, deviazione standard, etc,) o la cui distribuzione non è gaussiana.

Avendo utilizzato il metodo della massima verosimiglianza si è implicitamente ammessa una distribuzione log-normale sulla popolazione dei conducenti, Non avendo una distribuzione normale sembra di trovarsi di fronte a d un test non parametrico, Dopo un'attenta analisi e lo sviluppo di alcuni test (Fisher, Wilcoxon, Mann-Whitney) ci si accorge però che non è possibile implementare correttamente i test non parametrici, I principali motivi sono:

- Alcuni test non parametrici (Fisher) richiedono valori nominali, mentre nel nostro caso i valori sono ordinali;
- Non si ha un preciso valore per ogni osservazione, ma un limite inferiore ed un limite superiore all'interno del quale si inserirà il gap critico di ogni soggetto o dell'insieme dei soggetti raggruppati. Questo è un limite per lo sviluppo dei test in quanto le osservazioni non sono valori identificabili univocamente, ma sono un range all'interno del quale si troverà il gap critico. Non è possibile quindi calcolare la devianza (la somma delle differenze tra la media e ogni singola osservazione), o il Rango di ogni di osservazione, passo indispensabile per una corretta implementazione dei test non parametrici;
- Alcuni test (Wilcoxon) richiedono la dipendenza (stesso numero di osservazioni) dei campioni oggetti del confronto, ma in questo caso i campioni sono indipendenti tra loro.

Come affrontare il problema visto che:

- Non abbiamo una distribuzione normale delle osservazioni;
- Le osservazioni non identificano un valore numerico preciso ma una serie di intervalli all'interno dei quali abbiamo stimato il gap critico;

- I dati da noi in possesso, stimati con il metodo della massima verosimiglianza, sono media e varianza del gap critico,
- E' stato scartato l'impiego dei test non parametrici, per la loro inadeguatezza per il caso in esame.

Per risolvere questo problema si applica il teorema del limite centrale. Quando l'ampiezza del campione casuale diventa sufficientemente grande (numero di osservazioni pari almeno a 30), questo teorema permette di approssimare una distribuzione qualsiasi ad una distribuzione normale. Tuttavia il teorema del limite centrale può essere applicato anche con campioni di ampiezza inferiore se si sa che la distribuzione della popolazione ha alcune caratteristiche che la avvicinano di per se stessa alla normale (ad esempio quando è simmetrica).

Avendo un campionamento elevato, grazie al teorema del limite centrale, è possibile supporre una distribuzione normale delle nostre osservazioni. Si esegue quindi un confronto tra le categorie in cui si è suddiviso lo studio tramite un test parametrico, molto utile ai nostri fini perché ci permette di confrontare le medie e le varianze di due campioni e stabilire se questi ultimi siano significativamente differenti.

I test parametrici che permettono di eseguire un confronto tra due campioni indipendenti, avendo a disposizione media e varianza sono il test-t di Student e il test-Z.

Il test-Z confronta un campione di media nota con l'intera popolazione di media e varianza nota, supponendo che campione e popolazione abbiano la stessa varianza. In questo studio si confrontano tra loro campioni (sottogruppi della popolazione) e quindi si è portati ad escludere il test-Z.

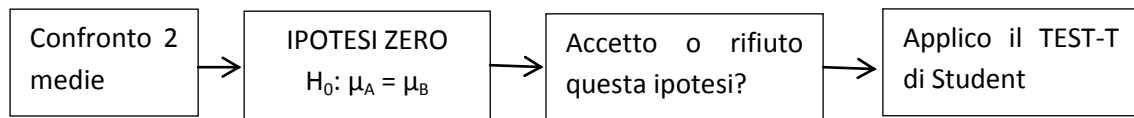
Il test-t nella statistica applicata, è utilizzato per il confronto tra:

1. La media di un campione e la media dell'universo;
2. Un singolo dato e la media di un campione, per verificare se possono appartenere alla stessa popolazione;
3. La media delle differenze di due campioni dipendenti con una differenza attesa;
4. Le medie di due campioni indipendenti.

Il confronto tra le categorie oggetto di studio in questa tesi è quindi reso possibile grazie all'utilizzo del test-t in quanto ci troviamo di fronte al quarto caso e cioè il confronto tra le medie di due campioni indipendenti. Nell'applicare questo caso aumenta la variabilità tra i due gruppi (per esempio possono essere presenti più maschi rispetto alle femmine), ma si ottengono dei vantaggi come il poter utilizzare un numero differente di osservazioni e utilizzare per il confronto con il proprio un campione raccolto da altri.

Il test di significatività tra due medie campionarie comporta un'ipotesi zero o ipotesi nulla H_0 , secondo la quale le due medie a confronto sono estratte dalla stessa popolazione o comunque sono identiche; di conseguenza, le differenze effettivamente riscontrate nelle medie campionarie sarebbero imputabili a variazioni casuali, come effetto del campionamento, cioè all'estrazione casuale di alcuni dati da un universo teoricamente infinito, formato da valori tra loro diversi e con una distribuzione normale intorno alla loro media.

Lo schema di ragionamento da utilizzare è il seguente:



La formula generale da applicare per il calcolo del valore t è:

$$t = \frac{m_a - m_b}{S} \sqrt{\frac{n_a n_b}{n_a + n_b}}$$

Dove:

- m_a, m_b : medie dei campioni a e b
- S : Deviazione standard media
- n_a, n_b : osservazioni per i campioni a e b

Mediante l'inferenza sulle medie calcolate sui dati dei due campioni, si determina la probabilità di ottenere tra loro differenze maggiori di quelle sperimentalmente osservate, nella condizione che l'ipotesi nulla sia vera. Se questa probabilità risulta alta si accetta l'ipotesi nulla, Se la probabilità risulta piccola (convenzionalmente vengono utilizzati i valori di probabilità $p=0,05$ e $p=0,01$) allora esiste una ragionevole evidenza per dubitare della validità dell'ipotesi nulla, che quindi è rifiutata. L'ipotesi alternativa H_1 è quella che $\mu_A \neq \mu_B$.

L'esempio classico di un test-t è il confronto tra un campione di individui sottoposti a un trattamento e un campione di soggetti che servono come controllo; è tuttavia possibile anche il confronto tra le medie di due trattamenti diversi.

Nel primo caso si tratta solitamente di un test a una coda, nel secondo di un test a due code. E' importante evidenziare la direzionalità che prende il test in quanto da essa deriva la distribuzione di probabilità con le quali è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Un test è a una coda quando ci si domanda se una media è maggiore dell'altra, escludendo a priori che essa possa essere minore. Un test è a due code quando ci si chiede se tra le due medie esista una differenza significativa, senza avere indicazioni su quale sia la maggiore o la minore.

Nel test a una coda la zona di rifiuto sarà solamente da una parte della distribuzione (a sinistra quando il segno è negativo, a destra quando è positivo); in un test a due code sarà simmetricamente distribuita dalle due parti. E' maggiore la probabilità di dimostrare l'esistenza di una differenza significativa mediante un test a una coda che con un test a due code (il test a due code è più "conservativo", quello ad una coda è più "potente"). In questo lavoro di tesi affrontiamo un test a due code in cui l'ipotesi zero H_0 è $\mu_A = \mu_B$ e l'ipotesi alternativa è $\mu_A \neq \mu_B$.

Siamo quindi in presenza di due campioni indipendenti estratti entrambi da due popolazioni normali (N) (grazie al teorema del limite centrale) con medie (μ_A e μ_B) e varianze (σ_A^2 e σ_B^2) differenti, quindi:

- la prima con $N(\mu_A, \sigma_A^2)$;

- la seconda con $N(\mu_B, \sigma_B^2)$;

per l'ipotesi nulla H_0 sulle due medie : $\mu_A = \mu_B$ il test di significatività t assume la seguente forma:

$$t = \frac{m_a - m_b}{\sqrt{\frac{S_A^2}{n_A} + \frac{S_B^2}{n_B}}}$$

Come già anticipato è condizione di validità della distribuzione t di Student che la distribuzione dei dati sia normale (la nostra è log-normale ma applichiamo il teorema del limite centrale con cui è possibile approssimarla ad una distribuzione normale) e che le osservazioni siano raccolte in modo indipendente. Una volta trovato il valore t, esso va confrontato con quelli contenuti in apposite tabelle. Il valore dei gradi di libertà è uguale alla somma dei dati dei due campioni meno il numero di gruppi oggetto del confronto, In funzione della colonna nella quale si trova il valore t è possibile affermare quale sia la probabilità che l'ipotesi nulla sia verificata. Va sottolineato che questo test di significatività non può provare con assoluta certezza che l'ipotesi zero sia vera o falsa, ma può fornire una indicazione della forza con cui i dati contrastano l'ipotesi zero.

4.6.1 VALIDAZIONE DEI DATI DEI TEST AL SIMULATORE

Si applica il test-t alle medie dei gap critici dei dati osservati sul campo e delle sequenze degli headway random prodotte dal simulatore di guida. Avendo due casi (CASO 1 – media del gap critico ricavato dalla totalità delle decisioni dei soggetti aggregati, CASO 2 – gap critico come media delle medie relative ad ogni soggetto) si eseguiranno dei test-t a coppie tra il caso reale e i due casi random e un successivo test tra i due casi random, per osservare se esistano differenze significative tra le stime.

Facendo riferimento alle stime derivanti dal metodo della massima verosimiglianza, in quanto come detto nel capitolo 1 è il metodo più affidabile, dall'applicazione del test-t di Student tra i diversi casi appena citati, si ottengono i risultati riportati nelle seguenti tabelle:

Tabella 15 - Confronto tra media e varianza del gap critico del rilievo di traffico reale e della distribuzione random (CASO 1) degli headway nella prova al simulatore di guida

A	t _c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
Rilievo di traffico REALE	3,36	0,54	810
Sequenza headway RANDOM (CASO 1)	3,32	0,22	557
t (test-t)		1,2276	
Gradi di libertà		1.365	
Probabilità P (2 code)		0,2198	
Esito	p > 0,05 : La differenza tra le due medie NON è significativa		

Tabella 16 - Confronto tra media e varianza del gap critico del rilievo di traffico reale e della distribuzione random (CASO 2) degli headway nella prova al simulatore di guida

B	t _c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
Rilievo di traffico REALE	3,36	0,54	810
Sequenza headway RANDOM (CASO 2)	3,38	0,11	44
t (test-t)		0,3244	
Gradi di libertà		852	
Probabilità P (2 code)		0,7457	
Esito	p > 0,05 : La differenza tra le due medie NON è significativa		

Tabella 17 - Confronto tra media e varianza del gap critico della distribuzione random (CASO 1) degli headway e della distribuzione random (CASO 2) degli headway nella prova al simulatore di guida

C	t _c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
Sequenza headway RANDOM (CASO 1)	3,32	0,22	557
Sequenza headway RANDOM (CASO 2)	3,38	0,11	44
t (test-t)		1,0706	
Gradi di libertà		599	
Probabilità P (2 code)		0,2848	
Esito	p > 0,05 : La differenza tra le due medie NON è significativa		

In tutti e tre i confronti (REALE - RND (CASO 1) , REALE – RND (CASO 2), RND (CASO1) – RND (CASO 2)) l'applicazione del test-t di Student restituisce una probabilità maggiore del 5%. Questo significa che **si accetta l'ipotesi nulla per la quale $\mu_A = \mu_B$** , in quanto la probabilità che le medie dei gap critici osservati sia significativamente differente è superiore al 5% (è pari al 21,98% nel confronto A, 74,57% nel confronto B, 28,48% nel confronto C). Se avessimo avuto una probabilità inferiore a 0,05 si sarebbe rifiutata l'ipotesi nulla, per la possibilità di commettere un errore di I tipo (rifiutare l'ipotesi nulla quando essa è vera) dichiarando che la differenza tra le medie dei due campioni risultava significativa ($p < 0,05$) o molto significativa ($p < 0,01$).

Avendo un livello di confidenza minimo pari al 5% si può affermare che **la differenza tra le medie osservate non è significativa**. Il gap critico stimato dai rilievi di traffico su campo e quello derivante dalla simulazione sono quindi confrontabili; è possibile ritenere affidabili i dati prodotti dall'esperimento al simulatore di guida.

Si riporta di seguito il grafico della distribuzione normale cumulativa relativa ai gap reali misurati dal rilievo di traffico e a quelli random degli esperimenti al simulatore di guida:

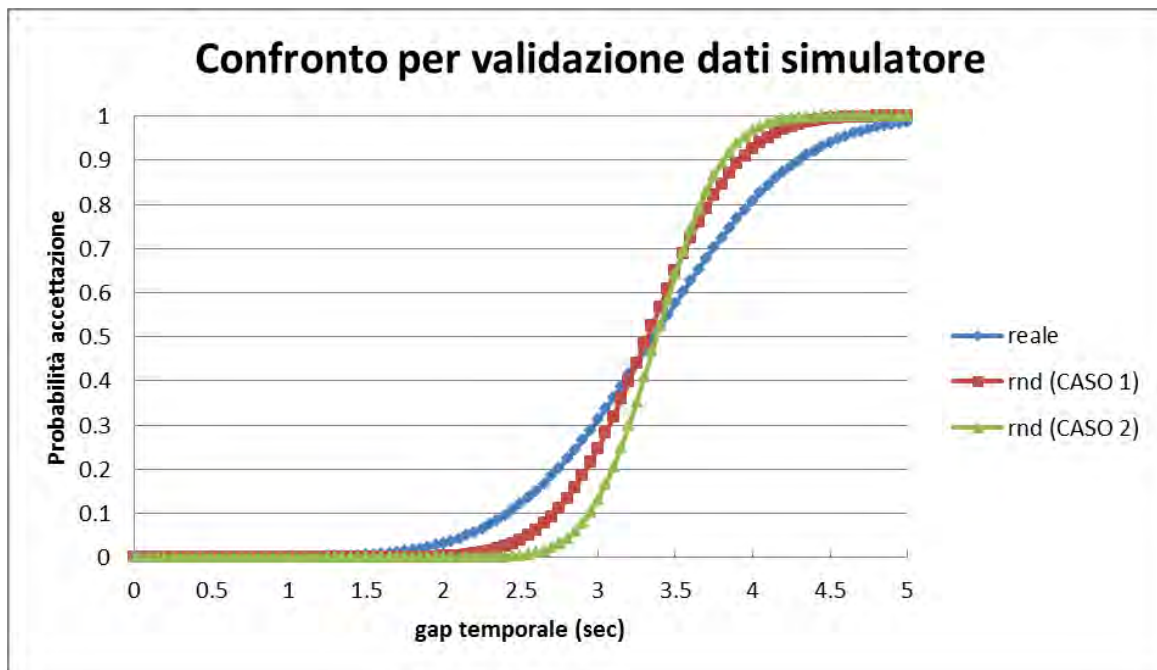


Figura 66- Rappresentazione della distribuzione cumulativa della probabilità d'accettazione di un gap di una determinata dimensione temporale in funzione della tipologia di distribuzione degli headway

Dal grafico è possibile notare come per il valore di ordinata pari a 0,5 le tre curve rappresentanti la distribuzione cumulativa delle probabilità d'accettazione riportino valori di ascissa molto simili e vicini tra loro. Le diverse inclinazioni delle curve invece sono dovute ai valori della varianza,

4.7 CONFRONTO TRA LE CATEGORIE DI STUDIO

Verificata l'attendibilità della media del gap critico derivante dall'esperimento al simulatore di guida, si procede al confronto tra le varie famiglie in cui si è suddiviso lo studio, tramite l'applicazione del test-t di Student, per osservare se esistano o meno differenze evidenti tra le famiglie stesse. Ci si concentra dapprima sul confronto tra le medie dei gap critici tra le distribuzioni degli headway random e quelle progressive, essendo il caso che più interessa per i nostri scopi. Successivamente si eseguiranno delle comparazioni tra sottogruppi (come evidenziato nella tabella a pag. 91) per osservare se esistano delle caratteristiche o delle variabili che influenzino i soggetti nella scelta di accettazione (o rifiuto) di gap, che si tradurrà poi in un determinato valore di gap critico.

Si presentano di seguito delle tabelle con i valori del test-t e della probabilità associata relativa a coppie di famiglie, confrontando le medie del gap critico ricavate con il metodo della massima verosimiglianza.

4.7.1 CONFRONTO DISTRIBUZIONE RANDOM/PROGRESSIVA

Il primo confronto, come appena accennato, viene svolto tra le sequenze di arrivi veicolari random e progressive. Si eseguiranno 2 confronti tra la coppia di sequenze random e progressive del CASO 1 e la coppia random-progressiva del CASO 2. Si farà poi un parallelo per studiare se esistano differenze significative tra i due casi progressivi (il parallelo tra i due casi random è stato studiato nel precedente paragrafo).

Tabella 18 - Confronto tra media e varianza del gap critico tra distribuzione random e progressiva (CASO 1) per la significatività della differenza tra le due stime

rnd /progr (CASO 1)	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
random	3,32	0,22	557
progressiva	2,38	0,21	651
t (test-t)		35,0914	
Gradi di libertà		1.206	
Probabilità P (2 code)		0	
Esito	p < 0,01 : La differenza tra le due medie è molto significativa		

Tabella 19 - Confronto tra media e varianza del gap critico tra distribuzione random e progressiva (CASO 2) per la significatività della differenza tra le due stime

rnd /progr (CASO 2)	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
random	3,38	0,11	44
progressiva	2,38	0,11	47
t (test-t)		14,2394	
Gradi di libertà		89	
Probabilità P (2 code)		0	
Esito	p < 0,01 : La differenza tra le due medie è molto significativa		

Tabella 20 - Confronto tra media e varianza del gap critico tra distribuzione progressiva (CASO 1) e progressiva (CASO 2) per la significatività della differenza tra le due stime

progr(CASO 1)/ progr(CASO 2)	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
progr (CASO 1)	2,38	0,21	651
progr (CASO 2)	2,38	0,11	47
t (test-t)		0,0619	
Gradi di libertà		696	
Probabilità P (2 code)		0,9507	
Esito	p > 0,05 : La differenza tra le due medie NON è significativa		

Come era presumibile anche senza l'applicazione del test-t, c'è una differenza notevole tra le medie dei gap critici della distribuzione degli headway casuale e quella con la sequenza prestabilita di arrivi crescenti progressivi.

In particolare confrontando medie e varianze tra il primo caso random ed il primo progressivo e tra il secondo caso random ed il secondo progressivo la probabilità derivante dall'applicazione del test-t risulta pari a zero (e inferiore a 0,05). Il che significa che la differenza tra le medie dei gap critici della distribuzione random e progressiva è significativa.

Questo risultato dimostra come il gap critico t_c di una popolazione, nel caso specifico di intersezioni a rotatoria, sia minore (di 0,94 secondi nel CASO 1 e di 1 secondo nel CASO 2) con una distribuzione degli headway della corrente di conflitto (quella circolante nell'anello circolatorio) che cresce progressivamente rispetto al veicolo del ramo secondario che deve compiere la manovra di immissione.

Prima di esprimere delle considerazioni riguardo i risultati ottenuti si vuole presentare in dettaglio il confronto tra le medie dei gap critici ricavate per ogni soggetto, sia per la distribuzione random (R) che per quella progressiva (P), da cui sono state poi ricavate le medie per il gap critico definitivo (R) e (P).

Applicando il metodo della massima verosimiglianza si è calcolata la media e la varianza del gap critico per ogni soggetto, rispettivamente per le distribuzioni (R) e (P). Si riportano in una tabella le stime ricavate:

Tabella 21 – Media del gap critico, varianza del gap critico e numero di decisioni (record) relative ad ogni soggetto (specificato dall'identificativo Id_soggetto accoppiato all'identificativo Id_tester) per la distribuzione random (rnd) e progressiva (progr) degli headway stimati con il metodo della massima verosimiglianza

Id_soggetto	Id_tester	tc_rnd	var_rnd	record_rnd	tc_progr	var_progr	record_progr
1	247	3,161	0,101	13	1,989	0,097	14
2	248	3,806	0,030	12	1,989	0,097	14
3	249	3,506	0,049	13	2,585	0,007	14
4	250	2,851	0,270	14	1,918	0,093	14
5	252	3,232	0,231	11	1,902	0,083	14
6	253	3,341	0,208	12	2,625	0,011	14
7	254	3,287	0,100	12	2,088	0,045	14
8	255	3,438	0,228	8	2,438	0,030	14
9	256	3,660	0,048	8	2,963	0,132	10
10	258	2,996	0,186	12	2,691	0,106	14
11	259	3,128	0,208	14	2,090	0,114	14
12	260	3,281	0,201	14	2,134	0,080	14
13	262	2,997	0,059	13	2,292	0,023	14
14	263			3	2,345	0,199	14
15	264	3,188	0,137	12	2,075	0,067	14
16	265	3,491	0,264	10	2,290	0,092	14
17	266	3,173	0,063	13	2,306	0,032	14
18	267	4,016	0,008	12	3,055	0,073	14
19	268	3,761	0,047	11	2,619	0,105	14
20	269	3,351	0,155	11	1,802	0,066	14
21	270	3,156	0,307	13	2,347	0,073	14
22	271	3,413	0,056	13	2,347	0,073	14
23	272			12	2,129	0,025	14
24	384	3,552	0,114	14	2,450	0,059	14
25	385	2,861	0,314	14	1,786	0,078	14
26	386	4,016	0,008	11	2,581	0,027	14
27	387	3,556	0,186	11	2,404	0,091	14
28	388	3,194	0,433	12	2,406	0,068	14
29	162	3,166	0,207	12	2,449	0,073	14
30	165	2,908	0,268	13	2,322	0,065	14
31	389	2,842	0,292	12	2,116	0,064	14
32	393	4,016	0,013	7	2,648	0,167	14
33	394	3,320	0,022	10	2,380	0,178	11
34	395	3,383	0,097	12	2,061	0,071	14
35	396	3,035	0,236	12	2,420	0,075	14
36	143	4,035	0,026	13	2,987	0,085	14
37	159	3,512	0,161	13	2,693	0,036	14
38	397	3,638	0,149	12	2,492	0,086	14
39	398	3,238	0,234	11	2,408	0,036	14
40	399	3,720	0,014	12	2,408	0,036	14
41	400	3,244	0,141	14	2,131	0,009	14
42	152	2,817	0,364	14	2,043	0,028	14
43	169	3,579	0,058	14	2,450	0,059	14
44	401	3,526	0,214	12	2,232	0,280	14
45	402	3,247	0,095	13	2,748	0,106	14
46	403	4,016	0,013	10	3,439	0,137	14
47	404			13	2,636	0,039	14
MEDIA DEI 47 SOGGETTI		3,379			2,378		
VARIANZA DEI 47 SOGGETTI		0,114			0,111		

Effetti della distribuzione degli arrivi veicolari sul comportamento di gap acceptance. Esperimenti in ambiente simulativo

Si presentano graficamente i valori delle medie del gap critico in relazione ad ogni soggetto sia per il caso in cui la distribuzione della corrente di conflitto sia random e sia per il caso in cui la distribuzione sia progressiva:

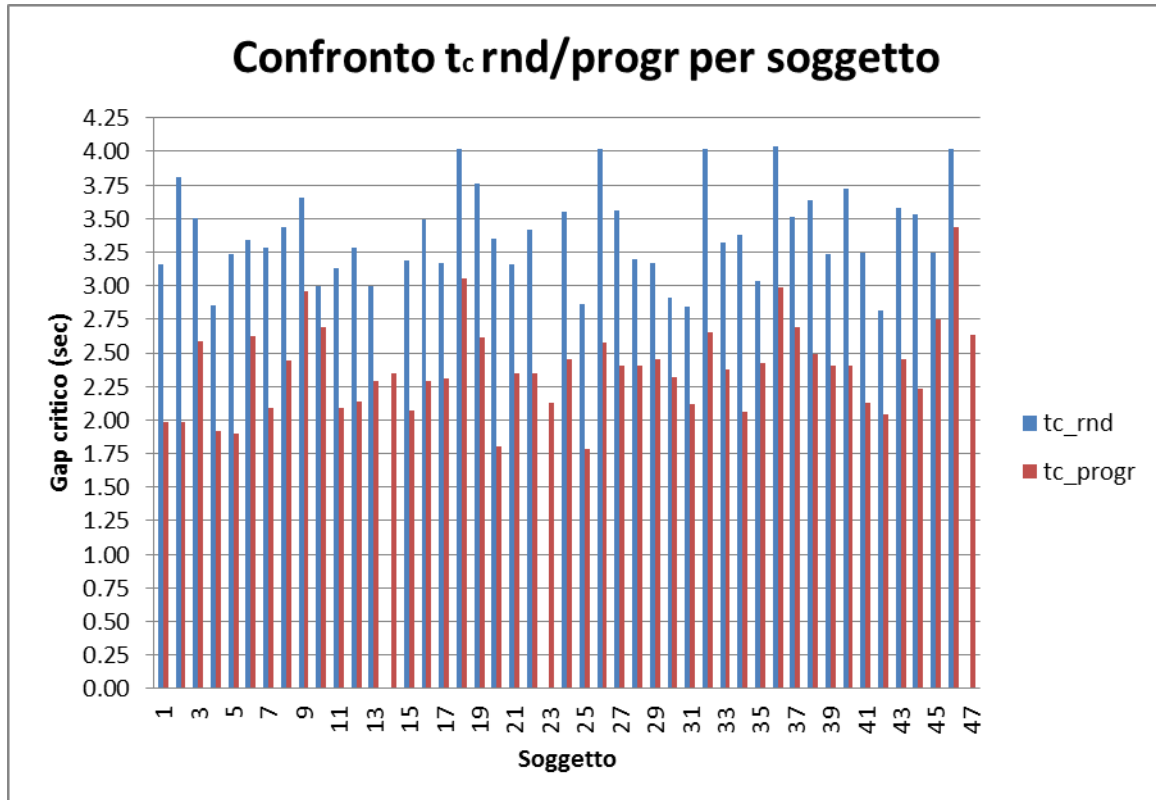


Figura 67 - Media del gap critico della distribuzione random (in azzurro) e della distribuzione progressiva (in rosso) degli headway relativamente ad ognuno dei 47 soggetti testati

La lettura dei valori tabulari e del grafico a barre portano alle seguenti osservazioni:

- La colonna record_rnd e record_progr nella tabella della pagina precedente riportano il numero di decisioni (una decisione corrisponde alla coppia massimo gap rifiutato/gap accettato per ogni rotatoria) coerenti con le quali sono stati determinati il gap critico e la varianza tramite il metodo della massima verosimiglianza. E' possibile notare come nel caso di distribuzione random (R) i record di molti soggetti siano minori di 14 (che sono le rotatorie con distribuzione random affrontate da ogni soggetto), proprio perché alcuni sono stati scartati per incoerenza della decisione;
- Dai soggetti 14, 23 e 47 non è stato possibile ricavare la media del gap critico. Per il soggetto 14 in quanto le decisioni disponibili per il calcolo del gap critico erano solamente 3 (con 11 decisioni incoerenti), per i soggetti 23 e 47 perché il procedimento iterativo alla base del metodo della massima verosimiglianza non riusciva a convergere ad un valore finito. La media del gap critico nel caso di distribuzione degli headway random sarà eseguita quindi senza i valori ricavati dai soggetti 14, 23 e 47;
- Dal confronto tra le barre azzurre (tc_rnd) e le barre rosse (tc_progr) è possibile notare come per ogni soggetto il gap critico stimato dalla distribuzione (P) sia minore rispetto a quello della distribuzione (R);

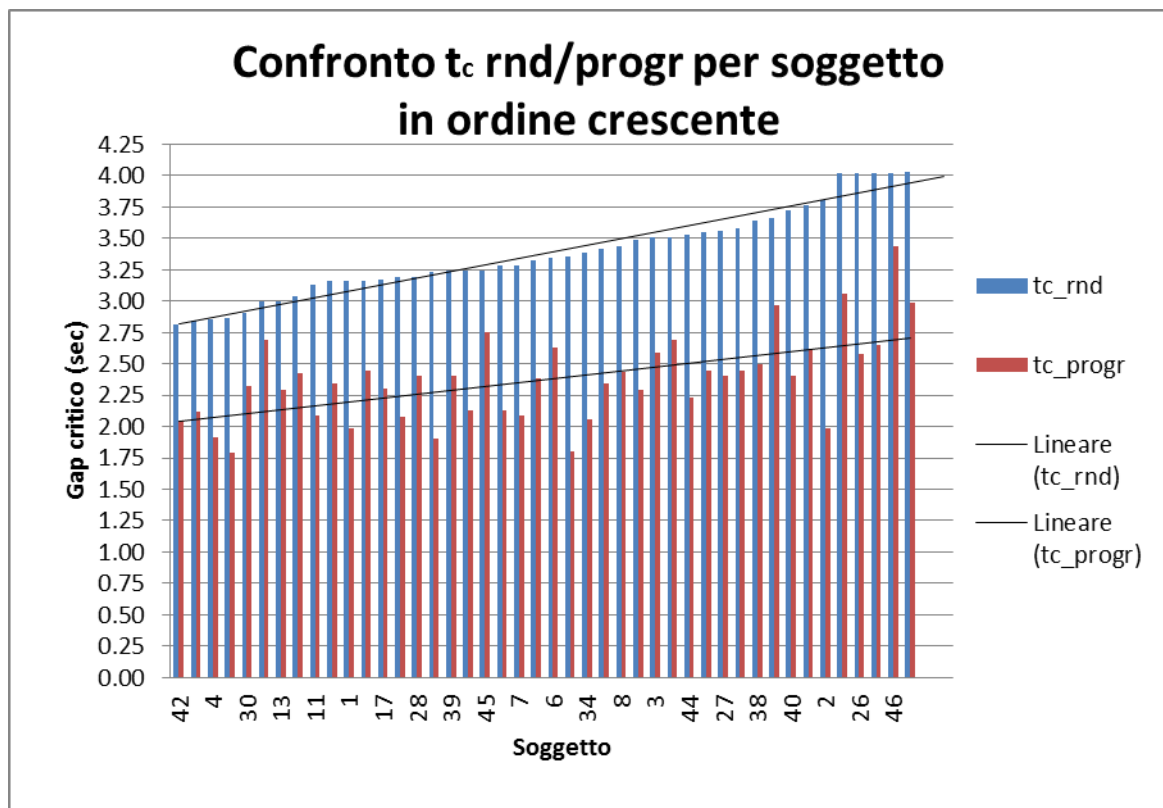


Figura 68 - Rappresentazione grafica delle medie dei gap critici random e progressive in relazione ad ogni soggetto. Rispetto al precedente grafico questo ordina in modo crescente le medie dei gap critici delle distribuzioni random e affianca ad ogni media della distribuzione random la media della distribuzione progressiva avuta dallo stesso soggetto.

In figura 68 si sono poste in ordine crescente le medie del gap critico relative alle distribuzioni degli headway (R) e si è accoppiata la media del gap critico della distribuzione (P) relativa allo stesso soggetto.

Le linee di tendenza che approssimano l'andamento delle due distribuzioni aiutano a capire in modo più preciso le considerazioni che si vogliono esporre. Sebbene l'inclinazione delle due linee di tendenza non sia la stessa (e questo è corretto perché la differenza tra il minimo ed il massimo dei valori del gap critico (R) è maggiore della differenza tra il minimo ed il massimo della distribuzione (P)) è però vero che entrambe le rette sono crescenti. Questo risultato suggerisce che verosimilmente il comportamento di gap acceptance di un conducente (più o meno cauto o viceversa più o meno aggressivo) permangono anche al variare della distribuzione degli headway della corrente di conflitto.

Tendenzialmente quindi la distribuzione degli headway di tipo (P) non pregiudica il comportamento di gap acceptance dei soggetti, in quanto conducenti aggressivi restano relativamente aggressivi e conducenti prudenti restano relativamente prudenti.

Per quanto riguarda la distribuzione progressiva (P) degli headway della corrente di conflitto, si vogliono esprimere le seguenti considerazioni:

- Con la distribuzione di headway progressiva crescente (P) ogni conducente accetterà presumibilmente il primo gap giudicato di dimensioni idonee per essere attraversato. Ad ogni conducente si presentano inizialmente gap non accettabili (perché di dimensioni troppo piccole) ma al progredire della sequenza si presenteranno una serie di gap tra i quali sicuramente si troverà quel gap che consente ad ogni conducente, secondo la propria aggressività ed il proprio stile di guida, di eseguire la manovra di attraversamento in condizioni di sicurezza;
- La differenza tra successivi gap è di 0,2 secondi. Con la distribuzione (P) i gap proposti definiscono in maniera più completa e precisa gli intervalli all'interno dei quali è possibile stimare il gap critico;
- Con una distribuzione (P), nella stima del gap critico, non si avranno incoerenze da parte dei soggetti che devono compiere la scelta di accettazione o rifiuto del gap (il massimo gap rifiutato sarà sempre minore del gap accettato);
- La distribuzione (P) non ha la pretesa di essere riproposta nella realtà, ha lo scopo teorico di determinazione del valore del gap critico;
- Una volta capita la struttura della distribuzione (P) i guidatori potrebbero attendere fino all'intertempo veicolare che giudicano attraversabile in condizioni di sicurezza senza dover forzare la manovra per l'ingresso. Potrebbero cioè aver alterato il loro criterio di scelta accettando gap di dimensioni maggiori per eseguire la manovra in totale sicurezza perché sanno quale sarà il gap successivo che si presenterà loro di fronte. Questo potrebbe portare ad una sovrastima del gap critico;
- Il tempo d'attesa prolungato nel ramo d'ingresso alla rotatoria nella distribuzione (P) rispetto a quella (R) potrebbe aver indotto a forzare la manovra di immissione da parte dei soggetti, con una conseguente sottostima del gap critico. I conducenti potrebbero accettare cioè gap di dimensioni minori a causa dell'impazienza dovuta all'attesa nel ramo d'approccio alla rotatoria.

Infatti mediamente ogni accettazione è preceduta da circa 10/11 rifiuti (652 accettazioni su 7515 decisioni, per una percentuale di gap accettati pari al 8,68%) per un tempo d'attesa medio al ramo d'ingresso della rotatoria di 15,17 secondi.

Nella distribuzione (R) invece mediamente ogni accettazione è preceduta da 2 gap rifiutati (649 accettazioni su 1948 decisioni, per una percentuale di gap accettati pari al 33,32%) per un tempo d'attesa medio al ramo d'ingresso della rotatoria di 4,24 secondi; Quanto appena detto è sostenuto anche da ((42) Tupper, 2011) che analizzando le variabili che intervengono nel comportamento di gap acceptance di un guidatore, valuta il tempo d'attesa come una delle variabili che portano ad accettare gap minori di quelli che normalmente si accetterebbero. Inoltre si afferma che strettamente collegato al tempo di attesa è il numero di gap rifiutati, in quanto mentre i guidatori aspettano nel ramo secondario un gap accettabile, rifiutano uno o più gap che non considerano di dimensioni sufficienti per compiere la manovra di attraversamento in sicurezza. All'aumentare dei gap rifiutati aumenta l'impazienza e la possibilità di accettare gap di dimensioni minori;

- La possibile sovrastima del gap critico dovuta alla conoscenza della struttura della distribuzione degli headway e la possibile sottostima del gap critico dovuta all'accettazione di gap minori per l'impazienza dell'attesa al ramo d'ingresso della rotatoria, potrebbero compensarsi tra loro. Le due cause, contrastanti tra loro, si pensa quindi non influiscano sul valore della media del gap critico;
- La sequenza di gap rifiutati nella distribuzione (P) non influenza o pregiudica la stima del gap critico, in quanto il metodo utilizza solamente il massimo gap rifiutato. Potrà essere influente invece nei metodi Logit, Probit e PEM in quanto in questi vengono considerati anche tutti i gap rifiutati;
- La differenza di 1 secondo tra la media del gap critico della distribuzione (R) e la media del gap critico della distribuzione (P), oltre ad essere significativa in termini statistici, potrà esserlo anche in termini di capacità. Nel prossimo capitolo si esaminerà come, prendendo come attendibile anche per la realtà il valore della media del gap critico della distribuzione (P), potrà variare il valore della capacità del ramo di ingresso di una rotatoria rispetto al caso (R);
- E' possibile pensare che una distribuzione (P) possa far diminuire la stima della media del gap critico non solo per un'intersezione a rotatoria ma anche nel caso generale di intersezione a regime di priorità;
- Avendo validato la distribuzione (R) (confrontandola con quella reale), anche il valore della media del gap critico di 2,38 secondi della distribuzione (P) è da considerare attendibile;
- Nella distribuzione (R) i soggetti non sono a conoscenza del gap successivo che potrà presentarsi loro nella corrente di traffico. Si tenderà verosimilmente ad avere un comportamento più cauto rispetto alla distribuzione (P),

Si riporta la distribuzione normale cumulativa relativa alla sequenza di headway random e progressiva dei casi 1 e 2 in figura 69:

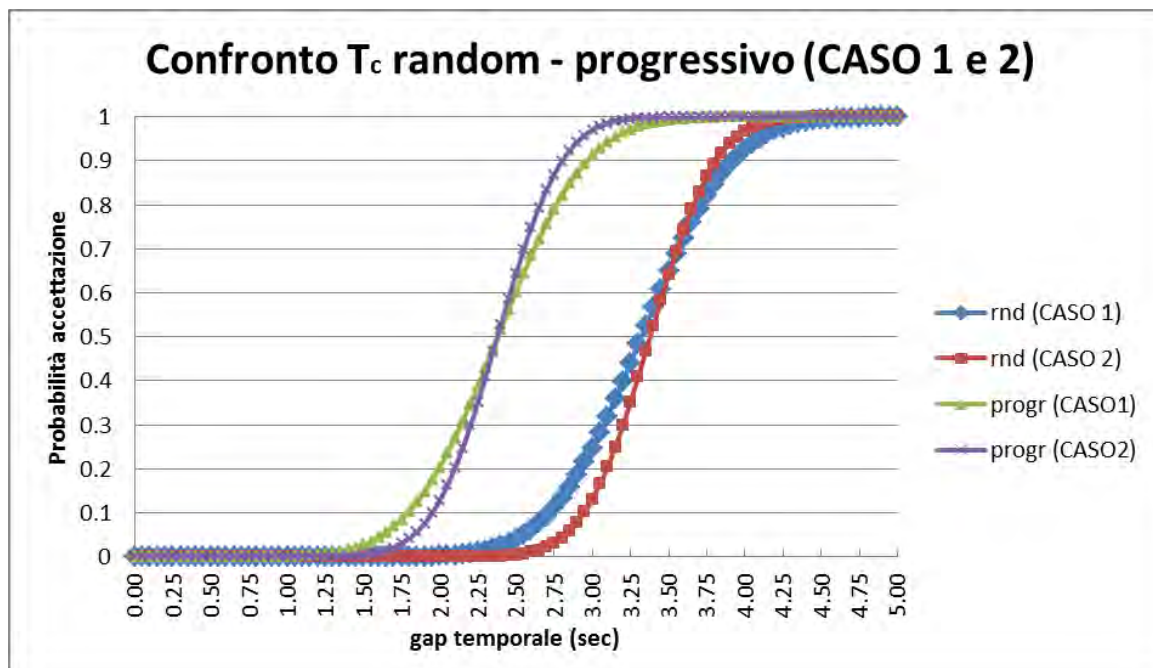


Figura 69 - Confronto tra le distribuzioni cumulative delle probabilità d'accettazione di gap in funzione della distribuzione degli headway della corrente di conflitto (random o progressivo, CASO 1 o CASO 2)

4.7.2 CONFRONTO TRA GENERE MASCHILE/FEMMINILE

Viene ora studiata la differenza tra il gap critico dei soggetti di genere maschile e di genere femminile, Si riportano le tabelle relative alla determinazione del test-t e i grafici con le distribuzioni normali cumulative:

Tabella 22 - Confronto tra medie e varianze del gap critico, per la distribuzione random degli headway, tra il genere maschile e femminile, con esiti del test di significatività tra le differenze

rnd_M/ rnd_F	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
rnd_M	3,30	0,24	425
rnd_F	3,35	0,18	132
t (test-t)		1,1386	
Gradi di libertà		555	
Probabilità P (2 code)		0,2554	
Esito	p > 0,05 : si accetta l'ipotesi nulla ($\mu_A = \mu_B$) per la quale le due medie non presentano differenze significative		

Tabella 23 - Confronto tra medie e varianze del gap critico, per la distribuzione progressiva degli headway, tra il genere maschile e femminile, con esiti del test di significatività tra le differenze

progr_M/ progr_F	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
progr_M	2,39	0,24	486
progr_F	2,32	0,15	165
t (test-t)		1,8689	
Gradi di libertà		649	
Probabilità P (2 code)		0,06209	
Esito	p > 0,05 : si accetta l'ipotesi nulla ($\mu_A = \mu_B$) per la quale le due medie non presentano differenze significative		

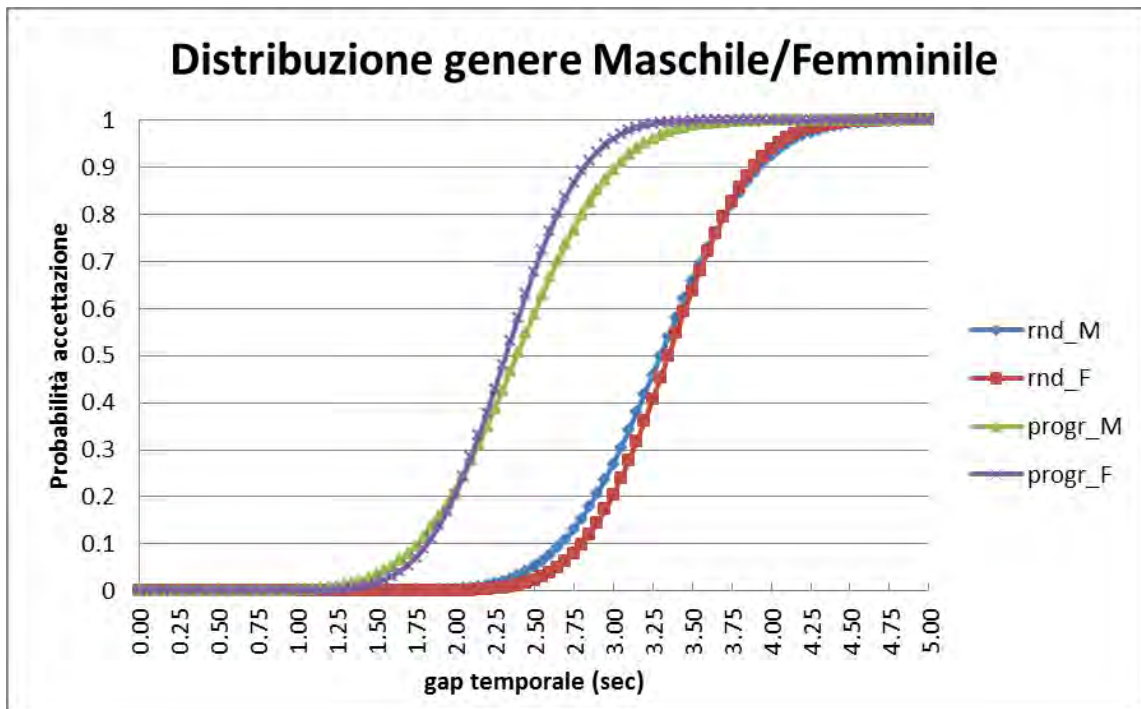


Figura 70 - Confronto tra le distribuzioni cumulative delle probabilità d'accettazione dei gap temporali in funzione della distribuzione random e progressiva degli headway e del genere maschile o femminile

Si possono esprimere le seguenti considerazioni:

- Sia per la distribuzione degli headway random che per quella dei progressivi non esiste una differenza significativa tra il gap critico t_c di maschi e femmine relativamente alle intersezioni a rotatoria,
Questo risultato conferma le affermazioni espresse da Tupper in riferimento alle intersezioni a regime di priorità, e cioè che non esistono differenze statistiche rilevanti nel comportamento di gap acceptance tra il genere maschile e quello femminile.
Tupper notava che la distribuzione è molto simile per gap di dimensioni piccoli e grandi, mentre nella fascia intermedia il genere maschile appariva più aggressivo;
- Potendo quindi considerare il gap critico indifferente rispetto al genere proprio perché non esiste una differenza statistica significativa, il fatto che nella distribuzione random il gap critico dei maschi sia minore di quello delle femmine (di 5 centesimi di secondo) mentre nella distribuzione progressiva il gap critico dei maschi sia maggiore di quello delle femmine (di 7 centesimi di secondo) non pregiudica la veridicità dei valori stimati.

4.7.3 CONFRONTO TRA CONDUCENTI PIU' E MENO ESPERTI

Per distinguere le due categorie di questo paragrafo ed eseguire il confronto si è fissato il valore di 10.000 Km, i guidatori che percorrono meno di 10.000 Km annui vengono etichettati come meno esperti e viceversa coloro che ne percorrono di più come esperti. Non si è valutata l'esperienza anche in funzione degli anni di conseguimento della patente o della fascia d'età dei guidatori. Questi potrebbero essere stati ulteriori parametri da aggiungere per esprimere un giudizio sull'esperienza di guida, ma ci si è fermati ai solamente ai Km annui percorsi.

Si presentano la differenza tra le medie dei gap critici secondo il test-t di Student ed il grafico relativo alla distribuzione normale cumulativa:

Tabella 24 - Confronto tra medie e varianze del gap critico, per la distribuzione random degli headway, tra conducenti più e meno esperti, con esiti del test di significatività tra le differenze.

rnd_Km<10,000 / rnd_Km>10,000	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
rnd_Km<10,000	3,31	0,21	312
rnd_Km>10,000	3,32	0,24	245
t (test-t)		0,2460	
Gradi di libertà		555	
Probabilità P (2 code)		0,8058	
Esito	p > 0,05 : si accetta l'ipotesi nulla ($\mu_A = \mu_B$) per la quale le due medie non presentano differenze significative		

Tabella 25 - Confronto tra medie e varianze del gap critico, per la distribuzione progressiva degli headway, tra conducenti più e meno esperti, con esiti del test di significatività tra le differenze.

progr_Km<10,000 / progr_Km>10,000	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
progr_Km<10,000	2,40	0,17	371
progr_Km>10,000	2,35	0,27	280
t (test-t)		1,3257	
Gradi di libertà		649	
Probabilità P (2 code)		0,1854	
Esito	p > 0,05 : si accetta l'ipotesi nulla ($\mu_A = \mu_B$) per la quale le due medie non presentano differenze significative		

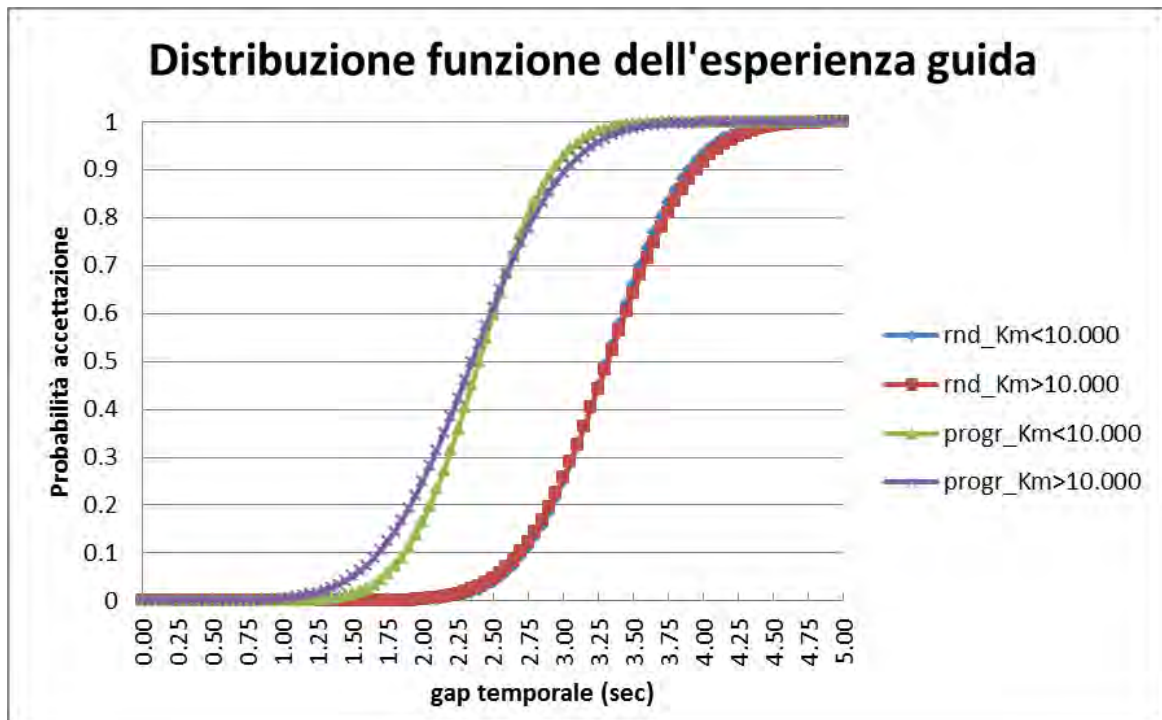


Figura 71 - Confronto tra le distribuzioni cumulative delle probabilità d'accettazione dei gap temporali in funzione della distribuzione random e progressiva degli headway e dell'esperienza di guida dei conducenti

Vista la differenza minima che intercorre tra i gap critici dei due gruppi di conducenti più e meno esperti (1 centesimo di secondo per le rotatorie con sequenza random, 5 centesimi per quelle progressive), il test-t conferma ciò che poteva essere già dedotto da un'osservazione preliminare delle stime del gap critico dei due gruppi. Non esiste cioè una differenza significativa per la quale si possa affermare che il gap critico di uno dei due gruppi di conducenti possa essere minore (o maggiore) rispetto all'altro.

Si potrebbe concludere che il comportamento di gap acceptance non sia influenzato dall'esperienza di guida, ma si è coscienti del fatto che i due gruppi in esame non sono distinti nettamente. All'interno del gruppo che percorre meno di 10.000 Km/anno potrebbe essere presente un guidatore che possiede la patente da più tempo rispetto ad uno appartenente alla categoria che percorre più di 10.000 Km annui. Alla luce dei risultati inoltre si sarebbe potuto porre una soglia diversa, che distingue in maniera più precisa le due categorie. Per esempio porre come soglia per i conducenti meno esperti il limite superiore di 5.000 Km/anno, e come soglia per quelli più esperti il limite inferiore di 15.000 Km/anno,

4.7.4 CONFRONTO TRA I TEST ESEGUITI AL MATTINO/POMERIGGIO

Si vogliono esaminare ora le differenze che intercorrono tra gli esperimenti condotti al mattino e quelli condotti al pomeriggio, ponendo come soglia tra i due periodi della giornata le 12:30. Si sono volute creare queste famiglie di studio in quanto ci si è posti questa domanda: “Può l’orario all’interno della giornata influenzare il comportamento di gap acceptance di un guidatore?”. Cerchiamo di rispondere al quesito applicando il test-t si Student tra le due categorie mattina e pomeriggio con distribuzione (R) degli headway e tra le categorie mattina e pomeriggio con distribuzione (P) degli headway della corrente di conflitto:

Tabella 26 - Confronto tra medie e varianze del gap critico, per la distribuzione random degli headway, tra esperimenti condotti al mattino e al pomeriggio, con esiti del test di significatività tra le differenze.

rnd_matt/rnd_pome	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
rnd_matt	3,27	0,24	298
rnd_pome	3,37	0,20	259
t (test-t)		2,5177	
Gradi di libertà		555	
Probabilità P (2 code)		0,0121	
Esito	p < 0,05 : La differenza tra le due medie è significativa		

Tabella 27 - Confronto tra medie e varianze del gap critico, per la distribuzione progressiva degli headway, tra esperimenti condotti al mattino e al pomeriggio, con esiti del test di significatività tra le differenze.

progr_matt/ progr_pome	t_c medio (s)	Varianza del gap critico	Osservazioni
progr_matt	2,30	0,19	336
progr_pome	2,46	0,23	315
t (test-t)		4,4451	
Gradi di libertà		649	
Probabilità P (2 code)		0,0001	
Esito	p < 0,01 : La differenza tra le due medie è significativa		

Si riportano anche le distribuzioni normali cumulative relative al caso in esame:

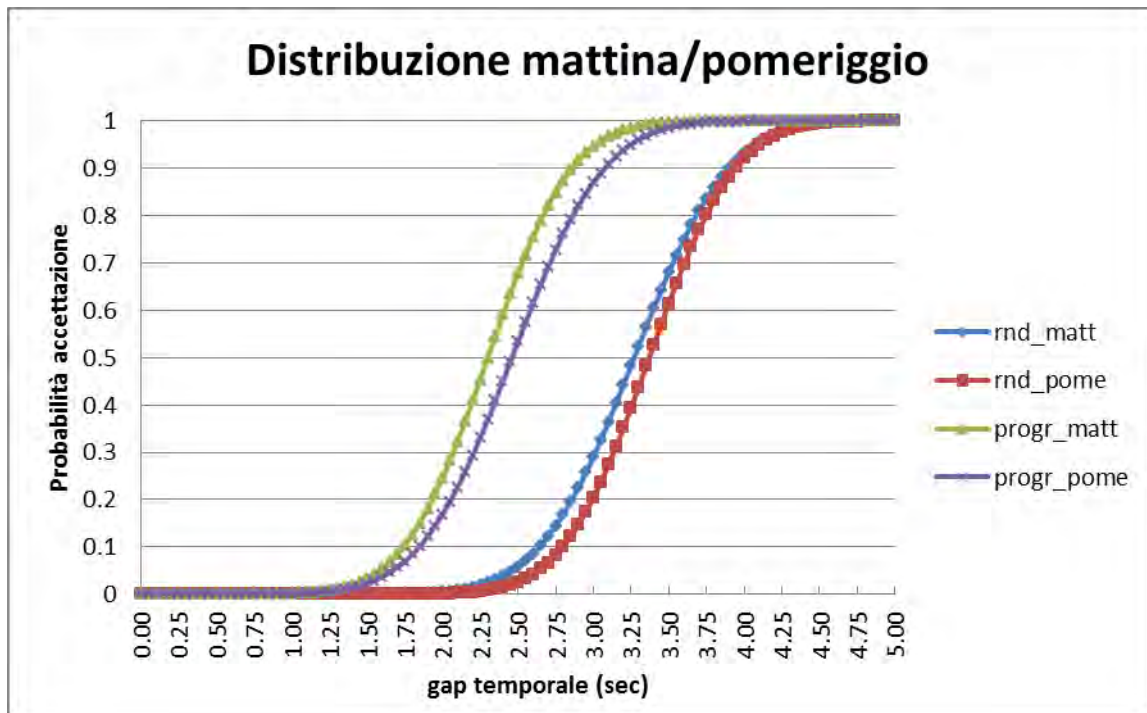


Figura 72- Distribuzioni normali cumultive della probabilità d'accettazione dei gap temporali in funzione della distribuzione (random o progressiva) e del periodo in cui è stato effettuato il test (mattina o pomeriggio)

Valutando i risultati prodotti dal test-t si esprimono i seguenti giudizi:

- Sia per le rotatorie in cui la distribuzione degli arrivi veicolari della corrente di conflitto è random e sia per quelle in cui è progressiva la differenza tra i gap critici dei soggetti testati al mattino rispetto a quelli testati al pomeriggio è statisticamente significativa;
- Per le rotatorie con distribuzione random i soggetti testati al mattino hanno un gap critico minore di 0,1 secondi rispetto a quelli del pomeriggio (3,27 secondi e 3,37 secondi rispettivamente);
- Per le rotatorie con distribuzione progressiva degli headway i soggetti testati al mattino hanno un gap critico minore di 0,16 secondi rispetto a quelli del pomeriggio (2,30 secondi e 2,46 secondi rispettivamente);
- In entrambi i casi (distribuzioni random e progressive) i soggetti testati al mattino hanno un gap critico minore. Questo risultato può essere interpretato positivamente, vista la differenza statistica significativa. Se le distribuzioni random e progressive degli headway non fossero state entrambe minori al mattino rispetto al pomeriggio si avrebbe avuto una maggiore difficoltà di interpretazione dei risultati.

In questo modo invece è possibile affermare che al mattino i conducenti sono disposti ad accettare gap minori (anche se parliamo di un decimo di secondo) rispetto al pomeriggio;

- E' vero che il test di significatività ha portato a dichiarare che le medie dei gap critici siano statisticamente differenti, ma ragionando per un successivo calcolo della capacità, la differenza di un decimo di secondo tra il gap critico del mattino e quello del pomeriggio non porterà variazioni significative ragionando per un successivo calcolo della capacità.

4.7.5 CONFRONTO DELLE MEDIE DEL GAP CRITICO FUNZIONE DELLE ROTATORIE PERCORSE

Si vuole ricordare che la prova al simulatore di guida è predisposta in modo che ogni soggetto debba affrontare 7 giri di un percorso virtuale, ed ogni giro contiene 4 rotatorie disposte secondo la seguente distribuzione di headway della corrente di conflitto: P, R, P, R. Ogni soggetto quindi è tenuto ad affrontare 28 rotatorie (14 con distribuzione random e 14 con distribuzione progressiva).

Si è voluto eseguire un confronto tra determinate rotatorie per valutare se esista una variazione significativa tra le medie del gap critico all'aumentare delle rotatorie affrontate all'interno del percorso virtuale. Dall'osservazione delle prove e dei dati di output infatti si è notato che le prime rotatorie sono state affrontate con una maggiore prudenza rispetto alle successive. Si vuole osservare se esista una differenza significativa tra le medie dei gap critici riferiti a determinate rotatorie. Nello specifico si eseguiranno confronti a coppie sia per le rotatorie con distribuzione random sia per quelle con distribuzione progressiva identificate da un numero secondo l'ordine temporale in cui sono state affrontate. Le rotatorie scelte sono state la numero: 1, 3, 6, 9, 12, 14. Si è optato per questi valori in modo da avere un campionamento abbastanza elevato rispetto al totale (6 rotatorie su 14) e un intervallo abbastanza regolare tra le stesse.

Si aggrediranno quindi per ogni rotatoria percorsa la decisione presa da ognuno dei 47 soggetti relativamente alla rotatoria percorsa e si calcolerà con il metodo della massima verosimiglianza la media e la varianza del gap critico per ogni rotatoria. Si riportano in una tabella i valori relativi alle medie e alle varianze del gap critico relativamente ad ogni rotatoria, sia nel caso di distribuzione random che in quello di distribuzione progressiva:

Tabella 28 - Media e varianza del gap critico per la distribuzione random e la distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto, relativamente alla rotatoria percorsa. La media del gap critico per ogni rotatoria è stata calcolata con il metodo della massima verosimiglianza, raggruppando le decisioni prese dai 47 soggetti relativamente ad ogni rotatoria.

Rotatoria	Giro	Tc_rnd	Var_rnd	Record_rnd	Tc_progr	Var_progr	Record_progr
1	1	3,780	0,039	38	2,873	0,201	47
2	1	3,080	0,143	38	2,689	0,164	47
3	2	3,702	0,041	42	2,569	0,187	47
4	2	3,762	0,038	36	2,532	0,127	47
5	3	3,543	0,084	42	2,402	0,196	47
6	3	3,213	0,422	44	2,331	0,158	47
7	4	3,151	0,210	41	2,343	0,150	47
8	4	3,256	0,184	43	2,299	0,181	47
9	5	3,288	0,191	41	2,275	0,152	47
10	5	3,390	0,239	40	2,175	0,140	47
11	6	3,164	0,312	37	2,263	0,196	46
12	6	3,254	0,113	42	2,151	0,166	45
13	7	3,281	0,145	36	2,188	0,197	45
14	7	3,271	0,237	39	2,147	0,134	45
MEDIA		3,389			2,374		
VARIANZA		0,048			0,044		

Si è stimata anche la media delle medie sia per la distribuzione random che per quella progressiva. Non è questo lo scopo per cui si è voluto determinare il gap critico per ogni rotatoria da parte dei 47 soggetti, ma osservando i risultati ci si accorge che:

- La media e la varianza della distribuzione random degli headway sono pari rispettivamente a 3,389 secondi e 0,048 secondi;
- La media e la varianza relative alla distribuzione progressiva degli headway sono pari a 2,374 e 0,044 secondi;
- Questi valori non sono molto dissimili dalle medie delle medie ricavate per ogni soggetto (pari a 3,379 secondi per la distribuzione random e 2,377 per quella progressiva).

Si precisa che dalla distribuzione random è stata tolta la media del gap critico relativa alla seconda rotatoria, Il valore della media del gap critico è infatti il minore tra tutte le 14 le rotatorie, e questo ha fatto sorgere dei dubbi. La spiegazione del fatto che la media sia così bassa è da ritrovarsi nella medesima distribuzione degli headway che si presenta di fronte ai soggetti che devono compiere la manovra di immissione. La creazione degli agent, cioè del traffico di conflitto, avviene grazie ad uno script che genera dei veicoli con una determinata sequenza di headway descritti in un apposito file. Il file contenente i gap per la rotatoria random numero 2 presenta la seguente forma: 4, 4, 4, 1.74, 1.859, 2.601, 2.91, 4, 4, 4, 2.102, 3.461, 3.958, etc, in cui ogni valore numerico rappresenta il gap tra due veicoli successivi, Essendo la rotatoria 2 appartenente al primo giro ed essendo la distribuzione dei gap generata sempre dall'inizio del file, la sequenza di headway che si presenterà di fronte ad ogni soggetto sarà sempre la stessa.

Inoltre dal momento di creazione degli agent all'arrivo all'intersezione da parte del soggetto, mediamente (in funzione della velocità tenuta) passano all'incirca 10-12 secondi. I gap tra i quali ogni soggetto dovrà eseguire la scelta saranno quindi 1,74, 1,859, 2,601, 2,91, 4, etc e si scarteranno i primi tre gap da 4 secondi che è proprio il tempo che si impiega mediamente per raggiungere l'intersezione. I gap che si presentano ad ogni soggetto sono quindi tendenzialmente bassi, ma soprattutto non più casuali, bensì "semicasuali" in quanto la distribuzione è sempre la stessa per ogni soggetto. Si è cioè notato che in 14 casi su 38 il gap accettato era di 2,91 secondi ed il massimo rifiutato di 2,601 secondi.

A seguito delle considerazioni esposte si è deciso di togliere la rotatoria random numero 2, Per le successive rotatorie random non si pone più il problema perché poi la generazione di gap non comincia più dall'inizio del file e inoltre ogni soggetto percorre il tracciato con una diversa velocità e arriverà all'intersezione in un diverso istante rispetto agli altri soggetti. Di conseguenza le sequenze affrontate saranno diverse per ogni guidatore, quindi la casualità dei gap è garantita, Per le rotatorie con distribuzioni progressive ovviamente il problema non si pone perché la sequenza proposta deve sempre essere la medesima, crescente in modo progressivo per ogni gap affrontato.

Si riportano graficamente i valori delle medie del gap critico per ogni rotatoria, sia relativamente alla distribuzione (R) degli headway, sia per quella con distribuzione (P).

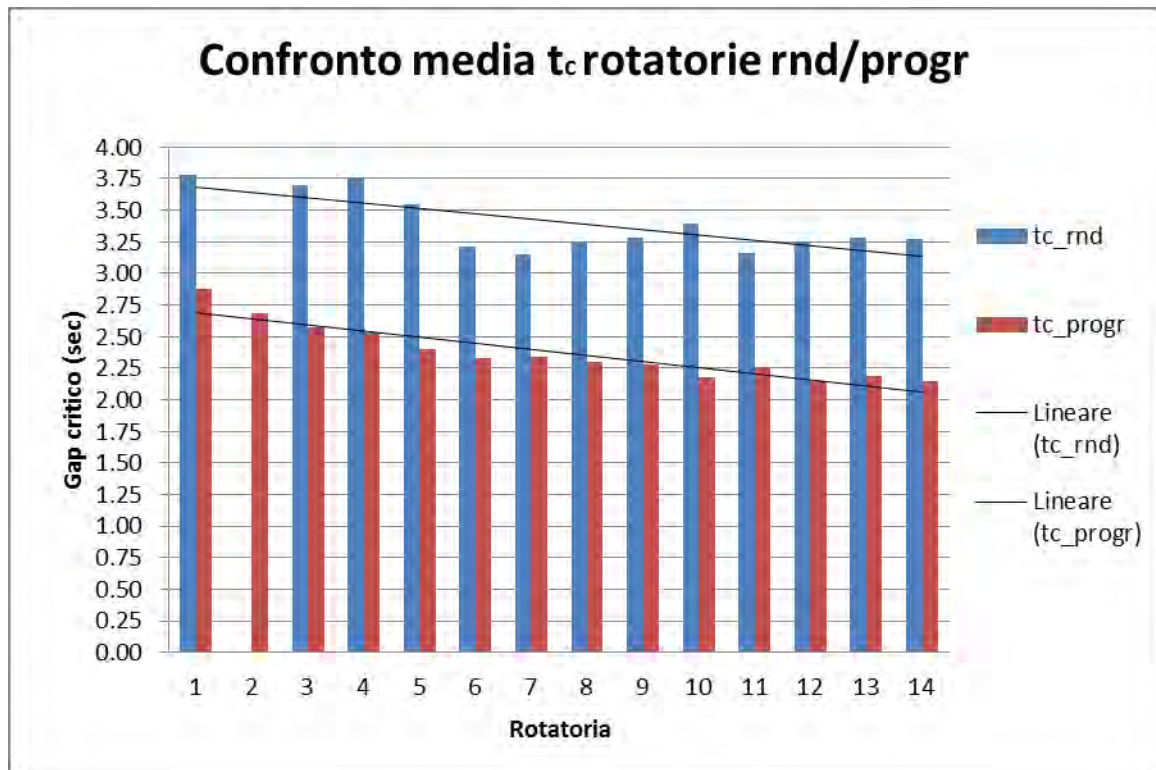


Figura 73- Confronto tra le medie del gap critico stimate relativamente ad ogni roatoria, per la distribuzione random e progressiva degli headway della corrente di conflitto. Si è evidenziata la diminuzione del gap critico all'aumentare del valore della rotatoria percorsa con l'inserimento di due linee di tendenza, una per la distribuzione random e l'altra per quella progressiva.

Nel grafico a barre sono rappresentate le medie del gap critico, stimate con il metodo della massima verosimiglianza, dei 47 soggetti relativamente ad ogni rotatoria affrontata. La numerazione delle rotatorie nell'asse delle ascisse corrisponde all'ordine in cui sono state percorse. Nell'asse delle ordinate è possibile leggere, relativamente ad ogni rotatoria, la media del gap critico per la distribuzione random (barre di color blu), e la media per la distribuzione progressiva (barre color rosso). Le barre sono appaiate per eseguire un confronto tra la prima rotatoria con distribuzione (R) e la prima con distribuzione (P) e così via fino alla quattordicesima.

Dall'osservazione del grafico si nota in maniera più esaustiva rispetto ai semplici valori numerici come la media del gap critico tenda a decrescere sia per la distribuzione random che per quella progressiva, all'aumentare delle rotatorie affrontate.

Le linee di tendenza aiutano la lettura del grafico. Si osserva che le due rette che approssimano l'andamento delle medie del gap critico in funzione della rotatoria percorsa, sembrano essere parallele. Il fatto che il coefficiente angolare tra le rette sia simile è un fattore positivo in quanto è possibile dichiarare che a prescindere dal tipo di distribuzione degli headway che i soggetti affrontano, i comportamenti dimostrati nel caso di distribuzione random e progressiva hanno una loro coerenza. Cioè per entrambe le distribuzioni i soggetti inizialmente affrontano le rotatorie più cautelativamente (con valori delle medie del gap critico di 3,70 secondi circa per la distribuzione (R) e 2,57 secondi circa per la distribuzione (P) relativamente alla rotatoria numero 3) e nelle successive hanno un atteggiamento più deciso (rispettivamente 3,29 secondi circa per (R) e 2,27 secondi circa per (P)). Entrambe le stime delle medie quindi diminuiscono

all'aumentare delle rotatorie affrontate e all'aumentare della confidenza presa con il mezzo (simulatore) e con il tracciato di guida.

Nel caso in esame di valutazione del gap critico in funzione della rotatoria percorsa, per la distribuzione random il gap critico assume il valore di 3,39 secondi (a differenza dei 3,36 secondi del rilievo di traffico reale, dei 3,32 secondi del CASO 1, dei 3,38 secondi del CASO 2), per la distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto la media è pari a 2,37 secondi (la distribuzione progressiva nel CASO 1 e nel CASO 2 erano pari a 2,38 secondi). I valori delle medie stimati in funzione della rotatoria percorsa non presentano differenze significative rispetto alle medie calcolate in precedenza secondo i diversi approcci proposti (CASO 1 e CASO 2), Si può quindi ritenersi soddisfatti anche di questo calcolo ma si precisa che:

- Il numero di rotatorie percorse è stata una variabile importante per la stima della media del gap critico. In questo caso le 14 rotatorie random e le 14 rotatorie progressive sono state un numero ideale di intersezioni da affrontare in quanto è stato con questo valore che è stato possibile validare le prove effettuate al simulatore di guida. Se si fossero affrontate un numero minore di rotatorie la media del gap critico sarebbe stata maggiore, o in caso contrario con un numero maggiore di rotatorie affrontate la media del gap critico si sarebbe probabilmente ridotta;
- La linea di tendenza che approssima le medie del gap critico in funzione della rotatoria percorsa decresce all'aumentare delle rotatorie percorse. Dopo le prime 4/5 rotatorie della distribuzione random e le prime 4/5 rotatorie della distribuzione progressiva si assiste però ad una "stabilizzazione" della media del gap critico. Se si volesse rappresentare la linea di tendenza delle medie dei gap critici dalla quinta alla quattordicesima rotatoria il risultato sarebbe il seguente:

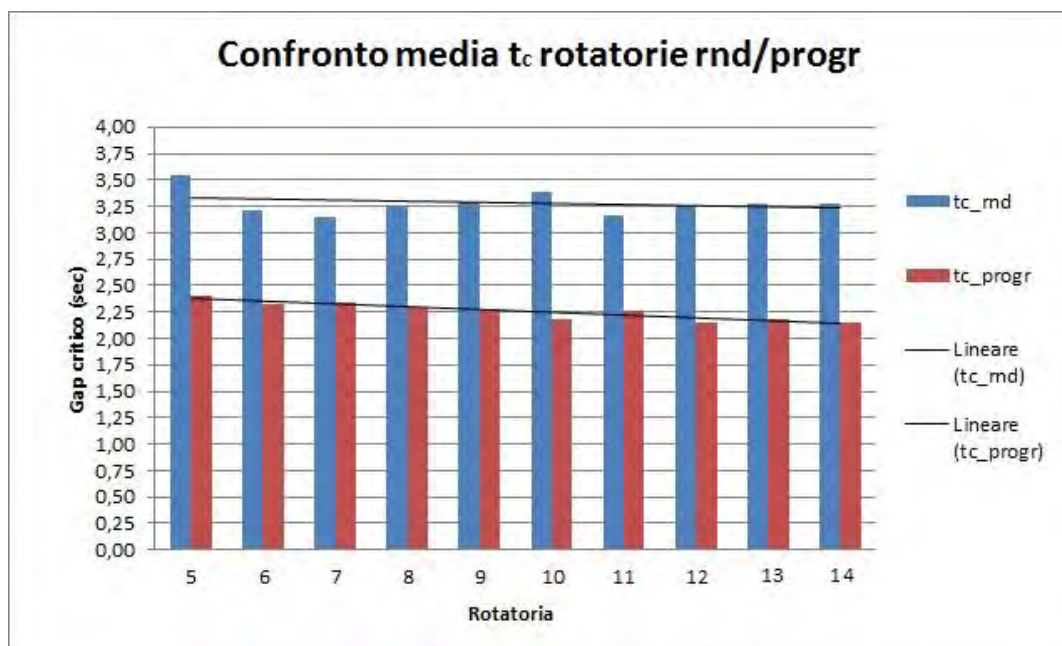


Figura 74 - Confronto tra le medie del gap critico ricavate in funzione della rotatoria percorsa, sia per la distribuzione random che per quella progressiva degli headway. Questo è un caso particolare in quanto si sono tenute in considerazione solamente le medie dei gap critici dalla quinta rotatoria in poi.

Il coefficiente angolare delle linee di tendenza delle due distribuzioni sembra essere prossimo allo zero. Le due rette sono quasi parallele all'asse delle ascisse. Viene mantenuto un comportamento simile da parte dei soggetti anche all'aumentare delle rotatorie percorse.

4.7.5.1 TEST-T A COPPIE CON LA CORREZIONE DI BONFERRONI

Quando si vogliono eseguire confronti multipli, non più solamente tra due categorie, non è possibile ricorrere al test-t utilizzato finora, Il test-t infatti valutava la differenza tra due campioni indipendenti, Ora invece ci sono 6 campioni indipendenti, In questo caso, per valutare se esista o meno una differenza significativa tra i campioni è necessario affidarsi all'ANOVA (Analysis of Variance), Nello specifico bisognerebbe applicare un ANOVA ad una via, per verificare contemporaneamente se le medie di più gruppi sono uguali (o significativamente differenti),

Le ipotesi alla base della procedura ANOVA sono la normalità e l'omoschedasticità (uguali varianze tra le categorie oggetto di studio) tra le categorie e la stessa numerosità delle osservazioni all'interno dei campioni. Solo verificando queste caratteristiche sarà possibile applicare l'analisi della varianza tra i sei gruppi. Nello specifico questa analisi confronterà i sei gruppi nel loro insieme e dirà se esiste un gruppo che sia significativamente differente rispetto agli altri. Ma non specificherà quale sia il gruppo in questione e tantomeno permetterà di confrontare coppie di gruppi separatamente.

L'ANOVA in questo caso non è applicabile, perché nessuna delle ipotesi è verificata: la distribuzione non è normale, i campioni sono eteroschedastici (hanno diversa varianza) e la numerosità (espressa dai valori record nella tabella) varia perché sebbene ci siano sempre 47 soggetti ad affrontare le rotatorie, molte decisioni sono state scartate per incoerenza.

Se fosse stato possibile eseguire la verifica con l'analisi della varianza, e il risultato ottenuto fosse stata una differenza significativa di uno o più campioni tra quelli testati, il passo successivo sarebbe stato confrontare i campioni a coppie per verificare precisamente tra quali rotatorie la media del gap critico fosse statisticamente differente.

Per sviluppare queste comparazioni tra coppie di gruppi sarebbe stato necessario eseguire un test statistico post-hoc, nello specifico un test-t con la correzione di Bonferroni.

La correzione di Bonferroni applicata al test-t di Student, tiene conto del fatto che si stanno facendo confronti multipli, e applica opportune correzioni al livello di significatività α ($\alpha=0,05$). L'utilizzo di questo test porta a risultati più conservativi rispetto a quelli che tengono in considerazione l'errore relativo ad ogni controllo. L'idea alla base della correzione di Bonferroni è che se si esegue un numero di test di significatività pari ad n , per ottenere un livello complessivo di errore di Tipo I pari ad α , si deve semplicemente dichiarare che ciascun test sarà significativo se il valore di probabilità ottenuto sarà minore di α/n .

Seppur le ipotesi statistiche non siano state verificate, si suppone che si possa applicare l'analisi della varianza, e che questa abbia dimostrato che esistono differenze significative tra le medie dei gap critici relativi ad ogni rotatoria. Si applica quindi il test-t con la correzione di Bonferroni, per valutare tra quali coppie esista una differenza significativa. Le coppie confrontate tra loro

sono 10 e il livello di significatività α con la correzione di Bonferroni per ogni coppia confrontata prende il seguente valore:

$$\alpha_i = \frac{\alpha}{n} = \frac{0,05}{10} = 0,005$$

I risultati del test-t per le rotatorie con distribuzione random degli headway vengono riportati nella tabella 27:

Tabella 29 - Confronto tra coppie di rotatorie con distribuzione random degli headway della corrente di conflitto effettuato tramite l'applicazione del test-t e correzione di Bonferroni.

Confronto rotatorie	t-test	n	p-value	Livello significatività α_i	Esito
1_3	1,7538	78	0,0834	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
1_6	5,5059	80	0,0000	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
3_6	4,7535	84	0,0000	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
3_9	5,5176	81	0,0000	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
6_9	0,6261	83	0,5329	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
6_12	0,3719	84	0,7109	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
9_12	0,3913	81	0,6966	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
6_14	0,4635	81	0,6442	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
9_14	0,1615	78	0,8721	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
1_14	6,0477	75	0,0000	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti

Dall' applicazione del test-t con la correzione di Bonferroni alle rotatorie con distribuzione random è possibile notare quanto segue:

- Le medie dei gap critici delle rotatorie numero 1 e 3 non presentano differenze significative tra di loro ma le presentano con le medie dei gap critici delle successive rotatorie;

- Le medie dei gap critici delle rotatorie numero 6, 9, 12 e 14 non presentano differenze significative tra di loro;
- Il test-t con la correzione di Bonferroni evidenzia ciò che si era notato dalla visione delle prove al simulatore e dei risultati di output proposti e cioè che le prime rotatorie affrontate dai tester (rappresentate qui dalla rotatoria numero 1 e 3) sono state affrontate in modo differente rispetto alle successive rotatorie (rappresentate qui dalle rotatorie 6, 9, 12, 14). Più precisamente nelle prime rotatorie i soggetti si sono comportati in modo più cauto ovvero all'aumentare delle rotatorie percorse i tester hanno tenuto un comportamento più aggressivo.

Si riporta ora la distribuzione cumulativa della probabilità di accettazione in funzione del gap della corrente di traffico nell'anello circolatorio per il caso di distribuzione random degli headway.

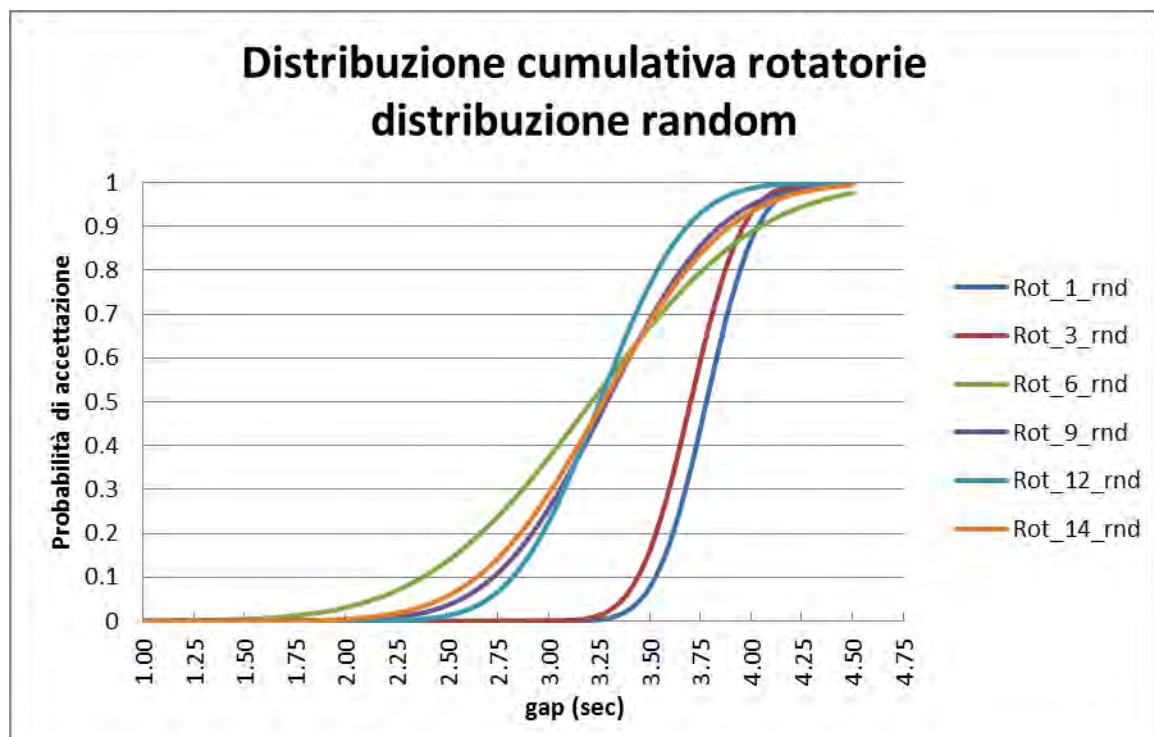


Figura 75 - Distribuzione cumulativa della probabilità d'accettazione dei gap temporali per le rotatorie con distribuzione random degli headway della corrente di conflitto.

Le distribuzioni normali cumulative aiutano a comprendere in maniera più esaustiva come il gap critico possa variare (in questo caso diminuire) al crescere delle rotatorie affrontate. E' possibile individuare il gap critico di ogni curva nel punto d'intersezione tra la curva stessa e l'ordinata di valore 0,5 (cioè dove la probabilità d'accettazione del gap è pari al 50%). Si nota come in questo caso di distribuzione random degli headway le rotatorie 1 e 3 hanno un gap critico maggiore rispetto alle rotatorie successive (valore leggibile nell'asse delle ascisse); è possibile notare una distinzione netta tra le rotatorie (1 e 3) e le successive (6, 9, 12 e 14).

E' possibile osservare che tra la rotatoria 1 e 3, sebbene non ci sia una differenza statistica rilevante, c'è una diminuzione del gap critico di 0,08 secondi. Già tra il primo ed il terzo giro

quindi è presente un leggero aumento della sicurezza nel controllo del mezzo o comunque una maggiore conoscenza del ambiente simulato.

Nei giri successivi invece, vista la casualità della sequenza con cui si presentano i gap della corrente di traffico nell'anello circolatorio al soggetto che deve compiere la manovra di attraversamento, si osserva come non sia possibile definire una diminuzione della media del gap critico all'aumentare delle rotatorie percorse (e il fatto che statisticamente queste rotatorie non siano differenti è un ulteriore fattore a supporto di questa considerazione).

Si propongono ora nella tabella 28 i risultati del test-t per le rotatorie con distribuzione progressiva degli headway:

Tabella 30 - Confronto tra coppie di rotatorie con distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto effettuato tramite l'applicazione del test-t e correzione di Bonferroni.

Confronto rotatorie	t-test	n	p-value	Livello significatività α_i	Esito
1_3	3,3503	92	0,0012	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
1_6	6,2102	92	0,0000	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
3_6	2,7842	92	0,0065	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
3_9	3,4605	92	0,0008	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
6_9	0,6826	92	0,4966	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
6_12	2,1329	90	0,0357	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
9_12	1,4864	90	0,1407	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
6_14	2,3093	90	0,0232	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
9_14	1,6295	90	0,1067	0,005	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
1_14	8,5230	90	0,0000	0,005	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti

Dall' applicazione del test-t con la correzione di Bonferroni alle rotatorie con distribuzione progressiva degli headway è possibile notare quanto segue:

- Le medie dei gap critici delle rotatorie numero 1 e 3 presentano differenze significative tra di loro, La media del gap critico dei 47 soggetti nella prima rotatoria è di 2,873 secondi, nella terza è di 2,569 secondi. Questo risultato contrasta con quello ricavato prima per la distribuzione random, in cui non era stata trovata una differenza significativa tra la prima e la terza rotatoria. Si potrebbe pensare che tramite la distribuzione progressiva si riesca a definire in modo più chiaro il comportamento di gap acceptance dei soggetti rispetto a quella random;
- Le medie dei gap critici delle rotatorie numero 3 e 6 non presentano differenze significative tra di loro, a differenza del caso della distribuzione random in cui si evidenziava una separazione netta tra le prime rotatorie percorse e le successive;
- Le medie dei gap critici delle rotatorie numero 6, 9, 12 e 14 non presentano differenze significative tra di loro;
- Sebbene tra la rotatoria numero 3 e la numero 6 non ci siano differenze significative e tra le rotatorie 6, 9, 12 e 14 non ci siano differenze significative, tra la rotatoria numero 3 e la numero 9 il test-t con la correzione di Bonferroni esprime una differenza significativa.
Il valore della media del gap critico nella rotatoria numero 9 è 2,275 secondi, mentre nella 3 è di 2,569 secondi;
- Il test-t con la correzione di Bonferroni evidenzia anche in questo caso un abbassamento della media del gap critico all'aumentare delle rotatorie percorse, Il fatto che tra la rotatoria 3 e la 6 non ci sia una differenza significativa, ma che tra la 3 e la 9 la significatività nella diversità sia evidente suggerisce che la diminuzione del gap critico nel caso di distribuzione progressiva avvenga in modo più graduale, è cioè al crescere delle rotatorie percorse diminuisce progressivamente anche la media del gap critico;
- Si può concludere dicendo che anche con una distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto nelle prime rotatorie percorse i soggetti si sono comportati in modo più cauto rispetto alle successive.

Si riporta la distribuzione cumulativa della probabilità di accettazione in funzione del gap della corrente di traffico nell'anello circolatorio per il caso di distribuzione progressiva degli headway.

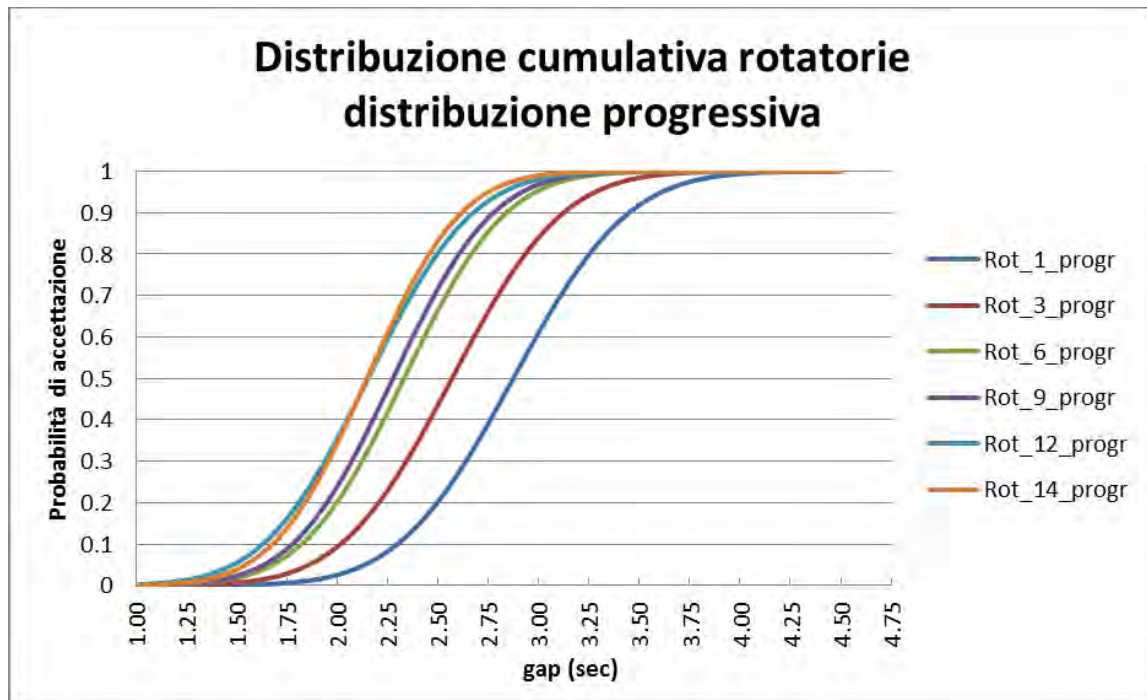


Figura 76 - Distribuzione cumulativa della probabilità d'accettazione dei gap temporali per le rotatorie con distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto,

Dalla distribuzione normale cumulativa relativa alla distribuzione progressiva degli headway è possibile ricavare le seguenti considerazioni:

- L'aspetto più evidente è come la media del gap critico diminuisca in maniera regolare al crescere delle rotatorie percorse. A differenza del caso di distribuzione random infatti in cui si potevano raggruppare in una categoria le rotatorie 1 e 3 (rotatorie affrontate in modo prudente) e in un'altra le rimanenti (rotatorie affrontate in modo più aggressivo) (raggruppamento consigliato l'altro dagli esiti del test-t), nel caso di distribuzione progressiva invece esistono differenze significative rispettivamente tra i gruppi 1 e 3, 1 e 6, 3 e 9 e quindi non è più possibile raggruppare nelle due categorie "prudenti" e "aggressivi" le medie dei gap critici delle rotatorie. Questo perché la media dei gap critici decresce in modo più netto rispetto alla distribuzione random: per ogni rotatoria affrontata, sebbene la differenza tra le medie non sia significativa (come tra le rotatorie 6, 9, 12, 14) si assiste ad una diminuzione della media stessa.
- Le medie delle varianze in funzione della rotatoria percorsa, rappresentate dall'inclinazione delle curve relative a specifiche rotatorie (la varianza incide sulla forma più o meno appiattita della curva), sono più omogenee rispetto al caso di distribuzione random. La varianza esprime la variabilità dei valori assunti dalla variabile aleatoria, e in particolare esprime quanto questi valori si discostino quadraticamente dal valore atteso (dalla media del gap critico). Per la distribuzione progressiva, per le rotatorie in esame, i valori delle varianze si attestano tra 0,37 e 0,45 secondi (per la distribuzione random invece i valori della varianza si trovano tra 0,19 e 0,64 secondi), il che porta ad affermare

che i comportamenti di gap acceptance tenuti dai 47 soggetti nelle diverse rotatorie con sono più coerenti nella distribuzione progressiva rispetto a quella random.

Le motivazioni del comportamento più prudente dei conducenti nelle prime rotatorie del percorso virtuale rispetto alle successive possono essere attribuibili a :

- Scarsa confidenza con il mezzo o con il simulatore di guida nei primi minuti dell'esperimento.
Sebbene ogni tester abbia effettuato un training di alcuni minuti nel quale ha potuto valutare le caratteristiche del mezzo e ambientarsi nel nuovo contesto virtuale, probabilmente la durata del training non è stata sufficiente ovvero la sicurezza con cui si manovrava il mezzo è aumentata all'aumentare delle rotatorie percorse nello scenario virtuale;
- Aumento della confidenza con il tracciato e con le caratteristiche del traffico e della geometria dell'intersezione all'aumentare delle rotatorie percorse.
Anche nella realtà quando un guidatore affronta un tragitto che non è abituato a percorrere presta maggior cautela rispetto ad un tragitto abituale. Le prime rotatorie affrontate (riconducibili ai primi 2 giri del percorso) sono paragonabili ad un percorso di cui non si ha conoscenza. All'aumentare del numero dei giri il conducente si troverà ad affrontare la stessa rotatoria (sia nella geometria che nelle condizioni di traffico di conflitto) random per 14 volte e la stessa rotatoria progressiva per 14 volte. Quindi si perfeziona l'esecuzione della manovra (intesa come decelerazione, fermata e accelerazione) con l'aumentare delle rotatorie affrontate;
- Aumento dell'impazienza per terminare la prova, La prova è durata, in funzione della velocità con cui ogni soggetto affrontava il percorso, tra i 28 e i 40 minuti circa. E' possibile che a causa dell'impazienza si siano accettati gap minori negli ultimi giri del percorso.

4.8 CONFRONTO TRA I METODI DI STIMA DEL GAP CRITICO

Come si è potuto notare dalle osservazioni fatte nel capitolo 2, il metodo della massima verosimiglianza è il più affidabile in termini di precisione di stima del gap critico. Si sono scelti i valori prodotti da quest'ultimo metodo per eseguire i confronti tra le categorie in cui si è suddiviso lo studio. I risultati trovati dall'applicazione degli altri metodi (Logit, Probit, Wu) possono ritenersi attendibili?

Per rispondere a quest'ultima domanda si dovrebbero eseguire dei test statistici, come nel capitolo precedente, nei quali esaminare la differenza tra le medie (e le varianze) di più gruppi. Trovandoci di fronte a confronti multipli (cioè volendo vedere se esiste una differenza significativa tra le medie del gap critico calcolate con i metodi appena citati) bisognerebbe applicare un'analisi della varianza e verificata la presenza di una differenza significativa eseguire un test post-hoc per individuare i gruppi che presentano questa differenza. Le ipotesi di normalità e omoschedasticità della distribuzione delle osservazioni però non sono rispettate nemmeno in questo caso e quindi ai fini di questo studio si suppone di aver applicato l'ANOVA, di essere in presenza di una differenza significativa e successivamente di applicare il test-t con correzione di Bonferroni per individuare quali siano i gruppi significativamente diversi tra loro.

Si distinguono i valori delle medie del gap critico calcolati con le distribuzioni degli headway random da quelli progressivi. Non si esegue un confronto tra i vari sottogruppi (maschi/femmine, mattina/pomeriggio, ecc,) ma si studiano solamente i casi più generali: distribuzione "random" e "progressiva" degli headway della corrente di conflitto.

Si riportano in una tabella (e in un grafico a barre) i valori delle medie e delle varianze del gap critico calcolati con i vari metodi di stima e successivamente gli esiti relativi all'applicazione test-t con correzione di Bonferroni per distribuzione random e progressiva degli headway della corrente di conflitto:

Tabella 31 - Confronto tra medie e varianze del gap critico stimate con i metodi della massima verosimiglianza, metodo Logit, Probit e metodo di Wu, sia per la distribuzione random che per la distribuzione progressiva degli headway.

	MLM	var	LOGIT	var	PROBIT	var	WU	var
Tc_rnd (CASO 1)	3,32	0,22	3,40	0,50	3,38	0,50	3,36	2,93
Tc_progr (CASO 1)	2,38	0,11	2,98	0,40	3,02	0,40	2,09	1,09

Si esaminano ora i risultati prodotti tramite l'applicazione del test-t con correzione di Bonferroni e si confrontano i valori con dei grafici a barre, prima per il caso di distribuzione random degli headway della corrente di conflitto, poi per il caso di distribuzione progressiva:

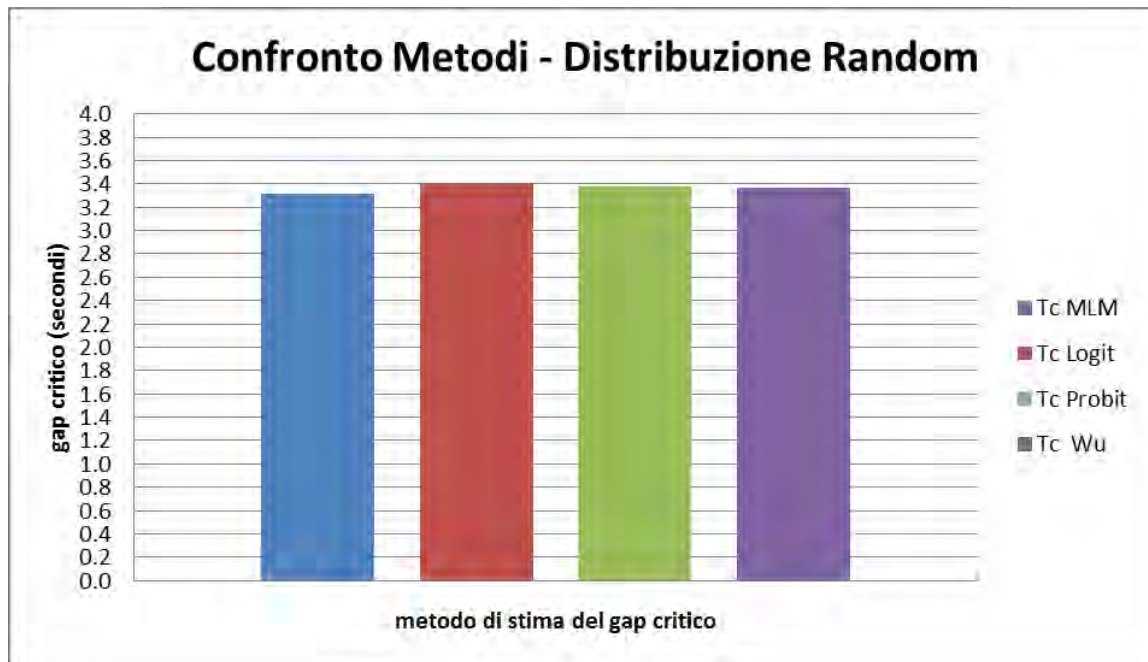


Figura 77 - Confronto delle medie del gap critico stimate con i metodi: MLM (massima Verosimiglianza), Logit, Probit e Wu per la distribuzione random degli headway della corrente di conflitto.

Tabella 32 - Confronto della significatività delle differenze tra le medie del gap critico tra coppie di metodi, tramite l'applicazione del test-t con correzione di Bonferroni per la distribuzione random degli headway della corrente di conflitto.

CONFRONTI DISTRIBUZIONE RANDOM	TEST-T	N	PROBABILITA'	$\alpha_i = \alpha/n$	ESITO
MLM_LOGIT	3,1339	2503	0,0017	0,0125	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
MLM_PROBIT	2,3504	2503	0,0188	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
MLM_WU	1,0785	1365	0,2810	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
LOGIT_PROBIT	0,8827	3894	0,3774	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti

Osservando il grafico a barre ed i risultati sulla significatività delle differenze dedotti con il test-t con correzione di Bonferroni applicata alla distribuzione random degli headway della corrente di conflitto, si possono esprimere le seguenti considerazioni:

- Le medie del gap critico dei quattro metodi si attestano in un intervallo compreso tra i 3,32 secondi del metodo della massima verosimiglianza e i 3,40 secondi del metodo

Logit. A prima vista quindi, essendo la differenza tra il massimo ed il minimo dei valori pari a 0,08 secondi, si tenderebbe ad escludere una differenza significativa tra i metodi di stima;

- Statisticamente però si rileva una differenza proprio tra il MLM ed il metodo Logit. Sapendo che nella pratica una variazione di otto centesimi di secondo non influisce in maniera drastica sulla stima della capacità del ramo d'ingresso della rotatoria, si può affermare che tutti i 4 metodi, nel caso di distribuzione random degli headway della corrente di conflitto, portano ad una stima veritiera della media del gap critico t_c .

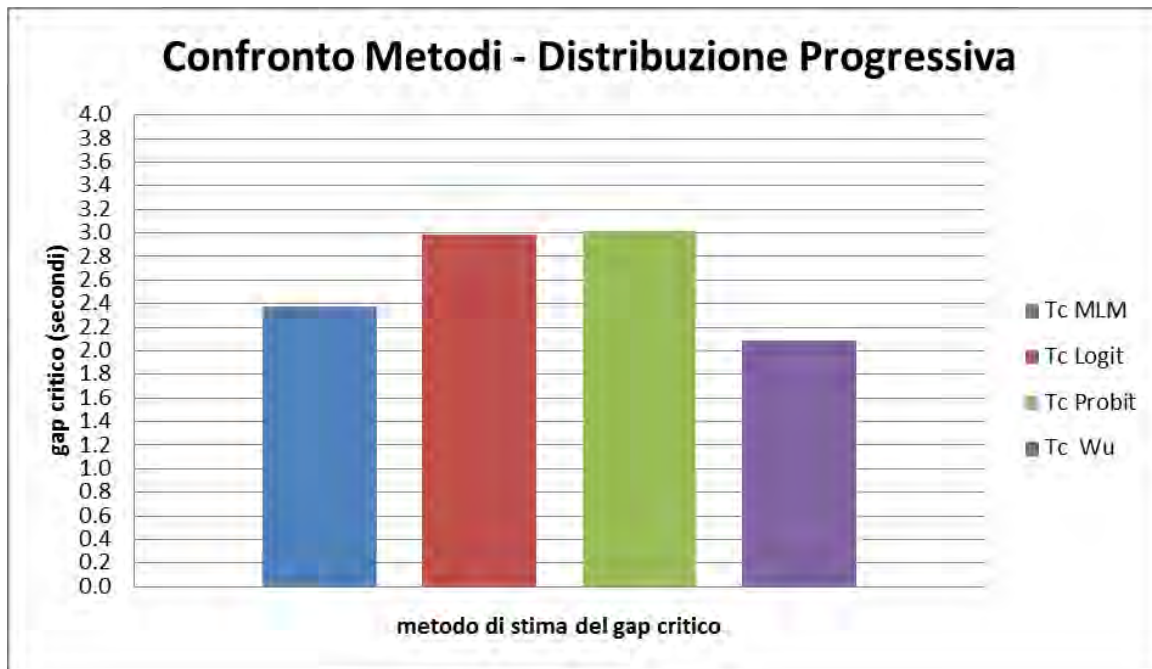


Figura 78 - Confronto delle medie del gap critico stimate con i metodi: MLM (massima Verosimiglianza), Logit, Probit e Wu per la distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto.

Tabella 33 - Confronto della significatività delle differenze tra le medie del gap critico tra coppie di metodi, tramite l'applicazione del test-t con correzione di Bonferroni per la distribuzione progressiva degli headway.

CONFRONTI DISTRIBUZIONE PROGRESSIVA	TEST-T	N	PROBABILITA'	$\alpha_i = \alpha/n$	ESITO
MLM_LOGIT	30,9506	8164	0,0000	0,0125	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
MLM_PROBIT	33,0139	8164	0,0000	0,0125	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
MLM_WU	13,4106	8164	0,0000	0,0125	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
LOGIT_PROBIT	1,1349	15028	0,2565	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti

Osservando il grafico a barre ed i risultati sulla significatività delle differenze dedotti con il test-t con correzione di Bonferroni applicata alla distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto, si possono esprimere le seguenti considerazioni:

- Dall'osservazione del grafico a barre si nota che le medie del gap critico derivanti dai quattro metodi di stima, variano in maniera considerevole tra loro;
- Il test-t di Bonferroni conferma quanto appena dedotto, e cioè che esiste una differenza significativa tra almeno tre coppie dei metodi ed in particolare tra il metodo della massima verosimiglianza confrontato prima con il modello Logit, poi con il modello Probit e infine con il metodo della probabilità d'equilibrio (metodo di Wu);
- Solamente il modello Logit e Probit non dimostrano tra loro una differenza significativa;
- Mediamente, ogni conducente nella distribuzione (P) è tenuto a rifiutare 10/11 gap prima di accettarne uno, mentre nella (R) mediamente se ne rifiutano 2 prima dell'accettazione. Il metodo della massima verosimiglianza considera solamente il massimo gap rifiutato, gli altri tre metodi considerano tutta la sequenza di gap rifiutati. Nella distribuzione random la differenza tra le medie di gap rifiutati tra il MLM e gli altri metodi è pari ad uno. Nella distribuzione progressiva questa differenza è pari a 9/10 gap;
- Quindi la spiegazione per la diversità tra le medie del gap critico nel caso di distribuzione progressiva degli headway rispetto a quella random è da ritrovarsi nel maggior numero di gap rifiutati, che può portare ad una sovrastima delle medie del gap critico per il metodo Logit e Probit, e ad una sottostima per il metodo di Wu;
- Le medie del gap critico tra il metodo Logit e Probit non risultano significativamente differenti. Infatti La procedura e le formulazioni proposte nel metodo Probit sono abbastanza simili al Logit.

4.8.1 CONFRONTO TRA METODI CONSIDERANDO IL SOLO MAX GAP RIFIUTATO

Si vuole ricordare l'articolo proposto da Troutbeck relativo al confronto tra MLM e PEM, in cui si sottolinea che il PEM (ma anche il Logit ed il Probit) utilizza tutti i gap rifiutati, e usando il solo massimo gap rifiutato si violerebbe la teoria alla base della formulazione. Nonostante questo però il PEM viene utilizzato anche con il solo massimo gap rifiutato.

Spinti dalla curiosità si vuole quindi stimare la media del gap critico, sia nel caso di distribuzione random che di quella progressiva, implementando nuovamente i quattro metodi di calcolo finora visti, per osservare come l'uso del solo massimo gap rifiutato possa far variare il risultato.

Si riportano in una tabella le medie e le varianze del gap critico stimate con i metodi Logit, Probit e Wu nel caso di utilizzo del solo massimo gap rifiutato e non di tutta la sequenza di rifiuti:

Tabella 34 - Confronto tra medie e varianze del gap critico stimate con i metodi della massima verosimiglianza, metodo Logit, Probit e metodo di Wu nel caso di utilizzo del solo massimo gap rifiutato, sia per la distribuzione random che per la distribuzione progressiva degli headway.

	MLM	var	LOGIT	var	PROBIT	var	WU	var
Tc_rnd (CASO 1)	3,32	0,22	3,14	0,44	3,13	0,44	3,38	2,87
Tc_progr (CASO 1)	2,38	0,11	2,34	0,24	2,33	0,40	2,38	1,68

Si esaminano ora i risultati prodotti tramite l'applicazione del test-t con correzione di Bonferroni e si confrontano i valori con dei grafici a barre, prima per il caso di distribuzione random degli headway della corrente di conflitto, poi per il caso di distribuzione progressiva:

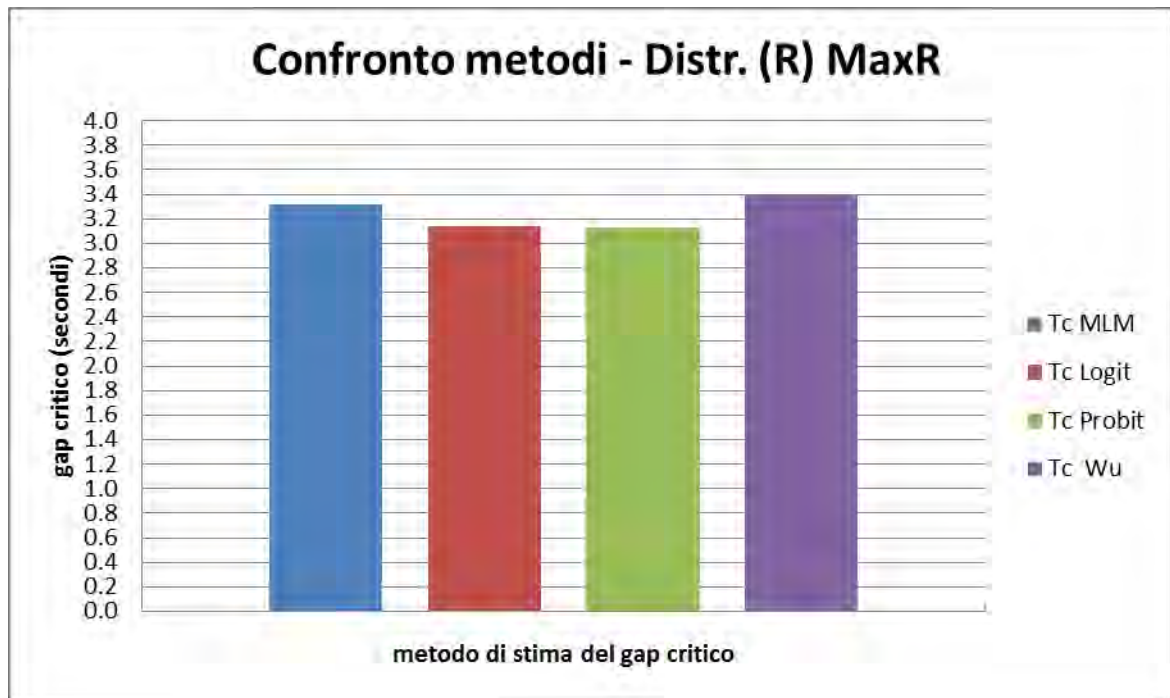


Figura 79 - Confronto delle medie del gap critico stimate con i metodi: MLM (massima Verosimiglianza), Logit, Probit e Wu nel caso di utilizzo del solo massimo gap rifiutato per la distribuzione random degli headway della corrente di conflitto.

Tabella 35 - Confronto della significatività delle differenze tra le medie del gap critico tra coppie di metodi (che utilizzano solamente il massimo gap rifiutato), tramite l'applicazione del test-t con correzione di Bonferroni per la distribuzione random degli headway della corrente di conflitto.

CONFRONTI DISTRIBUZIONE RANDOM	TEST-T	N	PROBABILITA'	$\alpha_i = \alpha/n$	ESITO
MLM_LOGIT	6,7225	1845	0,0000	0,0125	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
MLM_PROBIT	7,1658	1949,367	0,0000	0,0125	Le medie dei gap critici sono significativamente differenti
MLM_WU	1,3291	3236	0,1839	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
LOGIT_PROBIT	0,4615	2578	0,6444	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti

Osservando il grafico a barre ed i risultati sulla significatività delle differenze dedotti con il test-t con correzione di Bonferroni applicata alla distribuzione random degli headway della corrente di conflitto, nel caso di considerare nella procedura solamente i massimi gap rifiutati per ogni decisione, si possono esprimere le seguenti considerazioni:

- Con il metodo di Wu si stima una media del gap critico pari a 3,36 secondi, 2 centesimi di secondo in meno rispetto al caso precedente in cui si è considerata tutta la sequenza di gap rifiutati. Il metodo di Wu, nel caso di distribuzione random, propone quindi un risultato molto simile al caso precedente;
- Il metodo Logit ed il metodo Probit stimano rispettivamente una media di 3,14 e 3,13 secondi, mentre nel caso dell'intera sequenza di gap rifiutati le medie del gap critico erano pari a 3,40 e 3,38 secondi, Rispetto al caso precedente quindi la differenza è notevole;
- La media del gap critico stimata con il metodo della massima verosimiglianza risulta significativamente differente rispetto a quelle ricavate con il metodo Logit e Probit, a differenza del caso precedente in cui le medie erano simili.

Considerare solo il massimo gap rifiutato pregiudica in modo considerevole la bontà delle stime.

Si esaminano ora i risultati prodotti tramite l'applicazione del test-t con correzione di Bonferroni e si confrontano i valori con dei grafici a barre per il caso di distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto:

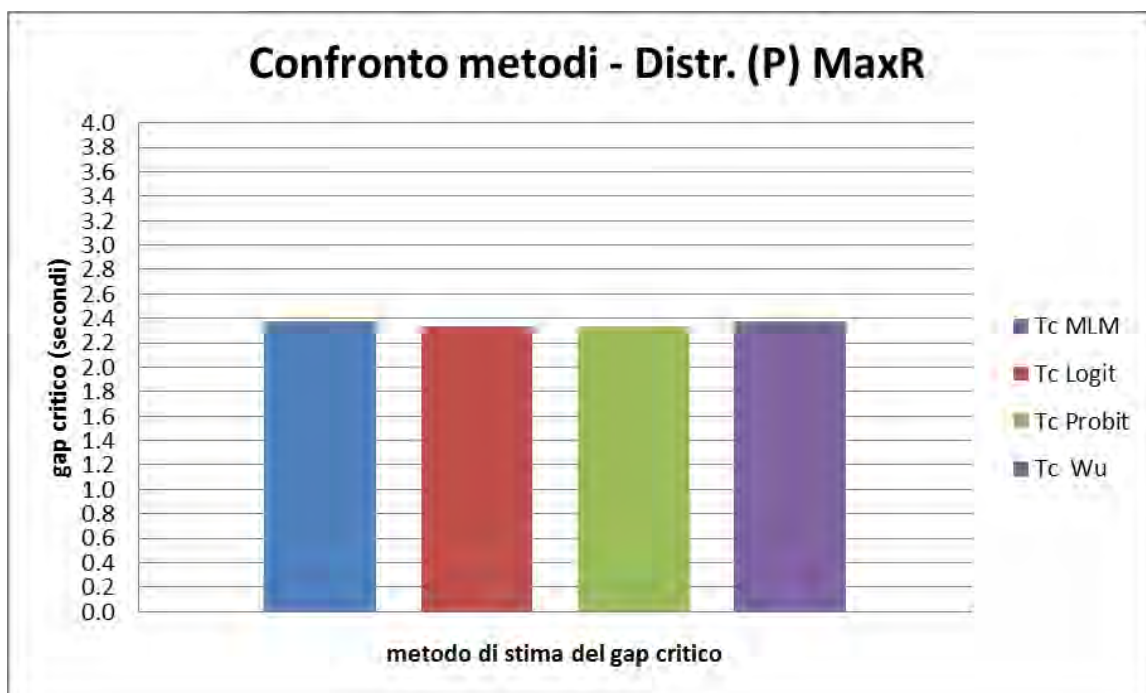


Figura 80- Confronto delle medie del gap critico stimate con i metodi: MLM (massima Verosimiglianza), Logit, Probit e Wu nel caso di utilizzo del solo massimo gap rifiutato per la distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto.

Tabella 36 - Confronto della significatività delle differenze tra le medie del gap critico tra coppie di metodi (che utilizzano solamente il massimo gap rifiutato), tramite l'applicazione del test-t con correzione di Bonferroni per la distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto.

CONFRONTI DISTRIBUZIONE PROGRESSIVA	TEST-T	N	PROBABILITA'	$\alpha_i = \alpha/n$	ESITO
MLM_LOGIT	1,9546	1.952	0,0508	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
MLM_PROBIT	2,1767	1.952	0,0296	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
MLM_WU	0,1496	1.952	0,8811	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti
LOGIT_PROBIT	0,2605	2.604	0,7945	0,0125	Le medie dei gap critici NON sono significativamente differenti

Osservando il grafico a barre ed i risultati sulla significatività delle differenze dedotti con il test-t con correzione di Bonferroni applicata alla distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto, nel caso di considerare nella procedura solamente i massimi gap rifiutati per ogni decisione, si possono esprimere le seguenti considerazioni:

- La differenza tra il valore minimo della media del gap critico (2,33 secondi, metodo Probit) ed il valore massimo della media del gap critico (2,38 secondi, sia per il metodo della massima verosimiglianza che per il metodo di Wu) è di 5 centesimi di secondo. Confrontando i gruppi tra loro non si osservano differenze statisticamente significative, Nel caso precedente invece, in cui si era considerata l'intera sequenza di gap rifiutati, solamente tra il metodo Logit e Probit non sussistevano differenze significative. Questo risultato dimostra come il numero di gap rifiutati vada ad influenzare pesantemente la stima della media del gap critico. Un eccessivo numero di gap non oltrepassabili proposti nella sequenza, può, nel caso si utilizzino questi modelli di stima, portare ad erronee valutazioni della media del gap critico;
- Nello specifico, rispetto al caso precedente in cui la media del gap critico con il modello Logit era pari a 2,98 secondi e con il modello Probit 3,02 secondi, il valore si abbassa notevolmente (rispettivamente a 2,34 e 2,33 secondi). Questo perché nei modelli Logit e Probit al diminuire dei gap rifiutati decresce anche la media del gap critico.

5 CAPITOLO 5 – DETERMINAZIONE DELLA CAPACITA'

La stima del gap critico t_c è finalizzata alla determinazione, nel caso più generale, della capacità alla manovra del ramo secondario di un'intersezione; nel caso specifico, della capacità alla manovra del ramo di ingresso della rotatoria.

In questo capitolo si vuole analizzare la capacità del ramo di ingresso alla rotatoria utilizzando i metodi analitici basati sulla teoria del gap acceptance, per osservare come possa variare la capacità inserendo il valore del gap critico stimato utilizzando la distribuzione degli headway (della corrente di conflitto) progressiva (P). Questo perché se il valore reale del gap critico fosse quello progressivo, di conseguenza la capacità di ingresso alla rotatoria aumenterebbe sensibilmente. Si eseguirà quindi un confronto tra il gap critico del caso random (corrispettivo della realtà) ed il caso progressivo.

Dei metodi analitici proposti per il calcolo della capacità nella letteratura della teoria e tecnica della circolazione si sceglie di utilizzare i seguenti :

- Metodo proposto dall' HCM 2000;
- Metodo di Siegloch;
- Metodo di Wu;
- Metodo proposto dall' HCM 2010.

Nel capitolo 2 si era già discusso riguardo alle ipotesi e alla determinazione della capacità all'approccio di una rotatoria. Di seguito quindi si riporteranno solamente le formule utilizzate e si eseguiranno i confronti tra i metodi esaminati.

Si riportano i valori del:

- Gap critico t_c relativo alla sequenza di headway random e progressiva, ricavato dall'esperimento al simulatore di guida con il metodo della massima verosimiglianza, e relativamente al CASO 1;
- Follow-up time t_f stimato nel precedente lavoro di tesi dai rilievi di traffico effettuati per la rotatoria e mantenuto valido anche in questo contesto.

Tabella 37 - Media del Gap critico e follow-up time delle distribuzioni random e progressive degli headway

	Random (R) (sec)	Progressiva (P) (sec)
Gap critico t_c	3,32	2,38
Follow-up time t_f	2,70	2,70

Per ogni metodo si determinerà la capacità del ramo d'ingresso alla rotatoria in funzione di una serie di flussi di conflitto, in modo da poter ricavare una curva che esprima la variazione della capacità al variare del flusso nell'anello circolatorio.

5.1 HCM 2000

La stima della capacità all'approccio secondo l' Highway Capacity Manual 2000, relativa ad un'intersezione a rotatoria con una corsia del ramo d'ingresso e una corsia dell'anello circolatorio, è data dall'equazione:

$$c_a = \frac{v_c e^{-v_c t_c / 3600}}{1 - e^{-v_c t_f / 3600}}$$

Dove:

- c_a : capacità del ramo d'approccio (ae/h)
- v_c : flusso circolante nell'anello (di conflitto) (ae/h)
- t_c : gap critico (s)
- t_f : follow-up time (s)

Si riportano i valori della capacità nel caso random e progressivo:

Tabella 38 - Valori della capacità del ramo di ingresso alla rotatoria in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo HCM 2000, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway

flusso conflitto v_c (veic/h)	HCM 2000 rnd (veic/h)	HCM 2000 progr (veic/h)
100	1.260,63	1.295,42
200	1.191,34	1.258,00
300	1.125,33	1.221,09
400	1.062,48	1.184,70
500	1.002,67	1.148,86
600	945,78	1.113,59
700	891,71	1.078,90
800	840,35	1.044,81
900	791,57	1.011,33
1000	745,29	978,48
1100	701,39	946,26
1200	659,78	914,68

E' possibile notare come il contributo dovuto ad una stima più bassa del gap critico (quella relativa alla distribuzione progressiva degli headway) aumenti con l'aumentare del volume di traffico di conflitto. Nel caso peggiore in cui il flusso nell'anello circolatorio sia di 1200 veic/h (è una condizione ipotetica di traffico molto elevato, suggerita come limite superiore dall'HCM: nel caso in cui si dovesse avere una distribuzione degli headway costante il gap tra due veicoli successivi sarebbe di 3 secondi) nel caso di distribuzione progressiva degli headway si arriva ad avere un incremento di capacità 255 veic/h rispetto alla distribuzione random.

Si graficano i valori tabulati per interpretare con maggiore chiarezza la differenza esistente tra le capacità calcolate con le distribuzioni degli headway random e quelle progressive:

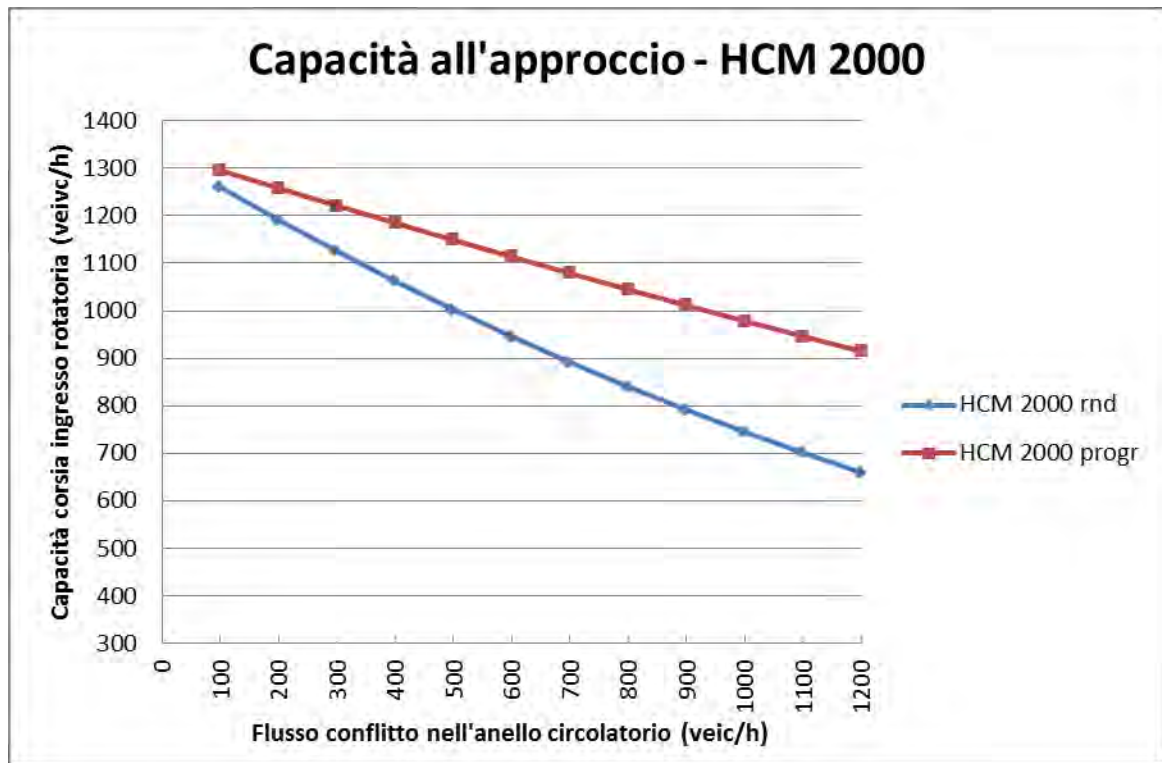


Figura 81 – Rappresentazione grafica della capacità del ramo di ingresso alla rotatoria in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo HCM 2000, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway

5.2 SIEGLOCH

La stima della capacità associata al ramo d'ingresso di una rotatoria è data dall'equazione:

$$Q_e = \frac{3600e^{-\frac{Q_c t_0}{3600}}}{t_f}$$

Dove:

- Q_e : flusso in entrata (ae/h)
- Q_c : flusso circolante (ae/h)
- $t_0 = t_c - 0,5 t_f$, definito come parametro di gap zero
- t_f : follow-up time

Si riportano i valori della capacità nel caso random e progressivo:

Tabella 39- Valori della capacità del ramo di ingresso alla rotatoria in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo di Siegloch, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway

flusso conflitto v_c (veic/h)	Siegloch rnd (veic/h)	Siegloch progr (veic/h)
100	1.214,52	1.248,04
200	1.106,29	1.168,20
300	1.007,71	1.093,46
400	917,91	1.023,51
500	836,12	958,03
600	761,61	896,74
700	693,74	839,38
800	631,92	785,68
900	575,61	735,42
1000	524,32	688,37
1100	477,60	644,33
1200	435,04	603,11

Con questo metodo, con un flusso di conflitto di 1200 veic/h nel caso di distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto si ha un incremento di capacità di 168 veic/h.

Il grafico relativo al metodo di Siegloch è il seguente:

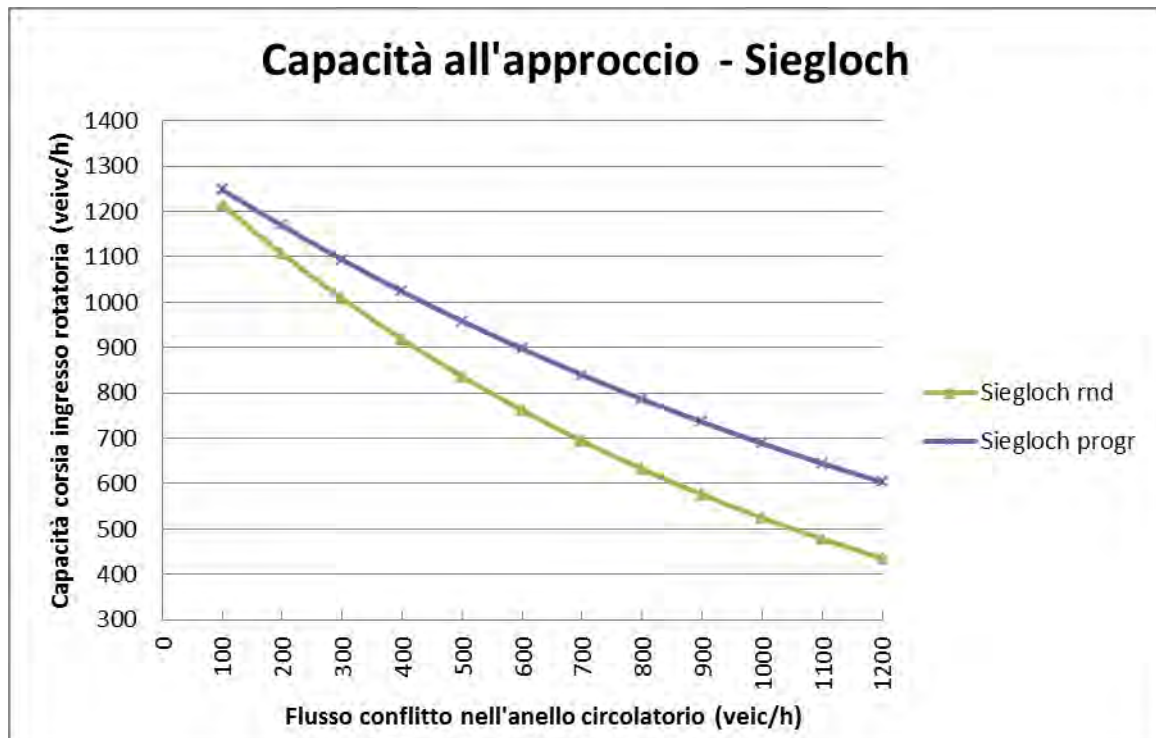


Figura 82 – Rappresentazione grafica della capacità del ramo di ingresso alla rotatoria in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo di Siegloch, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway

5.3 METODO DI WU

La stima della capacità associata al ramo d'ingresso di una rotatoria è data dall'equazione:

$$Q_e = 3600 \left(1 - \frac{t_{min} q_k}{3600 n_k} \right)^{n_k} \frac{n_z}{t_f} e^{-\frac{q_k}{3600} \left(t_c - \frac{t_f}{2} - t_{min} \right)}$$

Dove:

- Q_e : capacità all'approccio del ramo di ingresso (ae/h)
- q_k : traffico di conflitto (nell'anello circolatorio) (ae/h)
- n_k : numero di corsie nell'anello
- n_z : numero di corsie nel ramo di ingresso
- t_{min} : gap minimo tra successivi veicoli nell'anello (s)

Per questa rotatoria $n_k = 1$, $n_z = 1$, e $t_{min}=1,29$ secondi

Si riportano i valori delle capacità in funzione del flusso di conflitto:

Tabella 40 - Valori della capacità del ramo di ingresso alla rotatoria in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo di Wu, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway

flusso conflitto v_c (veic/h)	Wu rnd (veic/h)	Wu progr (veic/h)
100	1.260,11	12.94,88
200	1.189,26	1.255,81
300	1.120,74	1.216,11
400	1.054,48	1.175,79
500	990,41	1.134,83
600	928,48	1.093,22
700	868,62	1.050,96
800	810,77	1.008,04
900	754,89	964,46
1000	700,90	920,20
1100	648,77	875,26
1200	598,44	829,64

Inserendo il gap critico ricavato dalla distribuzione degli headway progressiva all'interno della formula proposta da Wu si ha un incremento della capacità di 34 veic/h per un flusso di conflitto di 100 veic/h fino a 232 veic/h per un flusso di conflitto di 1200 veic/h.

Il grafico relativo al metodo di Wu è:

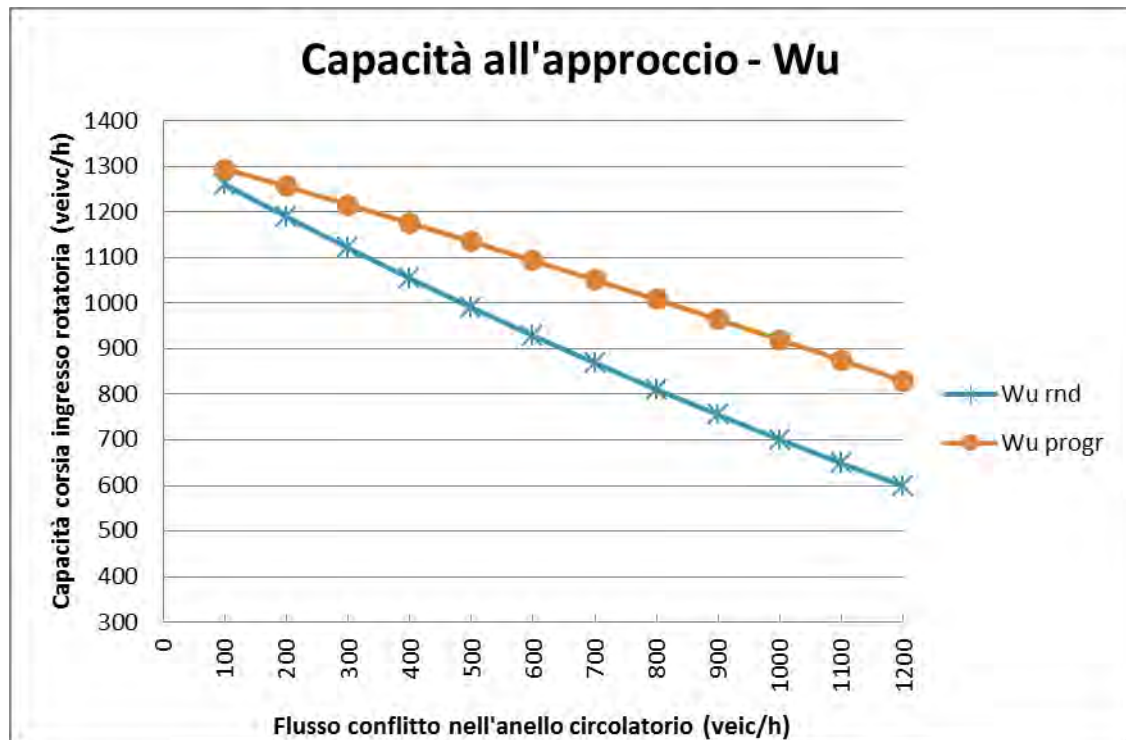


Figura 83 – Rappresentazione grafica della capacità del ramo di ingresso alla rotatoria in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo di Wu, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway.

5.4 HCM 2010

La stima della capacità associata al ramo d'ingresso di una rotatoria è data dall'equazione:

$$c_{pce} = Ae^{-(Bv_c)}$$

Dove:

- $A = \frac{3600}{t_f}$
- $B = \frac{t_c - 0,5t_f}{3600}$
- c_{pce} : capacità della corsia di ingresso alla rotatoria (ae/h)
- v_c : flusso di conflitto nell'anello circolatorio (ae/h)

Si riportano i valori relativi al calcolo della capacità nel caso di gap critico stimato dalla distribuzione degli headway random e dalla distribuzione progressiva.

Tabella 41 - Valori della capacità del ramo di ingresso alla rotatoria in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo HCM 2010, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway

flusso conflitto v_c (veic/h)	HCM 2010 rnd (veic/h)	HCM 2010 progr (veic/h)
100	1.260,93	1.295,73
200	1.192,46	1.259,18
300	1.127,70	1.223,66
400	1.066,46	1.189,15
500	1.008,55	1.155,61
600	953,78	1.123,01
700	901,99	1.091,34
800	853,01	1.060,56
900	806,69	1.030,64
1000	762,88	1.001,57
1100	721,46	973,32
1200	682,28	945,87

Nel caso di un elevato flusso di conflitto (1200 veic/h) considerando la capacità calcolata con la media del gap critico ricavata dalla distribuzione progressiva degli headway si ha un aumento della capacità di circa 263 veic/h rispetto alla distribuzione random. Se si graficano i valori riportati nella tabella precedente si ottengono le seguenti curve:

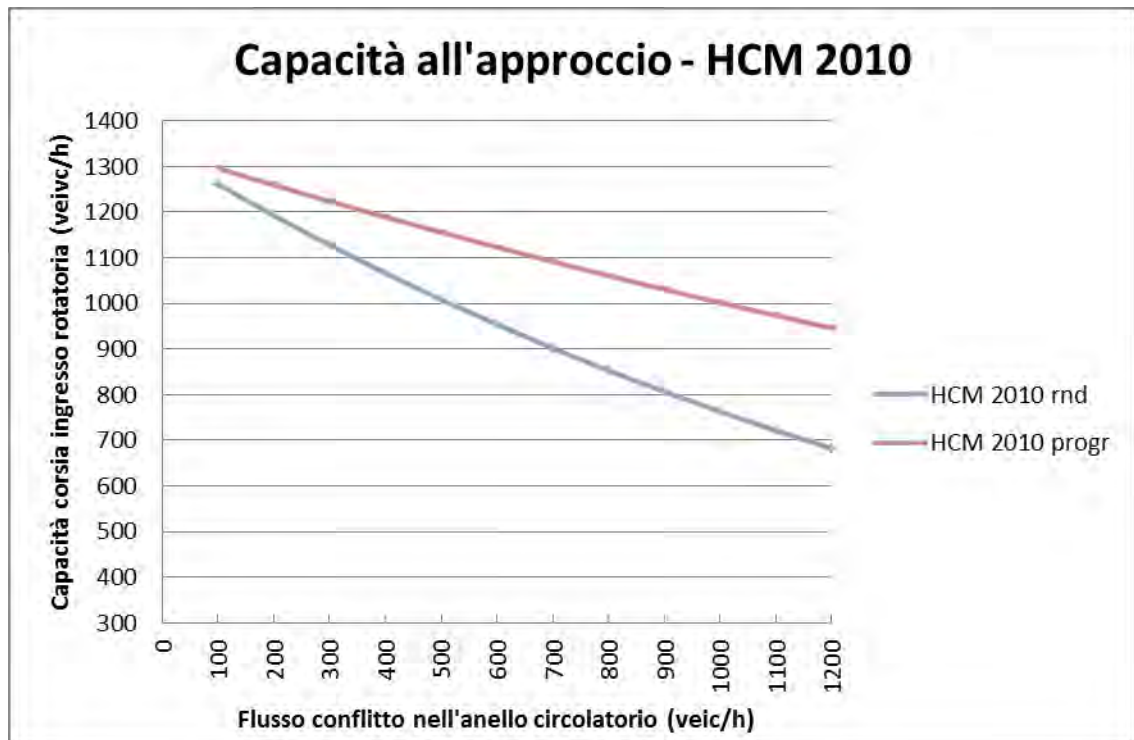


Figura 84 – Rappresentazione grafica della capacità del ramo di ingresso alla rotonda in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, ricavati con il metodo HCM 2010, per i casi di distribuzione random e progressiva degli headway.

5.5 CONFRONTO TRA I METODI DI STIMA DELLA CAPACITA'

Di seguito si riportano i grafici relativi alle stime della capacità in funzione dei gap critici calcolati con distribuzione degli headway random e progressiva, per i vari metodi proposti in questa tesi,

Tabella 42 - Insieme dei valori delle capacità del ramo d'ingresso di una rotatoria calcolate in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, per i metodi HCM 2000, Siegloch, Wu, 2010 sia per le distribuzioni random che per quelle progressive degli headway.

flusso confl, vc (veic/h)	HCM 2000 rnd (veic/h)	HCM 2000 progr (veic/h)	Siegloch rnd (veic/h)	Siegloch progr (veic/h)	Wu rnd (veic/h)	Wu progr (veic/h)	HCM 2010 rnd (veic/h)	HCM 2010 progr (veic/h)
100	1260,63	1295,42	1214,52	1248,04	1260,11	1294,88	1260,93	1295,73
200	1191,34	1258,00	1106,29	1168,20	1189,26	1255,81	1192,46	1259,18
300	1125,33	1221,09	1007,71	1093,46	1120,74	1216,11	1127,70	1223,66
400	1062,48	1184,70	917,91	1023,51	1054,48	1175,79	1066,46	1189,15
500	1002,67	1148,86	836,12	958,03	990,41	1134,83	1008,55	1155,61
600	945,78	1113,59	761,61	896,74	928,48	1093,22	953,78	1123,01
700	891,71	1078,90	693,74	839,38	868,62	1050,96	901,99	1091,34
800	840,35	1044,81	631,92	785,68	810,77	1008,04	853,01	1060,56
900	791,57	1011,33	575,61	735,42	754,89	964,46	806,69	1030,64
1000	745,29	978,48	524,32	688,37	700,90	920,20	762,88	1001,57
1100	701,39	946,26	477,60	644,33	648,77	875,26	721,46	973,32
1200	659,78	914,68	435,04	603,11	598,44	829,64	682,28	945,87

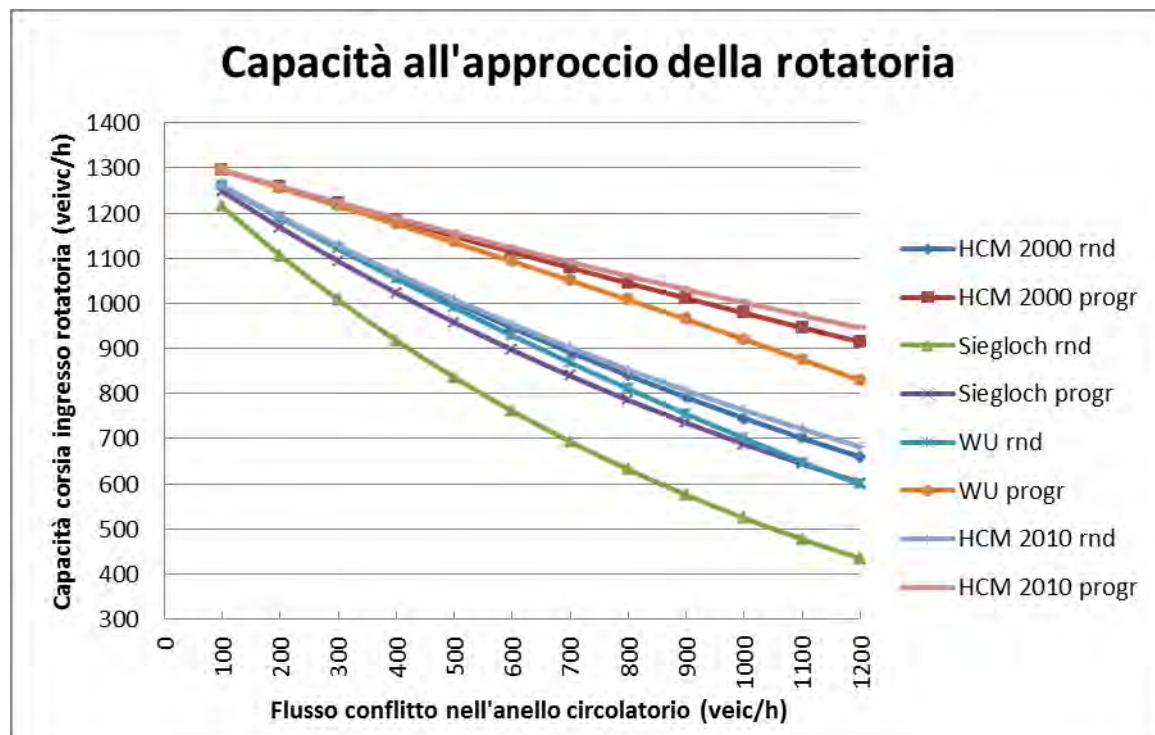


Figura 85 – Rappresentazione grafica dei valori delle capacità nel ramo d'ingresso di una rotatoria calcolate in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio, per i metodi HCM 2000, Siegloch, Wu, 2010 sia per le distribuzioni random che per quelle progressive degli headway.

Dall'osservazione delle curve si esprimono le seguenti considerazioni:

- Per tutti i metodi le capacità determinate dalle medie del gap critico delle distribuzioni di headway progressive producono valori maggiori rispetto alle relative capacità calcolate dalle medie dei gap critici delle distribuzioni random;
- Solamente i valori ricavati dalla capacità della distribuzione progressiva di Sieglach sono inferiori rispetto a quelli ricavati dalle capacità della distribuzione random degli altri tre metodi;
- Il metodo di Sieglach produce stime della capacità inferiori rispetto agli altri tre metodi, sia per le stime prodotte dal gap critico della distribuzione random che per quelle prodotte dalla distribuzione progressiva;
- I metodi proposti dall' HCM 2000 e dall' HCM 2010 producono risultati molto simili tra loro. L'utilizzo di un metodo rispetto all'altro non comporta differenze significative, Per esempio per il flusso di conflitto di 100 veic/h non vi è differenza tra le capacità prodotte dall' HCM 2000 e dall' HCM 2010, per il flusso di conflitto di 1200 veic/h la differenza è di circa 40 veicoli (per il caso progressivo);
- Il metodo proposto dall' HCM 2010 produce le stime di capacità maggiori rispetto agli altri metodi, sia relativamente al caso random che a quello progressivo. Le formule proposte dall' Highway Capacity Manual, a parità di gap critico e di flusso di conflitto, danno origine ai volumi di traffico più elevati rispetto agli altri metodi. Sebbene l' HCM 2000 sia suggerito come guida per il calcolo della capacità, produce le stime meno cautelative.
- La differenza tra le stime della capacità prodotta tra il metodo HCM 2010 (capacità maggiori) e il metodo di Sieglach (capacità minori) si attesta tra i 47 veic/h (per il flusso di conflitto di 100 veic/h) ed i 340 veic/h (per il flusso di conflitto di 1200 veic/h);
- Con un flusso di conflitto inferiore od uguale agli 800 veic/h i metodi proposti nell' HCM 2000, HCM 2010 ed il metodo di Wu producono stime della capacità molto simili tra loro, con una differenza massima di 52 veic/h (per il caso in cui il flusso di conflitto è di 800 veic/h) tra il metodo HCM 2010 ed il metodo di Wu, Oltre gli 800 veic/h la differenza aumenta all'aumentare del volume di conflitto;
- La capacità del ramo di ingresso di una rotatoria calcolata con la media del gap critico della distribuzione progressiva degli headway produce stime più elevate e quindi meno cautelative rispetto a quella calcolata con la distribuzione random degli headway della corrente di conflitto.

5.6 CONFRONTO CON UN METODO DI STIMA EMPIRICO (CETUR)

Si vuole riportare di seguito un confronto tra un metodo di stima empirico (basato sulle caratteristiche geometriche e di traffico della rotatoria) ed uno analitico (basato invece sulla teoria del gap acceptance). Si sceglie di analizzare il metodo Cetur in quanto adatto al calcolo della capacità del ramo di ingresso di rotatorie urbane (come il caso in esame) e confrontarlo con il metodo proposto dall' HCM 2000.

Si ripropongono di seguito le formule proposte dal Cetur:

$$C_e = \gamma(1500 - 0,83Q_g)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{se ramo di ingresso ad 1 corsia} \\ 1,5 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$Q_g = bQ_c + 0,2 Q_u$$

$$b = \begin{cases} 1 & \text{se } ANN < 8 \text{ m} \\ 0,9 & \text{se } ANN \geq 8 \text{ m e } D < 40 \text{ m} \\ 0,7 & \text{se } ANN \geq 8 \text{ m e } D \geq 40 \text{ m} \end{cases}$$

Dove:

- ANN : larghezza dell'anello circolatorio (m)
- D : Diametro rotatoria (m)
- Q_g : Flusso di disturbo (veic/h)
- Q_u : Flusso uscente dall'anello circolatorio (veic/h)
- Q_c , Flusso circolante nell'anello circolatorio (veic/h)
- C_e : Capacità del ramo d'ingresso (veic/h)

I dati della rotatoria oggetto di verifica sono:

- ANN = 9,50 metri
- D = 29 metri
- $Q_u = 0$ veic/h
- $\gamma = 1$
- $b = 0,9$

Si riportano di seguito i valori stimati per la capacità C_e in funzione del flusso circolante nell'anello circolatorio Q_c .

Tabella 43 - Confronto tra i valori di capacità del ramo d'ingresso ad una rotatoria tra un metodo di stima empirico (CETUR) ed uno analitico (HCM 2000) nei suoi due casi di distribuzione random e progressiva degli headway della corrente di conflitto, in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio

flusso conflitto Q_c (veic/h)	CETUR (veic/h)	HCM 2000 rnd (veic/h)	HCM 2000 progr (veic/h)
100	1.425,30	1.260,63	1.295,42
200	1.350,60	1.191,34	1.258,00
300	1.275,90	1.125,33	1.221,09
400	1.201,20	1.062,48	1.184,70
500	1.126,50	1.002,67	1.148,86
600	1.051,80	945,78	1.113,59
700	977,10	891,71	1.078,90
800	902,40	840,35	1.044,81
900	827,70	791,57	1011,33
1000	753,00	745,29	978,48
1100	678,30	701,39	946,26
1200	603,60	659,78	914,68

Si graficano i valori appena trovati con il metodo CETUR confrontandoli con le capacità "random" e "progressive" del metodo HCM 2000.

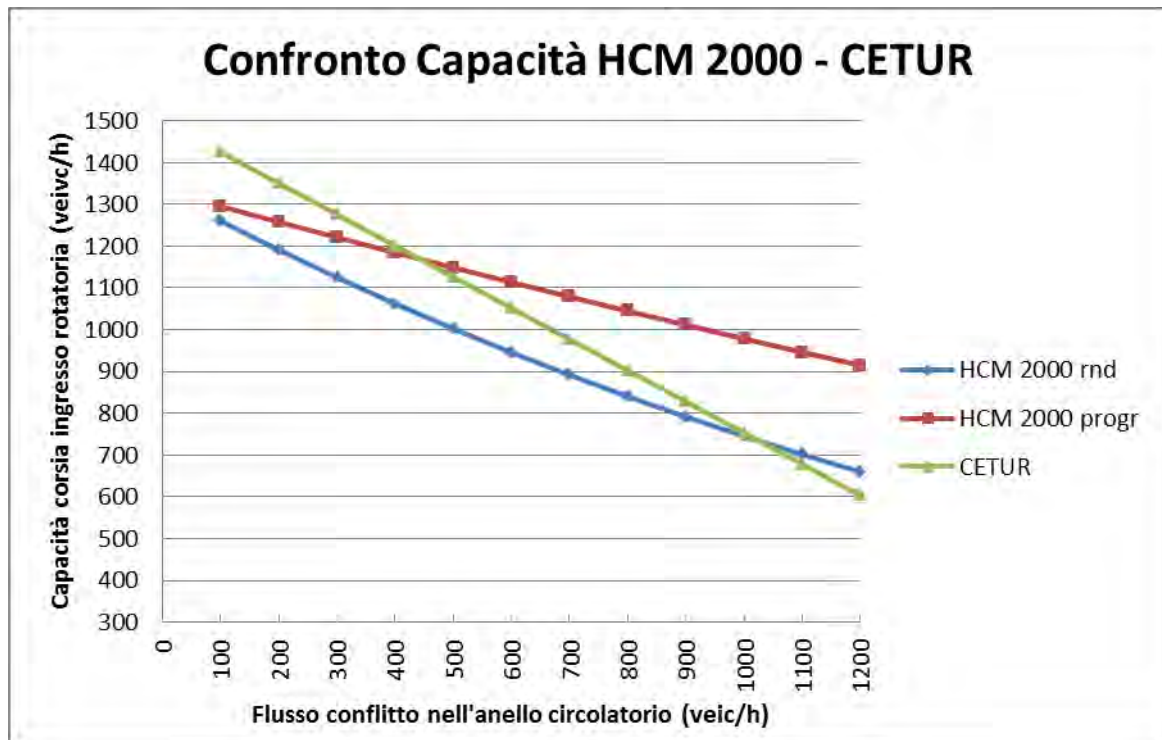


Figura 86 – Rappresentazione grafica dei valori di capacità del ramo d'ingresso ad una rotatoria tra un metodo di stima empirico (CETUR) ed uno analitico (HCM 2000) nei suoi due casi di distribuzione random e progressiva degli headway della corrente di conflitto, in funzione del flusso di conflitto nell'anello circolatorio

Osservando i dati proposti nel grafico ciò che risulta più evidente è la vicinanza tra le stime prodotte dal metodo Cetur con i valori "progressivi" del metodo HCM 2000 per flussi di conflitto inferiori ai 600 veic/h.

All'aumentare del volume di traffico di conflitto il metodo empirico si avvicina molto di più alle stime analitiche ricavate dalla distribuzione random degli headway della corrente di conflitto . Per un flusso di traffico urbano compreso tra i 300 e i 1000 veic/h il metodo Cetur sovrastima la capacità rispetto alla formula dell' HCM 2000 in cui si è determinato il gap critico con la distribuzione degli headway random della corrente di conflitto.

6 CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI

Tramite l'applicazione del test-t di Student si è potuto osservare che non esistono differenze significative tra la media del gap critico "reale" ricavata dal rilievo di traffico eseguito a Mirano (Ve) e la media della distribuzione random CASO 1 e tra la media del gap critico "reale" la media della distribuzione random CASO 2.

E' stato possibile quindi validare i dati e ritenere attendibili i risultati tratti dall'esperimento al simulatore di guida.

Anche la media del gap critico relativa alla distribuzione progressiva degli headway è stata calcolata con i due approcci appena esposti per la distribuzione random. Il CASO 1 e il CASO 2 portano alla stessa media del gap critico (2,38 secondi). Rispetto alla distribuzione random si ha una riduzione del 30% (di un secondo) del valore del gap critico.

La riduzione del valore della media del gap critico nel caso di distribuzione di headway progressiva crescente (P) è dovuta al fatto che:

- verosimilmente ogni conducente ha accettato il primo gap giudicato di dimensioni idonee per essere attraversato;
- nella stima del gap critico, non si sono avute incoerenze da parte dei soggetti che hanno compiuto la scelta di accettazione o rifiuto del gap (il massimo gap rifiutato è stato sempre minore del gap accettato);
- la differenza di solo 0,2 secondi tra massimo gap rifiutato e gap accettato permette di identificare in maniera più precisa il valore della media del gap critico;

Le considerazioni che si possono fare sulla distribuzione "progressiva" degli headway sono:

- I soggetti potrebbero aver intuito la struttura di distribuzione degli headway e aver accettato gap di dimensioni maggiori pur di attraversare in sicurezza la corrente di conflitto. Al contrario i soggetti potrebbero aver accettato gap minori per l'impazienza accumulata per l'attesa prima dell'immissione (mediamente 11 gap rifiutati prima di un accettazione). Queste due diversi comportamenti potrebbero essersi compensati tra loro e non aver quindi influenzato il valore della media del gap critico pur mantenendolo ad un livello inferiore rispetto a quello stimato per la distribuzione random;
- La sequenza di gap rifiutati non ha influenzato o pregiudicato la stima del gap critico con il metodo della massima verosimiglianza in quanto il metodo utilizza solamente il massimo gap rifiutato;

Riguardo al CASO 2, per ogni soggetto la media del gap critico ricavata dalla distribuzione progressiva è minore di quella ricavata dalla distribuzione random. Ponendo in ordine crescente la media del gap critico della distribuzione random e affiancando la media dello stesso soggetto relativa alla distribuzione progressiva si è notato che anche le medie della distribuzione progressiva erano tendenzialmente crescenti. Questo può suggerire che verosimilmente la struttura con cui si presenta la distribuzione degli headway della corrente di conflitto non altera le caratteristiche di aggressività dei guidatori.

I risultati prodotti dalle stime della media del gap critico relative alla rotatoria affrontata all'interno dello scenario virtuale descrivono in maniera evidente quello che si era notato dall'osservazione diretta dei soggetti durante le prove: sia per quanto riguarda la distribuzione random sia per la distribuzione progressiva degli headway, le medie del gap critico relative alle prime rotatorie percorse sono maggiori rispetto alle successive. Le prime rotatorie sono state percorse in maniera più prudente rispetto alle successive, probabilmente per una scarsa confidenza con il tracciato o il simulatore di guida. La linea di tendenza che approssima l'andamento delle medie del gap critico in funzione della rotatoria percorsa per la distribuzione random e per quella progressiva sono entrambe decrescenti: questa è un'ulteriore prova che suggerisce che verosimilmente la struttura della distribuzione degli headway non pregiudica il comportamento di gap acceptance dei guidatori.

Tramite l'applicazione del test-t di Student si è calcolata la significatività della differenza tra le medie dei vari sottogruppi, e si sono ottenuti i seguenti risultati:

- non è stata riscontrata alcuna differenza significativa tra il comportamento di gap acceptance tra il genere maschile e quello femminile;
- non è stata riscontrata alcuna differenza significativa tra il comportamento di gap acceptance di guidatori che percorrono annualmente più di 10.000 Km e guidatori che percorrono annualmente meno di 10.000 Km;
- Esiste una differenza significativa tra le medie del gap critico (e quindi sul comportamento di gap acceptance) tra i guidatori testati al mattino (prima delle 12:30) e quelli testati al pomeriggio (dopo le 12:30).

Dall'applicazione ed il confronto dei 4 metodi di stima del gap critico si è potuto notare che:

- Per la distribuzione random degli headway i quattro metodi di stima producono delle medie del gap critico che non sono significativamente differenti tra loro;
- Per la distribuzione progressiva degli headway esistono differenze significative tra i metodi di stima. La motivazione di questo risultato è da ritrovarsi nell'alto numero di gap rifiutati prima dell'accettazione nella distribuzione progressiva rispetto a quella random.

Si è considerato il solo massimo gap rifiutato, invece che l'intera sequenza di rifiuti, anche nei metodi Logit, Probit e Wu, per osservare come il numero di gap possa influire sulla media del gap critico:

- Per la distribuzione random degli headway la media calcolata con il metodo della massima verosimiglianza risulta statisticamente differente da quella del metodo Logit e dal metodo Probit;
- Per la distribuzione progressiva degli headway la media calcolata con il metodo della massima verosimiglianza, i metodi Logit, Probit e di Wu non risultano statisticamente differenti tra loro. Questo risultato dimostra come il numero di gap rifiutati prima dell'accettazione possa influenzare la stima della media del gap critico per i metodi probabilistici Logit, Probit e Wu.

Si è stimata infine la capacità del ramo d'ingresso di una rotatoria con quattro metodi analitici basati sulla teoria del gap acceptance, evidenziando per ogni caso come un calcolo condotto con la media del gap critico (CASO 1) ricavato dalla distribuzione progressiva degli headway della corrente di conflitto possa far variare il valore della capacità rispetto ad un calcolo condotto con la media del gap critico dedotto dalla distribuzione random degli headway.

I metodi proposti dall'HCM (HCM 2000 e HCM 2010) risultano avere le stime della capacità migliori, con un incremento nel caso di distribuzione progressiva che arriva fino a 260 veic/h rispetto al caso di distribuzione random.

6.1 POSSIBILI SVILUPPI

Con l' utilizzo della distribuzione "progressiva" degli headway della corrente di conflitto si è stimata una media del gap critico di 2,38 secondi. Rispetto alla distribuzione "random" degli headway si è avuta quindi una diminuzione del 30% della media del gap critico. Nella realtà però le distribuzioni del traffico di conflitto che ogni conducente affronta in relazione ad una rotatoria, o nel caso più generale in un'intersezione a regime di priorità, sono casuali, in quanto ogni conducente di un veicolo possiede un determinato stile di guida, mantiene una propria velocità, è più o meno prudente, rispetta in modo diverso le distanze di sicurezza, ecc.

Per le intersezioni a rotatoria si avrebbe un reale aumento della capacità (con conseguente diminuzione dei perditempo) solamente se si fosse in grado di proporre non tanto una distribuzione degli headway progressiva (altrimenti tutti i gap inferiori del gap critico medio sarebbero rifiutati), bensì una distribuzione in cui ci siano gap tra successivi veicoli costanti tra loro e che possiedano il valore minimo dettato dalla stima del gap critico e cioè 2,38 secondi.

In questo modo, in caso di coda continua al ramo d'ingresso alla rotatoria, se ogni conducente accettasse il gap che gli si propone di fronte si sfrutterebbero al massimo le potenzialità dell'intersezione. L'aumento della capacità al ramo d'ingresso alla rotatoria porterebbe verosimilmente ad una conseguente diminuzione dei ritardi, un abbattimento dei consumi di carburante, un miglioramento della qualità dell'aria per le minori quantità inquinanti emesse dai veicoli in attesa.

Il problema è che non è possibile riprodurre umanamente una distribuzione degli headway della corrente di conflitto nella quale si debbano mantenere costantemente tra successivi veicoli gap di 2,38 secondi, con velocità costante di 8 m/s (circa 30 Km/h) e in cui tutti i conducenti del ramo secondario accettino di immettersi nel gap di 2,38 secondi (essendo una media del gap critico si avranno conducenti più prudenti che potrebbero non accettare mai l'immissione in un gap di queste dimensioni). Inoltre lo studio appena effettuato considera solamente l'interazione tra il soggetto e la corrente veicolare proveniente dal ramo di sinistra, e non tiene conto della possibilità di sovrapposizione di manovre nell'anello circolatorio con i veicoli provenienti da altri rami all'approccio.

La soluzione per la proposizione di un flusso con distribuzione costante degli headway tra successivi veicoli potrebbe essere quello dello sviluppo di dispositivi posti alle intersezioni che controllino o coordinino le manovre dei veicoli completamente autonomi. Ad oggi sono stati sviluppati i sistemi CVIC - Cooperative Vehicle Intersection Control, ed AIM - Autonomous Intersection Management, che si interfacciano con i veicoli autonomi e riescono ad ottimizzare le fasi di verdi nei cicli semaforici per smaltire flussi di traffico elevati, ma che non gestiscono le loro manovre.

Il CVIC è un sistema che permette la cooperazione tra veicoli e infrastruttura per le operazioni alle intersezioni, nell'ipotesi che tutti i veicoli siano totalmente autonomi ((38) Lee, 2012), Il CVIC è un dispositivo posto nelle intersezioni semaforiche che comunica ai conducenti tutte le potenziali situazioni di pericolo (veicolo nella zona cieca dell'auto, incidente nell'intersezione, lavori in corso, luce del semaforo sta cambiando colore), In questo modo si cerca di far eseguire

le manovre di attraversamento all'intersezione ad ogni singolo veicolo in totale sicurezza, evitando collisioni ed eliminando le sovrapposizioni che potrebbero crearsi tra le traiettorie. Alla base dello sviluppo del sistema CVIC devono esserci dei "Veicoli connessi" (CV – Connected Vehicles) in grado di comunicare tramite wireless sia tra loro (V2V - Vehicle to Vehicle) sia con l'infrastruttura (V2I – Vehicle to Infrastructure). Veicoli ed infrastruttura equipaggiati con dispositivi di comunicazione possono quindi comunicare tra loro, collezionare dati di traffico altamente precisi come manovre dei veicoli, traiettorie, flussi. Il sistema CVIC potrebbe garantire benefici in termini di sicurezza e di riduzione degli stop-and-go tipici delle intersezioni semaforiche o di intersezioni a rotatoria caratterizzate da flusso elevato.

Le ipotesi alla base di questo sistema sono:

- Tutti i veicoli devono essere totalmente automatici;
- Le comunicazioni wireless V2V e V2I devono risultare perfette;
- Il dispositivo dell'intersezione deve essere progettato per ottimizzare i flussi di traffico e le manovre di tutti i veicoli;
- Si considerano solo automobili: mezzi pesanti, biciclette e pedoni non fanno parte di questo scenario.

Il sistema AIM ((39) Wu, 2011) rispetto al CVIC si basa sulla sequenza di arrivi all'intersezione. Per migliorare l'efficienza dell'intersezione ogni veicolo è considerato singolarmente e il sistema AIM sviluppa un processo di ottimizzazione in grado di gestire le manovre nel modo più efficiente in base agli ordini di arrivo all'intersezione. Anche l' AIM necessita di veicoli autonomi dotati di sistema wireless, ma è diverso dagli altri sistemi di controllo del traffico perché non decide sulla durata delle fasi di verde (o sul prolungamento del tempo di verde per un'altra fase), ma permette di selezionare i singoli veicoli che hanno la precedenza e di fargli compiere la manovra in sicurezza.

Questi sistemi aumentano l'efficienza e riducono i ritardi all'intersezione, ma non sono in grado di proporre una distribuzione degli headway costante tra successivi veicoli, resa possibile solo con un coordinamento tra i veicoli completamente autonomi (coordinamento in velocità, mantenimento di un gap costante, ecc), e cioè con uno sviluppo degli ITS (Intelligent Transportation System).

Gli ITS sembrano essere diventati la chiave per l'aumento della capacità delle infrastrutture esistenti (invece di investire in nuove infrastrutture, che diventa sempre più costoso). Ma mentre in ambito autostradale si sono eseguite vaste ricerche per l'aumento della capacità, le ricerche che ad oggi hanno riguardato l'ottimizzazione delle manovre alle intersezioni da parte dei veicoli autonomi sono state molto limitate e si sono concentrate per lo più sui consumi di carburante e sugli impatti delle emissioni inquinanti.

Un possibile sviluppo del lavoro proposto in questa Tesi potrebbe quindi essere l'implementazione di un algoritmo che ottimizzi la distribuzione degli headway delle correnti veicolari nel ramo d'approccio e nell'anello circolatorio, nel caso di veicoli completamente autonomi. Se fosse possibile coordinare i veicoli autonomi della corrente di conflitto in modo che questi possano mantenere gap e velocità costante tra loro, si potrebbero aumentare le prestazioni dell'intersezione.

Si pensi ad un caso generale di intersezione a T tra due strade a senso unico in cui i veicoli autonomi della corrente principale siano controllati come in ambito autostradale e abbiano gap e velocità costante (ridotta perché in avvicinamento ad un'intersezione), mentre i veicoli della corrente secondaria siano gestiti dal conducente del mezzo. Utilizzando un gap costante tra successivi veicoli della corrente principale, accettabile in condizioni di sicurezza da gran parte dei conducenti della corrente secondaria, si aumenterebbero le prestazioni dell'intersezione e si ridurrebbero i perditempo. Una volta eseguita la manovra di immissione dal ramo secondario i veicoli potrebbero poi essere presi in gestione dai dispositivi che gestiscono il funzionamento dell'accodamento in plotoni.

Il passo successivo potrebbe essere quello di riproporre questa idea per intersezioni a rotatoria, utilizzando il gap critico stimato dalla distribuzione progressiva come valore di riferimento del gap tra successivi veicoli della corrente nell'anello circolatorio. Ad oggi non sono stati sviluppati molti studi per quanto riguarda l'inserimento dei veicoli autonomi alle intersezioni a rotatoria. ((45) Pérez et altri, 2011) hanno proposto un approccio che permette ai veicoli autonomi di eseguire la migliore traiettoria in sicurezza all'interno dell'anello circolatorio e per il controllo laterale del veicolo in curva. Ma non esiste ancora un algoritmo che permetta di far controllare le manovre dei veicoli autonomi in intersezioni a rotatoria (e lo stesso vale per il caso generale di intersezioni a regime di priorità).

BIBLIOGRAFIA

- (01) Brilon, T. (2000). *Unsignalized intersection theory*.
- (02) Miller. (1972). *Nine estimators of gap acceptance parameters*.
- (03) Brilon, T. K. (1999). *Useful estimation procedures for critical gaps*.
- (04) Siegloch. (1973). *Capacity calculations at unsignalized intersections*.
- (05) Raff, H. (1950). *A volume warrant for urban stop signs. Eno foundation for highway traffic control*.
- (06) Wu. (2012). *Equilibrium of probabilities for estimating distribution function of critical gaps at unsignalised intersection*.
- (07) Ashworth. (1968). *A note on the selection of gap acceptance criteria for traffic simulation studies*.
- (08) Harders. (1968). *Capacity of urban unsignalized intersections*.
- (09) Miller, P. (1968). *Overtaking on two-lane rural roads*.
- (10) Troutbeck. (1992). *Estimating the critical acceptance gap from traffic movements*.
- (11) Wu. (2006). *A new model for estimating critical gap and its distribution at unsignalized intersections based on the equilibrium of probabilities*.
- (12) Troutbeck. (2014). *Estimating the mean critical gap*.
- (13) Ben-Akiva, L. (1987). *Discrete choice analysis*.
- (14) Cassidy, M. W.-H. (1995). *Unsignalized intersection capacity and level of service: revisiting critical gap*.
- (15) Polus. (2005). *Evaluation of the time effect on critical gaps at roundabouts by a Logit model*.
- (16) Solberg, O. (1966). *Lag and gap acceptance at stop controlled intersection*.
- (17) Hamed, E. (1997). *Disaggregate Gap-Acceptance Model for Unsignalized T-Intersections*.
- (18) Patil, P. (2011). *Gap acceptance behavior of two-wheelers at limited priority uncontrolled intersections*.
- (19) Mahmassani & Sheffi. (1981). *Using gap sequences to estimate gap acceptance functions*.
- (20) Currin. (2000). *Cumulative Acceptance Method*.
- (21) O'Flatherty. (1997). *Roundabouts*.
- (22) FHWA-Federal Highway Administration. (2000). *Roundabouts: an informational guide*.

- (23) Polus, P. L. (2002). *A decision model for gap acceptance and capacity at intersection.*
- (24) Highway Capacity Manual - HCM 2000. (2000).
- (25) Kimber. (1980). *Roundabouts: an informational guide.*
- (26) Setra. (1987). *Capacité des Carrefours giratoires interurbains.*
- (27) CETUR. (1990). *Carrefours Urbains.*
- (28) Wu. (1997). *Capacity enhancement and limitation at roundabouts with double lane or flared entries.*
- (29) Tanner. (1962). *A theoretical analysis of delay at an uncontrolled intersection.*
- (30) Rossi Meneguzzer Gastaldi Gecchele. (2011). *Analysis of gap-acceptance behaviour at road junctions: experiments in a driving simulator.*
- (31) Rossi Gastaldi Meneguzzer Gecchele. (2011). *Gap acceptance behaviour at priority intersection: field observations versus experiments with a driving simulator.*
- (32) Kerney Grechkin Cremer Plamert. (2006). *Traffic generation for studies of gap acceptance.*
- (33) Yan Radwan Guo. (2006). *Effects of major-road vehicle speed and driver age and gender on left-turn gap acceptance.*
- (34) Olson. (1996). *Forensic Aspects of Driver Perception and Response.*
- (35) Laberge. (2006). *Design of an intersection decision support (IDS) interface to reduce crashes at rural stop-controlled intersections.*
- (36) Lobjois Cavallo. (2006). *Age-related differences in street-crossing decisions: The effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task.*
- (37) Bierlaire. (2009). *Estimation of discrete choice models: extending BIOGEME.*
- (38) Lee. (2012). *Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm under the Connected Vehicles Environment.*
- (39) Wu. (2011). *Cooperative driving: an ant colony system for autonomous intersection management.*
- (40) Broggi. (2010). *Development of the control system for the VisLab Intercontinental Autonomous Challenge.*
- (41) Borgato. (2012). *Il comportamento di gap-acceptance in intersezioni a rotatoria. Simulazioni in ambiente virtuale.*
- (42) Tupper. (2011). *Safety and operational assesmant of gap acceptance through large-scale field evaluation.*

- (43) Vasconcelos Silva. (2012). *Comparison procedures to estimate critical headways at roundabouts.*
- (44) Randahl Irvana. (2010). *Analysis of gap acceptance in a saturated two-lane roundabout and implementation of critical gap in vissim.*
- (45) Pérez et altri. (2011). *Autonomous driving manoeuvres in urban road traffic environment : a study on roundabouts.*

RINGRAZIAMENTI

Non sono mai stato molto bravo ad esprimere i miei sentimenti, e penso che neanche in queste righe riuscirò a trovare le parole per esprimere la mia gratitudine alle persone che mi hanno accompagnato in questo percorso, ma cercherò di farlo nel miglior modo possibile.

Ringrazio il ch.mo prof. Riccardo Rossi perché mi ha permesso di svolgere molto più di una Tesi di Laurea, è stato sempre disponibile ad accettarmi per i miei quesiti in qualsiasi orario e non si è mai risparmiato nel darmi spunti e consigli, e nel farmi essere curioso riguardo al mio lavoro. Il tutto sempre accompagnato da una grandissima cordialità.

Ringrazio il ch.mo prof. Massimiliano Gastaldi, che mi ha supportato nello sviluppo della Tesi aiutandomi a trovare i migliori metodi per affrontare spinose situazioni. Mi ha accolto nel Suo studio e mi ha concesso di utilizzare le Sue strumentazioni per lo sviluppo di questo lavoro.

Ringrazio la ch.ma prof.ssa Rosa Arboretti per essere venuta in mio soccorso per l'elaborazione statistica dei dati in questo lavoro di Tesi.

Ringrazio l'ing. Gregorio Gecchele che si è adoperato con molta pazienza, ingegno e fantasia a risolvere i problemi che quotidianamente capitavano nello studiolo Laureandi. nonché ad aver risposto ad ogni domanda che mi passava per la mente.

Ringrazio l'ing. Alberto Sarto. Il Suo apporto è stato preziosissimo se non fondamentale. Nonostante fosse perennemente impegnato è riuscito a dedicare molto del Suo tempo per educarmi all'utilizzo del simulatore di guida, per indirizzarmi al giusto approccio di diversi software ed aveva sempre la battuta pronta per strappare un sorriso a tutto lo studiolo.

Il grazie più grande va sicuramente ai miei genitori. Grazie Papà, sono arrivato alla fine del percorso di studi, ma il bello comincia ora come mi hai detto tu. Grazie di avermi permesso di studiare, non sarebbe stato possibile senza i tuoi sforzi. Sembra tu riesca a risolvere sempre ogni situazione che ti si pone di fronte. In futuro spero di riuscirci anch'io, proprio come fai tu ogni giorno.

Grazie Mamma per la stima che mi dimostri in ogni occasione della vita. Se solo avessi un decimo del tuo sorriso potrei considerarmi il ragazzo più felice al mondo. Non potrò mai smettere di imparare da due genitori come voi, che si sono sempre fatti in quattro per i propri figli. Questo è il più bell'esempio di amore che una persona possa ricevere.

Ringrazio il mio fratellino Alberto perché gli voglio proprio tanto bene e perché è sempre stato pronto a darmi una mano in tutto, che non è mai scontata e anzi che è sempre apprezzatissima. Vorrei avere la sua determinazione, quando si fissa un obiettivo lo raggiunge sempre. Sei grande Berto.

Vorrei ringraziare Sabine. Nonostante ora le nostre strade si siano divise, lei ha condiviso con me gran parte del percorso che mi sta portando alla Laurea. Sa quali sono state le difficoltà che ho incontrato per arrivare fino a qui, e ha creduto in me e nelle mie capacità in un modo unico. Un grazie è il minimo che posso dirle, perché è stata e rimarrà parte di me e del mio cuore.

Ringrazio mio zio Luciano che, oltre ad aver finanziato la mia vita da studente facendomi sgobbare ogni sera negli ultimi due anni, cerca di istruirmi in vari aspetti della vita tra i quali l'arte dell'amore, i fumetti, la cinematografia.

Grazie al mio amico Matteo Bugno con cui credo di aver studiato e affrontato ogni esame della Laurea Magistrale. Aldilà del compagno di studi eccezionale che ti sei dimostrato, sempre pronto a spronarci per fare meglio e per dare qualcosa in più, sono sicuro potrò fare sempre affidamento sulla nostra bellissima e sincera amicizia.

Grazie ai miei amici Gianluca Marin, Mario Daniele e Mattia Milani. Quando si parla di amici mi venite in mente voi. Con ognuno di voi ho ricordi bellissimi, di quelli che non si dimenticano mai, tra giornate di studio all'Agripolis e alla biblioteca di Piove, organizzazione di feste delle birre, partite di calcio vissute col cuore, feste, vacanze e semplici ritrovi serali dove ridere e scherzare. Siete tutti amici veri, sempre pronti ad ascoltarmi o a confidarvi.

Ringrazio i miei amici di sempre. Un sorriso, un messaggio, una telefonata, una serata in compagnia di uno di loro ti fa capire l'importanza dell'amicizia e ti aiuta a credere in quello che stai facendo. Grazie a Daniel, Checco, Nicolas e Stefano.

Ringrazio Nicola Bez e Valeria Barbaro. Trascorrere le giornate con voi nello studiolo Laureandi è stato piacevole e divertente. Ci siamo aiutati e confrontati più volte, abbiamo fatto lavoro di squadra ed è nata un'amicizia vera. Vi ringrazio per avermi aiutato e per essere sempre stati gentili e disponibili nei miei confronti.

Ringrazio Matteo Bortolon e Federico Meneghin per tutti i bei momenti passati assieme nei due anni di corso della magistrale, tra risate e speranze di riuscire a portare a termine il corso. Grazie ad Elisa Mattiuzzo e Stefano Bellan, nonostante la faticaccia ci siamo divertiti a preparare assieme l'esame di Laboratorio. Ed è stato piacevole condividere con voi quei mesi di studio. Grazie ad Elisa Corà che in questi ultimi mesi è stata una buonissima amica e consigliera e non mi ha mai negato un sorriso. Ho scoperto quanto di bello c'è in lei e spero vivamente che l'amicizia possa continuare anche dopo la laurea.

Ringrazio tutti i miei amici "Stradini" e compagni dell'Università perché di ognuno di loro porto dentro un bel ricordo, e perché con tutti loro c'è stato un grande spirito di collaborazione per portare a compimento questo percorso di studi, e ultimamente ci troviamo spesso per festeggiare. Spero di poterlo fare ancora. Un grazie in particolare a Gabriele Serafin, Patrizio Pasqualetto, Nicola Lazzarin e Alessandro Tonella.

Ringrazio tutti i miei compagni di calcio con cui in questi anni ho sempre affrontato "piccole grandi" sfide. "Il calcio è come la vita", diceva un mio allenatore, "bisogna metterci sacrificio, impegno, voglia". E la determinazione che si può trovare nell'affrontare una partita o un allenamento è la stessa che ho messo per cercare di affrontare al meglio ogni esame.

Un grazie a tutti i partecipanti all'esperimento di questa Tesi. Senza di voi non avrei potuto mai eseguire questo lavoro. Una doverosa citazione va fatta a Giovanni Nicolussi, che spregiudicato è salito sul simulatore di guida dandosi arie da pilota di Formula Uno. Non dico come sia sceso, lascio ampio spazio all'immaginazione. Enrico Giroto è invece il detentore del giro record.