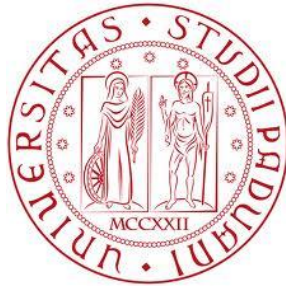


Ai miei genitori Paolo e Oriella,  
a mia figlia Mariavittoria,  
a Pierluigi.



*Università degli Studi di Padova*

*Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile*

*Tesi di laurea*

***METODI PER L'ANALISI  
DELL'INCIDENTALITA' NELLE  
INTERSEZIONI STRADALI***

*Relatore: Prof. Claudio Meneguzzer*

*Laureanda: Perla T. C. Scapin*

*Anno Accademico 2011/2012*

# Indice

## Capitolo 1

### *Incidentalità nelle intersezioni stradali*

1.1 Introduzione.....	pag. 5
1.2 Dati di incidentalità in Europa.....	pag. 7
1.3 La situazione in Italia: dati forniti dall'ISTAT.....	pag. 12
1.4 Incidentalità su incroci a rotatoria.....	pag. 20

## Capitolo 2

### *Modelli per la previsione degli incidenti nelle intersezioni stradali*

2.1 Introduzione.....	pag. 25
2.2 Modello di regressione logistica multipla.....	pag. 27
2.3 Modello di regressione lineare multipla.....	pag. 40
2.4 Modelli di Poisson e Binomiale Negativo.....	pag. 47
2.5 Modelli effetto random.....	pag. 59

2.6 Osservazioni.....pag. 69

2.7 Studio sulle rotatorie.....pag. 71

## Capitolo 3

### *Studi Before-After*

3.1 Introduzione.....pag. 75

3.2 Studio Bhagwant et al., 2000.....pag. 78

3.3 Studio Gross et al., 2012.....pag. 85

3.4 Gli effetti sulla riduzione di incidenti in seguito alla rimozione di semafori.....pag. 88

## Capitolo 4

*Conclusioni*.....pag. 91

**Riferimenti bibliografici**.....pag. 95

# CAPITOLO 1

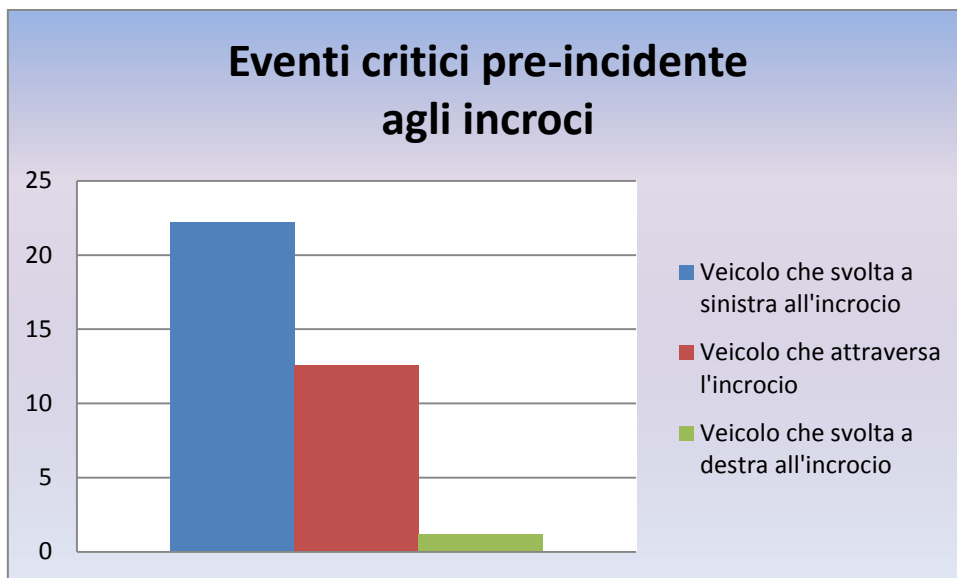
## *Incidentalità nelle intersezioni stradali*

### 1.1\_Introduzione

Sebbene le intersezioni costituiscano solo una piccola porzione dell'intero sistema viario, una gran parte degli incidenti, anche mortali, avviene proprio in corrispondenza di esse.

Gli incroci, essendo infatti luogo di intersezione tra due o più strade, richiedono al conducente del veicolo attività come la svolta a sinistra, a destra o l'attraversamento, che sono potenziali fattori di incidente.

Tali attività sono considerate dal NHTSA di Washington come "eventi critici", e le loro frequenze percentuali sono riportate nel grafico 1.1.



*Grafico 1.1: eventi critici pre-incidente agli incroci*

*(Fonte: NMVCCS, 2005-2007)*

Come si nota dal grafico il 22.2% di incidenti agli incroci è causato dall'evento critico di svolta a sinistra, il 12.6% è causato dall'evento critico di attraversamento dell'incrocio e una percentuale molto piccola, precisamente del 1.2%, è causata dalla manovra di svolta a destra.

## 1.2\_Dati di incidentalità in Europa

Per quanto riguarda la situazione in Europa, i dati dettagliati sugli incidenti stradali vengono pubblicati in un rapporto statistico annuale dalla commissione europea (ERSO: European Road Safety Observatory).

Nell'ERSO 2011 (Traffic Safety Basic Facts 2011) si rileva che circa 6300 persone sono state vittime di incidenti nel traffico agli incroci nei 18 paesi dell'Unione Europea (EU-18) nel 2009 ed è evidente una positiva riduzione di circa il 35% dall'anno 2000.

Nonostante questa riduzione la percentuale di incidenti mortali agli incroci si è attestata costantemente sul 20% del totale degli incidenti.

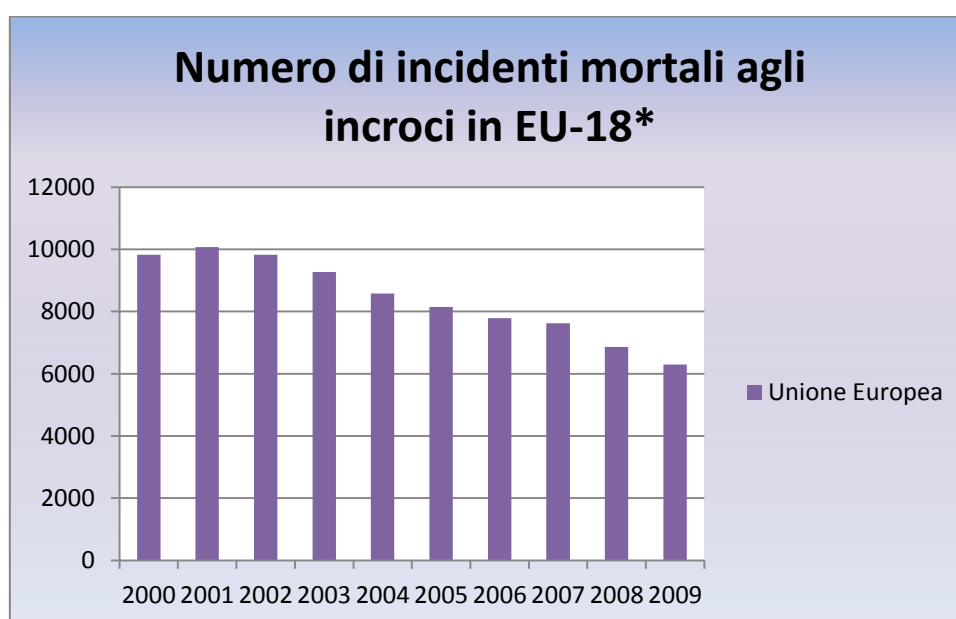


Grafico 1.2. Numero di incidenti mortali agli incroci in EU-18\* (Fonte: CARE Database / EC, 2011)

\*Belgio, Repubblica Ceca, Danimarca, Germania, Grecia, Spagna, Francia, Italia, Lussemburgo, Olanda, Austria, Polonia, Portogallo, Romania, Slovenia, Finlandia, Svezia, Regno Unito.

Va comunque considerato il fatto che la percentuale di incidenti mortali alle intersezioni mostra una grande variabilità nelle diverse nazioni, come si può vedere nell'immagine 1.1:



Immagine 1.1. Percentuale di incidenti mortali agli incroci per nazione, 2009 (Fonte: ERSO, 2011)



Continuando l'osservazione dei dati forniti dal CARE Database si può notare che quando ci sono incidenti mortali alle intersezioni, questi riguardano soprattutto gli incroci con attraversamento di strade (crossroad), mentre nelle rotatorie la percentuale di questi rimane bassissima come si può notare nella tabella 1.1 (per parecchie nazioni il tipo di incrocio non è sempre disponibile e tra esse ci sono grandi variazioni).

Paesi	Attraversamento	Incroci a T o Y	Rotatorie	Passaggio a livello	Altro	Non agli incroci	Sconosciuti
Belgio	0%	0%	0%	0%	17%	83%	0%
Croazia	9%	8%	0%	3%	0%	80%	0%
Danimarca	11%	0%	1%	1%	18%	69%	0%
Germania	22%	0%	0%	1%	3%	36%	38%
Estonia	6%	7%	2%	4%	2%	74%	4%
Grecia	0%	0%	0%	0%	0%	91%	9%
Spagna	7%	6%	2%	0%	2%	82%	0%
Francia	6%	4%	1%	1%	2%	87%	0%
Italia	13%	0%	2%	0%	13%	71%	0%
Lettonia	0%	0%	0%	0%	7%	93%	0%
Lussemburgo	4%	2%	0%	0%	6%	85%	2%
Ungheria	17%	0%	0%	3%	1%	79%	0%
Olanda	31%	0%	2%	2%	0%	66%	0%
Austria	15%	5%	0%	2%	0%	78%	0%
Polonia	15%	0%	0%	1%	0%	84%	0%
Portogallo	6%	8%	1%	1%	1%	82%	1%
Romania	8%	0%	0%	1%	0%	91%	0%
Slovenia	5%	0%	0%	2%	0%	92%	1%
Slovacchia	4%	5%	0%	0%	0%	88%	3%
Finlandia	0%	0%	0%	0%	18%	82%	0%
Svezia*	21%	0%	0%	0%	3%	1%	74%
Regno Unito	11%	16%	3%	0%	5%	65%	0%
EU-22**	11%	3%	1%	1%	4%	74%	6%

Tabella 1.1. Percentuali di incidenti mortali agli incroci per tipo di incrocio e per nazione, 2009

(Fonte: CARE Database / EC, 2011)

\*dati del 2008.

\*\*EU-18 + Estonia, Lettonia, Ungheria, Slovacchia..

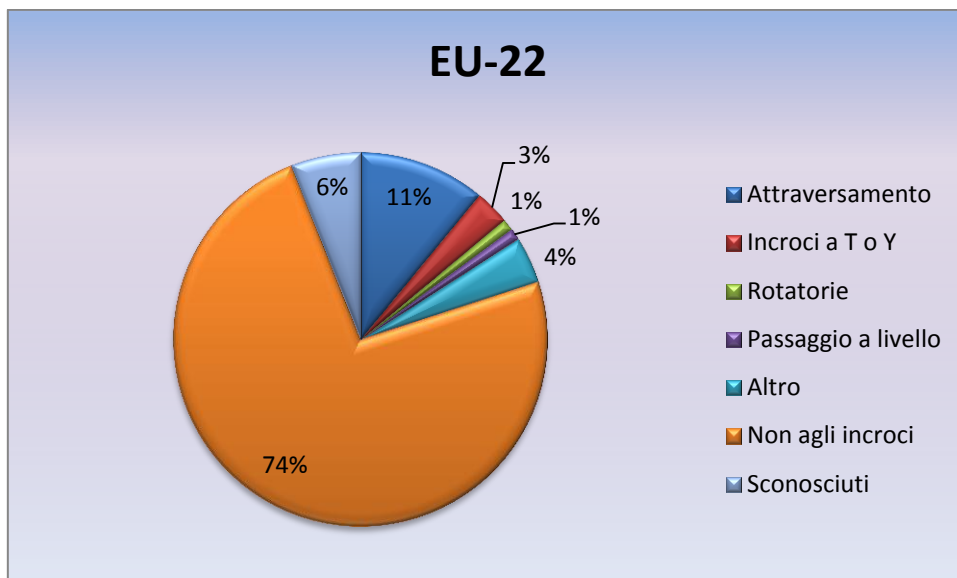


Grafico 1.3. Percentuali di incidenti mortali agli incroci per tipo di incrocio per l'EU-22, 2009.

(Fonte dati: CARE Database / EC, 2011)

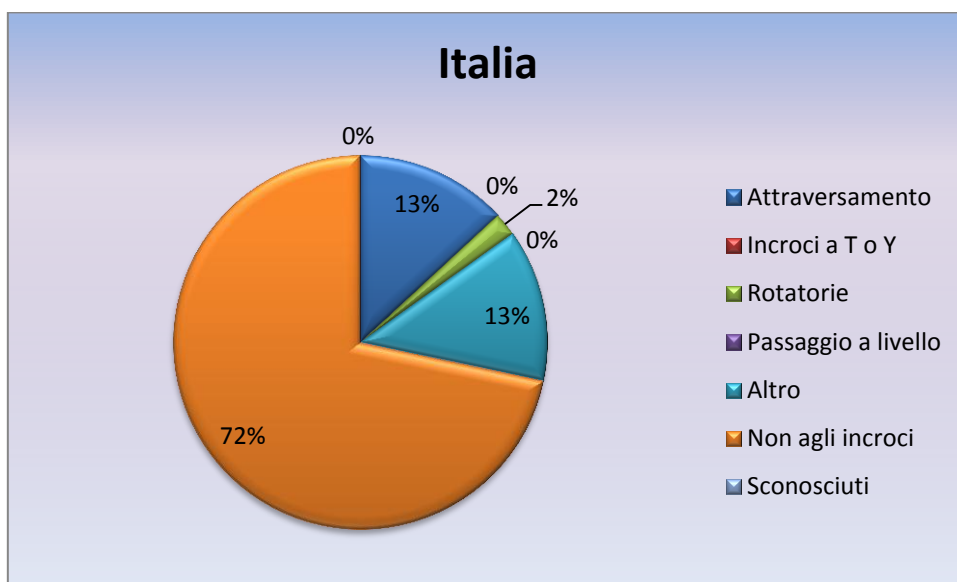


Grafico 1.4. Percentuali di incidenti mortali agli incroci per tipo di incrocio per l'Italia, 2009.

(Fonte dati: CARE Database / EC, 2011)

Come si può vedere dai grafici 1.3 e 1.4 le percentuali relative all'Italia sono in linea con quelle della media europea: la maggior parte degli incidenti mortali alle intersezioni avviene agli incroci (crossroad) mentre alle rotatorie la percentuale rimane molto bassa.

Al fine di migliorare la sicurezza stradale sono stati considerati altri fattori che possono dare ulteriori informazioni sugli incidenti agli incroci.

I grafici 1.5 e 1.6 riportano rispettivamente le percentuali degli incidenti mortali agli incroci correlati alle condizioni meteorologiche e alle condizioni di luminosità.

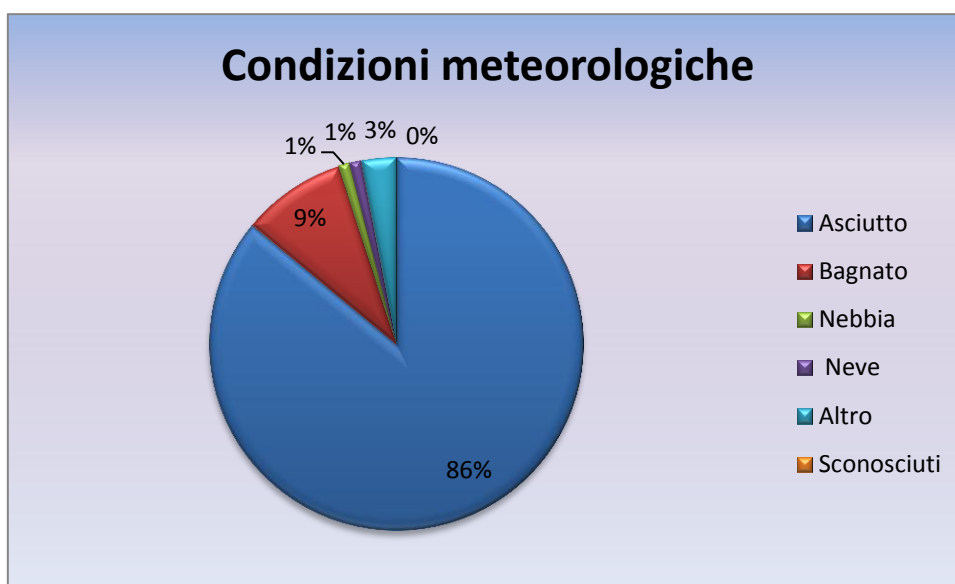


Grafico 1.5. Percentuale degli incidenti mortali agli incroci correlata alle condizioni meteorologiche,

EU-19 (Fonte dati: CARE Database, 2011)

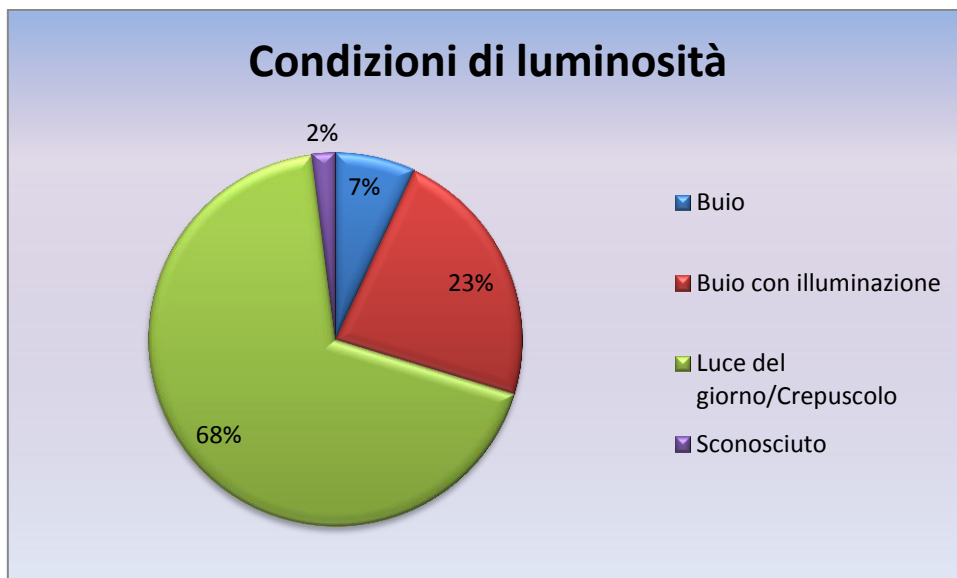


Grafico 1.6. Percentuale degli incidenti mortali agli incroci correlata alle condizioni di luminosità, EU-17

(Fonte dati: CARE Database, 2011.)

### 1.3\_La situazione in Italia: dati forniti dall'ISTAT

Anche in Italia dal 2001 al 2010 si assiste ad una progressiva diminuzione degli incidenti agli incroci delle strade urbane passando da 202098 nel 2001 a 139258 nel 2010.

Nella tabella 1.2 è riportato il numero di incidenti stradali agli incroci comprensivi di incroci a precedenza e a controllo semaforico.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Italia	202098	196425	190712	178960	172842	172736	166969	153991	145759	139258
Nord-Ovest	64818	64282	59942	56730	53865	53772	51108	46095	42743	40823
Nord-Est	46943	43697	42501	39705	36656	37014	34820	31698	29221	27354
Veneto	17089	15430	14380	13666	12802	13661	12705	11053	10539	9982
Centro	50688	49936	49768	47950	45708	44801	43493	39014	37228	35658
Sud	23000	22181	22818	20333	21738	22100	22798	22719	22349	21542
Isole	16649	16302	15683	14242	14875	15049	14750	14465	14218	13881

Tabella 1.2. Numero di veicoli coinvolti in incidenti stradali agli incroci dal 2001 al 2010

(Fonte: ISTAT, 2011)

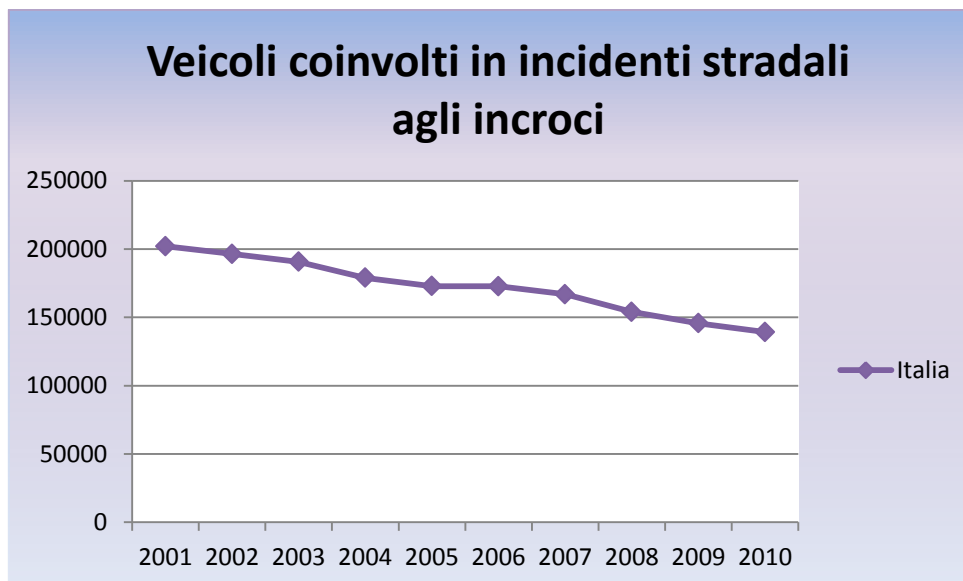


Grafico 1.7. Numero di veicoli coinvolti in incidenti stradali agli incroci dal 2001 al 2010 in Italia

(Fonte dati: ISTAT, 2011)

Dal 2001 al 2010 la riduzione di incidenti stradali agli incroci in Italia è stata del 31%.

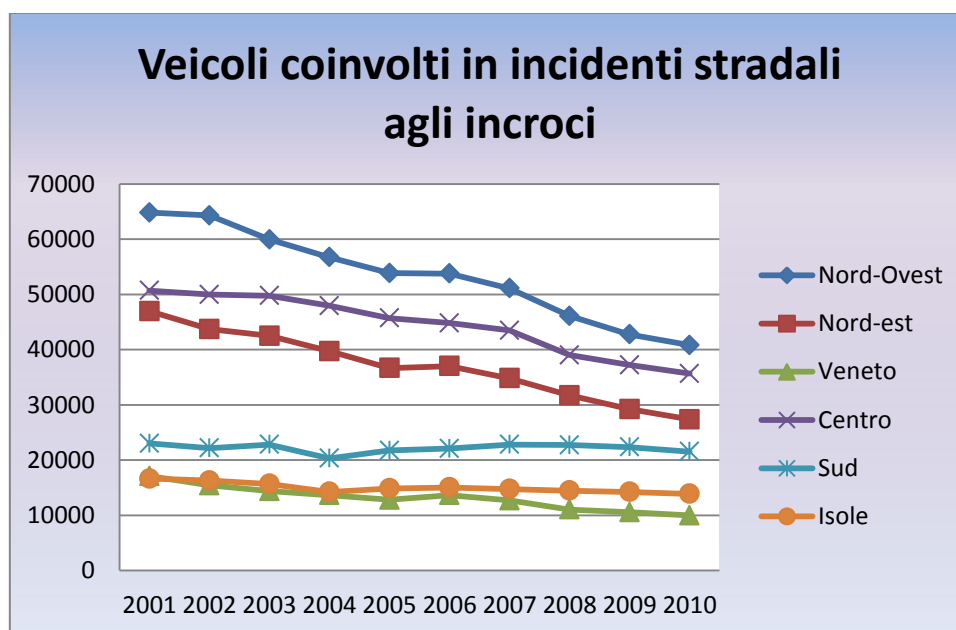


Grafico 1.8. Veicoli coinvolti in incidenti stradali agli incroci dal 2001 al 2010 (territorio italiano)

(Fonte dati: ISTAT, 2011)

Dal 2001 al 2010 le riduzioni in percentuali degli incidenti stradali agli incroci sono le seguenti:

Nord-Ovest: 37%

Nord-Est: 42%

Veneto: 42%

Centro: 30%

Sud: 6%

Isole: 17%

Si assiste invece ad un aumento di incidenti alle rotatorie dal 2001 al 2010 passando rispettivamente da 5199 a 11522.

Nella tabella 1.3 è riportato il numero di incidenti stradali alle rotatorie.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Italia	5199	5958	6068	6775	7846	8379	10130	10797	11001	11522
Nord-Ovest	2078	2238	2188	2512	2918	3137	3894	3683	3878	4086
Nord-Est	1183	1266	1666	1963	2172	2486	3058	3239	3253	3401
Veneto	287	334	471	628	669	786	1005	956	1061	1081
Centro	1281	1631	1402	1536	1834	1751	2099	2456	2522	2483
Sud	445	553	564	519	556	661	674	917	868	1006
Isole	212	270	248	245	366	344	405	502	480	546

Tabella 1.3. Numero di veicoli coinvolti in incidenti stradali alle rotatorie dal 2001 al 2010

(Fonte: ISTAT, 2011)

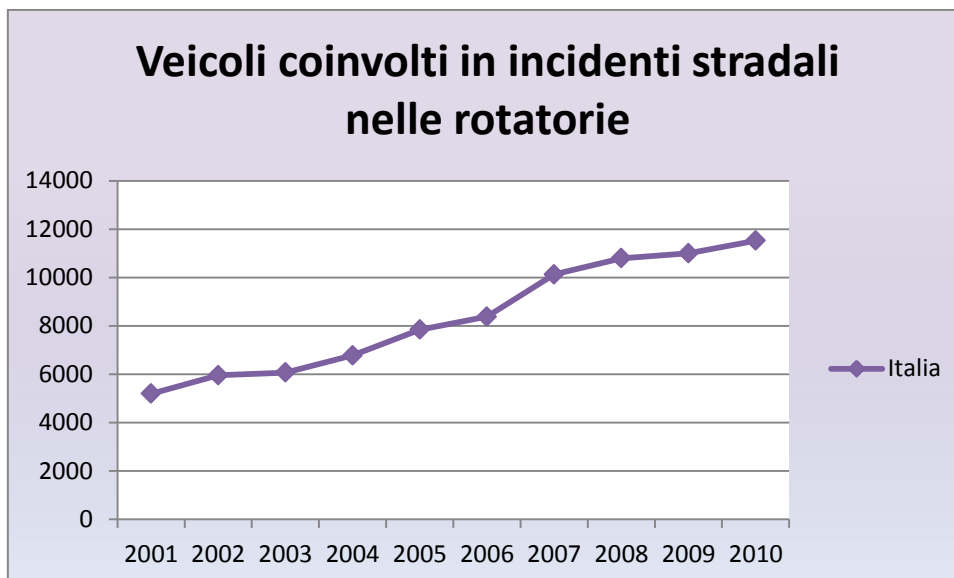


Grafico 1.9. Numero di veicoli coinvolti in incidenti stradali nelle rotatorie dal 2001 al 2010 in Italia

(Fonte dati: ISTAT, 2011)

Dal 2001 al 2010 l'aumento di incidenti stradali alle rotatorie in Italia è stato del 122%.

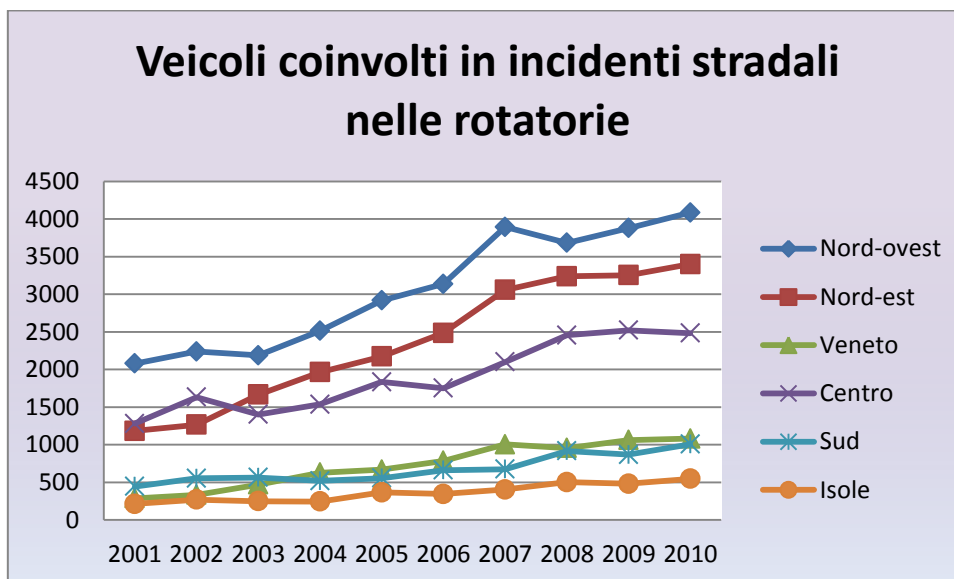


Grafico 1.10. Numero di veicoli coinvolti in incidenti stradali nelle rotatorie dal 2001 al 2010 (territorio italiano) (Fonte dati: ISTAT, 2011)



Dal 2001 al 2010 gli aumenti in percentuale degli incidenti stradali alle rotatorie sono i seguenti:

Nord-Ovest: 97%

Nord-Est: 187%

Veneto: 277%

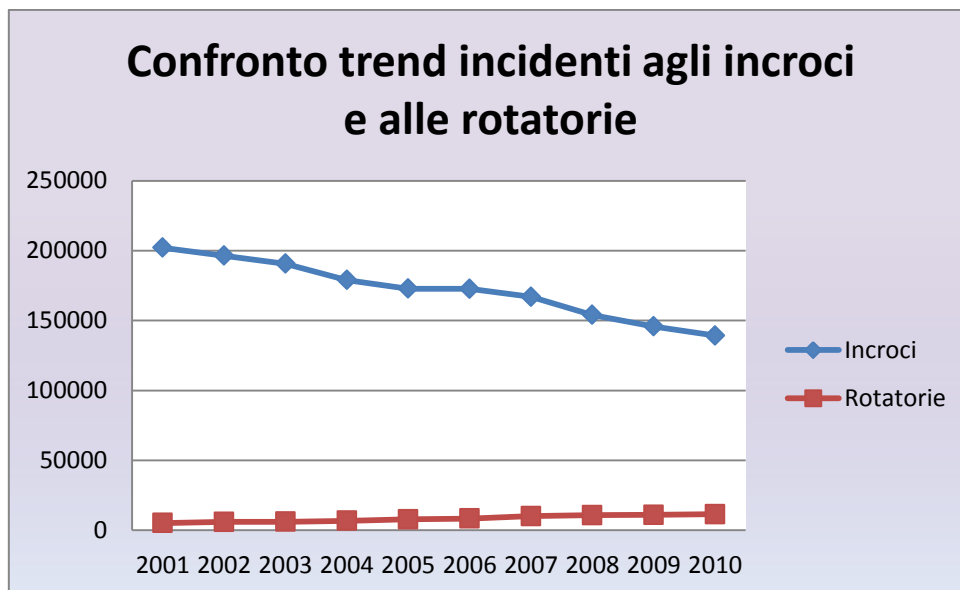
Centro: 94%

Sud: 126%

Isole: 158%

	2001	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Incroci	202098	196425	190712	178960	172842	172736	166969	153991	145759	139258
Rotatorie	5199	5958	6068	6775	7846	8379	10130	10797	11001	11522
Tot	207297	202383	196780	185735	180688	181115	177099	164788	156760	150780

*Tabella 1.4. Numero di veicoli coinvolti negli incidenti stradali agli incroci e alle rotatorie dal 2001 al 2010 (Fonte: ISTAT, 2011)*



*Grafico 1.11. Confronto del trend degli incidenti agli incroci con il trend degli incidenti alle rotatorie dal 2001 al 2010 in Italia (Fonte dati: ISTAT, 2011)*

Osservando i vari grafici che mostrano la riduzione degli incidenti è intuitivo pensare che nel corso dell'ultimo decennio siano state adottate misure per rendere più sicura la viabilità stradale.

Anche la trasformazione di incroci in rotatorie è parte di queste misure.

Nonostante l'aumento in percentuale molto significativo di incidenti alle rotatorie vi è comunque una riduzione del numero di incidenti totali alle intersezioni (incroci e rotatorie) che è del 27% circa. Risulta peraltro evidente che l'aumento di incidenti verificatesi nelle rotatorie è spiegabile con il costante aumento della presenza di questa tipologia di incroci nell'ultimo decennio in Italia.

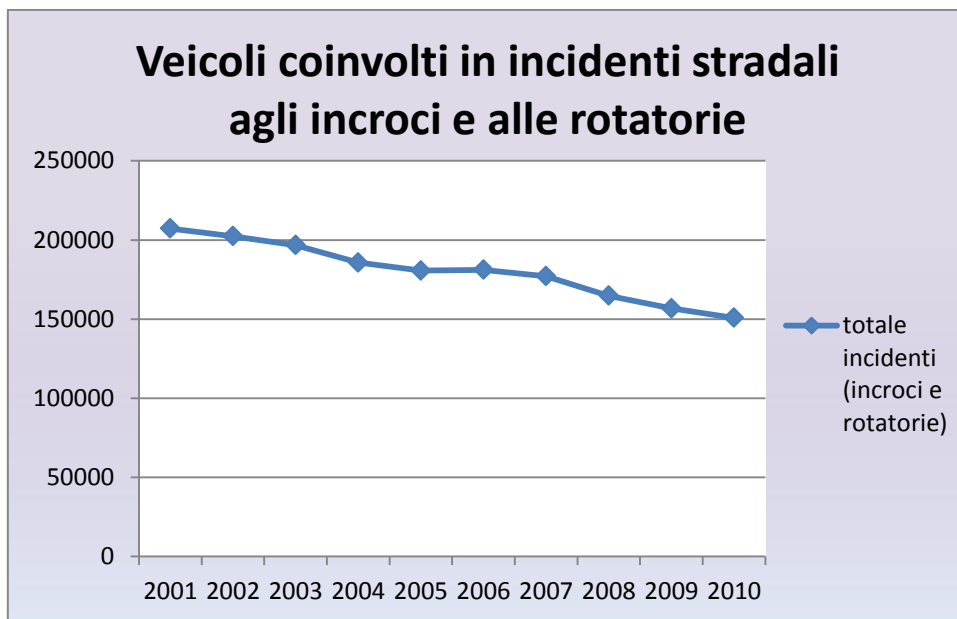


Grafico 1.12. Numero di veicoli coinvolti in incidenti stradali agli incroci e alle rotatorie dal 2001 al 2010 in Italia (Fonte dati: ISTAT, 2011)

## 1.4\_Incidentalità negli incroci a rotatoria

Dato l'aumento del numero di rotatorie è importante individuare i fattori che contribuiscono all'incidentalità e i vari tipi di incidenti che possono più frequentemente presentarsi in questo tipo di intersezioni.

L'immagine 1.2 mostra le possibili tipologie di incidenti alle rotatorie (Montella, Elefante, 2006).

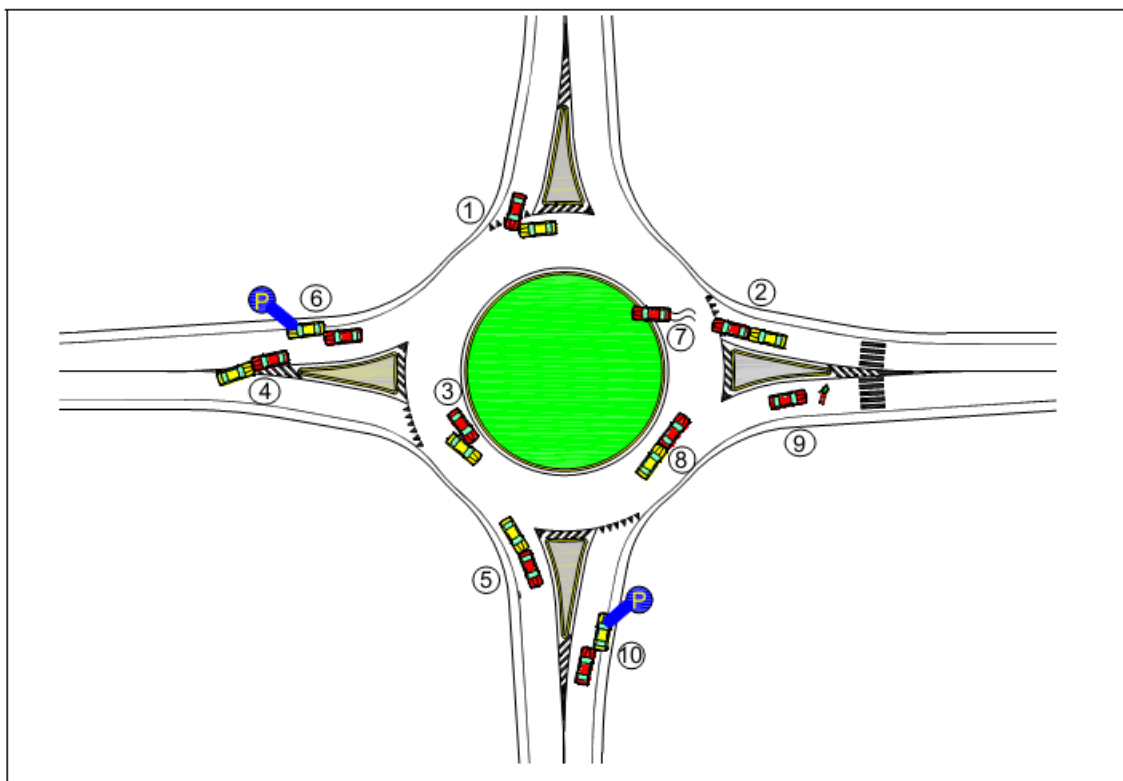


Immagine 1.2. Tipologie di incidenti (1-10) più frequenti alle rotatorie (Fonte: Montella, Elefante, 2006)

1. Fronto-laterale in ingresso
2. Tamponamento in ingresso
3. Laterale sull'anello
4. Frontale
5. Tamponamento in uscita
6. Urto veicolo in sosta in uscita
7. Fuoriuscita
8. Tamponamento sull'anello
9. Investimento pedone
10. Urto veicolo in sosta in ingresso

Nello studio di Montella et al. (2006) sono stati analizzati i dati di incidentalità relativi al periodo 2003-2005 di 15 rotatorie urbane nella città di Napoli. Si è visto che la tipologia di incidenti più frequente è il fronto-laterale (28.5%) cui seguono il tamponamento (23.6%) e lo scontro laterale (11.4%). Gli autori hanno identificato sei categorie di fattori contributivi in base alla dinamica degli incidenti e alle caratteristiche geometriche e funzionali delle rotatorie. I fattori contributivi sono:

- I. **Geometria** : elevato raggio di deflessione per attraversamento, insufficiente o troppo elevato angolo di deviazione del braccio di immissione, elevata larghezza d'ingresso, eccentricità del braccio di immissione rispetto al centro della rotatoria, raggi di ingresso e di uscita elevati, elevata larghezza dell'uscita,

elevato raggio di deflessione per svolta a destra, pendenza eccessiva del ramo di ingresso, elevata larghezza dell'anello, basso raggio di immissione.

- II. **Segnaletica orizzontale** : linea arresto assente o degradata, iscrizione di dare precedenza assente o inadeguato, assenza di isola divisionale materializzata nel ramo di approccio, strisce longitudinali e strisce di corsia assenti o degradate, sosta consentita nell'area di intersezione, attraversamento pedonale assente, degradato o con errato posizionamento, isola divisionale non materializzata nel ramo di approccio assente o degradata, cordolo dell'isola divisionale materializzata nel ramo di approccio pericoloso, cordolo dell'isola centrale pericoloso.
  
- III. **Segnaletica verticale** : segnali assenti o inefficaci di preavviso rotatoria, circolazione rotatoria, rotatoria, dare precedenza, direzioni, direzione obbligatoria a destra.
  
- IV. **Ambiente stradale** : presenza di ostacoli alla visibilità, veicoli in sosta vietata, posizionamento dei pali dell'illuminazione errato in relazione alla configurazione geometrica della rotatoria, accessi e attività commerciali nell'area di intersezione, illuminazione inadeguata.

V. **Pavimentazione** : aderenza insufficiente, irregolarità, presenza di macchia d'olio.

VI. **Utenti** : guida in stato di ebbrezza.

Il fattore contributivo più frequentemente riscontrato è stata la geometria (nel 72.4% degli incidenti) ma in quasi tutti gli incidenti vi è la presenza contemporanea di più problemi di sicurezza.





## CAPITOLO 2

### *Modelli per la previsione degli incidenti nelle intersezioni stradali*

#### 2.1\_Introduzione

La classificazione degli incidenti è importante al fine di aumentare la sicurezza sulle strade, dato che la tipologia di incidente che si ripete più frequentemente in un determinato segmento della rete stradale può essere considerata come un significativo indicatore per determinare gli interventi e le contromisure più appropriate. (Darcin e Bulent, 2010).

La capacità di prevedere il numero e il tipo di incidente considerando variabili come l'orario, il sito, le condizioni atmosferiche, il tipo di strada, le caratteristiche del veicolo e del conducente, è fondamentale per la progettazione di nuove strade e per migliorare le condizioni di sicurezza di quelle già esistenti.

Vari modelli per la previsione degli incidenti (Accident Prediction Models, in breve APMs) possono essere utilizzati per ottenere stime degli incidenti attesi, in varie sezioni della rete stradale (per tipo di strada, tipo di incrocio ecc.) e anche per identificare i fattori geometrici, ambientali e operativi associati al verificarsi degli incidenti stessi. E' importante esaminare la relazione tra i vari fattori e gli incidenti al fine di capire i meccanismi causali implicati negli incidenti stessi e per meglio prevedere il loro verificarsi.

Gli APMs rappresentano un valido metodo di ricerca per raggiungere questi obiettivi.

### *APMs per le intersezioni.*

Come già osservato nel capitolo 1, le intersezioni stradali sono luoghi in cui gli incidenti avvengono con notevole frequenza a causa della presenza di numerosi punti di conflitto tra diverse traiettorie veicolari.

Dal momento che le strade che formano le intersezioni possono essere diverse e diversamente segnalate, ci si può ragionevolmente aspettare che sia diversa anche la tipologia di incidenti che hanno più alta probabilità di verificarsi.

Sono stati quindi sviluppati diversi APMs per le intersezioni, che possano anche stimare i vari fattori associati ad ogni tipologia di intersezione. (Nambuusi, Brijs, Herman, 2008)

Nel seguito vengono presentati alcuni tipi di modelli e la loro applicazione a casi di studio specifici.

## 2.2\_Modello di regressione logistica multipla

Il modello di regressione logistica multipla è una funzione che descrive l'associazione tra un risultato binario e un set di variabili indipendenti. Tale metodologia è utilizzata nello studio di Yan et al. (2005) per determinare la tendenza degli incidenti a verificarsi agli incroci semaforizzati, identificando vari fattori di rischio (ambientali, caratteristiche del conducente e del veicolo).

*Contestualizzazione dello studio:*

- Florida, 2001
- Intersezioni semaforizzate sia urbane che extraurbane
- Dati ottenuti da DHSMV (Department of Highway Safety and Motor Vehicles)
- Incidenti di tamponamento (7666)
- Altri incidenti (15734)
- Variabili indipendenti in tabella 2.1

<b>Categoria delle variabili indipendenti</b>	<b>Livello delle variabili</b>	<b>Effetto</b>	<b>Cause di tamponamento</b>
<b>1. Fattori dell'ambiente stradale</b>			
Numero di corsie	Altro vs. 2 corsie	/	
	6 corsie vs. 2 corsie	/	
	4 corsie vs. 2 corsie	-	2 corsie
Strada a doppia o unica carreggiata	Unica vs. Doppia carreggiata	-	Doppia carreggiata
Ora degli incidenti	Notte vs. Di	-	Di
Condizione della superficie stradale	Bagnato vs. Asciutto	+	Bagnato
	Scivoloso vs. Asciutto	+	Scivoloso
Strada urbana/extraurbana	Urbana vs. Extraurbana	+	Urbana
Caratteristiche della strada	Curvatura in pendenza vs. Rettilineo	+	Curvatura in pendenza
	Curvatura vs. Rettilineo	+	Curvatura
	Rettilineo in pendenza vs. rettilineo	+	Rettilineo in pendenza
Limite di velocità	55 mph vs. 25 mph	+	55 mph
	50 mph vs. 25 mph	+	50 mph
	45 mph vs. 25 mph	+	45 mph
	40 mph vs. 25 mph	+	40 mph
	35 mph vs. 25 mph	+	35 mph
	30 mph vs. 25 mph	+	30 mph
<b>2. Caratteristiche del conducente</b>			
Uso di alcol/droga	Uso di alcol vs. No	+	Uso di alcol
	Uso di droga vs. No	+	Uso di droga
	Uso di alcol e droga vs. No	+	Uso di alcol e droga
	Uso di alcol precedente vs. No	+	Uso di alcol precedente
Età	26-35 vs. < 26	-	
	36-45 vs. < 26	-	
	46-55 vs. < 26	-	
	56-65 vs. < 26	-	
	66-75 vs. < 26	/	
Residenza	residente nel paese vs. residente in altro paese	-	Residente in altro paese
Genere	Maschio vs. Femmina	+	Guidatore maschio
<b>3. Tipo di veicolo</b>			
Veicoli coinvolti	Furgone vs. Auto	+	Furgone
	Pickup vs. Auto	+	pickup
	Veicolo pesante vs. Auto	+	veicolo pesante
<b>4. AADT</b>	Flusso di traffico giornaliero medio	+	Grande volume di traffico

+ = Effetto Positivo, - = Effetto Negativo, / = Non Significativo

Tabella 2.1. Variabili indipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

### *Tecnica dell'esposizione quasi indotta*

Come misura della capacità di causare incidenti viene usato il rapporto RAIR (Relative Accident Involvement Ratio) che indica come le variabili considerate influiscano sul verificarsi degli incidenti. Sono stati calcolati tre RAIR per valutare gli effetti sull'incidente di:

$$\text{Conducente: } \text{RAIR}_i = (D_{1i} / \sum D_{1i}) / (D_{2i} / \sum D_{2i})$$

$$\text{Veicolo: } \text{RAIR}_i = (V_{1i} / \sum V_{1i}) / (V_{2i} / \sum V_{2i})$$

$$\text{Caratteristiche ambientali: } \text{RAIR}_i = (E_{1i} / \sum E_{1i}) / (E_{2i} / \sum E_{2i})$$

Dove:

$\text{RAIR}_i$  : RAIR per tipologie  $i$  di veicolo, conducente e ambiente;

$D_{1i}$  : numero di conducenti tamponanti di tipo  $i$  in incidenti di tamponamento;

$D_{2i}$  : numero di conducenti non responsabili di tipo  $i$  in altri incidenti;

$V_{1i}$  : numero di veicoli tamponanti di tipo  $i$  in incidenti di tamponamento

$V_{2i}$  : numero di veicoli non responsabili di tipo  $i$  in altri incidenti;

$E_{1i}$ : numero di incidenti di tamponamento comprendente i fattori ambientali di tipo  $i$ ;

$E_{2i}$  : numero di incidenti di altro tipo comprendente i fattori ambientali di tipo  $i$ .

Inoltre per valutare le interazioni tra le tipologie  $i$  e  $j$  di conducente, veicolo e ambiente si può definire il seguente RAIR:

$$\text{RAIR}_{i,j} = (N1_{i,j} / \sum \sum N1_{i,j}) / (N2_{i,j} / \sum \sum N2_{i,j})$$

Dove:

$\text{RAIR}_{i,j}$ : RAIR per tipologie  $i$  e  $j$  di conducenti, veicoli e ambiente;

$N1_{i,j}$ : numero di veicoli, conducenti e condizioni ambientali nei tamponamenti per tipi  $i$  e  $j$  di incidenti di tamponamento;

$N2_{i,j}$ : numero di veicoli, conducenti e condizioni ambientali non responsabili per tipi  $i$  e  $j$  di incidenti di altro tipo.

### *Modello di regressione logistica multipla*

La variabile dipendente  $Y$  che rappresenta la classificazione degli incidenti assume il valore 1 per i tamponamenti e 0 per gli altri incidenti, quindi si calcola la probabilità che possa avvenire un tamponamento con la seguente regressione logistica multipla:

$$\ln [ \pi(x) / (1-\pi(x)) ] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n$$

dove:

$\pi(x)$ : probabilità condizionata di un tamponamento dati i valori osservati delle variabili esplicative  $x$ ;

$x_j$  : generica componente del vettore delle variabili indipendenti che descrivono le  $j$ -esime caratteristiche del conducente, del tipo di veicolo e dell'ambiente;

$\beta_j$  : coefficiente del modello che determina i rapporti delle probabilità che coinvolgono gli incidenti di tamponamento relativi alla  $j$ -esima caratteristica del guidatore, al tipo di veicolo e all'ambiente osservato.

### *Risultati*

I risultati hanno dimostrato che vi è una correlazione significativa tra diversi fattori relativi all'ambiente, al veicolo, al conducente con il rischio di incidenti di tamponamento.

- **Fattori ambientali e caratteristiche della strada:** numero di corsie; divisione o meno della strada principale; ora dell'incidente; condizioni della superficie stradale; qualità della strada; strada urbana o extraurbana; limiti di velocità.
- **Fattori relativi al veicolo urtante:** tipo di veicolo; età; residenza e genere del conducente; uso di sostanze.
- **Fattori relativi al veicolo urtato:** tipo di veicolo; età, residenza e genere del conducente.

L'immagine 2.1 mostra il rischio di incidente correlato ai vari fattori ambientali e della strada. Come si può notare i tamponamenti sono più frequenti su strade con divisione (*a*); il rischio è maggiore per strade a due corsie rispetto a strade a quattro corsie (*b*); gli incidenti di notte sono meno frequenti che di giorno (*c*); una superficie bagnata e

scivolosa aumenta il rischio di tamponamento se paragonata ad una superficie asciutta (d); aumentando la complessità geometrica della strada il rischio aumenta di conseguenza e in presenza di curvatura e di pendenza il rischio di tamponamento è quasi doppio rispetto ad una normale strada dritta (e); il rischio di tamponamento è maggiore nelle strade urbane rispetto alle extraurbane (f), infine esso aumenta all'aumentare della velocità, specialmente quando il limite è superiore ai 40 mph (g).

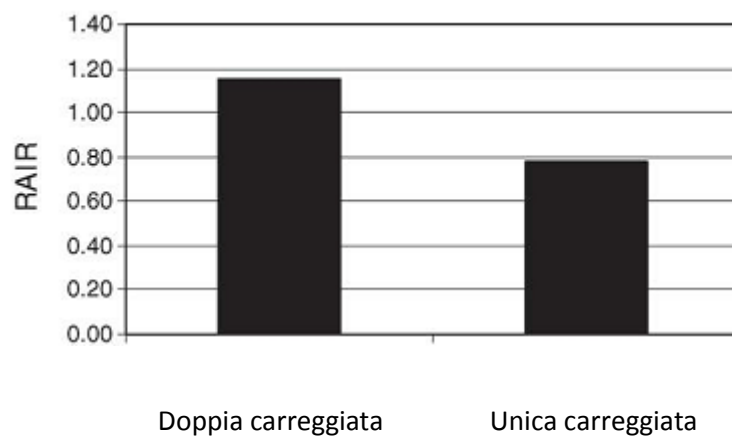


Immagine 2.1.a. Strade a doppia e unica carreggiata (Fonte: Yan et al., 2005)



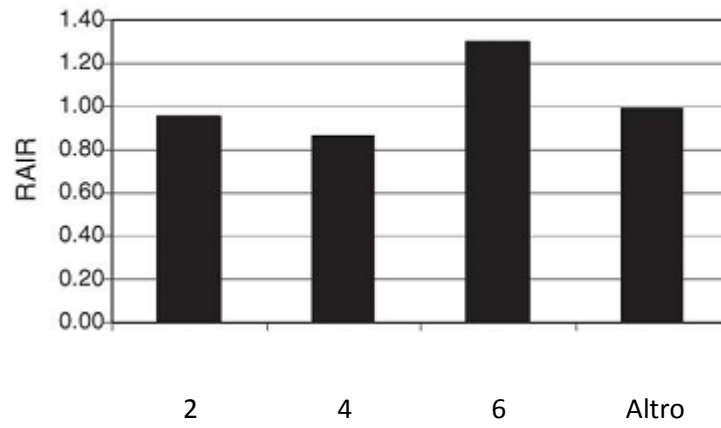


Immagine 2.1.b. Numero di corsie (Fonte: Yan et al., 2005)

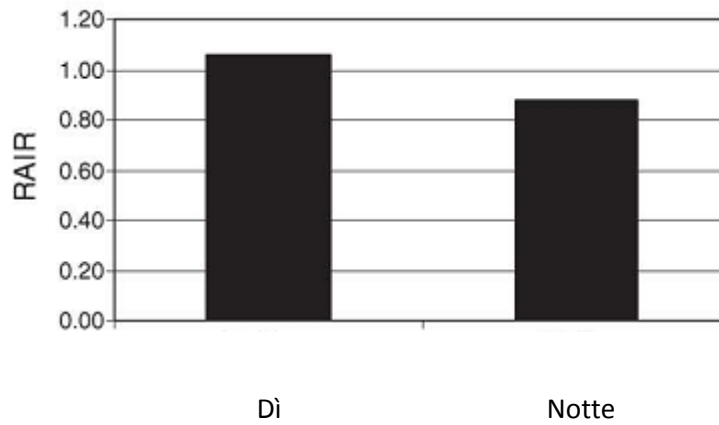


Immagine 2.1.c. Ora degli incidenti (Fonte: Yan et al., 2005)

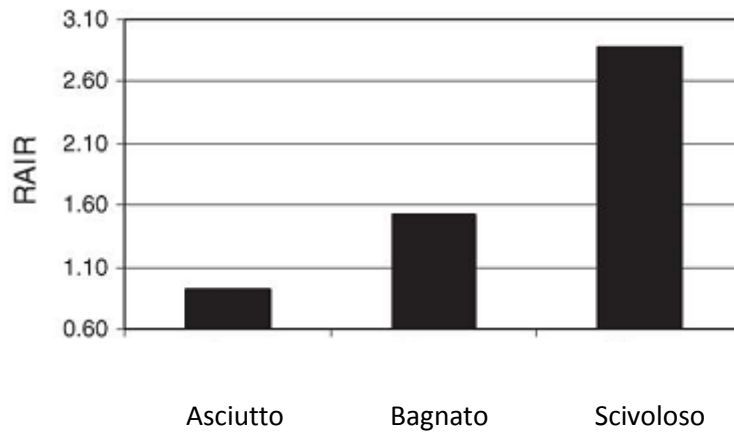


Immagine 2.1.d. Condizione della superficie stradale (Fonte: Yan et al., 2005)

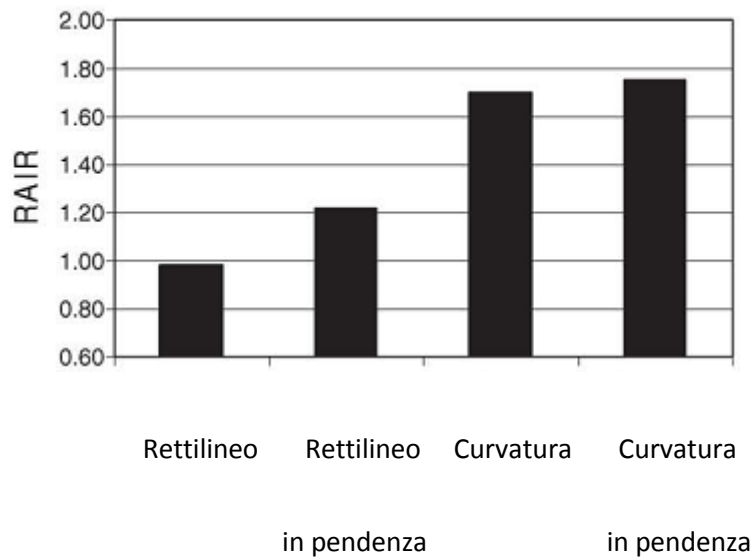


Immagine 2.1.e. Caratteristiche della strada (Fonte: Yan et al., 2005)

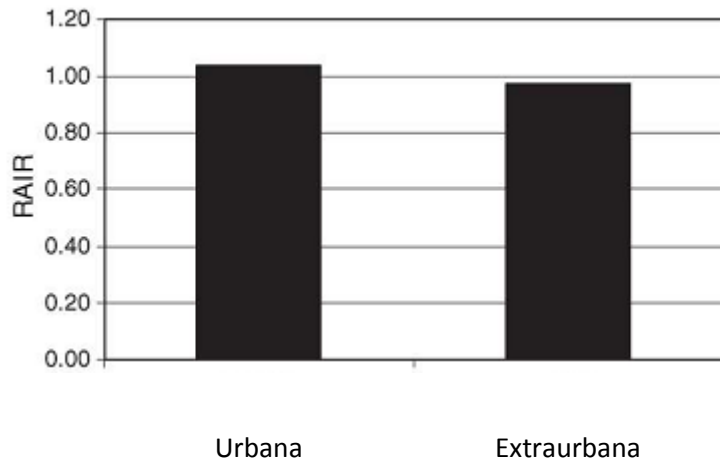


Immagine 2.1.f. Strada urbana/extraurbana (Fonte: Yan et al., 2005)

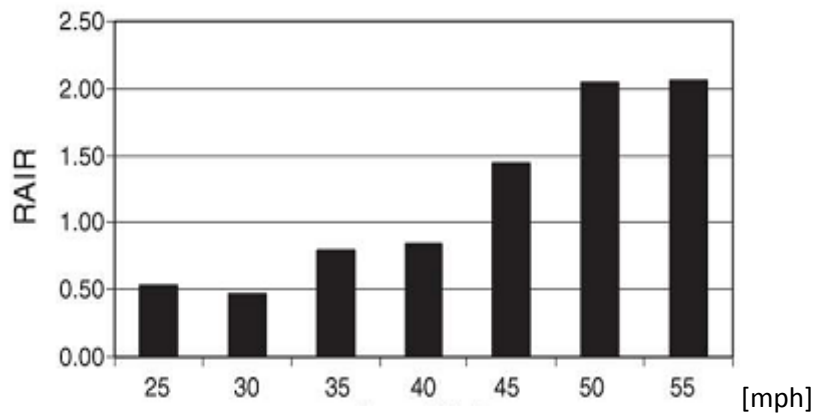


Immagine 2.1.g. Limiti di velocità (Fonte: Yan et al., 2005)

Immagine 2.1. RAIR correlato ai fattori ambientali e della strada

(Fonte: Yan et al., 2005)

L'immagine 2.2 mostra il rischio di incidente correlato alle caratteristiche del conducente e al tipo di veicolo. Come si può notare i tamponamenti sono più frequenti quando l'età del conducente supera i 75 anni (a); il rischio è maggiore per conducenti che sono sotto l'influenza di alcol accompagnato da droga (b); anche il genere è significativo per il rischio di incidenti, infatti le analisi portano a concludere che gli uomini sono più spesso coinvolti in incidenti causati da alcol, droga e alta velocità mentre le donne sono coinvolte in incidenti provocati da valutazioni errate (c), infine considerando il tipo di veicolo il rischio di tamponamento è minore per le auto (d).

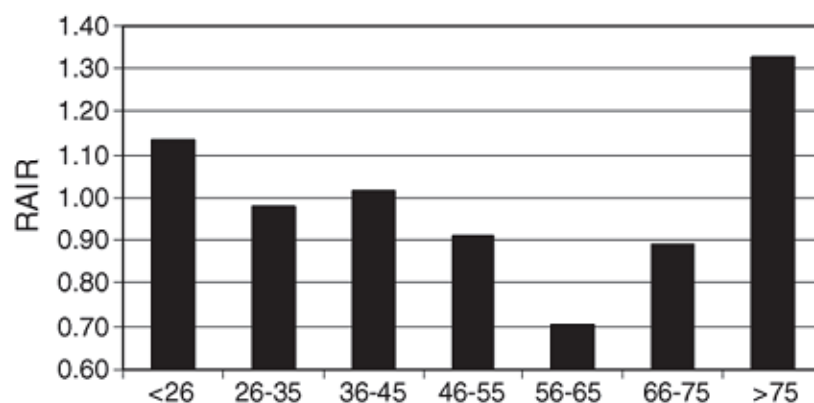
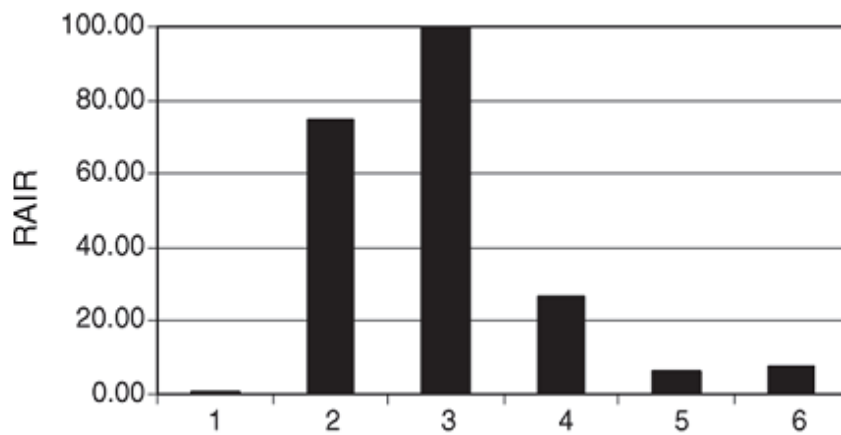
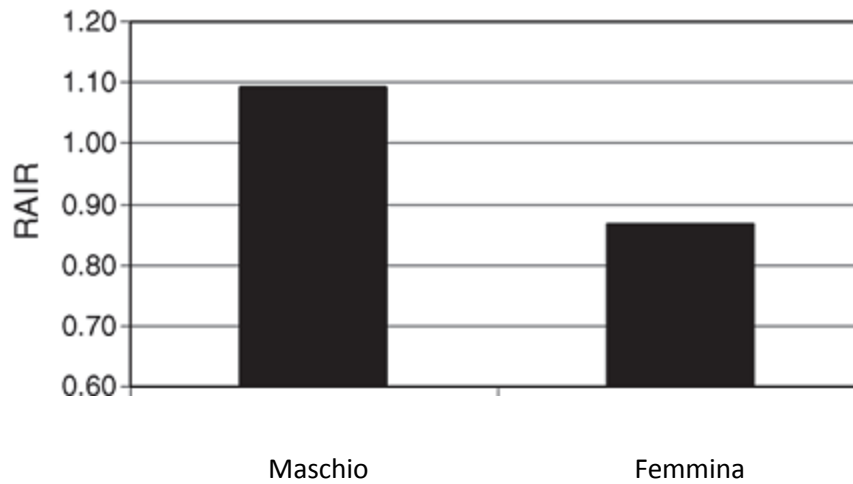


Immagine 2.2.a. Età del conducente (Fonte: Yan et al., 2005)

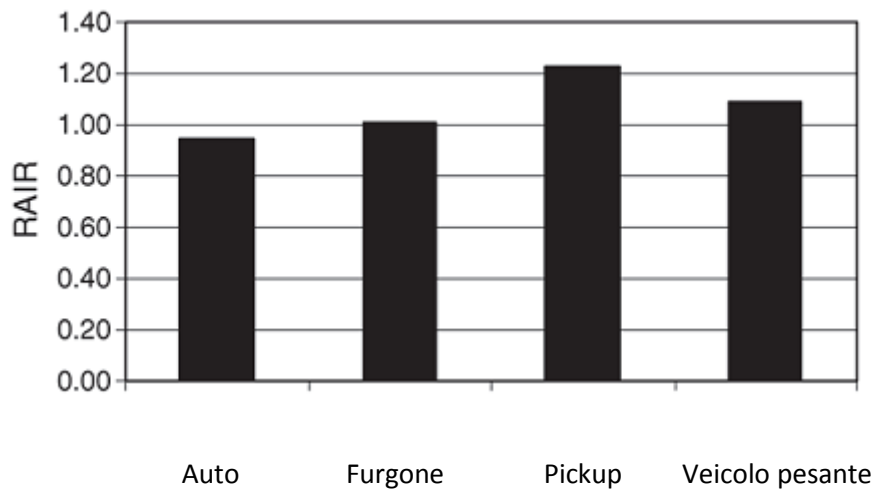


1: Nessun uso di alcol e droga; 2: Uso di alcol; 3: Uso di droga; 4: Uso di alcol & droga; 5: Uso di alcol precedente; 6: Risultato del test BAC (Blood Alcohol Content: contenuto di alcol nel sangue) in attesa

*Immagine 2.2.b. Uso di Alcol/Droga (Fonte: Yan et al., 2005)*



*Immagine 2.2.c. Genere del conducente (Fonte: Yan et al., 2005)*



*Immagine 2.2.d. Tipo di veicolo (Fonte: Yan et al., 2005)*

*Immagine 2.2. RAIR correlato alle caratteristiche del conducente e al tipo di veicolo*

*(Fonte: Yan et al., 2005)*

Gli autori dell'articolo suggeriscono di adottare particolari contromisure per ridurre il rischio di tamponamento, quali il miglioramento della configurazione delle intersezioni e l'aumento della visibilità dei semafori. E' infatti necessario rendere adeguata la distanza del semaforo principale e di tutti gli altri; inoltre andrebbero anticipati opportuni segnali prima di quello principale in modo da ridurre al conducente la possibilità di effettuare stop improvvisi. Infine gli autori affermano che in zone piovose il sistema di drenaggio dovrebbe garantire una rapida rimozione dell'acqua piovana dall'intersezione e andrebbe sempre ridotto il limite di velocità.

Anche in un altro studio (Al-Ghamdi, 2002) viene utilizzato un modello di regressione logistica multipla come APM. L'autore giunge alle stesse conclusioni sulla necessità di utilizzare opportuni accorgimenti per rendere più sicure le intersezioni.

## 2.3\_Modello di regressione lineare multipla

La regressione lineare multipla è un modello statistico che descrive le relazioni tra un risultato continuo e un set di variabili indipendenti. Si riportano nel seguito due esempi dell'applicazione del modello ad incroci e rotatorie.

### *Studio Bauer and Harwood, 2002*

#### *Contestualizzazione dello studio:*

- California, 1990-1992
- Intersezioni urbane a raso
- Tutti gli incidenti agli incroci
- Intersezioni a quattro rami con STOP
- Intersezioni a tre rami con STOP
- Intersezioni semaforizzate a quattro rami
- Variabili indipendenti riportate in tabella 2.2



Categoria delle variabili indipendenti	Livello della variabile	Effetto	Cause di incidente
<b>1. Incroci a quattro rami controllati da STOP</b>			
AADT nella strada principale e secondaria	Continuo	+	Aumento dell'AADT
Larghezza media della corsia della strada principale	Continuo	-	Larghezza ridotta
Illuminazione	Si=0, No=1	-	Illuminazione
Divieto di svolta a sinistra nella strada principale	Divieto vs. Svolta a sinistra	-	Svolta a sinistra consentita
Numero di corsie della strada principale	3 vs. ≥6	+	3
Canalizzazione per svolta a destra nella strada secondaria	Svolta a destra non libera/libera	-	Svolta a destra libera
Controllo degli accessi nella strada principale	Nessuno/Parziale	-	Parziale
<b>2. Incroci a quattro rami semaforizzati</b>			
AADT nella strada principale e secondaria	Continuo	+	Aumento dell'AADT
Limite di velocità della strada principale	Continuo	+	Aumento di velocità
Larghezza media della corsia della strada principale	Continuo	-	Larghezza ridotta
Canalizzazione per svolta a destra nella strada principale	Svolta a destra canalizzata/libera	-	Svolta libera
Numero di corsie della strada secondaria	≤3 vs. ≥4	-	≥4
Numero di corsie della strada principale	≤3 vs. ≥6	-	≥6
	4 o 5 vs. ≥6	-	≥6
Accesso controllato nella strada principale	no vs. parziale	-	Parziale
Temporizzazione del semaforo	Completamente attuato vs. semi-attuato	+	Completamente attuato
Fasatura del semaforo	Multifase vs. due fasi	-	Due fasi

+ = Effetto Positivo, - = Effetto Negativo, in tabella non sono riportati gli effetti non significativi

Tabella 2.2. Variabili indipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

Per applicare questo modello si suppone che il logaritmo del numero di incidenti sia normalmente distribuito. I modelli hanno la seguente forma:

$$\mu_i = e^{(\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_q x_{iq})}$$

Dove:

$\mu_i$  : media del numero di incidenti agli incroci di tipo  $i$

$x_{ij}$  : vettore delle variabili indipendenti, la generica delle quali rappresenta la  $j$ -esima caratteristica dell'incrocio di tipo  $i$

$\beta_j$  : parametro che quantifica l'effetto della  $j$ -esima variabile indipendente sul numero medio di incidenti all'intersezione  $i$

### *Risultati*

Per gli incroci a quattro rami sia controllati da STOP che controllati da semaforo sono stati individuati i seguenti fattori che aumentano gli incidenti:

- Aumento dell' AADT (media annuale del traffico giornaliero) sulle strade principali e secondarie
- Minor numero di corsie sulle strade principali
- Elevati valori dei limiti di velocità nelle strade principali
- Temporizzazione del semaforo completamente attuata

Quindi gli autori suggeriscono una serie di interventi e contromisure per contrastare gli effetti dei sopra evidenziati fattori sul numero di incidenti.

Gli autori dello studio precisano che il metodo della regressione lineare multipla presenta alcuni limiti, come ad esempio la possibilità che il modello preveda un numero negativo di incidenti. Per evitare questo problema si possono usare tecniche diverse come il modello di Poisson e il modello binomiale negativo.

## *Studio Arndt and Troutbeck, 1998*

*Contestualizzazione dello studio:*

- Queensland e Australia, 1986-1990
- 100 rotatorie situate in strade extraurbane e urbane
- 492 incidenti (veicolo autonomo, tamponamento all'entrata della rotatoria, collisione veicolo entrante/circolante)

Per la previsione del numero di incidenti in rotatorie con caratteristiche geometriche diverse sono stati considerati tre modelli separati, uno per ogni tipo di incidente.

### **A. Incidente di veicolo autonomo**

Variabili indipendenti: flusso di traffico, lunghezza della traiettoria di guida nell'elemento geometrico, 85-esimo percentile della velocità nell'elemento geometrico, raggio dell'elemento geometrico.

E' stata sviluppata la seguente equazione:

$$E(\mu_{singolo}) = 3.63 * 10^{-14} * Q * L * (S + \Delta S)^2 * [(S + \Delta S)^3 / (R^{1.5} + 47.4)]$$

Dove:

$E(\mu_{singolo})$  : frequenza annuale attesa di incidenti di veicolo autonomo

Q : media annuale del traffico giornaliero (AADT) nella direzione considerata

L : lunghezza della traiettoria veicolare nell'elemento geometrico (m)

S : 85-esimo percentile della velocità nell'elemento geometrico (km/h)

$\Delta S$  : diminuzione di S all'inizio dell'elemento geometrico (km/h)

R : raggio dell'elemento geometrico

In questo modello le variabili indipendenti hanno spiegato il 18,1% della variazione osservata nella frequenza annuale degli incidenti singoli.

## **B. Incidente di tamponamento**

Variabili indipendenti: flussi all'entrata e all'interno della rotatoria, velocità relativa tra i veicoli all'entrata e circolanti.

Il modello utilizzato è il seguente:

$$E(\mu_{tamponamento}) = 0.62 * 10^{-11} * Q_a * Q_c^{0.5} * S_a^2$$

Dove:

$E(\mu_{tamponamento})$  : frequenza annuale attesa degli incidenti di tamponamento

$Q_a$  : AADT sull'approccio (senso unico)

$Q_c$  : AADT nella carreggiata di circolazione adiacente all'approccio (senso unico)

$S_a$  : 85-esimo percentile di velocità nell'approccio (km/h)

Le variabili indipendenti in questo modello spiegano il 30,6% delle variazioni nella frequenza annuale degli incidenti di tamponamento in prossimità della rotonda.

### C. Collisione tra veicolo entrante e veicolo circolante

Variabili indipendenti: flusso dei veicoli che si avvicinano alla rotatoria e flusso nella rotatoria, velocità relativa tra i veicoli all'entrata e circolanti.

E' stata usata la seguente equazione:

$$E(\mu_{entrata}) = 3.45 * 10^{-12} * Q_a * \sum (Q_{ci} * S_{ri}^2)$$

Dove:

$E(\mu_{entrata})$  : frequenza annuale attesa di incidenti tra veicoli entranti e circolanti

$Q_a$  : AADT in avvicinamento (senso unico)

$Q_{ci}$  : AADT per ogni movimento  $i$  di entrata all'approccio e nella carreggiata di circolazione adiacente all'approccio

$S_{ri}$  : 85-esimo percentile della velocità per ogni movimento  $i$  di entrata all'approccio e nella carreggiata di circolazione adiacente all'approccio (km/h)

Le variabili indipendenti in questo modello spiegano il 10,7% della variazione osservata nella frequenza annuale per collisioni di veicoli entranti/circolanti.

I valori dell' $R^2$  aggiustato per i modelli sopra riportati indicano una qualità piuttosto bassa degli stessi, dato che le variabili considerate spiegano solo una piccola

percentuale della variazione nella frequenza degli incidenti annuali. Si evidenzia che non è stata utilizzata una procedura di selezione per immettere le variabili nei modelli e questa potrebbe essere una ragione della loro scarsa qualità.

## 2.4 Modelli di Poisson e Binomiale Negativo

La famiglia dei modelli di regressione di Poisson sembra essere migliore della regressione lineare multipla in quanto il verificarsi di incidenti è una variabile discreta e gli eventi sono casuali; infatti il modello di Poisson si usa in generale quando le variabili di risposta discrete rappresentano possibili esiti di un esperimento casuale (per esempio il numero di incidenti). Un limite del modello è dovuto al fatto che la media deve essere uguale alla varianza, e se tale assunto non è valido e i dati degli incidenti sono sovradispersi (la varianza è molto più grande della media), l'errore standard, di solito stimato con il metodo della massima verosimiglianza, sarà influenzato causando risultati non corretti del modello statistico. Per risolvere il problema della sovradisersione si usa il modello della distribuzione binomiale negativa introducendo un parametro che legghi la media alla varianza. In questo modo sarà migliore la descrizione della relazione tra il verificarsi degli incidenti e le caratteristiche della strada.

## *Studio Salifu, 2004*

### *Contestualizzazione dello studio:*

- Ghana, 1996-1998
- 91 intersezioni urbane non semaforizzate di cui 57 a tre rami e 34 a quattro rami
- 354 incidenti nelle intersezioni a tre rami
- 238 incidenti nelle intersezioni a quattro rami
- Dati del database nazionale degli incidenti (Building and Road Research Institute)
- Variabili indipendenti in tabella 2.3



Categoria delle variabili indipendenti	Livello della variabile	Effetto	Cause di incidente
<b>1. Incroci a quattro rami</b>			
<b>Flusso di traffico</b>			
Conteggi veicoli&pedoni che attraversano i quattro rami (AADT)	Continuo	+	Aumento di veicolo&pedoni
Proporzione di mezzi commerciali pesanti sul flusso di traffico tot	Proporzione	+	Aumento della proporzione di mezzi commerciali pesanti
<b>Controllo di traffico</b>			
Velocità di avvicinamento del veicolo all'incrocio lungo la strada principale	Continuo	+	Alta velocità
<b>Caratteristiche geometriche di design</b>			
Strada illuminata	presente=0, assente=1	+	Assenza di illuminazione
Corsia di svolta a sinistra nella strada principale	presente=0, assente=1	+	Assenza di corsia di svolta
Larghezza della strada secondaria in prossimità dell'incrocio	Continuo	+	Maggiore larghezza vicino all'intersezione
<b>2. Incroci a tre rami</b>			
<b>Flusso di traffico</b>			
AADT della strada principale e secondaria	Continuo	+	Aumento dell'AADT in entrambe
<b>Controllo di traffico</b>			
Velocità di avvicinamento del veicolo all'incrocio lungo la strada principale	Continuo	+	Alta velocità
Controllo di traffico di livello 2 (eseguito sulla strada secondaria)	presente=1, assente=0	-	Assenza di controllo di livello2
Controllo di traffico di livello 3 (strada secondaria senza controllo)	presente=1, assente=0	-	Assenza di controllo di livello3
<b>Caratteristiche geometriche di design</b>			
Larghezza media della strada principale	Continuo	-	Larghezza ridotta

+ = Effetto Positivo, - = Effetto Negativo, in tabella non sono riportati gli effetti non significativi

Tabella 2.3. Variabili indipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

La formula generale dei modelli testati è la seguente:

$$E(\mu_i) = \beta_0 * (AADT_{secondaria})^{\beta_1} * (AADT_{principale})^{\beta_2} * e^{\sum \beta_j x_{ij}}$$

Dove:

$E(\mu_i)$  : valore atteso di incidenti all' $i$ -esimo incrocio

$AADT_{secondaria}$  : flusso di traffico nella strada secondaria

$AADT_{principale}$  : flusso di traffico nella strada principale

$\beta_0$  : intercetta da stimare

$\beta_1$  : effetto del flusso di traffico nella strada secondaria sul numero atteso di incidenti

$\beta_2$  : effetto del flusso di traffico nella strada principale sul numero atteso di incidenti

$x_{ij}$  : vettore di variabili indipendenti,  $j$ , tranne il flusso di traffico nell'incrocio  $i$

$\beta_j$  : coefficiente di regressione rappresentante l'effetto della  $j$ -esima variabile indipendente tranne il flusso di traffico

Tale modello può essere trasformato usando i logaritmi naturali come segue:

$$\ln E(\mu_i) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln(AADT_{secondaria}) + \beta_2 \ln(AADT_{principale}) + \sum \beta_j x_{ij}$$

### *Risultati*

***Incroci a quattro rami.*** Vi è una correlazione positiva tra il numero di incidenti e le seguenti variabili: AADT, assenza della corsia riservata per la svolta a sinistra sulla strada principale, proporzione di veicoli pesanti sul totale del flusso di traffico, maggior larghezza della strada secondaria in prossimità dell'intersezione, assenza di illuminazione e deviazione standard dalle velocità medie sugli approcci principali.

***Incroci a tre rami.*** Hanno un effetto positivo sul numero di incidenti le seguenti variabili: AADT sulle strade principale e secondaria e deviazione standard dalla media della velocità nella strada principale. Hanno invece un effetto negativo sul numero di incidenti: controlli di traffico di livello 2 e 3 sulle strade secondarie.

Gli autori raccomandano di provvedere all'illuminazione, al restringimento della strada secondaria vicino al punto di intersezione, alla riduzione della velocità dei veicoli che si avvicinano all'incrocio dalla strada principale e alla regolazione del flusso di traffico in tutti i rami.

### ***Studio Bauer and Harwood, 2002***

*(seconda parte dello studio analizzato in 2.3)*

*Contestualizzazione dello studio:*

- California, 1990-1992
- Intersezioni urbane a raso
- Incroci a tre rami controllati da STOP
- Variabili indipendenti riportate in tabella 2.4

Categoria delle variabili indipendenti	Livello della variabile	Effetto	Cause di incidente
<b>1. Numero totale degli incidenti</b>			
<b>Flusso di traffico</b>			
AADT nella strade principali&secondarie	Continuo	+	Aumento AADT
<b>Fattori geometrici</b>			
Larghezza media della corsia della strada principale	Continuo	-	Larghezza ridotta
Presenza di spartitraffico centrale nella strada principale	Si=1, No=0	-	Assenza di spartitraffico centrale
<b>Controllo di traffico</b>			
Divieto di svolta a sinistra nella strada principale	Divieto di svolta a sinistra vs. Svolta a sinistra consentita	-	Svolta a sinistra consentita
Canalizzazione di svolta a destra nella strada secondaria	Svolta a destra non libera vs. Svolta a destra libera	-	Svolta a destra libera
Limite di velocità della strada principale	Continuo	+	Alta velocità
<b>2. Incidenti mortali e gravi</b>			
<b>Flusso di traffico</b>			
AADT nella strade principali&secondarie	Continuo	+	Aumento di AADT
<b>Controllo di traffico</b>			
Limite di velocità della strada principale	Continuo	+	Alta velocità
Divieto di svolta a sinistra nella strada principale	Divieto di svolta a sinistra vs. Svolta a sinistra consentita	-	Svolta a sinistra consentita
Controllo dell'accesso sulla strada principale	Nessuno vs. Parziale	-	Controllo dell'accesso sulla strada principale parziale
<b>Fattori geometrici</b>			
Larghezza media della corsia della strada principale	Continuo	-	Larghezza ridotta
Illuminazione	Si=0, No=1	-	Presenza di illuminazione
Canalizzazione di svolta a destra nella strada principale	Svolta a destra non libera vs. Svolta a destra libera	-	Svolta a destra libera
Presenza di spartitraffico centrale nella strada principale	Si=1, No=0	-	Assenza di spartitraffico centrale
Numero di corsie nella strada secondaria	≤ 3 vs. ≥ 4	-	≥ 4
Numero di corsie nella strada principale	≤ 3 vs. ≥ 6 4 o 5 vs. 6		≥ 6 ≥ 6

+ = Effetto Positivo, - = Effetto Negativo, in tabella non sono riportati gli effetti non significativi

Tabella 2.4. Variabili indipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

In questo studio gli autori assumono che gli incidenti seguano la distribuzione binomiale negativa. Sono stati testati modelli separati per il numero totale di incidenti (mortalità, gravi e meno gravi) e per gli incidenti mortali e gravi. Entrambi i modelli hanno la forma seguente:

$$E(\mu_i) = e^{(\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_j x_{ij})}$$

Dove:

$E(\mu_i)$  : media del numero di incidenti alle intersezioni di tipo  $i$

$x_{ij}$  : vettore di variabili indipendenti, la generica delle quali rappresenta la  $j$ -esima caratteristica all'intersezione di tipo  $i$  tranne il flusso di traffico

$\beta_j$  : parametri che quantificano gli effetti delle variabili indipendenti  $j$  sulla media di incidenti nelle intersezioni  $i$

Generalmente  $x_{i1}$  e  $x_{i2}$  rappresentano il valore dell'AADT rispettivamente sulla strada maggiore e minore nell'intersezione  $i$ . Perciò il modello può essere scritto come:

$$E(\mu_i) = e^{[\beta_0 + (\text{AADT}_{\text{principale}}) \beta_1 + (\text{AADT}_{\text{secondaria}}) \beta_2 + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_j x_{ij}]}$$

### *Risultati per il numero totale di incidenti*

Per quanto riguarda il modello per gli incidenti totali vi è una relazione positiva tra il numero totale di incidenti e: AADT sulle strade principali e secondarie e limiti di velocità sulla strada principale. Al contrario, riducono il numero totale di incidenti: corsie più ampie sulla strada principale, divieto di svolta a sinistra sulla strada principale, nessuna svolta a destra libera sulla strada secondaria e presenza dello spartitraffico sulla strada principale.

### *Risultati per gli incidenti mortali e gravi*

Per quanto riguarda il modello per gli incidenti mortali e gravi vi è una relazione positiva tra numero totale di incidenti e: AADT sulle strade principali e secondarie e limiti di velocità sulla strada principale. Riducono invece il numero di incidenti: corsie più ampie sulla strada principale, illuminazione, nessuna svolta a destra libera sulla strada principale né sulla strada secondaria, presenza dello spartitraffico sulla strada principale, minor numero di corsie sulla strada secondaria ( $\leq 3$ ) e sulla strada principale ( $\leq 3$ ); inoltre avere 4 o 5 corsie sulla strada principale è preferibile alla configurazione a 6 corsie.

### *Studio Kumara and Chin, 2003*

Ci sono intersezioni nelle quali per un periodo di tempo anche lungo si possono registrare zero incidenti. La ragione di questo potrebbe essere nel fatto che l'intersezione opera in condizioni di sicurezza o che la registrazione di zero incidenti è una possibilità che si può verificare o che gli incidenti non vengono denunciati. In tal caso è necessario usare in un unico modello Poisson e il binomiale negativo perché se presi singolarmente non aiutano a identificare i fattori che contribuiscono all'incidente. Per trattare set di dati con eccessi di zero viene utilizzato dagli autori il modello binomiale negativo "zero-inflated" (ZINB) che aiuta a distinguere le intersezioni sicure con piccola probabilità di incidenti da quelle con zero incidenti dovuti al caso, o al fatto che non sono denunciati.

#### *Contestualizzazione dello studio:*

- Singapore, 1992-2000
- 104 intersezioni a T semaforizzate
- Variabili indipendenti riportate in tabella 2.5

Categoria delle variabili indipendenti	Livello della variabile	Effetto	Cause di incidente
<b>Flusso di traffico</b>			
Volume totale in avvicinamento in AADT	Continuo	+	Aumento di volume
Volume totale di svolta a sinistra in AADT	Continuo	+	Aumento di volume
<b>Controllo di traffico</b>			
Spartitraffico con barriere	Si = 1, No = 0	-	Assenza di spartitraffico
Numero di fasi del semaforo per ciclo	Continue	+	Gran numero di fasi per ciclo
Svolta a destra permessa	Si = 1, No = 0	+	Presenza del permesso di svolta a destra
<b>Fattori geometrici</b>			
Distanza di visibilità	>100m = 1, altrimenti = 0	-	< 100m
Presenza del 5% di pendenza	Si = 1, No = 0	+	5% di pendenza
Curva orizzontale	Si = 1, No = 0	+	Curva orizzontale
Canalizzazione di svolta a destra	Si = 1, No = 0	-	Assenza di canalizzazione di svolta a destra
Corsia riservata per la svolta a sinistra non controllata	Si = 1, No = 0	+	Corsia riservata per la svolta a sinistra non controllata
Sezione di accelerazione nella corsia di svolta a sinistra	Si = 1, No = 0	-	Assenza della sezione di accelerazione nella corsia di svolta a sinistra
Più del 5% di pendenza in avvicinamento	Si = 1, No = 0	-	Pendenza $\geq 8\%$

+ = Effetto Positivo, - = Effetto Negativo, in tabella non sono riportati gli effetti non significativi

Tabella 2.5. Variabili indipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

Gli ZINB si basano sull'assunto che ci sono due condizioni che generano il processo degli incidenti: una condizione normale che corrisponde a un numero costante di incidenti attesi per unità di tempo e una condizione di sicurezza in cui gli incidenti non accadono. La distribuzione di probabilità risultante per il numero di incidenti sarà data da una distribuzione della famiglia Poisson (distribuzione binomiale negativa) e da una distribuzione contenente solo risultati zero (nessuna registrazione di incidenti); così la distribuzione di probabilità risultante conterrà un eccessivo numero di zeri se paragonata alla distribuzione di Poisson o alla binomiale negativa. Per questo ne vanno utilizzate due: una distribuzione standard e una per il "caso zero". Nel caso degli studi sugli incidenti questo sistema a doppia distribuzione può essere espresso come una



funzione di probabilità assumendo  $q_i$  come la probabilità che l'approccio  $i$  sia nella condizione di zero incidenti e  $(1-q_i)$  come la probabilità che zero incidenti si verifichino in una distribuzione come quella di Poisson o come quella binomiale negativa. Perciò:

$$P(n_i) = \begin{cases} q_i + (1 - q_i)R_i(0) & \dots n_i = 0 \\ (1 - q_i)R_i(n_i) & \dots n_i = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Con:

$n_i$  : numero annuale di incidenti registrati sull'approccio  $i$ -esimo dell'intersezione

$R_i$  : funzione di probabilità del verificarsi di  $n_i$  incidenti corrispondenti alla distribuzione standard modificata dallo stato zero

$$q_i = \exp(x'_i \beta) / [1 + \exp(x'_i \beta)]$$

$\beta$  : vettore dei coefficienti di regressione

$x_i$  : vettore delle variabili indipendenti che descrivono le caratteristiche dell'approccio  $i$

### *Risultati*

I risultati indicano che i fattori che aumentano gli incidenti sono: aumento del volume totale del traffico, aumento del traffico in svolta a sinistra, esistenza di una curva orizzontale, fase permissiva di svolta a destra, breve distanza di sicurezza, elevato numero di fasi semaforiche, raccordo per la svolta a sinistra non controllato.

I fattori che invece diminuiscono gli incidenti sono: canalizzazione della svolta a destra, sezione di accelerazione sulla corsia di svolta a sinistra, presenza di spartitraffico mediano, pendenza superiore al 5% in avvicinamento (pendenze dal 5 all'8% possono essere più sicure perché riducono la velocità anche se nello studio non sono state considerate intersezioni con pendenza superiore all'8%).

Gli autori concludono dicendo che è importante fornire le intersezioni di raccordi per la svolta a destra perché questo riduce il numero di incidenti e aumenta la frequenza del verificarsi di zero incidenti. Inoltre si è osservato che una corsia per la svolta a sinistra non controllata incrementa gli incidenti quali l'urto fianco a fianco e testa-fianco dato che i conducenti sbagliano a dare la precedenza. Per questo si raccomanda di prevedere una sezione di accelerazione nella corsia di svolta a sinistra per permettere agli automobilisti di immettersi più facilmente nel traffico; infine è molto importante l'installazione di spartitraffico mediani.

## 2.5\_Modelli effetto random

I modelli presentati precedentemente (regressione logistica e lineare multipla, regressione negativa binomiale e Poisson) possono essere meno significativi quando la struttura dei dati è caratterizzata da risposte correlate all'interno di gruppi. Se non viene valutata la correlazione all'interno dei gruppi vi potrebbe essere una attenuazione degli effetti (parametri stimati tendenti verso lo zero, errori di stima di alcuni parametri, sottostima dell'errore standard e conclusioni statistiche scorrette). Per questo il modello a effetto random tiene conto della correlazione all'interno dei gruppi.

### *Studio Kim et al., 2007*

In questo studio viene valutata l'associazione tra differenti tipi di incidente e le caratteristiche dell'intersezione usando un modello random. Per ogni tipo di incidente (variabile dipendente) vengono definiti due livelli, 1 e 0, come riportato in tabella 2.6. Per ciascun livello di ogni incidente vengono considerate le caratteristiche geometriche ed ambientali; vengono inoltre considerate le caratteristiche dell'intersezione.

<b>Variabile dipendente</b>	<b>Livello della variabile dipendente</b>
Angolo	1 se incidente ad angolo, 0 diversamente
Frontale	1 se incidente frontale, 0 diversamente
Tamponamento	1 se incidente di tamponamento, 0 diversamente
Laterale nella stessa direzione	1 se incidente laterale(stessa direzione), 0 diversamente
Laterale nella direzione opposta	1 se incidente laterale(direzione opposta), 0 diversamente

*Tabella 2.6. Livello delle variabili dipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)*

#### *Contestualizzazione dello studio:*

- Georgia, 1996-1997
- 548 incidenti (l'incidente è considerato appartenente all'intersezione quando avviene in un'area di raggio 76 m attorno ad essa)
- 91 incroci in strade extraurbane
- Le variabili indipendenti sono riportate nella tabella 2.7 (raggruppate per ogni categoria)

Categoria delle variabili indipendenti	Livello delle variabili	Effetto	Cause di incidente
<b>1. Modello di incidente ad angolo</b>			
Indicatore di tempo sereno	1 Se l'incidente avviene con tempo sereno, 0 Altrimenti	+	Tempo sereno
Indicatore delle condizioni della superficie	1 Se l'incidente avviene su strada bagnata, 0 Altrimenti	-	Superficie asciutta
Indicatore di luce del giorno	1 Se l'incidente avviene durante il dì, 0 Altrimenti	+	Dì
Indicatore di curvatura	1 Se l'incidente avviene in curva orizzontale, 0 Altrimenti	+	Curva orizzontale
Indicatore di semaforo	1 Se l'intersezione è semaforizzata, 0 Altrimenti	-	Intersezione non semaforizzata
<b>2. Modello di incidente di tamponamento</b>			
Indicatore di luce del giorno	1 Se l'incidente avviene durante il dì, 0 Altrimenti	+	Dì
Indicatore di segnale	1 Se l'intersezione è segnalata, 0 Altrimenti	+	Intersezione segnalata
<b>3. Modello di incidente laterale nella stessa direzione</b>			
Indicatore di curvatura	1 Se l'incidente avviene in curva orizzontale, 0 Altrimenti	-	No curva orizzontale
Indicatore della presenza di banchina	1 Se è presente la banchina, 0 Altrimenti	-	Assenza di banchina nella strada principale o secondaria
Indicatore di intersezione ad angolo	1 Se l'angolatura dell'intersezione è 90°, 0 Altrimenti	+	Angolo di intersezione = 90°
<b>4. Modello di incidente laterale nella direzione opposta</b>			
Indicatore di condizioni meteorologiche	1 Se l'incidente avviene durante condizioni di tempo sereno, 0 Altrimenti	-	No tempo sereno
Indicatore di condizioni della superficie	1 Se l'incidente avviene su una strada con superficie bagnata, 0 Altrimenti	-	Superficie asciutta
Indicatore della luce del giorno	1 Se l'incidente avviene durante il dì, 0 Altrimenti	-	Durante la notte
Indicatore di curvatura	1 Se l'incidente avviene in una curva orizzontale, 0 Altrimenti	-	No curva orizzontale
Indicatore di pendenza	1 Se l'incidente avviene in una curva verticale, 0 Altrimenti	-	No curva verticale

+ = Effetto Positivo, - = Effetto Negativo

Tabella 2.7. Variabili indipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

La tabella 2.8 riporta i dati statistici relativi agli incidenti alle intersezioni.

Variabile	Totale	Intersezioni semaforizzate		Intersezioni non semaforizzate	
		Numero	%	Numero	%
Numero di incidenti	548	274	50.0	274	50.0
Numero di intersezioni	91	27	32.3	64	67.7
<b>Variabili dipendenti</b>					
Angolo	239	107	19.5	132	24.1
Frontale	16	8	1.5	8	1.5
Tamponamento	144	104	19.0	40	7.3
Laterale nella stessa direzione	33	19	3.5	14	2.5
Laterale nella direzione opposta	20	8	1.4	12	2.2
<b>Caratteristiche del livello dell'incidente</b>					
Sereno	333	177	32.3	156	28.5
Superficie	116	49	8.9	67	12.2
Luce del giorno	424	229	41.8	195	35.6
Curvatura	504	263	48.0	241	44.0
Pendenza	208	77	14.1	131	23.9
<b>Caratteristiche del livello dell'intersezione</b>					
Banchina	67	22	24.2	45	49.4
Semaforo	27	27	29.7	0	0.0
Accesso secondario	26	14	15.4	12	13.2
Intersezioni ad angolo	12	10	11.0	2	2.2

Tabella 2.8. Riassunto dei dati statistici degli incidenti alle intersezioni (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

Sono stati valutati cinque modelli binomiali logistici random, uno per ogni tipo di incidente, nella forma qui riportata:

$$\ln[ \pi_{ij} / (1 - \pi_{ij}) ] = \beta_{00} + \sum_{q=1}^Q \beta_{0q} w_{qj} + \sum_{p=1}^P \beta_{p0} x_{pij} + u_{0j}$$

dove:

$\pi_{ij}$  : probabilità che un tipo di incidente  $i$  possa accadere all'intersezione  $j$

$\beta_{00}$  : intercetta

$w_{qj}$  : vettore delle caratteristiche del livello di intersezione  $q$  all'intersezione  $j$

$x_{pji}$  : vettore delle caratteristiche del livello di incidente  $p$  al livello di incidente  $i$   
all'intersezione  $j$

$\beta_{0q}$  : coefficiente di regressione associato alle caratteristiche del livello di  
intersezione

$\beta_{p0}$  : coefficiente di regressione associato alle caratteristiche del livello di  
incidente

$u_{0j}$  : effetto random causato dal livello di intersezione  $j$

$u_{0j} \sim N(0, \sigma_u^2)$

### *Risultati*

- **Incidenti frontali:** nel modello di questo incidente non sono state trovate variabili statisticamente significative. Ciò è dovuto al numero troppo piccolo di incidenti frontali (16).
- **Incidenti ad angolo:** questo tipo di incidenti è più frequente con condizioni di tempo sereno rispetto ad altre (pioggia, neve ...). La frequenza è maggiore anche durante le ore del dì rispetto alla notte e in presenza di curve orizzontali rispetto a sezioni rettilinee. L'aumento durante le ore diurne è dovuto all'aumento del traffico soprattutto durante le ore di punta. Gli incidenti ad angolo sono meno frequenti alle intersezioni con semaforo e su superfici

bagnate in quanto in presenza di pioggia i conducenti tendono a ridurre la velocità e a guidare in maniera più attenta.

- **Incidenti di tamponamento:** questo tipo di incidente risulta più frequente durante il dì e alle intersezioni semaforizzate. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che il conducente del veicolo di testa decelera alla vista del semaforo e il conducente del veicolo che segue potrebbe non essere pronto a reagire; inoltre se la strada è percorsa da numerosi mezzi pesanti ingombranti ci potrebbe essere una riduzione di visibilità dei segnali.
- **Incidenti laterali nella stessa direzione:** il modello suggerisce che gli incidenti sono meno frequenti su curve orizzontali e alle intersezioni con banchina; essi sono di solito associati al cambio di corsia fatto per evitare il contatto con il veicolo a lato che gira a destra o a sinistra. Inoltre le intersezioni con banchina forniscono più spazio per evitare le collisioni. Altri incidenti di questo tipo avvengono nelle intersezioni ad angolo retto più che in quelle oblique.
- **Incidenti laterali nella direzione opposta:** questo tipo di incidente accade con meno probabilità durante il dì con condizioni di tempo sereno, su strade bagnate, su curve orizzontali e verticali (molto probabilmente perché il conducente è costretto a diminuire la velocità).

In aggiunta alle variabili valutate in questo studio, gli autori ritengono che la probabilità che possano avvenire particolari tipi di incidenti sia associata anche a caratteristiche del conducente (attenzione, tempo di reazione, vista, ...) e del veicolo



(caratteristiche dei freni, cilindrata, ...). Anche queste variabili potrebbero essere introdotte nei modelli per aumentare l'accuratezza dei risultati.

### *Studio Chin and Quddus., 2003*

In questo studio gli autori usano una regressione binomiale negativa ad effetti random per valutare la relazione tra la frequenza degli incidenti e le caratteristiche geometriche, di traffico e di controllo di intersezioni semaforizzate.

#### *Contestualizzazione dello studio:*

- Zona Sud-Ovest di Singapore, 1992-1999
- 52 intersezioni a quattro rami
- 3000 incidenti di cui 90 mortali e 150 molto gravi
- Variabili indipendenti per ogni categoria e i loro effetti riportati in tabella 2.9

Categoria delle variabili indipendenti	Livelli della variabile	Effetto	Cause di incidente
<b>Flusso di traffico</b>			
Volume totale sull'approccio misurato con spire induttive	Migliaia di veicoli (1.416-53.84)	+	Aumento del volume totale sull'approccio misurato con spire induttive
Volume di svolta a destra misurato con spire induttive	Migliaia di veicoli (0.5-28.78)	+	Aumento del volume di svolta a destra misurato con spire induttive
Durata del ciclo	Secondi	*	
Durata rosso all'attraversamento pedonale	Secondi	*	
Numero di fasi per ciclo	Continuo (2 - 5)	+	Grande numero
<b>Controllo di traffico</b>			
Limite di velocità in avvicinamento	Continuo (km/h)	*	
Numero di fermate dell'autobus nella strada in avvicinamento	Continuo (0 - 4)	+	Più fermate
Controllo semaforico	1, pre-temp	-	Semaforo pre-temporizzato
Presenza di telecamera di sorveglianza	Si = 1, No = 0	+	Presenza di telecamera di sorveglianza
<b>Fattori geometrici</b>			
Curvatura della strada in avvicinamento	Si = 1, Altrimenti = 0	*	
Larghezza media della strada in avvicinamento maggiore di 2m	Si = 1, Altrimenti = 0	+	Larghezza media > 2m
Sezione di accelerazione sulla corsia di svolta a sinistra	Si = 1, Altrimenti = 0	-	Assenza della sezione di accelerazione sulla corsia di svolta a sinistra
Presenza di spartitraffico centrale	Si = 1, Altrimenti = 0	*	
Isola salvagente	Si = 1, Altrimenti = 0	*	
Corsia esclusiva di svolta a destra	Si = 1, Altrimenti = 0	*	
Corsia di svolta a sinistra incontrollata	Si = 1, Altrimenti = 0	+	Corsia di svolta a sinistra incontrollata
Numero di piazzole per gli autobus	Continuo ( 0 - 4)	-	Meno piazzole per gli autobus
Distanza di visibilità nell'incrocio	Continuo ( 65 - 400)m	+	

+ = Effetto Positivo, - = Effetto Negativo, \* = Significativi (direzione dell'effetto sconosciuta),

in tabella non sono riportati gli effetti non significativi

Tabella 2.9. Variabili indipendenti (Fonte: Nambuusi et al., 2008)

E' stato usato un modello binomiale negativo a effetti random per valutare la relazione tra il numero atteso di incidenti ( $\mu_{it}$ ) e le variabili indipendenti  $X_{it}$  per ogni intersezione  $i$  in un determinato periodo di tempo  $t$ .

$$\mu_{it} = \mu_{it} \delta_i$$

dove  $\delta_i$  rappresenta gli effetti random in ogni specifico sito. Per garantire un valore positivo il termine  $\mu_{it}$  può essere riscritto come  $\mu_{it} = \exp(\beta X_{it} + u_i)$  dove  $\beta$  è il vettore dei coefficienti che deve essere stimato e  $u_i$  sono gli effetti random nei siti specifici. In questo modello, l'effetto random si aggiunge al modello binomiale negativo assumendo che il parametro della sovradisersione sia distribuito casualmente nei gruppi. Questa formulazione spiega meglio l'eterogeneità non osservata nei gruppi e nel tempo. La regressione binomiale negativa ad effetti random della frequenza di incidenti annuali totali alle intersezioni, è stata stimata con l'algoritmo della massima verosimiglianza sia per quanto riguarda le caratteristiche geometriche, di traffico e la regolazione del controllo. Tutte le variabili indipendenti del set di dati sono state inserite nel modello ed è stata utilizzata la statistica "t di Student" per testare l'ipotesi  $\beta=0$  per ogni variabile. I valori non significativi sono stati eliminati uno a uno. In aggiunta è stato calcolato l'odds-ratio per facilitare l'interpretazione delle variabili.

### *Risultati*

Per verificare la bontà del modello è stato usato l'indice del rapporto log-verosimiglianza che paragona la log-verosimiglianza del modello testato con quella del

modello zero. Invece il rapporto log-verosimiglianza è stato usato per misurare quanto le variabili indipendenti del modello spiegano la variazione nei risultati. Il valore dell'indice era 0,318 che indica una buona performance del modello; il rapporto era 0,75 quindi le variabili del modello spiegano circa il 75% delle variazioni nel numero di incidenti alle intersezioni.

E' stato trovato che aumentano la frequenza degli incidenti i seguenti fattori: aumento del volume del flusso di traffico, aumento del volume di traffico di svolta a destra, presenza di corsia non controllata per la svolta a sinistra, larghezza media della strada in avvicinamento superiore ai 2m, presenza di fermate dell'autobus, distanza di visibilità nell'intersezione, numero di fasi nel ciclo semaforico.

I seguenti fattori invece diminuiscono la frequenza degli incidenti: presenza di una corsia di accelerazione, presenza di rientranze per gli autobus, uso di piani semaforici attuati per ogni intersezione.

Gli autori raccomandano l'utilizzo di una corsia di accelerazione che riduca la velocità differenziale tra i veicoli che svoltano a sinistra e quelli che attraversano l'incrocio. Una larghezza della mediana inferiore ai 2 m è in grado di ridurre il grado di libertà nella svolta a destra ed eventuali conflitti vicino alla linea dello STOP. Le fermate di autobus dovrebbero essere provviste di rientranze, per separare l'autobus fermo dagli altri veicoli in movimento. Infine i segnali dovrebbero permettere al traffico di seguire un flusso regolare definendo le precedenze in maniera corretta.

## 2.6\_Osservazioni

Abbiamo visto che molti autori hanno applicato a varie intersezioni su strade extraurbane e urbane diversi modelli per la previsione degli incidenti. Nei vari studi sopra riportati sono state considerate intersezioni a quattro e tre rami semaforizzate e non semaforizzate, intersezioni controllate da stop e rotatorie. La maggior parte dei modelli discussi è basata sulla seguente formula:

$$E(\mu_i) = \beta_0 * Q_{MI}^{\beta_1} * Q_{MA}^{\beta_2} * e^{\sum \beta_i x_i}$$

Dove:

$E(\mu_i)$ : numero atteso di incidenti alle intersezioni di tipo  $i$

$Q_{MA}$  : flusso di veicoli entranti nell'intersezione provenienti dalla strada principale

$Q_{MI}$  : flusso di veicoli entranti nell'intersezione provenienti dalla strada secondaria

$X_i$  : vettore dei valori dei fattori di rischio escluso il flusso di veicoli

$\beta_0$  : intercetta

$\beta_1, \beta_2$  : effetti dei volumi di traffico sul numero atteso di incidenti e modellati come elasticità

$\beta_i$  : parametro da stimare e rappresentante l'effetto dei fattori di rischio  $i$  nel numero atteso di incidenti escluso il volume di traffico

L'elasticità rappresenta la variazione percentuale del numero di incidenti attesi associata ad una variazione percentuale unitaria del volume di traffico. L'effetto dei fattori di rischio che influenzano la probabilità degli incidenti è dato da una funzione esponenziale che ha come argomento la somma dei prodotti dei coefficienti  $\beta_i$  e dei valori delle variabili indipendenti  $x_i$  che denotano i fattori di rischio.

## 2.7\_Studio sulle rotatorie

Per concludere viene riportato uno studio recente sulle rotatorie:

### *Studio Daniels et al., 2010*

Le rotatorie, paragonate ad altri tipi di intersezioni, possiedono alcune caratteristiche intrinseche che ne favoriscono la sicurezza: esse infatti riducono in maniera notevole la velocità e riducono i possibili punti critici per i vari utilizzatori della strada. Diversi studi (Daniels et al., 2010) hanno dimostrato che le rotatorie sono in grado di ridurre considerevolmente gli incidenti gravi, anche se non per tutti gli utilizzatori delle stesse. Il rischio sembra essere più elevato per il gruppo considerato vulnerabile, che comprende i pedoni, i ciclisti e i motociclisti.

Sono stati applicati alcuni modelli (Poisson, modelli di regressione) per la previsione degli incidenti nelle rotatorie (Daniels et al,2010).

Contestualizzazione dello studio:

- Fiandre, Belgio; 1996-2005
- 148 rotatorie, costruite dal 1990 al 2002
- Dati ottenuti dal dataset di tre province fiamminghe (dati sulla geometria delle rotatorie, sul flusso del traffico, sugli incidenti)

Sono stati utilizzati i modelli di regressione usando le variabili geometriche e di traffico disponibili e usando come variabile dipendente la media del numero annuale di

incidenti per rotatoria. E' stato quindi applicato il modello di Poisson per valutare il tasso di incidenti e, dal momento che era presente una sottodispersione dei dati si è proceduto applicando un modello che potesse rendere conto di essa (modello di probabilità gamma).

La forma della funzione dei modelli scelti era la seguente:

$$E(\lambda) = e^{\alpha} * Q_1^{\beta_1} * Q_2^{\beta_2} * e^{\left(\sum_{i=1}^n \gamma_i x_i\right)}$$

Dove:

$E(\lambda)$  : numero annuale atteso di incidenti

$Q_1$  : ADT, Average Daily Traffic (veicoli a motore)

$Q_2$  : volume di traffico per particolari tipi di veicoli (biciclette, ciclomotori, ...)

$X_i$  : altre variabili indipendenti

$\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma_i$  : parametri del modello

Il modello gamma per ogni  $\lambda$  è:

$$f(\lambda; \varphi; \mu) = \left[ \left(\frac{\varphi}{\mu}\right)^{\varphi} * e^{(-\varphi\lambda/\mu)} * \lambda^{\varphi-1} \right]; \lambda \geq 0$$

con:

$$E(\lambda) = \mu \text{ e } \text{VAR}(\lambda) = \left(\frac{\mu^2}{\varphi}\right) * \varphi \text{ è il parametro della dispersione}$$

La sottodispersione esiste se  $\varphi > 1$ , la sovradispersione se  $\varphi < 1$ , la equidispersione se  $\varphi = 1$ .



## *Risultati*

- Il gruppo considerato vulnerabile (motociclisti, utilizzatori di motorini, ciclisti, pedoni) è spesso coinvolto negli incidenti gravi alle rotatorie, in maniera superiore a quanto ci si aspetterebbe dalla loro presenza percentuale nel traffico (i dati disponibili non permettono però di stabilire se vi siano differenze con altri tipi di intersezioni)
- Vi sono meno incidenti alle rotatorie con pista ciclabile separata rispetto agli altri tipi di gestione dei flussi ciclabili, in particolare rispetto alle rotatorie con corsia per ciclisti segnata sulla strada stessa
- Il numero totale di incidenti è proporzionale al flusso di traffico
- Le rotatorie a tre rami hanno una performance peggiore rispetto a quelle con quattro o più rami (quindi presentano un maggior rischio di incidente)
- Alle rotatorie con isola centrale più grande sembrano avvenire più incidenti che coinvolgono un solo veicolo ma il numero totale di incidenti non è influenzato dalla forma dell'isola centrale.

Gli autori suggeriscono che dovrebbero essere fatti ulteriori studi sulle rotatorie in quanto, dato che il campione è poco numeroso ed è stata considerata un'area di studio limitata, i risultati ottenuti non possono essere facilmente generalizzati.



## CAPITOLO 3

### *Studi Before - After*

#### 3.1\_Introduzione

Nel capitolo 2, studiando i modelli di previsione degli incidenti, si è visto quali siano i fattori che maggiormente influiscono sul verificarsi degli incidenti alle intersezioni. Una volta individuati tali fattori vengono proposte dagli autori alcune modifiche nell'organizzazione dell'intersezione in modo da garantire migliori condizioni di sicurezza. Una delle più frequenti trasformazioni che si sono verificate negli ultimi anni è il passaggio da intersezione segnalata (a controllo semaforico o a precedenza) a rotatoria. Numerosi studi in letteratura indicano che le moderne rotatorie sono più sicure rispetto ad altri tipi di intersezione garantendo una importante riduzione di tutti gli incidenti, e soprattutto di quelli mortali.

Per esempio lo studio di Schoon e van Minnen (1994) riporta che la trasformazione di 181 intersezioni in rotatorie (Olanda) ha ridotto gli incidenti totali del 47% e quelli mortali del 71%; Troutbeck (1993) ha riportato una riduzione del 74% negli incidenti

mortali studiando la trasformazione di 73 intersezioni in rotatorie (Australia); in una rassegna della letteratura sull'argomento (Elvik et al., 1997) la conclusione è stata che il passaggio da intersezioni con STOP o controllo semaforico a rotatorie riduce il numero di incidenti di circa il 30-40 %.

La caratteristica principale delle rotatorie è quella di essere configurate per ridurre la velocità. Il veicolo entra in rotatoria con una certa deflessione dando la precedenza ai veicoli circolanti nell'anello; l'entrata e l'uscita sono curvate garantendo un abbassamento della velocità; il flusso di traffico si muove in senso antiorario intorno ad un'isola centrale. Inoltre l'attraversamento pedonale è previsto al di fuori dell'anello, ad un'opportuna distanza dalla linea di "dare la precedenza". (Persaud et al., 2000)

Per valutare l'effettivo aumento di sicurezza delle rotatorie rispetto alla situazione precedente possono essere fatti degli studi di tipo Before-After usando una procedura Bayesiana per stimare quale dovrebbe essere il numero di incidenti attesi nell'intersezione se non fosse stata trasformata. Il cambiamento del livello di sicurezza ad una intersezione trasformata per un certo tipo di incidente è dato da:

$$B - A$$

Dove  $B$  è il numero di incidenti attesi nel periodo seguente la modifica (periodo Before) presupponendo che la trasformazione non sia avvenuta e  $A$  è il numero di incidenti effettivamente avvenuti nel periodo dopo la conversione dell'intersezione (periodo After). Si usa un modello di regressione per stimare il numero annuale di incidenti ( $P$ )

che ci si aspetterebbe all'intersezione con volumi di traffico e altre caratteristiche simili a quelle che si stanno realizzando. Il risultato della regressione è poi combinato con il conteggio degli incidenti ( $x$ ) per  $n$  anni prima della trasformazione per ottenere una stima del numero annuale di incidenti attesi ( $m$ ) all'intersezione prima della conversione (periodo Before). La stima di  $m$  è:

$$m = w_1 (x) + w_2 (P)$$

dove le misure di  $w_1$  e  $w_2$  sono date dalla media e dalla varianza della stima della regressione come:

$$w_1 = P / (k + nP)$$

$$w_2 = k / (k + nP)$$

dove:

$$k = P^2 / \text{Var}(P)$$

è una costante per un dato modello ed è calcolata nel processo di calibrazione della regressione.

I fattori vengono conteggiati per la durata del periodo After e le differenze dei volumi di traffico tra i periodi Before e After. Il risultato è una stima di  $B$ . Nella procedura viene calcolata anche la varianza di  $B$ . La significatività della differenza ( $B - A$ ) è stabilita dalla stima della varianza di  $B$  assumendo, secondo una distribuzione di Poisson, che:

$$\text{Var}(A) = A$$

## 3.2\_Studio Bhagwant et al., 2000

*Contestualizzazione dello studio:*

- Stati Uniti (California, Colorado, Florida, Kansas, Maine, Maryland, South Carolina, Vermont)
- 24 intersezioni convertite a rotatorie tra il 1992 e il 1997
- Dati ottenuti dai report della polizia per un periodo prima e dopo la conversione
- Lunghezza dei periodi Before e After variabile a seconda della disponibilità dei dati (in nessun caso periodo più breve di 15 mesi)
- Esclusi i dati del periodo di costruzione, dal primo mese fino al completamento

Delle 24 intersezioni studiate 21 erano prima controllate dal segnale di STOP e 3 da semaforo; queste intersezioni sono state trasformate in rotatorie di cui 15 con un'unica corsia e 9 con più corsie.

La tabella 3.1 riporta i dati del campione.

							Incidenti			
			AADT		Mesi		Before		After	
Giurisdizione	Tipo di controllo Before	Corsia singola o multicorsie	Before	After	Before	After	Tutti	Gravi	Tutti	Gravi
Anne Arundel County, MD	1	Corisia singola	15,345	17,220	56	38	34	9	14	2
Avon, CO	2	Multicorsia	18,942	30,418	22	19	12	0	3	0
Avon, CO	2	Multicorsia	13,272	26,691	22	19	11	0	17	1
Avon, CO	5	Multicorsia	22,030	31,525	22	19	44	4	44	1
Avon, CO	1	Multicorsia	18,475	27,525	22	19	25	2	13	0
Avon, CO	5	Multicorsia	18,795	31,476	22	19	48	4	18	0
Bradenton Beach, FL	1	Corsia singola	17,000	17,000	36	63	5	0	1	0
Carrol County, MD	1	Corsia singola	12,627	15,990	56	28	30	8	4	1
Cecil County, MD	1	Corsia singola	7,654	9,293	56	40	20	12	10	1
Fort Walton Beach, FL	2	Corsia singola	15,153	17,825	21	24	14	2	4	0
Gainesville, FL	5	Corsia singola	5,322	5,322	48	60	4	1	11	3
Gorham, ME	1	Corsia singola	11,934	12,205	40	15	20	2	4	0
Hilton Head, SC	1	Corsia singola	13,300	16,900	36	46	48	15	9	0
Howard County, MD	1	Corsia singola	7,650	8,500	56	68	40	10	14	1
Manchester, VT	1	Corsia singola	13,972	15,500	66	31	2	0	1	1
Manhattan, KS	1	Corsia singola	4,600	4,600	36	26	9	4	0	0
Montpelier, VT	2	Corsia singola	12,627	11,010	29	40	3	1	1	1
Santa Barbara, CA	3	Corsia singola	15,600	18,450	55	79	11	0	17	2
Vail, CO	1	Multicorsia	15,300	17,000	36	47	16	n/a	14	2
Vail, CO	4	Multicorsia	27,000	30,000	36	47	42	n/a	61	0
Vail, CO	4	Multicorsia	18,000	20,000	36	21	18	n/a	8	0
Vail, CO	4	Multicorsia	15,300	17,000	36	21	23	n/a	15	0
Washington County, MD	1	Corsia singola	7,185	9,840	56	35	18	6	2	0
West Boca Raton, FL	1	Corsia singola	13,469	13,469	31	49	4	1	7	0

Tabella 3.1: Dati del campione (conversione in rotatoria) (Fonte: Persaud et al., 2000)

Dove:

1 = quattro rami, una strada con stop

2 = tre rami, una strada con stop

3 = tutte le strade con stop

4 = altre non segnalate

5 = semaforo

	Numero di incidenti avvenuti durante il periodo After (dopo la conversione)		Numero di incidenti attesi durante il periodo Before (senza la conversione)		Indice dell'efficacia di sicurezza $\theta$		Percentuale di riduzione degli incidenti $100(1-\theta)$	
	Tutti	Gravi	Tutti	Gravi	Tutti	Gravi	Tutti	Gravi
<b>Gruppi divisi in base alle caratteristiche prima della conversione/giurisdizione</b>								
<b>1. Corsia unica, Urbana, Controllata da STOP</b>								
Bradenton Beach, FL	1	0	9.9	0				
Fort Walton Beach, FL	4	0	16.9	2.7				
Gorham, ME	4	0	6.8	0.9				
Hilton Head, SC	9	0	42.8	8.2				
Manchester, VT	1	1	1.7	0				
Manhattan, KS	0	0	4.2	1.2				
Montpelier, VT	1	1	4.3	1.1				
Santa Barbara, CA	17	2	17.97	0				
West Boca Raton, FL	7	0	8.1	2.6				
<b>Gruppo completo (9)</b>	44	4	112.6	16.6	0.39	0.23	61	77
<b>2. Corsia unica, Extraurbana, Controllata da STOP</b>								
Anne Arundel County, MD	14	2	24.6	6.2				
Carroll County, MD	4	1	15.2	3.2				
Cecil County, MD	10	1	14.3	5.6				
Howard County, MD	14	1	36.7	7.7				
Washington County, MD	2	0	14.4	4.2				
<b>Gruppo completo (5)</b>	44	5	105.2	26.9	0.42	0.18	58	82
<b>3. Multicorsia, Urbana, Controllata da STOP</b>								
Avon, CO	3	0	19.9	0				
Avon, CO	17	1	12.2	0				
Avon, CO	13	0	30.1	2.3				
Vail, CO	14	-	19.1	-				
Vail, CO	61	-	50.9	-				
Vail, CO	8	-	9.8	-				
Vail, CO	15	-	11.8	-				
<b>Gruppo completo (7)</b>	131		153.8		0.85		15	
<b>4. Urbana, A controllo semaforico</b>								
Avon, CO	44	1	49.8	5.3				
Avon, CO	18	0	52.1	5.3				
Gainesville, FL	11	3	4.8	1.3				
<b>Gruppo completo (3)</b>	73	4	106.7	12.0	0.68	0.32	32	68
<b>Tutte le conversioni</b>	292	14	478.2	57.8	0.61	0.24	39	76

Tabella 3.2: Stima degli effetti sulla sicurezza della conversione (per gruppi) (Fonte: Persaud et al., 2000)



## *Risultati*

La tabella 3.2 riassume la riduzione degli incidenti stimati e fornisce due misure per gli effetti di sicurezza:

$\theta$ : indice dell'efficacia di sicurezza che è approssimativamente uguale al rapporto tra il numero di incidenti che avvengono dopo la conversione e il numero di incidenti atteso se non ci fosse stata la conversione

$100(1-\theta)$ : percentuale di riduzione degli incidenti

Come si può vedere dalla tabella la procedura di Bayes stima una riduzione del 39% di tutti gli incidenti nelle 24 intersezioni. Non essendo disponibili i dati di incidenti gravi per quattro rotatorie per il periodo prima della costruzione la stima per questo tipo di incidenti è stata fatta con le rimanenti venti intersezioni. Per queste il metodo empirico di Bayes stima il 76% di riduzione di incidenti gravi. I risultati nella tabella vengono inoltre suddivisi in gruppi:

- Gruppo di 9 rotatorie urbane a corsia unica derivate dalla conversione di intersezioni controllate da STOP: riduzione di tutti gli incidenti e degli incidenti gravi rispettivamente del 61% e del 77%
- Gruppo di 5 rotatorie extraurbane a corsia unica derivate dalla conversione di intersezioni controllate da STOP: riduzione di tutti gli incidenti e degli incidenti gravi rispettivamente del 58% e dell'82%

- Gruppo di 7 rotatorie urbane multicorsia: riduzione di tutti gli incidenti del 15%. Per questo gruppo non è stata calcolata la riduzione degli incidenti gravi perché i dati non erano disponibili
- Gruppo di 3 rotatorie derivate dalla conversione di intersezioni a controllo semaforico: riduzione di tutti gli incidenti e degli incidenti gravi rispettivamente del 32% e dell'68% (due di queste rotatorie sono multicorsia)

Gli effetti su incidenti mortali e molto gravi sono difficili da misurare perché il campione è molto piccolo ma è chiaro che anche questo tipo di incidenti si riduce sostanzialmente. Per le 20 intersezioni convertite riportanti i dati di gravità degli incidenti c'erano 3 incidenti fatali durante il periodo Before e nessuno durante il periodo After; inoltre c'erano 27 incidenti molto gravi durante il periodo Before e solo 3 durante il periodo After. Tenendo in considerazione la durata dei periodi Before e After, gli aumenti del volume di traffico e aggiustando per tenere conto della cosiddetta "regressione alla media" (stimata intorno al 22%), si osserva che 3 incidenti mortali o molto gravi durante il periodo After sono significativamente inferiori al valore atteso di 26.6. Quindi si stima che la riduzione di incidenti mortali e molto gravi sia dell'89%.

I risultati di questo studio indicano che il passaggio da intersezioni controllate da STOP o da semaforo a moderne rotatorie può causare una sostanziale riduzione di incidenti, specialmente di quelli mortali e molto gravi; questo è in accordo con i risultati di molti

altri studi internazionali. Inoltre gli autori osservano che le rotatorie non sono appropriate per tutte le intersezioni, specialmente quelle che prevedono un'alta percorrenza di ciclisti e di motoveicoli. Essi dichiarano anche che una moderna rotatoria dovrebbe avere un diametro esterno di circa 30m in modo da avere una deflessione che provochi una sufficiente riduzione di velocità.

### 3.3\_Studio Gross et al., 2012

Anche questo studio, come il precedente, ha lo scopo di investigare gli effetti di sicurezza derivanti dalla conversione di intersezioni controllate da semaforo a rotonde. Le rotonde hanno meno punti di conflitto potenziali. Infatti, come si vede nell'immagine 3.1, un normale incrocio semaforizzato a due strade con una singola corsia per avvicinamento ha ben 32 punti di conflitto potenziali tra veicolo e veicolo; mentre una rotonda a singola corsia ne presenta soltanto 8.

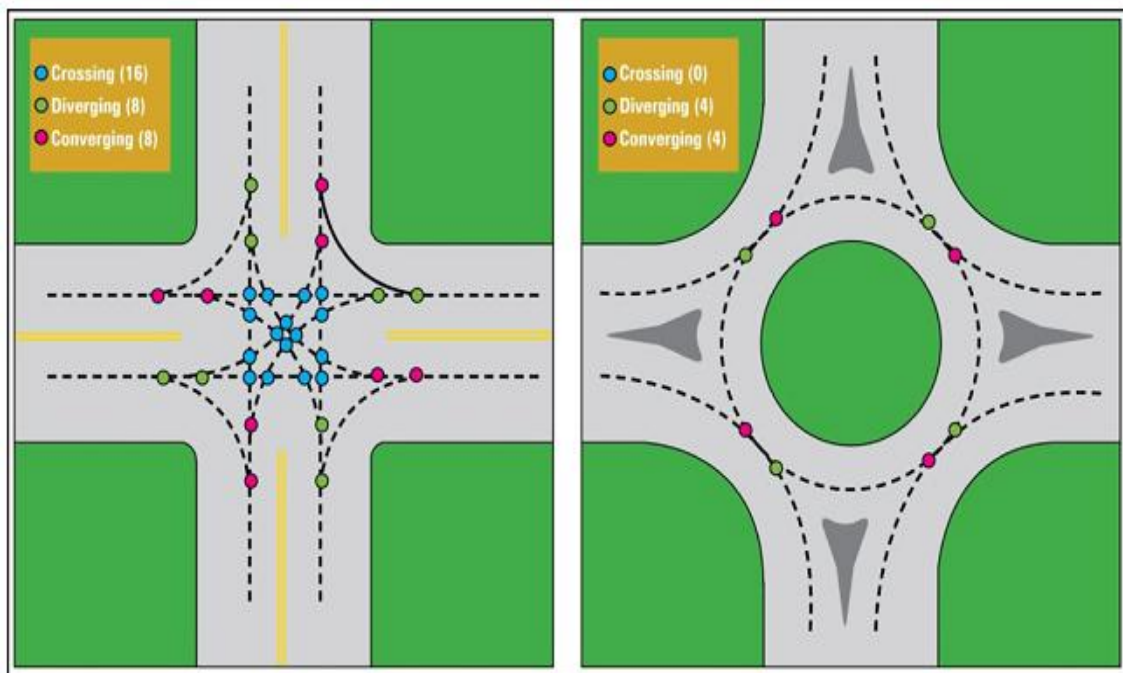


Immagine 3.1: Punti di conflitto potenziali per un incrocio semaforico e una rotonda

(Fonte: Gross et al., 2012)

Anche i tipi di incidente sono fondamentalmente diversi per la rotatoria, basti pensare che in essa non esistono gli incidenti dovuti all'attraversamento e alla svolta a sinistra.

L'obiettivo di questo studio è quello di analizzare la trasformazione di 28 incroci semaforizzati in rotatorie considerando zone geografiche molto diverse degli Stati Uniti e valutando rotatorie installate dal 2000 in poi. I dati per ogni intersezione erano forniti dalle varie agenzie di stato e locali su base volontaria e sono riportati in tabella 3.3.

<b>Variabile</b>	<b>Siti</b>	<b>Media</b>	<b>Minimo</b>	<b>Massimo</b>
Anni Before	28	3.92	1.83	13.00
Anni After	28	3.12	1.00	5.00
Totale incidenti per sito all'anno Before	28	6.72	0.67	26.23
Totale incidenti per sito all'anno After	28	6.55	0.33	34.00
Incidenti gravi per sito all'anno Before	28	1.40	0	5.00
Incidenti gravi per sito all'anno After	28	0.49	0	3.33
AADT entrante Before	28	18,529	5322	43,123
AADT entrante After	28	20,952	5322	52,541

*Tabella 3.3: Statistiche di sintesi relative alla conversione da intersezione a controllo semaforico a rotatoria (Fonte: Gross et al., 2012)*

Anche in questo caso è stato applicato il metodo empirico Bayesiano per gli studi osservazionali Before-After calcolando l'indice dell'efficacia di sicurezza ( $\theta$ ) e il cambiamento in percentuale degli incidenti ( $100(1-\theta)$ ). I risultati sono riportati in tabella 3.4.

Gruppo	Tipo di incidente	Numero di siti	Incidenti previsti nel periodo Before (senza la conversione) B	Incidenti avvenuti nel periodo After (dopo la conversione) A	Indice dell'efficacia di sicurezza $\theta$	Percentuale di riduzione degli incidenti $100(1-\theta)$
Tutti	Totale	28	643.91	511	0.792	20.8
Tutti	Gravi	28	122.03	42	0.342	65.8
Sub-urbano	Totale	15	403.00	233	0.576	42.4
Sub-urbano	Gravi	15	68.58	18	0.259	74.1
Urbano	Totale	13	240.91	278	1.150	-15
Urbano	Gravi	13	53.46	24	0.445	55.5
3 approcci	Totale	6	65.96	71	1.066	-6.6
3 approcci	Gravi	6	13.15	5	0.370	63
4 approcci	Totale	22	577.94	440	0.759	24.1
4 approcci	Gravi	22	108.88	37	0.338	66.2
2 corsie	Totale	16	485.51	394	0.809	19.1
2 corsie	Gravi	16	82.59	24	0.288	71.2
1 corsia	Totale	12	158.39	117	0.735	26.5
1 corsia	Gravi	12	39.44	18	0.451	54.9

Tabella 3.4: Dati per incidenti totali e gravi (Fonte: Gross et al., 2012)

I dati ottenuti in questo studio mostrano un generale beneficio nel passaggio da incroci semaforizzati a rotatorie. L'analisi aggregata (di tutti i siti) dimostra che vi è una riduzione significativa sia per gli incidenti totali che per i molto gravi, osservando per questi ultimi dei risultati più consistenti. Anche per le analisi separate il risultato più importante in termini di significatività è la riduzione di incidenti fatali e gravi: come già evidenziato, questo è il risultato della configurazione di base della rotatoria dove sono completamente eliminati l'attraversamento e la svolta a sinistra.

Il volume di traffico è un importante fattore che contribuisce a determinare la frequenza degli incidenti e dai risultati per sito si osserva che la sicurezza delle rotatorie sembra diminuire all'aumento del volume di traffico almeno rispetto agli

incidenti totali. Gli autori sostengono che questa relazione dipende anche dal numero di corsie e dal tipo di area ma i dati disponibili per questo studio erano insufficienti ad esplorare questi fattori in relazione all'aumento dei volumi di traffico. Comunque anche in questo caso il risultato più importante è la riduzione di incidenti mortali e gravi anche quando aumenta il volume di traffico.

### 3.4 Effetti di riduzione di incidenti in seguito alla rimozione di semafori.

Al fine di valutare il cambiamento degli indici di sicurezza alle intersezioni da un punto di vista diverso rispetto alla loro trasformazione in rotatorie, vengono di seguito sintetizzati i risultati dello studio di Persaud et al. (1997).

In tale studio, condotto a Philadelphia, vengono valutati gli effetti sugli incidenti dopo la rimozione dei semafori in incroci formati da due strade a senso unico (one-way street) e la loro trasformazione in incroci controllati da STOP.

Una delle funzioni del semaforo è quella di promuovere la sicurezza dei veicoli all'entrata e all'uscita ma possono esservi dei cambiamenti, ad esempio nella quantità e nella tipologia di traffico, che giustificano interventi sull'incrocio. Studi precedenti (anni '80) avevano dimostrato che la presenza di semafori non è giustificata in incroci con una media annuale di traffico giornaliero (AADT) inferiore a 9000 nella strada principale o a 2500 nella strada secondaria.

Dalla fine del 1992 sono stati individuati a Philadelphia diversi incroci semaforizzati che avevano le caratteristiche per poter essere trasformati in incroci controllati da STOP.

Utilizzando il metodo di Bayes è stata stimata la riduzione di tutti gli incidenti per 199 incroci semaforici trasformati in incroci controllati da STOP e si è avuta una riduzione del 24%. Tale riduzione era maggiore considerando gli incidenti gravi rispetto a tutti gli incidenti. Inoltre considerando flussi di traffico di volume diverso, si è visto che il tipo di conversione considerata, si rivela più efficace se attuata in incroci con volumi di



traffico non troppo elevati (range di AADT tra 5000 e 8000). Per volumi superiori la rimozione dei semafori aumenta gli incidenti.

Gli autori al termine dello studio ipotizzano una serie di ragioni per spiegare l'impatto favorevole sugli incidenti verificatosi con la rimozione dei semafori.

E' possibile, ad esempio, che la rimozione sia seguita da una deviazione del traffico verso altre strade o che spinga i conducenti a moderare la velocità tra un incrocio e l'altro.

Si pensa però che il beneficio maggiore in termini di sicurezza sia dovuto al fatto che i segnali di STOP eliminerebbero l'abitudine di aumentare la velocità in prossimità del semaforo per passare prima del rosso. Infatti è proprio la velocità al momento dell'impatto che determina la gravità dell'incidente.



## CAPITOLO 4

### *Conclusioni*

Il miglioramento della sicurezza stradale è un obiettivo comune a tutte le nazioni. Le intersezioni rappresentano un punto importante per raggiungere tale obiettivo perché è proprio in corrispondenza di esse che avviene la maggior parte degli incidenti mortali e gravi.

Nel decennio dal 2000 al 2010 si è avuta in Europa una progressiva diminuzione degli incidenti agli incroci di circa il 30%, percentuale rilevata anche dai dati Istat per l'Italia.

Nell'esito dell'incidente gioca un ruolo fondamentale la velocità dei veicoli coinvolti e tra i vari sistemi per il suo controllo si è rivelata di grande aiuto l'installazione di rotatorie, spesso derivanti dalla conversione di incroci pericolosi. La costruzione di molte rotatorie in tutto il territorio italiano ha portato ad un aumento di incidentalità in corrispondenza di esse di circa il 122% dal 2001 al 2010; nonostante questo significativo aumento in percentuale vi è comunque una riduzione del numero di incidenti totali alle intersezioni (incroci e rotatorie) che è del 27%.

Al fine di valutare i possibili effetti di interventi di miglioramento della sicurezza stradale sono stati sviluppati modelli matematici per la previsione degli incidenti (APMs) che consentono di prevedere il numero e le tipologie di incidenti in vari tratti stradali, come per esempio nelle intersezioni, considerando variabili quali la tipologia del sito, i volumi di traffico, le condizioni atmosferiche, il tipo di strada, le caratteristiche del veicolo e del conducente. Tra i metodi più usati in letteratura troviamo la regressione logistica multipla, la regressione lineare multipla, il modello di Poisson, il modello binomiale negativo. L'applicazione di questi modelli, anche aggregati, e di alcune loro varianti, a varie tipologie di incroci permette di fare una valutazione previsionale della sicurezza. In tutti gli studi considerati è stato riscontrato che i principali fattori che influiscono sull'incidentalità alle intersezioni sono il valore medio annuale del traffico giornaliero (AADT) e il valore dei limiti di velocità. A seconda poi della tipologia di incrocio considerato (a tre o a quattro rami, su strada extraurbana o urbana ecc.) entrano in gioco vari fattori, molti dei quali legati alla geometria dell'incrocio, come il numero di corsie sulla strada principale e sulla secondaria, la svolta a sinistra con corsia di immissione, la presenza di curve e di pendenza significativa. Altri fattori sono legati all'ambiente come la disposizione della segnaletica orizzontale e verticale e la visibilità dei segnali, le condizioni del manto stradale ecc.

Per quanto riguarda le rotatorie è stato evidenziato un aumento di incidentalità legato all'aumento dell'AADT e un aumento degli incidenti gravi che coinvolgono soprattutto gli utilizzatori vulnerabili (motoveicoli, ciclisti, pedoni) che tendono però a diminuire in

presenza di piste ciclabili separate. Molti studi in letteratura evidenziano che le rotatorie sono più sicure rispetto agli incroci proprio per la loro conformazione. Infatti l'avvicinamento alla rotatoria prevede una diminuzione della velocità che abbiamo visto essere un fattore fondamentale per l'esito degli incidenti; inoltre vengono completamente eliminati due degli eventi critici pre-incidente agli incroci (vedi Grafico1.1) che sono l'attraversamento e la svolta a sinistra.

Vari studi del tipo "Before-After" hanno valutato l'effettiva sicurezza delle rotatorie, spesso derivanti dalla conversione di incroci. Questi studi, valutando l'incidentalità prima e dopo la trasformazione dell'incrocio in rotatoria hanno evidenziato che è sempre presente una riduzione di tutti gli incidenti di circa il 30-40%. L'effetto più significativo è però la riduzione degli incidenti mortali e gravi che in alcuni casi può anche superare l'80%.

E' importante che la rete stradale sia continuamente monitorata, soprattutto in corrispondenza delle intersezioni, in modo che vengano sempre adottate le soluzioni più idonee per il miglioramento della sicurezza.



# Riferimenti bibliografici

## Capitolo 1

CARE: (Community Database on road accidents resulting in death or injury).

ERSO, 2011. *Traffic Safety Basic Facts 2011. Junctions* .

ERSO: European Road Safety Observatory.

ISTAT, 2011. Veicoli coinvolti in incidenti stradali

Montella, A., Elefante, A., (2006). Studio sui fattori contributivi dell'incidentalità nelle rotatorie urbane.

NHTSA, 2010. *Crash Factors in Intersection –Related Crashes: An On-Scene Perspective*.

NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration (U.S. Department of Transportation).

NMVCCS: National Motor Vehicle Crash Causation Survey (considerati I dati da Gennaio 2005 a Dicembre 2007).

## Capitolo 2

Al-Ghamdi, A.S., (2002). Using logistic regression to estimate the influence of accident factors on accident severity. *Accident Analysis & Prevention*.

Arndt, O.K., and Troutbeck, R.J., (1998). Relationship between roundabout geometry and accident rates. *International Symposium on Highway Geometric Design Practices*.

Bauer, K.M., and Harwood, D.W., (2000). Statistical models of at-grade intersections accidents-addendum. Pubblicazione FHWA-RD-99-094, FHWA, Washington D.C.

Chin, H.C., and Quddus, M.A., (2003). Applying the random effect negative binomial model to examine traffic accident occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*.

Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G., (2010). Extended prediction for crashes at roundabouts. *Safety Science*.

Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G., (2010). Externality of risk and crash severity at roundabouts. *Accident Analysis and Prevention*.

Darcin, A., Bulent, A., (2010). A neural network (NN) model to predict intersection crashes based upon driver, vehicle and roadway surface characteristics. *Scientific Research and Essays*.

Kim, D., Lee, Y., Washington, S., and Choi, K., (2007). Modeling crash outcome probabilities at rural intersections. *Application of hierarchical binomial logistic models*.

Kumara, S. S. P., and Chin, H. C., (2003). Modeling Accident Occurrence at Signalized Tee Intersections with Special Emphasis on Excess Zeros. *Traffic Injury Prevention*.

Nambuusi, B.B., Brijs, T., Hermans, E., (2008). A review of accident prediction models for road intersection. Steunpunt Mobiliteit & Openbare Werken.

Salifu, M., (2004). Accident prediction models for unsignalized urban junction in Ghana. *In: IATTS Research*.

Yan, X., Radwan, E., and Abdel-Aty, M., (2005). Characteristics of rear-end accidents at signalized intersection using multiple logistic regression model. *Accident Analysis & Prevention*.



## Capitolo 3

Elvik, R., Mysen, A.B., and Vaa, T., (1997). Traffic Safety Handbook (Norwegian). Oslo, Norway: Institute of Transport Economics (TØI).

Gross, F., Lyon, C., Persaud, B., and Srinivasan, R., (2012). Safety effectiveness of converting signalized intersection to roundabouts. *Accident Analysis and Prevention*.

Persaud, B., Hauer, E., Retting, R., Vallurupalli, R., and Mucsi, K., (1997). Crash reductions related to traffic signal removal in Philadelphia. . *Accident Analysis and Prevention*.

Persaud, B.N., Retting, R.A., Garder, P.E., and Lord, D., (2000). Crash Reductions Following Installation of Roundabouts in the United States. Insurance Institute for Highway Safety.

Schoon, C., and van Minnen, J., (1994). The safety of roundabouts in the Netherlands. *Traffic Engineering and Control*.

Troutbeck, R.J., (1993). Capacity and design of roundabouts in Australia. *Transportation Research Record*.