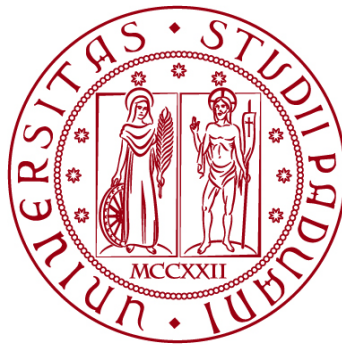


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**

*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**STUDIO DI ALCUNI ASPETTI DELLA DETERMINAZIONE  
DEL FLUSSO DI SATURAZIONE ALLE INTERSEZIONI  
SEMAFORIZZATE**

**Relatore: Chiar.mo PROF. CLAUDIO MENEGUZZER**

**Laureando: DAVIDE SANDRIN**

**ANNO ACCADEMICO 2023-2024**



# SOMMARIO

INTRODUZIONE .....	5
CAPITOLO 1: FATTORI DETERMINANTI NEL CALCOLO DEL FLUSSO DI SATURAZIONE .....	7
1.1. Caratteristiche dell'intersezione .....	7
1.2. Caratteristiche del traffico .....	8
1.3. Caratteristiche del piano semaforico dell'intersezione .....	9
1.4. Condizioni metereologiche .....	10
1.5. Comportamenti alla guida.....	10
1.6 Altri parametri (cenni).....	10
CAPITOLO 2: INFLUENZA DELLE CONDIZIONI METERELOGICHE SUL VALORE DEL FLUSSO DI SATURAZIONE.....	11
2.1 Studio di Sun et al. (2013) .....	11
2.2 Studi che riportano effetti statisticamente significativi delle condizioni meteo.....	13
2.3 Studio di Asamer & Van Zuylen (2011) .....	16
CAPITOLO 3: INFLUENZA DELLA GEOMETRIA DELL'INTERSEZIONE SUL VALORE DEL FLUSSO DI SATURAZIONE.....	19
3.1 Studio di Savitha et al. (2017) .....	19
3.2 Studio di Anas et al. (2023) .....	20
3.3 Studio di Salar & Dilveen (2021) .....	21
3.4 Studio di Potts et al. (2007).....	21
CAPITOLO 4: METODI PER LA MISURAZIONE DIRETTA DEL FLUSSO DI SATURAZIONE .....	23
4.1 Rilevamento degli headways di saturazione (secondo HCM 2000/2010) .....	23
4.2 Studio di Shao & Liu (2012).....	23
4.3 Studio di Wang et al. (2018).....	24
4.4 Studio di Bagheri et al. (2015).....	26

CAPITOLO 5: CONCLUSIONI.....	29
Bibliografia .....	32

## INTRODUZIONE

Le intersezioni a controllo semaforico svolgono un ruolo di vitale importanza nella circolazione veicolare, e la loro efficienza influenza l'intero sistema viabilistico in cui sono inserite. Negli anni sono stati effettuati numerosi studi con lo scopo di verificare quali siano i parametri e i fattori che controllano e influenzano il loro funzionamento. Argomento di interesse per questo elaborato è il flusso di saturazione, definibile come “il numero massimo di veicoli che potrebbero attraversare la linea di arresto di una corsia, in condizioni di accesso saturo, se la lanterna semaforica mostrasse sempre luce verde” (Mondal et al., 2019). Tale parametro rappresenta uno dei principali fattori da considerare nella progettazione delle intersezioni a controllo semaforico (Rodke et al., 2022), ed è oggetto di interesse in letteratura. La prima parte dell'elaborato effettuerà un'analisi generale dei principali parametri che influenzano il flusso di saturazione, sulla base degli studi condotti da vari autori. La seconda parte, invece, analizzerà più nel dettaglio l'influenza delle condizioni metereologiche sul valore del flusso di saturazione, mentre quella successiva analizzerà l'influenza delle caratteristiche geometriche dell'intersezione. L'ultima parte si concentrerà infine sull'analisi dei metodi per la misurazione diretta del flusso di saturazione.



# CAPITOLO 1

## FATTORI DETERMINANTI NEL CALCOLO DEL FLUSSO DI SATURAZIONE

I fattori che influenzano il flusso di saturazione nelle intersezioni a controllo semaforico possono essere suddivisi in cinque categorie principali: caratteristiche dell'intersezione, condizioni del traffico, caratteristiche del piano semaforico dell'intersezione, condizioni meteorologiche (Mondal et al., 2019) e comportamenti alla guida degli utenti (Yetis & Murat, 2019).

### 1.1. Caratteristiche dell'intersezione

Secondo Mondal et al. (2019), Webster (1958) fu il primo ad analizzare il flusso di saturazione, e fornì una relazione diretta di tale grandezza con la larghezza della corsia, sulla base di determinate assunzioni. Da allora sono stati effettuati numerosi studi sull'influenza delle caratteristiche dell'intersezione sul flusso di saturazione. In Tab. 1 (Mondal et al., 2019) sono elencati i parametri considerati da vari Highway Capacity Manual (HCM) e dalle linee guida per la progettazione delle intersezioni stradali dei seguenti paesi: Taiwan (THCM, 2011), USA (HCM, 2010), India (IRC-SP, 1994), Indonesia (IHCM, 1993), Germania (HBS, 2015), Finlandia (Nevala et al., 2002), Malesia (MHCM, 2006) e Australia (ARRB, 1968).

Manuale HCM	THCM, 2011	HCM, 2010	IRC- SP, 1994	IHCM, 1993	HBS, 2015	Nevala et al., 2002	MHCM, 2006	ARRB, 1968
Larghezza corsia di avvicinamento	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pendenza di avvicinamento	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
Geometria dell'intersezione <sup>1</sup>	✓	X	X	X	✓	✓	✓	X

Tab. 1 (Mondal et al., 2019): Caratteristiche dell'intersezione considerate da vari HCM

Nota: ✓: fattore considerato; X: fattore non considerato.

---

<sup>1</sup> Con "geometria dell'intersezione" si intende la configurazione fisica dell'incrocio (tipologia, forma, numero di corsie, tipologia e funzione delle varie corsie ecc.)

In aggiunta ai parametri riportati dagli HCM sopra elencati, negli anni sono stati effettuati diversi studi che hanno suggerito la presenza di ulteriori parametri che influenzano il flusso di saturazione riguardanti le caratteristiche dell'intersezione, riassunti da Mondal et al. (2019). Shao et al. (2011) suggeriscono che il numero di corsie e la pendenza delle corsie di avvicinamento all'area dell'intersezione influenzano il valore del flusso di saturazione, correlazione confermata anche dallo studio di Le et al. (2011). Bester e Meyers (2007) suggeriscono una correlazione tra il flusso di saturazione, il numero di corsie, la pendenza dell'asse stradale e il limite di velocità presente in corrispondenza dell'intersezione. Sempre Shao et al. (2011) hanno rilevato che, oltre al numero di corsie e alla pendenza di avvicinamento, anche il raggio di curvatura delle manovre di svolta ha un'influenza sul flusso di saturazione. Shang et al. (2014) propongono una correlazione tra il flusso di saturazione e la tipologia di corsia (specializzata, eterogenea ecc.). Infine, Rodke et al. (2022) evidenziano che “è necessario considerare, nello studio del flusso di saturazione, aspetti culturali e geografici, che possono influenzare le caratteristiche geometriche dell'intersezione”.

## **1.2. Caratteristiche del traffico**

In Tab. 2 sono riportati i parametri concernenti le caratteristiche del traffico che influenzano il flusso di saturazione secondo gli HCM di cui al paragrafo 1.1. In aggiunta agli HCM, sono stati condotti studi atti a verificare l'esistenza di parametri che influenzano il flusso di saturazione. Diversi studi (Vien et al., 2008; Lila et al., 2013; Adams et al., 2015; Davoodi et al., 2015) hanno verificato la sussistenza di un forte legame tra il flusso di saturazione e la presenza di veicoli a due ruote, a causa delle migliori caratteristiche di manovrabilità e accelerazione, tipiche di questa tipologia di veicoli. La presenza di mezzi pesanti, invece, secondo Lewis e Benekohal (2007) riduce considerevolmente il valore del flusso di saturazione, correlazione verificata anche da Kockelman e Shabih (2000). Anche la presenza di veicoli non motorizzati (ad esempio le biciclette) e pedoni influenza (come, d'altra parte, riportato da alcuni HCM, si veda Tab. 2) il flusso di saturazione, secondo uno studio di Allen et al (1998). Anche la presenza di fermate dei mezzi pubblici, considerata dagli HCM, è stata analizzata da Tuffour et al (2014) e Cao e Menendez (2015).



Manuale HCM	THCM, 2011	HCM, 2010	IRC- SP, 1994	IHCM, 1993	HBS, 2015	Nevala et al., 2002	MHCM, 2006	ARRB, 1968
Tipologia di veicolo	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
Presenza di veicoli in svolta	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Attraversamenti pedonali	✓	✓	X	X	✓	✓	X	✓
Presenza di parcheggi	✓	✓	X	X	X	X	✓	X
Presenza di fermate del Trasporto Pubblico Locale (TPL)	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓
Utilizzazione delle corsie	X	✓	X	X	X	X	X	✓

Tab. 2 (Mondal et al., 2019): Caratteristiche del traffico considerate da vari HCM

Nota: ✓: fattore considerato; X: fattore non considerato.

Infine, alcuni studi hanno evidenziato che sussistono correlazioni tra il flusso di saturazione e la presenza di parcheggi nelle vicinanze (Cao e Menendez, 2015) e la possibilità per i veicoli di effettuare alcune tipologie di manovre, come l'inversione a U e la svolta (Chen et al., 2011; Liu et al., 2005).

### 1.3. Caratteristiche del piano semaforico dell'intersezione

Le caratteristiche del piano semaforico, in particolare la durata delle fasi, sono considerate solo da alcuni HCM: IRC-SP del 1994, Nevala del 2002, HCM USA del 2000 e dal THCM del 2011. Alcuni studi (Devalla et al., 2015; Raksuntorn, 2012; Ibrahim et al., 2008; Sharma et al., 2012; Milaszewicz, 2018) hanno trovato una correlazione tra la presenza del display indicante i secondi residui prima del cambio di fase (countdown) e il flusso di saturazione. Secondo Koll et al. (2004), l'introduzione del verde lampeggiante prima dell'accensione del giallo tende

invece ad aumentare gli “early stops”, facendo sottostimare ai guidatori il tempo residuo al termine del giallo.

#### **1.4. Condizioni metereologiche**

Solamente IHCM del 1993 e ARRB del 1968 contemplano le condizioni metereologiche tra i fattori influenti sul flusso di saturazione. Tuttavia, diversi studi hanno approfondito il tema, ottenendo una correlazione molto elevata (si veda Cap. 2).

#### **1.5. Comportamenti alla guida**

I comportamenti alla guida non sono considerati come parametri fondamentali dagli HCM, ma uno studio di Yetis & Murat (2019) evidenzia come i comportamenti di guida in realtà impattano sul flusso di saturazione, che è influenzato dal tempo di reazione del guidatore e dal tempo necessario per raggiungere la velocità di saturazione nell’intersezione. Anche l’uso di dispositivi mobili durante la guida (vietato dal codice della strada italiano e in moltissimi altri paesi) influenza il flusso di saturazione, secondo uno studio di Wael e Abdulrahman (2023). Lijun et al. (2016), infine, evidenziano che la presenza di oggetti che possono attirare l’attenzione lungo la carreggiata (come, ad esempio, tabelloni pubblicitari o cartelli informativi) riduce il flusso di saturazione.

#### **1.6 Altri parametri**

Bonneson et al. (2006) affermano che esiste una relazione di proporzionalità diretta tra il flusso di saturazione e il numero di abitanti residenti nell’area dove si inserisce l’intersezione semaforica. Inoltre, gli stessi autori, nonché uno studio effettuato da Bonneson (1992), hanno verificato la sussistenza di una relazione di proporzionalità diretta tra il flusso di saturazione e il limite di velocità in corrispondenza dell’intersezione semaforica.

## CAPITOLO 2

# INFLUENZA DELLE CONDIZIONI METEOROLOGICHE SUL VALORE DEL FLUSSO DI SATURAZIONE

### 2.1 Studio di Sun et al. (2013)

Maze et al. (2006) affermano che “le condizioni meteo avverse influenzano le performance dei veicoli e dei guidatori in vari modi. Neve, ghiaccio e pioggia causano diminuzione delle proprietà frenanti e acceleranti dei rispettivi impianti del veicolo, riducendo al contempo anche la visibilità”. La variazione delle condizioni meteorologiche causa anche una conseguente variazione del flusso di saturazione. Alcuni studi hanno esaminato nel dettaglio questo fenomeno, ma non tutti hanno ottenuto risultati statisticamente significativi. È il caso dello studio condotto da Sun et al. (2013) presso un’intersezione semaforica a Shanghai, della quale sono state analizzate in particolare due corsie (si veda Figura 1). Gli autori hanno preso in considerazione due condizioni meteo, chiamate W1 (soleggiato, pavimentazione stradale asciutta) e W2 (pioggia, pavimentazione stradale bagnata). Hanno poi rilevato, tramite l’utilizzo di una videocamera, gli headways di saturazione  $h_s$ , calcolati come valori medi su gruppi di dieci veicoli:

$$h_s = \frac{\sum_6^{15} h_i}{10} [\text{sec.}] \quad (1)$$

Dove:

- $h_i = T_i - T_{i-1}$   $i=2,3,\dots$
- $h_1 = SRT + \frac{T_5 - T_1}{4}$
- $T_i$  è il tempo registrato quando l’asse anteriore del veicolo  $i$ -esimo attraversa la linea di stop
- SRT è il tempo di reazione del primo veicolo, generalmente assunto tra 0,8 secondi e 1,2 secondi
- $i$  è la posizione in coda del veicolo

Come si vede nella formula (1), ai fini del calcolo degli headways di saturazione sono stati considerati solamente i veicoli dal sesto al quindicesimo. L’esclusione dei primi cinque veicoli elimina l’effetto del fenomeno di “Start-Up Lost Time” (si veda il Paragrafo 2.2 e Figura 4). Infine, è stato calcolato il flusso di saturazione tramite la formula:

$$S = \frac{3600}{h_s} \quad (2)$$

I risultati sono riportati in Figura 2. Complessivamente sono stati analizzati 71 cicli e 994 headways tra veicoli.



Figura 1: disposizione delle corsie dell'intersezione oggetto dello studio (Sun et al., 2013)

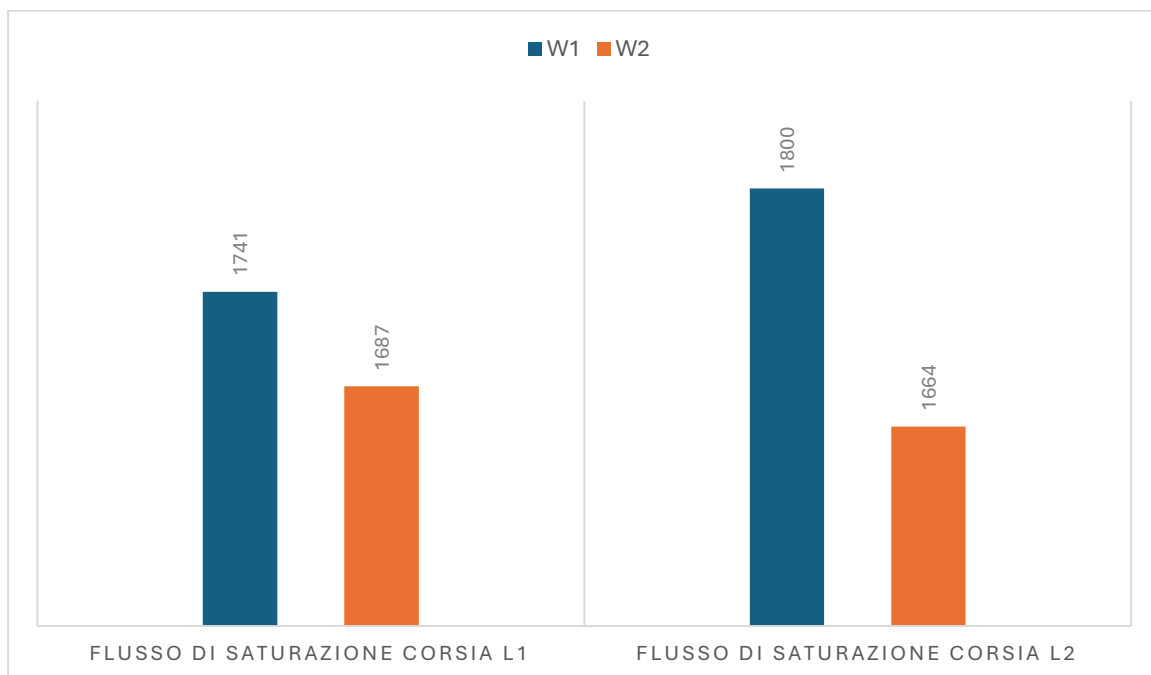


Figura 2: risultati delle analisi del flusso di saturazione (Sun et al., 2013)

Nonostante l'esistenza di differenze tra i valori del flusso di saturazione nelle condizioni W1 e W2 per entrambe le corsie (con una diminuzione del flusso in condizioni di meteo avverso), effettuando il test statistico ANOVA gli autori hanno rilevato che tali differenze non risultano statisticamente significative (Tab. 3).

Condition pairs	P value of ANOVA test	Saturation flow is significant at the 0.05 level
SF_L1W1 versus SF_L1W2	0.07	NO
SF_L1W1 versus SF_L2W1	0.46	NO

Tab. 3 (Sun et al., 2013): Test ANOVA

Come si può evincere dalla lettura della Tab. 3, risulta statisticamente non significativa non solo la differenza tra le condizioni meteo W1 e W2 per la corsia 1, ma anche quella tra la corsia 1 e la corsia 2 a parità di condizioni meteo. Combinando questi due risultati si può quindi affermare che, nello specifico caso di studio considerato dagli autori, il flusso di saturazione non è influenzato in maniera significativa né dalle condizioni meteo né dalle caratteristiche geometriche delle corsie.

## 2.2 Studi che riportano effetti statisticamente significativi delle condizioni meteo

Alcuni studi hanno invece rilevato differenze statisticamente significative del valore del flusso di saturazione in varie condizioni meteo. A titolo di esempio, si riportano gli studi di Agbolosu-Amison et al. (2004) e Shin & Keechoo (1998).

Agbolosu-Amison et al. (2004) hanno preso in esame un'intersezione semaforica a Burlington, nel Vermont, rilevando i dati mediante l'utilizzo di videocamere, associandoli poi alle condizioni meteo presenti nell'ora e nel giorno di rilevazione. Le rilevazioni sono state effettuate ininterrottamente dalle 7 alle 19, durante alcuni giorni nell'arco di tre mesi, per un totale di almeno 30 ore. Durante il rilevamento, sono stati coperti 446 cicli semaforici completi. Gli autori hanno differenziato i dati tra direzione est (di seguito riportata con la sigla EB) e direzione ovest (di seguito riportata con la sigla WB), e suddiviso le condizioni della strada in sei categorie:

1. Asciutto
2. Bagnato
3. Bagnato con precipitazioni nevose
4. Bagnato e fangoso
5. Fangoso sulla carreggiata
6. Nevoso e appiccicoso (i.e. appiccicoso alla superficie stradale)

Per poter utilizzare la formula di calcolo del flusso di saturazione di cui al paragrafo 2.1, sono stati estratti i dati degli headways di saturazione solamente nelle condizioni di traffico con almeno cinque veicoli in coda prima dell'inizio della fase di verde. In Tab. 4 sono riportati i risultati dello studio, con il flusso di saturazione nelle sei condizioni stradali e la riduzione % del flusso di saturazione rispetto alle condizioni asciutte.

Condizioni della strada	Headway di saturazione [Secondi per veicolo]		Riduzione % del flusso di saturazione	
	EB	WB	EB	WB
Asciutto	2,24	2,04	0%	0%
Bagnato	2,31	2,08	3%	2%
Bagnato con precipitazioni nevose	2,42	2,13	7%	4%
Bagnato e fangoso	2,41	2,39	7%	15%
Fangoso sulla carreggiata	null	2,58	null	21%
Nevoso e appiccicoso	2,67	2,44	16%	16%

*Tab. 4 Risultati dello studio di Agbolosu-Amison et al. (2004)*

*NOTA: null= dati non disponibili*

Per analizzare i dati sono stati poi effettuati due test: il test statistico ANOVA, che ha evidenziato differenze statisticamente significative tra tutti i sotto-campioni, e il test della “comparazione multipla”, che invece ha evidenziato l’assenza di differenze statisticamente significative tra le seguenti coppie di condizioni:

1. asciutto – bagnato;
2. bagnato - bagnato con precipitazioni nevose;
3. bagnato e fangoso - nevoso e appiccicoso.

Shin&Keechoo (1998) hanno preso in esame due intersezioni in Corea del Sud, una a Seoul e una a Suwon, in due condizioni del mando stradale: bagnato e asciutto. Similmente agli studi

sopra riportati, sono stati misurati gli headways di saturazione nelle due intersezioni, avvalendosi di registrazioni video come riportato in figura 3. Ai fini del calcolo del flusso di saturazione sono stati considerati gli headways dal sesto veicolo in poi, in quanto i primi cinque veicoli sono caratterizzati da headways maggiori a causa dello “Start-Up Lost Time” (Figura 4).

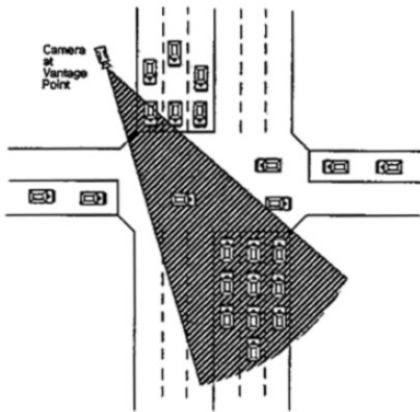


Figura 3: posizione della videocamera rispetto all'intersezione (Shin&Keechoo, 1998)

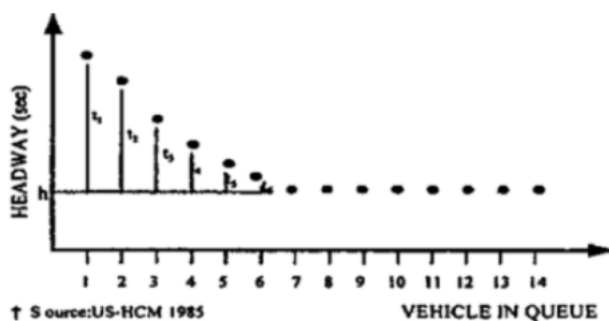


Figura 4: Headway di saturazione dei primi 5 veicoli in coda (Shin&Keechoo, 1998)

Dopo aver effettuato due test statistici (“paired-difference test” e “small-sample test”) per verificare la sussistenza di differenze statisticamente significative tra gli headways di saturazione in condizione di pavimentazione bagnata e asciutta, gli autori affermano che c’è un significativo aumento degli headways di saturazione (e quindi una diminuzione del flusso di saturazione) in condizioni di pavimentazione bagnata rispetto alle condizioni di pavimentazione asciutta. Il flusso di saturazione, considerando un’intensità di precipitazione di circa 20 mm/h, presenta una riduzione variabile tra il 3% e il 13%, range che tuttavia non può essere validato

dalle analisi statistiche, in quanto non supportato da un numero sufficiente di siti di osservazione e di valori dell'intensità di pioggia.

### 2.3 Studio di Asamer & Van Zuylen (2011)

Asamer & Van Zuylen (2011) hanno studiato il flusso di saturazione e gli headways di saturazione di tre diverse intersezioni a Vienna, prendendo in considerazione cinque condizioni meteorologiche e del manto stradale:

1. Precipitazione leggera (0,5mm in 10 minuti) con strada coperta da neve;
2. Precipitazione leggera (0,5mm in 10 minuti) con strada bagnata;
3. Precipitazione intensa (2mm in 10 minuti) con strada coperta da neve;
4. Precipitazione intensa (2mm in 10 minuti) con strada bagnata;
5. Nessuna precipitazione, pavimentazione asciutta.

I rilevamenti sono stati effettuati tramite registrazione video contemporaneamente per tutte le intersezioni a gennaio 2005 (per 4 giorni) e a gennaio 2010 (per due giorni). In ogni intersezione e per ogni condizione meteorologica è stata effettuata una registrazione continuativa di due ore, coprendo circa cento cicli semaforici. Il flusso di saturazione è stato ottenuto similmente agli studi sopra riportati. In Figura 5 sono riportati i risultati sperimentali dei rilevamenti.

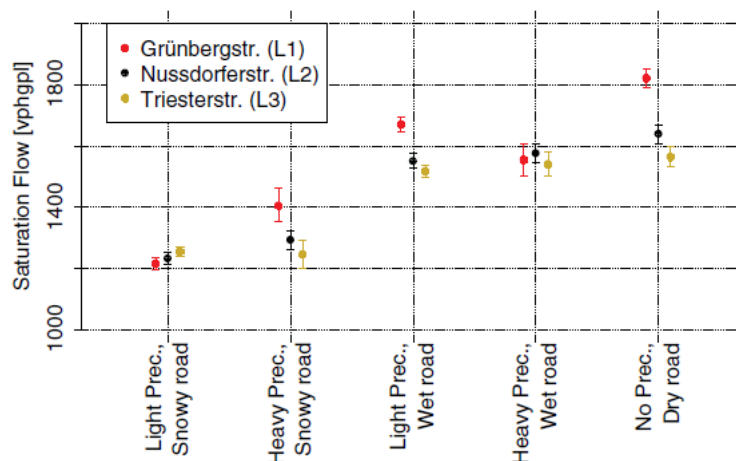


Figura 5: Risultati sperimentali delle rilevazioni nelle tre intersezioni (Asamer & Zuylen, 2011)

Dai dati si osserva una forte riduzione del flusso di saturazione (rispetto al caso di pavimentazione asciutta) a causa del manto nevoso, mentre la riduzione causata dalla pavimentazione bagnata appare decisamente minore. La situazione in cui la strada era innevata e la precipitazione intensa ha determinato, in due delle tre intersezioni studiate, un flusso di



saturazione più elevato rispetto a quando la precipitazione nevosa era debole, differenza dovuta, secondo gli autori, ai diversi tipi di neve (compressa o fanghiglia) presenti sul manto stradale, come mostrato nelle registrazioni video. Infine, le discrepanze tra le tre sedi di rilevazione sono state causate da fattori locali influenti sulla formazione della neve (concentrazione salina, temperatura e vento).



## CAPITOLO 3

### INFLUENZA DELLA GEOMETRIA DELL'INTERSEZIONE SUL VALORE DEL FLUSSO DI SATURAZIONE

Il presente capitolo è inteso come un approfondimento del paragrafo 1.1, con riferimento ad alcuni dei fattori che influiscono sul flusso di saturazione. In Tab. 5 sono riportati, a titolo di sintesi, i parametri analizzati dagli autori trattati nel presente capitolo.

	Savitha et al. (2017)	Anas et al. (2023)	Salar & Dilveen (2021)	Potts et al. (2007)	Bonneson et al. (2006)
Larghezza corsia	✓	X	✓	✓	X
Pendenza	✓	X	X	X	X
Numero corsie	X	✓	X	X	✓

*Tab. 5: Parametri analizzati dagli autori citati nel Cap. 3*

*Nota: ✓: fattore considerato; X: fattore non considerato.*

#### 3.1 Studio di Savitha et al. (2017)

Savitha et al. (2017) hanno preso in esame 15 intersezioni semaforiche a Bangalore, in India, raccogliendo i dati con strumentazione video. Lo studio era finalizzato a sviluppare una nuova formula per il calcolo del flusso di saturazione e a confrontarla con i valori ottenuti con la formula (2) (pagina 12), aggiustata secondo quanto indicato dall'HCM 2000, e con la formula fornita dalle linee guida indiane IRC: SP41-1994:

$$S = 525 * w \text{ [autovetture equivalenti/h]} \quad (3)$$

Dove  $w$  indica la larghezza della corsia in metri.

La formula fornita dagli autori per il calcolo del flusso di saturazione di una corsia di svolta a destra è la seguente:

$$S = S_0 * fg * ftr \text{ [autovetture equivalenti/h]} \quad (4)$$

Dove:

- $S_0=600*w$
- $w$ = larghezza corsia in metri
- $fg = 1 - 0.013*(\%g)$
- $\%g$  è la pendenza della sede stradale di avvicinamento all'intersezione semaforica (positiva se in salita)
- $ftr = 1 + 4 * (\frac{r}{1000})$ , dove  $r$  rappresenta il raggio di sterzata dei veicoli svoltanti a destra in metri.

Al fine di verificare la validità delle formule sopra riportate, gli autori hanno effettuato una regressione lineare tra i dati rilevati sul campo (formula (2)) e quelli ottenuti utilizzando le formule (3) e (4), trovando i risultati migliori qualora all'interno della formula vengano inseriti i fattori correttivi legati alla pendenza e al raggio di sterzata. La formula (4), infatti, risulta quella che meglio rappresenta i dati raccolti (essendo quella che presenta il valore di  $R^2$  maggiore).

### 3.2 Studio di Anas et al. (2023)

Questo studio si concentra invece su 24 intersezioni in Qatar, selezionate in modo da presentare “condizioni il più possibile ideali”<sup>2</sup>. Durante le rilevazioni, effettuate sempre con dispositivi di registrazione video, sono stati coperti 3335 cicli e 62000 veicoli, da agosto 2017 a dicembre 2018. Le 24 intersezioni oggetto di studio erano caratterizzate da un numero di corsie (differenziando tra direzione nord, sud, est e ovest) diverso, che andava da un minimo di una corsia per senso di marcia ad un massimo di cinque. In particolare, i dati hanno evidenziato un aumento del flusso di saturazione in corrispondenza di intersezioni dotate di un numero di

---

<sup>2</sup> Con “condizioni il più ideali possibile” gli autori intendono intersezioni in cui non sono presenti fermate di mezzi pubblici e/o parcheggi nelle vicinanze (entro 75 m dall'intersezione), prive di attraversamenti pedonali e con larghezza della corsia pari a 3,65 m; si assume inoltre l'assenza di deviazioni del traffico.

corsie elevato. In particolare, il flusso di saturazione varia da 2062 v/h per rami di intersezioni dotati di una sola corsia a 2345 v/h per rami composti da cinque corsie (valori riferiti ad una singola corsia).

Sulla base di opportuni test statistici, gli autori hanno concluso che le situazioni analizzate sono suddivisibili in due diversi gruppi: rami con un numero di corsie da 1 a 2 e rami con un numero di corsie da 3 a 5. Il test ha evidenziato che sussiste una differenza statisticamente significativa solamente tra valori di gruppi diversi. A titolo esemplificativo, la differenza tra il valore del flusso di saturazione tra rami a 1 corsia e 3 corsie risulta essere statisticamente significativa, mentre non lo è la differenza tra rami a 1 corsia e rami a 2 corsie, così come tra rami a 3 corsie e rami a 4 corsie.

### 3.3 Studio di Salar & Dilveen (2021)

Anche Salar & Dilveen (2021) si concentrano sulla larghezza della corsia di avvicinamento all'intersezione semaforica, prendendo in esame cinque intersezioni a Erbil, in Iraq. Anche in questo caso per la raccolta dei dati è stata usata una strumentazione video. Successivamente, utilizzando una regressione lineare, gli autori hanno ottenuto una relazione tra il flusso di saturazione e la larghezza della corsia, caratterizzata da un buon valore di  $R^2$  come mostrato in Figura 6.

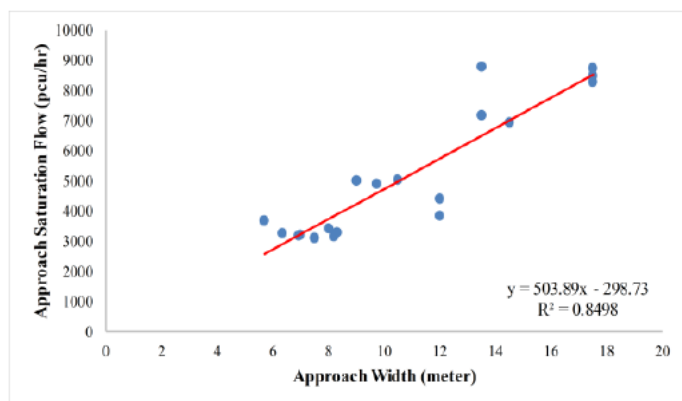


Figura 6 (Salar & Dilveen, 2021): risultati della regressione lineare.

### 3.4 Studio di Potts et al. (2007)

In questo studio gli autori hanno preso in esame 25 intersezioni in nove diverse città statunitensi: Tucson, Boise, Washington D.C, Miami, Portland, Marathon, Orlando, Ocala e Clearwater. Le intersezioni sono state selezionate in modo da avere una percentuale di mezzi pesanti inferiore al 2% e condizioni ambientali e geometriche “il più ideali possibile”. Gli

headways sono stati misurati solamente tra il quarto e l'ottavo veicolo in coda (al fine di massimizzare, a detta degli autori, il numero degli headways di saturazione), mentre per intersezioni con code di veicoli superiori a 8, sono stati raccolti i dati dal quarto veicolo al decimo, al fine di aumentare il campione di osservazione. Per assicurare una minima influenza di fattori esterni nel calcolo del flusso di saturazione, sono stati rimossi dal database i seguenti dati:

- headways di veicoli che effettuavano una manovra di svolta;
- code che contenevano uno o più mezzi pesanti;
- headways condizionati da fenomeni di accodamento in uscita dall'intersezione;
- headways di veicoli influenzati da manovre di parcheggio nelle vicinanze.

Complessivamente sono stati misurati 1199 headways. La larghezza delle corsie oggetto dello studio era così distribuita:

- nove corsie larghe 2.9 m (9.5 ft);
- cinque corsie larghe 3.3 m (11 ft);
- una corsia larga 3.5 m (11.5 ft);
- sei corsie larghe 3.6 m (12 ft);
- tre corsie larghe 4.0 m (13 ft);
- una corsia larga 4.3 m (14 ft).

I dati raccolti sono stati suddivisi in base alla larghezza della corsia, effettuando poi il test ANOVA per verificare la sussistenza di differenze statisticamente significative tra i gruppi di larghezza diversi. Il test ha fornito risultati statisticamente significativi (riferiti a singola corsia) per i seguenti tre gruppi:

- larghezza corsia pari a 2,9m, con un valore medio di flusso di saturazione compreso tra 1736 autovetture/h e 1752 autovetture/h;
- larghezza corsia pari a 3,3m/3,6m (queste due larghezze sono state raggruppate dagli autori in un unico gruppo), con un valore di flusso di saturazione pari a 1815/1830 autovetture/h;
- larghezza corsia pari a 4m, con un flusso di saturazione compreso tra 1898 autovetture/h e 1913 autovetture/h;

I risultati, anche in questo caso, mostrano un aumento massimo del 10% (da 1736 autovetture/h a 1913 autovetture/h) del flusso di saturazione all'aumentare della larghezza delle corsie esaminate.

# CAPITOLO 4

## METODI PER LA MISURAZIONE DIRETTA DEL FLUSSO DI SATURAZIONE

### 4.1 Rilevamento degli headways di saturazione (secondo HCM 2000/2010)

Tutti gli studi di cui al Capitolo 2 e 3, come anche gli HCM 2000 e 2010, per determinare il flusso di saturazione si avvalgono del rilevamento degli headways di saturazione, utilizzando poi la formula (2) (pagina 12), tenendo conto del fenomeno dello “Start up lost time”. Di seguito sono riportate alcune indicazioni fornite dall’HCM 2000 riguardanti il metodo per la misurazione diretta del flusso di saturazione:

- le disposizioni standard per l’ottenimento del flusso di saturazione sono:
  - larghezza di corsia pari a 3,66m (12 piedi);
  - passaggi dei veicoli misurati con riferimento al loro asse anteriore;
  - intersezione caratterizzata da traffico veicolare omogeneo composto da autovetture;
  - strada priva di pendenza;
  - assenza di veicoli effettuanti manovre di parcheggio o svolta;
  - headways misurati a partire dal quarto veicolo in coda;
  - l’unità di misura standard è autovetture /ora per corsia;
  - il punto di riferimento per la misura del flusso di saturazione è la linea di stop della corsia;
  - il rilevamento degli headways di saturazione termina quando l’asse anteriore dell’ultimo veicolo attraversante supera la linea di stop.
- Per ottenere un valore di flusso di saturazione statisticamente significativo è necessario rilevare almeno 15 cicli semaforici.

### 4.2 Studio di Shao & Liu (2012)

Shao e Liu (2012) propongono un metodo per il calcolo del flusso di saturazione basato su due possibili formule:

$$S = 3600 * \exp \left( -\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \ln h_{si} \right) \quad [\text{veicoli/h}] \quad (5)$$

dove:

- $n$  è il numero di veicoli soggetti a rilevamento degli headways;
- $h_{si}$  è l'headway di saturazione del veicolo  $i$ -esimo, misurato in secondi.

$$S = \frac{3600}{\bar{h}_s} * \left(1 + \frac{\sigma_s^2}{\bar{h}_s^2}\right)^{0,5} \quad [\text{veicoli/h}] \quad (6)$$

dove:

- $\bar{h}_s$  è la media degli headway di saturazione considerati ai fini del calcolo di  $S$ , misurata in secondi;
- $\sigma_s^2$  è la varianza campionaria della distribuzione degli headways.

Gli autori hanno quindi implementato le due formule, utilizzandole per calcolare il flusso di saturazione in otto diverse intersezioni semaforiche a Pechino. Come mostrato in Tab. 6, i risultati ottenuti con la (5) e (6) sono simili tra di loro, ma forniscono valori più elevati rispetto a quelli della formula “tradizionale” (2). Inoltre, gli autori affermano che, quando la distribuzione degli headways di saturazione è asimmetrica, la formula tradizionale sottostima il flusso di saturazione, mentre quando la distribuzione è simmetrica non ci sono significative differenze tra le tre formule proposte.

Intersezione semaforica	Valore flusso di saturazione [veic/h]		
	Formula (2)	Formula (5)	Formula (6)
1	1846	1914	1911
2	1525	1600	1656
3	1565	1651	1600
4	1621	1706	1644
5	1643	1747	1675
6	1730	1809	1774
7	1558	1698	1660
8	1764	1800	1803

Tab. 6 (Shao & Liu, 2012): Valori del flusso di saturazione ottenuti utilizzando tre diverse formule.

### 4.3 Studio di Wang et al. (2018)

Gli autori, considerando quanto indicato dall'HCM (paragrafo 4.1), affermano che, qualora i dati vengano rilevati mediante strumentazione video, risulta molto semplice automatizzare il



rilevamento dell'istante in cui il quarto veicolo in coda attraversa la linea di stop, ma risulta invece molto complesso rilevare (sempre in modo automatico) l'istante in cui l'ultimo veicolo attraversa la medesima linea (se non monitorando manualmente la registrazione video). Risulta dunque necessario, sempre a detta degli autori, sviluppare un nuovo metodo, di cui si ritiene utile riportare l'idea di base. Durante la fase di verde i veicoli in coda attraversano la linea di stop in modo continuativo e in sequenza. Se il flusso è quello di saturazione, il valore degli headways dei veicoli fluttuerà attorno al valore dell'headway di saturazione. Da un punto di vista statistico, il valore degli headways dei veicoli fluttuerà attorno ad una costante (da determinare), e gli scostamenti dei valori dei singoli headway dalla suddetta costante tenderanno ad essere indipendentemente e identicamente distribuiti con valore medio pari a zero. Gli headways di saturazione saranno quindi da calcolare mediante la seguente formula:

$$X_m(n) = \mu + e(n) \quad (7)$$

Dove:

- $X_m(n)$  è l'headway n-esimo;
- $1 \leq n \leq N_m$ ;
- $N_m$  è il numero di veicoli concorrenti alla determinazione del flusso di saturazione;
- $\mu$  è il valore reale dell'headway di saturazione;
- $e(n)$  è l'errore casuale dell'n-esimo headway, che segue una distribuzione normale con valore medio pari a 0.

La formula adottata dagli autori per la determinazione del valore reale dell'headway di saturazione è la seguente:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N_m} * \sum_{n=1}^{N_m} X_m(n) \quad (8)$$

Uno dei risultati più significativi riportati in questo studio riguarda la determinazione degli intervalli da considerare o escludere nel calcolo degli headways di saturazione. Secondo gli autori, esistono infatti due diverse tipologie di dati anomali:

- a) fenomeno dello "start-up lost time".
- b) durante la fase di verde ci possono essere headway maggiori causati da distrazione degli utenti e aleatorietà degli arrivi nella corsia oggetto di analisi.

Per rimuovere i dati anomali è necessario individuare una soglia (denominata dagli autori  $\theta$ ) per cui i valori più piccoli di  $\theta$  vanno considerati headway di saturazione. Gli autori affermano che il criterio per determinare se il data set contiene dati anomali di tipo a) e b) è verificare se la moda dei valori è minore dal valore medio, dato che nei periodi di rilevazione (ore di punta),

verosimilmente ci saranno pochi valori anomali e media e moda tenderanno ad essere uguali. Seguendo questo ragionamento, gli autori affermano che la soglia  $\theta$  va impostata al 60-80-esimo quantile della distribuzione del data set quando il numero di dati è elevato, e all'80-95-esimo quando il numero è basso.

A supporto della trattazione teorica, l'elaborato contiene anche un caso studio, effettuato presso un'intersezione semaforica a Qijing, in Cina. Con riferimento alla corsia di marcia rettilinea, il data set iniziale conteneva 1247 headways. Applicando la soglia  $\theta$  corrispondente all'80-esimo quantile, il numero di dati finali ammontava a 392.

#### **4.4 Studio di Bagheri et al. (2015)**

Le evoluzioni tecnologiche recenti, che impattano moltissimo da anni sui settori ingegneristici, coinvolgono anche la mobilità. È per questo che Bagheri et al. (2015) hanno dedicato uno studio alla misurazione del flusso di saturazione utilizzando non più dati provenienti da sensori esterni al veicolo, ma provenienti dal veicolo stesso. Si tratta dei cosiddetti "Veicoli Connessi" (di seguito abbreviati con la sigla VC), veicoli che sono in grado di trasmettere in tempo reale velocità, posizione, direzione e altri parametri ai veicoli nelle vicinanze o direttamente alle infrastrutture stradali. Gli autori hanno quindi studiato come calcolare il flusso di saturazione utilizzando solamente dati provenienti dai VC. Per ottenere dati in linea con le indicazioni richieste dall'HCM, gli autori suggeriscono la seguente metodologia:

1. identificazione, all'inizio di ogni fase di verde, del numero di veicoli in coda per ogni corsia;
2. dato che non tutti i veicoli che attraversano l'intersezione semaforica durante una determinata fase di verde sono VC, e il tempo al quale un veicolo non connesso attraversa la linea di stop non è identificabile, tutti i veicoli non VC presenti tra due VC successivi sono considerati facenti parte della coda;
3. durante la fase di verde e la successiva fase di giallo, la stima dei veicoli in coda e quella dei veicoli che attraversano l'intersezione viene aggiornata ogni secondo;
4. quando questa fase termina viene calcolato il flusso di saturazione.

Nella metodologia proposta dagli autori sono state assunte le seguenti ipotesi:

- i veicoli connessi trasmettono i dati dieci volte al secondo;

- i dati trasmessi al computer (che li raccoglie e li elabora al fine di calcolare il flusso di saturazione della corsia) includono dimensioni del mezzo, velocità, distanza dalla linea di stop e distanza dai bordi della corsia;
- il ritardo nella trasmissione dei dati è assunto trascurabile;
- si assumono noti i dati della geometria dell'intersezione e del piano semaforico;
- si assume che il veicolo connesso sia fermo qualora la sua velocità risulti minore o uguale a 2 km/h

La problematica principale nel calcolo del flusso di saturazione utilizzando i dati provenienti dai VC è il fatto che non tutti i veicoli che attraversano l'intersezione sono connessi, e quindi non trasmettono alcun dato. È quindi necessario stimare il numero di veicoli che attraversano l'intersezione utilizzando solamente i dati provenienti dai VC. A tale scopo gli autori propongono un'apposita formula.

Come già detto più volte, per tenere conto del fenomeno di “start-up lost time” vengono considerati solamente i veicoli dal quarto in poi. È quindi necessario un criterio applicabile qualora un veicolo connesso si trovi in quarta posizione in coda. Gli autori assumono che i primi quattro veicoli impiegano circa dieci secondi per attraversare la linea di stop. Di conseguenza, un veicolo VC è considerato in quarta posizione se:

- attraversa la linea di stop entro dieci secondi dall'inizio della fase di verde e
- il numero di veicoli stimati in coda dalla linea di stop al veicolo in questione (incluso) è pari a quattro.

Infine, è possibile identificare un veicolo che cambia corsia durante la fase di verde rimuovendolo dalla coda della corsia di origine e aggiungendolo al numero di veicoli connessi rilevati nella corsia di destinazione nel momento in cui esso attraversa la linea di stop.

In Figura 7 è riportato un<sup>3</sup> grafico rappresentante il flusso di saturazione calcolato, per un certo numero di cicli, con metodi tradizionali (avvalendosi quindi di sensori presenti nella sede stradale o nelle immediate vicinanze), nel caso di una intersezione simulata, sovrapposto a quello calcolato utilizzando i veicoli connessi.

---

<sup>3</sup> È stato riportato, a titolo di esempio, solamente il grafico ottenuto con una percentuale di VC pari al 20%.

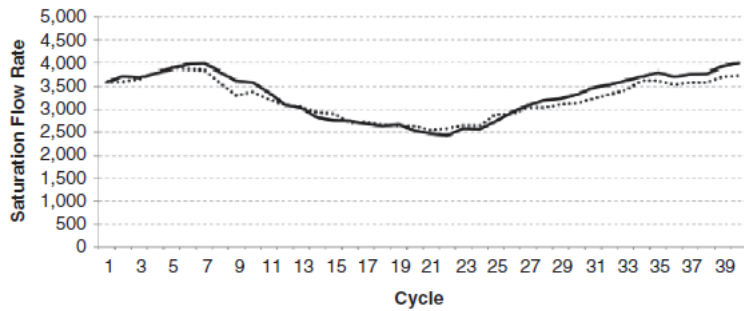


Figura 7 (Bagheri et al., 2015): comparazione tra il flusso di saturazione calcolato con metodi tradizionali (linea continua) e quello calcolato con una percentuale del 20% di veicoli connessi (linea tratteggiata).

Come si può facilmente evincere dalla figura, il metodo di calcolo proposto dagli autori produce risultati molto vicini a quelli ottenibili con i metodi basati sull'impiego di sensori fissi.

Per quanto riguarda l'errore commesso nella stima del flusso di saturazione in funzione del tasso di penetrazione dei veicoli connessi, gli autori riportano che, per un tasso di penetrazione pari al 100%, nella curva di distribuzione dell'errore relativo il valore più elevato ammonta a 10,4%, ma l'85° percentile è solamente del 4,5% e la media del 2,3%. Per tassi di penetrazione più bassi, ad esempio pari al 20%, l'errore aumenta, con un valore medio della curva che oscilla tra il 2,2% e il 9,4%. In generale, si registra un errore maggiore in condizioni di scarso traffico.

## **CAPITOLO 5**

### **CONCLUSIONI**

In questo elaborato sono stati trattati alcuni aspetti relativi alla determinazione del flusso di saturazione nelle intersezioni a controllo semaforico. Dopo una breve introduzione, nella prima parte sono stati elencati i principali fattori che influenzano il flusso di saturazione, raggruppabili in cinque macrocategorie: caratteristiche dell'intersezione, caratteristiche del traffico, caratteristiche del piano semaforico, condizioni metereologiche e comportamenti alla guida. Di queste, sono stati approfonditi gli effetti delle condizioni metereologiche (nel capitolo 2) e delle caratteristiche geometriche dell'intersezione, con riferimento esclusivo al numero e alla larghezza delle corsie (capitolo 3), sulla base degli studi effettuati da alcuni autori. L'ultima parte dell'elaborato si è invece concentrata sull'analisi di vari metodi per la misurazione diretta del flusso di saturazione che alcuni autori, partendo dall'HCM (letteratura di riferimento per la maggior parte degli studi scientifici analizzati in questa tesi), propongono nei loro elaborati.

Nell'approfondire i fattori metereologici influenzanti il flusso di saturazione nelle intersezioni a controllo semaforico, appare chiaro che la criticità più rilevante risulta essere la scarsa significatività statistica dei risultati. La numerosità del campione di dati, infatti, viene spesso riportata dagli stessi autori come scarsa o appena sufficiente ad ottenere valori significativi (tale criticità risulta peraltro spesso presente anche nella trattazione dei fattori geometrici e dei metodi per la misurazione diretta del flusso di saturazione). Gli studi che hanno evidenziato un effetto significativo delle condizioni meteo hanno identificato tale effetto solamente per condizioni metereologiche fortemente differenti tra loro. Per quanto invece riguarda la geometria dell'intersezione, la letteratura presente in merito all'effetto della larghezza della corsia risulta essere molto corposa, mentre la pendenza della sede stradale è stata meno trattata. Un motivo che spiega la scarsità di ricerche riguardanti tale parametro è certamente legato alla localizzazione delle intersezioni che vengono scelte per gli studi, spesso posizionate in zone pianeggianti. D'altra parte, quasi tutti gli autori citati in questo elaborato segnalano che il campione osservato risulta essere limitato, e raccomandano futuri studi basati su campioni più numerosi. Si può osservare, limitatamente agli studi riguardanti l'influenza delle condizioni metereologiche, che risulta più difficile condurre un'analisi che copra in maniera esaustiva tutte le possibili situazioni, e non solo quelle (più comuni) di tempo soleggiato e pioggia. Un ulteriore

elemento emerso durante il lavoro riguarda il fatto che gli studi considerati differiscono tra loro per quanto riguarda la presenza o meno di indicazioni della numerosità dei campioni utilizzati e della localizzazione dei siti di studio.

Risultano auspicabili futuri studi che forniscano spiegazioni più complete sui metodi di raccolta dei dati e sulla localizzazione delle intersezioni, anche al fine di agevolare la ripetibilità delle analisi. Si raccomandano inoltre futuri studi riguardanti la correlazione tra il flusso di saturazione e condizioni meteo particolari, quali neve e vento forte, attualmente poco presenti in letteratura. Risulterebbero certamente utili anche ulteriori studi sull'effetto della pendenza della sede stradale. Infine, futuri elaborati potrebbero analizzare in modo approfondito la correlazione tra il flusso di saturazione e i comportamenti alla guida, tema poco trattato dalla letteratura scientifica attuale.

## RINGRAZIAMENTI

*Un sentito ringraziamento al Professor C. Meneguzzer per la disponibilità accordatami durante la stesura di questo elaborato. Un grazie speciale ai miei genitori e Miriam, senza i quali oggi non sarei qui, ai nonni Ernestino, Silvana e Lina, agli amici e parenti tutti. Ultimo, ma non per importanza, un grazie a Christian, fedele e fondamentale supporto in questi anni di università.*

Padova, 26 settembre 2024.

## Bibliografia

**NOTA: Le citazioni in grassetto identificano le fonti dirette, mentre le rimanenti indicano documenti citati nelle fonti dirette.**

Adams, C., Zambang, M., & Opoku-Boahen, R. (2015). Effects of motorcycles on saturation flow rates of mixed traffic at signalized intersections in Ghana. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*.

**Agbolosu-Amison, S. J., Sadek, A. W., & ElDessouki, W. (2004). Inclement Weather and Traffic Flow at Signalized Intersections: Case Study from Northern New England. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1867, Issue 1, p. 163 - 171**

Allen, D., Hummer, J., Roupail, N., & Milazzo, J. (1998). Effect of bicycles on capacity of signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1646, Issue 1, p. 87 - 95

**Anas A. M., Hazem M. A. N., Wael, K. A., Charitha, D., & Babak, M. (2023). Lane-based analysis of the saturation flow rate considering traffic composition. *Transportation Planning and Technology*, Volume 46, n° 5, p. 653–671**

**Asamer, J., & Van Zuylen, H. J. (2011). Saturation Flow Under Adverse Weather Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2258, Issue 1, p. 103–109**

**Bagheri, E., Babak, M., & Hellinga, B. (2015). Real-Time Estimation of Saturation Flow Rates for Dynamic Traffic Signal Control Using Connected-Vehicle Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2487, Issue 1, p. 69 - 77**

Bester, C., & Meyers, W. (2007). Saturation flow rates. *26th Southern African Transport Conference (SATC 2007)*, (p. 560–568). Pretoria, South Africa.

Bonneson, J. A. (1992). Study of Headway and Lost Time at Single-Point Urban Interchanges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1365

**Bonneson, J. A., Nevers, B., Pratt, M. P., & Bonyani, G. (2006). Influence of Area Population, Number of Lanes, and Speed Limit on Saturation Flow Rate. *Transportation Research***



**Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 1988, Issue 1, p. 76 - 85**

- Cao, J., & Menendez, M. (2015). Generalized effects of on-street parking maneuvers on the performance of nearby signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2483, Issue 1, p. 30 - 38
- Chen, P., Nakamura, H., & Asano, M. (2011). Saturation flow rate analysis for shared left-turn lane at signalized intersections in Japan. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*.
- Davoodi, S., Sadeghiyan, S., & Faezi, S. (2015). The analysis the role of motorcycles on saturation flow rates at signalized intersections in Gorgan. *Indian Journal of Science and Technology*.
- Devalla, J., Biswas, S., & Ghosh, I. (2015). The Effect of countdown timer on the approach speed at signalized intersections. *Procedia Computer Science*.
- Directorate General of Highways Ministry of Public Works. (1993). *Indonesian Highway Capacity Manual*.
- Forschungsgesellschaft für Straßen - und Verkehrswesen. (2015). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [German Highway Capacity Manual]*. Cologne.
- Guidelines for the design of at-grade intersections in rural and urban areas. (1994). *Indian Road Congress*. New Delhi.
- Ibrahim, M., Karim, M., & Kidwai, F. (2008). The effect of digital countdown display on signalized junction performance. *American Journal of Applied Sciences*.
- Kockelman, K., & Shabih, R. (2000). Effect of light-duty trucks on the capacity of signalized intersections. *Journal of Transportation Engineering*.
- Köll, H., Bader, M., & Axhausen, K. (2004). Driver behaviour during flashing green before amber: a comparative study. *Accident Analysis & Prevention*.
- Le, X., Lu, J., Mierzejewski, E., & Zhou, Y. (2000). Variations in capacity at signalized intersections with different area types. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1710, Issue 1, p. 199 - 204
- Lewis, E., & Benekohal, R. (2007). Saturation flow rate study at signalized intersections in Panama. *86th Annual Meeting of Transportation Research Board*.

- Lijun, G., Bhuiyan M, A., Brian W, R., Douglas, K. N., & Richard S., M. (2016). Information point and saturation flow at signalized intersections. *Journal of traffic and transportation engineering.***
- Lila, W., Wicaksono, A., & Anwar, M. (2013). Analysis of motorcycle effects to saturation flow rate at signalized intersections in Malang City. *Journal Rekayasa Sipil.*
- Liu, P., Lu, J., Fan, J., Pernia, J., & Sokolow, G. (2005). Effects of U-turns on capacities of signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1920, Issue 1, p. 74 - 80
- Maze, T. H., Agarwal, M., & Burchett, G. (2006). Weather Matters to Traffic Demand, Traffic Safety, and Traffic Operations and Flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1948, Issue 1, p. 170 - 176**
- Milaszewicz, B. (2018). The issue of using countdown timers at intersections with traffic lights: a literature review. *XI International Science-Technical Conference Automotive Safety.*
- Milazzo, J. I., Roupail, N., Hummer, J., & Allen, D. (2006). *Malaysian Highway Capacity Manual*. Ministry of Works Malaysia.
- Ministry of Transportation and Communication. (2011). *Taiwan Highway capacity manual* (Vol. Report No. 100 – 132-1299). Taiwan.
- Mondal, S., & Gupta, A. (2019). A review of methodological approaches for saturation flow estimation at signalized intersections. *Canadian Journal of Civil Engineering.***
- National Association of Australian State Road Authorities. (1988). *Australian Road Research Board - Australian road capacity guide: Austroads.*
- Nevala, R., & Luttinen, R. (2002). *Capacity and level of service of Finnish signalized intersections: S 12 solutions to improve main roads.* Finnish Road Administration.
- Potts, I. B., Ringert, J. F., Bauer, K. M., Zegeer, J. D., Harwood, D. W., & David K., G. (2007). Relationship of Lane Width to Saturation Flow Rate on Urban and Suburban Signalized Intersection Approaches. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2027, Issue 1, p. 45 - 51**
- Raksuntorn, W. (2012). The effects of countdown signals on intersection capacity. *International Transaction Journal of Engineering, Management, and Applied Sciences and Technologies.*

- Rodke, S. J., Ghodmare, S. D., & Deshmukh, A. (2022). Critical Analysis of Saturation Flow Rate and Affecting parameters. *10th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*. Nagpur, India
- Salar, K. H., & Dilveen, H. O. (2021). The Relation between Saturation Flow Rate and Approach Width at Signalized Intersections in Erbil City. *7th International Engineering Conference Research & Innovation amid Global Pandemic*. Erbil, Iraq.
- Savitha, B., Murthy, R. S., Jagadeesh, H. S., Sathish, H. S., & Sundararajan, T. (2017). Study on Geometric Factors Influencing Saturation Flow Rate at Signalized Intersections under Heterogeneous Traffic Conditions. *Journal of Transportation Technologies*, p. 83-94.
- Shang, H., Zhang, Y., & Fan, L. (2014). 'Heterogeneous lanes' saturation flow rates at signalized intersections. *Procedia of Social and Behavioral Sciences*.
- Shao, C., Rong, J., & Liu, X. (2011). Study on the saturation flow rate and its influence factors at signalized intersections in China. *Procedia Social and ehavioral Sciences*.
- Shao, C.-Q., & Liu, X.-M. (2012). Estimation of Saturation Flow Rates at Signalized Intersections. *Hindawi Publishing Corporation, Discrete Dynamics in Nature and Society*
- Sharma, A., Vanajakshi, L., & Rao, N. (2012). Effect of phase countdown timers on queue discharge characteristics under heterogeneous traffic conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2130, Issue 1, p. 93 - 100
- Shin, C.-H., & Keecho, C. (1998). Saturation Flow Rate Estimation under Rainy Weather Conditions for On-line Traffic Control Purpose. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 211-222.
- Sun, H., Yang, J., Wang, L., Li, L., & Wu, B. (2013). Saturation Flow Rate and Start-up Lost Time of Dual-left Lanes at Signalized Intersection in Rainy Weather Condition. *13th COTA International Conference of Transportation Professionals*.
- Transport Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: National Research Council.
- Transportation Research Board, National Research Council. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.

- Tuffour, Y., Obiri-Yeboah, A., Saliful, M., & Acquah, P. (2014). Adjusting for the effect of bus blockage on saturation flows. *International Journal of Science and Research*.
- Vien, L., Ibrahim, W., & Mohd, A. (2008). Effect of motorcycles travel behaviour on saturation flow rates at signalized intersections in Malaysia. *The 23rd ARRB Conference – Research Partnering with Practitioners*,. Adelaide, Australia.
- Wael, E., & Abdulrahman, A. (2023). Smartphones and traffic signals: A quantitative assessment for phone usage behavior on performance of signalized intersections. *Journal of traffic and transportation engineering*.**
- Wang, L., Wang, Y., & Bie, Y. (2018). Automatic Estimation Method for Intersection Saturation Flow Rate Based on Video Detector Data. *Journal of Advanced Transportation*.**
- Webster, F. ( 1958). *Traffic signal settings*. RRL- Tech. Paper No. 39. London, England.: Her Majesty's Stationary Ofc. (HMSO).
- Yetis Sazi, M., & Murat, C. (2019). A New Perspective for Saturation Flows at Signalized Intersections. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.**