

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO ICEA – Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**EMISSIONI VEICOLARI ALLE INTERSEZIONI
STRADALI: ANALISI COMPARATIVA DI DIVERSE
TIPOLOGIE MEDIANTE OSSERVAZIONI DI CAMPO**

Relatore:

Ch.mo Prof. Ing. MASSIMILIANO GASTALDI

Correlatore:

Ing. GREGORIO GECHELE

Laureando:

NICOLA BEZ

Matr. 1035734

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile – Curriculum Trasporti

Anno Accademico 2014/2015

INDICE

INTRODUZIONE	iii
1. STATO DELL'ARTE	1
1.1 Cenni sulle emissioni da motori a combustione interna	1
1.1.1 Principio di funzionamento dei motori Otto	2
1.1.2 Formazione delle emissioni	3
1.1.3 Influenza parametri motoristici sulle emissioni	6
1.1.4 Normativa di riferimento e sistemi di abbattimento delle emissioni	9
1.2 Rassegna della letteratura	10
1.2.1 Emissioni stimate con modello	11
1.2.2 Emissioni misurate con strumentazione di bordo	13
1.2.3 Valutazione area di influenza	14
1.2.4 Ripartizione modale	15
2. CASO STUDIO	19
2.1 Progettazione dell'esperimento	19
2.1.1 Area di studio	19
2.1.2 Giornate di sperimentazione	22
2.1.3 Caratteristiche e strumentazione del veicolo sonda	23
2.1.4 Conducenti	25
2.1.5 Raccolta e digitalizzazione dei dati	25
2.1.6 Trattamento dati da veicolo sonda	28
2.1.7 Trattamento dati di traffico da rilevamento video	34

2.2	Analisi dei dati	34
2.2.1	Analisi preliminare	36
2.2.2	Prima ipotesi di confronto	39
2.2.3	Seconda ipotesi di confronto	41
2.2.4	Sviluppo seconda ipotesi	46
2.2.5	Ripartizione modale dei profili di velocità osservati	53
CONCLUSIONI		61
	Ulteriori osservazioni	62
	Limiti dello studio e possibili sviluppi futuri	63
BIBLIOGRAFIA		65

INTRODUZIONE

Come è noto, le emissioni delle nostre autovetture, alimentate a combustibili fossili, hanno un'influenza diretta sull'inquinamento atmosferico dato che rappresentano, insieme al riscaldamento domestico e alle attività produttive, le maggiori fonti di emissione. In ambito urbano la maggior parte di inquinanti come gli ossidi di azoto (NO_x), il monossido di carbonio (CO), le polveri sottili, ecc, sono prodotti proprio dal traffico veicolare (Pinamonte, 2004), che impatta significativamente anche sulle emissioni di idrocarburi incombusti (HC) e di anidride carbonica (CO_2). Quest'ultima viene considerata un inquinante termico, in quanto è il gas serra, dovuto ad attività antropiche, maggiormente responsabile del riscaldamento globale.

Ridurre l'inquinamento atmosferico è molto utile ai fini della salute dell'uomo. Numerosi studi epidemiologici hanno dimostrato, infatti, una correlazione tra il livello di inquinamento e l'insorgere (o l'aggravarsi) soprattutto di patologie dell'apparato cardio/respiratorio (Pinamonte, 2004). Di seguito si riportano le caratteristiche dei principali inquinanti emessi allo scarico delle autovetture e il loro effetto sulla salute umana. Il monossido di carbonio è un gas tossico inodore e incolore, ha la capacità di unirsi all'emoglobina riducendo la quantità di ossigeno trasportato dal sangue; può, quindi, causare mal di testa, vertigini e stanchezza, malattie cardiache e danni al sistema nervoso (Zampetti & al., 2012). Gli ossidi di azoto, nel dettaglio il biossido, è un gas tossico dall'odore forte e pungente dotato di grande potere irritante per le vie respiratorie e per gli occhi, può raggiungere gli alveoli polmonari e provocare edema polmonare (Zampetti & al., 2012). Infine gli idrocarburi incombusti, che comprendono una grande quantità di composti organici, possono causare irritazione agli occhi ed avere effetti cancerogeni.

La normativa italiana, con il D. Lgs. 155/2010 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa", impone valori limite alla concentrazione di molti inquinanti; tra quelli citati, rientrano in normativa, il monossido di carbonio e il biossido di azoto (NO_2).

Per quanto riguarda l'anidride carbonica, non esistono concentrazioni limite, dato che non ha effetti negativi sulla salute, ma, con il protocollo di Kyoto, entrato in vigore il 16 febbraio 2005, e sottoscritto da più di 180 paesi, il mondo intero si impegna nella riduzione delle emissioni di CO_2 .

Dato che, come detto, nei centri urbani la componente principale dell'inquinamento è data dal traffico veicolare, è proprio sulle autovetture che la normativa impone limiti sulle emissioni in continuo aggiornamento. Basti pensare che a partire dal 1992 (anno di introduzione della normativa europea Euro 1) ad oggi, quindi in poco più di due decenni, si sono susseguiti ben 6 standard emissivi sempre più stringenti.

Da questo punto di vista lo sviluppo tecnologico si concentra su carburanti più ecologici, motori sempre più efficienti, tecniche di post-trattamento dei gas esausti mediante convertitori catalitici, ricerca di sistemi di propulsione innovativi.

D'altro canto però vi sono politiche che stanno cercando di ridurre il problema alla radice, cioè disincentivando l'utilizzo dell'auto privata a favore dei mezzi pubblici (bus, tram, treno, metropolitana, ecc) o di altri mezzi più ecologici e salutari come ad esempio la bicicletta (è il caso del cosiddetto *shift modale*); oppure privilegiando le autovetture ad alto tasso di occupazione (HOV: High Occupancy Vehicle).

Senza ricorrere a complesse politiche di medio-lungo periodo, in ambito urbano, benefici effetti sulla congestione e sulle emissioni si possono ottenere con un deflusso più fluido possibile. La presenza delle intersezioni a raso pone un ostacolo notevole all'obiettivo del deflusso ininterrotto. La scelta del tipo di controllo di un'intersezione a raso può ricadere su una vasta gamma di alternative a seconda della tipologia di strade che si incrociano, dei flussi circolanti, della classificazione dei veicoli, ecc. Ad oggi la quasi totalità delle intersezioni urbane di un certo rilievo sono controllate da un semaforo o mediante una rotatoria. L'intersezione semaforizzata è la scelta ideale quando si hanno flussi significativamente differenti tra i vari approcci, quando si vuole dare la precedenza a particolari categorie (bus, taxi, mezzi di soccorso, ecc.) o quando si riscontra un'elevata presenza di pedoni. Il controllo semaforico attuato dal traffico e la coordinazione tra vari semafori (onda verde), permettono di ottenere ottime prestazioni anche nel caso di flussi molto ridotti o di incroci ravvicinati. L'enorme diffusione delle rotatorie, principalmente negli ultimi due decenni, è dovuta al maggior livello di sicurezza rispetto al controllo semaforico (Hallmark & al, 2011) e ai minori costi di manutenzione e di funzionamento (non serve l'elettricità anche se, talvolta, devono essere maggiormente illuminate rispetto alle intersezioni semaforizzate) (Taekratok, 1998). Dal punto di vista della sicurezza, infatti, ipotizzando un'intersezione a 4 rami in cui tutte le manovre (svolta a sinistra, attraversamento e svolta a destra) sono possibili, i punti di conflitto si riducono da 32, nel caso di controllo semaforico, a solamente 8 per la rotatoria. Con quest'ultima, inoltre, per effetto di traiettorie curvilinee, eventuali collisioni avvengono con angoli inferiori a 90° e quindi risultano essere meno pericolosi per l'incolumità dei conducenti e dei passeggeri, anche in virtù delle minori velocità. (Robinson & al, 2000) Per intersezioni di medio-piccole dimensioni Tan (2001) afferma che la rotatoria presenta capacità maggiori. Alle rotatorie è associata anche l'idea di presentare ritardi inferiori (Mandavilli & al, 2008) poiché il regime di precedenza all'anello non costringe nessun veicolo ad arrestarsi, ma, in caso di assenza di flusso di conflitto, solo a rallentare. Infine, le rotatorie permettono di compiere inversioni di marcia in totale sicurezza.

È necessario, però, segnalare che la rotatoria presenta i vantaggi appena descritti quando l'intersezione sulla quale è realizzata soddisfa le seguenti caratteristiche: intersezione isolata; flussi paragonabili tra i rami in ingresso; dimensione non troppo contenuta, sufficiente visibilità; flusso pedonale ridotto.

In virtù di quanto detto risulta logico chiedersi: la rotatoria produce anche emissioni minori?

Lo studio in esame ha come obiettivo proprio la risposta a questa domanda. Grazie alla collaborazione con l'Istituto Motori del CNR di Napoli è stato possibile raccogliere dati su campo mediante l'utilizzo di un veicolo "sonda", alimentato a benzina, equipaggiato con strumentazione di bordo atta alla valutazione delle emissioni istantanee e non solo.

Nel primo capitolo vengono spiegati i concetti di funzionamento dei motori a combustione interna, i principali processi di formazione delle emissioni inquinanti e i parametri motoristici che maggiormente le influenzano. In seguito a questa panoramica generale vengono presentate le metodologie di analisi e i risultati ottenuti da vari Autori che hanno affrontato un simile studio. Nel capitolo sono anche riportate le risposte trovate in letteratura in merito a quesiti riscontrati nello studio in oggetto.

Nel secondo capitolo viene descritta dettagliatamente la sperimentazione effettuata. L'area di studio, situata lungo la circonvallazione interna del Comune di Vicenza presenta un'intersezione semaforizzata che il Comune ha intenzione di sostituire con una rotatoria. Nel contesto di uno studio prima-dopo la realizzazione della rotatoria è stato possibile effettuare un confronto tra l'intersezione semaforizzata e una rotatoria adiacente alla prima e distante poche centinaia di metri. Vengono inoltre descritte le modalità di raccolta, pulizia e trattamento dei dati. In seguito ad alcune considerazioni generali sulle emissioni osservate, sono presentate le ipotesi di analisi dei dati, dando, ovviamente, maggior risalto alla strada che è stata poi seguita, e specificando i motivi dello studio limitato alle sole emissioni di CO₂. Mediante l'utilizzo di appositi software per l'analisi statistica è stato possibile produrre risultati del confronto statisticamente significativi.

Nelle conclusioni è riportata una sintesi di tutti i risultati ottenuti mediante analisi statistica, segnalando infine i limiti dello studio e i suoi possibili sviluppi futuri.

1. STATO DELL'ARTE

1.1 Cenni sulle emissioni da motori a combustione interna

In questo paragrafo vengono affrontate le modalità di funzionamento dei Motori a Combustione Interna (MCI) ad accensione comandata (ciclo Otto) e viene pertanto descritto il processo di formazione dei principali inquinanti emessi dai motori per autotrazione alimentati a benzina, in quanto la quasi totalità (oltre il 99%) degli inquinanti vengono emessi in atmosfera dalle autovetture attraverso lo scarico del motore, e solo una piccolissima e trascurabile parte di idrocarburi incombusti può derivare dall'evaporazione del combustibile dal serbatoio o da non perfette tenute del circuito di alimentazione (Pinamonte, 2004). Le immagini di questo paragrafo sono state tutte tratte dal Ferrari (2008), così come buona parte di quanto descritto.

I principali inquinanti emessi da questi motori sono:

- anidride carbonica, CO₂ (inquinante termico);
- monossido di carbonio, CO;
- ossidi di azoto, NO_x;
- idrocarburi incombusti, HC;
- ossidi di zolfo, SO_x;
- particolato carbonioso, PM (Particulate Matter).

Questi inquinanti vengono detti *primari*, perché possono reagire con altre specie chimiche presenti nell'ambiente per dare origine a forme di inquinamento di tipo *secondario*, come lo smog catalitico o le piogge acide.

Le emissioni di particolato carbonioso non verranno esaminate in questo lavoro, pertanto tale problema non verrà trattato.

Si analizzano ora i meccanismi di formazione delle specie sopra descritte durante il funzionamento del motore, sottolineando che la formazione degli ossidi di azoto, a differenza delle altre specie, non è direttamente collegata al processo di combustione degli idrocarburi, ma

dipende dalle condizioni (chimiche e di temperatura) dell'ambiente generato dal processo di combustione stesso.

1.1.1 Principio di funzionamento dei motori Otto

Questi motori permettono di trasformare l'energia chimica di una miscela combustibile-comburente (tipicamente benzina-aria) in lavoro meccanico. Tale trasformazione avviene nella camera di combustione (delimitata dal cilindro, dalla testata e dal pistone), dove i gas combusti generano l'incremento di pressione necessario a spingere il pistone verso il basso e, grazie ad una biella, a far ruotare l'albero motore; poiché la trasformazione, avviene secondo 4 fasi che si ripetono analogamente durante ogni ciclo termodinamico (che è composto da due rotazioni complete dell'albero), questi motori vengono anche definiti a 4 tempi, nel dettaglio:

Aspirazione: all'inizio di questa fase il pistone si trova nel Punto Morto Superiore (PMS). Le valvole di aspirazione si aprono, il movimento del cilindro verso il basso (aiutato dal motorino di avviamento nel caso di messa in moto del motore, o dall'inerzia e dal moto del pistone in controfase nel caso di motore già avviato) crea una depressione che aspira aria (nel caso di iniezione diretta) o già la miscela preformata dal carburatore (nel caso di iniezione indiretta). Nel primo caso l'iniettore inietta in questa fase la quantità di carburante calcolata dalla centralina elettronica sulla base della pressione sul pedale dell'acceleratore.

Compressione: inizia quando il pistone si trova al Punto Morto Inferiore (PMI); le valvole di aspirazione si chiudono e il pistone comincia a risalire verso il PMS comprimendo la miscela aria-combustibile presente nella camera di combustione. Poco prima che il pistone raggiunga il PMS scocca la scintilla nell'elettrodo della candela che produce la combustione della miscela.

Espansione: la combustione produce un notevole aumento di pressione (e temperatura) nella camera; il pistone viene quindi spinto verso il PMI.

Scarico: le valvole di scarico si aprono in questa fase e dal PMI il cilindro risale espellendo i gas prodotti dalla combustione e preparando la camera ad un nuovo ciclo.

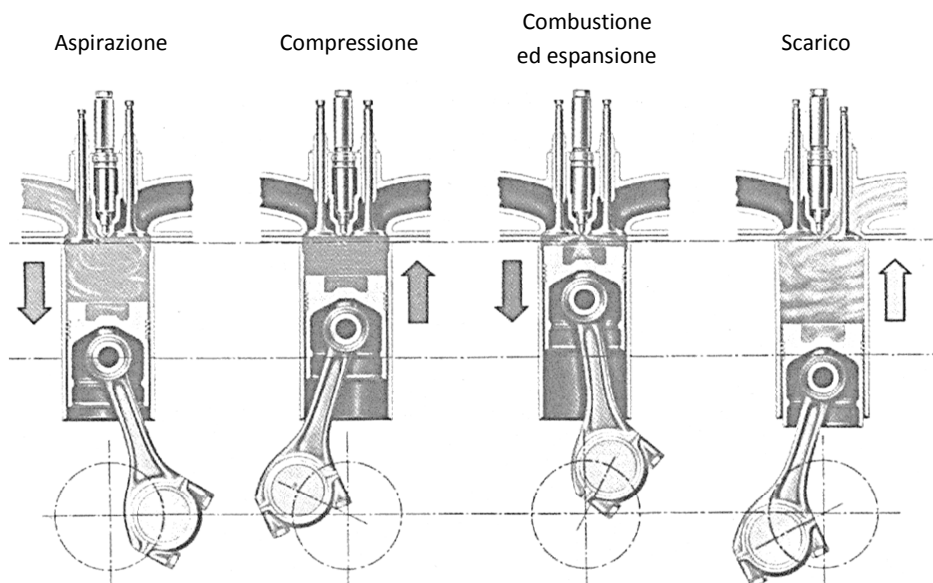


Figura 1.1: Le quattro fasi del ciclo di lavoro a quattro tempi [Ferrari, 2008].

Nei cicli reali, poiché le valvole non si aprono e chiudono in maniera istantanea quando il pistone si trova esattamente nei punti morti, ma in un tempo finito, si possono attuare degli accorgimenti per migliorare la funzionalità delle varie fasi e del rendimento globale del motore. La figura 1.2 mostra gli istanti di inizio apertura e chiusura delle valvole rispetto ai punti morti.

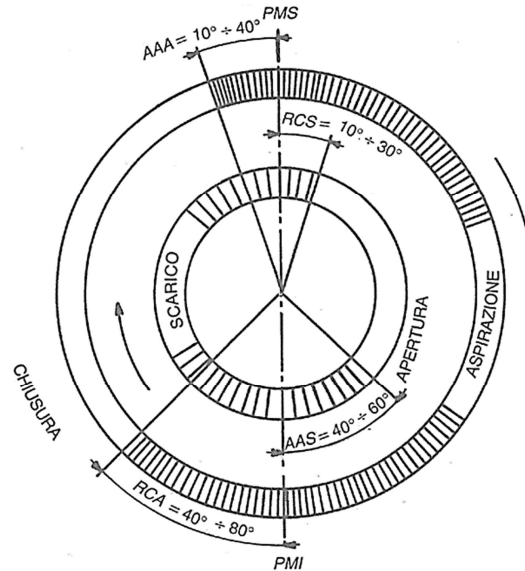


Figura 1.2: Diagramma circolare rappresentante gli angoli di apertura e chiusura delle valvole rispetto ai punti morti (AAA: Anticipo Apertura valvola d'Aspirazione; RCA: Ritardo Chiusura valvola d'Aspirazione; AAS: Anticipo Apertura valvola di scarico; RCS: Ritardo Chiusura valvola di scarico) [Ferrari, 2008].

Aperto in anticipo la valvola di scarico rispetto al PMI si abbassa la pressione dei gas combusti riducendo l'energia sprecata dal pistone per espellere i gas di scarico ottenendo un'apertura accettabile della valvola non appena inizia la corsa di scarico. Ritardando invece la chiusura della valvola rispetto al PMS si ha il cosiddetto incrocio delle valvole, cioè la contemporanea apertura sia della valvola di scarico che di quella di aspirazione; si può così sfruttare l'inerzia dei gas espulsi per facilitare l'aspirazione di quelli freschi.

L'apertura anticipata della valvola di aspirazione rispetto al PMS permette di raggiungere l'apertura voluta quando il pistone inizia la corsa verso il PMI; la chiusura di tale valvola, ritardata oltre il PMI, permette di favorire il riempimento del cilindro sfruttando l'energia cinetica dei gas in moto nel condotto di aspirazione.

1.1.2 Formazione delle emissioni

Le figure 1.3a e 1.3b mostrano i principali processi di formazione degli inquinanti all'interno del cilindro, seguite dalla descrizione per ogni inquinante.

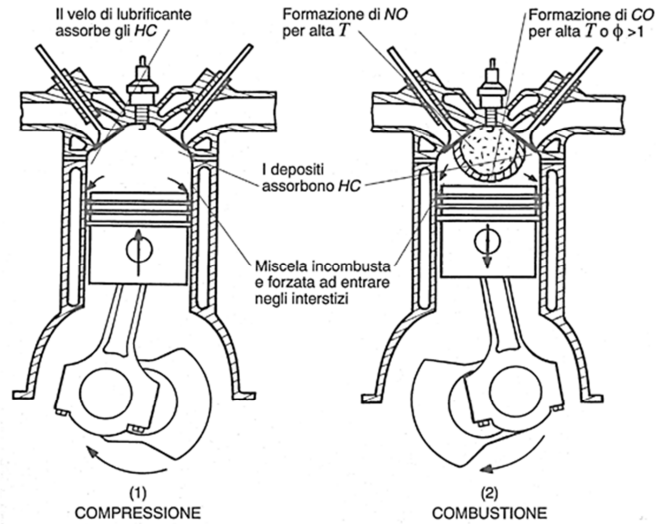


Figura 1.3a: Schematizzazione dei processi più probabili di formazione dei principali inquinanti (CO, NO_x e HC) durante le fasi di compressione e combustione [Ferrari, 2008].

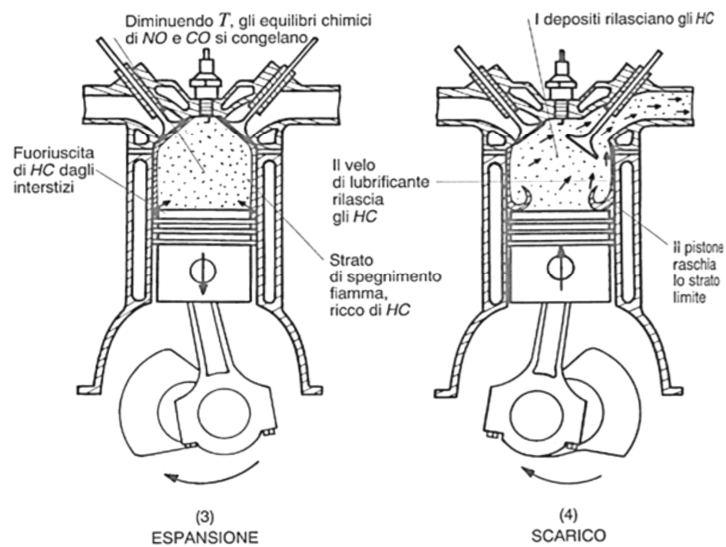
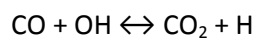


Figura 1.3b: Schematizzazione dei processi più probabili di formazione dei principali inquinanti (CO, NO_x e HC) durante le fasi di espansione e scarico [Ferrari, 2008].

Monossido di carbonio (CO) e anidride carbonica (CO₂)

L'ossigeno presente nell'aria aspirata tende ad ossidare il carbonio dapprima a CO (ossidazione parziale), e poi a CO₂ (ossidazione completa) secondo la reazione:



La velocità di reazione della prima, però, è più elevata della seconda (quest'ultima tra l'altro diminuisce al diminuire della temperatura); si hanno pertanto in camera di combustione le massime concentrazioni di CO. Allo scarico, invece, si avranno concentrazioni inferiori data la

tendenza alla completa ossidazione, ma comunque decisamente superiori rispetto ai valori di equilibrio, in quanto la rapida diminuzione di temperatura nella fase di espansione (circa 100 K/ms) provoca il cosiddetto “congelamento” della reazione.

Ne consegue che l'unica variabile motoristica che influenza sensibilmente la concentrazione di CO nei gas di scarico è il rapporto aria/combustibile della miscela, e, come sua conseguenza, la temperatura massima sviluppata dalla combustione.

Idrocarburi incombusti (HC)

Le emissioni di HC hanno varie origini. Durante la fase di compressione la crescente pressione del cilindro forza parte della carica fresca ad entrare nei piccoli interstizi all'interno del cilindro (ad esempio il volume compreso tra pistone, cilindro e fasce elastiche, oppure tra la testata, la guarnizione e il cilindro, ecc) dove il fronte di fiamma non riesce a penetrare; nella successiva fase di espansione la carica occultata negli interstizi, incombusta o solo parzialmente ossidata, viene rilasciata nel cilindro e poi scaricata. Una seconda importante fonte di formazione di HC è data dalle pareti della camera di combustione, più fredde dei gas interni. In prossimità delle pareti, pertanto, a causa della minore temperatura il fronte di fiamma si spegne (*quenching*) lasciando uno strato di circa 0,1 mm ricco di idrocarburi incombusti. Una terza possibile sorgente di HC è data dallo strato lubrificato delle pareti del cilindro. Prima della combustione (durante la fase di compressione) il velo di olio lubrificante può assorbire idrocarburi per poi rilasciarli in fase di espansione, quando la pressione diminuisce, sottraendoli così alla combustione. Un'ulteriore causa che concorre alla formazione di HC è data da alti valori del rapporto aria/combustibile, che non permettono al fronte di fiamma di interessare l'intera camera lasciando così incombusti una buona parte di idrocarburi.

Alla luce di queste cause le due principali variabili motoristiche che influenzano la concentrazione di HC allo scarico del motore sono il rapporto aria/combustibile e il valore di anticipo all'accensione rispetto al PMS.

Ossidi di azoto (NO_x)

Si formano alle alte temperature raggiunte nella zona di reazione, ma ancor più nella massa di gas appena combusti che vengono compressi dall'espansione della nuova miscela che brucia. Le elevate temperature (superiori ai 2000 K) producono la dissociazione delle molecole di N₂ e O₂ in atomi che si combinano poi tra loro andando a formare gli ossidi di azoto. Come accade per il monossido di carbonio e l'anidride carbonica, l'abbassamento di temperatura durante la fase di espansione “congela” la reazione di ossidazione. In camera di combustione, pertanto, il monossido (NO) prevale nettamente (circa il 98%) rispetto al totale di ossidi di azoto prodotti. Questa percentuale però diminuisce mano a mano che i gas esausti percorrono il collettore di scarico e, successivamente, il tubo di scarico, fino ad invertirsi una volta che gli ossidi vengono emessi in atmosfera dove l'NO si ossida rapidamente reagendo con l'ossigeno dell'aria. A causa di questa reazione continua essi vengono misurati senza distinzione tra monossido, diossido, ecc. La loro formazione è data dall'ossidazione con l'ossigeno presente nell'aria della miscela durante la combustione. Per quanto spiegato, la concentrazione di NO dipende dal contenuto di ossigeno

della miscela e dal valore massimo di temperatura. Questi parametri sono principalmente influenzati dal rapporto aria/combustibile e dal valore di anticipo all'accensione rispetto al PMS.

1.1.3 Influenza parametri motoristici sulle emissioni

Come si è visto, il parametro che maggiormente influenza le emissioni allo scarico di un motore ad accensione comandata è il **rapporto aria/combustibile** (o **dosatura**) α :

$$\alpha = \frac{m_a}{m_c}$$

con:

- m_a : massa d'aria;
- m_c : massa di combustibile.

La figura 1.4 mostra gli andamenti delle emissioni di CO, HC e NO_x al variare del rapporto di equivalenza ϕ , definito come:

$$\phi = \frac{\alpha_s}{\alpha}$$

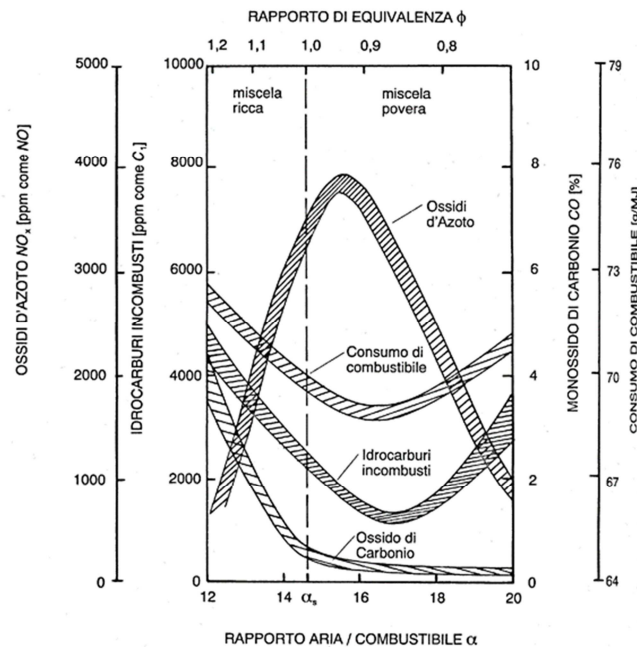


Figura 1.4: Influenza del rapporto di miscela sulle concentrazioni dei tre principali inquinanti e sul consumo specifico di combustibile [Ferrari, 2008].

Il pedice *s* indica il valore stechiometrico, cioè che contiene l'esatta quantità di O₂ necessaria ad ossidare tutti gli elementi che costituiscono il combustibile.

In figura 1.4 è anche riportata la curva del consumo specifico di carburante, che rappresenta un indice della produzione di CO₂ per unità di potenza sviluppata.

Si osserva che le emissioni di CO aumentano rapidamente all'arricchirsi della miscela, come conseguenza del difetto di ossigeno, ma scendono a valori molto bassi per miscele povere. In prossimità del rapporto stechiometrico le emissioni di CO sono in genere rilevanti e devono essere controllate (si veda tabella 1.1 al paragrafo 1.1.4).

Per quanto riguarda gli HC essi presentano un minimo per miscele piuttosto povere. Al diminuire della dosatura (miscela più ricca), il crescente difetto di ossigeno riduce progressivamente la possibilità di ossidare gli HC, ne consegue un aumento di concentrazione nei gas di scarico. Le emissioni di HC aumentano anche per miscele molto povere, in questo caso a causa della lentezza e irregolarità del fronte di fiamma, cioè all'aumentare della povertà della miscela peggiora la qualità della combustione.

Gli ossidi di azoto, come detto, sono funzione della temperatura massima e del rapporto aria combustibile. La temperatura massima di combustione si raggiunge per miscele aria/combustibile leggermente ricche ($\varphi \approx 1,1$), mentre all'impovertirsi della miscela aumenta l'ossigeno disponibile all'ossidazione; la combinazione di questi due parametri fa sì che la massima produzione di NO si abbia per miscele leggermente povere ($\varphi \approx 0,9$). Per miscele ancora più povere, infatti, la dissociazione delle molecole di N₂ e O₂ in atomi è ostacolata dalla minore temperatura sviluppata dalla combustione, mentre per miscele più ricche vi è una minore disponibilità di ossigeno (Pinamonte, 2004).

L'andamento di emissione degli ossidi di azoto rappresenta una condizione piuttosto sfavorevole nelle applicazioni motoristiche. Come si può osservare dalla figura 1.4, le esigenze di contenere consumi ed emissioni potrebbero essere soddisfatte contemporaneamente con l'impiego di miscele povere, se ciò non portasse ad un inaccettabile incremento delle emissioni di NO_x. Per questa ragione infatti, come mostrato in tabella 1.1, le norme antinquinamento Euro 1 ed Euro 2 imponevano valori limite di emissione per la somma NO_x + HC, lasciando al progettista una maggiore libertà nel fare in modo che il motore soddisfacesse le norme.

Il secondo parametro che influenza le emissioni è il **valore di anticipo all'accensione della miscela**. Questo stratagemma consiste nel far scoccare la scintilla tra gli elettrodi della candela prima che il pistone raggiunga il PMS (l'anticipo viene espresso in gradi di angolo di manovella). L'accensione viene comandata in anticipo perché, essendo la combustione della benzina relativamente lenta, un'accensione comandata in corrispondenza del PMS farebbe ritardare il picco di pressione all'interno del cilindro di circa 15° dopo il PMS. Comandare l'accensione in anticipo permette, quindi, di sfruttare la combustione il più possibile nelle vicinanze del PMS, garantendo un lavoro motore più elevato per via di un incremento della pressione media indicata. In generale, all'aumentare dell'angolo di anticipo, si ha un incremento dei valori massimi di temperatura e pressione, per effetto della compressione della frazione di carica che brucia prima del PMS. Come detto, questo influenza principalmente le emissioni di HC e NO_x.

Diminuire l'anticipo significa, invece, ritardare anche il completamento della combustione, che può eventualmente continuare oltre all'ingresso del collettore di scarico coinvolgendo gli idrocarburi incombusti che vi si trovano dopo la loro espulsione dal cilindro. Inoltre si verifica un

innalzamento delle temperature dei gas combusti nelle ultime fasi del ciclo favorendo l'ossidazione degli HC che proprio in quelle fasi vengono rilasciati dai piccoli interstizi della camera di combustione e dal film di lubrificante aderente alle pareti.

Un secondo effetto della diminuzione dell'anticipo è la minor quantità di combustibile che viene bruciata prima del PMS, riducendo così i valori massimi di pressione e temperatura, e quindi le emissioni di NO_x . La figura 1.5 mostra l'influenza dell'angolo di anticipo, al variare della dosatura, sulle emissioni di NO_x e sul consumo specifico di carburante. Ancora una volta, si può osservare che la necessità di limitare gli ossidi di azoto contrasta con l'esigenza di ottenere alti rendimenti del motore (consumi ridotti).

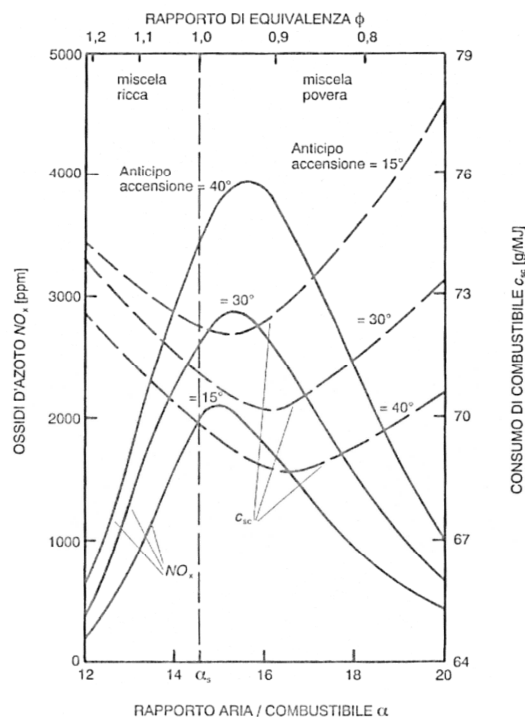


Figura 1.5: Influenza del rapporto di miscela e dell'anticipo all'accensione sulla concentrazione degli ossidi di azoto e sul consumo di carburante [Ferrari, 2008].

Un altro metodo per ridurre le emissioni di ossidi di azoto, a prescindere dalle tecniche di post trattamento dei gas di scarico, è quello di operare la cosiddetta **ricircolazione dei gas combusti (EGR)**. Questo sistema consiste nel diluire la carica fresca con una frazione di gas combusti (in genere tra il 5 e il 15%) che costituiscono, pertanto, una miscela inerte che non partecipa alla combustione, ma ne assorbe parte del calore sviluppato. Ne consegue un minor valore della temperatura massima e di conseguenza minori emissioni di NO_x .

Come è intuitivo pensare, anche il **regime di rotazione del motore e le condizioni di carico** influenzano le emissioni. All'aumentare del numero di giri del motore, infatti, si incrementa il livello di turbolenza in camera di combustione (flussi più veloci in aspirazione) e aumentano le temperature dei gas combusti per il minor calore ceduto alle pareti del cilindro. Il carico viene regolato variando la quantità di miscela aspirata mediante la valvola a farfalla. Un aumento del carico implica quindi un maggiore riempimento del cilindro a cui conseguono pressioni e temperature in camera più alte. Ne consegue che questi parametri influenzano positivamente le

emissioni di HC, mentre, al contrario, condizionano negativamente quelle di NO_x per effetto delle maggiori temperature.

Le emissioni, infine, sono dipendenti da altri parametri operativi. Il **rapporto superficie/volume (S/V)** della camera di combustione determina l'estensione dello strato limite termico aderente alle pareti, nel quale la miscela non viene raggiunta dalla fiamma. Segue che elevati rapporti S/V favoriscono le emissioni di HC. L'**angolo di contemporanea apertura delle valvole** e la **contropressione allo scarico** sono particolarmente influenti sulle emissioni di HC durante la fase di decelerazione del motore. Infatti, in questa condizione di funzionamento, si crea nel collettore di aspirazione una forte depressione che richiama dalla camera di combustione una grande quantità di gas residui del ciclo precedente, durante il periodo in cui le valvole di aspirazione e scarico sono contemporaneamente aperte (fase di incrocio). I gas residui diluiscono la carica del cilindro, creando sacche in cui, a causa della loro cattiva miscelazione con la carica fresca, la combustione non avviene. Questo rischio può essere completamente evitato se si esclude (come fanno gli attuali sistemi di alimentazione) l'apporto di combustibile in fase di brusca decelerazione. Infine il **rapporto di compressione** esercita pure una certa influenza sulle emissioni di HC e, soprattutto, di NO_x. L'aumento di questo parametro infatti determina un incremento delle pressioni e delle temperature di combustione.

1.1.4 Normativa di riferimento e sistemi di abbattimento delle emissioni

La crescente attenzione verso il problema delle emissioni inquinanti rilasciate in atmosfera dai veicoli stradali ha messo in moto, a partire dagli anni novanta del secolo scorso, un'importante attività di ricerca finalizzata al miglioramento delle prestazioni dei propulsori, alla riduzione dei consumi specifici e, soprattutto, degli inquinanti scaricati. Nel 1992 entra in vigore la prima normativa europea (EURO 1), seguita da continui "aggiornamenti" (Euro II, III, IV, V e VI, introdotti rispettivamente nel 1996, 2000, 2005, 2009 e 2014) che impongono limiti via via più stringenti sulle quantità di inquinanti emessi in atmosfera dai veicoli (si veda tabella 1.1). Al fine di valutare le emissioni dei veicoli, tali normative fanno riferimento ad una procedura di prova normalizzata che consiste nell'esecuzione in laboratorio, da parte del veicolo, di un prestabilito ciclo di guida (NEDC: New European Driving Cycle) che simula sia il comportamento urbano che quello extraurbano. Il ciclo viene eseguito su banchi a rullo, ed è composto (si veda figura 1.6) da una prima parte, con immediata partenza a freddo, costituita dalla ripetizione di un modulo rappresentativo del comportamento di un veicolo in una tipica città europea (UDC: Urban Driving Cycle), e da una seconda parte che rappresenta un percorso di tipo extraurbano (EUDC: Extra-Urban Driving Cycle).

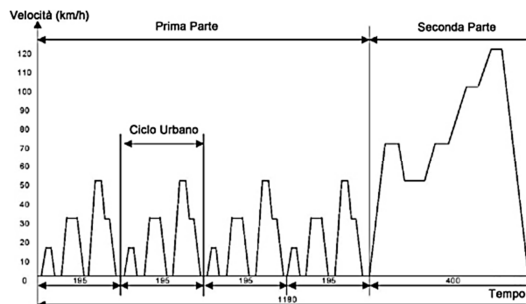


Figura 1.6: Ciclo di prova NEDC che simula il comportamento di un'autovettura su percorso urbano e extraurbano; ciclo in vigore dal 2000 [Ferrari, 2008].

Motore a ciclo Otto per autovetture						
Inquinante regolato	Euro I (1992)	Euro II (1996)	Euro III (2000)	Euro IV (2005)	Euro V (2009)	Euro VI (2014)
CO	2,72	2,20	2,30	1,00	1,00	1,00
HC	-	-	0,20	0,10	0,10	0,10
HC + NOx	0,97	0,50	-	-	-	-
NOx	-	-	0,15	0,08	0,06	0,06

Tabella 1.1: Limiti (espressi in g/km) delle emissioni inquinanti da motori per autovettura (normativa UE).

Il controllo delle emissioni è reso ancora più complesso dalla necessità di cercare un compromesso tra varie esigenze, spesso in contrasto tra loro, come ad esempio: le prestazioni del motore, il consumo di combustibile, il costo delle soluzioni, ecc. Il problema pertanto viene affrontato su più fronti: composizione dei combustibili, alimentazione del motore, completezza ed efficienza del processo di combustione e interventi a valle sui gas di scarico. Nei motori a ciclo Otto questi ultimi consistono in convertitori catalitici e ossidanti, che svolgono una triplice azione sui gas in quanto riducono gli NO_x a N₂ e, contemporaneamente, ossidano gli HC e il CO rispettivamente a CO₂ e H₂O. Questo è possibile, anche a temperature inferiori a 300 °C, grazie al passaggio del flusso esausto attraverso un monolita ceramico avente una struttura a nido d'ape, le cui pareti sono ricoperte da un sottile strato di metalli nobili (platino o palladio necessari per i processi di ossidazione, e rodio per produrre l'ambiente riducente necessario ad eliminare gli NO_x). Come accade per gli inquinanti, anche l'efficienza del convertitore catalitico dipende dal rapporto di miscela; l'ottimo si ha per un rapporto molto vicino allo stechiometrico, un eccesso di O₂ infatti rende difficile la riduzione degli ossidi di azoto, mentre un suo difetto fa diminuire la probabilità di ossidazione di CO e HC.

1.2 Rassegna della letteratura

In letteratura si possono trovare molti studi in cui si è valutata la quantità di inquinanti emessi dai veicoli confrontando vari tipi di controllo di un'intersezione. I possibili metodi di confronto vedono l'utilizzo, da un lato, di un modello basato sulla cinematica dei veicoli (profilo di velocità), dall'altro, di uno o più mezzi equipaggiati con apparecchiatura portatile per la valutazione delle emissioni (PEMS: Portable Emissions Measurement System), che misura, in continuo, le emissioni istantanee del veicolo (in questi casi in genere i dati vengono forniti con frequenza 1 Hz). Il profilo di velocità può a sua volta essere ricavato mediante un software di micro-simulazione oppure da dati di campo raccolti mediante GPS (Global Positioning System) montato sull'autovettura.

Mentre con il caso del modello si ha principalmente un confronto di tipo *before-after*, cioè prima e dopo la modifica del controllo dell'intersezione, nel secondo caso l'elevato costo delle misurazioni raramente giustifica la limitazione dello studio ad un solo nodo, anche se questo sarebbe più accurato. Risultano quindi più diffusi gli studi in cui il veicolo strumentato percorre un

corridoio attraversando varie intersezioni, possibilmente omogenee tra loro (sia a livello geometrico e funzionale che di domanda potenziale entrante).

Vi sono infine studi in cui il veicolo strumentato con PEMS è usato per poter calibrare al meglio i parametri di emissione e, successivamente, utilizzarli per simulare un differente tipo di controllo dell'intersezione.

I modelli consentono di simulare il comportamento di molti veicoli, con un costo di raccolta dati sensibilmente inferiore rispetto all'utilizzo di un veicolo strumentato; per questo motivo la letteratura è ricchissima di questo tipo di studi. D'altro canto, però, la stima dell'attività del singolo veicolo, che influenza significativamente le emissioni, può non essere così accurata.

Nel seguito vengono descritte le ipotesi e le metodologie usate da vari Autori, e, ovviamente, i risultati ottenuti, non solo relativi alle emissioni, ma anche ai ritardi e al consumo di carburante, che, come mostrato al paragrafo 2.2.1 risulta rappresentativo della quantità di CO₂ emessa.

1.2.1 Emissioni stimate con modello

Mandavilli et al. (2008) hanno valutato l'effetto sulle emissioni della sostituzione di intersezioni a regime di priorità (controllate da stop) con rotatorie in 6 differenti siti (5 in Kansas e 1 in Nevada). Videoregistrando il comportamento dei veicoli alle intersezioni sono stati raccolti i dati, successivamente analizzati tramite il software di analisi del traffico **aaSIDRA**, ottenendo i seguenti risultati: riduzione delle emissioni di anidride carbonica del 16% e del 59%, rispettivamente nei periodi di analisi della mattina e del pomeriggio. La stessa analisi è stata condotta anche sugli altri inquinanti regolamentati ottenendo riduzioni del 20 e del 48% per gli ossidi di azoto, del 17 e 65% per gli idrocarburi incombusti e, infine, del 21 e 42% per il monossido di carbonio. Tutte le differenze sono risultate statisticamente significative, così come la riduzione del ritardo, degli accodamenti e del numero degli arresti veicolari.

Ahn et al. (2009) hanno svolto uno studio analogo in Virginia, in cui una rotatoria rimpiazzava una precedente intersezione isolata a 4 rami con regime di stop sulla secondaria su una strada a scorrimento veloce. Sono stati raccolti dati di campo (come velocità e capacità) prima della sostituzione per modellare al meglio i profili di velocità nel caso di rotatoria. L'output così ottenuto è diventato l'input del modello di emissione **VT-Micro**. I risultati mostrano, per il controllo a rotatoria, un incremento delle emissioni di CO₂ del 10%, di CO del 203%, di NO_x del 38%, di HC del 155% ed un aumento del consumo di carburante del 13%.

Bergh et al. (2005), utilizzando il software **aaSIDRA**, hanno valutato il consumo di carburante e i ritardi, durante i periodi di picco (della mattina, del mezzogiorno e della sera), in seguito alla realizzazione di una rotatoria su 11 intersezioni in Nord-Virginia (10 semaforizzate ed 1 con regime di stop). I risultati con la rotatoria al posto del semaforo mostrano una riduzione complessiva del consumo di carburante del 16%, mentre la riduzione del ritardo durante i tre periodi studiati si mantiene tra il 62% e il 64%.

Varhelyi (2002) ha studiato la variazione delle emissioni a seguito della realizzazione di una serie di rotatorie nella città di Vaxjo (Svezia) al posto di 20 intersezioni con regime di precedenza e una semaforizzata. Un veicolo è stato strumentato con apparecchiatura che registrava, con

frequenza di 2 Hz, la distanza percorsa. Il conducente aveva il compito di replicare, il più fedelmente possibile, il comportamento del veicolo, scelto casualmente, da cui era preceduto. I dati registrati hanno permesso di ricavare i profili di velocità e accelerazione, e da questi, i valori di emissione e consumo di carburante usando i fattori proposti dal Swedish car-testing Institute "AB Svensk Bilprovning". I risultati mostrano, rispetto all'intersezione semaforizzata, una diminuzione delle emissioni di CO del 29%, degli NO_x del 21%, e del consumo di carburante del 28%. Mentre rispetto al precedente controllo a precedenza si ha avuto un leggero aumento delle emissioni medie: del 4%, 6% e 3% rispettivamente per il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto e il consumo di carburante. Nessuna delle differenze ottenute, però, è risultata statisticamente significativa.

Coelho et al. (2006) hanno indagato le emissioni prodotte dai veicoli in approccio a rotatorie con singola corsia all'interno di corridoi urbani. Le due intersezioni studiate si trovano una a Lisbona (Portogallo) e una a Raleigh (USA). Grazie all'analisi con videocamere sono state ricavate le variabili chiave (lunghezza della coda, tempo di fermata, numero di stop, ecc.) e, successivamente, per mezzo del software aaSIDRA, sono stati definiti tre profili di velocità caratteristici. Infine è stato applicato il metodo **VSP** (Vehicle Specific Power) per calcolare le emissioni. Il modello è stato calibrato usando dati di campo delle emissioni delle autovetture raccolti negli Stati Uniti. I risultati ottenuti mostrano generalmente un aumento delle emissioni all'aumentare del flusso di conflitto, in quanto la coda si allunga e si verificano i fenomeni di *stop and go* che sono altamente inquinanti, ma anche per flussi di conflitto piccoli, al diminuire di questi, un incremento delle emissioni, giustificabile probabilmente con il maggiore tasso di accelerazione nel ritornare alla velocità di crociera.

Gastaldi et al. (2014) hanno raccolto dati di campo mediante videocamere per modellare i profili di velocità e confrontare l'effetto della sostituzione di un controllo semaforico a tempi fissi con uno a rotatoria nel comune di Mirano (VE). I dati relativi alla cinematica dei veicoli sono stati ottenuti con il software Paramics e sono stati processati col software **AIRE** (Analysis of Instantaneous Road Emissions) per ottenere i valori di emissione durante il periodo di picco del mattino. In seguito alla calibrazione dei parametri secondo le linee guida proposte da FHWA (Federal Highway Administration) gli Autori hanno concluso che la rotatoria fa diminuire il ritardo totale del 20%. A questo miglioramento delle prestazioni del nodo, però, non è associata una così netta riduzione delle emissioni che resta contenuta tra il 2% e il 5% a seconda dell'inquinante.

La letteratura presenta molti casi in cui il software aaSIDRA viene usato, in questo tipo di studi, perché permette di formulare previsioni su capacità, densità, velocità, ritardi, lunghezza delle code, implementando le procedure del manuale HCM. Questo strumento permette inoltre di stimare le emissioni sulla base di un "elemental model" a quattro modi (*acceleration*, *cruise*, *deceleration* e *idle*), cioè sulla base del ciclo di guida. Risulta quindi possibile modellare le emissioni secondo un prestabilito ciclo (COPERT III, MOBILE6, MOVES, ecc.) oppure sviluppare un modello di emissione che si adatti al meglio al caso in esame. Spesso quest'ultima operazione risulta fondamentale per produrre risultati che ben si adattino al caso studio; Jie et al. (2013), infatti, calibrando i parametri comportamentali del modello VISSIM hanno concluso che usando le impostazioni di default si producono errori significativi nel calcolo delle emissioni. Confrontando i profili di velocità e accelerazione raccolti lungo un corridoio con un veicolo strumentato, e quelli simulati col modello VISSIM lungo lo stesso corridoio, Oneyear e Hallmark (2013) hanno ottenuto differenze statisticamente significative tra i dati di campo e quelli simulati col modello VSP.

1.2.2 Emissioni misurate con strumentazione di bordo

Hallmark et al. (2011) hanno valutato l'effetto sulle emissioni al variare del tipo di controllo del nodo e delle caratteristiche del conducente. Un veicolo, su cui è stata montata la strumentazione di bordo OEM-2100 Axion System della CATI (Clear Air Technologies International, Inc.) che fornisce dati di emissione con frequenza 1 Hz, è stato usato per percorrere più volte un circuito comprendente due *corridoi* (uno a 4 e l'altro a 2 corsie) in cui sono state scelte 7 intersezioni con diversi tipi di controllo, ma tutte a 4 rami (3 regolate da stop su tutti gli approcci, 2 a rotatoria, 2 semaforizzate). Tutte le osservazioni sono state fatte in condizioni di non congestione ed ogni intersezione veniva percorsa con la sola manovra di attraversamento. Complessivamente, in condizioni di non saturazione, la rotatoria non è risultata essere più "ecologica" di altri tipi di controllo, inoltre i risultati hanno mostrato un effetto differente a seconda dell'inquinante e del conducente.

Zuger et al. (2001) hanno studiato 4 intersezioni in Svizzera con un confronto *before-after* la realizzazione di una rotatoria utilizzando il Mobile Abgas Mess Anlage (MAMA). I ricercatori, dopo aver trascurato le emissioni di HC perché troppo basse per essere confrontate, hanno constatato che le emissioni dipendono da condizioni locali (traffico, numero di pedoni, flussi sui diversi rami) e dall'ora del giorno. Gli Autori hanno concluso che la rotatoria sembra avere un impatto negativo sulle emissioni quando il precedente flusso regolare viene sostituito da uno ricco di accelerazioni e decelerazioni. Si afferma inoltre che, nel caso di flusso sulla secondaria minore di quello sulla principale di un fattore compreso tra 5 e 10, l'utilizzo di una rotatoria produce effetti sfavorevoli dal punto di vista delle emissioni.

Frey et al. (2001) hanno utilizzato l'analizzatore OEM-1000 Axion System della CATI per studiare le emissioni dei veicoli, raccolte secondo dopo secondo, alle intersezioni semaforizzate. Gli Autori hanno mostrato la natura episodica del fenomeno (cioè basato su episodi temporanei: accelerazione, decelerazione, crociera, *idle*) concludendo che le emissioni sono significativamente diverse in base all'attività modale. I valori medi di emissione di NO e CO sono 10 volte più alti in *accelerazione* che in *sosta*, e 5 volte più alti quelli di CO₂ e HC.

Unal et al. (2004) hanno mostrato gli enormi vantaggi delle misurazioni *on-board* con veicolo strumentato rispetto alle altre possibili soluzioni di misure di campo: test del dinamometro e telerilevamento. Il veicolo strumentato permette infatti di raccogliere dati di emissione a prescindere dalle condizioni ambientali e di congestione, senza influenzare il comportamento degli altri conducenti. In questo studio, gli Autori, utilizzando una flotta di 7 veicoli strumentati, hanno concluso che alcune variabili, come la velocità minima e quella media, l'accelerazione media e quella massima, la deviazione standard delle velocità, la percentuale di tempo spesa in modalità "crociera", hanno un impatto significativo sulle emissioni veicolari. Viene inoltre affermato che il deflusso caratterizzato da *stop and go*, cioè con repentini cambiamenti di velocità e alte accelerazioni, genera *hot spots*, cioè tratti fissi lungo un corridoio nei quali le emissioni risultano essere statisticamente più grandi di un fattore 2 rispetto alle emissioni medie per condizioni di deflusso libero (*free flow*) nel corridoio.

Bokare e Maurya (2013) hanno utilizzato l'analizzatore Automotive Exhaust Monitor PEA 205 della Indus Scientific India associato al V-Box Global Positioning System (GPS) per ricavare, con frequenza 1 Hz, le emissioni inquinanti (CO, NO_x e HC) e il relativo profilo di velocità. I risultati mostrano che, a parità di accelerazione (1 m/s²), il minimo di emissione si ha per una velocità

compresa tra 3 e 8 m/s (10,8-28,8 km/h), in accordo anche con un altro studio (Ahn & al, 2002) in cui il minimo era osservato a 5,5 m/s (19,8 km/h). Inoltre, il tasso di accelerazione impatta in maniera statisticamente significativa sulle emissioni; infine, è stato concluso che per ridurre le emissioni i veicoli dovrebbero viaggiare a velocità pressoché costante.

Per quanto descritto la stima delle emissioni con modello può produrre differenze, rispetto a quanto succede nel mondo reale, sia nella rappresentazione del ciclo di guida dei veicoli, che nella valutazione delle diversità comportamentali tra conducente e conducente; altri errori possono nascere anche quando, a partire dal profilo di velocità e accelerazione, vengono stimate le emissioni. Per questo, è bene porre attenzione alla fase di calibrazione del modello.

La valutazione delle emissioni mediante strumentazione di bordo può seguire sostanzialmente due percorsi:

- 1) confronto tra intersezioni con diverso tipo di controllo appartenenti ad un corridoio;
- 2) confronto *prima-dopo* il cambio del tipo di controllo.

Nel primo caso i limiti della soluzione sono rappresentati dalle differenze, geometriche, funzionali e di domanda potenziale, tra le intersezioni analizzate. Nel secondo caso questo problema non si pone in quanto in particolare i valori domanda potenziale del nodo dovrebbero mantenersi pressoché costanti, anche se è necessario molto più tempo per portare a conclusione l'analisi; oltre all'intervallo di tempo materiale per la modifica del tipo di controllo (es. realizzazione di una rotatoria), infatti, va considerato il periodo in cui il nuovo tipo di controllo viene implementato mediante una soluzione temporanea. Quest'ultima è necessaria all'ambientamento da parte dei conducenti e alla valutazione della bontà dell'opera futura.

La prima soluzione risulta essere la più economica in quanto si deve procedere ad una sola campagna di rilievo. In entrambi i casi, come detto, si hanno comunque costi operativi decisamente superiori rispetto alla simulazione.

Nel seguito vengono presi in considerazione altri due aspetti importanti relativi all'attività di valutazione degli effetti emissivi di diverse tipologie di intersezione: definizione dell'area di influenza e ripartizione modale del ciclo di guida. Risulta interessante a tal proposito analizzare quanto fatto da diversi studiosi.

1.2.3 Valutazione area di influenza

Per una corretta valutazione dell'impatto ambientale di un'intersezione, dal punto di vista delle emissioni, è necessario definire il segmento stradale nel quale il comportamento dei veicoli è influenzato dalla presenza del nodo.

Hallmark et al. (2011) hanno analizzato i profili di velocità in funzione dello spazio ricavati dai veicoli strumentati in prossimità di ogni intersezione. I due corridoi oggetto dello studio presentano un carattere extra-urbano in cui la distanza tra le intersezioni varia tra 0,75 e 1,32 mi (1,2-2,1 km). L'analisi ha portato a definire un **tratto di strada dove si osservano la maggior parte delle accelerazioni e decelerazioni**; nel caso particolare questo segmento si estende per 750 ft (\approx 230 m) sia a monte che a valle dell'intersezione, per un totale di circa 460 m.

Varhelyi (2002) ha confrontato i profili di velocità simulati prima e dopo la realizzazione di una rotonda al posto delle attuali configurazioni dei nodi (20 a regime di precedenza e uno semaforizzato) nella città di Vaxjo (ambito urbano). **L'area di influenza è stata divisa in "tratto in ingresso" e "tratto in uscita". Il primo inizia a monte del nodo dove i due profili di velocità media (quello relativo alla situazione attuale e quello post realizzazione della rotonda) divergono, e termina 10 m a valle dell'intersezione. Il secondo inizia 10 m a valle del nodo e termina dove i due profili di velocità media convergono.** Nel caso del semaforo è stata valutata un'estensione complessiva dell'area di 150 m (da 100 m a monte a 50 m a valle). Per le intersezioni con regime a precedenza sono stati inoltre separati i casi in base al diritto o meno di precedenza. Il segmento in entrata comincia tra 80 e 300 m a monte del nodo per la principale e 50 m a monte per la secondaria. Il tratto di uscita si estende fino ad una distanza compresa tra 80 e 200 m a valle per la principale, e fino a 50 m a valle per la secondaria.

Coelho et al. (2006) hanno studiato i profili di velocità prodotti dal software aaSIDRA calibrato sulla base di dati di campo. In questo caso **l'area di influenza si sviluppa tra l'inizio delle decelerazioni a monte del nodo e la fine delle accelerazioni a valle del nodo.** Per entrambe le rotonde studiate si estende per un totale di 450 m.

In tutti i casi sopra descritti l'estensione dell'area di influenza viene valutata dall'osservazione dei profili di velocità che si manifestano all'intersezione; essa risulterà, quindi, tanto più estesa quanto maggiori sono le velocità di crociera a monte e a valle del nodo. Queste dipendono principalmente dalle caratteristiche geometriche e funzionali del tratto in oggetto e dall'ambito in cui l'intersezione è situata.

In ambito urbano, però, risulta piuttosto difficile definire in maniera univoca la localizzazione dell'inizio delle decelerazioni e la fine delle successive accelerazioni; questo è dovuto al fatto che la velocità di crociera è influenzata anche da fattori esterni al deflusso veicolare stesso (attraversamenti pedonali, fermate del bus, ecc.), inoltre le code in approccio si possono estendere verso monte per parecchie decine di metri, modificando quindi il profilo di velocità anche in punti distanti dall'intersezione.

1.2.4 Ripartizione modale

I profili di velocità reali ricostruibili dai dati raccolti su campo, con frequenza 1 Hz, possono essere segmentati secondo le 4 componenti dell'attività modale: *acceleration*, *cruise*, *deceleration* e *idle* (rispettivamente accelerazione, velocità costante, decelerazione e perdi tempo). Per procedere in questa maniera basta definire a priori gli estremi di velocità e accelerazione di ogni modo. Nel caso di studio con veicolo strumentato è possibile inoltre associare ad ogni secondo di osservazione il valore di emissione e il relativo modo; questa analisi, però, può risultare troppo di dettaglio per ritenere affidabili i risultati ottenuti, specie quando si è in presenza di continue e rapide variazioni di velocità. È anche opportuno evidenziare che rispetto al caso reale questa rappresentazione sistematica non tiene conto dei frequenti fenomeni di *stop and go* effettuati da un veicolo accodato ad un'intersezione a regime di priorità.

In letteratura è possibile trovare vari studi in cui il profilo di velocità viene segmentato in base all'attività modale, di seguito se ne riporta una rassegna indicando le soglie scelte per ogni modo e la fonte di origine dei dati.

Frey et al. (2001) hanno suddiviso il profilo di velocità, raccolto da dati a 1 Hz, di un veicolo strumentato con OEM-2100 Axion System secondo *range* definiti a priori. In *idle* rientrano quelle osservazioni in cui velocità e accelerazione sono nulle. La definizione del modo *acceleration* è un po' più complessa. Innanzitutto la velocità deve essere maggiore di zero e l'accelerazione almeno pari a 2 mph/s ($\approx 3,2$ km/(hs)). Inoltre rientrano in questa attività modale anche quei casi in cui il veicolo sta accelerando, ma lentamente; quindi, anche per valori di accelerazione di almeno 1 mph/s ($\approx 1,6$ km/(hs)) mantenuti dal veicolo per almeno 3 s si ricade in questo modo. L'attività *deceleration* è definita allo stesso modo di *acceleration* ma basandosi su valori di accelerazione negativi. Tutti i casi che non rientrano in uno dei modi appena descritti vengono considerati *cruise*. I risultati ottenuti da queste definizioni sono stati ritenuti molto validi, tanto che gli stessi *range* sono stati usati in successivi studi degli stessi Autori e adottati anche dall'EPA (Environmental Protection Agency). I risultati mostrano che le maggiori emissioni si ottengono in *acceleration*, quelle minori in *idle*.

Nam (2003) ha sviluppato un modello comportamentale che, implementato con MOVES, permette di legare le emissioni all'attività modale. Il modello prende il nome di Physical Emission Rate Estimator (PERE). I dati relativi alla cinematica del veicolo, disponibili secondo per secondo, sono stati suddivisi tra i 4 modi. L'attività *idle* viene assegnata a tutte quelle osservazioni in cui, a prescindere dal valore di accelerazione, la velocità è minore di 2 mph ($\approx 3,2$ km/h). Si considera *acceleration* quando l'accelerazione è maggiore di 1 mph/s ($\approx 1,6$ km/(hs)), *deceleration* quando i valori di accelerazione sono minori di -0,2 mph/s ($\approx 0,32$ km/(hs)) e, infine, *cruise* quando l'accelerazione è compresa tra -0,2 e 1 mph/s.

Tong et al. (2000) hanno misurato le emissioni istantanee di CO, NO_x e HC utilizzando l'analizzatore Flux-2000 montato a bordo dei 4 veicoli scelti per lo studio, con l'obiettivo di valutare le emissioni in funzione dell'attività modale. I dati sono stati raccolti nella città di Hong Kong. La definizione a priori dei *range* di attività modale prevede che ricadano in *idle* tutte quelle osservazioni in cui sia la velocità che l'accelerazione sono nulle. Il modo *acceleration* si realizza per valori di accelerazione maggiori di 0,1 m/s² (0,36 km/(hs)), *deceleration* per accelerazioni minori di -0,1 m/s² (-0,36 km/(hs)), e, infine, *cruise* per le restanti osservazioni. I risultati, espressi in g/s, dimostrano che i modi transitori (*acceleration* e *deceleration*) sono significativamente più inquinanti di quelli a velocità costante (*cruise* e *idle*).

Feng et al. (2007) hanno proposto e sviluppato un modello per valutare le emissioni istantanee dei bus in funzione dell'attività modale. A tale scopo sono state definite 4 ipotesi di *range* dei vari modi e, successivamente, è stata considerata migliore quella che produce le maggiori differenze intermodali. Nella prima ipotesi *idle* presenta velocità minori di 2,5 mph (≈ 4 km/h) e, contemporaneamente, il modulo dell'accelerazione deve essere minore o uguale a 0,5 mph/s ($\approx 0,8$ km/(hs)). I casi in cui l'accelerazione è maggiore di 0,5 mph/s ricadono in *acceleration*, e, in *deceleration* quando è minore di -0,5 mph/s. In *cruise* finiscono le restanti osservazioni. La seconda, terza e quarta ipotesi sono analoghe alla prima, ma il valore limite di accelerazione è, rispettivamente, 1, 1,5 e 2 mph/s ($\approx 1,6$, 2,4 e 3,2 km/(hs)). La successiva analisi ha mostrato che i risultati migliori, cioè con una maggiore differenza dei valori medi di emissione, si sono ottenuti

con la seconda ipotesi, in cui il valore limite di accelerazione è posto pari a 1 mph/s. I risultati, con questa ipotesi, mostrano che *acceleration* è sempre il modo più inquinante seguito da *cruise*. Il modo meno inquinante è *deceleration* sia per il CO che per gli NO_x, mentre per gli HC è *idle*.

Giuffrè et al. (2011) hanno studiato come le percentuali di tempo spese in ogni modo influenzano le emissioni dei veicoli leggeri. I limiti per definire l'attività modale usati dal modello CORSIM sono di seguito riportati. *Idle* presenta velocità minori o uguali a 3 mph ($\approx 4,8$ km/h) e, contemporaneamente, valori del modulo dell'accelerazione minori o uguali a 1 mph/s (≈ 1 km/(hs)). *Acceleration* si ha per accelerazioni maggiori o uguali a 2 mph/s ($\approx 3,2$ km/(hs)), *deceleration* per accelerazioni inferiori a -2 mph/s, e *cruise* nel caso di velocità maggiori a 3 mph e, contemporaneamente, valori del modulo dell'accelerazione minori o uguali a 1 mph/s. Implementando il modello CMEM (Comprehensive Modal Emission Model) si sono ottenute le emissioni relative ad ogni secondo. Gli Autori evidenziano l'importanza dell'analisi dell'attività modale per ricavare fattori di emissione per ogni modo. Si sottolinea che la ripartizione modale così definita, utile a risaltare le differenze di emissione per i vari modi, non ricopre l'intero profilo di velocità. Restano, infatti, estranei a tale ripartizione i casi in cui il modulo dell'accelerazione assume valori compresi tra 1 e 2 mph/s. I risultati mostrano che, per i 3 inquinanti studiati (CO, NO_x e HC), i modi più inquinanti sono nell'ordine *acceleration*, *cruise*, *deceleration* e *idle*.

Per concludere, Sinha e Kumar (2013) hanno analizzato il ciclo di guida nella città di Patna in India. I profili di velocità sono stati ricostruiti a partire dai dati forniti, a 10 Hz, da un GPS ad alte prestazioni, il Performance Box, montato su una tipica autovettura. I vari modi sono stati così definiti. *Idle* per velocità inferiori a 3 km/h (a prescindere dalle rispettive accelerazioni), *acceleration* per accelerazioni maggiori di $0,9 \text{ m/s}^2$ ($3,24 \text{ km/(hs)}$), *deceleration* per accelerazioni minori di $-0,1 \text{ m/s}^2$ ($0,36 \text{ km/(hs)}$) e, infine, *cruise* per moduli di accelerazione minori o uguali a $0,1 \text{ m/s}^2$. Si osserva che, anche in questo caso, l'intero profilo di velocità non viene ripartito secondo i 4 modi in quanto non vengono considerate le accelerazioni comprese tra $0,1$ e $0,9 \text{ m/s}^2$.

La normativa italiana nel DM 25/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" considera, per ricavare il diagramma delle velocità, accelerazioni e decelerazioni pari a $0,8 \text{ m/s}^2$ ($2,88 \text{ km/(hs)}$).

A conclusione di questa rassegna si può affermare che stabilire i *range* di velocità e accelerazione limite per ogni modo è un'operazione molto delicata se l'obiettivo finale è rappresentato dalla stima delle emissioni in base all'attività modale. Valori limite diversi, infatti, scelti a priori, possono influenzare notevolmente i risultati finali.

Gli studi riportati mostrano una notevole variabilità nei limiti scelti. Il valore limite dell'accelerazione per ricadere in *acceleration* varia tra $0,36$ e $3,22 \text{ km/(hs)}$, in *deceleration* tra $-3,22$ e $-0,32 \text{ km/(hs)}$. Anche il modo *idle* presenta varie alternative; dal caso più diffuso in cui sia velocità che accelerazione devono essere nulle, a valori di velocità di $4,8 \text{ km/h}$ con accelerazioni minori di $1,6 \text{ km/(hs)}$.

I limiti proposti dal Frey sono quelli maggiormente usati anche in studi non riportati nella rassegna e sono stati assunti anche dall'EPA. Nei suoi lavori i dati di velocità sono raccolti a 1 Hz e provengono da un veicolo strumentato. I valori proposti dall'Autore sono riportati in tabella 1.2:

Limiti ripartizione modale		
	Velocità (km/h)	Accelerazione (km/(hs))
Idle	0	0
Acceleration	> 0	> 3,22 (o > 1,61 per almeno 3 s)
Deceleration	> 0	< -3,22 (o < -1,61 per almeno 3 s)
Cruise	tutte le restanti osservazioni	

Tabella 1.2: Limiti di ripartizione modale proposti da C. Frey.

In tutti gli studi il modo *acceleration* è risultato il più inquinante, mentre tra i più ecologici, quando le emissioni vengono espresse per unità di tempo, troviamo *idle* o *deceleration* a seconda dello studio e dell'inquinante.

2. CASO STUDIO

Lo studio in esame si concentra sul confronto tra due tipi di controllo di un'intersezione, semaforizzata nel primo caso e rotatoria nel secondo. Per poter valutare la quantità di inquinanti emessa in atmosfera, in corrispondenza ai due tipi di intersezione, si è usato un "veicolo sonda", cioè un'autovettura equipaggiata con le strumentazioni necessarie a fornire, con frequenza pari ad 1 Hz, la posizione del veicolo, le condizioni istantanee di funzionamento del motore, le condizioni ambientali, i valori di emissione dei 4 principali inquinanti: CO₂ (anidride carbonica - inquinante termico), CO (monossido di carbonio), NO_x (ossidi di azoto) e HC (idrocarburi incombusti).

2.1 Progettazione dell'esperimento

2.1.1 Area di studio

Il sito scelto è situato nella zona occidentale del Comune di Vicenza lungo la circonvallazione interna. In quest'area le principali intersezioni tra la circonvallazione e le vie radiali di Vicenza sono tutte regolate da rotatoria eccetto quella tra via Mazzini, via Bonollo (verso il centro città) e via dei Cairoli (verso ovest). Quest'intersezione a 4 rami (rettangolo blu di figura 2.2), infatti, è semaforizzata. Proseguendo verso sud lungo la circonvallazione (via Mazzini e Viale Milano), a circa 260 m è situata una rotatoria (circonferenza blu di figura 2.2) all'intersezione con corso Ss Felice e Fortunato. Grazie alla presenza di una rotatoria sia a nord (rotatoria A) dell'intersezione semaforica che a sud (rotatoria B) di quella a rotatoria è stato possibile creare un *circuito* (suddiviso in due *trip*, A e B, rispettivamente da nord verso sud e da sud verso nord) dal carattere urbano su terreno pianeggiante, nel quale entrambi gli incroci di interesse vengono superati dal veicolo sonda mediante la sola manovra di attraversamento. Il circuito si estende pertanto in un'area principalmente residenziale in cui tra i poli attrattivi di una certa significatività vi sono il Teatro Comunale di Vicenza posto proprio in prossimità dell'intersezione semaforica e la stazione ferroviaria di Vicenza sita qualche centinaia di metri ancora più a sud lungo la circonvallazione.

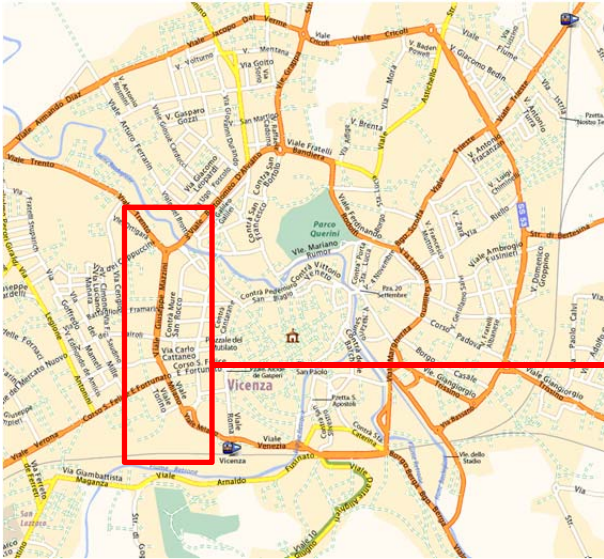


Figura 2.1: Area di studio nel Comune di Vicenza [ViaMichelin.it].

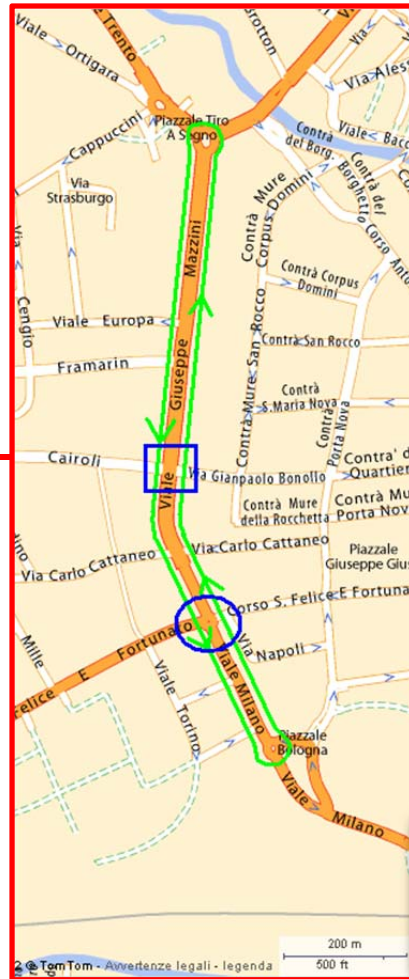


Figura 2.2: Dettaglio area di studio con indicazione intersezioni e circuito [ViaMichelin.it].



Figura 2.3: Foto aerea dell'area di studio [Google Earth].

L'intersezione semaforica (**nodo 1**) è composta da 4 rami. Quelli della direttrice principale nord-sud (N-S) sono entrambi a due corsie, sia in entrata che in uscita; l'approccio ovest (O) ha due corsie in entrata ed una in uscita, mentre il ramo est (E) ha un'unica corsia sia in entrata che in uscita. Le uniche manovre vietate sono le svolte a sinistra per i soli approcci nord e sud.

Il ciclo semaforico è composto da due sole fasi che prevedono, pertanto, una contemporaneità di verde tra le manovre riservate ai veicoli e quelle riservate ai pedoni, i quali avranno la precedenza rispetto al veicolo che svolta (si vedano figure 2.4 e 2.5). La durata del ciclo, e delle fasi al suo interno, non è fissa. Una sintesi delle durate delle componenti del ciclo per la direttrice N-S, osservate nel periodo di analisi (si veda paragrafo 2.2), è riportata nelle tabelle 2.1 e 2.2.

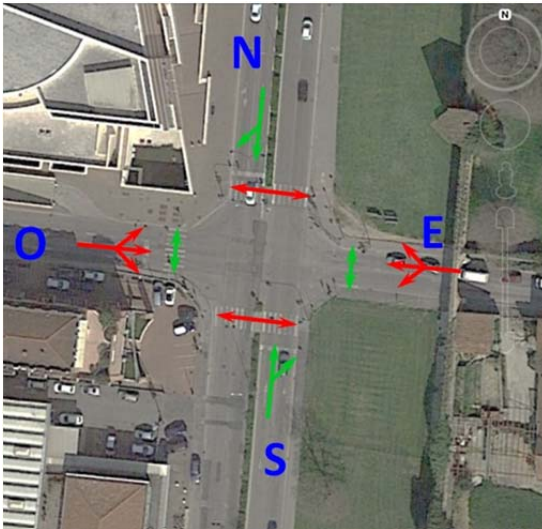


Figura 2.4: Rappresentazione fase 1 [Google Earth].

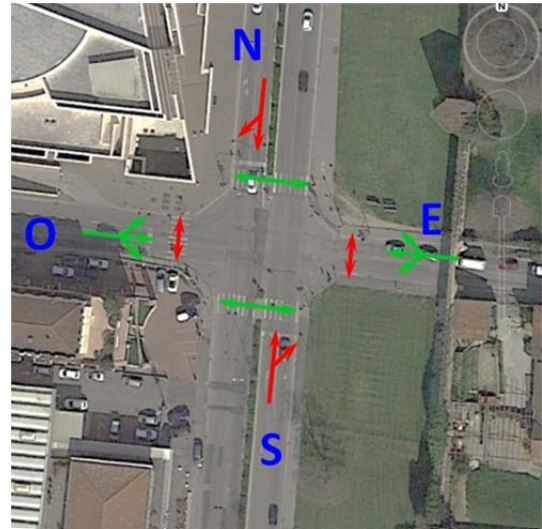


Figura 2.5: Rappresentazione fase 2 [Google Earth].

	Verde	Giallo	Rosso	Ciclo
Min (s)	49.0	3.0	31.8	85.8
Med (s)	50.1	4.0	46.1	100.1
Max (s)	54.9	4.9	62.1	116.2

Tabella 2.1: Valori minimi, medi e massimi del ciclo e delle sue componenti, per la direttrice N-S, osservati nel periodo di analisi.

	Verde	Giallo	Rosso	Ciclo
I quartile (s)	49.9	3.9	46.7	100.8
Mediana (s)	50.1	4.0	47.0	101.0
III quartile (s)	50.1	4.0	47.0	101.1

Tabella 2.2: Valori del I, II e III quartile del ciclo e delle sue componenti, per la direttrice N-S, osservati nel periodo di analisi.

Il valore medio del ciclo risulta essere poco significativo dato che più del 50% delle osservazioni ha una durata compresa tra 100,8 e 101,1 s, viene quindi riportata in figura 2.6 la composizione del ciclo mediano per le due direzioni.

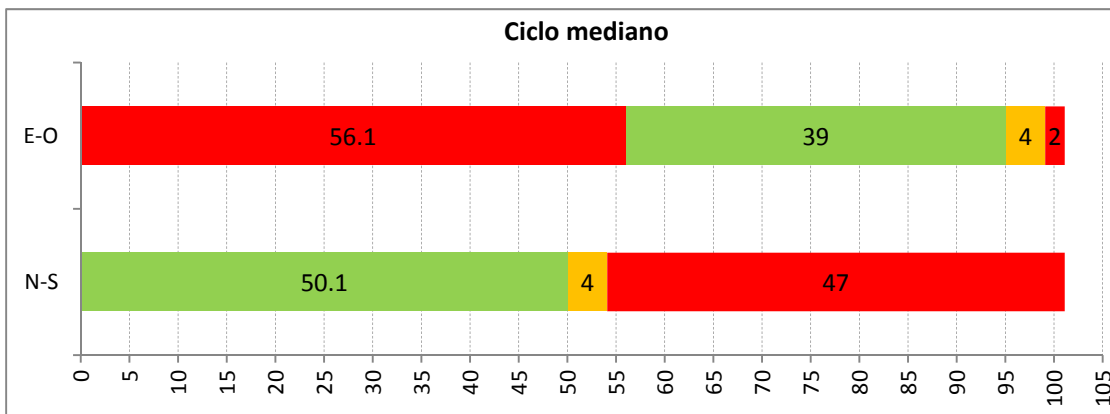


Figura 2.6: Composizione del ciclo mediano per le due direttrici.

L'intersezione a rotatoria (nodo 2), anch'essa a 4 rami, è composta da un'isola centrale non sormontabile di 10,0 m di diametro, circondata da un cordolo calpestabile largo 2,6 m; la corona rotatoria (anello) ha una larghezza di 7,8 m, da cui ne risulta un diametro totale di 30,8 m. In accordo col D.M. 19/04/2006 ("Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali") si classifica come rotatoria compatta. I rami della direttrice N-S hanno entrambi due corsie in entrata e una in uscita; l'approccio O in entrata ha due corsie, quella di destra è riservata alla sola svolta a destra di mezzi pubblici e taxi e, per disincentivare il suo utilizzo da parte di autovetture private e veicoli commerciali, è protetta da un piccolo cordolo di delimitazione che si estende a partire da circa 85 m a monte della linea di precedenza fino all'isola divisionale; in uscita, invece, vi è un'unica corsia ma la sua larghezza è tale da consentire la disposizione dei veicoli su due file. Questo accorgimento si è reso necessario affinché la coda generata dal semaforo, che regola il flusso pedonale in attraversamento al ramo, non si estenda fino all'anello; rispetto agli altri 3 attraversamenti pedonali non regolati, infatti, questo risulta anche più distante dalla rotatoria. Infine il ramo E ha la peculiarità di essere a senso unico in entrata, con due corsie, anche in questo caso quella di destra riservata a mezzi pubblici e taxi, ma delimitata da sola segnaletica orizzontale. Come previsto dal D.M. sopra citato, l'anello è composto da un'unica corsia.

2.1.2 Giornate di sperimentazione

La raccolta dei dati è stata fatta durante tre giornate consecutive dell'aprile 2014. Per avere un campione di dati il più completo possibile si sono indagate sia le ore di picco che quelle fuori picco di tre giorni feriali. Precedenti studi (Rakha & al., 2000) hanno dimostrato che i giorni centrali della settimana (da martedì a giovedì compresi) riflettono le condizioni di traffico di un tipico giorno feriale, ciò, invece, non vale per il lunedì e il venerdì. In virtù di queste considerazioni la sperimentazione è stata condotta per un totale di 5 sessioni: le mattine dei giorni 1, 2 e 3 aprile tra le 7:30 e le 10:30, e i pomeriggi del 1 e 2 aprile tra le 16:30 e le 19:30.

2.1.3 Caratteristiche e strumentazione del veicolo sonda

La raccolta dati è stata resa possibile mediante l'utilizzo di una delle 20 Fiat Panda bi-fuel che il Centro Ricerche Fiat ha fornito alla regione Lombardia per testare miscele di carburante con diversi tenori di idrogeno. I test e l'equipaggiamento del veicolo sono stati curati dall'Istituto Motori del CNR di Napoli. Durante la sperimentazione la Fiat Panda Natural Power è stata alimentata esclusivamente a benzina, se ne riportano le caratteristiche salienti:

- anno di costruzione	2007
- cilindrata	1242 cm ³
- numero di cilindri	4 in linea
- potenza massima a 5000 giri/min	44 (60) kW (CV)
- coppia massima a 2500 giri/min	102 Nm
- trasmissione	cambio manuale a 5 marce
- consumo urbano/extra-urbano/misto	7,9/5,2/6,2 l/100km
- trattamento delle emissioni	catalizzatore trivalente
- emissioni CO ₂	146 g/km
- direttiva di omologazione	Euro 4
- km alla sperimentazione	≈ 20500

La figura 2.7 riporta lo schema di tutti i componenti installati a bordo del veicolo e di seguito elencati:

- analizzatore Semtech-DS con relativo alimentatore/inverter;
- misuratore di portata dei gas di scarico (EFM: Exhaust Flow Meter) con relativo modulo di gestione e controllo;
- GPS Garmin 16X per la localizzazione del veicolo, altitudine e velocità;
- sonda meteorologica per la misura della temperatura, pressione ed umidità ambientale;
- videocamera per la registrazione del percorso;
- OBD MATRIX collegato alla presa OBD;
- notebook per il controllo del Semtech;
- batterie di alimentazione;
- quadro elettrico di sicurezza;
- inverter;
- pompa per il campionamento;
- collegamenti elettrici.

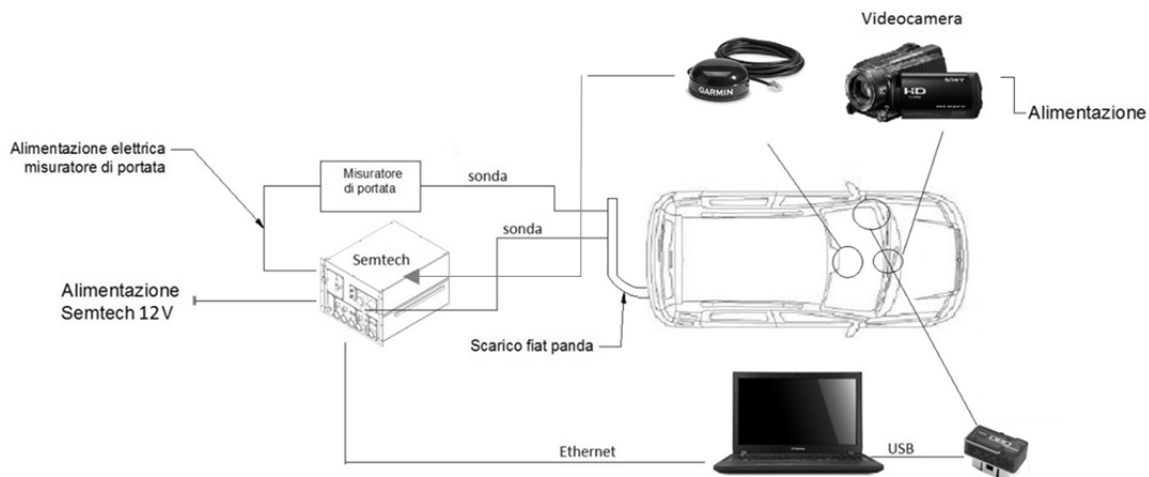


Figura 2.7: Schema dei componenti installati a bordo del veicolo durante le prove su strada.

L'apparecchiatura più interessante a bordo del veicolo sonda è sicuramente l'**analizzatore Semtech-DS** della *Sensors*. Questo strumento (figura 2.8) è in grado di misurare la portata di massa delle emissioni di CO₂, CO, NO_x e HC sfruttando varie tecnologie come elencato in tabella 2.3 (NDIR: *Non-Dispersive Infra-Red*; NDUV: *Non-Dispersive Ultra-Violet*; FID: *Flame Ionization Detector*). Della stessa ditta è anche la **sonda misuratrice di portata massica allo scarico**. La tabella riporta anche, la precisione e il tempo di riscaldamento dello strumento. Tutti i valori di output sono registrati con frequenza pari a 1 Hz.



Figura 2.8: Analizzatore Semtech-DS.

	CO ₂	CO	NO _x	HC	Flusso esausto
Principio di misura	NDIR	NDIR	NDUV	FID	Tubo di Pitot
Precisione	± 3%	± 3%	± 3%	± 2%	± 2,5%
Tempo di riscaldamento (min)	15	15	15	60	15

Tabella 2.3: Specifiche salienti dell'analizzatore Semtech-DS.

Per informazioni più dettagliate sulle tecnologie di misura si rimanda a quanto descritto dal Ferrari (2008)

L'**OBD MATRIX** consente la diagnosi e la registrazione dei sistemi elettronici (ad esclusione di quelli safety related) mentre il veicolo è in movimento. Con questo strumento sono stati registrati i parametri relativi al numero di giri del motore, portata d'aria, velocità ECU (Engine Control Unit) e rapporto di marcia, anche questi dati con frequenza 1 Hz.

L'**accuratezza della posizione e della velocità fornite dal GPS** vengono garantite dal sistema WAAS, in condizioni stazionarie, rispettivamente con uno scarto inferiore a 3 m nel 95% delle osservazioni e di 0,1 nodi (0,19 km/h).

Di fondamentale importanza per il funzionamento di tutta la strumentazione sono le **sei batterie** collegate in serie che sviluppano una tensione totale di 24 V (6*4V). Le batterie sono a

loro volta collegate ad un **quadro elettrico** che presenta due interruttori di sicurezza (sul polo positivo e sul polo negativo). Questi interruttori mettono in collegamento le batterie con un **inverter** nel quale la tensione entra continua a 24V, ed esce alternata a 220V. Con tale tensione, vengono alimentate le prese del quadro elettrico con una potenza nominale di 1000VA. A queste prese viene collegato l'alimentatore del Semtech e tutta la strumentazione utilizzata nello svolgimento delle prove su strada.



Figura 2.9: Strumentazione di bordo [tvweb.it].



Figura 2.10: Dettaglio strumentazione [tvweb.it].

2.1.4 Conducenti

Per cercare di rendere il campione più omogeneo e rappresentativo della popolazione il veicolo sonda è stato alternativamente guidato da due autisti con caratteristiche psico-fisiche differenti, senza imporre loro un particolare stile di guida, ma lasciandoli liberi di guidare secondo le proprie attitudini sia per quanto riguarda lo stile, che la scelta, totalmente arbitraria, della corsia da occupare. Le caratteristiche dei due conducenti (*driver D1 e D2*) sono:

- D1: uomo, 33 anni, guida scattante
- D2: donna, 57 anni, guida tranquilla

2.1.5 Raccolta e digitalizzazione dei dati

Le modifiche applicate al veicolo sonda prevedono che una piccola aliquota dei gas di scarico venga campionata in prossimità della marmitta (dove è situata anche la sonda EFM) e, tramite una linea riscaldata (settata a 191 °C), divisa in due parti:

- 1) una prima parte attraversa un filtro riscaldato a 191 °C per giungere all'analizzatore HC che lavora alla stessa temperatura;
- 2) la seconda parte, invece, dopo aver attraversato un chiller (a 2-5 °C) viene campionata da una pompa fredda e raggiunge, nell'ordine, i moduli di analisi degli NO_x, del CO e della CO₂;
- 3) entrambe le parti sono infine scaricate in atmosfera insieme all'acqua di condensazione del chiller.

Prima della partenza del veicolo sonda tutte le apparecchiature sono state collegate e accese. Dopo l'attesa di un tempo pari a quello di riscaldamento dei vari componenti il veicolo sonda è pronto a partire.

Il seguente lavoro di digitalizzazione (e contemporaneo trattamento e pulizia) dei dati relativi al veicolo sonda è stato condotto dai tecnici dell'Istituto Motori del CNR di Napoli. I dati di output, raccolti con frequenza 1 Hz, sono:

- direzione del trip e conducente;
- data e ora;
- posizione del veicolo (latitudine e longitudine);
- condizioni ambientali (umidità, pressione e temperatura);
- velocità da GPS;
- portata massica totale allo scarico;
- portata massica allo scarico dei 4 inquinanti (CO₂, CO, NO_x e HC);
- consumo di carburante;
- portata massica d'aria al motore;
- dati dall'unità di controllo motore (ECU: Engine Control Unit): velocità, giri al minuto e rapporto di marcia.

Parallelamente, al fine di indagare le condizioni di traffico osservate nelle sessioni di analisi sono state posizionate nell'area di studio varie videocamere montate su pali telescopici appositamente studiati. La scelta della videocamera è stata fatta perché non essendo uno strumento intrusivo non reca alcun disturbo alla normale circolazione dei veicoli, inoltre risulta essere di facile e rapida installazione e permette di rilevare una grande quantità di dati. La figura 2.11 mostra la disposizione e i coni visivi delle videocamere. Le manovre al nodo sono state registrate ad ogni intersezione con una GoPro Hero3 che offre, rispetto alle altre videocamere usate (JVC MG-330 e Panasonic HC-V110), un più ampio angolo di visuale (videocamere 1 e 2 rispettivamente per nodo 1 e 2). Nel dettaglio ogni videocamera ha registrato:

- Videocamera 1: manovre al nodo 1, accumulo della coda ai rami N ed E del nodo 1, lanterna semaforica del ramo O del nodo 1;
- Videocamera 2: manovre al nodo 2, accumulo della coda ai rami S ed E del nodo 2;
- Videocamera 3: coda al ramo O del nodo 1;
- Videocamera 4: parte terminale di un'estesa coda al ramo E del nodo 1;
- Videocamera 5: coda al ramo S del nodo 1;
- Videocamera 6: dettaglio delle parti terminali di code molto estese per l'approccio S del nodo 1 e l'approccio N del nodo 2;
- Videocamera 7: accumulo della coda al ramo N del nodo 2;
- Videocamera 8: accumulo della coda al ramo O del nodo 2;
- Videocamera 9: lanterna semaforica del ramo S del nodo 1.

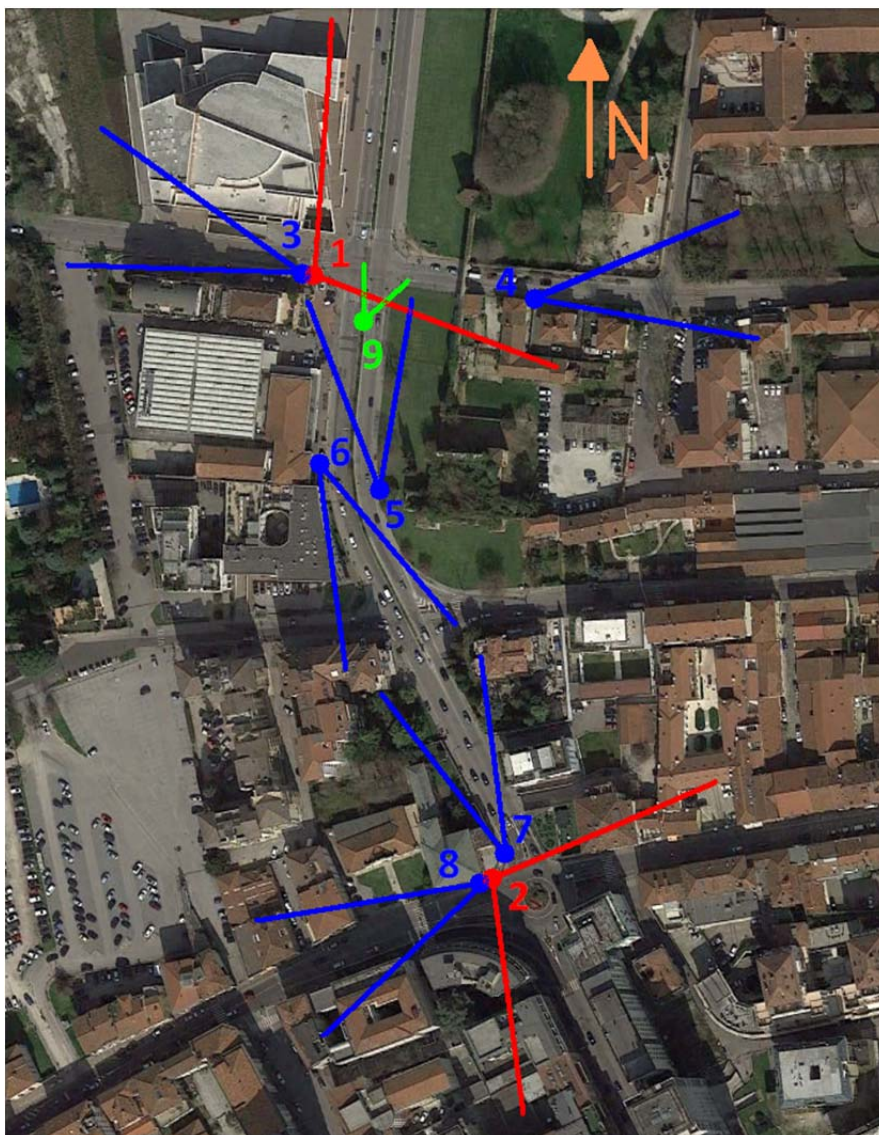


Figura 2.11: Disposizione delle videocamere e relativi con visivi.

Un ulteriore vantaggio delle riprese video è che la codifica manuale consente di ridurre notevolmente l'errore rispetto ai più sofisticati (ma ancora meno precisi) software automatici, specie in condizioni di luce scarsa o particolari situazioni transitorie (riflessi, controluce, ecc.). Il rovescio della medaglia è rappresentato da un tempo di codifica molto elevato.

Prima di procedere con l'operazione di codifica dei video tutti i filmati sono stati temporalmente allineati tra loro e con i dati provenienti dalla strumentazione dei veicolo sonda.

La codifica è stata fatta sfruttando una maschera di Access, appositamente creata, per registrare direttamente i record in un database. Nell'istante in cui ogni veicolo effettuava la manovra esso è stato codificato, veniva quindi registrata la classe, la manovra, il ramo di ingresso e l'istante (espresso in millisecondi) in cui essa veniva effettuata. La classificazione del veicolo e della manovra ha rispettato il seguente schema:

Classificazione veicolo

- 1M: motocicli e ciclomotori (veicoli a due ruote);

- 2C: autovetture (utilitarie, medie, station wagon, suv, pick-up, monovolume);
- 3V: commerciali leggeri (furgoni e camion fino a 7,5 m di lunghezza o 3,5 t di massa, auto con roulotte a traino, camper);
- 4T: commerciali pesanti (camion oltre 7,5 m di lunghezza o 3,5 t di massa, autoarticolati, autotreni, tir, autobus e pullman);
- 5P: veicolo sonda.

Classificazione manovra

- 1: svolta a sinistra;
- 2: attraversamento;
- 3: svolta a destra.

Classificazione ramo in ingresso

- 1: sud;
- 2: est;
- 3: nord;
- 4: ovest.

Nel solo caso di approccio da nord del nodo 2 (rotatoria), essendo la svolta a sinistra vietata (il ramo est è a senso unico in ingresso al nodo) si è deciso di assegnare il codice 1 alla manovra di inversione a U. Tale manovra si rende necessaria per tutti quei veicoli provenienti da nord che non potendo svoltare a sinistra all'intersezione semaforizzata si trovano costretti a procedere fino alla rotatoria per poi effettuare la manovra di inversione. Durante le osservazioni il 5,78 % dei veicoli provenienti da nord ha effettuato l'inversione di marcia, mentre per gli altri rami le percentuali relative alla stessa manovra (in questi casi non codificata) sono risultate essere decisamente inferiori.

2.1.6 Trattamento dati da veicolo sonda

L'operazione di pulizia serve a rimuovere dall'analisi quei dati che per varie ragioni (errori di sincronizzazione, di collegamento tra l'analizzatore, lo scanner e il pc, ecc.) possono risultare non corretti.

Per quanto riguarda i dati forniti dall'Istituto Motori non sono pervenuti circa il 30% dei valori di velocità raccolti dall'ECU, e quasi il 35% di quelli di emissione di idrocarburi incombusti (HC), mentre il restante dataset risulta completo.

Analizzando nel dettaglio il dataset, si è osservato, inoltre, che la velocità calcolata dal GPS è caratterizzata, per alcuni trip o loro parti, da oscillazioni non compatibili con le caratteristiche fisiche di una normale autovettura; si sono riscontrati, infatti, vari esempi in cui il valore di accelerazione al tempo i -esimo, calcolato come differenza tra la velocità al tempo i e quella al tempo $i-1$, superava notevolmente i limiti fisici di una tipica autovettura (si veda figura 2.14a). Da un confronto (figura 2.12) tra i valori di velocità misurati dal GPS e quelli misurati dall'ECU si è osservato che i secondi tendono ad essere mediamente superiori di un fattore costante pari a 1,4

km/h a cui si aggiunge un incremento percentuale di circa l'1,2% rispetto ai primi; sono inoltre facilmente visibili due sorte di "ali" che si discostano molto dalla retta a 45° (in nero) e che si riferiscono a quelle oscillazioni nei valori di velocità precedentemente citate.

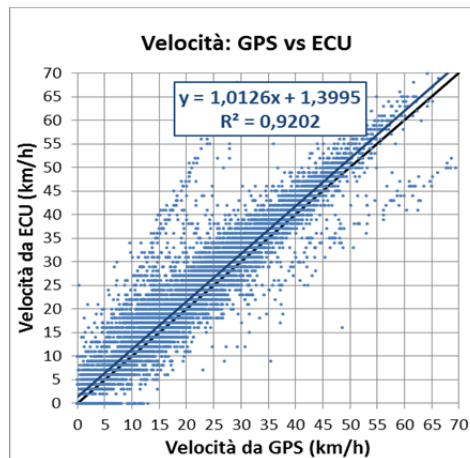


Figura 2.12: Confronto velocità istantanee date dal GPS e dall'ECU.

Dati i limitati valori di velocità rilevata dall'ECU, e il suo arrotondamento all'intero, si è quindi deciso di utilizzare i dati del GPS trattati con una tecnica di smoothing per eliminare i valori evidentemente errati.

Una rassegna delle possibili tecniche di smoothing relative a dati di velocità raccolti, come nel caso studio, da GPS su campo con frequenza 1 Hz è stata proposta nel dettaglio da H. Rakha (Rakha & al., 2001). Nel seguito verrà illustrata ed utilizzata la tecnica che meglio si adatta ai dati in esame.

La prima operazione è quella di ricavare il valore istantaneo di accelerazione, che è possibile ottenere tramite la seguente formulazione:

$$a_t = \frac{u_{t+1} - u_{t-1}}{\Delta t} \quad (1)$$

con:

a_t = accelerazione istantanea al tempo t [km/(hs)];

u_t = velocità istantanea al tempo t (km/h);

Δt = intervallo di tempo tra le 2 osservazioni al numeratore (s).

L'equazione 1 usa un approccio *central-difference*, ma in alternativa si possono usare anche l'approccio *backward-difference* che considera le misurazioni agli istanti t e $t-1$, o l'approccio *forward-difference* con le misurazioni agli istanti t e $t+1$. L'approccio *central-difference* sembra produrre risultati con un'accuratezza superiore di un ordine di grandezza rispetto alle altre due formulazioni, e quindi è quella scelta per lo studio in oggetto. L'analisi del Rakha fornisce anche il campo delle accelerazioni in funzione della velocità ritenute realistiche per un tipico veicolo (area all'interno del poligono blu di figura 2.13).

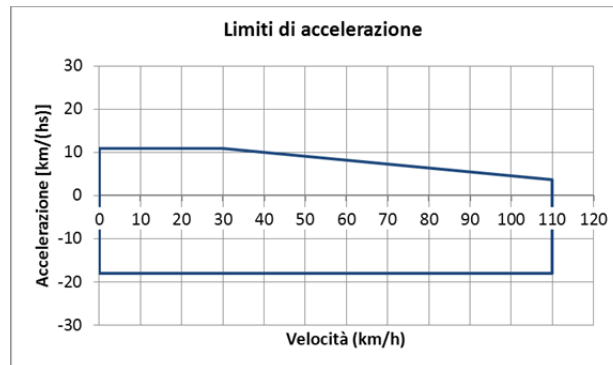


Figura 2.13: Valori limite di accelerazione in funzione della velocità per un tipico veicolo [Rakha et al., 2001].

Mentre le decelerazioni massime consentite sono indipendenti dalla velocità e pari a -18 km/(hs) (-5 m/s²), le accelerazioni massime sono costanti e pari a $10,8$ km/(hs) (3 m/s²) fino alla velocità di 30 km/h e poi decrescono linearmente di $0,09$ km/(hs) ($0,025$ m/s²) per ogni incremento unitario di velocità fino a 110 km/h.

I modelli di smoothing analizzati dal Rakha sono 5: *data trimming*, *simple exponential* (SE), *Epanechnikov kernel* (EK), *robust M-kernel* (RK) e *robust SE*. Per un confronto dettagliato tra i vari metodi si rimanda allo studio del Rakha e nel seguito si riporta la procedura del modello EK smoothing utilizzato.

I metodi Kernel, applicabili con buoni risultati su serie di almeno 50 dati, usano un peso assegnato per determinare il trend di una serie di osservazioni. In questi metodi, ad ogni osservazione attorno ad un punto dato è assegnato un peso in relazione alla posizione del punto stesso all'interno della banda considerata secondo una funzione di densità parabolica:

$$K(u) = \begin{cases} 0,55(1 - u^2) & \text{se } u \leq 1 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2)$$

$$u = \frac{x - x_i}{h} \quad (3)$$

con:

- $K(u)$ = funzione di densità kernel;
- x = punto dato attorno al quale viene stimato il trend;
- $x - x_i$ = posizione del punto i in relazione al punto x ;
- h = larghezza della banda della funzione di densità.

Viene affermato che il valore di larghezza della banda che produce i risultati migliori è $h = 3$. Osservata la notevole oscillazione di alcuni valori di velocità è stato necessario ricorrere ad una doppia operazione di smoothing (rispetto a quanto indicato dal Rakha anche il peso di ogni misurazione è stato ridotto da $0,75$ a $0,55$).

Il processo di smoothing dei dati si basa sulle equazioni 4, 5 e 6 in cui gli apici r ed s indicano rispettivamente il dato grezzo e quello trattato:

$$u_t^s = u_{t-1}^s + a_{t-1}^s \Delta t \quad (4)$$

$$a_t^s = 0,55^2 a_{t-1}^s + 0,55 a_t^{rII} + 0,55^2 a_{t+1}^r \quad (5)$$

Per migliorare l'accuratezza dello smoothing è stata effettuata, prima di questa operazione, la correzione dei valori di accelerazione secondo l'equazione 6:

$$a_t^{rI} = u_t^r - u_t^s \quad (6)$$

Nel caso a_t^{rI} sia esterno al campo delle accelerazioni realistiche per un tipico veicolo, viene considerato al suo posto il valore a_t^{rII} che, a parità di velocità, ricade sul confine del campo delle accelerazioni.

In questo modo, come si può constatare dalle figure 2.14a e 2.14.b, i valori di accelerazione ricadono entro i limiti fisici del veicolo, e il profilo di velocità smussa notevolmente i picchi nel caso di valori errati, mentre continua a mantenersi aderente ai dati grezzi quando questi assumono valori realistici. Le figure 2.15a e 2.15b mostrano, con degli esempi di profili di velocità e accelerazione, l'efficacia di tale operazione.

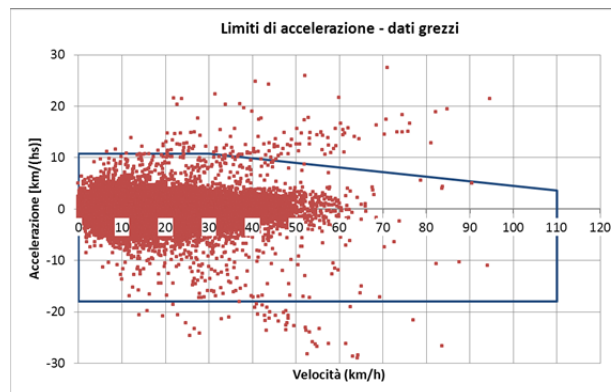


Figura 2.14a: Dati grezzi di accelerazione in funzione della velocità.

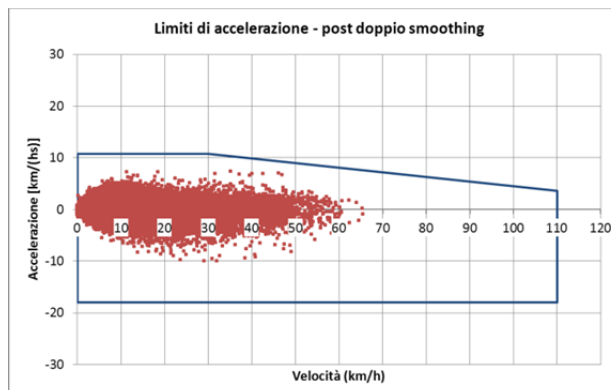


Figura 2.14b: Dati grezzi di accelerazione in funzione della velocità a seguito della doppia operazione di smoothing.

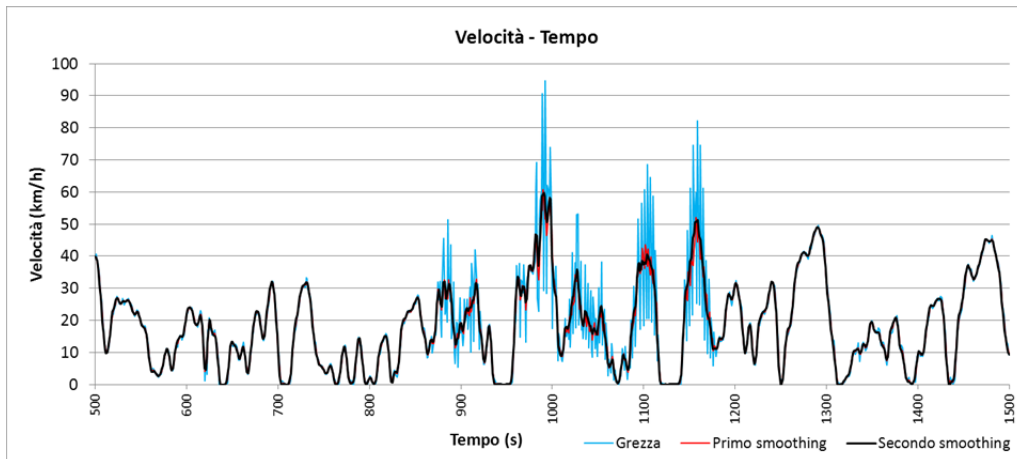


Figura 2.15a: Esempio di profilo di velocità in funzione del tempo pre e post smoothing.

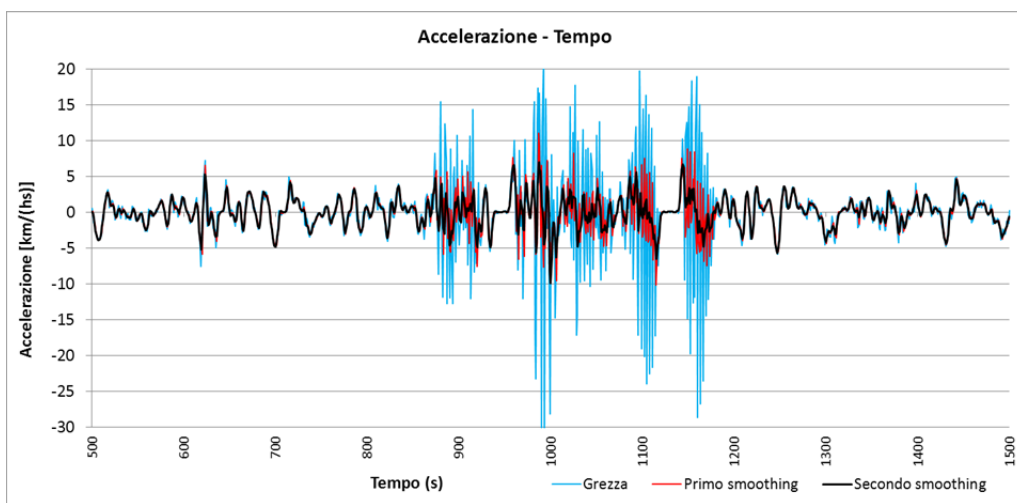


Figura 2.15b: Esempio di profilo di accelerazione in funzione del tempo pre e post smoothing.

La validità del processo di smoothing è confermata anche dall'eliminazione delle "ali" relative ai dati grezzi (confronto figure 2.12 e 2.16) e dall'incremento del valore di R^2 (da 0,92 a 0,95).

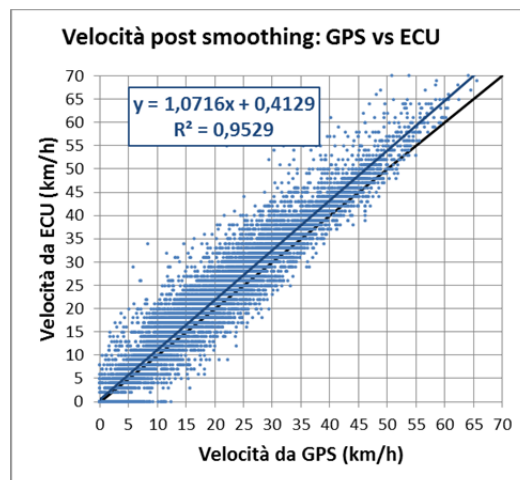


Figura 2.16: Confronto velocità istantanee date dal GPS e dall'ECU post smoothing.

L'affidabilità dei dati di emissione ricavati dall'analizzatore Semtech-DS è assicurata da test di laboratorio che la Regione Lombardia ha effettuato su una delle 20 Fiat Panda analoghe a quelle utilizzate. Le figure 2.17a 2.17b e 2.17c sono tratte dal report di quello studio (Jiménez & Niedzialek, 5th intermediate technical / scientific report: Collaborative research project for air pollution reduction in Lombardy Region (2006-2010), 2008) e comparano le emissioni misurate per lo stesso ciclo di guida (NEDC nel primo caso e "reale" nel secondo) dalla strumentazione portatile.

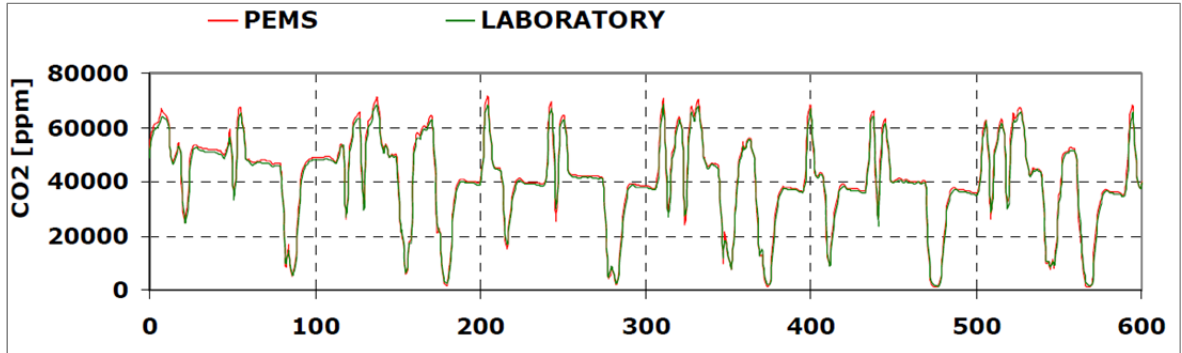


Figura 2.17a: Confronto tra le emissioni misurate con PEMS e con test di laboratorio per ciclo NEDC [Jiménez & Niedzialek, 2008].

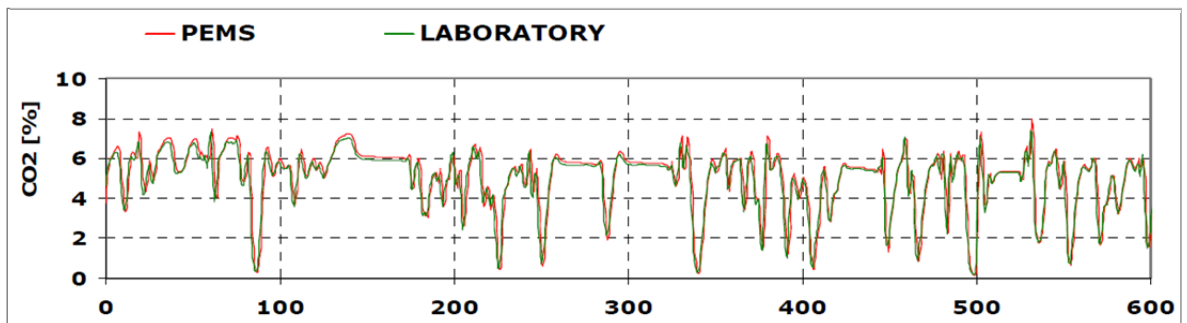


Figura 2.17b: Confronto tra le emissioni misurate con PEMS e con test di laboratorio per ciclo "reale": Milan City [Jiménez & Niedzialek, 2008].

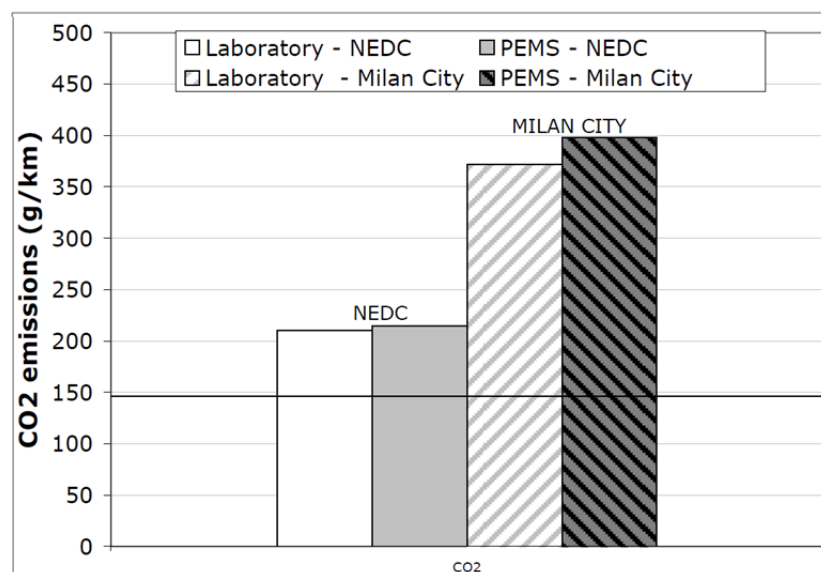


Figura 2.17c: Confronto tra le emissioni misurate con PEMS e con test di laboratorio per i cicli NEDC e Milan City [Jiménez & Niedzialek, 2008].

Si osserva che il PEMS (Portable Emissions Measurement System) produce gli stessi risultati dell'analisi di laboratorio effettuata con Horiba MEXA-7400HTR-LE nel caso di ciclo NEDC, mentre le sovrastima di quasi il 7% nel caso di ciclo "reale" riferito alla Città di Milano. La linea nera indica il valore di emissione dichiarato dalla Casa su ciclo NEDC. Complessivamente i due sistemi di misura si possono ritenere in buon accordo.

2.1.7 Trattamento dati di traffico da rilevamento video

Durante la visione delle riprese video non si sono osservate situazioni particolari (ad esempio incidenti, lavori in corso, veicoli in panne, chiusure momentanee al traffico, ecc.) tali da limitare o compromettere il funzionamento delle intersezioni per cause esterne a quelle del "normale" deflusso veicolare. Solamente in un caso, intorno alle 7:50 del secondo giorno di rilevazioni, si è osservata un'importante coda al semaforo pedonale del ramo Ovest in uscita dalla rotatoria tale da interessare l'anello della rotatoria. In questa situazione, inoltre, il comportamento dei veicoli ha impedito l'ingresso in rotatoria da entrambe le corsie del ramo Nord. Anche il veicolo sonda è stato condizionato negativamente da questo evento anomalo. Il tempo impiegato per attraversare la rotatoria in quest'occasione, infatti, è risultato il più elevato di tutti, superando di più del 20% il secondo valore massimo. Si è deciso di non considerare nell'analisi i dati relativi al passaggio appena descritto.

2.2 Analisi dei dati

Come indicato al paragrafo 1.2.3, osservando per tutti i *trip* i profili di velocità in funzione dello spazio si è potuto scegliere l'estensione dell'area di influenza come quella zona a cavallo dell'intersezione in cui si concentrano le decelerazioni e le successive accelerazioni. Con particolare attenzione al caso del semaforo si è constatato che la decelerazione che precede la fermata in caso di semaforo rosso comincia al più 150 m a monte della linea di arresto, mentre l'accelerazione per tornare alla velocità di crociera si conclude entro 50 m a valle della linea d'arresto. Verificato poi che l'area di 200 m così ripartita comprende abbondantemente, anche per la rotatoria, le decelerazioni e le accelerazioni dovute alla presenza dell'intersezione, si è proceduto a selezionare per ogni *trip* solo i dati relativi alle aree appena descritte. La frazione di *trip* così individuata prende il nome di *passaggio*. I dati disponibili sono quelli relativi al primo giorno di rilievo e a metà mattina (D1) del secondo giorno, per un totale di 113 *trip* completi (226 *passaggi*, ognuno identificato con un codice *ID* progressivo). Il periodo di analisi si riduce, pertanto, all'intervallo appena descritto. Il *passaggio* 159 è stato eliminato in seguito alla pulizia del dato, e inoltre sono stati cancellati i *passaggi* con ID 62 e 175 perché facenti parte di un *trip* che ricadeva al di fuori del periodo di analisi (ora di inizio: 16:27). Il dataset analizzato è pertanto composto da 223 *passaggi* ed un totale di 9852 record.

In figura 2.18 sono mostrati, per le due intersezioni, il numero di veicoli effettivamente serviti (considerando tutti gli approcci) ogni 30 minuti. Gli ultimi due intervalli in ascissa si riferiscono al secondo giorno di sperimentazione.

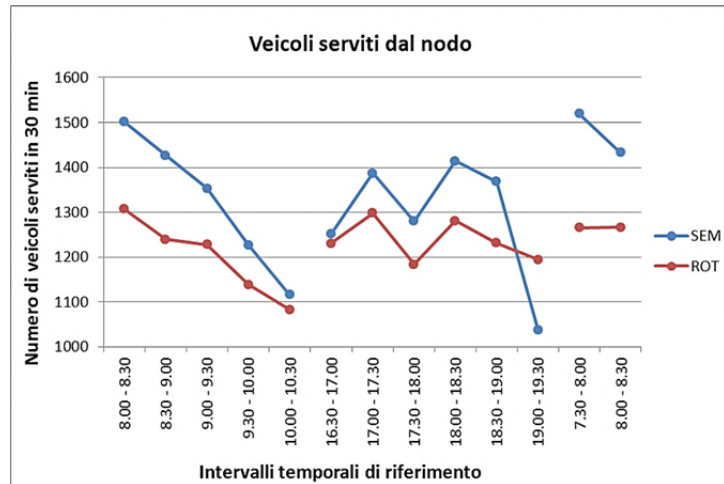


Figura 2.18: Numero totale di veicoli serviti dal nodo negli intervalli temporali di riferimento.

Si osserva che, per quanto l'andamento tra le due intersezioni sia qualitativamente simile, il numero di veicoli codificati alla rotatoria risulta minore; complessivamente la differenza è pari al 7,9% (17314 veicoli serviti dall'intersezione semaforizzata, 15934 dalla rotatoria).

Per ogni *passaggio* è stato ricavato il tempo di attraversamento dell'area di influenza (durata del *passaggio*). Dalla figura 2.19, in cui è riportata la distribuzione cumulata dei tempi di attraversamento, si distingue una differente distribuzione delle durate per le due intersezioni. Una rappresentazione più intuitiva è stata possibile aggregando i tempi in prefissati intervalli di 5 secondi (figura 2.20).

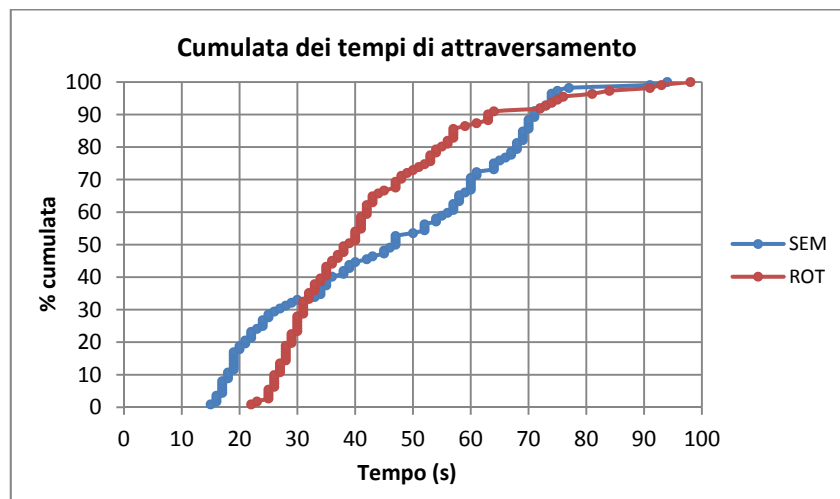


Figura 2.19: Distribuzione cumulata dei tempi di attraversamento per le due intersezioni studiate.

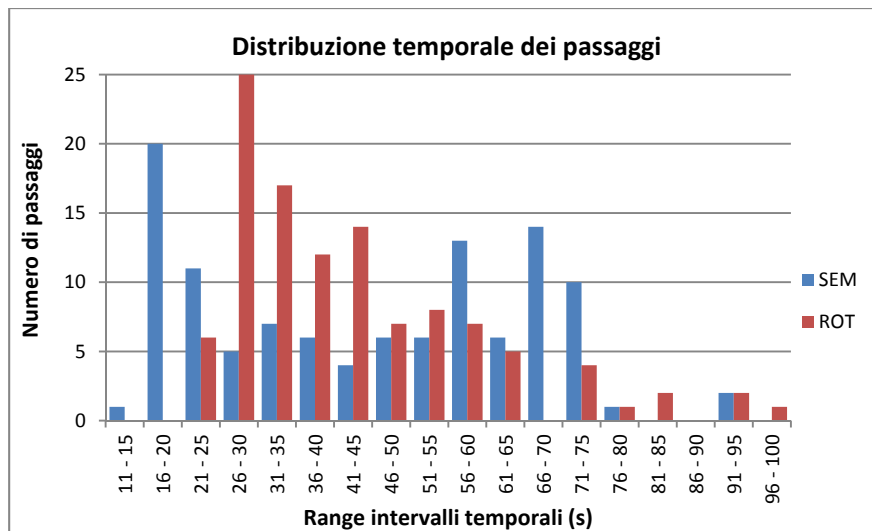


Figura 2.20: Rappresentazione tramite istogrammi dei tempi di attraversamento dell'intersezione aggregati a 5 secondi.

Si può affermare che:

- i tempi minori si osservano nel caso di controllo semaforizzato. Il regime di precedenza all'anello, infatti, costringe tutti i conducenti a rallentare in prossimità della rotatoria. Tale comportamento, invece, non si osserva nel caso di semaforo verde, anzi, in alcuni casi si riscontra il fenomeno opposto;
- i tempi maggiori invece, superiori a 80 s, si manifestano più spesso nel caso di intersezione a rotatoria;
- ciononostante, sia il tempo di attraversamento medio (45,6 s e 42,8 s rispettivamente per semaforo e rotatoria) sia quello mediano (rispettivamente 40 s e 36 s) risultano minori nel caso della rotatoria per effetto di una maggiore concentrazione dei tempi su valori bassi (più del 60% delle osservazioni ricadono tra 25 e 43 s). Con il semaforo invece si realizza una situazione differente, circa il 30% dei tempi osservati è inferiore o pari a 25 s, mentre un altro 36% si colloca tra 47 e 74 s.

2.2.1 Analisi preliminare

In una prima analisi si è indagato se effettivamente l'andamento delle emissioni di CO₂ sia analogo a quello del consumo di carburante.

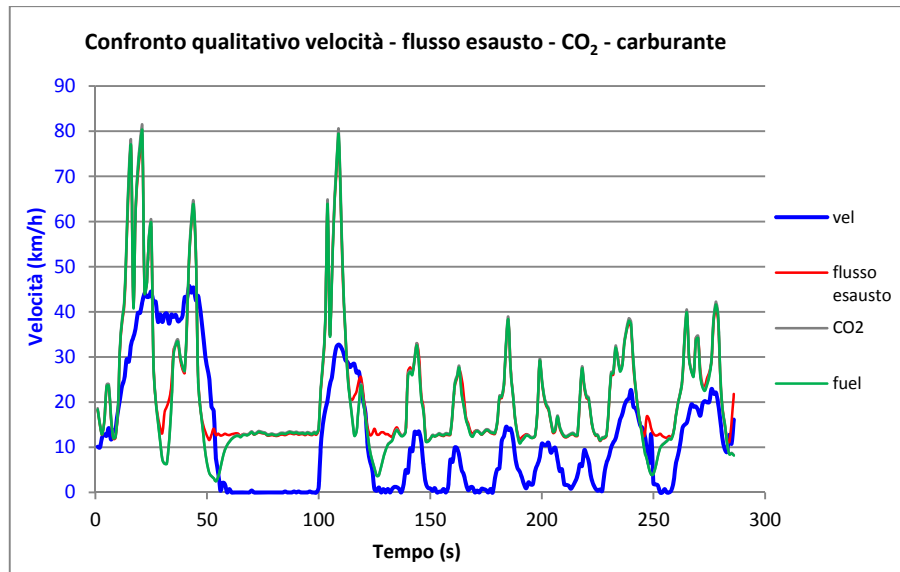


Figura 2.21: Rappresentazione grafica degli andamenti istantanei di velocità, flusso esausto, emissione di CO₂ e consumo di carburante.

Grazie alla figura 2.21, relativa ai valori del *trip* delle 7:45:59 del 2 aprile, si può osservare che qualitativamente l'emissione istantanea di CO₂ non solo rispetta pedissequamente il profilo del consumo di carburante, ma anche quello del flusso massico dei gas esausti. L'unica differenza è che mentre quest'ultimo non scende mai al di sotto di un determinato valore (circa 11,5 kg/h), i primi due presentano valori minimi inferiori. Questo è dovuto alla ridottissima quantità di carburante che viene immessa in camera di combustione nelle forti decelerazioni (si veda paragrafo 1.1.3).

I picchi di emissione di CO₂, inoltre, derivano sia da violente accelerazioni, sia da quelle più contenute ma con velocità iniziali superiori.

Si riportano ora i grafici rappresentativi dei 4 inquinanti (CO₂, CO, NO_x e HC), ovviamente separati per intersezione, ordinati per tempi di attraversamento crescenti. Il singolo valore rappresentato è il totale di quanto emesso nei 200 m del *passaggio* indicato in ascissa.

Viene inoltre riportato, con un tratto orizzontale nero, il valore di emissione limite per la norma Euro 4 rapportato su 200 m. Per l'anidride carbonica il segmento nero è riferito al valore di emissione dichiarato dalla Casa costruttrice.

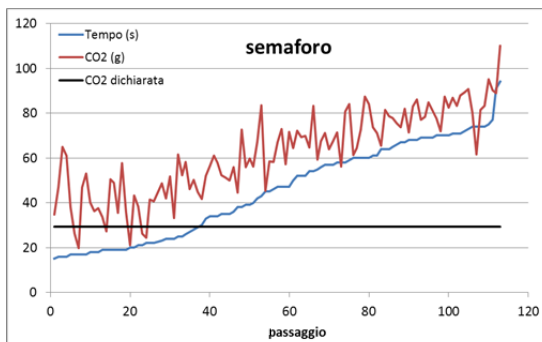


Figura 2.22a: Tempo impiegato e CO₂ emessa ad ogni passaggio all'intersezione semaforizzata.

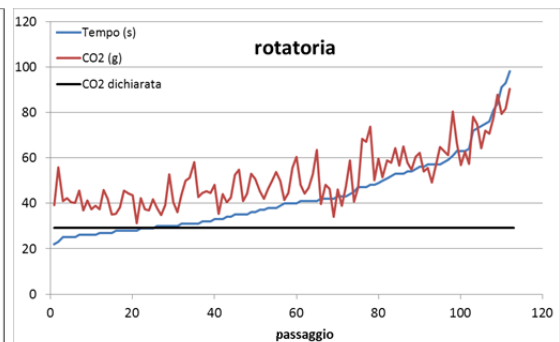


Figura 2.22b: Tempo impiegato e CO₂ emessa ad ogni passaggio alla rotatoria.

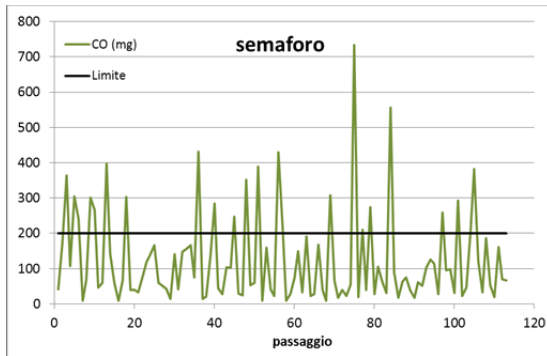


Figura 2.23a: CO emesso ad ogni passaggio all'intersezione semaforizzata.

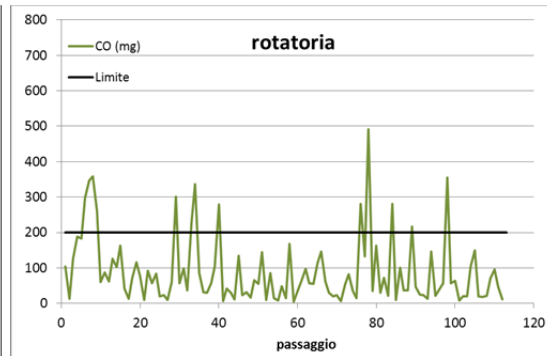


Figura 2.23b: CO emesso ad ogni passaggio alla rotatoria.

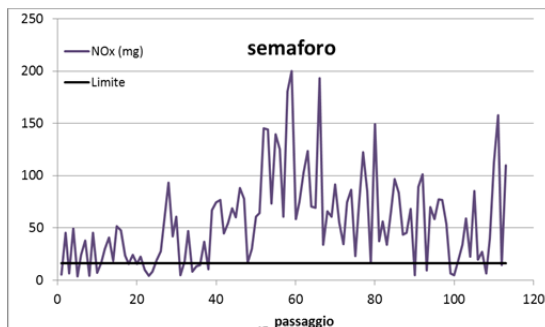


Figura 2.24a: NO_x emessi ad ogni passaggio all'intersezione semaforizzata.

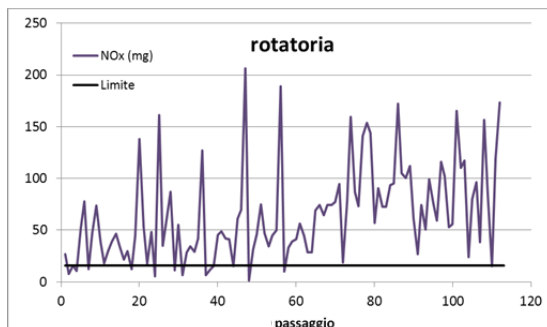


Figura 2.24b: NO_x emessi ad ogni passaggio alla rotatoria.

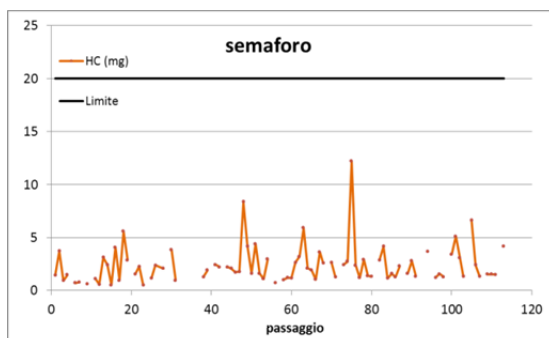


Figura 2.25a: HC emessi ad ogni passaggio all'intersezione semaforizzata.

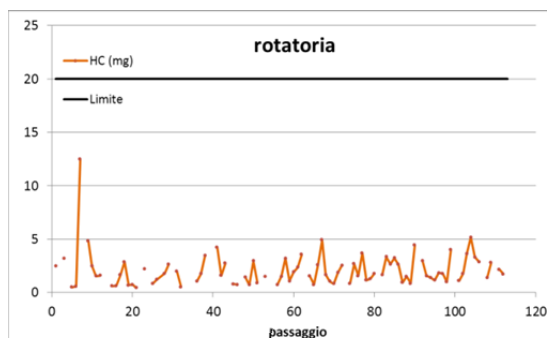


Figura 2.25b: HC emessi ad ogni passaggio alla rotatoria.

Trascurando gli idrocarburi incombusti (HC) in quanto i valori sono davvero molto bassi per poter essere confrontati, si discutono ora gli andamenti dei restanti inquinanti.

È immediato notare che, anche per tempi di attraversamento pressochè uguali, la quantità di inquinante emesso può subire grandi variazioni tra *passaggio* e *passaggio*. A parità di tempo, valori totali di emissione molto diversi tra loro non sono frutto di singoli dati istantanei particolarmente differenti, ma solo di pochi valori “di picco” che influiscono notevolmente sul totale emesso. Dall’osservazione diretta dei profili di emissione istantanea, però, non si è riusciti a trovare un legame tra questi picchi ed altre variabili, anche se molto spesso (ma non sempre) si realizzano durante o al termine di forti accelerazioni. Il rapporto tra il massimo valore di emissione istantanea (g/s o mg/s) e quello medio per tutte le osservazioni è pari a 7 per l’anidride carbonica (CO₂), mentre raggiunge i valori di 75 e 80 rispettivamente per il monossido di carbonio (CO) e per gli ossidi di azoto (NO_x). Rapporti simili sono confermati anche da Frey et al. (2003). La

ricerca della spiegazione fisica di tali valori, comunque, non è obiettivo del presente lavoro; ci si limita quindi a constatare la natura “episodica” delle emissioni.

È facile osservare, inoltre, che i totali superano spesso e notevolmente i limiti imposti dalla normativa Euro 4 (segmento nero). A tal proposito però è bene segnalare che, come riportato da vari Autori, il ciclo di guida reale è molto più inquinante di quello NEDC usato per l’omologazione. Tra questi Autori Jiménez e Niedzialek (2008) mostrano che il ciclo di guida medio osservato per la Città di Milano, quindi per un ambito strettamente urbano, è circa l’80% più inquinante del NEDC (figura 2.17c). M.V. Prati e M.A. Costagliola (2013), utilizzando lo stesso veicolo del caso studio, dimostrano che il ciclo “Artemis urban”, sviluppato nell’ambito del progetto europeo FP5, emette circa il 60% in più di CO₂, il quadruplo di CO e il doppio di NO_x, rispetto al ciclo di omologazione. Mock et al. (2013) evidenziano che nel 2011 la differenza media tra le emissioni di CO₂ dichiarate e quelle reali si attestava al 25%. Una ricerca della rivista Quattroruote (Viola, 2010), misurando le emissioni reali di CO₂ di 8 autovetture, il cui valore dichiarato dalle Case era per tutte inferiore a 100 g/km, ha riscontrato che, nel migliore dei casi, l’incremento è del 38%. Infine, si ricorda che l’attrezzatura per la misura delle emissioni impatta notevolmente sul peso totale del veicolo, aumentandone ovviamente le emissioni.

In questo studio ci si è concentrati sull’influenza del tipo di controllo dell’intersezione sulle emissioni del solo gas serra (CO₂), lasciando l’analisi degli altri inquinanti ad un successivo lavoro.

Il profilo dei totali di emissione, ordinati per tempi di attraversamento crescenti (figure 2.22a e 2.22b), mostra che, tendenzialmente, le emissioni di CO₂ sono proporzionali al tempo impiegato a percorrere l’area di influenza. La tabella 2.4 riporta, in sintesi, i valori dei tempi spesi e la quantità di CO₂ emessa per le due intersezioni.

	Numero passaggi	Tempo totale	Tempo medio a passaggio	CO ₂ totale emessa	CO ₂ a passaggio	CO ₂ specifica
Unità di misura	adim	s	s	g	g	g/s
Semaforo	112	5106	45,6	6975	62,27	1,366
Rotatoria	111	4746	42,8	5686	51,22	1,198
Variazione %*	-	-7,1	-6,2	-18,5	-17,7	-12,3

Tabella 2.4: Confronto sintetico tra intersezione semaforizzata e rotatoria basato su valori di tempo impiegato e CO₂ emessa.

* La variazione è calcolata con riferimento ai dati relativi al semaforo.

Si ricorda che, nel periodo di analisi, nel caso della rotatoria si è registrato un numero totale di veicoli serviti inferiore del 7,9% rispetto all’intersezione semaforica. Anche la riduzione del tempo totale e di quello medio per ogni passaggio si attesta su valori pressoché analoghi, mentre si osserva una maggiore riduzione delle emissioni di CO₂.

2.2.2 Prima ipotesi di confronto

L’obiettivo dello studio è quello di confrontare le emissioni in corrispondenza dei due differenti tipi di controllo in condizioni di traffico veicolare paragonabile. Si è supposto, ragionevolmente,

che le emissioni dipendano, in prima approssimazione, dal tempo impiegato ad attraversare l'intersezione e che, quest'ultimo, dipenda a sua volta dal flusso potenziale entrante e, da quello di conflitto nel caso della rotatoria, dal rapporto tra il tempo di rosso e la durata del ciclo nel caso di intersezione semaforizzata. Per indagare in maniera accurata le condizioni di deflusso riscontrate dal veicolo sonda si è scelta, in prima ipotesi, l'ampiezza dell'intervallo temporale di riferimento pari a 1 minuto.

Il primo problema affrontato è stato quello di rendere paragonabili il tempo di rosso, misurato all'interno di ogni minuto, con il flusso di conflitto alla rotatoria. La ricerca bibliografica non ha fornito alcun tipo di risposta a tale problema; la percentuale di rosso all'interno del generico minuto i (R_i) è stata trasformata in un flusso di conflitto equivalente ($Q_{confl_i}^e$) sfruttando la media degli *headways* (\bar{h}) rifiutati alla rotatoria (equazione 7). Il concetto alla base di questa trasformazione è che il veicolo che sopraggiunge al semaforo con luce rossa accesa è costretto ad arrestarsi, proprio come quello che, in entrata alla rotatoria, non ritiene accettabili i diversi *headways* (h) che si presentano tra i veicoli che circolano nell'anello.

$$Q_{confl_i}^e = \frac{1}{\bar{h}} R_i \quad (7)$$

Il calcolo di \bar{h} è stato eseguito considerando solo serie di almeno tre *headways* consecutivi rifiutati e scartando il primo in quanto tendenzialmente maggiore degli altri.

Le riprese video hanno permesso di contare il numero di veicoli in coda all'inizio (nvc_i^i) e alla fine (nvc_i^f) dell'*i*esimo minuto, così da rendere possibile anche la valutazione della domanda potenziale entrante (Q_{pot}^{entr}):

$$Q_{pot}^{entr} = nvc_i^f + vs_i - nvc_i^i \quad (8)$$

con vs_i : veicoli serviti nell'*i*esimo minuto.

Inserendo in un piano cartesiano i valori della domanda potenziale entrante (in ordinata) e del flusso di conflitto (in ascissa), si è potuta notare una differenza abbastanza netta tra la distribuzione dei punti (rappresentativi di ogni minuto) per il semaforo e per a rotatoria. L'utilizzo delle attuali tecniche di *clustering*, pertanto, non ha portato alla definizione di "nuvole di punti" sovrapponibili per le due intersezioni. Si è quindi condotta la stessa analisi portando a 5 minuti l'ampiezza dell'intervallo temporale di riferimento, ma anche in questo caso il confronto non è stato possibile in quanto il flusso di conflitto equivalente per il semaforo risulta decisamente superiore a quello reale della rotatoria.

Da questa prima ipotesi si è concluso che il tempo necessario al veicolo sonda, e quindi il suo profilo di velocità e di emissione, per attraversare la zona di influenza è strettamente legato alle particolari condizioni istantanee incontrate in approccio al nodo. Tali condizioni possono essere, per il semaforo, il "via libera" (verde) oppure l'obbligo di stop (rosso) e in quest'ultimo caso il tempo di attesa prima del verde; per la rotatoria, invece, le particolari condizioni possono essere la lunghezza della coda in ingresso e la distribuzione dei singoli *headways* nell'anello (anche a parità di flusso di conflitto) quando il veicolo sonda si trova in testa alla coda. Da un lato, quindi, la riduzione dell'intervallo temporale anche sotto il minuto rende più accurata la valutazione degli

headways (incrementando però notevolmente i tempi di elaborazione), ma dall'altro riduce i valori dei flussi a pochissime unità rendendo il confronto per nulla significativo.

Si è quindi deciso di abbandonare questa strada.

2.2.3 Seconda ipotesi di confronto

La seconda strada percorsa è stata quella di considerare come unica variabile il tempo di attraversamento dell'area di influenza, risolvendo così i problemi di valutazione dei vari flussi e del numero di veicoli in coda, in quanto, questi ultimi, influenzano direttamente il valore della variabile considerata. In ambito urbano, inoltre, il tempo è anche la variabile più significativa nella scelta del percorso.

Con l'utilizzo del software statistico RapidMiner 5 è stato possibile raggruppare le varie osservazioni con le tecniche di *clustering*. Si è ottenuta una ripartizione ottimale (cioè con il miglior compromesso tra il numero di *clusters* e la varianza totale intra *cluster*, grazie all'implementazione del *k-means*) in 5 intervalli temporali. I risultati sono riportati in tabella 2.5 e in figura 2.26.

Nodo	Cluster	Range (s)	Nr pass	Emissione media	Dev St	Variac %
1	1	15 - 30	37	42,19	11,45	-
1	2	31 - 45	17	57,70	9,71	-
1	3	46 - 61	27	69,90	8,46	-
1	4	62 - 81	29	80,91	7,43	-
1	5	82 - 98	2	99,54	14,99	-
2	1	15 - 30	31	40,53	5,07	-3,9
2	2	31 - 45	43	47,26	6,44	-18,1
2	3	46 - 61	23	59,89	7,90	-14,3
2	4	62 - 81	10	68,05	7,75	-15,9
2	5	82 - 98	4	84,79	5,16	-14,8

Tabella 2.5: Valori di emissione per i due nodi divisi per *cluster*.

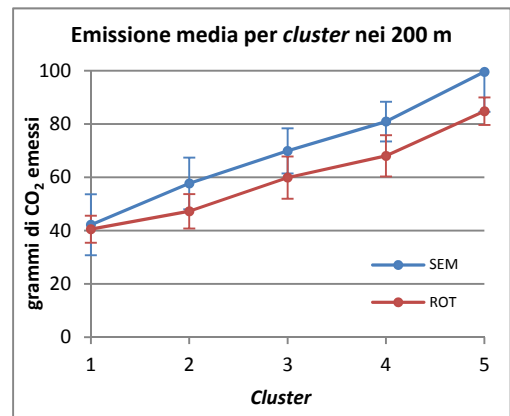


Figura 2.26: Rappresentazione grafica dei valori di emissione.

È immediato constatare che anche nei singoli intervalli temporali si può osservare il benefico effetto della rotatoria.

Considerato l'andamento pressoché lineare delle emissioni in funzione del tempo si è deciso di impostare un'analisi di regressione per valutare se esiste una differenza statisticamente significativa tra le emissioni nelle due intersezioni, prescindendo dagli intervalli di aggregazione scelti. I risultati, ottenuti con l'ausilio del software statistico R, sono di seguito riportati.

L'analisi statistica condotta su 223 campioni (*passaggi*) (112 per il semaforo e 111 per la rotatoria) ha analizzato la relazione esistente tra l'emissione totale di CO₂, il tipo di intersezione e la durata del singolo *passaggio*, secondo il modello lineare (modello con interazione):

$$CO_2 = \beta_1 + \beta_2 \text{SECONDI} + \beta_3 \text{INTERS} + \beta_4 \text{SECONDI} \cdot \text{INTERS} \quad (9)$$

Con:

- CO₂: emissione totale di CO₂ per *passaggio*;
- SECONDI: durata del *passaggio* (tempo di attraversamento);
- INTERS: tipo di controllo dell'intersezione (0: semaforo, 1: rotatoria);
- SECONDI · INTERS: interazione delle due variabili.

```
Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI * INTERS, data = dat_2)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-22.8349  -4.4460  -0.6243   4.6609  25.8507

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   26.52960    1.80954   14.661 <2e-16 ***
SECONDI        0.78404    0.03605   21.746 <2e-16 ***
INTERS        -3.42910    2.78585   -1.231  0.2197
SECONDI:INTERS -0.12635    0.05863   -2.155  0.0323 *
---
Signif. codes:
  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.009 on 219 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7811,    Adjusted R-squared:  0.7781
F-statistic: 260.5 on 3 and 219 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 2.27: Stima dei parametri del modello con interazione.

Dall'analisi statistica condotta (figura 2.27) risulta che il modello è globalmente significativo ($F(3,219)=260.5$, $p<0.001$) e adeguatamente specificato, secondo quanto riportato dai coefficienti R^2 e R^2_{adj} . Per quanto riguarda i coefficienti della regressione, risultano essere tutti significativamente diversi da zero, ad eccezione del coefficiente della variabile INTERS ($t=-1.231$, $p>0.05$).

L'analisi dei residui (condotta per via grafica o attraverso opportuni test di specificazione) permette di verificare la validità del modello, per il quale i residui (scarto tra i valori osservati e quelli modellati) devono:

- avere media nulla;
- avere distribuzione normale;
- avere varianza costante (omoschedasticità);
- essere a due a due indipendenti.

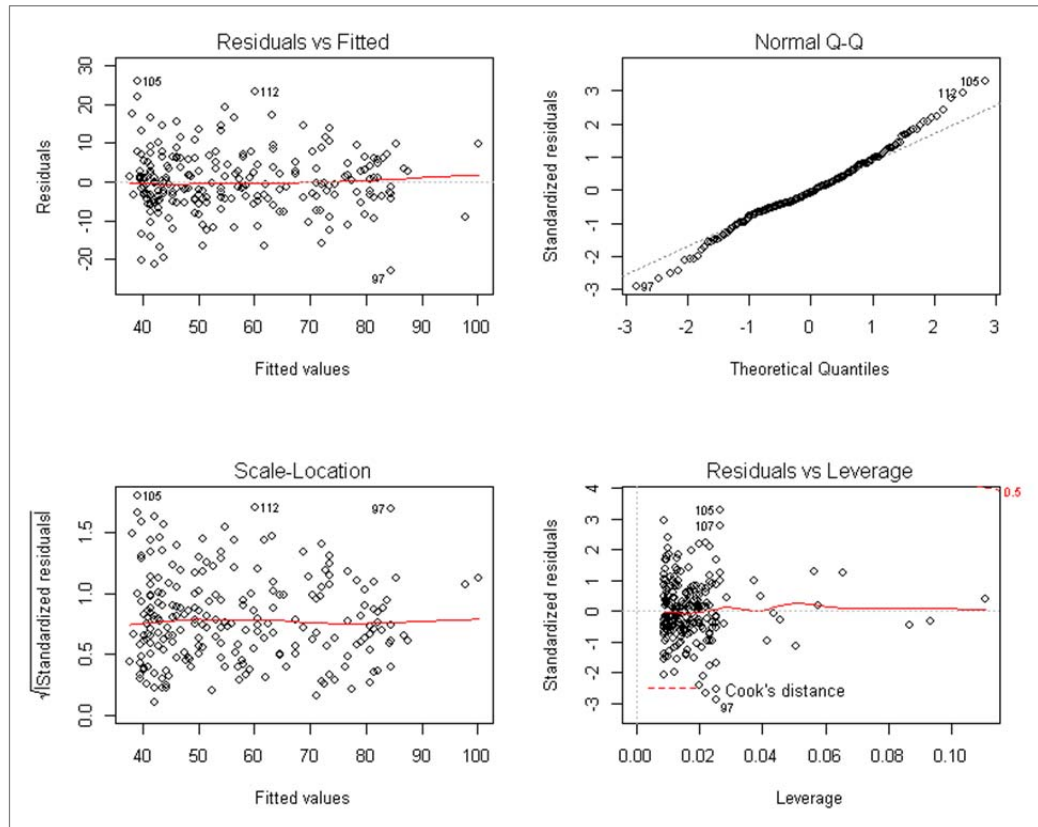


Figura 2.28: Analisi grafica dei residui disponibile automaticamente in R.

Per il modello di regressione calibrato (figura 2.28) si osserva che risultano violate le ipotesi di normalità (test di Shapiro-Wilk ($W=0.986$, $p<0.05$)) e di omoschedasticità dei residui (test di Breusch-Pagan (BP=16.399, $p<0.01$)). In particolare la condizione di eteroschedasticità sembra inficiare maggiormente la validità del modello, tuttavia nel caso studio questo sembra essere dovuto alla non omogenea distribuzione dei dati rispetto al tempo (specie per la rotatoria). In tal senso una maggiore numerosità del campione, specie per tempi di passaggio più elevati, potrebbe essere sufficiente per mantenere costante la varianza tra i residui.

Per meglio valutare l'effetto della tipologia di intersezione sull'emissione totale di CO_2 (variabile INTERS) è stato calibrato un modello di tipo additivo, che presenta la seguente forma funzionale:

$$CO_2 = \beta_1 + \beta_2 \text{SECONDI} + \beta_3 \text{INTERS} \quad (10)$$

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI + INTERS, data = dat_2)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-22.362  -4.637  -0.302   5.212  24.437

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  28.70756    1.51334  18.970 < 2e-16 ***
SECONDI      0.73627    0.02867  25.684 < 2e-16 ***
INTERSE     -8.96670    1.08453  -8.268 1.29e-14 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.075 on 220 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7764,    Adjusted R-squared:  0.7744
F-statistic: 382 on 2 and 220 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 2.29: Stima dei parametri del modello additivo.

La significatività del modello (figura 2.29) è analoga a quella del modello con interazione, e tutti i coefficienti (β_1 , β_2 e β_3) risultano ampiamente significativi.

Per quanto riguarda l'analisi dei residui, anche in questo caso non è rispettato il solo requisito di omoschedasticità (BP=12.389 $p < 0.01$), per il quale vale quanto detto in precedenza.

Confrontando i risultati ottenuti con i due modelli (additivo e con interazione), sembra essere chiaro che la tipologia di intersezione (variabile INTERS) ha un effetto sull'emissione totale di CO₂ non trascurabile, per quanto non sempre univoco (es. significatività dell'interazione SECONDI · INTERS e non della variabile INTERS). Sulla base di queste considerazioni, si è deciso di considerare due modelli di regressione distinti per il semaforo e per la rotatoria, ottenibili dal modello con interazione imponendo rispettivamente INTERS=0 e INTERS=1)

Modello semaforo (INTERSE=0):

$$\text{CO}_2 = \beta_1 + \beta_2 \text{SECONDI} \quad (11)$$

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI, data = dat_2, subset = INTERS ==
    0)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-22.8349  -4.4035  -0.6117   6.0115  25.8507

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  26.52960    2.06912  12.82 <2e-16 ***
SECONDI      0.78404    0.04123  19.02 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 9.158 on 110 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7668,    Adjusted R-squared:  0.7647
F-statistic: 361.7 on 1 and 110 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 2.30: Stima dei parametri del modello semaforo.

Modello rotatoria (INTERS=1):

$$CO_2 = \beta_1 + (\beta_2 + \beta_4) \text{SECONDI} + \beta_3 \text{INTERS} \quad (12)$$

```
Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI, data = dat_2, subset = INTERS ==
  1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-16.6287  -4.5291  -0.7191   3.4402  19.1581

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  23.1005     1.7591   13.13  <2e-16 ***
SECONDI       0.6577     0.0384   17.13  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.651 on 109 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7291,    Adjusted R-squared:  0.7266
F-statistic: 293.3 on 1 and 109 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 2.31: Stima dei parametri del modello rotatoria.

I coefficienti (ampiamente significativi in entrambi i casi) risultano uguali a quelli ottenuti stimando il modello con interazione; in figura 2.32 sono rappresentate le rette di regressione risultanti per le due intersezioni.

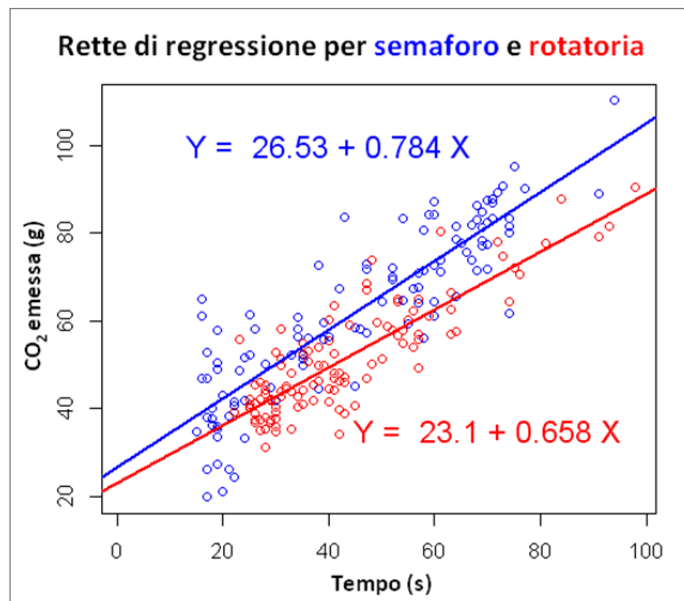


Figura 2.32: Rappresentazione grafica dei totali di emissione di CO₂ in funzione del tempo e delle rette di regressione per le due intersezioni.

Sulla base dell'analisi statistica condotta si può concludere che la retta di regressione relativa alla rotatoria ha intercetta e pendenza inferiori rispetto alla retta relativa al semaforo. **Operativamente la rotatoria è dunque caratterizzata, a parità di durata del *passaggio*, da emissioni di CO₂ inferiori a quelle del semaforo, che, all'aumentare della durata, si riducono progressivamente.**

I risultati ottenuti con questa seconda ipotesi sono di più facile interpretazione rispetto a quelli dell'ipotesi precedente, nel seguito si è quindi seguita questa strada.

2.2.4 Sviluppo seconda ipotesi

Per rendere ancora più significativi i risultati ottenuti l'analisi descritta al paragrafo 2.2.3 è stata effettuata comprendendo solo quei passaggi che ricadono in intervalli di 30 minuti, nei quali i numeri dei veicoli totali serviti alle due intersezioni sono tra loro paragonabili. Osservando i valori di figura 2.18, si sono scelti due *range* di flusso per i quali effettuare il confronto:

- *range* 1: tra 1200 e 1250 veicoli serviti ai nodi (flusso di 2400-2500 veic/h);
- *range* 2: tra 1250 e 1300 veicoli serviti ai nodi (flusso di 2500-2600 veic/h).

La tabella 2.6 riporta, per ogni *range* e per la loro unione, il numero di passaggi del veicolo sonda alle due intersezioni. La seguente analisi è basata su quanto emesso in questi passaggi.

Range	Veicoli serviti	Nr <i>passaggi</i>	
		SEM	ROT
1	1200 ÷ 1250	10	35
2	1250 ÷ 1300	21	36
Tot	1200 ÷ 1300	31	71

Tabella 2.6: Numero di *passaggi* del veicolo sonda per ognuno dei due *range*.

L'analisi statistica, condotta su 45 *passaggi* (10 al semaforo e 35 alla rotatoria) compresi nel *range* 1, è stata effettuata calibrando il modello lineare con interazione (equazione 9).

```
Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI * INTERS, data = MEZZORA1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-13.7055  -5.3476  -0.1125   4.9694  16.3333

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    18.3881     6.5300   2.816  0.00744 **
SECONDI         0.8923     0.1412   6.321 1.51e-07 ***
INTER          6.0076     7.5638   0.794  0.43162
SECONDI:INTER  -0.2363     0.1641  -1.440  0.15752
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.154 on 41 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7159,    Adjusted R-squared:  0.6951
F-statistic: 34.43 on 3 and 41 DF,  p-value: 2.784e-11
```

Figura 2.33: Stima dei parametri del modello con interazione per i *passaggi* appartenenti al *range* 1.

Dall'analisi (figura 2.33) risulta che, nei casi in cui il numero di veicoli serviti al nodo in 30 minuti è compreso tra 1200 e 1250, l'effetto della tipologia di intersezione (variabile INTERS) non è significativo ($t=0.794$, $p>0.05$), nemmeno nell'interazione con la variabile SECONDI ($t=-1.440$, $p>0.05$).

A conclusioni analoghe (figura 2.34) si può pervenire dalla calibrazione del modello additivo (equazione 10) ($t=-1.363$, $p>0.05$).

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI + INTERS, data = MEZZORA1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-18.1638  -5.5913  -0.8777   4.8225  17.5338

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  25.81867    4.05155   6.373 1.16e-07 ***
SECONDI      0.71742    0.07289   9.842 1.80e-12 ***
INTERS      -4.03616    2.96082  -1.363   0.18
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.257 on 42 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7015,    Adjusted R-squared:  0.6873
F-statistic: 49.35 on 2 and 42 DF,  p-value: 9.415e-12

```

Figura 2.34: Stima dei parametri del modello additivo per i *passaggi* appartenenti al range 1.

Si è pertanto calibrato un modello che tenga conto del solo effetto della durata dei *passaggi* (variabile SECONDI), avente forma funzionale:

$$CO_2 = \beta_1 + \beta_2 \text{ SECONDI} \quad (13)$$

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI, data = MEZZORA1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-15.027  -5.294  -1.418   4.239  16.635

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  22.68389    3.36883   6.733 3.13e-08 ***
SECONDI      0.71732    0.07361   9.744 1.88e-12 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.339 on 43 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6883,    Adjusted R-squared:  0.681
F-statistic: 94.95 on 1 and 43 DF,  p-value: 1.884e-12

```

Figura 2.35: Stima dei parametri del modello base che non considera l'effetto della tipologia di intersezione (*passaggi* appartenenti al range 1).

Dall'analisi statistica condotta (figura 2.35) risulta che il modello è globalmente significativo ($F(1,43)=94.95$, $p<0.001$) e sufficientemente specificato (coefficienti R^2 e R^2_{adj} pari rispettivamente a 0.688 e 0.681). I coefficienti β_1 e β_2 risultano ampiamente significativi.

Per quanto riguarda la diagnostica del modello di regressione calibrato, tutte le ipotesi sui residui risultano verificate dai test statistici (figura 2.36); in particolare è possibile osservare (figura 2.37) che i dati sono ben distribuiti nel dominio delle durate (non a caso anche l'ipotesi di omoschedasticità è verificata, a conferma di quanto precedentemente presunto).

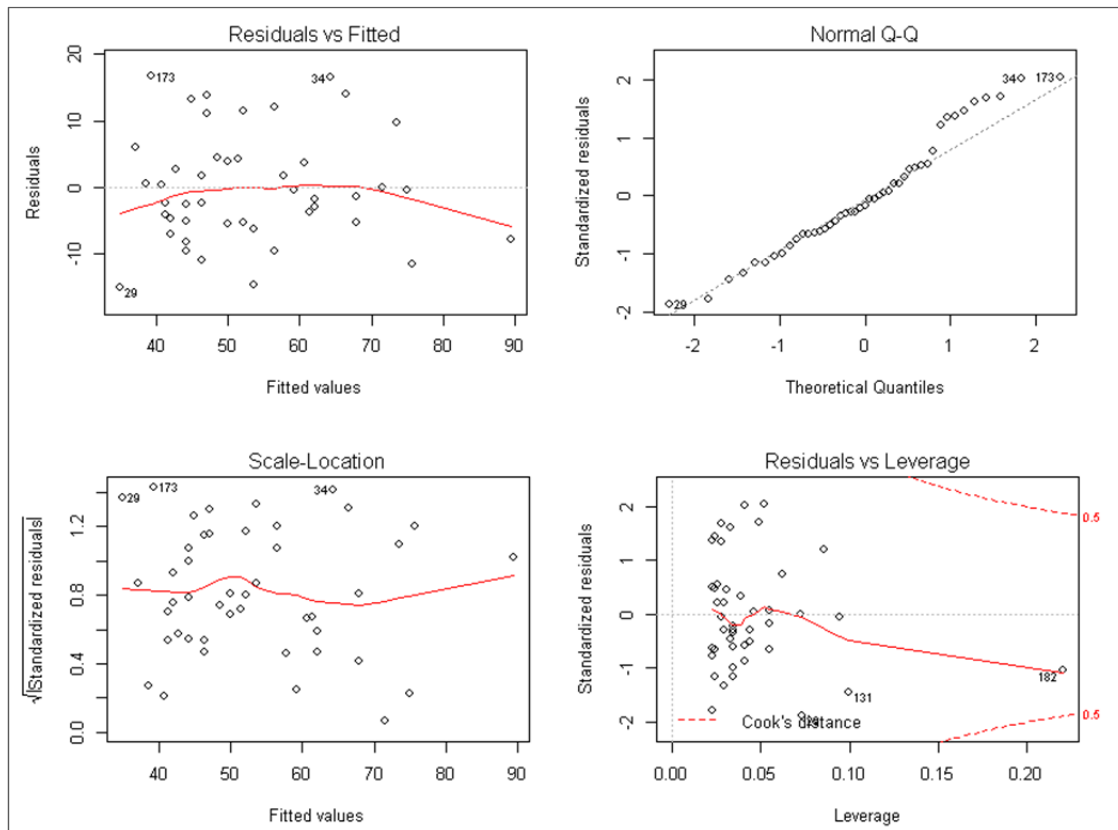


Figura 2.36: Analisi grafica dei residui per il campione relativo ai *passaggi* compresi nel *range 1*.

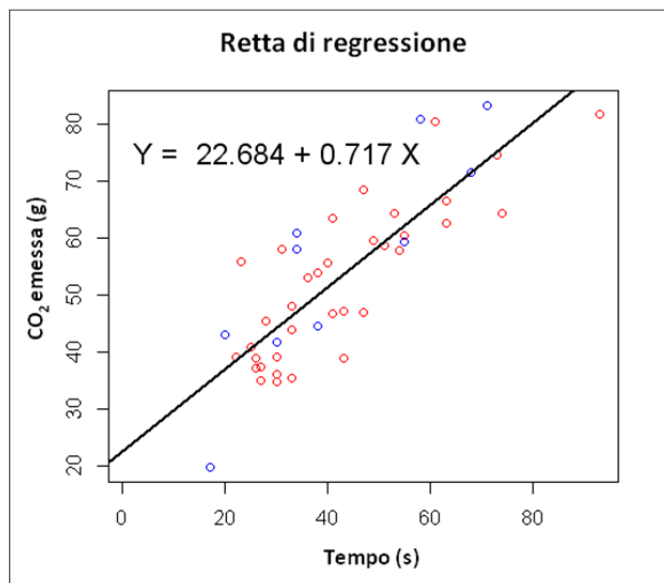


Figura 2.37: Unica retta di regressione per il *range 1*.

Sulla base dell'analisi statistica si può concludere che, per i *passaggi* compresi nel *range 1*, non vi è nessuna differenza statisticamente significativa tra le rette di regressione delle due intersezioni. Non si può, pertanto, concludere che il tipo di controllo influenzi le emissioni totali di CO₂.

Per il *range 2* l'analisi statistica è stata condotta su 57 *passaggi* (21 al semaforo e 36 alla rotatoria) calibrando il modello lineare con interazione (equazione 9).

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI * INTERS, data = MEZZORA2)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-16.182  -3.516  -0.156   3.237  13.693

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  22.66704    3.41577   6.636 1.74e-08 ***
SECONDI      0.84150    0.06443  13.061 < 2e-16 ***
INTERS      -0.45508    4.41870  -0.103  0.9184
SECONDI:INTERS -0.17329    0.08860  -1.956  0.0557 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.463 on 53 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8659,    Adjusted R-squared:  0.8583
F-statistic: 114 on 3 and 53 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 2.38: Stima dei parametri del modello con interazione per i *passaggi* appartenenti al *range 2*.

Dall'analisi (figura 2.38) risulta che, nei casi in cui il numero di veicoli serviti al nodo in 30 minuti è compreso tra 1250 e 1300, l'effetto della tipologia di intersezione (variabile INTERS) non è significativo ($t=-0.103$, $p>0.05$), e non lo è neanche nell'interazione SECONDI · INTERS ($t=-1.956$, $p>0.05$), anche se in quest'ultimo caso si avvicina molto al livello di confidenza.

Per meglio valutare l'effetto sulle emissioni della tipologia di intersezione sono stati stimati i parametri del modello additivo (equazione 10).

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI + INTERS, data = MEZZORA2)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-16.6102  -3.8705  -0.0689   3.4632  12.5636

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  27.09227    2.62520  10.320 2.22e-14 ***
SECONDI      0.74985    0.04537  16.529 < 2e-16 ***
INTERS      -8.35477    1.83894  -4.543 3.15e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.63 on 54 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8562,    Adjusted R-squared:  0.8509
F-statistic: 160.7 on 2 and 54 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 2.39: Stima dei parametri del modello additivo per i *passaggi* appartenenti al *range 2*.

Dall'analisi (figura 2.39) risulta che il modello è globalmente molto significativo ($F(2,54)=160.7$, $p<0.001$) e ben specificato (coefficienti R^2 e R^2_{adj} pari rispettivamente a 0.856 e 0.851). I coefficienti β_1 , β_2 e β_3 risultano ampiamente significativi.

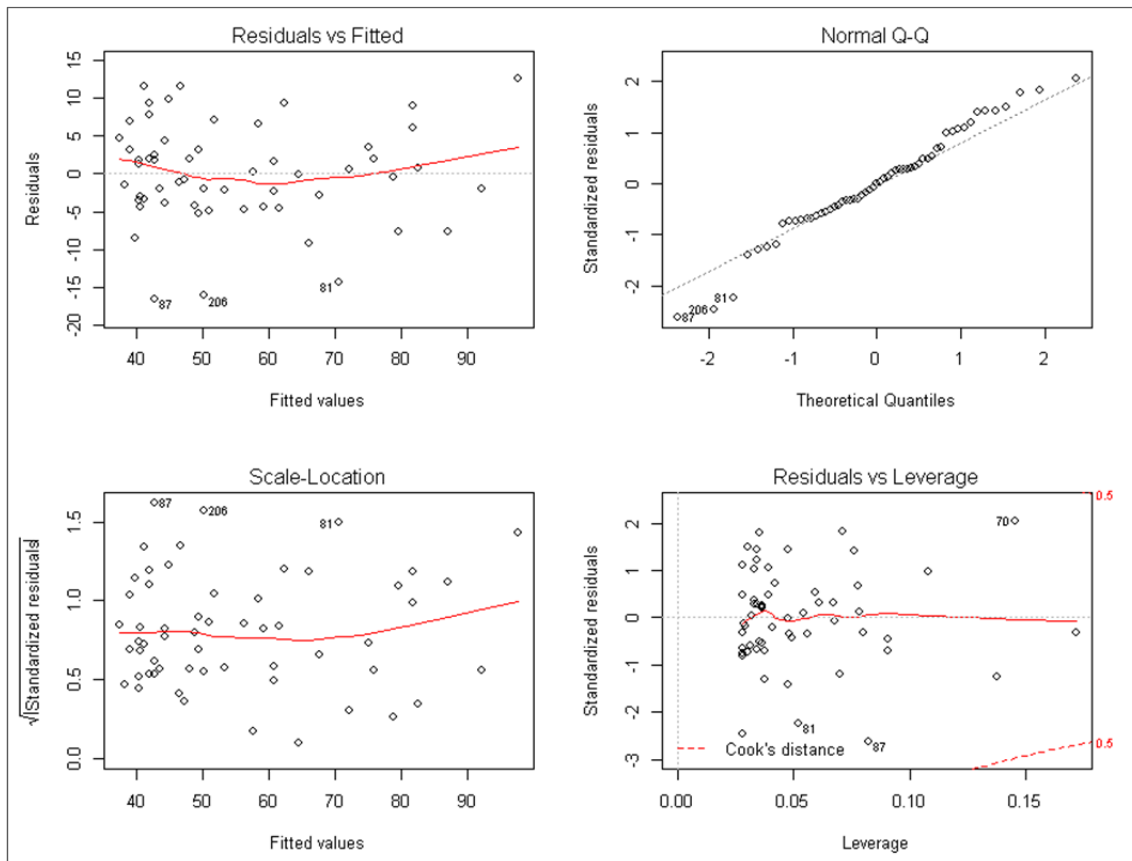


Figura 2.40: Analisi grafica dei residui per il campione relativo ai *passaggi* compresi nel range 2.

Anche in questo caso (figura 2.40) tutte le ipotesi sui residui risultano verificate dai test statistici.

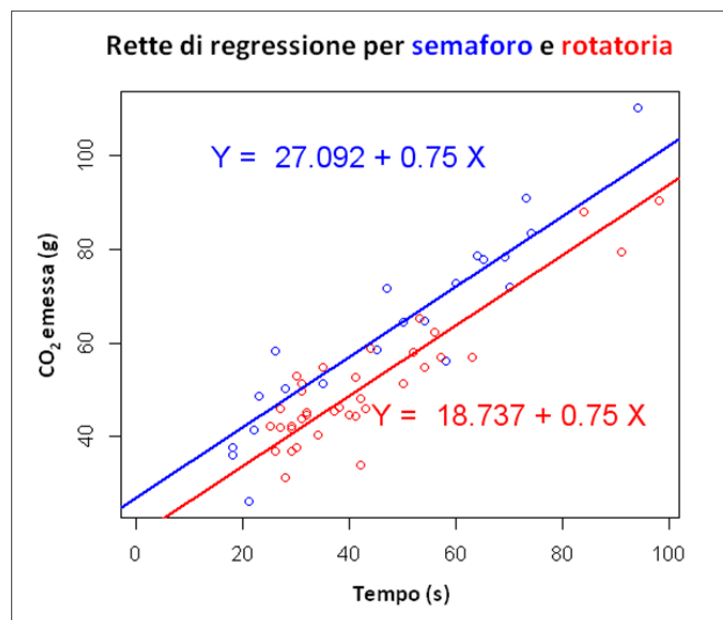


Figura 2.41: Rette di regressione per il range 2 (modello additivo).

L'analisi statistica effettuata porta a concludere che la retta di regressione relativa alla rotatoria, pur avendo la stessa pendenza di quella relativa al semaforo, ha intercetta inferiore. Risulta, quindi, che prescindendo dalla durata del *passaggio*, la rotatoria presenta emissioni inferiori rispetto al controllo semaforico.

Poiché il numero di passaggi inclusi nei due *range* scelti è piuttosto limitato (tabella 2.6), è stata condotta un'ulteriore analisi aggregando le osservazioni di entrambi i *range*, quindi per totali di veicoli serviti ai nodi in 30 minuti compresi tra 1200 e 1300 unità. Ne risultano 31 passaggi al semaforo e 71 alla rotatoria.

```
Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI * INTERS, data = MEZZORA1e2)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-17.005  -4.448   0.021   4.797  17.306

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  21.12237    3.12424   6.761 9.97e-10 ***
SECONDI      0.86003    0.06134  14.021 < 2e-16 ***
INTERIS      2.14810    3.86612   0.556  0.580
SECONDI:INTERIS -0.19742  0.07892  -2.502  0.014 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.16 on 98 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8083,    Adjusted R-squared:  0.8025
F-statistic: 137.8 on 3 and 98 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 2.42: Stima dei parametri del modello con interazione per i *passaggi* appartenenti ai *range* 1 e 2.

L'analisi prodotta (figura 2.42) calibrando il modello con interazione (equazione 9) manifesta una generale significatività ($F(3,98)=137.8$, $p<0.001$) e un'adeguata specificazione, secondo quanto riportato dai coefficienti R^2 e R^2_{adj} . Come nel caso dell'intero campione, tutti i coefficienti della regressione risultano essere significativamente diversi da zero, ad eccezione di quello della variabile INTERS ($t=0.556$, $p>0.05$).

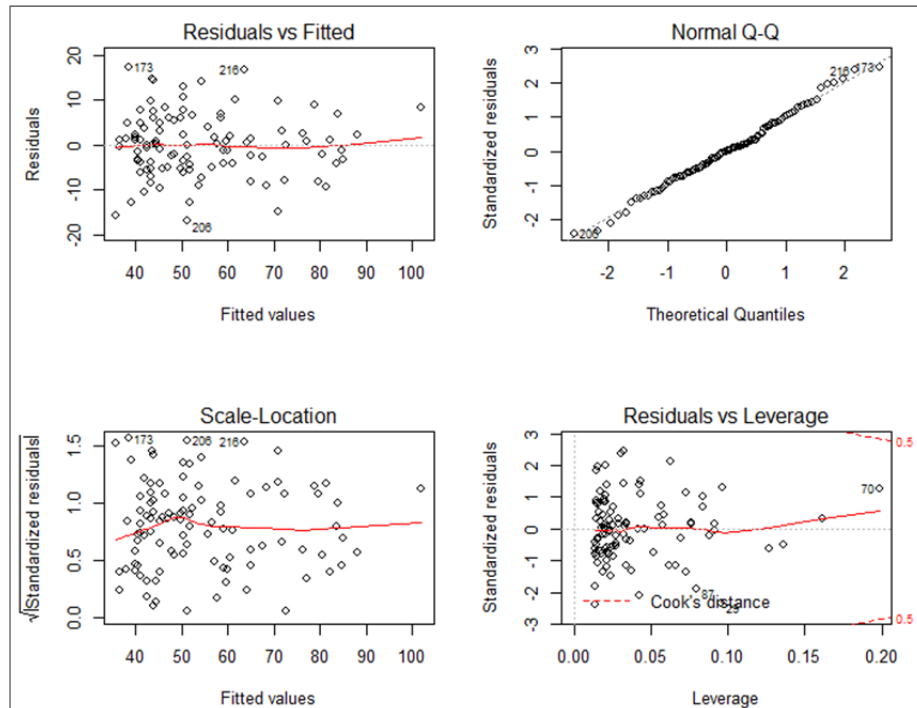


Figura 2.43: Analisi grafica dei residui per il campione relativo ai *passaggi* compresi nei *range* 1 e 2.

I test sui residui (figura 2.43) dimostrano la validità delle 4 ipotesi. Anche in questo caso si è indagato l'effetto del tipo di controllo dell'intersezione stimando i parametri del modello additivo (equazione 10).

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI + INTERS, data = MEZZORA1e2)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-19.4005  -4.9158  -0.1701   4.6967  18.8344

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 26.65846    2.26309   11.780 < 2e-16 ***
SECONDI     0.74077    0.03961   18.703 < 2e-16 ***
INTERS     -6.71354    1.58916   -4.225 5.33e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.348 on 99 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7961,    Adjusted R-squared:  0.792
F-statistic: 193.3 on 2 and 99 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 2.44: Stima dei parametri del modello additivo per i *passaggi* appartenenti ai *range* 1 e 2.

La significatività e la specificazione (figura 2.44) sono analoghe a quelle del modello con interazione, e tutti i coefficienti (β_1 , β_2 e β_3) risultano ampiamente significativi. L'analisi dei residui conferma la validità delle 4 ipotesi.

Dalla calibrazione dei due modelli è evidente l'effetto del tipo di controllo sulle emissioni di CO₂. Come al paragrafo 2.2.3 la stima dei parametri dei modelli relativi al semaforo (equazione 11) e alla rotatoria (equazione 12) ha condotto agli stessi coefficienti del modello con interazione rappresentato in figura 2.45.

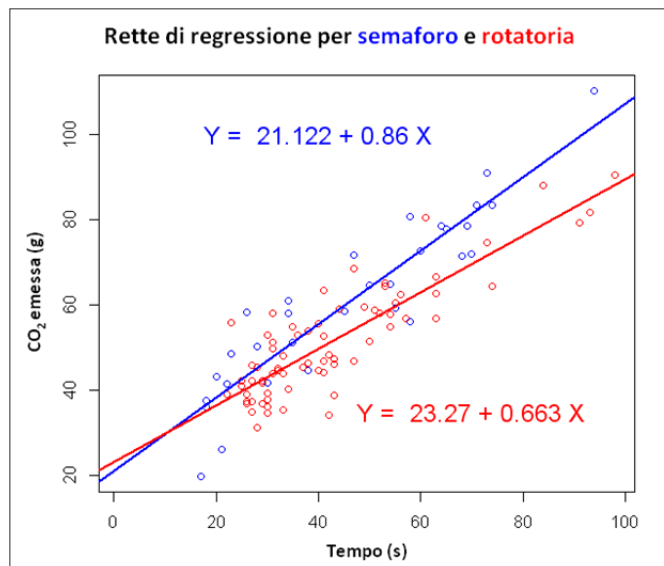


Figura 2.45: Rette di regressione per l'unione dei due *range* (modello con interazione).

Sulla base dell'analisi statistica condotta si osserva che, nel campo di validità dei modelli (cioè nel dominio delle durate), la retta relativa alla rotatoria, pur avendo intercetta maggiore, si colloca al di sotto di quella relativa al semaforo.

Si può pertanto concludere che, sia a parità di veicoli serviti (numero di veicoli globalmente serviti al nodo compreso tra 1200 e 1300 unità) sia a parità di durata dei *passaggi*, la rotatoria produce emissioni di CO₂ inferiori rispetto all'intersezione semaforizzata.

2.2.5 Ripartizione modale dei profili di velocità osservati

Come mostrato al paragrafo 1.2.4, in letteratura è comune valutare le emissioni in funzione dei 4 modi con cui è possibile scomporre il profilo di velocità (*acceleration*, *cruise*, *deceleration* e *idle*). Nel caso studio si è pertanto deciso di analizzare anche i profili di velocità, per indagare se il tipo di controllo possa contribuire a creare un profilo tipicamente più "ecologico".

Allo stesso paragrafo è evidenziato che, in letteratura, i limiti di velocità e accelerazione per ogni modo, scelti da vari Autori, possono essere molto diversi tra loro. Nello studio in esame si sono tenuti come riferimento i limiti proposti dal Frey (tabella 1.2), in quanto sono quelli maggiormente usati e si riferiscono a studi analoghi a quello in oggetto (veicolo strumentato con analizzatore dei gas esausti e dati di posizione e velocità ricavati mediante tecnologia GPS).

Per tenere conto dell'effetto del doppio smoothing le soglie di accelerazione proposte dal Frey sono state modificate; inoltre la modalità *idle* non comprende solamente i valori in cui sia la velocità che l'accelerazione sono nulle, ma tutti quei valori in cui la velocità è minore di (o tutt'al più uguale a) 1 km/h. La tabella 2.7 riporta i limiti utilizzati nel caso in esame.

Limiti ripartizione modale		
	Velocità (km/h)	Accelerazione (km/(hs))
Idle	≤ 1	qualsiasi
Acceleration	> 1	> 2
Deceleration	> 1	< -2
Cruise	> 1	-2 ≤ acc ≤ 2

Tabella 2.7: Limiti di ripartizione modale utilizzati nello studio in esame.

Ogni profilo di velocità è stato quindi completamente segmentato nei 4 modi.

Successivamente i profili sono stati raggruppati tra loro grazie ad un'operazione di clustering. Come per il tempo di attraversamento (paragrafo 2.2.3) si è utilizzato l'algoritmo *k-means*, adottando quale indicatore di qualità l'indice Davies-Boulding, che misura il rapporto tra la distribuzione *intra-cluster* e le distanze *inter-clusters*, misurate a partire dai vari centroidi (Davies & Bouldin, 1979). Tale scelta ha portato a definire il numero ottimale di *clusters* pari a 6.

La figura 2.46 riporta graficamente i risultati dell'operazione di *clustering*: per ogni *passaggio* (spezzata colorata) viene riportata la percentuale di tempo spesa nelle 4 componenti dell'attività modale, mentre il colore ne indica il *cluster* di appartenenza.

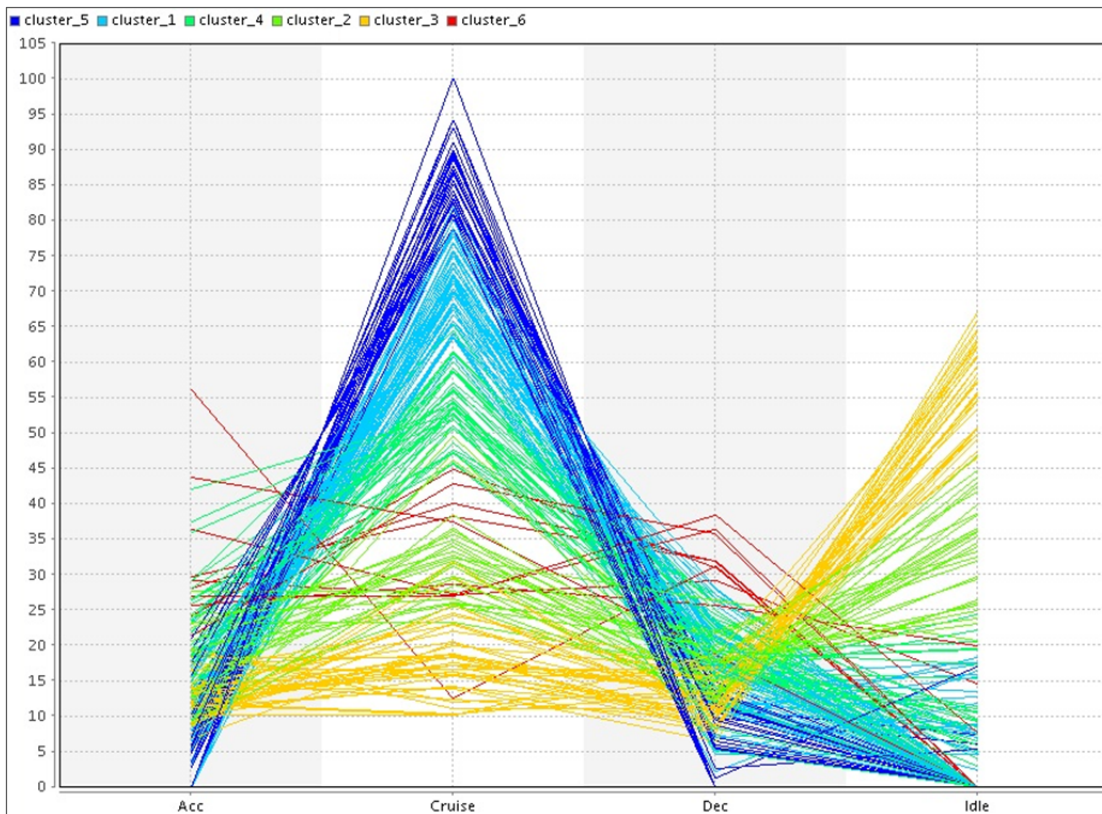


Figura 2.46: Percentuale di tempo spesa nelle 4 componenti dell'attività modale (*acceleration*, *cruise*, *deceleration* e *idle*).

Risulta che ciascun *cluster* è ben specificato in rapporto alle diverse percentuali di tempo spese in modalità *cruise* e *idle* (attributi più significativi). L'unica eccezione è data dal *cluster 6* che presenta percentuali relativamente alte per le modalità *acceleration* e *deceleration*. La ridotta numerosità e i valori di accelerazione e decelerazione poco realistici sembrano perciò identificarlo come un *cluster di passaggi* anomali o outlier, poco significativi ai fini dell'analisi.

Per quanto riguarda gli altri *clusters*, i *clusters 1*, *4* e *5* differiscono principalmente per le diverse percentuali di tempo spese in modalità *cruise*, in particolare comprese tra 45% e 61% per il *cluster 4*, tra 61% e 78% per l'1, e superiori al 78% per il 5. I *clusters 2* e *3* si differenziano per la percentuale spesa in *idle* rispettivamente minore e maggiore del 45%.

Sia la distribuzione dei *passaggi* tra i vari *clusters*, sia il loro numero all'interno di uno stesso *cluster* sono molto diversi tra le due intersezioni (figura 2.47), proprio a giustificazione del fatto che **il tipo di controllo produce profili di velocità differenti**.

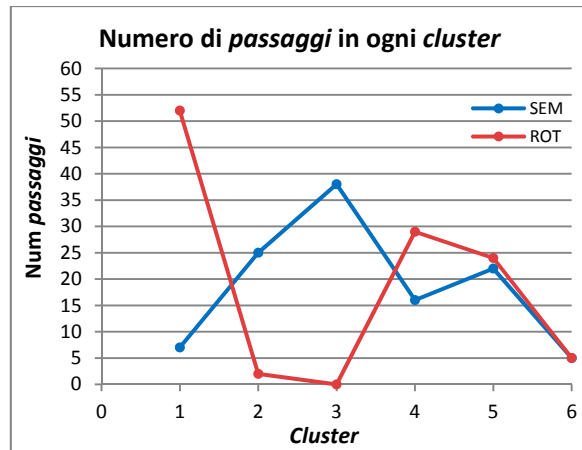


Figura 2.47: Numero di *passaggi* in ogni *cluster* divisi per intersezione.

Solo i *cluster* 4 e 5 hanno una numerosità sufficiente per poter confrontare l'effetto del tipo di controllo sulle emissioni di CO₂ a parità di ripartizione modale.

I profili di velocità per questi due *clusters*, separati per intersezione, sono di seguito riportati.

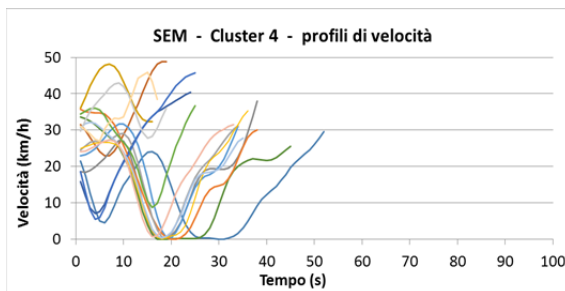


Figura 2.48a: Profili di velocità dei *passaggi* all'intersezione semaforizzata compresi nel *cluster* 4.

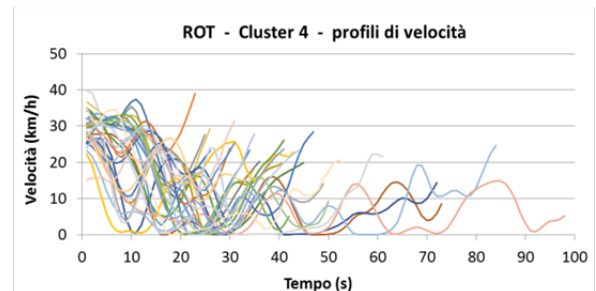


Figura 2.48b: Profili di velocità dei *passaggi* alla rotatoria compresi nel *cluster* 4.

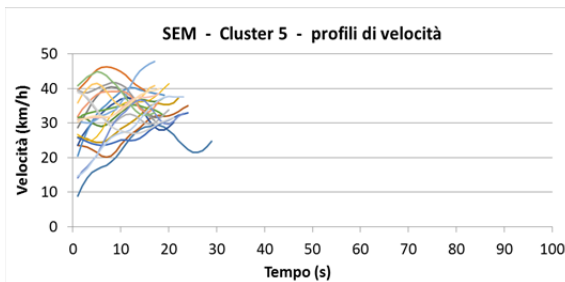


Figura 2.49a: Profili di velocità dei *passaggi* all'intersezione semaforizzata compresi nel *cluster* 5.

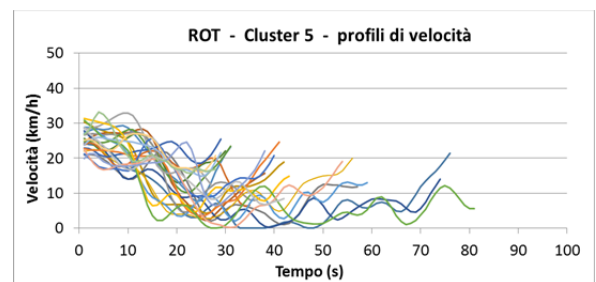


Figura 2.49b: Profili di velocità dei *passaggi* alla rotatoria compresi nel *cluster* 5.

Risulta evidente che le durata dei *passaggi* nel caso della rotatoria, a parità di ripartizione modale (per i soli 2 *clusters* considerati), sono nettamente superiori rispetto al caso del semaforo. Le brevi durate dei *passaggi* per l'intersezione semaforizzata rendono non significativo il modello lineare per il semaforo (equazione 11). Per il *cluster* 4 l'analisi statistica (figura 2.50a) mostra: $F(1,14)=1.996$, $p>0.05$ e coefficienti R^2 e R^2_{adj} pari rispettivamente a 0.125 e 0.062; anche nel caso di *cluster* 5 (figura 2.50b), in cui si osservano durate ancora inferiori, il modello è completamente privo di significato: $F(1,19)=1.915$, $p>0.05$ e coefficienti R^2 e R^2_{adj} pari rispettivamente a 0.092 e 0.044.

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI, data = CLUSTER_4, subset = INTERS ==
  0)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-14.234  -4.092  -1.227   4.841  15.257

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  46.7910     6.4438   7.261 4.15e-06 ***
SECONDI       0.2824     0.1999   1.413   0.18
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.058 on 14 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1248,    Adjusted R-squared:  0.06226
F-statistic: 1.996 on 1 and 14 DF,  p-value: 0.1796

```

Figura 2.50a: Stima dei parametri del modello semaforo per il *cluster* 4.

```

Call:
lm(formula = TOT_CO2 ~ SECONDI, data = CLUSTER_5, subset = INTERS ==
  0)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-15.789  -2.373   1.057   3.508  12.785

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  21.3991     11.2286   1.906  0.0719 .
SECONDI       0.7731     0.5586   1.384  0.1824
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.99 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.09157,    Adjusted R-squared:  0.04376
F-statistic: 1.915 on 1 and 19 DF,  p-value: 0.1824

```

Figura 2.50b: Stima dei parametri del modello semaforo per il *cluster* 5.

In quest'ottica si è ragionato sulle possibili alternative per rendere più omogenei anche i tempi di attraversamento. Sono state considerate due possibilità. La prima è stata quella di scegliere un numero inferiore di *clusters*, (4) sulla base dei valori dell'indicatore Davies-Bouldin. La seconda è stata quella di inserire nell'operazione di *clustering* dei *passaggi* anche l'attributo durata.

Nessuna delle due alternative, però, ha portato ad una maggiore omogeneità di tempi tra i profili appartenenti alle due diverse intersezioni e allo stesso *cluster*. Anche un'operazione di *clustering* condotta in maniera separata tra le due intersezioni, è stata scartata in quanto non sono stati riscontrati *clusters* sovrapponibili tra loro.

Si è quindi condotta l'analisi (figura 2.51) sui valori medi di emissione di CO₂ per ogni *cluster*, e per ogni intersezione, non considerando l'effetto della durata.

```

Analysis of Variance Table

Response: TOT_CO2
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
CLUSTER    5  36503   7300.6  58.8825 < 2e-16 ***
INTERS      1    577    576.6   4.6505 0.03217 *
CLUSTER:INTERS 4    802    200.5   1.6169 0.17114
Residuals 212  26285    124.0
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Figura 2.51: Analisi della varianza per valutare l'effetto dell'intersezione, del *cluster* e della loro interazione sulle emissioni di CO₂.

L'analisi della varianza condotta (figura 2.51) dimostra la significatività delle variabili CLUSTER e INTERS, mentre la loro interazione non risulta significativa (F=1.617, p>0.05). Considerando separatamente le variabili (figura 2.52) appare chiaro che entrambe risultano significative.

```

Analysis of Variance Table

Response: TOT_CO2
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
CLUSTER    5  36503   7300.6  58.217 < 2e-16 ***
INTERS      1    577    576.6   4.598 0.03313 *
Residuals 216  27087    125.4
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Figura 2.52: Analisi della varianza per valutare l'effetto dell'intersezione e del *cluster* sulle emissioni di CO₂.

Per meglio valutare l'effetto del tipo di controllo (variabile INTERS) si è condotto il test HSD (Honestly Significant Difference) di Tukey; i risultati (figura 2.53) confermano la significatività statistica della differenza delle emissioni medie (62,3 g per il semaforo contro 51,2 g per la rotonda).

Da un punto di vista operativo **si può concludere che, anche a prescindere dalla durata dei passaggi, la rotonda risulta essere complessivamente meno inquinante dell'intersezione semaforizzata.**

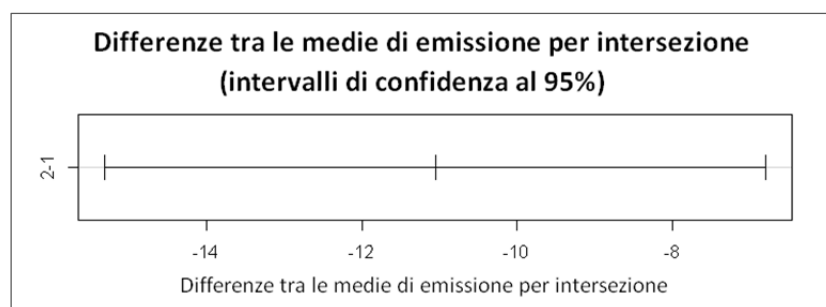


Figura 2.53: Confronto tra le differenze delle emissioni medie di CO₂ di ogni intersezione.

Lo stesso test HSD di Tukey è stato condotto per confrontare le emissioni medie prodotte dai diversi *clusters*, ovvero valutare l'effetto della variabile CLUSTER. I risultati mostrano (figura 2.54) che le differenze tra le emissioni medie di ogni *cluster* (a prescindere dall'intersezione) sono a due a due tutte significativamente diverse da zero.

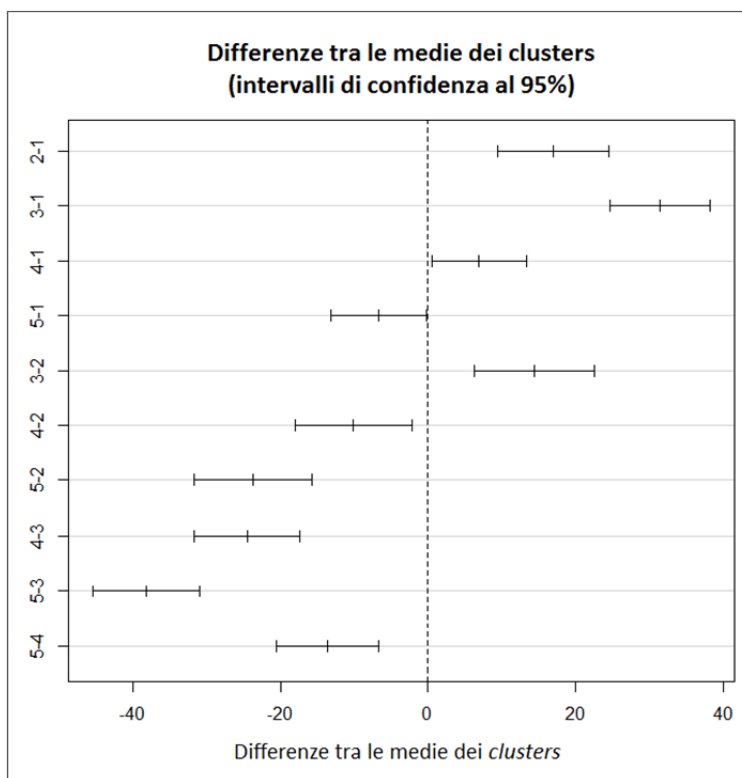


Figura 2.54: Confronti a coppie tra le differenze delle emissioni medie di CO₂ di ogni cluster.

In particolare risulta che il cluster 3 è il più inquinante, seguito dai clusters 2, 4, 1, e infine dal 5. Il cluster 6, per quanto spiegato in precedenza, è stato omesso da tale confronto.

Cluster	Emissioni medie di CO ₂		
	SEM	ROT	Totale
1	45.3	49.5	49.0
2	66.3	78.2	67.6
3	80.5	-	80.5
4	55.4	56.1	55.9
5	37.1	46.9	42.2
6	56.8	54.4	55.6

Tabella 2.8: Emissioni di CO₂ medie per ogni cluster, con e senza separazione tra le due intersezioni.

Per meglio definire come vada ad incidere nei diversi clusters la tipologia di intersezione, in tabella 2.8 sono riportati i valori medi di emissione osservati per ciascun cluster in rapporto alle due intersezioni.

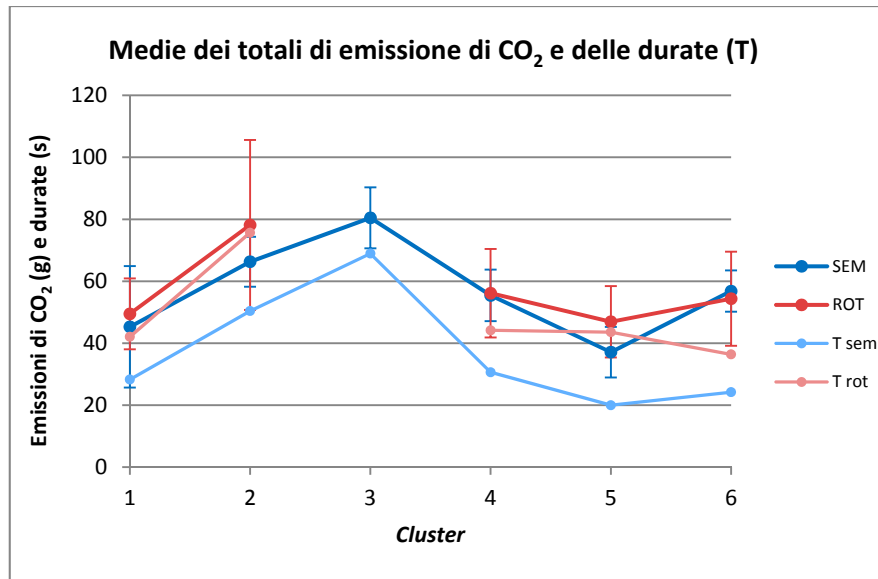


Figura 2.55: Valori medi dei totali di CO₂ emessa per ogni cluster con barre rappresentanti la deviazione standard.

La rotatoria presenta emissioni medie per ogni cluster leggermente superiori rispetto al caso del semaforo (figura 2.55). La giustificazione di tale comportamento, apparentemente contrastante con quanto affermato fino ad ora, sta nelle differenti durate dei *passaggi* appartenenti allo stesso cluster e alle due diverse intersezioni. I *passaggi* al semaforo che presentano le durate maggiori (e quindi quelli più inquinanti) ricadono tutti nel cluster 3 (*idle* > 45%), nel quale non si riscontrano *passaggi* alla rotatoria. Tendenzialmente gli altri clusters presentano quindi durate medie maggiori per la rotatoria, e di conseguenza emissioni medie superiori.

Tuttavia, se si incrociano questi dati con quelli relativi alla distribuzione dei *passaggi* tra i vari clusters (figura 2.47), si può osservare che la maggior parte dei *passaggi* al semaforo (in particolare il 56%) si divide tra i clusters 2 e 3 (rispettivamente il 22% e il 34%) che sono i più emissivi. Questi due clusters, invece, comprendono solo circa il 2% dei *passaggi* alla rotatoria.

Questo risultato è confermato anche per il sottoinsieme dei *passaggi* effettuati in condizioni di flusso totale ai nodi paragonabile (numero di veicoli serviti in 30 minuti compreso tra 1200 e 1300 unità). La tabella 2.9 riporta il numero dei *passaggi* per ogni cluster e la relativa percentuale sul totale, suddivisi per tipologia di controllo dell'intersezione.

CLUSTER	SEM		ROT	
	n pass	%	n pass	%
1	2	6,5	32	45,1
2	6	19,4	2	2,8
3	11	35,5	0	0,0
4	4	12,9	22	31,0
5	6	19,4	13	18,3
6	2	6,5	2	2,8
TOT	31	100	71	100

Tabella 2.9: Numero di *passaggi* per ogni cluster ricadenti nei range 1 e 2.

Si evince che, anche per questo campione, ai *clusters* più inquinanti (2 e 3) è associato un numero di *passaggi* alla rotatoria trascurabile (2,8%) rispetto a quelli che si manifestano all'intersezione semaforizzata (54,9%).

In conclusione la rotatoria produce minori emissioni di CO₂ rispetto al semaforo a parità di tempo di attraversamento e a parità di flusso totale servito al nodo. Tale riduzione è giustificata da una ripartizione modale differente tra rotatoria e intersezione semaforizzata, con profili che risultano tipicamente meno inquinanti nel caso della rotatoria.

CONCLUSIONI

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di valutare se un differente tipo di controllo di un'intersezione stradale possa influire in maniera significativa sulle emissioni di CO₂ prodotte dai veicoli. Per lo studio in oggetto è stato utilizzato un veicolo "sonda", alimentato a benzina, equipaggiato con strumentazione di bordo atta alla valutazione delle emissioni istantanee.

I dati analizzati si riferiscono al *passaggio*, con manovra di semplice attraversamento, del veicolo sonda presso due intersezioni, una semaforizzata (113 *passaggi*) e l'altra con rotatoria (112 *passaggi*). Le due intersezioni, contigue tra loro, sono situate lungo la circonvallazione interna del Comune di Vicenza (figura 2.2).

Durante il periodo di analisi (mattina tra le ore 7:30 e le 10:30, e pomeriggio tra le 16:30 e le 19:30) si è osservato un flusso totale alla rotatoria (conteggiando tutti gli approcci) inferiore del 7,9% rispetto a quello misurato all'intersezione semaforizzata (conteggiando, anche in questo caso, tutti gli approcci) (figura 2.18). Della stessa entità è anche la riduzione delle durate dei *passaggi* (tempi di attraversamento) alla rotatoria (-6,2% per la durata media, -10,0% per quella mediana). Si è constatata, per le due intersezioni, una differente distribuzione dei tempi di attraversamento: per la rotatoria si osserva una maggiore concentrazione nell'intervallo 25÷43 s; nel caso dell'intersezione semaforizzata, invece, circa il 30% dei tempi osservati è inferiore o pari a 25 s, mentre un altro 36% si colloca tra 47 e 74 s (figura 2.20). Tutte le durate analizzate sono comprese tra 15 s e 98 s (figura 2.19). In generale si è osservato che il tempo necessario al veicolo sonda, e quindi il suo profilo di velocità e di emissione, per attraversare la zona di influenza, è strettamente legato alle particolari condizioni istantanee riscontrate in approccio al nodo. Tali condizioni possono essere, per il semaforo, il "via libera" (verde) oppure l'obbligo di stop (rosso) e in quest'ultimo caso il tempo di attesa prima del verde; per la rotatoria, invece, le particolari condizioni possono essere la lunghezza della coda in ingresso e la distribuzione dei singoli *headways* nell'anello (anche a parità di flusso di conflitto) quando il veicolo sonda si trova in testa alla coda.

A prescindere da quanto detto, un'analisi effettuata sulle sole emissioni di CO₂ medie (figura 2.54) mostra che la rotatoria è più "ecologica" rispetto al semaforo.

Con le condizioni al contorno descritte si è osservato che le emissioni totali di CO₂ prodotte ad ogni *passaggio* sono linearmente proporzionali alla durata del *passaggio*. L'analisi ha dimostrato che esiste una differenza statisticamente significativa tra la retta di regressione relativa al controllo semaforico e quella relativa alla rotatoria. In particolare, si è dimostrato che, **a parità di durata del *passaggio*, la rotatoria è caratterizzata da emissioni inferiori di CO₂, che si riducono progressivamente, rispetto all'intersezione semaforizzata, all'aumentare del tempo di attraversamento** (figura 2.32).

Una successiva e analoga analisi statistica è stata condotta su un sottoinsieme del campione iniziale definito da un flusso totale al nodo paragonabile. In particolare il confronto è stato possibile per un numero di veicoli, globalmente serviti in 30 minuti da ognuna delle due intersezioni, compreso tra 1200 e 1300 unità (cioè per un flusso totale al nodo compreso nell'intervallo 2400÷2600 veic/h). Anche con questa analisi si è giunti agli stessi risultati di quella precedente. Si può quindi affermare che **sia a parità di tempo di attraversamento che di flusso totale servito al nodo, la rotatoria produce emissioni di CO₂ inferiori rispetto all'intersezione semaforizzata, e la differenza aumenta all'aumentare della durata** (minore pendenza della retta di regressione; figura 2.45).

La motivazione del maggior grado di "ecologia" della rotatoria rispetto all'intersezione semaforizzata è stata cercata analizzando i profili di velocità rispetto al tempo osservati presso le due intersezioni. Per procedere lungo questa strada ogni profilo di velocità è stato scomposto nelle percentuali di tempo spese in ognuna delle 4 componenti dell'attività modale: *acceleration*, *cruise*, *deceleration* e *idle*; la ripartizione è stata possibile stabilendo a priori i limiti di velocità e accelerazione delle quattro componenti (tabella 2.7). I profili di velocità, così segmentati, sono stati raggruppati in 6 classi (*clusters*) mediante un'operazione di *clustering*. L'analisi statistica ha portato a concludere non solo che le emissioni medie dei *passaggi* appartenenti ai 6 *clusters* sono significativamente diverse tra loro (figura 2.54), ma anche che i profili di velocità relativi all'intersezione semaforizzata si distribuiscono principalmente nei *clusters* più inquinanti (figura 2.47); un'analoga ripartizione è stata osservata anche all'interno del sottoinsieme dei passaggi effettuati in condizioni paragonabili di flusso ai nodi (tabella 2.9). In conclusione si può affermare, come già riportato, che **la rotatoria produce minori emissioni di CO₂ rispetto all'intersezione semaforizzata a parità di tempo di attraversamento e a parità di flusso totale servito al nodo. Tale riduzione è giustificata da una ripartizione modale differente tra rotatoria e intersezione semaforizzata, con profili che risultano tipicamente meno inquinanti nel caso della rotatoria.**

Ulteriori osservazioni

Oltre a quanto appena descritto, questo lavoro ha permesso di trarre anche le seguenti conclusioni sulle emissioni prodotte dai veicoli in ambito urbano:

- esse presentano natura "episodica", sono quindi funzione delle condizioni istantanee di funzionamento del motore;
- il profilo di emissione della CO₂ è sovrapponibile (in maniera qualitativa) a quello del consumo di carburante (figura 2.21);
- i valori massimi di emissione istantanea si verificano in corrispondenza sia di violente accelerazioni, sia di quelle leggermente più contenute ma con velocità iniziali superiori;

- le emissioni di CO₂ reali, sono decisamente superiori rispetto a quelle dichiarate dalle Case costruttrici; mentre per gli inquinanti regolamentati CO (monossido di carbonio) e NO_x (ossidi di azoto) si osserva che le emissioni reali (in ambito strettamente urbano) superano spesso i limiti di emissione rispetto ai quali il veicolo è stato omologato mediante test di laboratorio (figure 2.24a, 2.24b, 2.25a e 2.25b);

Dall'osservazione dei profili di velocità in funzione del tempo, prodotti nel caso di intersezione semaforizzata, si possono distinguere due grandi famiglie. La prima è composta da quei *passaggi*, di breve durata, in cui la velocità si mantiene pressoché costante nel tempo (semaforo verde). Alla seconda famiglia appartengono, invece, tutti quei casi (semaforo rosso) in cui è presente una fase iniziale di decelerazione fino a velocità nulla, seguita da una più o meno prolungata fase di tempo perso (*idle*), e dalla successiva accelerazione fino alla velocità di crociera. I profili di questa seconda famiglia si differenziano tra loro per la durata della fase *idle*, mentre sono indipendenti dalla posizione in coda del veicolo.

I profili di velocità, anche nel caso della rotatoria, si possono dividere in due famiglie a seconda della presenza o meno di coda in approccio al nodo. In entrambi i casi, però, sono tutti caratterizzati da una fase iniziale di decelerazione. Nel caso di assenza di coda questa fase di decelerazione (che può portare la velocità fino a zero per la presenza di un flusso di conflitto circolante sull'anello) è seguita dall'accelerazione necessaria a tornare alla velocità di crociera. Il profilo di velocità con presenza di coda, invece, è caratterizzato da ripetuti fenomeni di *stop and go*, più o meno marcati, caratteristici della fase di scalamento della coda.

Limiti dello studio e possibili sviluppi futuri

I dati analizzati nello studio in oggetto corrispondono a metà di quelli raccolti nella sperimentazione dell'aprile 2014. Questi hanno fornito risultati consistenti, la cui robustezza e significatività potrebbe essere incrementata dall'analisi dell'intero campione.

Il confronto è basato su due diverse intersezioni, che presentano quindi caratteristiche geometriche, di composizione veicolare e di domanda potenziale differente. Il futuro lavoro di confronto prima-dopo la realizzazione della rotatoria in sostituzione del controllo semaforico (previsto per aprile 2015) ridurrà notevolmente l'effetto di tali variabili sui risultati.

Come è consuetudine per questo tipo di studi le intersezioni vengono oltrepassate mediante la sola manovra di attraversamento.

Ulteriori interessanti risultati possono essere forniti valutando altre ipotesi di ripartizione modale; in particolare indagando gli effetti di differenti valori limite di accelerazione per la definizione delle quattro componenti dell'attività modale. Nel dettaglio si consiglia di ripetere l'analisi con valori limite pari a 1 km/(hs) e 1,5 km/(hs).

BIBLIOGRAFIA

- Ahn, K., & al. (2002). Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of transportation engineering*, 2, p. 182-190.
- Ahn, K., & al. (2009). Energy and environmental assessment of high-speed roundabouts. *Transportation Research Record: journal of the transportation research board*(2123), p. 54-65.
- Bergh, C., & al. (2005). *Continued reliance on traffic signals: the cost of missed opportunities to improve traffic flow and safety at urban intersections*. Arlington, Va.: Insurance institute for highway safety.
- Bokare, P. S., & Maurya, A. K. (2013). Study of effect of speed, acceleration and deceleration of small petrol car on its tail pipe emission. *International journal for traffic and transport engineering*, 3 (4), p. 465-478.
- Coelho, M. C., & al. (2006). Effect of roundabout operations on pollutant emissions. *Transportation research part D: transport and environment*, 11, p. 333-343.
- Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1, p. 224-227.
- Feng, C., & al. (2007). *Transit bus load-based modal emission rate model development*. Georgia institute of technology. Atlanta, GA (USA): EPA.
- Ferrari, G. (2008). *Motori a combustione interna*. Torino: il capitello.
- Frey, C., & al. (2001). Emissions reduction through better traffic management: an empirical evaluation based upon on-road measurements. Raleigh, NC, USA.
- Frey, C., & al. (2001). Measurement of onroad tailpipe CO, NO and hydrocarbon emissions using portable instrument. *Annual meeting of air and waste management association*, (p. 1-12).
- Frey, C., & al. (2003, Agosto). On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. *Journal of the air & waste management association*, 53, p. 992-1002.

- Gastaldi, M., & al. (2014). Evaluation of air pollution impacts of a signal control to roundabout conversion using microsimulation. *Transportation Research Procedia*, 3, p. 1031-1040. Siviglia (Spagna): 17th Meeting of EURO Working Group of Transportation.
- Giuffrè, O., & al. (2011). Emission factors related to vehicle modal activity. *International journal of sustainable development and planning*, 6(4), p. 447-458.
- Hallmark, S. L., & al. (2011). On-road evaluation of emission impacts of roundabouts. *TRB Annual meeting*, (p. 226-233).
- Jie, L., & al. (2013). Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. *Transportation research part C*, 31, p. 172-184.
- Jiménez, J. M., & Niedzialek, J. (2008). *5th intermediate technical/scientific report: Collaborative research project for air pollution reduction in Lombardy Region (2006-2010)*.
- Mandavilli, S., & al. (2008). Environmental impact of modern roundabouts. *International journal of industrial ergonomics*, 28, p. 135-142.
- Mock, P., & al. (2013). *From laboratory to road - a comparison of official and "real-world" fuel consumption and CO2 values for cars in Europe and the United States*.
- Nam, E. K. (2003). *Proof of concept investigation for the physical emission rate estimator*. EPA.
- Oneyear, N., & Hallmark, S. L. (2013). Evaluation of microsimulation model output for mobile source air quality modeling. *Road safety and simulation international conference*. Roma.
- Pinamonte, P. (2004). *Motori, traffico e ambiente: emissioni inquinanti da motori a combustione interna per autotrazione*. Udine.
- Prati, M. V., & Costagliola, M. A. (2013). *Repot finale - Attività 2 - Caratterizzazione del comportamento emissivo di una Panda durante test effettuati sul banco a rulli dinamometrico e prove su strada*. CNR - Istituto Motori, Napoli.
- Rakha, H., & al. (2000). Traffic signal coordination across jurisdictional boundaries. *Transportation Research Record*, p. 42-51.
- Rakha, H., & al. (2001). Using Global Positioning System data for field evaluation of energy and emission impact of traffic flow improvement projects: issues and proposed solutions. *Transportation Research Record*, p. 210-223.
- Robinson, B. W., & al. (2000). *Roundabouts: an informational guide*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Sinha, S., & Kumar, R. (2013). Driving cycle pattern for cars in medium sized city of India. *Proceedings of the eastern Asia society for transportation studies*, 9.
- Taekratok. (1998). *Modern roundabouts for Oregon*. Oregon department of transportation, Salem.
- Tan, J. (2001). *Comparison of capacity between roundabout design and signalised junction design*. Swiss transport research conference, Ascona.

- Tong, H. Y., & al. (2000, Aprile). On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. *Journal of the air & waste management association*, 50, p. 543-554.
- Unal, A., & al. (2004, Febbraio). Quantification of highway vehicle emissions hot spots based upon on board measurements. *Journal of the air & waste management association*, 54, p. 130-140.
- Varhelyi, A. (2002). The effect of small roundabouts on emissions and fuel consumption: a case study. *Transportation research part D: transport and environment*, 7, p. 65-71.
- Viola, A. (A cura di). (2010, Aprile). Le ragazze dei 99. *Quattroruote*, 134-144.
- Zampetti, G., & al. (2012). *MAL'ARIA DI CITTA' - L'inquinamento atmosferico e acustico nelle città italiane*. Legambiente.
- Zuger, P., & al. (2001). Roundabouts: fuel consumption, emissions of pollutants, crossing times. *1st Swiss transport research conference*. Ascona, Svizzera.