



# CITTÀ DI MOLFETTA

**SINDACO**  
Tommaso Minervini

**ASS.RE ALLA P.L. E ALL'AMBIENTE**  
Caterina Roselli

**R.U.P. – DIR. AREA 1 P.L.**  
dott. Cosimo Aloia

## PIANO GENERALE DEL TRAFFICO URBANO



**ELABORATO**

**AM**

**APPENDICE METODOLOGICA**

**REDAZIONE**

DICEMBRE 2023

**ADOZIONE**

**APPROVAZIONE**

**PROGETTAZIONE**

**S.I.P.E.T. SOC. COOP. S.T.P.**

arch. Nicola D'Errico

arch. Enrico Eugenio D'Errico

CONSULENZA URBANISTICA E  
TRASPORTISTICA  
arch. Michele Amato  
ing. Claudio Troisi

DATA ANALYST  
urb. Antonio Gioia

CONSULENZA VAS  
urb. Morena Scrascia



## Sommario

1	Metodologia di rilievo dei flussi di traffico.....	2
2	Indagini sulla sosta .....	6
2.1	La stima della domanda di sosta .....	6
2.2	Metodo della targa .....	7
2.3	Turnazione della sosta a pagamento.....	9
3	I modelli di assegnazione dei sistemi di trasporto .....	9
4	Analisi dei modelli di calcolo .....	17
4.1	Livello di servizio delle intersezioni semaforizzate.....	17
4.2	Determinazione del livello di servizio.....	21
4.3	Livello di servizio delle intersezioni urbane non semaforizzate .....	23
4.4	Livello di servizio delle rotatorie.....	31
5	Modelli di emissione per la simulazione dell'inquinamento atmosferico .....	36
5.1	Modello acustico .....	38
5.2	Riferimenti normativi .....	40

## 1 METODOLOGIA DI RILIEVO DEI FLUSSI DI TRAFFICO

La campagna d'indagine è stata pianificata con lo scopo di costituire una solida base dati a supporto delle attività di ricostruzione della domanda di mobilità dello stato attuale e alla calibrazione dei relativi modelli. La campagna di rilevamento ha compreso anche conteggi diretti del traffico veicolare. Queste indagini specifiche del contesto sono fondamentali per integrare ed aggiornare i dati della mobilità sistematica sia riferita al PUMS (2014) che quelli raccolti dall'ISTAT e da altri enti statistici nazionali e regionali.

Le principali indagini utili alla ricostruzione dello scenario attuale della mobilità sono state le seguenti:

- Ricognizione degli interventi previsti dal PUMS ed analisi del livello di attuazione, alla luce di tutti gli interventi infrastrutturali realizzati negli ultimi 20 anni;
- Ricognizione dei principali attrattori e generatori di traffico;
- Rilievi automatici tramite video-analisi dei flussi veicolari;
- Indagini relative ai sistemi di mobilità sostenibili (pedonalità e ciclabilità).

L'analisi del livello di attuazione del PGTU e degli altri Piani, è stata condotta partendo dall'elenco degli interventi infrastrutturali effettivamente realizzati ed esaminando i relativi indicatori e dati trasportistici pre e post intervento/i.

La campagna di indagini sui flussi di traffico finalizzata ad individuare la mobilità sistematica complessiva dei residenti in Molifetta e dei gravitanti è stata effettuata su sezioni significative delle principali direttrici di afflusso e di deflusso. I rilievi sono stati articolati e distinti in indagini al cordone, indagini su sezioni stradali urbane e flussi alle intersezioni complesse. Le prime riguardano i flussi rilevati sulle principali direttrici di ingresso-uscita dalla città. Le seconde e i terzi riguardano le sezioni e le intersezioni interne alla città.

Per i rilievi automatici dei flussi veicolari sono state impiegate strumentazioni di video-analisi non intrusive per la loro facilità di utilizzo, velocità di installazione, riduzione ed ottimizzazione dei tempi di analisi e delle postazioni di rilievo e soprattutto per la completezza e la precisione dei dati di output.

Nello specifico, sono state utilizzate delle Unità di rilevamento mobile "Video Scout", composte ciascuna da una telecamera con obiettivo grand'angolare e da un palo telescopico estensibile fino a 7 m.

La tecnologia basata sull'elaborazione delle immagini, oltre a consentire contemporaneamente con un'unica unità video lo studio di più assi stradali e una varietà molto ampia di tipologie di studio, ha il vantaggio di consentire l'analisi e il monitoraggio dei comportamenti delle tipologie veicolari nel caso che ripetute infrazioni del codice della strada, favorite dall'inadeguata organizzazione delle intersezioni e della segnaletica, influiscano sulla circolazione.

Con la tecnologia sopra citata si sono realizzati i seguenti studi:

- Conteggio sulle intersezioni - conteggio di tutti i possibili movimenti di un veicolo ad un incrocio: attraversamento, svolta a destra, svolta a sinistra, inversione di marcia (TMC); classificazione dei veicoli per categorie;
- Conteggi sulle rotatorie (Roundabout Volume – MCR) – conteggio, con un'unica postazione, di tutti i movimenti di svolta dei veicoli provenienti da tutti i bracci della rotatoria, gli ingressi e le uscite in rotatoria, classificazione dei veicoli per tipologia, calcolo delle ore di punta sull'intero periodo di studio, produzione report di origine-destinazione;
- Conteggio del traffico medio giornaliero (ADT) - conteggio dei volumi di traffico su un determinato asse viario.



Unità di rilevamento con schermo LCD da 5,6" e obiettivo telescopico



Unità di rilevamento posizionata a terra ed in quota



La classificazione dei veicoli è stata effettuata secondo le seguenti categorie:

	<b>Motocicli e ciclomotori (Motorcycles )</b>
	<b>Autovetture (Cars)</b>
	<b>Veicoli commerciali leggeri (Light Goods Vehicles)</b>
	<b>Mezzi pesanti isolati (Single-Unit Trucks)</b>
	<b>Autobus (Buses)</b>
	<b>Autoarticolati (Articulated Trucks)</b>

Classificazione dei veicoli oggetto di rilievo per categoria

Su alcune sezioni stradali stati realizzati anche dei conteggi continuativi mediante dispositivi radar ad elevata precisione. I dispositivi sono dotati di radar motorizzati con registrazione automatica della corretta angolazione, previa impostazione dei parametri di installazione. La classificazione dei veicoli è stata effettuata secondo le seguenti categorie:

- Motocicli e ciclomotori

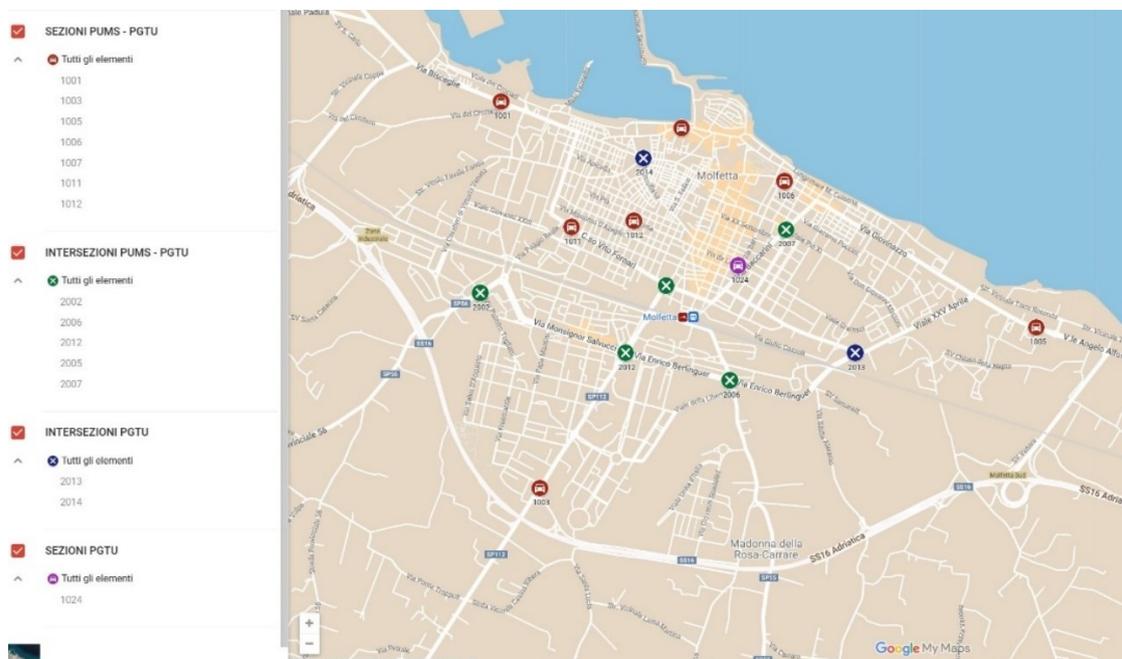
- Autovetture
- Mezzi commerciali leggeri < di 7 5 m
- Mezzi commerciali pesanti (lunghezza compresa tra 7,5 e 12,5 m)
- Mezzi pesanti (lunghezza > di 12 5 m)



Dispositivo radar di rilievo del traffico

Durante la fase di progettazione dei rilievi l'ubicazione delle postazioni designate è stata georeferenziata su planimetria in formato web-gis (google my maps) al fine di permettere alla struttura tecnica Comunale il monitoraggio dell'attività di rilievo e lo scambio di informazioni più velocemente e senza l'utilizzo di alcun software, ma solo di un browser.

4



Mappatura web-gis delle postazioni di rilievo dei flussi di traffico

Le campagne di rilevamento sono state effettuate nei mesi di Aprile e Maggio 2022 per rilevare la mobilità sistemica con la componente scolastica e nel mese di Agosto 2022 per i flussi estivi. Il rilievo dei flussi veicolari sulle sezioni stradali al cordone è stato realizzato in giorni feriali (da lunedì

a venerdì) per un arco temporale di 14 ore consecutive (7:00 – 21:00) per individuare gli orari a maggior afflusso e deflusso di traffico e durante le ore di punta del mattino e del pomeriggio sulle intersezioni complesse. Per avere una migliore aggregazione e disaggregazione dei dati è stato scelto per l'analisi un intervallo temporale di 15 minuti, ma i dati disaggregati sono disponibili anche minuto per minuto.

Elaborando i dati estratti dai rilievi dei flussi è stato calcolato, per ogni sezione ed intersezione rilevata, il fattore dell'ora di punta PHF (PEAK HOUR FACTOR), ovvero il "tasso di flusso" rappresentato dal numero dei veicoli che transiterebbe in un'ora se il volume, che transita in un periodo di riferimento inferiore all'ora, si mantenesse costante. Nel nostro caso il periodo di riferimento è pari a 15 minuti poiché è stata ritenuta più opportuna, per il conteggio dei veicoli, l'adozione di una base temporale di 15 minuti primi in quanto:

- una durata troppo breve, nell'ordine del minuto, determina per i flussi valori che risentono notevolmente degli eventi accidentali che si verificano su strada quali rallentamenti dovuti a pedoni in attraversamento della carreggiata, fermate di bus, arresto della marcia dei veicoli per qualsiasi motivo, ecc..;
- una durata eccessiva, nell'ordine di mezz'ora, risulta normalmente più lunga dei periodi in cui si verifica la maggiore concentrazione dei veicoli in transito.

Pertanto il rapporto tra il Volume dell'ora di punta e la massima portata che si prevede si verificherà durante la stessa ora viene definito come "fattore dell'ora di punta" (PHF).

In formula  $PHF = \text{Volume orario} / \text{massimo tasso di flusso (rapportato all'ora)}$

5

Nel nostro studio poiché l'ora è stata suddivisa in periodi di 15 minuti ciascuno, il fattore dell'ora di punta risulta pari a :

$$PHF = VHP / (4 \times V15)$$

dove:

- PHF = fattore dell'ora di punta;
- VHP = volume dell'ora di punta (veic/h);
- V15 = volume del quarto d'ora più caricato (veic/15 minuti);
- $\times V15$  = massimo tasso di flusso rapportato all'ora.

Occorre notare che negli studi e nei confronti con la capacità delle arterie stradali risulta fondamentale considerare la portata di punta che deriva dai 15 minuti più carichi all'interno dell'ora: questa portata viene anche denominata intensità di traffico.

Può accadere, infatti, che, sebbene il volume relativo ad un'ora sia minore della capacità della strada, la portata di punta sia superiore a quest'ultima; se il volume eccede la capacità anche per un solo quarto d'ora, è dimostrato da vari studi ed indagini effettuate che gli effetti della congestione in questo periodo di punta possono risentirsi anche per tutta un'ora e più.

L'HCM (Highway Capacity Manual) fornisce per il fattore dell'ora di punta a seconda delle strade i seguenti valori:

- per le strade extraurbane senza particolare destinazione:  $PHF = 0.80 - 0.90$ ;

- per le strade extraurbane senza particolare destinazione ma con volumi giornalieri elevati: PHF = 0.85 – 0,93;
- per le strade extraurbane a destinazione particolare (strade con prevalente utenza pendolare, strade turistiche): PHF = 0.88 – 0,95;
- per le strade urbane a forte traffico: PHF = 0.90 – 0,95.

I dati sui flussi di traffico, le registrazioni video e le analisi dei rilievi effettuati sono consultabili dall'Amministrazione sul portale <https://miovision.com/central>. Una volta fornito il link specifico della stazione di rilevamento richiesta, attraverso il pannello di controllo l'Amministrazione per ogni singola sezione o intersezione potrà gestire tutte le informazioni disponibili, visualizzare e scaricare i video, generare grafici ed esportare i report personalizzandoli a seconda delle necessità, in quanto sarà possibile impostare prima del download gli intervalli temporali ed altri settaggi. Questo strumento, oltre a velocizzare i tempi di condivisione delle analisi, permetterà all'Amministrazione di avere uno strumento di supporto alla gestione della viabilità e della mobilità, in particolare su intersezioni critiche della rete stradale urbana.

Al fine di analizzare gli "equilibri" tra domanda e offerta, le analisi della domanda di sosta sono state approfondite attraverso il "metodo della targa", ovvero un tipo di indagine che consente di rilevare il numero di veicoli in sosta e la durata media della sosta ponendo sotto osservazione, per l'intera giornata, un campione di stalli presenti nell'area di studio e registrando ad intervalli di tempo fissi le ultime cinque cifre delle targhe delle auto in sosta.

## 2 INDAGINI SULLA SOSTA

Per verificare la presenza di eventuali cambiamenti delle dinamiche di sosta sopravvenuti dalla realizzazione degli ultimi rilevamenti della domanda ad oggi, si è proceduto a stimare la domanda su due livelli: uno più esteso su tutta la zona di studio e sull'area dell'ospedale mediante una procedura semplificata che si serve dei dati trasportistici aggiornati ed uno più di dettaglio mediante il rilievo della domanda effettuato con il metodo della targa, applicato a 5 zone specifiche dell'area di studio.

### 2.1 La stima della domanda di sosta

In assenza di un modello della domanda di sosta (che rientra nelle metodologie di stima della domanda), al fine di avere un quadro di riferimento di supporto alle elaborazioni dei dati ottenuti dalle indagini e dalle stime dirette, si è proceduto ad implementare procedura semplificata che si serve dei dati trasportistici aggiornati.

La domanda di sosta in una zona, in generale, è funzione di tre aliquote:

- gli utenti che nel periodo di riferimento giungono nella zona "J" in esame ( $D_{IN}^J$ );
- gli utenti che nel periodo di riferimento abbandonano la zona "J" in esame ( $D_{OUT}^J$ );
- gli utenti che nel periodo di riferimento erano nella zona "J" in esame e nello stesso periodo non compiono spostamenti con l'automobile ( $D_{stanziale}^J$ ).

La prima aliquota è pari alla domanda attratta dalla zona (somma della colonna della matrice OD), la seconda aliquota è pari alla domanda emessa dalla zona (somma della riga della matrice OD), la terza aliquota è pari alla domanda stanziale, ovvero agli utenti che nel periodo di riferimento non compiono spostamenti con l'automobile e non hanno posto auto loro riservato e pertanto sostano l'auto negli stalli disponibili in zona.

Per la stima della domanda stanziale si è operato nel modo seguente:

$$D_{stanziale}^J = N_{AUTO}^J - D_{OUT}^J$$

con:

$$N_{AUTO}^J = N^{\circ} \text{ famiglie zona "J"} \times 1,5 \text{ (n. auto/famiglia}^1) \times 0,60 \text{ (coefficiente no park}^2)$$

La domanda di sosta della zona "J" sarà pari, pertanto, alla somma della domanda in ingresso e della domanda stanziale, ovvero:

$$D_{SOSTA}^J = D_{IN}^J + D_{stanziale}^J$$

L'offerta di sosta è pari alla somma di tre aliquote:

- sosta su strade appartenenti alle infrastrutture rilevanti considerate (rete di base);
- sosta su strade non appartenenti alle infrastrutture rilevanti considerate (strade locali);
- sosta fuori strada (garages, box, cortili, ecc.).

7

Per l'area in esame si è fatto riferimento ai dati rilevati forniti per zona considerando la somma degli stalli disponibili delle seguenti tipologie:

- libera;
- non regolamentata;
- pagamento.

Per le due ore di punta della mattina e della sera sono state elaborate delle tabelle consultabili nell'allegato RPP (Relazione Tecnica – Piano Urbano dei Parcheggi e della sosta).

## 2.2 Metodo della targa

Il metodo della targa è un comune tipo di indagine che consente di rilevare il numero di veicoli in sosta nel corso della giornata e la durata media della sosta: consiste nel porre sotto osservazione per l'intera giornata un campione di stalli presenti nell'area di studio e nel registrare su appositi moduli ad intervalli di tempo fissi (generalmente 30 min/ 1 h/1h e 30min ) le targhe delle auto in sosta negli stalli prescelti.

<sup>1</sup> Dato medio italiano (fonte: ns elaborazione su dato ACI numero auto pro capite anno 2020)

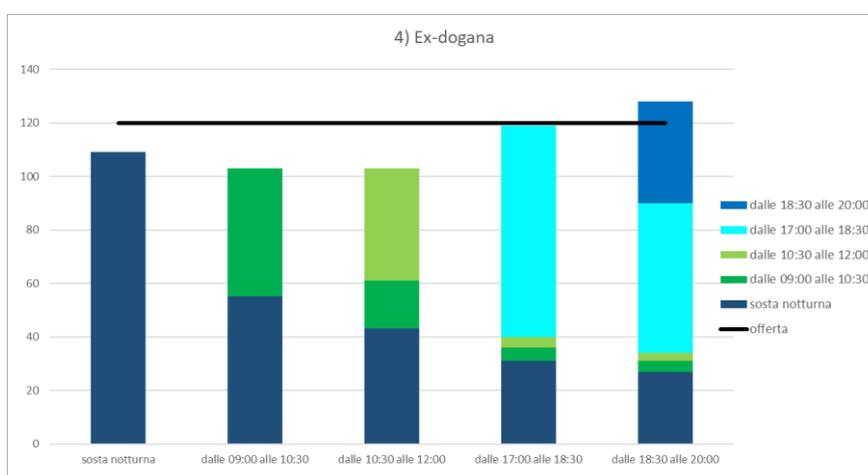
<sup>2</sup> Coefficiente che tiene conto che il 60% delle famiglie non possiede un garage esclusivo e pertanto parcheggia l'auto in zona

Informazioni cronologiche	ULTIME CINQUE CIFRE TARGA	TIPOLOGIA SOSTA
5/31/2022 17:04:36	025em	a pagamento
5/31/2022 17:04:56	308vy	libera
5/31/2022 17:05:12	279kx	libera
5/31/2022 17:05:33	633sm	libera
5/31/2022 17:05:52	964by	libera
5/31/2022 17:06:10	771ws	libera
5/31/2022 17:06:34	919gd	irregolare
5/31/2022 17:07:04	252ay	libera

Modulo per la registrazione dei dati rilevati

Nell'ambito della costruzione del quadro conoscitivo del PGTU e del PUP di Molfetta, sono state effettuate delle indagini durante 1 giorno ferialo tipo rilevando i numeri di targa (ultime 5 cifre) dei veicoli in sosta in diversi momenti per ogni zona indagata: un passaggio notturno dalle 4:00 alle 6:00 per tutte le zone e altri passaggi mattutini e pomeridiani (fino alle 21 00).

La successiva elaborazione dei dati fornisce le informazioni richieste. La presenza, infatti, in un dato intervallo di tempo di una targa prima non registrata, indica l'arrivo di una nuova auto in quell'intervallo; la sua permanenza per un certo numero di intervalli di tempo consente di misurare la durata della sosta; la sua scomparsa indica l'ora di partenza; il numero di targhe riportato in ogni unità di tempo misura le auto presenti.



*Esempio dell'elaborazione sulla turnazione della sosta su una delle zone oggetto di indagine*

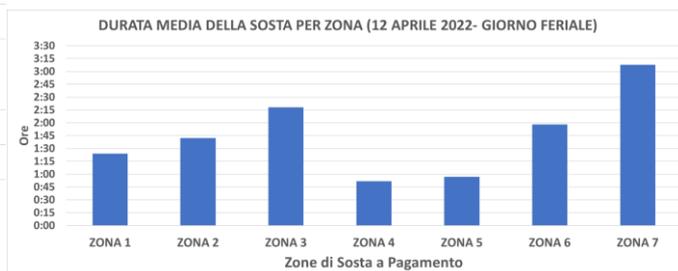
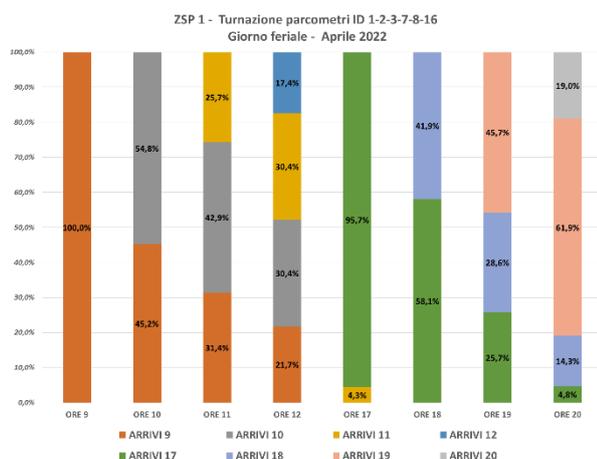
L'espansione all'universo dei risultati dell'elaborazione avviene moltiplicandoli per il rapporto tra il numero di stalli presenti nell'area ed il numero di stalli sottoposti ad osservazione.

E' opportuno che gli stalli campione siano disposti lungo un circuito chiuso in modo da semplificare le operazioni di rilevamento; è altresì necessario che in questo circuito siano compresi stalli di tutte le possibili tipologie presenti nella zona. Bisogna poi fare attenzione a considerare come stallo non solo uno spazio legale per la sosta, ma uno spazio che viene normalmente utilizzato per essa, pur essendo vietata.

### 2.3 Turnazione della sosta a pagamento

Sono stati eseguiti inoltre degli approfondimenti sulla macro-zona di sosta a pagamento mediante l'elaborazione dei dati di scassetamento dei parcometri e del database della piattaforma di prenotazione tramite app. I risultati dell'analisi, seppur fornendo un quadro parziale sulla capacità dinamica della sosta in quanto non sono disponibili i dati sulla rotazione dei possessori di pass, hanno consentito di effettuare valutazioni sulla durata della sosta e sul grado di utilizzo dei ticket in rapporto ai pass emessi.

Terminale - ID terminale	Il pagamento -	Centro	Data locale acquisto	Importo	durata a 0,60€	tempo acquistato	ora fine	ora arrivo	ora partenza
01	Coin	Molfetta	12/04/2022 10:30:24	1,00	1,666666667	01:40:00	12:10:24	10	12
02	Coin	Molfetta	12/04/2022 10:51:19	2,00	3,333333333	03:20:00	14:11:19	10	14
02	Coin	Molfetta	12/04/2022 10:34:29	0,50	0,833333333	00:50:00	11:24:29	10	11
02	Coin	Molfetta	12/04/2022 10:21:35	1,30	2,166666667	02:10:00	12:31:35	10	12



Estratto report di scassetamento dei parcometri ed elaborazione dei dati

## 3 I MODELLI DI ASSEGNAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO

I modelli di assegnazione ad una rete di trasporto simulano l'interazione domanda-offerta e consentono di calcolare i flussi di utenti e le prestazioni di ciascun elemento del sistema di offerta (archi della rete) come risultato dei flussi di domanda Origine-Destinazione tra differenti zone di traffico, dei comportamenti di scelta del percorso e delle reciproche interazioni fra domanda e offerta.

Essi, quindi, svolgono un ruolo centrale nella costruzione di un modello complessivo di un sistema di trasporto, in quanto un tale modello si pone l'obiettivo di simulare il funzionamento del sistema mentre i risultati ottenuti costituiscono gli elementi di ingresso per la progettazione e/o verifica del sistema di trasporto.

I modelli di assegnazione possono classificarsi in base a ipotesi sul comportamento degli utenti (funzioni di domanda, scelta del percorso, informazione disponibile) e sul tipo di approccio utilizzato per lo studio delle interazioni domanda-offerta. Senza, ovviamente, entrare nel merito della trattazione dei modelli di assegnazione, quelli usualmente utilizzati nella pratica possono essere classificati:

- riguardo al tipo di approccio utilizzato per lo studio della interazione domanda-offerta, come:
  - o modelli di assegnazione di equilibrio, poiché ricercano la configurazione di equilibrio del sistema, cioè quelle configurazioni nelle quali i flussi di domanda, di percorso fra le varie coppie o/d e di arco siano congruenti con i costi che da essa derivano;
  - o modelli di assegnazione a reti congestionate, poiché i costi dipendono dai flussi sugli archi in virtù del fenomeno della congestione;
- riguardo al comportamento degli utenti come:
  - o modelli di scelta del percorso deterministici se tutti gli utenti scelgono l'itinerario di minimo costo;
  - o modelli di scelta del percorso probabilistici o stocastici se gli utenti possono scegliere anche itinerari non di minimo costo.

Il software utilizzato per le assegnazioni di traffico, denominato T.Model, è descritto nel paragrafo seguente; esso è costituito da un sofisticato sistema di modelli matematici di simulazione e previsione di supporto per la progettazione e la pianificazione del traffico e dei trasporti.

---

10

Essi supportano:

- la progettazione e la verifica degli interventi in una logica globale del sistema della mobilità, dell'ambiente e della pianificazione urbanistica;
- la valutazione di misure tese al miglioramento dell'offerta di trasporto ed al controllo ed all'orientamento della domanda di mobilità.

Il sistema, denominato T.MODEL, è costituito da quattro componenti principali:

- a. i modelli matematici;
- b. la base dati;
- c. la grafica interattiva;
- d. il sistema di gestione.

In questa ottica, il sistema T.MODEL non si propone come uno strumento di progetto, per cui non fornisce la soluzione ottimale, ma consente la verifica ed il confronto fra differenti scenari.

La flessibilità e rapidità d'uso di T.MODEL e le caratteristiche di relazionalità della base dati consentono, in tempi relativamente brevi, di testare e confrontare un altissimo numero di scenari alternativi conseguenti alle composizioni degli interventi progettati con la possibilità di poter scegliere l'insieme ottimale di interventi.

L'ossatura principale di T.MODEL è costituita da un sistema di modelli matematici che permettono la simulazione del processo di pianificazione nella sua completezza. Essi si possono suddividere nelle seguenti tipologie:

- a. modelli di domanda (TMOB);
- b. modelli di offerta (TNET);
- c. modelli di interazione domanda offerta o di assegnazione dei veicoli alla rete stradale (TROAD) e dei passeggeri al sistema di trasporto pubblico (TBUS);
- d. modelli di stima e aggiornamento delle matrici O/D a partire dai flussi di traffico (TOD).

Tra i moduli sopra indicati quello utilizzato per effettuare l'assegnazione della domanda di mobilità al sistema di offerta di trasporto privato è T.Road di cui si riporta una breve descrizione.

Il modulo T.Road assegna il traffico privato alla rete stradale consentendo di valutare la bontà degli interventi progettati in funzione di alcuni indicatori fra i quali si evidenziano:

- il grado di saturazione di ogni strada;
- il tempo e la velocità di percorrenza su ogni singola strada;
- il flusso di autovetture su ogni strada;
- i km totali percorsi sulla rete;
- il tempo totale speso sulla rete;
- tempi, distanze e velocità medie di percorrenza per ogni coppia di zone di traffico origine-destinazione.

---

11

Tutti gli indicatori possono essere calcolati sia a livello disaggregato, cioè relativamente ad ogni arco stradale, che a livello aggregato e quindi per l'intera area di studio o parti di essa.

Per quanto attiene specificamente il processo di assegnazione del traffico privato, T.ROAD consente di utilizzare modelli di assegnazione sia in ipotesi deterministiche che stocastiche. Evidentemente sarà possibile utilizzare il modello più congeniale per la valutazione dei carichi sulla rete, delle relative criticità e di tutti gli indicatori utili per la valutazione ed il confronto degli scenari di progetto.

In ipotesi di rete congestionata, qui accettata, come descritto al paragrafo precedente, T.ROAD assicura un'assegnazione di tipo deterministico, (Deterministic User Equilibrium o DUE), o di tipo stocastico (Stochastic User Equilibrium o SUE).

La base dati di T.Road è strutturata in modo da contenere tutti i dati di interesse per il sistema di traffico e di trasporto.

Dal punto di vista logico la base dati si può supporre suddivisa in sezioni che contengono diverse tipologie di informazioni.

La prima (dati scenari) riguarda le informazioni, sia di input che di output, che andranno a costituire i diversi scenari. Si tratta pertanto di dati relativi al sistema di domanda (matrici O/D), dati relativi all'offerta di trasporto (rete privata con rispettive caratteristiche geometriche e funzionali), flussi di traffico, dati ottenuti dalle funzioni di costo e di valutazione delle prestazioni e di tutte le altre

informazioni che permettono di definire ed individuare un particolare scenario. Questa associazione a tutte le informazioni relative ad un unico scenario è fondamentale per il controllo dei risultati. Infatti in questo modo risulta estremamente semplice gestire eventuali modifiche nei dati di input.

Una seconda sezione (dati integrativi) è dedicata a dati non indispensabili per il funzionamento dei modelli, ma utili per le sue valutazioni e decisioni.

Per facilitare l'interpretazione dei risultati ottenuti dalle elaborazioni, una porzione di Data Base (dati per rappresentazione) è riservata alle informazioni di carattere topologico indispensabili per ottenere una rappresentazione del territorio e delle caratteristiche topografiche di maggior rilievo dell'area di studio.

Un ultimo settore (dati di gestione) viene riservato per i dati utili alla gestione dei processi (numero di iterazioni, valori di tolleranza, parametri di input ai processi, ecc.).

Fisicamente tutte le informazioni presenti in T.Road sono inserite in un database relazionale (DBMS). Tutti i dati di uno stesso progetto sono contenuti in un unico database. I dati sono classificati a seconda della loro tipologia detta classe di tabella o semplicemente tabella. Ogni occorrenza di tabella è detta istanza. Vi possono essere più istanze della stessa tabella, ad esempio la matrice O/D che rappresenta la domanda di mobilità attuale e la matrice O/D che rappresenta la domanda futura sono due istanze della stessa tabella.

L'interfaccia di T.Road, denominato T.Graph, consente la visualizzazione grafica e tabellare delle grandezze di input e di output dei modelli relative al grafo viario ed al traffico veicolare, sia utilizzate come dati di ingresso dai modelli che prodotte come risultato delle simulazioni; inoltre, consente di interagire direttamente con i dati definendo o modificando interattivamente sia dati che parametri.

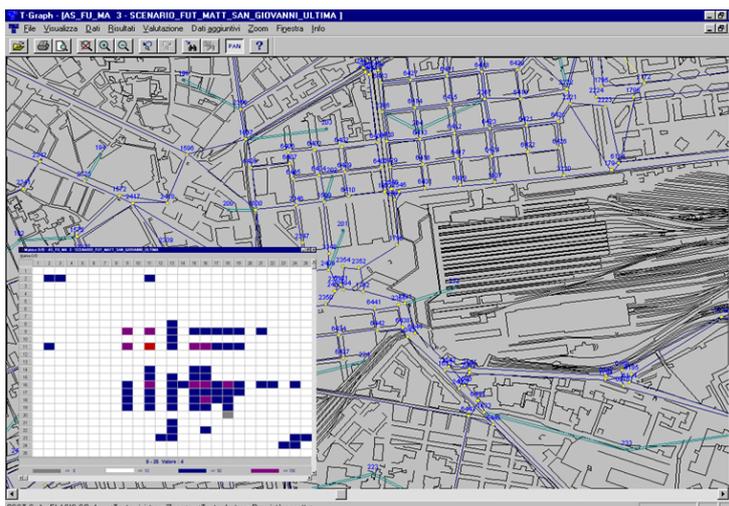
---

12

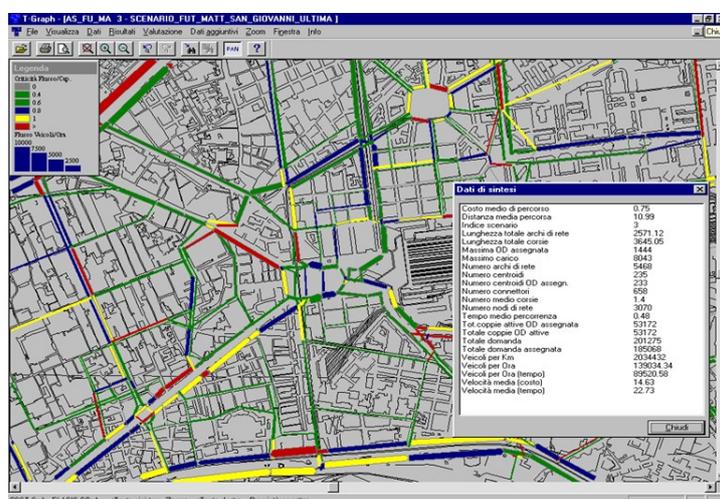
In particolare l'interfaccia svolge essenzialmente le seguenti funzioni:

- rappresentare attributi dei grafi stradali (e.g. velocità, criticità, flussi, svolte alle intersezioni) secondo diverse tipologie grafiche;
- visualizzare graficamente e numericamente le matrici O/D;
- effettuare interattivamente procedure di analisi e calcolo dei percorsi minimi;
- visualizzare in forma numerica tutti gli elementi della base dati;
- consentire la modifica degli oggetti che può visualizzare, di inserirne dei nuovi o di eliminare quelli esistenti operando in modo interattivo con il sistema;
- effettuare tutte le operazioni, quindi apertura file, rappresentazione multifinestre, stampe, ecc. secondo standard ormai consolidati nell'ambito del sistema operativo Windows.

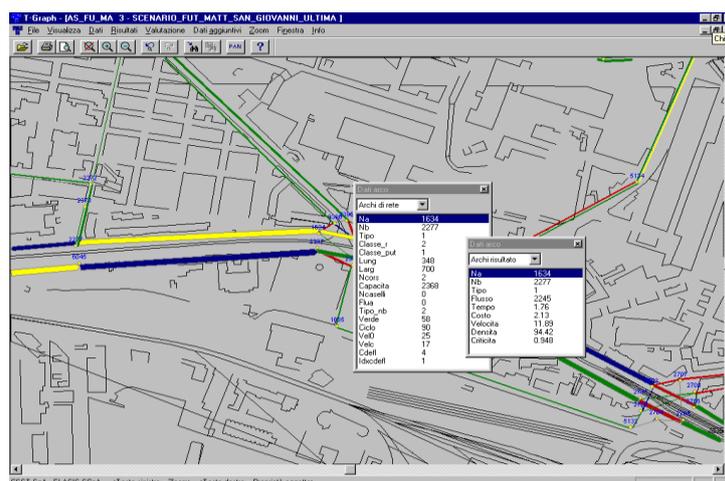
Esempi di visualizzazione dei risultati sono riportati nelle successive figure.



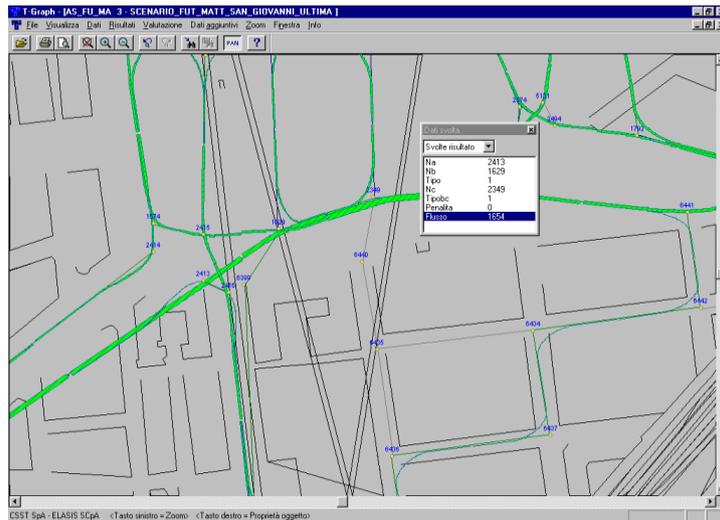
Rappresentazione della rete e della matrice o/d con valori della domanda di spostamenti suddivisa in classi.



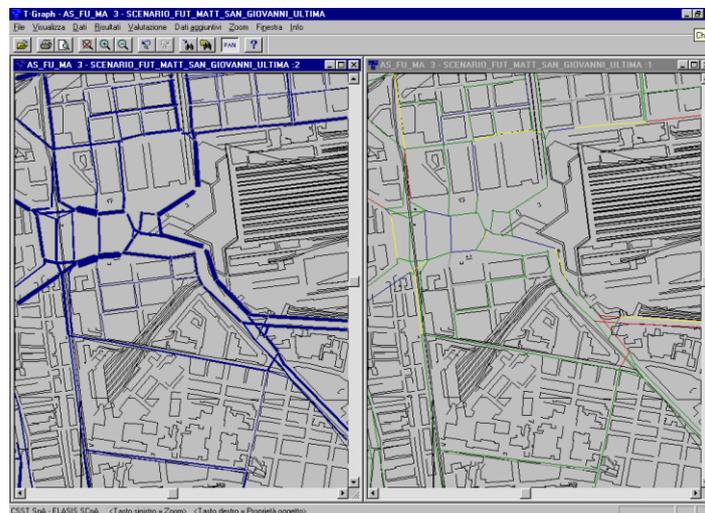
Rappresentazione della rete stradale con in scala colore la criticità (flusso/capacità) degli archi. La tabella riporta i risultati aggregati.



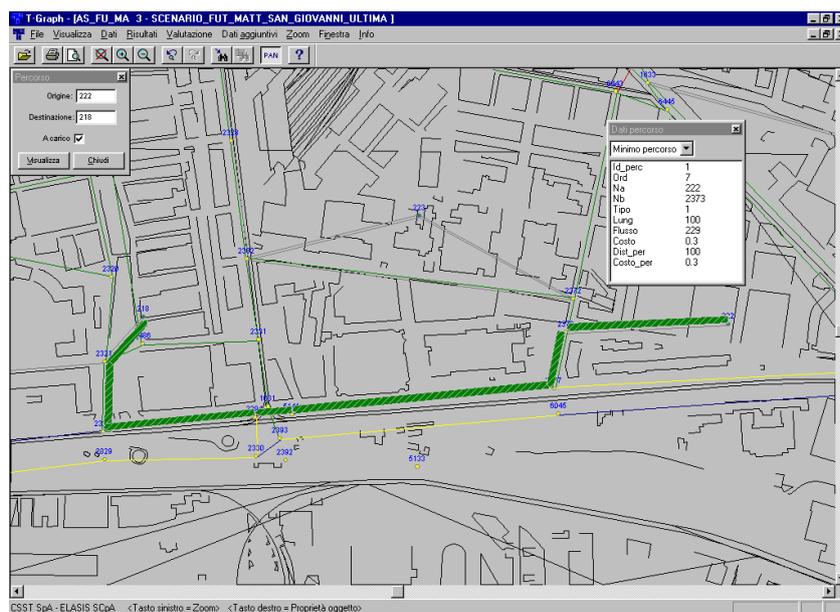
Rappresentazione della rete stradale con dati di input e di output di un arco selezionato.



Rappresentazione dei flussi di svolta per un nodo "implicitamente esplosi" e dei dati numerici relativi ad una svolta.



Rappresentazione di un minimo percorso fra coppia OD e caratteristiche dello stesso all'equilibrio.



Rappresentazione multiwindows. La finestra di sinistra rappresenta i flussi in scala spessore, quella di destra le criticità in scala colore.

Per eseguire una assegnazione di traffico privato mediante il modulo T.Road è necessario:

- inserire nella base dati la descrizione della rete di traffico sulla quale effettuare la simulazione;
- disporre di una matrice O/D di spostamenti da assegnare alla rete;
- definire lo scenario di assegnazione;
- configurare lo scenario di assegnazione;
- eseguire il modulo T.Road.

Per quanto concerne la rete considerata, si è costruito un file in cui sono contenute le informazioni relative ai nodi (NODI.DBF), un file contenente le caratteristiche degli archi (ARCHIR.DBF) rilevate con le indagini eseguite, un file in cui per coppia di zone di traffico Origine/Destinazione è fornito il valore degli spostamenti in auto nell'ora di punta, ottenuto, ed un file in cui sono contenuti i parametri che entrano in gioco nelle funzioni di costo prescelte (CDEFL.DBF).

- 1) I campi del file NODI.DBF sono:
- 2) COD: contiene il codice numerico che identifica il nodo;
- 3) TIPO: è un codice numerico che identifica il tipo di nodo (1=centroide, 2=nodo di rete);
- 4) COORDX: coordinata x del nodo (corrispondente alla georeferenziazione eseguita sulla mappa);
- 5) COORDY: coordinata y del nodo (corrispondente alla georeferenziazione eseguita sulla mappa);
- 6) ZONA: è il codice del centroide relativo alla zona di traffico in cui è contenuto il nodo in questione;
- 7) GRUPPO: contiene un codice che serve ad identificare nodi omogenei;
- 8) ESPLOSO: contiene un codice 1 o 0 a seconda che il nodo sia stato considerato un nodo di svolta o meno, tale campo è necessario nella schematizzazione delle svolte.
- 9) I campi del file ARCHIR.DBF sono:
- 10) NA: è il codice numerico che identifica il nodo iniziale dell'arco;
- 11) NB: è il codice numerico che identifica il nodo finale dell'arco;
- 12) TIPO: è una classificazione che permette di distinguere un arco in funzione del grado di parallelismo in questo caso è sempre stato posto uguale ad 1;
- 13) CLASSE\_R: è un campo numerico che serve a classificare l'arco (1=connettore, 2=arco reale);
- 14) CLASSE\_PUT: è un codice che serve a classificare l'arco secondo le direttive dei PUT, nel caso specifico è stato posto sempre pari ad 1;
- 15) LUNG: lunghezza dell'arco espressa in metri;
- 16) LARG: larghezza utile dell'arco espressa in cm;
- 17) NCORS: numero di corsie dell'arco rilevate;
- 18) CAPACITA': capacità dell'arco calcolata come descritto;
- 19) NCASELLI: numero di caselli, diverso da zero per gli archi casello;
- 20) FLUA: eventuale precarico sull'arco;

- 21) TIPO\_NB: è un codice numerico che consente di definire il tipo di nodo finale (1=centroide, 2=incrocio ritardato, 3=incrocio non ritardato);
- 22) VERDE: durata di verde all'intersezione in secondi;
- 23) CICLO: durata del ciclo semaforico in secondi;
- 24) VELO: velocità a flusso nullo calcolata come descritto;
- 25) VELC: velocità a carico calcolata come descritto;
- 26) CDEFL: codice numerico che identifica il tipo di curva di deflusso (2=BPR, 4=Doherty, 5=Doherty casello);
- 27) IDXCDEFL: indice della curva di deflusso associata all'arco.

I campi del file MATOD\_VIAGGI.DBF sono:

- 1) ORIG: codice del centroide rappresentativo della zona di traffico origine;
- 2) DEST: codice del centroide rappresentativo della zona di traffico destinazione;
- 3) VAL: numero di spostamenti in autovetture equivalenti nell'ora di punta.
- 4) I campi del file CDEFL.DBF sono:
- 5) CDEFL: è un valore che identifica il tipo di curva di deflusso (1 per i connettori, 2=BPR, 4=Doherty, 5=Doherty casello);
- 6) IDXCDEFL: è un codice numerico che identifica la curva di deflusso;
- 7) COEFF1: vale -1 per le BPR e le Doherty, è uguale alla velocità a carico per le Doherty casello;
- 8) COEFF2: per le BPR contiene i coefficienti della funzione, per la Doherty vale -1, per la Doherty casello contiene il numero di caselli;
- 9) COEFF3: per le BPR contiene i coefficienti della funzione, per la Doherty e la Doherty casello vale -1;
- 10) COEFF4: contiene il parametro  $t^*$  che tiene conto dell'eventuale tempo aggiuntivo da scontare.

---

16

Avendo costruito la base dati come descritto si è configurato lo scenario di assegnazione, si è scelto cioè il tipo di assegnazione di traffico da eseguire (DUE o SUE), si sono caricati i file di input e definiti i file di output (ARCHIRIS.DBF) e si sono fissati i valori dei parametri (numero di iterazioni, soglia di arresto dell'algoritmo e soglia di confronto) dell'assegnazione.

A valle di quanto descritto si è lanciato il modulo T.Road.

I risultati dell'assegnazione di traffico effettuata per la situazione attuale con il modello di offerta costruito come descritto, hanno imposto una verifica dello stesso.

Mediante la grafica interattiva di T.Road si è proceduto ad una analisi dei dati di input:

- capacità
- velocità a flusso nullo
- numero di corsie

nonché ad una valutazione degli output dell'assegnazione:

- distribuzione dei flussi
- grado di saturazione, ovvero rapporto tra i flussi che percorrono l'arco e la capacità dello stesso;
- velocità di percorrenza dell'arco
- tempi di percorrenza su rete

Infine la visualizzazione dei minimi percorsi a flusso nullo per zone di traffico dell'area di studio ritenute significative ha consentito un'ulteriore valutazione circa la validità del modello di offerta.

## 4 ANALISI DEI MODELLI DI CALCOLO

Per l'analisi di alcune intersezioni, è stato calcolato il livello di servizio, con i metodi riportati di seguito:

### 4.1 Livello di servizio delle intersezioni semaforizzate

La regolazione semaforica è adottata per gli incroci urbani caratterizzati da flussi rilevanti, cioè tali da non consentire l'adozione di una regolazione basata sulle usuali regole di precedenza, ovvero con regole di priorità.

La funzione principale dell'impianto semaforico è di fermare ciclicamente, per un certo tempo, il deflusso delle correnti veicolari in avvicinamento all'intersezione per consentire il passaggio dei veicoli, sfalsandolo nel tempo ed evitando, se possibile, i punti di conflitto delle traiettorie veicolari e/o dei veicoli con i pedoni.

Un'intersezione semaforizzata consente di:

- aumentare la sicurezza dell'incrocio;
- contenere i ritardi di attesa all'intersezioni;
- ridurre la lunghezza delle code evitando il diffondersi della congestione.

Il livello di servizio per le intersezioni semaforizzate è definito in termini di "ritardo di fermata medio per veicolo". Il ritardo è una misura del discomfort, del consumo di carburante e del tempo impiegato nello spostamento.

Livello di servizio	Ritardo medio di fermata per veicolo (sec)
A	$\leq 5,0$
B	$> 5,0$ e $\leq 15,0$
C	$> 15,0$ e $\leq 25,0$
D	$> 25,0$ e $\leq 40,0$
E	$> 40,0$ e $\leq 60,0$
F	$> 60$

*Livello di servizio all'intersezione in funzione del ritardo*

Di seguito viene descritto il funzionamento dell'intersezione in corrispondenza dei vari livelli di servizio:

- Livello di servizio A. Il ritardo medio all'intersezione è molto basso (meno di 5.0 secondi per veicolo). Tale LdS si ha quando la progressione è molto favorevole e la maggior parte dei veicoli arrivano durante la fase di verde; la maggior parte dei veicoli non si arresta all'intersezione.
- Livello di servizio B. Il ritardo medio è compreso tra 5 e 15 secondi per veicolo. Ciò si ha in genere in corrispondenza di una buona progressione e/o durate brevi del ciclo. Si arrestano più veicoli rispetto al LdS A.
- Livello di servizio C. Il ritardo medio è compreso tra 15 e 25 secondi per veicolo. Questi ritardi più elevati possono essere dovuti ad una discreta progressione e/o durate del ciclo maggiori. Si possono presentare casi in cui la fila non è smaltita all'interno di un solo ciclo. Il numero di veicoli che si arresta all'intersezione è significativo, tuttavia ancora molti veicoli attraversano l'intersezione senza arrestarsi.
- Livello di servizio D. Il ritardo medio è compreso tra 25 e 40 secondi per veicolo; l'influenza della congestione comincia a notarsi. Molti veicoli si arrestano e diminuisce il numero di quelli che possono attraversare l'intersezione senza farlo. Sono frequenti i casi in cui la fila non viene smaltita all'interno dello stesso ciclo.
- Livello di servizio E. Il ritardo medio per veicolo è compreso tra i 40 e i 60 secondi; quest'ultimo è considerato il limite di un ritardo accettabile. Sono molto frequenti i casi in cui i veicoli in coda non riescono ad essere smaltiti nel tempo di un ciclo;
- Livello di servizio F. Il ritardo medio supera i 60 secondi per veicolo; ciò viene considerato inaccettabile dalla maggior parte dei conducenti.

La procedura per valutare il livello di servizio di una intersezione semaforizzata considera i singoli accessi dell'intersezione e, all'interno di ciascuno di essi, singoli gruppi di corsie. Un gruppo di corsie è definito come una o più corsie di un accesso all'intersezione che servono una o più correnti di traffico.

La procedura per la determinazione del livello di servizio è articolata in 4 fasi:

- a. Dati di input;
- b. Flusso di saturazione;
- c. Analisi della capacità;
- d. Livello di Servizio.

### Dati di input

Vengono acquisiti i dati necessari per l'esecuzione della procedura. Tali dati sono classificati in tre categorie:

- Geometria: numero di corsie, larghezza delle corsie, pendenza dell'accesso, ecc.;

- Traffico: volumi per manovra, percentuale di veicoli pesanti, autobus che si fermano in prossimità dell'intersezione, ecc.;
- Segnalamento: durata del ciclo, tempi di verde, tutto rosso, ecc.

### Flusso di saturazione

In questa fase si determina il flusso di saturazione di ciascun gruppo di corsie nelle condizioni prevalenti di geometria, traffico e segnalamento, che si hanno in ciascuno di essi.

Per calcolare il flusso di saturazione si parte da un valore ideale che viene modificato mediante una serie di fattori correttivi, i quali rispecchiano le effettive condizioni, geometriche e di traffico, del gruppo di corsie in esame:

$$s = s_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{RT} \cdot f_{LT}$$

dove:

$s$  = flusso di saturazione di un gruppo di corsie, espresso come totale per tutte le corsie del gruppo, sotto le condizioni prevalenti, calcolato in veicoli per ora di verde effettivo;

$s_0$  = flusso di saturazione ideale per corsia, pari a 1900 autovetture equivalenti per ora di verde effettivo per corsia;

$N$  = numero di corsie del gruppo;

$f_w$  = fattore correttivo per larghezza corsie non ideale;

$f_{HV}$  = fattore correttivo per la presenza di mezzi pesanti;

$f_g$  = fattore correttivo per la pendenza dell'accesso non nulla;

$f_p$  = fattore correttivo per la presenza di manovre di parcheggio;

$f_{bb}$  = fattore correttivo per la presenza di fermate di autobus;

$f_a$  = fattore correttivo per la localizzazione dell'intersezione;

$f_{RT}$  = fattore correttivo per svolte a destra nel gruppo di corsie;

$f_{LT}$  = fattore correttivo per svolte a sinistra nel gruppo di corsie.

I valori dei fattori correttivi si leggono in apposite tabelle, costruite sulla base di osservazioni sperimentali.

### Analisi di capacità

Vi sono due diversi percorsi attraverso cui eseguire questa fase, a seconda se sono noti o meno i tempi della semaforizzazione, cioè se essi risultano essere dati di input oppure devono essere determinati.

I vari passi della procedura sono di seguito descritti.

### Passo 1) Calcolo dell'indice di criticità $I_c$

Il primo passo dell'analisi di capacità è il calcolo dell'indice di criticità,  $I_c=f/s$ , tra il volume di domanda e il flusso di saturazione, per ogni gruppo di corsie dell'intersezione.

### Passo 2) Individuazione dei gruppi di corsie critici

I gruppi di corsie critici sono quelli che presentano il flusso più intenso tra i gruppi. L'intensità del flusso è misurata dal rapporto  $f/s$ .

### Passo 3) Calcolo del ciclo semaforico (se non già fissato)

Il segnale emesso da un semaforo può essere di tre tipi:

- luce verde: indica "via libera";
- luce gialla: indica che i veicoli che sopraggiungono devono fermarsi, se sono in condizioni di sicurezza per farlo, altrimenti devono liberare al più presto l'intersezione;
- luce rossa: i veicoli devono arrestarsi.

Il ciclo semaforico è una sequenza completa di segnali.

È detta "fase" la frazione di un ciclo che assegna ad alcuni gruppi di correnti simultaneamente il segnale di luce verde.

La durata del ciclo è l'intervallo di tempo necessario per completare un ciclo semaforico:

- durata minima = 30 s;
- durata media = 50-75 s;
- durata massima = 90-120 s.

Per il calcolo del ciclo ci si riferisce al metodo proposto da Webster che consente di ottenere la durata del ciclo ed i tempi di verde partendo dall'ipotesi che ciascuna fase sia rappresentata da una sola corrente, quella per cui è massimo il rapporto tra il volume in arrivo  $f$  ed il relativo flusso di saturazione  $s$ . Nel caso in cui si abbiano più corsie in ogni accesso, ognuna riservata ad una manovra effettuata nella fase considerata, occorre considerare la portata di arrivo e il flusso di saturazione della corsia per cui il rapporto  $f/s$  sia massimo.

Il valore della durata del ciclo che rende minimo il ritardo totale all'intersezione è viene calcolato con la seguente formula:

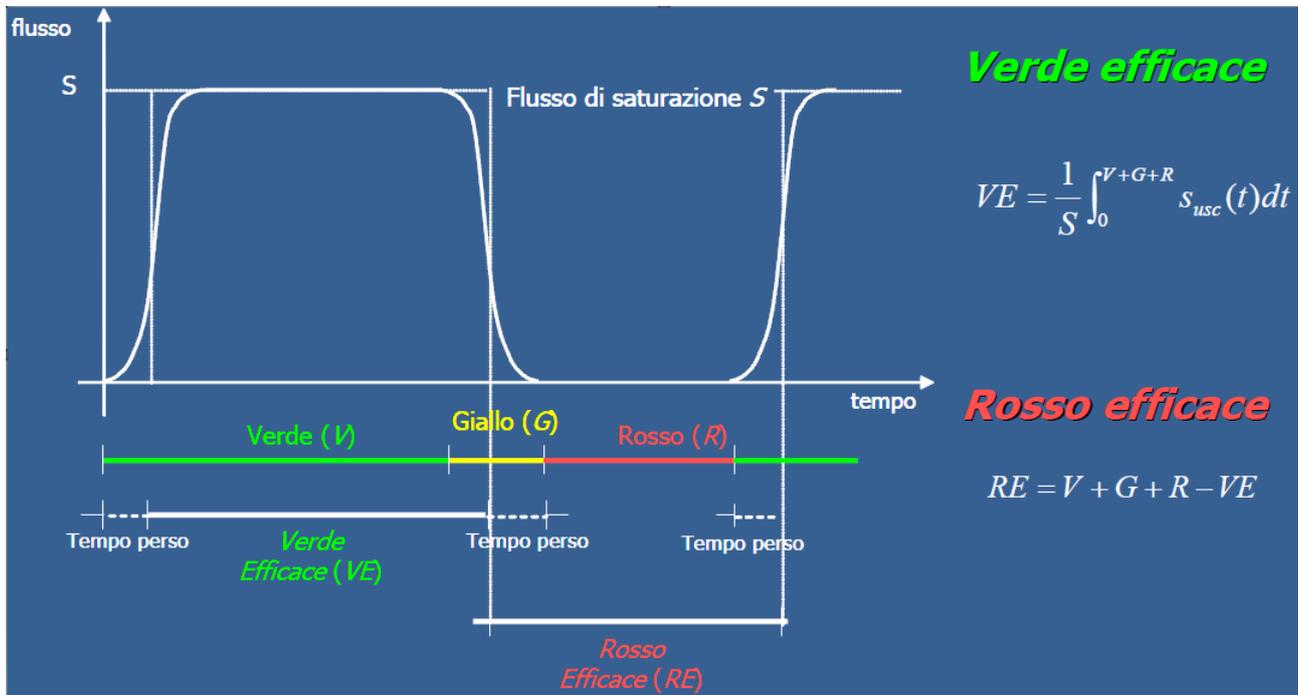
$$C = \frac{1.5 \cdot \sum_{i=1}^n l_i + 5}{1 - \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{s_i}} \quad (\text{sec})$$

dove:

$l_i$  è il tempo perso dalle correnti rappresentative di ogni accesso alla generica fase  $i$  (sec), posto pari a 4 sec.

I tempi di verde efficace sono ottenuti grazie al principio di equisaturazione:

$$V_{Ei} = \frac{f_i/S_i}{\sum_{i=1}^n f_i/S_i} \cdot (C - \sum_{i=1}^n l_i)$$



*Passo 4) Calcolo della capacità del gruppo di corsie*

Fissata la durata del ciclo semaforico ed i tempi di verde effettivo assegnati ad ogni fase, la capacità di ogni gruppo di corsie può essere ottenuta come:

$$c_i = s_i \cdot \left(\frac{g_i}{C}\right)$$

*Passo 5) Calcolo del rapporto f/c critico per i gruppi di corsie e per l'intersezione*

Il rapporto critico per il gruppo di corsie i-esimo viene calcolato come:

$$X_i = \frac{f_i}{c_i}$$

**4.2 Determinazione del livello di servizio**

Il livello di servizio di una intersezione semaforizzata è connesso al ritardo medio di fermata per veicolo.

$$d = d_1 \cdot CF + d_2$$

$$d_1 = 0.38 \cdot C \cdot \frac{[1 - (\frac{g}{C})]^2}{[1 - (\frac{g}{C}) \cdot \min(X, 1.0)]}$$

$$d_2 = 173 \cdot X^2 \cdot [(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{m \cdot X}{c}}]$$

d = ritardo medio di fermata per veicolo (sec/veic);

$d_1$  = ritardo uniforme (sec/veic);

$d_2$  = ritardo incrementale (sec/veic);

CF = fattore di correzione;

m = coeff. di calibrazione che tiene conto del tipo di arrivo e dell'entità dei plotoni di veicoli; in particolare:

Tipo 1. Arrivo di un plotone denso all'inizio della fase di rosso; condizione peggiore → m=8;

Tipo 2. Arrivo di un plotone moderatamente denso a metà della fase di rosso o arrivo di un plotone sparso durante tutta la fase di rosso → m=12;

Tipo 3. Arrivi casuali; i veicoli arrivano durante le fasi di verde e di rosso in proporzione alla loro durata; condizione media → m=16;

Tipo 4. Arrivo di un plotone moderatamente denso a metà della fase di verde o di un plotone sparso, contenente dal 40 all'80% del volume del proprio gruppo di corsie, durante tutta la fase di verde; condizione mediamente favorevole → m=12;

Tipo 5. Arrivo di un plotone denso, contenente oltre l'80% del volume del gruppo di corsie all'inizio della fase di verde; condizione molto favorevole → m=8;

Tipo 6. Questo tipo di arrivo è rappresentativo di una progressione eccezionale, su strade con progressioni quasi ideali → m=4.

22

Il termine  $d_1$  rappresenta il ritardo per arrivi uniformi, mentre il termine  $d_2$  tiene conto del fatto che tali arrivi non sono uniformi.

Calcolato il ritardo d per ogni gruppo di corsie, si ottiene il livello di servizio di ciascun gruppo.

Si può poi calcolare il ritardo medio dell'accesso (media pesata dei ritardi dei gruppi di corsie che lo costituiscono) e dell'intersezione (media pesata dei ritardi degli accessi), come segue:

$$d_A = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

$$d_I = \frac{\sum_{A=1}^n d_A \cdot f_A}{\sum_{A=1}^n f_A}$$

dove:

$d_i$  = ritardo per il gruppo di corsie i;

$d_A$  = ritardo per l'accesso A;

$d_i$  = ritardo per l'intersezione;

$f_i$  = flusso per il gruppo di corsie  $i$ ;

$f_A$  = flusso per l'accesso A.

### 4.3 Livello di servizio delle intersezioni urbane non semaforizzate

Nelle intersezioni regolate con diritto di precedenza per una delle due strade (strada principale) un veicolo percorrente la strada secondaria, che vuole immettersi o attraversare la strada principale, deve attendere che si presenti un "distanziamento temporale" tra due veicoli successivi (gap) sufficiente allo scopo; la stessa cosa dovrà fare un veicolo della strada principale che vuole svoltare a sinistra.

La capacità dell'accesso della strada secondaria dipende dalla distribuzione dei gap disponibili nel flusso della strada principale, e dalla ampiezza dei gap che sono accettati dai veicoli della strada per effettuare le volute manovre.

Essendo diverse le manovre che possono essere effettuate all'intersezione viene stabilita una priorità tra esse, in modo tale che, quando è disponibile un gap, esso viene utilizzato dal veicolo tra quelli in attesa la cui manovra è prioritaria rispetto alle altre; l'ordine di priorità si basa sulla difficoltà relativa tra le varie manovre ed è il seguente:

- Manovre di Rango  $r = 1$  → attraversamento sulla strada principale e svolta a destra dalla strada principale. Indicate con pedice  $i$ ;
- Manovre di Rango  $r = 2$ , subordinate alle manovre di rango 1 → svolta a sinistra dalla strada principale e svolta a destra dalla secondaria nella strada principale. Indicate con pedice  $j$ ;
- Manovre di Rango  $r = 3$ , subordinate alle manovre di rango 1 e 2 → attraversamento sulla strada secondaria (nel caso di intersezione a 4 bracci) e svolta a sinistra dalla strada secondaria (nel caso di intersezione a T). Indicate con pedice  $k$ ;
- Manovre di Rango  $r = 4$ , subordinate a tutte le altre manovre → svolta a sinistra dalla strada secondaria (nel caso di intersezione a 4 bracci). Indicate con pedice  $l$ .

Di seguito è riportata la procedura sviluppata dall'HCM per il calcolo del livello di servizio di una intersezione non semaforizzata tra una strada principale ed una secondaria.

#### Procedura di calcolo

La metodologia di calcolo è strutturata nei seguenti passaggi:

- 1) Definizione della geometria attuale e delle condizioni di traffico dell'intersezione oggetto di studio.
- 2) Calcolo del volume di conflitto attraverso il quale ogni manovra della strada secondaria, e la svolta a sinistra sulla strada principale, deve passare.
- 3) Calcolo della dimensione del gap necessario affinché i veicoli che devono effettuare manovre all'intersezione possano attraversare i flussi con essi in conflitto.
- 4) Calcolo della capacità dei gap nei flussi di traffico principali in grado di accogliere ognuna delle manovre subordinate che userà gli stessi gap.
- 5) Correzione delle capacità calcolate per tener conto dei fattori di impedenza e delle corsie condivise.
- 6) Stima del ritardo totale medio di ognuna delle manovre subordinate e determinazione del livello di servizio per ogni manovra e per l'intersezione.

### Dati di input

I dati richiesti per poter sviluppare la procedura riguardano il tipo di controllo previsto ("STOP" o "dare precedenza"), i volumi di traffico (previsti o misurati), la loro composizione, il tipo di manovra effettuato, la velocità del flusso dei veicoli sulla strada principale e la geometria completa dell'intersezione; quest'ultima deve includere:

- canalizzazioni;
- numero e senso di marcia delle corsie;
- pendenza degli accessi.

### Calcolo del volume di conflitto

Il "volume di conflitto"  $V_{c,x}$  è il volume di traffico con il quale la manovra  $x$  entra in conflitto; esso è il volume all'interno del quale dovranno essere ricercati i gap necessari per poter effettuare la manovra.

Il calcolo del volume di conflitto, in veicoli per ora, viene effettuato come riportato in figura seguente; in essa la linea in grassetto indica la manovra in questione, mentre le altre linee indicano le manovre che entrano in conflitto con essa.

Manovra	Volume di conflitto $V_{c,x}$	Figure
1. Svolta a dx. dalla strada secondaria. ( $V_{c,9}$ )	$1/2(V_3)^2 + V_2^2$	
2. Svolta a sinistra dalla strada principale. ( $V_{c,4}$ )	$V_2 + V_3^2$	
3. Attraversamento dalla strada secondaria. ( $V_{c,8}$ )	$1/2(V_3)^2 + V_2 + V_1 + V_6^2 + V_5 + V_4$	
4. Svolta a sx. dalla strada secondaria. ( $V_{c,7}$ )	$1/2(V_3)^2 + V_2 + V_1 + 1/2(V_6)^2 + V_5 + V_4 + 1/2(V_{11} + V_{12}^2)$	
5. Svolta a dx. dalla strada secondaria. ( $V_{c,12}$ )	$1/2(V_6)^2 + V_5^2$	
6. Svolta a sinistra dalla strada principale. ( $V_{c,1}$ )	$V_5 + V_6^2$	
7. Attraversamento dalla strada secondaria. ( $V_{c,11}$ )	$1/2(V_6)^2 + V_5 + V_4 + V_3^2 + V_2 + V_1$	
8. Svolta a sx. dalla strada secondaria. ( $V_{c,10}$ )	$1/2(V_6)^2 + V_5 + V_4 + 1/2(V_3)^2 + V_2 + V_1 + 1/2(V_8 + V_9^2)$	

- 1) Quando è prevista una corsia per la svolta a destra sulla strada principale, e/o quando V6 è controllato da STOP o "dare precedenza", e/o la strada principale è multicorsia, non si tiene conto di V6.
- 2) Quando è prevista una corsia per la svolta a destra sulla strada principale e/o quando V6 è controllato da STOP o "dare precedenza" non si tiene conto di V6.
- 3) V5 comprende solo il volume della corsia di destra.
- 4) Quando la svolta a destra è controllata da STOP o "dare precedenza" eliminare V6, V3.
- 5) V9 dovrebbe essere eliminato per le strade principali multicorsia.
- 6) Quando è prevista una corsia per la svolta a destra sulla strada principale, e/o quando V3 è controllato da STOP o "dare precedenza", e/o la strada principale è multicorsia, non si tiene conto di V3.

Un veicolo che svolta a destra dalla strada secondaria si immette nella corsia di destra della strada principale, per cui il gap sufficiente alla manovra deve essere ricercato nel flusso di questa corsia; il volume di conflitto è dato, allora, dal volume che interessa solo la corsia di destra della strada principale e che prosegue dritto; a questo va aggiunto la metà del volume che svolta a destra dalla

strada principale nella secondaria, perché non tutti i veicoli che effettuano tale manovra utilizzano l'indicatore di direzione, ed alcuni mantengono una velocità tale da indurre il conducente in attesa all'intersezione a ignorare o rifiutare dei gap sufficienti.

La manovra di svolta a sinistra dalla strada principale entra in conflitto con il flusso della strada principale che, nel verso opposto, attraversa l'intersezione e con quello che, sempre in verso opposto, svolta a destra; il volume di conflitto è dato dalla somma dei suddetti termini.

Un veicolo della strada secondaria che attraversa l'intersezione entra in conflitto con i flussi di traffico che eseguono le seguenti manovre: attraversamento dell'intersezione da parte dei veicoli che percorrono la strada principale, per entrambi i sensi di marcia; svolta a sinistra e a destra dalla strada principale dei veicoli che percorrono le corsie della semicarreggiata più lontana; svolta a sinistra dalla strada principale dei veicoli che percorrono la semicarreggiata più vicina. Il volume di conflitto è dato dalla somma dei suddetti termini, ai quali va aggiunto metà del flusso che effettua la svolta a destra dalla semicarreggiata più vicina, per i motivi visti prima.

La svolta a sinistra dalla strada secondaria è la manovra più complessa. Le manovre con cui si entra in conflitto sono:

- attraversamento dei flussi sulla strada principale per entrambi i sensi di marcia;
- svolta a sinistra dalla strada principale per entrambi i sensi di marcia;
- svolta a destra e attraversamento da parte dei veicoli della strada secondaria che si trovano sul lato opposto dell'intersezione (perdendone metà).

26

Per ottenere il volume di conflitto si sommano ai flussi che eseguono le manovre suddette anche la metà dei flussi che svoltano a destra dalla strada principale.

### Calcolo del gap critico e della capacità potenziale

Il "gap critico"  $t_g$  è definito come la dimensione media del distanziamento temporale che viene accettato dal conducente in una data situazione.

Il suddetto valore varia nella realtà da utente ad utente, e, a seconda delle situazioni, anche per lo stesso utente.

Il tempo che intercorre tra la partenza di un veicolo dall'accesso all'intersezione e la partenza del veicolo successivo, in caso di veicoli in coda, viene detto "follow-up-time"  $t_f$ .

La tabella seguente riporta i valori di  $t_g$  e  $t_f$ ; tali valori sono stati ricavati per via sperimentale e sono validi per autovetture.

Gap critico $t_g$ (sec)			
Manovra	Strada principale a due corsie	Strada principale a quattro corsie	Follow-up time $t_f$ (sec)
Svolta a sinistra, strada principale	5,0	5,5	2,1
Svolta a destra, strada secondaria	5,5	5,5	2,6
Attraversamento, strada secondaria	6,0	6,5	3,3
Svolta a sinistra, strada secondaria	6,5	7,0	3,4

Gap critico e Follow-up time per tipologia di manovra

La “capacità potenziale” è la capacità ideale di una data manovra, quando vi sono le seguenti condizioni:

- il flusso di traffico sulla strada principale non blocca la strada secondaria;
- ogni manovra della strada secondaria e le manovre di svolta a sinistra dalla strada principale hanno a loro disposizione una corsia esclusiva;
- nessun'altra manovra di rango 2, 3 o 4 impedisce la suddetta manovra.

27

Essa viene calcolata con la seguente formula:

$$c_{p,x} = \frac{3600}{t_f} \times e^{-\frac{[V_{c,x}]t_0}{3600}}$$

dove:

$c_{p,x}$  = capacità potenziale della manovra secondaria x [veic equi./h];

$V_{c,x}$  = volume di conflitto della manovra x [veic/h];

$t_0 = t_g - (t_f/2)$ ;

$t_g$  = gap critico [sec];

$t_f$  = follow-up time (tempo che intercorre tra la partenza di un veicolo dalla strada secondaria e la partenza del successivo, nella condizione di veicoli in coda) [sec].

### Fattori di impedenza

Il calcolo della capacità potenziale, così come effettuata al punto precedente, non tiene conto che un veicolo in attesa all'intersezione a volte non può sfruttare un gap sufficiente alla sua manovra, se vi sono veicoli che devono effettuare manovre prioritarie alla sua.

In pratica la capacità potenziale è la capacità della manovra in questione se essa fosse l'unica ad essere svolta all'intersezione, e quindi avesse a sua disposizione tutti i gap che si presentano nel flusso principale.

Nella realtà capita che un veicolo che deve effettuare una manovra di rango basso (ad esempio 3 o 4), risulta impedito dai veicoli che, contemporaneamente, effettuano manovre di rango superiore.

Per tale motivo si calcola la **capacità effettiva** di manovra  $c_{m,x}$ .

Si assume che le manovre di rango 1 non siano influenzate dalle manovre di rango inferiore, cioè che i veicoli del flusso di traffico principale non subiscano ritardi a seguito delle manovre effettuate alle intersezioni dagli altri veicoli.

I flussi di traffico di rango 2 devono dare la precedenza solo ai flussi di attraversamento e di svolta a destra della strada principale (rango 1). Per questo motivo non vi sono impedenze addizionali per cui si ha:

$$C_{m,j} = C_{p,j}$$

dove j indica le manovre di rango 2.

Le manovre di rango 3 non solo devono dare la precedenza ai flussi principali (rango 1), ma entrano in conflitto anche con la manovra di svolta a sinistra sulla strada principale (rango 2). Per questo motivo non tutti i gap di dimensione accettabile possono essere utilizzati, in quanto alcuni vengono sfruttati dalla manovra prioritaria di rango 2. L'influenza di questo fattore è tanto maggiore quanto maggiore è la probabilità che vi siano veicoli della strada principale in coda che effettuino la suddetta manovra; la probabilità che non vi siano veicoli in coda è data da:

$$P_{0,j} = 1 - \frac{V_j}{C_{m,j}}$$

dove j = 1, 4 (svolte a sinistra di rango 2).

La capacità di manovra  $c_{m,k}$  di tutte le manovre di rango 3 si ottiene moltiplicando la capacità potenziale  $c_{p,k}$  per un fattore correttivo  $f_k$  dato da:

$$f_k = \prod_j (p_{0,j})$$

Si ha quindi:

$$c_{m,k} = c_{p,k} \times f_k$$

Le manovre di rango 4 (cioè le svolte a sinistra dalla strada secondaria in una intersezione a 4 bracci) sono potenzialmente impedito dalle code di tre flussi di traffico di rango più elevato:

- flussi che svoltano a sinistra dalla strada principale (rango 2);
- flussi di attraversamento sulla strada secondaria (rango 3);
- flussi che svoltano a destra dalla strada secondaria (rango 2).

Anche in questo caso i fattori di impedenza sono legati alle probabilità che vi siano veicoli in attesa di effettuare le suddette manovre prioritarie; non essendo, però, tali probabilità indipendenti tra loro, il calcolo della capacità di manovra viene così effettuato:

$$c_{m,l} = c_{p,l} \times f_l$$

dove il fattore di correzione è così calcolato:

$$f_l = (p') \times (p_{0,j})$$

e

$$p' = 0,65 \cdot p'' - \frac{p''}{p'' + 3} + 0,6\sqrt{p''}$$

con

$$p'' = (p_{0,j}) \times (p_{0,k})$$

### Capacità promiscua della corsia

Fino a questo punto si è assunto che ogni manovra avesse a disposizione una corsia a suo esclusivo servizio. In realtà una corsia "h" della strada secondaria può essere a servizio di più tipi di manovra; nel caso più comune sono consentite tre manovre: svolta a sinistra (LT), attraversamento (TH) e svolta a destra (RT).

La capacità promiscua della corsia "h" è data da:

$$c_{sh} = \frac{V_{lt} + V_{th} + V_{rt}}{\frac{V_{lt}}{c_{mlt}} + \frac{V_{th}}{c_{mth}} + \frac{V_{rt}}{c_{mrt}}}$$

dove:

$V_{lt}$ ,  $V_{th}$  e  $V_{rt}$  sono i volumi che effettuano le singole manovre;

$c_{mlt}$ ,  $c_{mth}$  e  $c_{mrt}$  sono le capacità di manovra delle singole manovre.

### Livelli di servizio

Il "livello di servizio" di una intersezione non semaforizzata è correlato al ritardo medio per veicolo all'intersezione come riportato nella tabella B1.2.

Livello di servizio	Ritardo totale medio [sec/veic]
A	$\leq 5$
B	$> 5$ e $\leq 10$
C	$> 10$ e $\leq 20$
D	$> 20$ e $\leq 30$
E	$> 30$ e $\leq 45$
F	$> 45$

Livelli di servizio

La formula per il calcolo del ritardo è la seguente:

$$D = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \left[ \frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)\left(\frac{V_x}{c_{m,x}}\right)}{450T}} \right]$$

dove:

D = ritardo totale medio [sec/veic]

$V_x$  = volume per la manovra x, espresso come tasso di flusso orario

$c_{m,x}$  = capacità di manovra x, espressa come tasso di flusso orario

T = periodo dell'analisi [h]

30

Il ritardo così calcolato è relativo ad una singola manovra; il ritardo medio per un accesso è ottenuto come media pesata dei ritardi delle manovre ad esso relativi: esso consente di valutare il livello di servizio dell'accesso.

$$D_A = \frac{D_r V_r + D_t V_t + D_l V_l}{V_r + V_t + V_l}$$

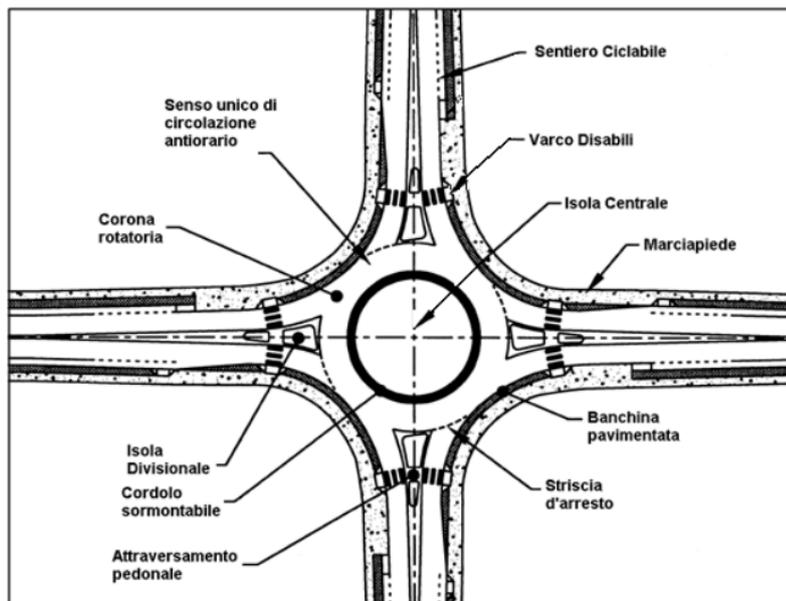
Analogamente il ritardo medio dell'intersezione, che consente di valutare il livello di servizio della stessa, è dato dalla media pesata dei ritardi dei diversi accessi.

$$D_I = \frac{D_{A,1} V_{A,1} + D_{A,2} V_{A,2} + D_{A,3} V_{A,3} + D_{A,4} V_{A,4}}{V_{A,1} + V_{A,2} + V_{A,3} + V_{A,4}}$$

#### 4.4 Livello di servizio delle rotatorie

La **rotatoria** è un tipo di intersezione a raso caratterizzata dalla presenza di un'area centrale circolare, circondata da un anello (corona rotatoria o corona giratoria) percorribile a senso unico in senso antiorario.

Essa assolve alla funzione di moderazione e snellimento del traffico.



Di seguito si riportano le definizioni dei singoli elementi:

- **Corona rotatoria:** si intende la carreggiata che circonda l'isola centrale, ad una o più corsie, percorsa dai veicoli in senso antiorario.
- **Isola centrale:** è la parte più interna del sistema a rotatoria, generalmente di tipo non valicabile e di forma circolare. La dimensione dell'isola centrale è influenzata dalla necessità di ottenere una sufficiente deviazione per i veicoli che attraversano diametralmente la rotatoria.
- **Fascia valicabile:** generalmente è presente nelle rotatorie di piccolo diametro ed è una corona circolare che circonda l'isola centrale. Tale fascia serve a facilitare le manovre dei mezzi pesanti lungo l'anello, può essere semplicemente disegnata con segnaletica orizzontale, oppure pavimentata con materiale lapideo, diverso dalla pavimentazione dell'anello.
- **Braccio:** rappresenta quella porzione di asse stradale che converge verso l'anello.
- **Entrata:** è la parte terminale della carreggiata di ogni singolo braccio che viene utilizzata per entrare nella rotatoria. L'entrata è separata dall'anello dalla segnaletica orizzontale di dare la precedenza.
- **Uscita:** è la parte di carreggiata di ogni singolo braccio che viene utilizzata per uscire dalla rotatoria. L'uscita non risulta mai separata dall'anello con segnaletica orizzontale.

- *Isola divisionale*: è una piattaforma costruita su un ramo d'intersezione tra la corsia in entrata e quella di uscita. In alcuni casi può servire da rifugio ai pedoni e costringe i veicoli ad una deflessione dalla loro traiettoria. In ambito urbano, se manca lo spazio, oppure se si tratta di sbocchi di vie con poco traffico, le isole di separazione talvolta sono limitate ad una semplice segnaletica orizzontale.

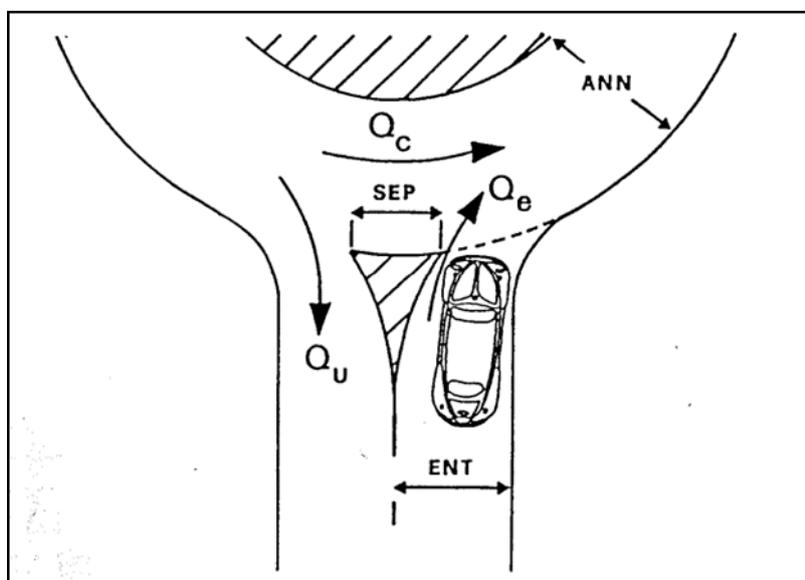
Per le rotonde viene adottato come parametro caratteristico la *capacità delle entrate*. Si definisce capacità dell'entrata il più piccolo valore del flusso sul ramo d'ingresso che determina la presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi. Questo valore del flusso dipende dal flusso che percorre l'anello, e quindi dall'insieme dei flussi in ingresso e in uscita da tutti i bracci della rotonda.

### Metodo del SETRA

Il metodo di stima della capacità di un'entrata in rotonda ha alla base le indagini condotte a partire dalla seconda metà degli anni Ottanta dai CETE di Nantes, di Metz e di Rouenne ed elaborate dal SETRA.

Il metodo del SETRA fa intervenire nel calcolo della capacità, oltre al traffico che percorre l'anello in corrispondenza di un'immissione, anche il traffico che si allontana all'uscita immediatamente precedente; per cui definisce una relazione lineare fra capacità e un traffico complessivo di disturbo

$Q_d$ , nel quale intervengono sia il flusso che percorre l'anello sia quello in uscita precedentemente definito.



Elementi caratteristici di una rotonda

Dove:

- $Q_c$  è il flusso che percorre l'anello all'altezza dell'immissione;

- $Q_e$  è il flusso entrante;
- $Q_u$  è il flusso uscente;
- SEP è la larghezza dell'isola spartitraffico all'estremità del braccio;
- ANN è la larghezza dell'anello;
- ENT è la larghezza della semicarreggiata del braccio misurata dietro il primo veicolo fermo all'altezza della linea del "dare precedenza".

Tutte le lunghezze sono misurate in metri. La capacità e i flussi sono espressi in autovetture equivalenti per ora (veq/h).

Sia C la capacità del braccio, ossia il minimo valore di  $Q_e$  che dà luogo alla presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi; il metodo del SETRA definisce C come funzione delle caratteristiche geometriche e di traffico innanzi definite:  $C = f(Q_u, Q_c, SEP, ANN, ENT)$ .

Nota la matrice M origine/destinazione, la procedura di calcolo della capacità si articola nei tre passi seguenti:

1. Calcolo del traffico uscente equivalente  $Q_u'$  in funzione di  $Q_u$  e di SEP:

$$Q_u' = Q_u \cdot (15 - SEP) / 15$$

Assumendo  $Q_u' = 0$  se  $SEP \geq 15m$ .

2. Determinazione del traffico complessivo di disturbo  $Q_d$  in funzione di  $Q_c$ , di  $Q_u'$  e di ANN:

$$Q_d = (Q_c + 2/3 \cdot Q_u') \cdot [1 - 0.085 \cdot (ANN - 8)]$$

3. Calcolo della capacità dell'entrata C mediante la relazione:

$$C = (1330 - 0.7 \cdot Q_d) \cdot [1 + 0.1 \cdot (ENT - 3.5)]$$

Il parametro geometrico più rilevante per il calcolo della capacità è la larghezza dell'entrata (ENT) ed in particolare lo scarto di ENT rispetto ad una larghezza standard di 3.5m. La larghezza dell'anello (ANN) influisce sul valore della capacità attraverso la relazione che esso ha con l'azione di disturbo prodotta dal traffico che percorre l'anello. L'influenza del traffico in uscita sull'azione di disturbo è invece determinata dalla larghezza SEP dell'isola spartitraffico: tale influenza è nulla quando  $SEP \geq 15m$ .

Tenendo conto di ciò, si usa definire un flusso entrante equivalente  $Q_e'$ , il quale eguaglia la capacità di un braccio largo 3.5m quando questa viene raggiunta dal flusso  $Q_e$  su un braccio della rotatoria avente la larghezza effettiva ENT:

$$Q_e' = Q_e / [1 + 0.1 \cdot (ENT - 3.5)]$$

Il metodo di calcolo della capacità descritto è stato messo a punto utilizzando i dati raccolti in una estesa campagna di indagini eseguite su rotatorie sia urbane che extraurbane. Per questo motivo si può ritenere che il metodo esposto sia valido per entrambi i tipi di rotatorie.

La differenza tra la capacità dell'entrata C e il flusso in ingresso Qe è definita riserva di capacità RC dell'entrata:

$$RC = (0.8 \cdot C) - Q_e$$

e in termini percentuali:

$$RC(\%) = (0.8 \cdot C - Q_e) / (0.8 \cdot C)$$

La riserva di capacità permette di fare una valutazione sul funzionamento della rotatoria in termini di livello di servizio e quindi stimare gli effetti che l'intersezione avrà sui flussi veicolari.

Nella seguente tabella è riportata la condizione di esercizio della rotatoria in funzione della riserva di capacità RC(%).

Riserva di capacità %	Condizioni di esercizio
RC > 30%	Fluida
15 < RC ≤ 30%	Soddisfacente
0 < RC ≤ 15%	Aleatorio
RC ≤ 0%	Saturo/Critico

*Riserva di Capacità e condizioni di esercizio*

Per la progettazione delle rotatorie, le norme francesi indicano come corretta una riserva di capacità tra il 25% e l'80%. Un valore troppo elevato di RC su un'entrata principale deve indurre a verificare se la sua larghezza (o il numero delle corsie) non sia sovradimensionata. Se tutte le entrate hanno una riserva di capacità molto ampia, si può arrivare talvolta a ridurre la larghezza dell'anello. Se la riserva di capacità è esigua (dal 5% al 25%) occorrerà fare attenzione ai tempi di attesa e alla lunghezza delle code che potranno formarsi.

Se invece RC(%) è inferiore al 5% (e a maggior ragione se negativa) sono da temere forti perturbazioni, quindi sarà necessario adottare soluzioni tendenti a migliorare la capacità quali: allargamento delle entrate, allargamento dell'anello, aumento del raggio della rotatoria, creazione di una via diretta di svolta a destra.

Nel caso in cui questi accorgimenti risultassero non praticabili o insufficienti sarà necessario adottare un altro tipo di intersezione, eventualmente a livelli sfalsati.

### Verifica del Livello di Servizio

Il livello di servizio di una rotatoria è correlato al ritardo medio veicolare all'intersezione come riportato nella tabella seguente.

Livello di servizio	Ritardo medio (sec)
A	≤ 10
B	10 – 15
C	15 – 25
D	25 – 35
E	35 – 50
F	> 50

Il parametro di riferimento di calcolo è il grado di saturazione  $x$ , definito come il rapporto tra il flusso entrante e la capacità del braccio:

$$x = Q_e / C$$

Noto il grado di saturazione  $x$ , il ritardo medio di fermata associato ad un ramo della rotatoria può essere determinato come:

$$d = 3600 / C + 900T [ (x-1) + \text{radq}((x-1)^2 + (3600x)/(450CT)) ] + 5 * \min(x, 1)$$

dove:

$d$  = ritardo medio di fermata ad un ramo (s/veic)

$C$  = capacità del ramo (veic/h)

$x$  = grado di saturazione

$T$  = periodo di analisi (h)

Il ritardo così calcolato è relativo ad un singolo ramo; il ritardo medio della rotatoria, che consente di calcolare il livello di servizio della stessa, è dato dalla media pesata dei ritardi dei singoli rami:

$$D = \sum (d_i * Q_{e,i}) / \sum Q_{e,i}$$

Il ricorso ad un modello di assegnazione della domanda di traffico alla rete stradale per simulare i flussi veicolari sugli archi e capace di riprodurre i valori rilevati, ha consentito di operare una serie di verifiche ed analisi quantitative, di seguito descritte, per la valutazione del livello di servizio di alcuni punti singolari della rete.

## 5 MODELLI DI EMISSIONE PER LA SIMULAZIONE DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Le quantità di sostanze emesse in atmosfera dagli autoveicoli dipendono sia dalle emissioni dei veicoli (fattori di emissione), che dalla numerosità delle flotte (di veicoli a benzina, diesel, GPL, veicoli catalizzati e non, ecc.) e dalle relative percorrenze.

A ciascuna classe veicolare e per ogni inquinante vengono associate delle funzioni di stima delle emissioni e dei consumi. Tali funzioni rappresentano delle curve medie di emissione e di consumo di carburante; esse vengono ricavate da misure di emissioni per diverse tipologie e marche di veicoli.

I principali inquinanti prodotti dal funzionamento dei sistemi di trasporto sono il monossido di carbonio (CO), l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), gli idrocarburi (HC), gli ossidi azoto (NOx) e il particolato, un insieme complesso d'idrocarburi combusti in modo incompleto, costituito da un nucleo centrale di carbone su cui si depositano idrocarburi come acqua e composti dello zolfo.

I modelli di emissione consistono nella formulazione matematica delle relazioni esistenti tra le emissioni inquinanti dei veicoli a motore e le variabili da cui tali emissioni sono influenzate.

La descrizione analitica del processo di emissione di sostanze inquinanti da parte dei veicoli con motore a combustione interna è fondata sull'individuazione delle variabili indipendenti che influenzano il fenomeno.

Il modello di valutazione ambientale T.ENV, utilizzando come dati di ingresso i risultati della procedura di assegnazione delle matrici OD alle reti stradali, aggiunge ai parametri di traffico la valutazione dell'inquinamento atmosferico (monossido di carbonio, ossidi di azoto ed idrocarburi incombusti) ed acustico.

Il modello di diffusione realizzato nel modulo T.ENV, calcola la concentrazione di inquinante in un determinato punto dello spazio a livello locale, **dovuto al traffico che fluisce sull'arco stradale più prossimo al recettore.**

Per il calcolo è rilevante la conoscenza della situazione topografica (strada a tessuto aperto o strada disposta tra file contigue di palazzi).

I modelli utilizzati per il calcolo della diffusione sono i seguenti:

- modello gaussiano per il calcolo della concentrazione a scala globale;
- modello gaussiano/modello canyon per il calcolo della concentrazione a scala locale.

Le metodologie di calcolo si basano sui seguenti parametri: parco auto circolante, classe ambientale dei veicoli, km percorsi e tipo di combustibile.

Classe	Entrata in vigore [anno]	CO		PM	NOx	
		benzina [g/km]	diesel [g/km]	[g/km]	benzina [g/km]	diesel [g/km]
Euro 0	< 1993	-		-	-	
Euro 1	1993	2.720		0.140	0.970 (HC+NOx)	
Euro 2	1997	2.200	1.000	0.080	0.500 (HC+NOx)	0.700 (HC+NOx)
Euro 3	2001	2.300	0.640	0.050	0.150	0.500
Euro 4	2006	1.000	0.500	0.025	0.080	0.250
Euro 5	2009	1.000	0.500	0.005	0.060	0.180
Euro 6	2015	1.000	0.500	0.005	0.060	0.080

Limiti emissioni inquinanti

### Parco circolante in Italia

L'ACI fornisce i dati relativi al parco circolante suddividendo i veicoli in categorie di cilindrata/peso.

	Benzina Petrol	Bz/Gpl Petrol/LPG	Bz/Metano Petrol/CNG	Gasolio Diesel	Gasolio/Gas Diesel/Gas	Ibrido Bz-Elettrico Hybrid Petrol-El.	Ibrido Ds-Elettrico Hybrid Diesel-El.	Elettrico BEV	Altre Others	N.I. Not id.	Totale Total
Autovetture (cars)	17.806.656	2.782.057	984.964	17.093.277		927.006	104.488	118.034	609	5.632	39.822.723
Veicoli industriali (CV)											
- Autocarri merci (goods lorries)	195.323	56.595	96.193	3.915.722		6.999	9.289	9.209	56	656	4.290.042
- Autoveicoli speciali/specifici (special lorries)	21.272	7.650	6.535	747.007		392	168	809	29	134	783.996
- Trattori stradali (road tractors)	154	40	3.348	200.964	31	1	1	24	8	515	205.086
- Autobus (buses)	414	271	4.946	93.453		8	266	744	13	84	100.199
Totale veicoli industriali (CV)	217.163	64.556	111.022	4.957.146	31	7.400	9.724	10.786	106	1.389	5.379.323
Totale autoveicoli (total motor vehicles)	18.023.819	2.846.613	1.095.986	22.050.423	31	934.406	114.212	128.820	715	7.021	45.202.046

Fonte / Source : ACI

#### AUTOVETTURE / PASSENGER CARS

unità/units

Alimentazione / Fuel	EURO 0	%	EURO 1	%	EURO 2	%	EURO 3	%	EURO 4	%	EURO 5	%	EURO 6	%	N.I.	%	Totale / Total
Benzina/Petrol	2.783.814	15,6	648.466	3,6	1.924.499	10,8	1.867.866	10,5	4.101.353	23,0	2.105.501	11,8	4.356.090	24,5	19.067	0,1	17.806.656
Benzina-GPL/Petrol-LPG	194.477	7,0	53.390	1,9	116.292	4,2	98.866	3,6	872.480	31,4	516.086	18,6	930.117	33,4	349	0,0	2.782.057
Benzina-Metano/Petrol-CNG	33.047	3,4	10.424	1,1	32.088	3,3	37.422	3,8	310.289	31,5	267.602	27,2	294.028	29,9	64	0,0	984.964
Gasolio/Diesel	567.020	3,3	165.095	1,0	699.703	4,1	2.103.381	12,3	4.422.921	25,9	3.862.301	22,6	5.272.447	30,8	409	0,0	17.093.277
Elettrico/BEV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118.034	100,0	118.034
Ibrido Benzina/Hybrid Petrol-El.	13	-	-	-	2	-	2	-	5.261	-	42.368	-	879.360	-	-	-	927.006
Ibrido Gasolio/Hybrid Diesel-El.	12	-	-	-	1	-	15	-	-	-	2.014	-	102.446	-	-	-	104.488
Altre/Others	531	87,2	6	1,0	9	1,5	6	1,0	13	2,1	17	2,8	27	4,4	-	-	609
N.I. /not identified	3.460	61,4	47	0,8	14	0,2	63	1,1	28	0,5	2	0,0	-	-	2.018	35,8	5.632
TOTALE / TOTAL	3.582.374	9,0	877.428	2,2	2.772.608	7,0	4.107.621	10,3	9.712.345	24,4	6.795.891	17,1	11.834.515	29,7	139.941	0,4	39.822.723

Le autovetture rappresentano la quasi totalità dei veicoli circolanti in Italia. Di queste, quelle alimentate solo a benzina e a gasolio, rappresentano rispettivamente il 46,60% e il 41,26% dei veicoli totali circolanti in Italia (fonte: ACI, anno di riferimento 2022).

Il rumore veicolare è riconducibile a due cause principali:

- rumore prodotto dal motore (motore, impianto di aspirazione e scarico, alberi di trasmissione, ventola di raffreddamento, cambio, pompe idrauliche), che dipende fondamentalmente dalla velocità e dall'accelerazione del veicolo;
- rumore dovuto al moto del veicolo in marcia (rollio, vibrazioni, interazione pneumatici-strada, resistenze aerodinamiche), che dipende dalla velocità e dal tipo di pavimentazione (rugosità, tipo di inerti e granulometrie utilizzate, grado di ammaloramento, proprietà di assorbimento acustico).

I modelli di previsione del rumore generato dal traffico permettono di calcolare il  $Leq$  in dB(A) partendo dai dati dei flussi veicolari.

La pressione sonora o livello sonoro equivalente ( $Leq$ ) è un indicatore rappresentativo del danno e del disturbo provocato da rumore.

In genere tutti i metodi di previsione considerano le seguenti variabili caratterizzanti:

- flusso veicolare;
- tipologia del traffico veicolare;
- caratteristiche cinematiche del traffico (velocità dei veicoli, accelerazione addizionale, stop and go);
- caratteristiche peculiari della infrastruttura stradale;
- condizioni meteorologiche;
- distanza di ricezione;
- pendenza stradale;
- tipo di pavimentazione.

### Classe ambientale

Con la classe ambientale si indica la categoria emissiva a cui appartiene un determinato veicolo. Le classi ambientali sono state introdotte per rendere il parco auto europeo più sostenibile. In particolare, l'UE ha introdotto una serie di standard, identificati con la sigla Euro- seguita da un numero, che i produttori di auto devono rispettare per commerciare i loro veicoli e che con il passare degli anni richiedono livelli di sostenibilità sempre più alti.

## 5.1 Modello acustico

Il modulo T.ENV è capace di calcolare l'inquinamento acustico determinato in punti specifici dello spazio, utilizzando i modelli:

- O.M.T.C. per le strade a "L";
- Corriere Lo Bosco, per strade a "U" o a canyon.

L'equazione dell'O.M.T.C.(Ontario Ministry of Transportation and Communication,1976) consente di ottenere il livello sonoro equivalente come:

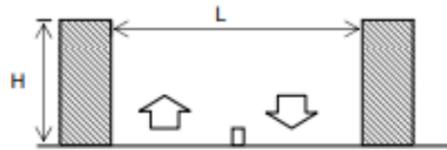
$$Leq = 49,5 + 10,2 \ln feq - 13,9 \ln d + 0,21V$$

Dove  $feq$  è il flusso equivalente (veic/h) con fattore di equivalenza dei mezzi pesanti pari a 6,  $d$  è la distanza (in metri) tra il bordo della carreggiata,  $V$  è la velocità media in km/h.

Il modello è stato calibrato per tessuti stradali aperti ad L.

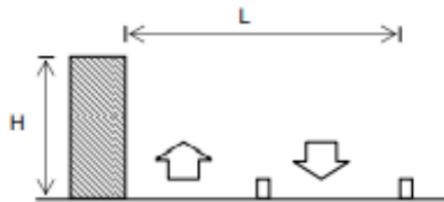
Nel **Modello "Corriere – Lo Bosco"** le relazioni, calibrate in ambito urbano, sono differenziate in funzione della tipologia di strada, in particolare:

- per le strade ad U, con rapporto altezza degli edifici/larghezza della strada superiore a 0,2



$$Leq = 52,78 + 5,20 * \log_{10}(Q_{eq}/d) + 0,68 * V$$

- per le strade a tessuto aperto, del tipo ad L o del tipo ad U con un rapporto altezza/larghezza inferiore a 0,2, o con costruzioni a distanza superiore a 20m dal margine della carreggiata



$$Leq = 51,77 + 4,88 * \log_{10}(Q_{eq}/d) + 0,36 * V$$

Calcolando il flusso equivalente come  $Q_{eq} = Q_{VL} + 2 * Q_{V2R} + 8 * Q_{VP}$ .

Dove:

- $Q_{VL}$  [veic/h] = flusso veicolare veicoli leggeri;
- $Q_{V2R}$  [veic/h] = flusso veicolare veicoli a due ruote;
- $Q_{VP}$  [veic/h] = flusso veicolare veicoli pesanti;
- $d$  [m] = distanza del ricettore dalla mezzzeria stradale;
- $V$  [km/h] = velocità media di deflusso.

### Flusso veicolare

L'entità dei flussi di traffico è una delle variabili più importanti ai fini della determinazione del rumore da traffico veicolare, poiché esiste un forte legame tra i flussi di traffico e l'inquinamento acustico. Il livello di rumore  $L$  prodotto dal flusso veicolare totale  $Q$  può essere rappresentato da una relazione logaritmica del seguente tipo:

$$L = C * \log Q$$

### Composizione del flusso veicolare e velocità media

La velocità del flusso di traffico e la sua composizione sono variabili interdipendenti.

Per velocità superiori a 50-60 km/h si può ritenere che il flusso sia liberamente scorrevole mentre per valori inferiori si è, generalmente, in condizioni di flusso interrotto. In quest'ultimo caso il livello di rumore può essere ritenuto indipendente dalla velocità.

Nella maggior parte dei modelli di previsione, per flusso liberamente scorrevole si ipotizza che tra livello di rumore  $L$  e velocità media del flusso  $V$  (km/h) sussista la relazione:

$$L = B * \log V$$

in cui  $B$  è una costante il cui valore è determinabile in base a misure sperimentali.

Dal punto di vista del rumore emesso i veicoli possono essere suddivisi in due sole classi: veicoli leggeri e pesanti.

### Caratteristiche peculiari della infrastruttura stradale

Numerose indagini sperimentali hanno mostrato in modo evidente che i livelli di rumore, a parità di altri parametri quali la distanza strada-ricevitore, variano considerevolmente in relazione alle caratteristiche della infrastruttura stradale, in particolare dipendono:

1. dalla tipologia di sezione stradale (in rilevato, in viadotto, a raso o in trincea);
2. dalla presenza di costruzioni situate da un solo, o da entrambi i lati della carreggiata e dal rapporto tra l'altezza (H) degli edifici e la larghezza (L) della strada, in particolare, la presenza degli edifici da un punto di vista acustico riveste particolare importanza.

Le strade possono essere classificate in strade ad U (a tessuto chiuso) e in strade a L (a tessuto aperto). Le prime sono tipiche dei centri storici ed in esse il rapporto tra l'altezza degli edifici e la larghezza della strada è in genere elevato (superiore a 0,2), in questo tipo di strade avvengono numerosi fenomeni di riflessione tra le facciate degli edifici, che causano un aumento del livello di pressione sonora e un conseguente aumento nei livelli di picco e nei livelli di fondo del rumore. Nelle strade a tessuto aperto assume particolare importanza la propagazione diretta del rumore, mentre si può non tenere conto dei fenomeni di riflessione;

3. dalla pendenza longitudinale;
4. dal tipo di pavimentazione stradale. La pavimentazione stradale influisce sul rumore prodotto dal traffico in quanto è un parametro che determina il rumore di rotolamento dei pneumatici.

### Condizioni metereologiche

Le condizioni metereologiche hanno anch'esse influenza sull'inquinamento acustico prodotto dal traffico; infatti, in caso di eventi piovosi o di vento, è possibile riscontrare una variazione dei livelli di emissioni sonore.

In condizioni di pavimentazione bagnata si ha un aumento di circa 3 – 4 dB(A) rispetto ai valori riscontrabili nel caso di pavimentazione asciutta; per quanto riguarda invece il vento, si può avere una maggiore o minore diffusione delle onde sonore, a seconda della direzione in cui spirava.

Sulla base delle considerazioni esposte, sono stati proposti numerosi modelli previsionali sviluppati con l'ausilio di campagne sperimentali.

## 5.2 Riferimenti normativi

A livello europeo, la Direttiva 2008/50/CE, rappresenta il quadro di riferimento per quanto riguarda la valutazione e gestione della qualità dell'aria-ambiente. Essa mira, in particolare, a fornire gli indirizzi per la valutazione della qualità dell'aria-ambiente nelle diverse zone del territorio, a impostare obiettivi ed azioni atti a mantenere la qualità dell'aria laddove essa è buona e migliorarla negli altri casi. Al fine di salvaguardare la salute umana e l'ambiente, essa stabilisce soglie di allarme, limiti, termini entro i quali tali limiti devono essere raggiunti, la metodologia di monitoraggio del processo di raggiungimento, ecc...

A livello Nazionale, la normativa italiana in materia di inquinamento atmosferico fa riferimento principalmente al D.Lgs. 155 del 13/08/2010 “Attuazione della direttiva 2008/50/UE relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa”, in vigore a far data dal 30/09/2010 e al D.Lgs. n. 250 del 24/12/2012 recante “Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155, entrato in vigore il 12/02/2013.

Gli inquinanti atmosferici sono regolati attraverso diversi tipi di soglie che si differenziano per tipo di bersaglio da proteggere (salute umana, vegetazione, ecosistemi) e per orizzonte temporale di conseguimento (breve o lungo termine):

- valore limite;
- valore obiettivo;
- obiettivo a lungo termine;
- soglia di informazione e di allarme;
- livello critico.

I valori limite fissati dalla suddetta normativa per gli inquinanti, riportati nell’Allegato XI al D. Lgs. 13 agosto 2010, n. 155 e ss.mm.ii. al quale si rimanda per ulteriori approfondimenti, sono:

#### Biossido di Azoto (NO<sub>2</sub>)

La soglia di allarme per l'NO<sub>2</sub> è pari a 400 µg/m<sup>3</sup> misurati su tre ore consecutive, presso siti fissi di campionamento aventi un'area di rappresentatività di almeno 100 Km<sup>2</sup> oppure pari all'estensione dell'intera zona o dell'intero agglomerato se tale zona o agglomerato sono meno estesi.

#### Monossido di Carbonio (CO)

La soglia di allarme per il CO è pari a 10 mg/m<sup>3</sup> calcolata come media massima giornaliera misurata su 8 ore, presso siti fissi di campionamento aventi un'area di rappresentatività di almeno 100 Km<sup>2</sup> oppure pari all'estensione dell'intera zona o dell'intero agglomerato se tale zona o agglomerato sono meno estesi.

#### Idrocarburi Incombusti (HC)

La soglia di allarme per gli idrocarburi non metanici è pari a 200 µg /m<sup>3</sup> calcolata come media misurata su 3 ore (Limite massimo di accettabilità DPCM 28.3.1983).