

Mario Olivari

**TEORIA E TECNICA
DEL DEFLUSSO
VEICOLARE**



Copyright © MMIX
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133/A-B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-2969-5

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: dicembre 2009

A Michela, Fabio e Riccardo

Mario Olivari, *Teoria e tecnica del deflusso veicolare*

001 Capitolo I

Parametri del deflusso veicolare

1.1. Le condizioni di deflusso, 001 – 1.2. I parametri del deflusso, 001 – 1.3. La portata, 003 – 1.4. La relazione flusso-densità, 011 – 1.5. La relazione sperimentale velocità-flusso, 015 – 1.6. La relazione sperimentale velocità-densità, 017 – 1.7. Distribuzioni statistiche della velocità, 017 – 1.8. Le condizioni ai limiti per le curve di deflusso, 020 – Bibliografia, 021

023 Capitolo II

I modelli di deflusso

2.1. I modelli di deflusso, 023 – 2.2. Modelli a spaziatura costante e funzione della velocità, 023 – 2.3. Modello della spaziatura ridotta, 026 – 2.4. Modello del veicolo accodato, 029 – 2.5. Il modello fluidodinamico, 044 – 2.6. I modelli dinamici di Payne, 058 – 2.7. Il modello fluidodinamico di Ross, 060 – 2.8. Il modello stocastico di Haight, 063 – 2.9. I modelli stocastici di Hodgson e Cowan, 066 – Bibliografia, 069

071 Capitolo III

I livelli di servizio

3.1. Caratteristiche generali, 071 – 3.2. I LdS derivati dall'analogia energetica, 074 – 3.3. La capacità, 080 – 3.4. Applicazioni del concetto di LdS, 083 – Bibliografia, 085

087 Capitolo IV

Il deflusso sulle autostrade

4.1. Autostrade, 087 – 4.2. Componenti di un'autostrada, 088 – 4.3. Considerazioni preliminari, 090 – 4.4. Le curve di deflusso, 091 – 4.5. Livelli di

10 *Indice*

servizio per segmenti-base, 093 – 4.6. Relazioni fondamentali, 095 – 4.7. Le problematiche-tipo, 103 – 4.8. L'affidabilità nel deflusso autostradale, 119 – 4.9. Modelli di simulazione del traffico autostradale, 123 – 4.10. Applicazioni, 125 – Bibliografia, 130

131 **Capitolo V** *Il deflusso su strade a due corsie*

5.1. Strade a due corsie, 131 – 5.2. Caratteristiche del deflusso, 132 – 5.3. Caratteristiche operative, 133 – 5.4. Condizioni ideali, 134 – 5.5. I livelli di servizio, 134 – 5.6. Relazioni fondamentali, 137 – 5.7. I fattori correttivi delle portate di servizio, 137 – 5.8. Le problematiche-tipo, 143 – 5.9. Le strade a due corsie - Hcm 2000, 148 – 5.10. Applicazioni, 159 – Bibliografia, 164

165 **Capitolo VI** *Strade a flusso interrotto*

6.1. Introduzione, 165 – 6.2. La semaforizzazione, 165 – 6.3. Gli attraversamenti pedonali, 191 – 6.4. Misura diretta del flusso di saturazione, 193 – 6.5. Misura diretta del ritardo, 195 – 6.6. Intersezioni non semaforizzate, 196 – Bibliografia, 197

199 **Capitolo VII** *Regolazione semaforica delle intersezioni a raso*

7.1. Definizioni, 199 – 7.2. I livelli di servizio di un'intersezione, 201 – 7.3. Problematiche-tipo, 202 – 7.4. Le regolazioni attuate e coordinate, 219 – 7.5. La massimizzazione della banda verde, 240 – Bibliografia, 257

259 **Capitolo VIII** *Analisi funzionale delle rotatorie*

8.1. Caratteristiche generali, 259 – 8.2. Componenti di una rotatoria, 260 – 8.3. Funzionamento in periodi di punta, 262 – 8.4. Metodi di calcolo della capacità degli ingressi, 263 – 8.5. L'analisi operativa, Fhwa, 285 – 8.6. Gli indici di prestazione e il LdS di una rotatoria, 287 – 8.7. La riserva di capacità, Setra, 294 – 8.8. I software, 295 – 8.9. Considerazioni, 297 – Bibliografia, 299

Parametri del deflusso veicolare

1.1. Le condizioni di deflusso

Premesso che la marcia dei veicoli stradali è del tipo a vista, in letteratura si distingue tra strade con deflusso veicolare in condizioni di flusso ininterrotto e interrotto.

Una strada è in condizioni di deflusso di tipo ininterrotto quando il flusso veicolare non subisce arresti per cause ad esso estranee: è cioè esclusa la presenza di elementi atti a interromperne la marcia (semafori, ad es.).

Eventuali interruzioni dovute ad incidenti (con conseguente riduzione parziale o totale della sezione utile), ad eccesso di domanda rispetto alla capacità di smaltimento della strada in corrispondenza di punti critici (immissioni, uscite) o a propagazione di perturbazioni (onde d'urto) in correnti veicolari molto dense, essendo cause interne, fanno considerare la strada ancora in flusso ininterrotto. Le condizioni di deflusso sono perciò il risultato di interazioni tra veicoli di una stessa corrente e tra veicoli, geometria e ambiente.

È, invece, in condizioni di flusso interrotto una strada ove sono frequenti gli arresti delle correnti veicolari per la presenza di elementi esterni (semafori, stop, ecc.) che impongono interruzioni al deflusso indipendentemente dal volume di traffico esistente.

La trattazione che segue è riferita al flusso ininterrotto quale si può riscontrare nei tratti di strada non influenzati da punti di conflitto (segmenti stradali-base); tali tratti si ritrovano prevalentemente nella viabilità extraurbana.

1.2. I parametri del deflusso

I principali parametri utilizzati nel deflusso dei veicoli stradali per caratterizzare le condizioni in cui avviene la marcia sono:

- il flusso q , numero di veicoli che transitano in una sezione di corsia in un tempo di riferimento
- la densità k , numero di veicoli che in un certo istante sono contenuti in una data lunghezza di corsia
- la velocità u , media spaziale delle velocità istantanee dei veicoli che, all'istante "t", sono contenuti in una data lunghezza di corsia.

I parametri citati sono legati dall'equazione di stato stazionario:

$$q = uk \quad [\text{vei/tempo}] \quad (1)$$

è anche

$$q = u/s \quad [\text{vei/tempo}] \quad (2)$$

infine

$$q = 1/(s/u) = 1/\tau \quad [\text{vei/tempo}] \quad (3)$$

s = spaziatura (*spacing*) distanza tra punti corrispondenti di veicoli successivi [spazio/vei] = $1/k$

τ = intervallo temporale (*headway*) tra punti corrispondenti di veicoli successivi [tempo/vei] = s/u .

La (3) non dice a quale velocità si realizza il flusso q : infatti un flusso di 3600 vei/h-co può ottenersi con veicoli che marciano su una corsia uniformemente intervallati di $\tau=1$ s alla velocità di 100 o di 10 km/h.

La relazione tra portata, velocità media spaziale e densità non può essere vista soltanto in senso deterministico come espresso dalle equazioni riportate: infatti il deflusso veicolare, entro limiti non esattamente definibili, è caratterizzato da distribuzioni casuali dei gap temporali e spaziali e quindi è anche un fenomeno di tipo aleatorio. Inoltre, dato che sia il flusso sia la densità dipendono dalla velocità e che all'aumentare della densità la velocità media della corrente diminuisce, è più corretto scrivere l'equazione di stato nella forma:

$$q(k) = u(k)k \quad (4)$$

Numerose esperienze hanno mostrato la dipendenza del flusso veicolare dalla velocità e dalla densità nel senso che, al crescere di quest'ultima, la marcia da libera diviene sempre più condizionata con significative riduzioni della velocità media dovute all'influenza determinante dei veicoli lenti.

In seguito verranno analizzate nel dettaglio le relazioni tra i citati parametri; quanto alla capacità, intesa come massimo numero di veicoli che, sotto date

condizioni, transita in una sezione di corsia nell'unità di tempo, ci si atterrà, per la sua definizione e determinazione, ai manuali Hcm 1985 e 2000.

1.3. La portata

Per scegliere l'ampiezza del periodo di tempo cui riferire il flusso veicolare, specie se finalizzato al progetto della sezione, occorre considerare che:

- il periodo d'osservazione dev'essere abbastanza ristretto per garantire un flusso pressoché stazionario, cioè il numero di veicoli che transita negli intervalli elementari nei quali può dividersi la durata dell'osservazione non dev'essere molto variabile; infatti, perché il numero medio di passaggi per unità di tempo non sia più da considerarsi variabile casuale e sia sostituibile dal valore medio, è necessario che sia piccola la relativa dispersione
- il periodo d'osservazione deve anche essere di durata tale da poter rappresentare la variabilità del flusso nel tempo con un numero di valori non eccessivo e disperso; ad es., se si volesse descrivere la variabilità della portata oraria nel corso di un anno si dovranno confrontare 8760 valori; se invece si volesse descrivere la variabilità della portata di 0,25 h in un anno, si avrà da confrontare un numero quadruplo di valori (35040) i quali avranno una dispersione relativa più elevata della precedente.

Ciò premesso, si è ritenuto che l'ora rappresenti una situazione di compromesso tra le opposte esigenze prospettate.

1.3.1. La variabilità della portata nell'ora

Rilevando il numero di veicoli transitati in una sezione stradale in ciascuno degli n intervalli di tempo elementari in cui l'ora può suddividersi (ad es. 60 intervalli di 1 min), si può rappresentare il fenomeno in forma di distribuzione di frequenza (distribuzione dei conteggi) discretamente approssimabile a quella di Poisson se il flusso è lontano dalla capacità e quindi i veicoli non sono mutuamente influenzati e si realizzano, conseguentemente, condizioni di casualità del deflusso. In questo caso, la distribuzione di Poisson esprime la probabilità che in un dato intervallo di tempo t si verifichino x passaggi di veicoli quando il numero medio di tali passaggi in quell'intervallo è m .

$$P(x; m) = m^x e^{-m}/x! \quad (5)$$

Assunto che il fenomeno del passaggio di $x=0, 1, \dots, k$ veicoli in un dato intervallo sia un fenomeno casuale obbediente a leggi probabilistiche del tipo citato (è ragionevole pensare che le cause che determinano P volte il passaggio di x veicoli in un intervallo dato siano numerose e indipendenti sempreché le densità veicolari siano modeste), si osserva che la dispersione relativa dei dati, cioè la variabilità del n. vei/intervallo di tempo (portata), misurata dal coefficiente di dispersione:

$$C_d = sqm/media \quad (6)$$

diminuisce al crescere della media (per la distribuzione di Poisson $C_d = 1/\sqrt{m}$), cioè all'aumentare dell'intervallo di tempo di riferimento per l'osservazione dei passaggi.

Infatti, passando da un intervallo di 1 min ad uno di 5 o 10 min, la variabilità del numero di vei/int diminuisce perché aumenta il valore medio e, quindi, in accordo con la (6), anche il coefficiente di dispersione relativa.

Si osservi al riguardo la Fig. 1 ove sono tracciate a titolo esemplificativo le funzioni di distribuzione di frequenza di Poisson per valori di m pari a 2, 4, 8, 10 cui corrispondono i seguenti valori di C_d : 70, 50, 35, 31 %. Dalle curve si nota anche che, al crescere di m , la forma della distribuzione di Poisson tende ad assumere quella a campana della distribuzione normale gaussiana.

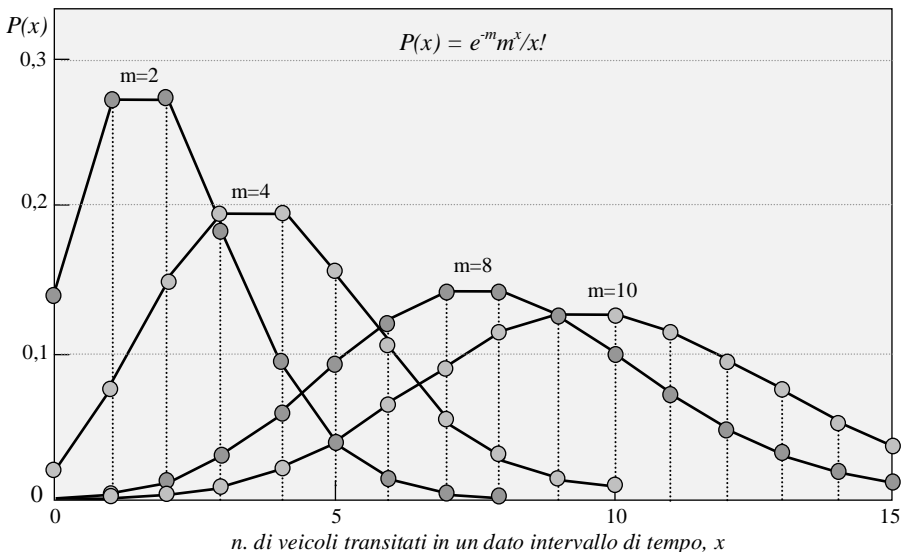


Fig. 1. Distribuzioni discontinue di Poisson per valori diversi di "m"

Da quanto esposto consegue che la portata misurata in un periodo di tempo <1 h ha maggior probabilità di superare la sua media più di quanto non ne abbia la portata oraria. Questa proprietà, caratteristica della distribuzione di Poisson e di altre, spiega perché è opportuno far riferimento all'ora nelle misure di portata veicolare. D'altro canto, se l'ampiezza dell'intervallo di riferimento fosse $\gg 1$ h, sarebbe incauto ritenere che sussistano condizioni di stazionarietà di flusso all'interno di tale intervallo.

Scegliendo l'ora come riferimento temporale si cerca di realizzare una condizione di equilibrio statistico (probabilità di passaggi uguale nel tempo) o, in altri termini, che sia piccola la dispersione relativa del numero di passaggi di veicoli rispetto alla media. In tal modo, il numero di passaggi non sarà più da considerarsi come variabile casuale poiché potrà essere individuato dal valore medio, ora divenuto parametro deterministico. In definitiva, la scelta dell'ampiezza di 1 h come intervallo di riferimento per esprimere la portata di una strada è un compromesso tra esigenze contrastanti.

In effetti, la variabilità del flusso (inteso come ritmo di passaggi) all'interno dell'ora non costituirebbe un problema se la sezione stradale fosse dimensionata per fornire un buon livello d'esercizio in corrispondenza della portata oraria di progetto: infatti, le punte di traffico che si potrebbero verificare all'interno di intervalli elementari dell'ora provocherebbero soltanto un momentaneo decadimento delle condizioni operative. Se però si progettasse la sezione per fornire in corrispondenza della stessa portata oraria, caratteristiche d'esercizio di livello medio-basso, si rischierebbe di avere, nei periodi di punta, condizioni di deflusso di incipiente congestione.

In generale, durante un'ora di rilevamento veicolare continuo, il deflusso non è stazionario e la portata oraria, intesa come media relativa all'ora della legge di probabilità dei passaggi di n veicoli in sue frazioni, risulta maggiore del numero di veicoli effettivamente transitati. Perciò si usa assumere come portata di progetto la media, relativa ad un'ora, della legge di probabilità del passaggio di n veicoli in un intervallo di tempo più corto dell'ora (15 min), anche perché in quest'intervallo il deflusso è all'incirca stazionario e statisticamente stabile.

La portata di un intervallo <1 h ragguagliata ad ora è definita intensità di traffico (IT): essa può intendersi come la portata oraria che si realizzerebbe se il flusso misurato in una frazione d'ora si mantenesse costante in tutti gli intervalli nei quali l'ora è stata suddivisa.

Disponendo di un rilievo continuo di flusso esteso a 24 h, si può individuare l'intensità massima di traffico (IMT), prodotto del più alto flusso misurato in un intervallo elementare dell'ora di massima portata (ora di punta) per il numero di intervalli in essa contenuti.