



Classificazione Decimale Dewey:

388 (23.) TRASPORTI SU STRADA, CIRCOLAZIONE STRADALE

MARIO OLIVARI
ALESSANDRO OLIVO

TEORIA E TECNICA DELLA CIRCOLAZIONE STRADALE





©

ISBN
979-12-218-1271-8

PRIMA EDIZIONE
ROMA 9 MAGGIO 2024

Indice

- 7 **Capitolo I**
 I parametri del deflusso veicolare
 1.1. Le condizioni di deflusso, 7 – 1.2. I parametri del deflusso, 8 – 1.3. La portata, 9 – 1.4. Relazione flusso–densità, 17 – 1.5. Relazione sperimentale velocità–flusso, 19 – 1.6. Relazione sperimentale velocità–densità, 21 – 1.7. Distribuzioni statistiche della velocità, 22 – 1.8. Condizioni ai limiti delle curve di deflusso, 24 – Bibliografia, 26.
- 27 **Capitolo II**
 I modelli di deflusso
 2.1. I modelli di deflusso, 27 – 2.2. Modelli basati sul distanziamento, 27 – 2.3. Modello del veicolo accodato, 33 – 2.4. Modello fluidodinamico, 47 – Bibliografia, 65.
- 67 **Capitolo III**
 I livelli di servizio
 3.1. Caratteri generali, 67 – 3.2. LdS derivati dall’analogia energetica, 70 – 3.3. La capacità, 75 – 3.4. Applicazioni del LdS, 80 – Bibliografia, 82.
- 83 **Capitolo IV**
 Il deflusso nelle autostrade
 4.1. Le autostrade, 83 – 4.2. Componenti tipici, 84 – 4.3. Considerazioni, 86 – 4.4. Condizioni base o ideali, 88 – 4.5. Curve di deflusso dei segmenti base, 88 – 4.6. LdS per segmenti base, 90 – 4.7. Problemi–tipo, 92 – 4.8. Modelli di simulazione del traffico, 108 – 4.9. I software, 109 – Bibliografia, 111.
- 113 **Capitolo V**
 Il deflusso nelle strade a due corsie
 5.1. Strade a due corsie, 113 – 5.2. Caratteri del deflusso, 114 – 5.3. Strade a due corsie, Hcm 2016, 114 – 5.4. Analisi per strade a due corsie, 135 – 5.5. Applicazioni, Hcm 2016, 136 – Bibliografia, 139.

- 141 **Capitolo VI**
Il controllo degli incroci a raso
6.1. Introduzione, 141 – 6.2. La semaforizzazione, 141 – 6.3. Gli attraversamenti pedonali, 163 – Bibliografia, 167.
- 169 **Capitolo VII**
La semaforizzazione delle intersezioni a raso
7.1. Evoluzione del semaforo, 169 – 7.2. Definizioni, 170 – 7.3. I LdS di un'intersezione, 174 – 7.4. Problemi-tipo, 174 – 7.5. Analisi operativa, 181 – 7.6. Controllo semaforico, 192 – 7.7. Pianificazione, 198 – 7.8. Intersezioni a precedenza, 198 – 7.9. Misura del flusso di saturazione, 199 – 7.10. Misura del ritardo, 201 – 7.11. Elaborati progettuali, 202 – 7.12. Esempi, 203 – 7.13. Equivalenti in autovetture, 209 – Bibliografia, 212.
- 215 **Capitolo VIII**
Semafori attuati e coordinati
8.1. Le regolazioni attuate, 215 – 8.2. La regolazione coordinata, 223 – 8.3. La massimazione della banda verde, 238 – Bibliografia, 254.
- 257 **Capitolo IX**
Il deflusso sulle strade urbane
9.1. Caratteristiche generali, 257 – 9.2. Il livello di servizio, Hcm 2000, 259 – 9.3. La metodologia d'analisi, 266 – Bibliografia, 271.
- 273 **Capitolo X**
La mobilità ciclabile
10.1. Caratteri generali, 273 – 10.2. Il ciclismo urbano, 274 – 10.3. La bici in Italia, 275 – 10.4. Tipologie e localizzazione, 279 – 10.5. La qualità del deflusso, 287 – 10.6. Considerazioni, 289 – Bibliografia, 292.
- 293 **Capitolo XI**
Il trasporto collettivo di superficie
11.1. Tipologie, 293 – 11.2. Progetto del TP, 297 – 11.3. Prestazioni del TP, 298 – 11.4. Misure di prestazione del TP, 300 – 11.5. Misura della qualità del servizio, 306 – 11.6. Qualità del servizio e LdS, 308 – 11.7. La taglia del sistema, 314 – 11.8. Note sui LdS, 315 – 11.9. La metrotranvia, 316 – Bibliografia, 333.

I 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 distinguono le strade con marcia in condizioni di flusso ininterrotto da quelle con flusso interrotto:

- a. una strada è in stato di flusso *ininterrotto* quando la marcia dei veicoli non subisce arresti per cause esterne a essa: cioè è esclusa la presenza di elementi atti a interromperne il deflusso (semafori ecc.). Eventuali interruzioni dovute a incidenti (con riduzione parziale o totale della sezione utile), a eccesso di domanda rispetto alla capacità in corrispondenza di punti critici (immissioni, uscite) o a propagazione di perturbazioni (onde d'urto) in correnti veicolari dense, essendo cause interne, fanno ritenere la strada ancora in flusso ininterrotto; tali condizioni di deflusso sono, dunque, il risultato di interazioni tra i veicoli di una stessa corrente e tra veicoli, geometria e ambiente ove si sviluppa l'infrastruttura stradale
- b. è, invece, in stato di flusso *interrotto* una strada ove sono frequenti gli arresti della corrente veicolare dovuti a elementi esterni a essa (semafori, STOP, passaggi pedonali ecc.) che impongono interruzioni al deflusso indipendentemente dal volume di traffico.

La trattazione che segue è riferita al flusso ininterrotto quale si può riscontrare nei tratti di strada non influenzati da punti di conflitto (i cosiddetti segmenti stradali base) che si ritrovano quasi esclusivamente 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 dato intervallo di tempo
- la densità k , numero di veicoli che all'istante t sono contenuti in una data lunghezza di corsia
- la velocità u , media spaziale delle velocità istantanee dei veicoli che sono contenuti in una data lunghezza di corsia all'istante t .

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

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

è anche

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

infine

$$q = (d/u)^{-1} = 1/\tau^{(1)} \quad [\text{vei}/\text{tpo}] \quad (3)$$

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

$\tau = d/u =$ intervallo di tempo (*headway*) tra punti corrispondenti di veicoli successivi
[tpo/vei].

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 que-

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

st'ultima, la marcia da libera diviene sempre più condizionata con significative riduzioni della velocità media dovute all'influenza 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 2010 e 2016.

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 in quanto, 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 dev'essere anche 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 in un anno si dovranno confrontare 8760 valori; se, invece, si volesse descrivere la variabilità della portata di $\frac{1}{4}$ d'ora in un anno, si dovranno confrontare un numero quadruplo di valori (35 040) 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) di-

scretamente approssimabile a quella di Poisson se il flusso q è lontano dalla capacità e , quindi, i veicoli non sono mutuamente influenzati e si realizzano le condizioni di casualità del deflusso.

In questo caso, la distribuzione di Poisson esprime la probabilità che in un dato intervallo di tempo (t) si verificano (x) passaggi di veicoli quando il numero medio di passaggi in quell'intervallo è qt :

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

Assunto che il fenomeno del passaggio di $x=0, 1, \dots, k$ veicoli in un dato intervallo t 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 nell'intervallo t siano numerose e indipendenti purché le densità veicolari siano modeste), si osserva che la dispersione relativa dei dati, cioè la variabilità del $n. \text{vei}/int$, misurata dal coefficiente di dispersione relativa C_d :

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

diminuisce al crescere del valor medio (nella distribuzione di Poisson $C_d=1/\sqrt{qt}$), cioè all'aumentare dell'intervallo di tempo di riferimento per l'osservazione dei passaggi. Infatti, passando da un intervallo di 1^{min} a uno di 5 o 10^{min} , la variabilità del $n. \text{vei}/int$ diminuisce perché aumenta il valore medio e, quindi, in accordo con la (6), anche il coefficiente di dispersione relativa.

Da ciò 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 perché 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 (ritmo di passaggi) all'interno dell'ora non costituirebbe un problema se la sezione stradale fosse dimensionata per fornire un elevato 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 n . di veicoli effettivamente transitati. Perciò si usa assumere come portata di progetto la media, relativa a 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 $<1^{\text{h}}$ riportata a ora è detta *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 può essere 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 dato intervallo dell'ora di massima portata su 24^{h} (ora di punta, *HDP*) per il numero di tali intervalli in essa contenuti.

1.3.2. Il fattore dell'ora di punta

Il fattore dell'ora di punta (*FHP*), parametro adimensionale che fornisce un'indicazione della variabilità del flusso all'interno dell'ora e, in particolare, dell'ora di massimo carico su 24^{h} , è espresso dal rapporto:

$$FHP = q_e/IMT \quad (7)$$

q_e = volume orario effettivo, av/h

IMT = intensità max di traffico, av/h .

Se IMT è calcolata in base 15^{min} (IMT_{15}), in teoria $0,25 \leq FHP \leq 1$; calcolata in base 10^{min} , è: $0,16 \leq FHP \leq 1$. Di solito FHP assume valori compresi

tra 0,80 e 0,95: tanto più s'avvicina a 1, tanto meno è variabile il n. di veicoli per intervallo elementare d'ora. Il *FHP* dipende dalle caratteristiche socioeconomiche del territorio interessato alla strada: la presenza di insediamenti di notevole importanza o di particolari strutture territoriali (fabbriche, scuole, stadi ecc.), può determinare notevoli incrementi di domanda concentrata in brevi periodi di tempo in corrispondenza delle ore di entrata/uscita, facendo sì che esso assuma valori molto bassi. In Fig. 1 è rappresentato un rilievo di flusso nella fascia oraria 7–9 a.m. ove si colloca l'ora di max punta su 24^h.

Vi si nota che il volume orario effettivo q_e è 1622 *av/h*, mentre l'*IMT* in base 5^{min} è di 2232 *av/h* e quella in base 15^{min} di 1980 *av/h* cui corrispondono, rispettivamente, *FHP* di 0,73 e 0,82. L'intervallo d'ora ove si ha il massimo carico veicolare è detto *intervallo critico (IC)*.

Si osservi, inoltre, che gli intervalli di 15^{min} evidenziati nella figura sono indicati sequenzialmente in forma discreta per esigenze grafiche: in realtà i 15^{min} di punta possono collocarsi in qualsiasi intervallo di 15^{min} consecutivi all'interno dell'ora.

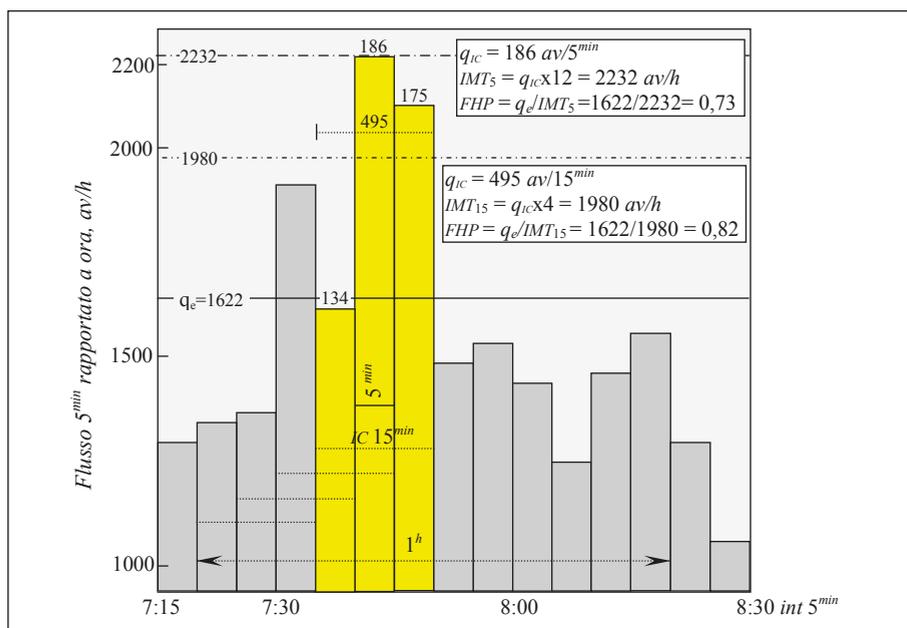


Figura 1. Flusso in frazioni d'ora di 5^{min} nell'ora di max punta su 24^h, AA.

Progettare una sezione stradale per l'*IMT* dei 5^{min} porterebbe a un sovra dimensionamento dell'opera, peraltro, assumere come portata di

progetto quella effettiva dell'ora di punta significherebbe avere probabili fenomeni di congestione per diverse frazioni d'ora che necessiterebbero di lunghi tempi per essere smaltiti. Ciò ha suggerito di scegliere l' IMT_{15} come portata di riferimento per il progetto o l'analisi di strade extraurbane e urbane. Nel progetto della sezione si può fare, comunque, riferimento alla portata oraria anche quando è necessario considerare punte di traffico di breve durata (15^{min}) se le si amplifica con il FHP .

1.3.3. La variabilità della portata

Poiché le cause che determinano la mobilità veicolare variano nel tempo (ora e giorno della settimana, stagione ecc.), e nello spazio, anche le variazioni di flusso orario lo saranno: tipico è l'andamento del volume orario di traffico dei giorni lavorativi per le strade extraurbane e urbane che presenta due punte caratteristiche in corrispondenza delle ore di inizio/termine delle attività, Fig. 2.

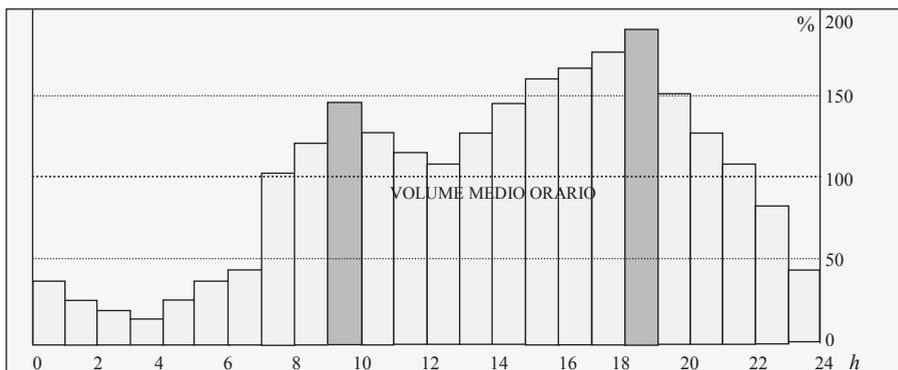


Figura 2. Volumi di traffico in un giorno-tipo, strada extraurbana, AA.

1.3.4. L'ennesima ora di punta

Volendo descrivere il fenomeno della variabilità dei flussi orari di una strada per un lungo periodo di tempo, ad es. un anno, si potrebbero rilevare le portate delle 8760 ore e riportarle in un grafico ove in ordinate si leggerà la portata raggiunta nella corrispondente ora indicata in ascisse. In tale grafico caratteristico, la portata raggiunta nell' n -sima ora, che è stata superata per $n-1$ ore in un anno, è detta portata dell' n -sima ora di punta (Fig. 3). Spesso nelle ordinate del diagramma, caratteristico per tipo e funzione di strada, si riporta il volume orario in %

del volume del traffico giornaliero medio annuo (TGM) raggiunto o superato nel numero di ore corrispondenti in ascisse.

Le curve delle 200 più elevate portate orarie rilevate in un anno per diversi tipi di strada (Fig. 4), mostrano che i volumi orari massimi vanno dal 10 (strada urbana) al 45% (extraurbana turistica) del TGM ; essi sono anche da 2 a 12 volte maggiori dei volumi orari medi annui.

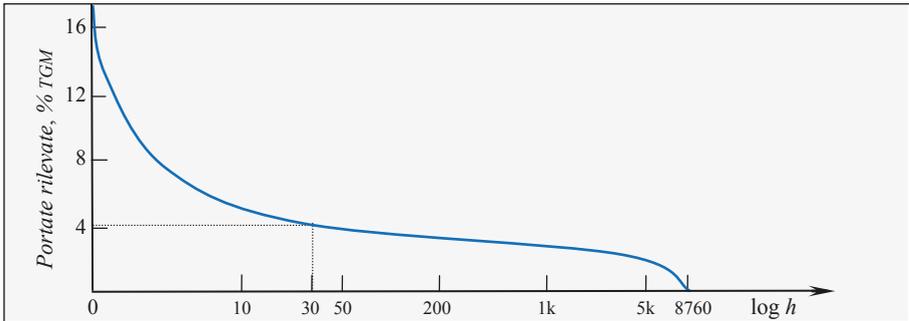


Figura 3. Distribuzione-tipo delle n ore di punta di un intero anno, AA .

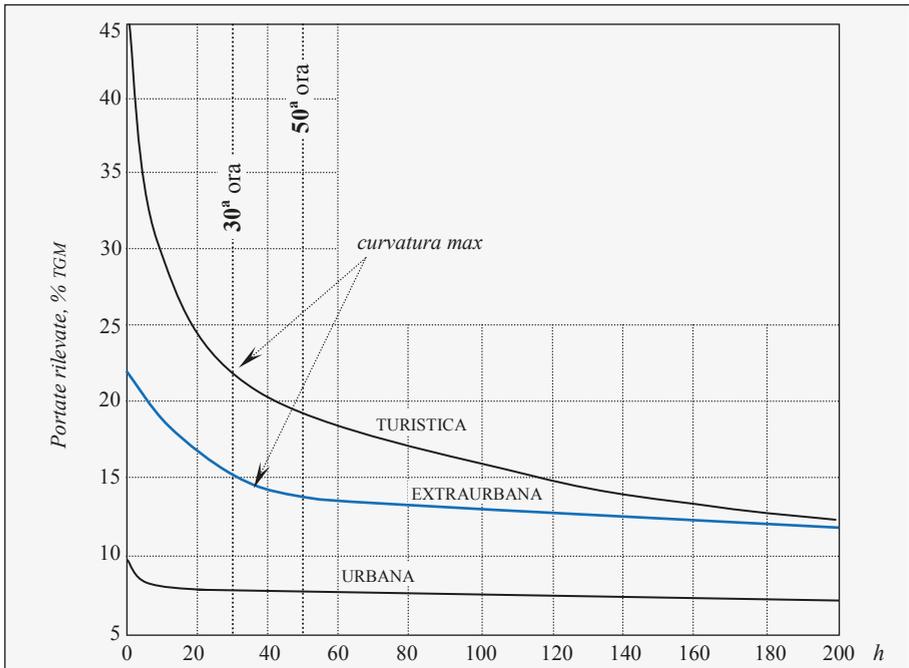


Figura 4. Prime 200 ore di punta per tipologia stradale, AA .

1.3.5. Il *TGM*, traffico giornaliero medio

Per *TGM* s'intende il volume totale di traffico in un periodo di tempo, in giorni interi, di durata maggiore di un giorno e minore di un anno, diviso per il numero di giorni di quel periodo.

In Italia, nelle strade statali e nelle autostrade viene effettuato annualmente un censimento del traffico stradale che prevede conteggi giornalieri secondo un programma di sedici rilievi diurni (7:00–19:00) e sette notturni (19:00–7:00) distribuiti nei giorni della settimana e nelle stagioni secondo modalità codificate.

Con i dati acquisiti dai conteggi si calcolano le seguenti forme di *TGM* (formule di Ginevra):

$$\begin{aligned} TGM_{Dpe} &= TGM \text{ diurno primavera-estate} \\ TGM_{Dai} &= TGM \text{ diurno autunno-inverno} \\ TGM_{Npe} &= TGM \text{ notturno primavera-estate} \\ TGM_{Nai} &= TGM \text{ notturno autunno-inverno} \end{aligned}$$

da cui:

$$\begin{aligned} TGM_D &= \frac{1}{2}(TGM_{Dpe} + TGM_{Dai}) \\ TGM_N &= \frac{1}{2}(TGM_{Npe} + TGM_{Nai}) \end{aligned}$$

infine:

$$TGM = TGM_D + TGM_N \quad (8)$$

I rilievi di traffico sono suddivisi analiticamente per categorie veicolari (dai motoveicoli agli autosnodati) e per tipo di traffico (leggero, pesante); per ogni categoria e per ogni tipo viene calcolato il *TGM* diurno e notturno; il *TGM* risulta come somma dei *TGM* di tutte le categorie veicolari e comprende il traffico di entrambi i sensi di marcia (*sm*).

La quota di *TGM* corrispondente alla portata oraria di progetto è indicata con (*A*) ed espressa in decimi; questo fattore, riferito alla $30^a/50^a$ *HDP*, varia con la tipologia e la funzione della strada.

Nel progetto della sezione stradale, sia in area urbana, sia extraurbana, è a volte necessario conoscere anche la distribuzione direzionale del traffico (*D*) che rappresenta la quota di traffico del senso più carico nell'*n*-sima *HDP* assunta come base di calcolo. Infatti, se nell'arco di una giornata lavorativa tipo si avessero ore di punta nei due sensi d'entità sensibilmente diversa, dovute a fenomeni di pendolarità, sarà necessario tenerne conto nel progetto della sezione, determinando separatamente, per ogni senso di marcia, il numero di corsie necessario a smaltire il traffico previsto al prefissato livello di servizio.

In area urbana, su strade a carreggiata unica può invece essere prevista la reversibilità di una o più corsie (dette banalizzate) per fronteggiare flussi unidirezionali di domanda concentrati in determinate fasce orarie; questo provvedimento di gestione del traffico, usato in Europa e Nord America, è raramente usato in Italia.

I fattori citati A e D vengono utilizzati per determinare il volume orario direzionale di progetto q_{DDHV} (*directional design hourly volume*) mediante l'espressione:

$$q_{DDHV} = TGM A D \quad [ae/h-sm] \quad (9)$$

TGM = traffico giornaliero medio in autovetture equivalenti/giorno, ae/d

A = quota di TGM assunta come volume orario di progetto in corrispondenza della 30^a o 50^a HDP , $[ae/h]/[ae/d]$, decimali

D = quota di traffico del senso di marcia più carico, decimali.

1.3.6. La portata di progetto

La scelta della portata oraria di progetto non è banale: infatti, scegliendo quella dell'ora di massima punta annuale si assicurerebbero ottime condizioni di deflusso ma a costi elevati e la sezione sarebbe certamente esuberante per la quasi totalità delle ore dell'anno; scegliendo la portata della 200^a HDP si rischierebbe, invece, un sottodimensionamento della sezione e un numero di ore/anno di congestione inaccettabile dall'utenza.

Poiché in quasi tutti i diagrammi (Fig. 4) la massima curvatura si ha in una fascia compresa tra la 30^a e la 50^a HDP , si assume come portata di progetto il volume orario corrispondente accettando a priori 29–49 h/a di eccesso di domanda e un decadimento delle condizioni di deflusso.

Si può, comunque, affermare che la scelta della portata oraria di progetto deve derivare da una il più possibile accurata analisi della domanda congiunta ad un'altrettanto precisa analisi economica condotta, ad es., confrontando i costi di costruzione con i benefici derivanti dalla riduzione dei costi di trasporto per differenti valori di portata (cui corrisponderanno diverse condizioni di operatività della strada), avendo presente che il numero d'ore di probabile congestione dev'essere contenuto nella fascia delle 30–50 h/a ove, in pratica, la portata oraria spazia tra l'8 e il 13% del TGM previsto.

Per progettare la sezione stradale, cioè il numero di corsie necessario a smaltire una data domanda in un anno futuro assicurando un cer-

to livello di servizio, bisogna determinare il traffico dell'anno zero (anno d'entrata in esercizio) e quello previsto dopo un certo periodo di tempo (vita utile), generalmente vent'anni; tale traffico, in ae/h , costituirà la portata di riferimento per la progettazione dell'infrastruttura.

Riepilogando, i dati-base necessari per una progettazione di massima di una sezione stradale sono:

- TGM all'anno zero (0)
- TGM dopo vent'anni di esercizio (XX anno = anno di progetto)
- diagramma dell' n -sima HDP per gli anni zero e venti
- composizione del traffico per gli anni zero e venti
- eventuale distribuzione del flusso tra i sm per l'anno di progetto.

1.4. Relazione flusso-densità

La relazione tra flusso q e densità veicolare k , $q=uk$, è nota come *equazione di stato* del deflusso di tipo generale; la sua rappresentazione grafica o *diagramma fondamentale*, può dedursi sperimentalmente da rilievi di traffico interpolando i dati ottenuti con curve approssimanti. Tali curve hanno un andamento del tipo illustrato nella Fig. 5.1, di forma assimilabile a quella di una parabola rovescia.

Poiché la velocità $u_i=q_i/k_i$ è determinata dalla pendenza del raggio vettore del punto (q_i, k_i) , il diagramma fondamentale illustra le relazioni tra tutti e tre i parametri: q , k e u .

I punti della curva rappresentano una successione di stati di stazionarietà; la tangente in un punto dà la velocità di propagazione del cambiamento di stato, nota come onda d'urto.

La forma del diagramma è puramente qualitativa in quanto su di essa influiscono numerosi fattori (composizione del traffico, comportamento dei conducenti, tipo e caratteristiche progettuali della strada, condizioni meteo ecc.) che ne possono modificare l'andamento.

Considerando il flusso come variabile dipendente dalla densità, è logico che esso passi per tre punti caratteristici:

1. un punto di nullo, per densità nulla k_0 (assenza di veicoli)
2. un altro punto di nullo, per densità massima k_j (veicoli fermi)
3. un punto di massimo/ottimo (q_o), per un valore di densità k_o , intermedio tra 0 e k_j , detto capacità.

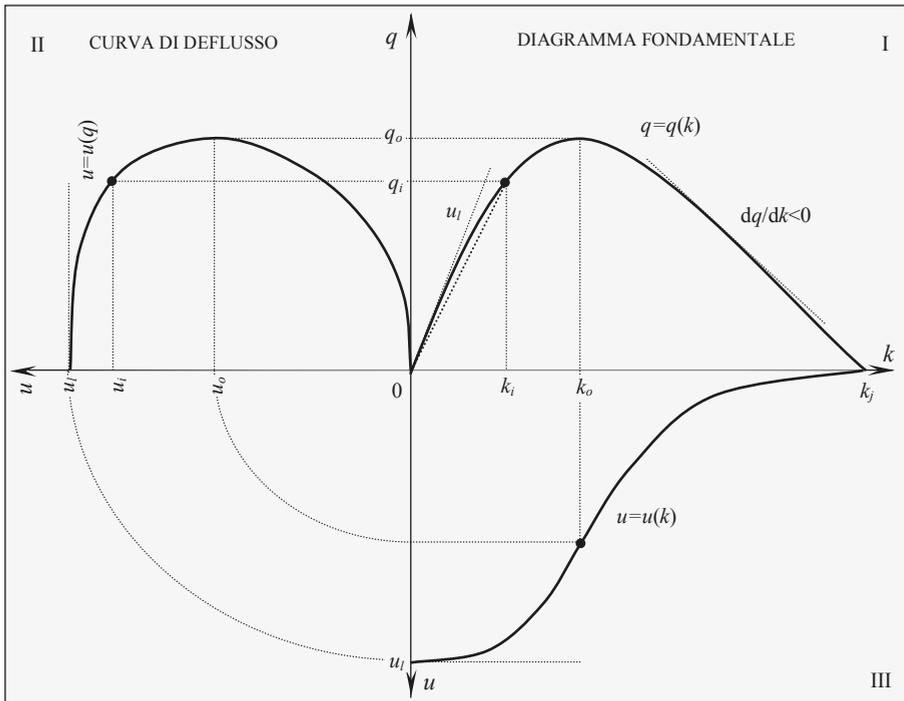


Figura 5. Curve di deflusso approssimanti: $q-k$, $u-q$, $u-k$, AA .

Essendo il deflusso veicolare, entro limiti non ancora rigorosamente definiti, un fenomeno sostanzialmente aleatorio, non è possibile stabilire il massimo esatto del flusso, cioè la capacità della strada: essa potrebbe essere definita (Haight, 1963) come quel valore di flusso che ha sufficiente probabilità di non venire superato.

Dalla Fig. 5.I si nota che all'aumentare della densità da 0 a k_o , la portata cresce fino a raggiungere il suo massimo q_o proprio in corrispondenza di k_o , detto densità ottima; in questo ramo l'andamento della curva può essere più o meno concavo verso il basso dipendendo dal tasso di incremento dei veicoli con velocità inferiore alla media. Il deflusso avviene in condizioni di stabilità perché gli incrementi di domanda possono essere assorbiti da riduzioni di distanziamento e di velocità che consentono di raggiungere una nuova condizione di stazionarietà, sia pure di livello inferiore rispetto a quella iniziale.

Superate le condizioni di massima portata, si passa alle condizioni di flusso forzato (II ramo della curva), caratterizzate da densità veicolari elevate, rapide diminuzioni di flusso dovute all'effetto congiunto della riduzione dei distanziamenti e delle velocità medie: la corrente si

compatta progressivamente riducendo le spazature fino ad annullarle per $k=k_j$ (densità massima ≈ 150 av/km-co) ove cessa il moto e inizia la formazione di code.

1.5. Relazione sperimentale velocità-flusso

Questa relazione è derivabile sperimentalmente mediando le velocità istantanee dei veicoli che attraversano una sezione stradale in un periodo di tempo nel quale il flusso è costante, per differenti valori di quest'ultimo.

Nel piano $u-q$ si otterrà un insieme diffuso di punti che possono essere interpolati da una curva di regressione a minimi quadrati del tipo rappresentato in Fig. 5.II. La curva taglia l'ordinata in un punto (u_l) che rappresenta la media delle velocità a flusso libero (VFL), si inclina verso il basso all'aumentare del flusso in quanto, incrementandosi la domanda, aumentano anche i conducenti che mantengono velocità inferiori alla media, condizionando il moto di quelli più veloci.

L'incremento di portata, ottenuto a scapito di decrementi di velocità, di compattazioni della corrente e di limitazioni alla libertà di guida, continua fino a raggiungere il massimo della funzione per una velocità media u_o circa metà di quella libera, indicativamente 45–55 km/h. Da quel punto (capacità), la portata non può più aumentare e, se continua l'incremento di domanda, si percorrerà il ramo inferiore della curva (campo del flusso forzato) caratterizzato da fenomeni di congestione (moto di *stop and go*) ove il flusso diminuisce progressivamente fino a cessare del tutto. Il diagramma $u-q$, detto *curva di deflusso*, è differente per tipo di strada e, per uno stesso tipo, varia con le caratteristiche geometriche, del traffico e dell'ambiente.

1.5.1. Il diagramma statistico $u-q$

Per meglio illustrare la relazione *velocità-portata*, è utile far riferimento a un particolare diagramma, riportato in Fig. 6 ove il piano della figura è diviso in tre zone delimitate da curve-limite, luogo dei punti rappresentativi di velocità medie di marcia (rapporto tra lunghezza di un segmento stradale e tempo impiegato a percorrerlo fermate escluse) in corrispondenza a date portate orarie, che hanno probabilità del 10 e del 90% di venir superate. In pratica, all'interno di tali cur-

ve–limite ricade l'80% dei valori di velocità medie di marcia rilevati per una certa portata veicolare.

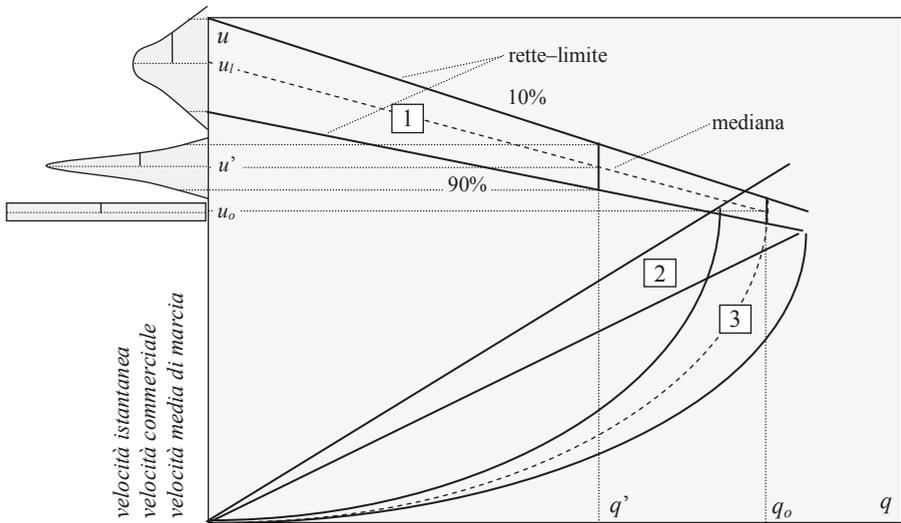


Figura 6. Diagramma statistico velocità di marcia–flusso, AA.

La zona “1” individua condizioni di flusso stabile: quando, per una portata q' , la velocità media ricade in questa zona, il deflusso avviene alla velocità media u' senza superare, con l'80% di probabilità, i limiti di zona indicati dalle due rette.

La zona “2” individua condizioni di flusso instabile: i corrispondenti valori di q e u possono mantenersi per brevi periodi di tempo; entrambi tendono a diminuire facendo cadere il deflusso nella zona “3” di flusso forzato ove si collocano i fenomeni di congestione: i veicoli si disturbano vicendevolmente, basse velocità e alte densità favoriscono improvvisi arresti del deflusso e formazione di code. Può anche accadere che, riducendosi la domanda, la coda venga smaltita velocemente, nel qual caso le condizioni di marcia si potranno riportare nella zona di flusso stabile.

Il diagramma citato può anche costruirsi ponendo in ordinate la *velocità media di viaggio*; essa è definibile come la *velocità commerciale* media mantenuta dai conducenti su un dato segmento stradale in corrispondenza di un certo flusso orario.

Per *velocità commerciale* s'intende il rapporto tra la lunghezza di un tronco stradale e il tempo impiegato a percorrerlo inclusi i rallentamenti e/o le fermate dovuti alle semaforizzazioni. Comunque, i dia-