

6. Analisi del deflusso su autostrade

Un'autostrada può essere definita come una strada extraurbana o urbana riservata a particolari categorie di autoveicoli, a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, a due o più corsie per senso di marcia, con elevata velocità di progetto e controllo totale degli accessi.

La definizione legale è data all'art. 2 del D.L. n. 285, 30.4.1992, *Nuovo codice della strada*.

Le autostrade italiane, gestite in concessione, sono per la quasi totalità a pedaggio; ad esse i veicoli accedono attraverso caselli (l'A. è protetta lateralmente da recinzioni continue site nelle fasce di pertinenza) sorta di porte presenziate da addetti con funzione di esazione, controllo degli autoveicoli ed anche di regolazione del flusso entrante. Vi sono ammesse solo alcune categorie di veicoli a motore, quali: autovetture [av], autocarri [t] e autobus [b], motocarri e motofurgoni oltre 500cm³, motocicli oltre 150cm³ e motocarrozze oltre 250cm³.

L'autostrada è il solo tipo di infrastruttura in cui si possono realizzare completamente le condizioni di flusso ininterrotto: infatti non vi sono intersezioni o attraversamenti pedonali a raso e gli incroci con altre strade sono risolti con svincoli a livelli sfalsati ove entrate ed uscite avvengono attraverso rampe con corsie di accelerazione o decelerazione che consentono velocità di immissione o uscita relativamente elevate e rendono minime le interferenze al deflusso delle correnti dirette. Ugualmente con rampe e corsie specializzate per entrate/uscite vengono risolti gli accessi isolati lungo il tracciato.

Per quanto sopra, le condizioni operative del traffico su queste infrastrutture sono il risultato di interazioni di tipo generale: tra veicoli; tra veicoli, tracciato e piattaforma; tra veicoli e condizioni ambientali; tra veicoli e stato della pavimentazione, ecc., quindi tipiche del flusso ininterrotto.

Le procedure che verranno illustrate nel seguito mettono in relazione le probabili condizioni operative con le condizioni geometriche, di traffico e ambiente che si possono trovare in un dato intervallo di tempo in un segmento autostradale.

Per le autostrade di nuova costruzione, la normativa DM 5.11.2001 - che supera le vecchie norme Cnr (B.U. 78/1980) - ne prevede due tipi (extraurbane e urbane) differenziati dall'intervallo di velocità di progetto (VdP), dalle dimensioni della piattaforma e da altre caratteristiche geometriche. In Tab. 1 la tipologia extraurbana.

Tab. 1- Caratteristiche-tipo delle autostrade extraurbane - Standard DM 5.11.2001

Tipo	VdP [km/h]	LdS	i _{max} [%]	R _{min} [m]	PIATTAFORMA [m]
A	90÷140	B	5	339	<p><i>base, a 2+2 corsie</i></p> <p>3,0 3,75 3,75 4,00 3,75 3,75</p> <p>25,00</p>
<p>Le sezioni-tipo delle autostrade urbane differiscono solo per la larghezza dello spartitraffico (3,2m); inoltre la VdP è 80÷140, il R_{min} è 252m, la i_{max} è del 6%; il LdS di progetto è il C.</p> <p>Altre differenze riguardano elementi geometrici minori.</p>					<p><i>a 3+3 corsie</i></p> <p>3,0 3,75 3,75 3,75 4,00 3,75 3,75 3,75</p> <p>32,50</p>

6.1. Componenti di un'autostrada

In generale un'autostrada si considera composta da tre elementi-tipo:

- *segmenti-base*: tronchi non influenzati da movimenti di immissione o uscita e da manovre di scambio
- *rampe*: zone nelle quali si innestano particolari manufatti per l'immissione o l'uscita
- *tronchi di scambio*: zone ove due o più veicoli di correnti diverse debbono intrecciare, intersecandole, le proprie traiettorie.

Nelle Fig. 1, 2 sono illustrati gli elementi caratteristici sopra descritti con le relative zone d'influenza.

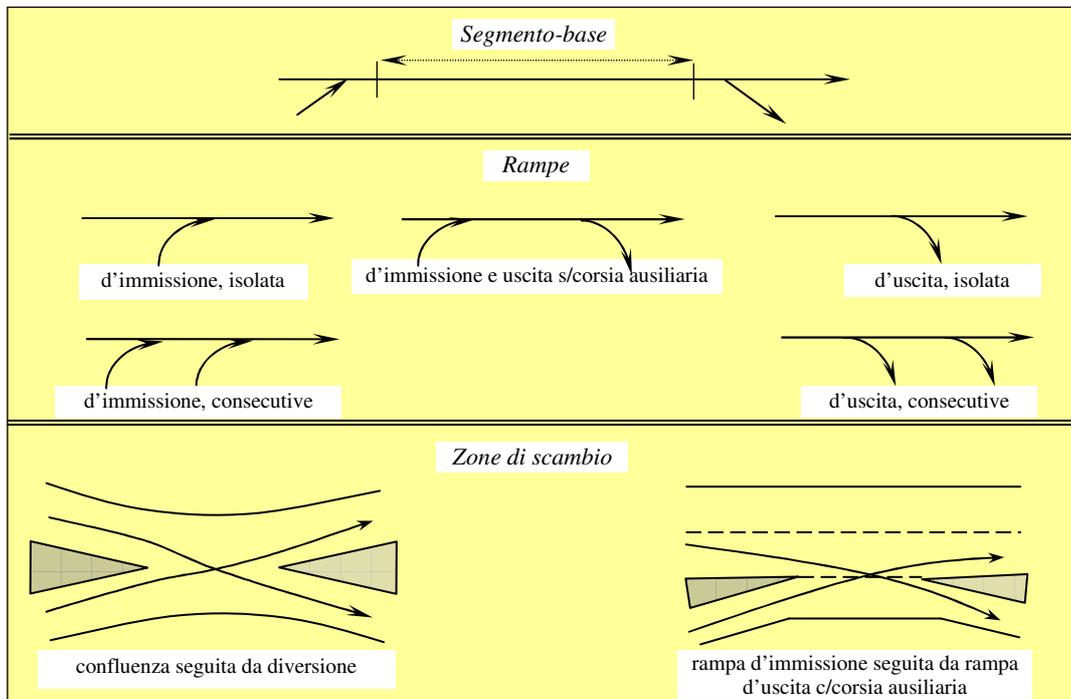


Fig. 1 - Componenti di un'autostrada

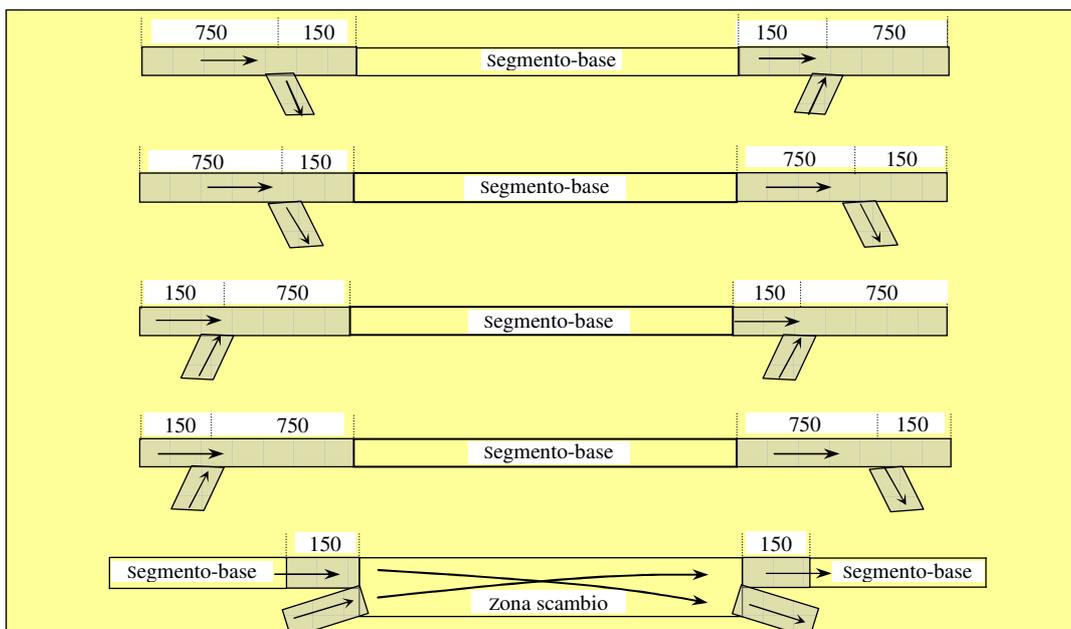


Fig. 2 - Zone d'influenza dei componenti un'autostrada

6.2. Considerazioni preliminari

Le procedure adottate dagli Hcm '85-2000 per l'analisi dei segmenti-base sono riferite a condizioni di flusso stabile: infatti, durante i periodi di punta, nelle connessioni a rampa e nei tronchi di scambio si possono formare code di lunghezza tale da influenzare il deflusso oltre il limite di stabilità; per queste zone critiche sarà allora necessario uno studio specifico delle condizioni operative che, per ragioni di brevità, non può essere esposto in questa sede rimandando il lettore alla trattazione degli Hcm. Ci si limiterà, perciò, ad illustrare le problematiche generali del deflusso nelle tratte non influenzate dalla presenza di tali manufatti.

L'analisi dei segmenti autostradali viene condotta nell'ipotesi di buone condizioni atmosferiche e di pavimentazione e di assenza di incidenti.

6.3. Definizioni e caratteristiche

Per iniziare lo studio dei segmenti-base è necessario premettere alcune definizioni sulla geometria e sul traffico:

- *capacità*: massima intensità di traffico (base 15min) che può transitare in un segmento autostradale di caratteristiche generali uniformi nelle condizioni prevalenti di strada e traffico; definita per ogni senso di marcia, è espressa in vei/h.
- *caratteristiche stradali*: definiscono la geometria del segmento in esame e comprendono: la piattaforma stradale (numero, larghezza e destinazione - veicoli lenti, marcia normale, sorpasso, emergenza - delle corsie, franchi laterali), le velocità di progetto, le pendenze, ecc.
- *caratteristiche di traffico*: definiscono quegli elementi connessi alle prestazioni dell'infrastruttura in termini di capacità e condizioni operative, quali: composizione della corrente per tipologia veicolare (% mezzi pesanti e leggeri) e dei conducenti (abituali, occasionali), distribuzione dei veicoli tra le corsie, sistemi di regolazione e controllo del deflusso.

I segmenti oggetto di analisi devono avere caratteristiche uniformi di strada, traffico e regolazione del deflusso: in particolare, le tratte in piano e rettilineo devono avere $VdP=113\text{km/h}$. Quando nel segmento vi sono tratte a VdP ridotta (ad es. per presenza di curve a raggio stretto) può essere necessaria un'analisi specifica; alternativamente, se in un segmento di sviluppo notevole sono frequenti gli elementi a VdP ridotta, lo si potrà considerare come un unico tronco con quella VdP .

6.4. Le curve di deflusso

Le curve di deflusso volume/densità e velocità/volume dei segmenti autostradali dipendono dalle condizioni prevalenti di strada e traffico degli stessi; le curve-base riportate nelle Figg. 3, 4 dall'Hcm '85 sono state elaborate per una serie di condizioni ideali che comprendono, tra le principali:

- tracciato in piano
- corsie di almeno 3,66m
- franchi laterali dai margini di carreggiata $\geq 1,83\text{m}$
- corrente veicolare di sole autovetture
- conducenti abituali.

Queste condizioni sono ideali solo dal punto di vista dei volumi di traffico smaltibili alla capacità ed ai vari livelli di servizio, ma non sono direttamente correlate ad altri parametri di qualità della circolazione (sicurezza, emissioni, rumore, ecc.).

La forma delle curve risente del limite di velocità di $55\text{mph}\approx 89\text{km/h}$ esistente all'epoca dei rilievi negli US; la capacità è di 2000av/h-c per VdP 113 e 96km/h e di 1900av/h-c per VdP di 80km/h ; lievissime differenze si riscontrano tra autostrade a 4, 6, 8 corsie, per cui nei diagrammi velocità-

volume e volume-densità le curve non sono graficamente differenziabili.

Esiste un ampio campo di valori di flusso nel quale la velocità è quasi insensibile all'incremento di volume ma, quando il flusso si avvicina al suo massimo (a partire da $v/c \approx 0,85$), le velocità decadono con un tasso estremamente rapido. Nelle zone prossime al volume massimo si verificano importanti modifiche delle condizioni operative e le delimitazioni dei LdS riflettono questo fatto: infatti i livelli peggiori vengono definiti da campi di flusso sempre più ristretti e da campi di velocità e densità relativamente più ampi.

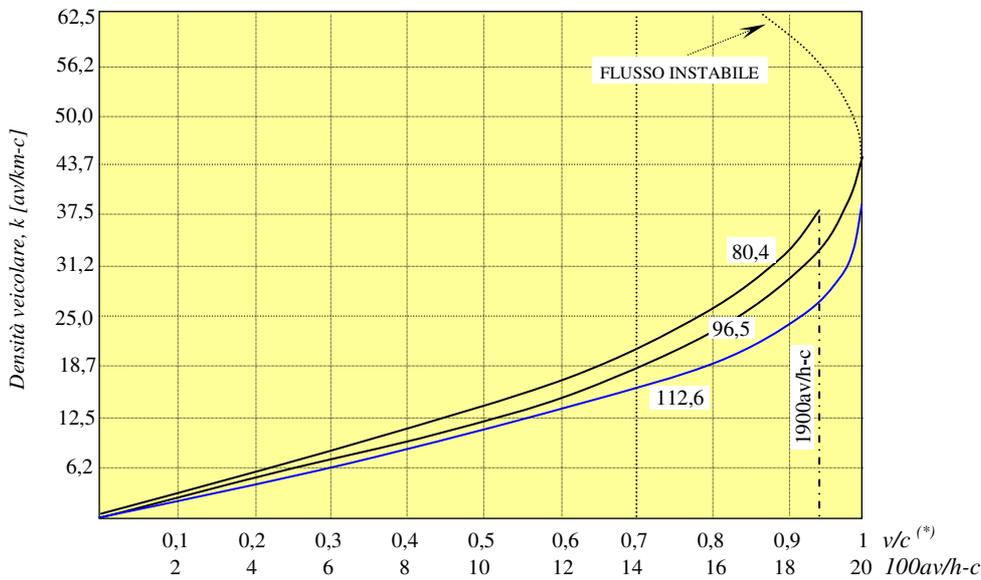


Fig. 3 - Autostrade - Curve densità-volume in condizioni ideali (Hcm, 1985)

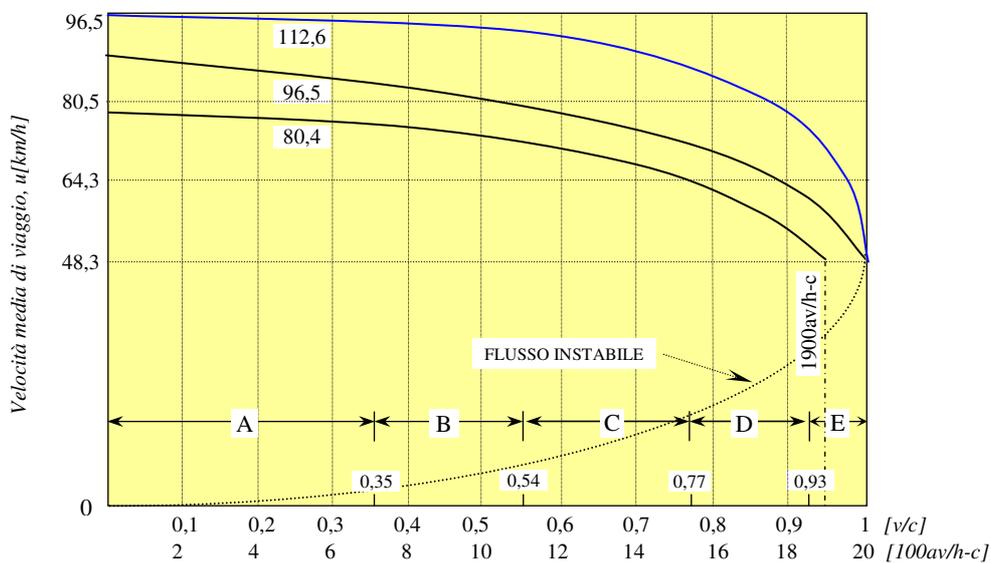


Fig. 4 - Autostrade - Curve velocità-volume in condizioni ideali (Hcm, 1985)

6.5. Fattori che influenzano il deflusso

Qualunque autostrada in condizioni non-ideali presenta curve di deflusso modificate rispetto a quelle standard per l'influenza di una serie di fattori stradali e di traffico spesso non coincidenti con quelli ideali e che di seguito si accennano.

Tra i fattori di geometria, una corsia di larghezza <3,66m o un franco laterale dallo spartitraffico o una banchina ridotti (<1,83m) inducono i conducenti dei veicoli delle corsie adiacenti a marciare con franchi laterali più stretti di quanto vorrebbero: ciò viene compensato mantenendo maggiori spaziature tra veicoli di una stessa corsia. Quindi, se per una data velocità media di viaggio aumentano le spaziature, ne consegue una riduzione di volume; alternativamente, se per una data spaziatura si incontrano restringimenti di corsie o di franchi, si avrà ancora una riduzione di portata.

La riduzione della VdP a valori <113km/h ha significative conseguenze sulle condizioni operative del traffico: infatti, la maggiore attenzione richiesta al conducente per le più difficili caratteristiche geometriche si traduce, per un volume osservato, in una riduzione delle velocità mantenibili rispetto a quelle di segmenti autostradali simili ma con velocità di progetto ideale.

Tra i fattori di traffico, la presenza di mezzi pesanti influenza il deflusso per due motivi: le grandi dimensioni comportano una maggiore occupazione di sede stradale (spaziale e temporale) e portate minori rispetto a quelle realizzabili da una corrente di sole autovetture; le prestazioni (velocità, accelerazioni, ecc.), inferiori a quelle delle autovetture, contribuiscono ad innescare la formazione di plotoni a velocità ridotta, separati da intervalli vuoti che non possono agevolmente essere riempiti per le difficoltà di esecuzione del sorpasso.

Le condizioni ideali fanno anche riferimento ad una popolazione di conducenti composta da utenti abituali (ad es. pendolari): quando questa tipologia varia, come nei fine-settimana, esperienze effettuate in molti Stati degli US hanno mostrato significative riduzioni di capacità (dal 10 al 25%) dovute alle elevate percentuali di utenti occasionali inesperti.

6.6. Livelli di servizio per segmenti-base

Le condizioni di deflusso in autostrada sono caratterizzate, nella zona di stabilità, da un ampio campo di valori di intensità di traffico nei quali la velocità media di marcia resta pressoché inalterata; ciò significa che il parametro velocità, sebbene per i conducenti sia un importante indicatore della qualità del servizio, non è adeguato a definire prioritariamente i LdS. Perciò l'Hcm '85 assume come indicatore della qualità del deflusso, per la sua proprietà di rappresentare direttamente il grado di libertà dei conducenti durante la marcia, la densità veicolare.

La densità viene dunque usata come parametro prioritario per definire i LdS dei segmenti-base delle autostrade anche perché, nel campo della stabilità, densità e flusso sono entrambi crescenti. I valori di densità (arrotondati all'intero più vicino), assunti per individuare i limiti dei LdS, sostanzialmente derivati da quelli teorici dell'analogia *quantità di moto-energia*, sono dati nella Tab. 2.

Tab. 2 - Livelli di servizio in funzione della densità, Hcm 1985

LdS	A	B	C	D	E	F
Densità [av/km-c]	07	12	19	26	42	≥42

Le densità indicate in tabella sono quelle massime ammesse ai LdS associati; il valore "42" per il livello E è la densità alla capacità (critica o ottima) cui corrisponde una VMV≈50km/h ed una $c=2000av/h-c$ per segmenti in condizioni ideali a VdP di 113 o di 96km/h. Perché una corrente di traffico si trovi ad un dato LdS deve essere prioritariamente verificato il criterio della densità.

Nella successiva Tab. 3 è riportato invece, in forma completa, il criterio per individuare i LdS di autostrade impostate a differenti VdP (113, 96 e 80km/h) con i valori attesi di VMV e PSM per le densità corrispondenti.

Si fa notare, ancora, che i valori riportati in Tab. 3, così come quelli desumibili dalle curve di deflusso, riflettono l'influenza del limite di velocità di 55mph delle autostrade US; per le autostrade europee, ove i limiti sono superiori e le dimensioni medie dei veicoli inferiori, sarebbe necessario mettere a punto una diversa parametrizzazione dei livelli di servizio.

Tab. 3 - Livelli di servizio per segmenti-base di autostrada

LdS [-]	Densità [av/km-c]	VdP 113km/h			VdP 96km/h			VdP 80km/h		
		VMV [km/h]	v/c [-]	PSM* [av/h-c]	VMV [km/h]	v/c [-]	PSM [av/h-c]	VMV [km/h]	v/c [-]	PSM [av/h-c]
A	≤7	≥96	0,35	700	**	**	**	**	**	**
B	≤12	≥92	0,54	1100	≥80	0,49	1000	**	**	**
C	≤19	≥87	0,77	1550	≥76	0,69	1400	≥69	0,67	1300
D	≤26	≥74	0,93	1850	≥68	0,84	1700	≥64	0,83	1600
E	≤42	≥48	1,00	2000	≥48	1,00	2000	≥45	1,00	1900
F	>42	<48	***	***	<48	***	***	<45	***	***

* Portata di Servizio Max per corsia in condizioni ideali espressa come intensità di traffico, av/h.
2* Non sono definibili: il LdS "A" per velocità di progetto di 96km/h ed i Livelli "A" e "B" per tracciato a 80km/h perché non esistono tutte le condizioni ideali.
3* Al LdS "F" le VMV vanno dal valore critico a zero, le densità raggiungono il massimo ed il flusso è altamente instabile.

I livelli di servizio per le autostrade sono stati definiti, avendo presenti le risultanze della analogia energetica, in modo da rappresentare ragionevoli campi di variazione delle variabili: densità, velocità media di viaggio e intensità di traffico.

La forma delle curve di deflusso sperimentalmente ricavate richiede comunque che, passando dal livello A al livello E, il range delle velocità e delle densità sia crescente mentre il corrispondente range di intensità di traffico vada progressivamente restringendosi.

Le condizioni operative dei LdS

A: prevalgono VMV≈96km/h su segmenti a velocità di progetto di 113km/h; i veicoli possono manovrare comodamente risultando spaziature medie di 135m (≈22av) che danno ai conducenti un elevato comfort psicofisico nella guida; i lievi incidenti (che comportano capacità temporaneamente limitata da restringimenti di carreggiata) o le brevi interruzioni, sebbene possano abbassare temporaneamente il LdS, non portano alla formazione di code durevoli ed il deflusso rientra rapidamente nel campo del flusso libero.

B: vengono mantenute VMV poco superiori a 92km/h, le spaziature medie sono di ≈80m (≈13av); le possibilità di manovra all'interno della corrente sono solo leggermente limitate ed il comfort dei conducenti è ancora elevato; gli effetti di lievi incidenti sono ancora rapidamente riassorbiti sebbene la durata del decadimento di livello sia maggiore di quella del LdS A.

C: il deflusso è ancora nel campo stabile ma i flussi si avvicinano a quei valori per i quali piccoli incrementi di domanda o restringimenti di carreggiata provocano sostanziali decadimenti delle condizioni operative con formazione di code a monte delle zone critiche; le velocità sono maggiori di 87km/h, le spaziature medie sono di ≈53m (≈9av) e le densità raggiungono le 19av/km-c; le libertà di manovra sono molto limitate e i sorpassi richiedono un notevole livello d'attenzione per cui si prevedono condizioni di stress psicofisico nei conducenti.

D: è l'ultimo livello di flusso stabile ove modesti incrementi di domanda provocano gravi decadi-

menti di operatività del deflusso; non viene generalmente utilizzato per il progetto della sezione; la VMV mantenibile su segmenti a velocità di progetto di 113km/h è $\geq 73\text{km/h}$ ma la libertà di manovra è severamente limitata ed il livello di comfort dei conducenti è basso; piccoli incidenti innescano code di discreta lunghezza e durata in quanto non vi sono spaziature sufficienti per riassorbire le “strizioni” di carreggiata: infatti la spaziatura media è $\approx 38\text{m}$ ($\approx 6\text{av}$) mentre la densità arriva a 26av/km-c .

E: descrive lo stato operativo della corrente di traffico nell’intorno della capacità che ne costituisce il limite inferiore; i condizionamenti ai conducenti sono pesantissimi poiché non vi sono spaziature utili tra i veicoli ($\approx 24\text{m} = 4\text{av}$) e di conseguenza il deflusso è instabile. Qualunque disturbo alla marcia della colonna (quale un cambio di corsia o un’immissione da rampa) innesca la formazione di onde d’urto verso monte con probabili arresti del deflusso e formazione di code. Alla capacità, che si raggiunge per velocità di $\approx 48\text{km/h}$, la corrente non ha la possibilità di riassorbire neanche il più piccolo dei disturbi citati; qualunque incidente può provocare l’arresto della corrente e la formazione di code crescenti. Il *range* di portate del LdS E è più ristretto rispetto a quello degli altri e riflette il sostanziale deterioramento delle condizioni di deflusso caratterizzato dall’impossibilità di manovra e dal bassissimo comfort dei conducenti.

F: descrive condizioni di flusso forzato e interrotto; tali sono quelle della marcia nelle code che si formano dietro zone di interruzione di traffico che si verifica quando un incidente causa una temporanea riduzione di capacità per cui i veicoli in arrivo superano quelli smaltibili dalla sezione residua; quando, in corrispondenza di rampe d’immissione, il flusso entrante dalla rampa sommato a quello della corsia di accoglimento supera la capacità di quest’ultima; quando, infine, l’intensità di traffico di progetto assunta per l’ora di punta risulta superata da quella che effettivamente si verifica.

Poiché il LdS F si rileva in una coda come risultato di interruzioni o strettoie situate a valle, la dizione *LdS F* si adotta sia per identificare le condizioni di deflusso nella zona origine della coda (strettoia, incidente), sia per quelle all’interno della coda che si va formando a monte di essa; l’estensione della coda ed i ritardi da essa causati costituiscono un particolare argomento di studio dell’Hcm ‘85, basato su tassi di arrivo e di scarico noti: la metodologia ivi illustrata permette, in pratica, di quantificare l’estensione della congestione causata da una situazione di marcia nelle condizioni citate.

6.7. Relazioni fondamentali

La portata di servizio massima ideale

Nella Tab. 3 sono indicate le massime Intensità di Traffico o Portate di Servizio Massime ideali (base 15min) di ogni LdS i cui valori, arrotondati alle 50av/h-c , sono ricavati dalla relazione:

$$\mathbf{PSM}_i = c_j (v/c)_i \quad [\text{av/h-c}] \quad 1$$

PSM_i = portata di servizio massima per corsia dell’i-esimo LdS

c_j = capacità in condizioni ideali per segmenti autostradali a VdP “j”: 2000av/h/c per elementi a VdP di 113 e 96km/h ; 1900av/h/c per elementi a VdP di 80km/h

$(v/c)_i$ = massimo valore del rapporto volume/capacità dell’i-esimo LdS.

La portata di servizio in condizioni reali

Per definire valori di portata (IT) ai diversi LdS che riflettano le condizioni prevalenti di strada e

traffico, normalmente non-ideali, è necessario introdurre dei fattori correttivi alla PSM_i che tengano conto delle reali condizioni di traffico, di tracciato e di piattaforma, nonché del numero di corsie per senso di marcia. La relazione che lega la portata effettiva dell'i-esimo livello (PS_i) a quella teorica (PSM_i) raggiungibile solo in condizioni ideali è allora:

$$PS_i = PSM_i N f_w f_{hv} f_p \quad [vei/h-senso] \quad 2$$

PS_i = portata di servizio dell'i-esimo LdS nelle condizioni prevalenti
 N = numero di corsie per senso di marcia
 f_w = fattore correttivo (≤ 1) per corsie e/o franchi laterali non ideali
 f_{hv} = fattore correttivo (≤ 1) per presenza di mezzi pesanti
 f_p = fattore correttivo (≤ 1) per tipologia di conducenti.

Si noti che la portata di servizio corretta è riferita a condizioni-tipo: assenza di incidenti e buone condizioni atmosferiche e di pavimentazione.

Le equazioni 1, 2 possono essere combinate per calcolare direttamente la PS_i senza passare attraverso la PSM_i :

$$PS_i = c_j (v/c)_i N f_w f_{hv} f_p \quad [vei/h-senso] \quad 3$$

Le relazioni 1/2/3 sono le equazioni-base per tutte le analisi di capacità e le altre applicazioni concernenti i "segmenti-base" delle autostrade.

6.8. I fattori correttivi della PSM

Come accennato in precedenza, per riportare alle condizioni prevalenti, quelle cioè che si ritrovano effettivamente nella marcia autostradale, i valori di portata dei diversi LdS determinati sotto condizioni ideali, è necessario "correggerli" utilizzando una serie di "fattori" relativi alla geometria stradale e al traffico determinati sperimentalmente sulla base di numerosissime rilevazioni (effettuate prevalentemente negli US) e riassunti in appropriate tabelle nell'Hcm '85. Di seguito vengono descritti (e ragguagliati alle unità metriche, ove necessario) i principali fattori correttivi delle condizioni ideali da applicare nell'analisi di segmenti-base di autostrade.

6.8.1. Il fattore f_w

Il valore della PSM per segmenti autostradali con corsie di larghezza $< 3,66m$ o con franchi laterali $< 1,83m$, va corretto moltiplicandolo per il fattore f_w allo scopo di riportarlo a condizioni inferiori agli standard ideali.

Non sempre, però, gli ostacoli laterali (barriere spartitraffico continue, muri di contenimento, ecc.), anche se si trovano a distanza ridotta dalle linee di margine della carreggiata, riducono la PSM: ciò perché gli utenti, se prevalentemente abituali, "imparano" a marciare su quel tipo di strada con quegli elementi caratteristici; sta, allora, all'esperienza del tecnico considerare o no come influenti tali elementi, a distanza ridotta rispetto a quella ideale.

Comunque, i valori del fattore f_w sono riportati nella Tab. 4.

Tab. 4 - Fattore correttivo per corsie e franchi laterali, f_w

Distanza ostacoli da cigli carregg.ta [m]	Ostacoli su un ciglio Larghezza corsie [m]				Ostacoli su ambo i cigli Larghezza corsie [m]				f_w Autostrade 4 corsie
	3,66	3,35	3,05	2,74	3,66	3,35	3,05	2,74	
$\geq 1,83$	1,00	0,97	0,91	0,81	1,00	0,97	0,91	0,81	
$\geq 1,52$	0,99	0,96	0,90	0,80	0,99	0,96	0,90	0,80	
$\geq 1,22$	0,99	0,96	0,90	0,80	0,98	0,95	0,89	0,79	
$\geq 0,91$	0,98	0,95	0,89	0,79	0,96	0,93	0,87	0,77	
$\geq 0,61$	0,97	0,94	0,88	0,79	0,94	0,91	0,86	0,76	
$\geq 0,30$	0,93	0,90	0,85	0,76	0,87	0,85	0,80	0,71	
0,00	0,90	0,87	0,82	0,73	0,81	0,79	0,74	0,66	

6.8.2. Il fattore f_{hv}

La determinazione del fattore correttivo per la presenza di mezzi pesanti nella corrente di traffico avviene in due fasi:

1. Si determinano gli *equivalenti in autovetture*¹: E_t =equival.te dell'autocarro-tipo; E_b =equival.te dell'autobus; E_r =equival.te del veicolo ricreazionale, per ogni categoria di mezzo pesante e per le condizioni di strada e traffico esistenti.

2. Usando i citati equivalenti, note le percentuali (P_t , P_b , P_r) delle varie categorie di mezzi pesanti, con l'aiuto di apposite tabelle o utilizzando una relazione analitica, si determina il fattore correttivo f_{hv} .

L'influenza dei mezzi pesanti è accentuata dal grado di acclività e dalla lunghezza delle livellette: particolari tabelle correttive tengono conto degli effetti di salite più o meno lunghe e acclivi sui parametri di deflusso.

L'equivalente si determina, perciò, sia per lunghi segmenti a caratteristiche generali uniformi che per singole livellette; se il segmento comprende tratte in piano, ascesa e discesa e le tratte in ascesa sono a pendenza $3 \leq i < 6\%$ ma con sviluppo $L \leq 800m$, o a $i < 3\%$ ma con sviluppo $L \leq 1600m$, esso può essere considerato come un segmento unico a caratteristiche generali uniformi. Quando, invece, nella tratta esistono elementi che non rispettano le citate condizioni, essi vanno a costituire segmenti a se stanti per i quali dovrà calcolarsi un apposito valore dell'equivalente in autovetture.

Equivalente in autovetture su estesi segmenti

Innanzitutto è necessario classificare l'andamento generale del segmento in una delle categorie: piano, ondulato, montuoso.

È in *piano* per qualunque combinazione di pendenze e planoaltimetria di tracciato tale da consentire ai mezzi pesanti di mantenere velocità medie circa uguali a quelle delle autovetture; in questo caso le pendenze di brevi salite si aggirano sull'1÷2% al massimo.

È *ondulato* per qualunque combinazione di pendenze e planoaltimetria che induca i mezzi pesanti a ridurre sensibilmente la velocità rispetto a quella delle autovetture, ma che non li costringa ad operare a velocità "critica" per lunghi periodi di tempo.

È *montuoso* per qualunque combinazione di pendenze e di planoaltimetria di tracciato tale da costringere i mezzi pesanti a marciare a velocità critica per lunghi tratti o con frequenza.

¹ L'equivalente rappresenta il numero di autovetture che "consumerebbe" la stessa percentuale di capacità di autostrada di un mezzo pesante nelle condizioni prevalenti di strada e traffico. Tra i metodi sperimentali usati per determinarlo, il più preciso è quello che si basa sul confronto della *ddf* delle velocità delle autovetture in una corrente di traffico misto per una portata nota, con l'analoga *ddf* di velocità in una corrente di sole autovetture.

Individuata la categoria prevalente del tracciato, l'equivalente in autovetture per estesi segmenti autostradali a caratteristiche generali uniformi inquadrabili in una delle tre categorie citate, viene determinato usando i valori dell'apposita tabella (Tab. 5).

Tab. 5 - Equivalenti in autovetture su estesi segmenti autostradali a caratteristiche uniformi

E	Tipo di tracciato		
	Piano	Ondulato	Montuoso
E _t	1,7	4,0	8,0
E _b	1,5	3,0	5,0
E _r	1,6	3,0	4,0

Equivalente in autovetture su singole livellette in ascesa

Qualunque livelletta di sviluppo $L > 1600\text{m}$ e pendenza $i < 3\%$ o $L \leq 800\text{m}$ e pendenza $\geq 3\%$ è da considerare come segmento autostradale particolare: per esso le procedure di analisi considerano separatamente tratte in salita o in discesa a pendenza costante o composita. Le prestazioni dei mezzi pesanti su salite acclivi variano in rapporto alla categoria e, all'interno di essa, alla classe di peso.

Apposite Tabb., da usarsi per livellette singole, danno i valori degli E delle varie categorie di mezzi pesanti in funzione delle relative percentuali e della lunghezza e dell'acclività delle livellette, per le diverse tipologie di piattaforma autostradale (4 e 6/8corsie).

Il calcolo del fattore f_{hv}

Una volta determinati i valori degli E_t , E_b , E_r , questo fattore correttivo si può calcolare dalla relazione:

$$f_{hv} = [1 + P_t(E_t - 1) + P_b(E_b - 1) + P_r(E_r - 1)]^{-1} \quad [\text{vei/av}] \quad 4$$

f_{hv} = fatt. corrett. delle Portate di Servizio ideali per l'effetto combinato di autocarri, bus e veicoli ricreazionali, vei/av

P_t = percentuale di autocarri, decimi

P_b = percentuale di autobus, decimi

P_r = percentuale di veicoli ricreazionali, decimi.

La 4 consente anche di trasformare una portata espressa in autovetture in una portata di traffico misto con una data percentuale di mezzi pesanti.

6.8.3. Il fattore f_p

I dati di riferimento per l'analisi delle autostrade sono basati su correnti veicolari formate da utenti abituali; in effetti le correnti con caratteristiche composite di conducenti (domenicali, turisti, occasionali, ecc.) usano la strada meno efficientemente di quelle composte da utenti abituali: ciò è dimostrato dai valori di traffico rilevati nelle autostrade nei week-end ove la capacità raggiunge valori di sole $1500 \div 1600\text{av/h-c}$. È logico, quindi, aspettarsi anche proporzionali riduzioni delle portate di servizio quando la popolazione dei conducenti non è ideale.

Per tener conto di questo aspetto viene introdotto l'apposito fattore correttivo f_p legato alla tipologia dei conducenti. In Tab. 6 sono riportati valori indicativi di questo fattore; se si desidera condurre un'analisi più accurata, esso dev'essere determinato sperimentalmente.

Tab. 6 - Fattore correttivo per tipologia dei conducenti, f_p

Tipologia conducenti	Utenti abituali	Altri utenti
Fattore $f_p \rightarrow$	1,00	0,75÷0,90

6.9. Applicazioni-tipo

Quanto precedentemente esposto viene applicato per affrontare tre tipi di problematiche: analisi operativa, progetto e pianificazione.

L'*analisi operativa* riguarda la stima delle caratteristiche del deflusso su una autostrada esistente o in progetto: LdS, velocità e densità corrispondenti, portata massima, portate di servizio massime nelle condizioni prevalenti possono essere determinati una volta che siano note le caratteristiche geometriche e della domanda di traffico esistente o prevista (volumi, composizione della corrente, FhP, popolazione dei conducenti). Con questa analisi si possono anche valutare gli effetti di miglioramenti locali o di proposte progettuali alternative.

Il *progetto* consiste sostanzialmente nel calcolo del numero di corsie necessario per smaltire una data domanda di traffico ad un dato LdS, noti nel dettaglio gli standard geometrici. La fase progettuale richiede, perciò, accurate previsioni di domanda comprese le caratteristiche delle punte e la composizione della corrente veicolare.

L'obiettivo della *pianificazione* (intesa anche come progettazione di massima) è identico a quello del progetto: la differenza sta nel grado di approssimazione delle previsioni di traffico (che possono basarsi solo su previsioni di Tgm), nella previsione dei mezzi pesanti (che si limita alla categoria dei soli autocarri) e nella classifica dell'andamento del tracciato, individuato semplicemente dalla tipologia generale: piano, ondulato, montuoso. In base a questi elementi, determinati con larga approssimazione, può farsi una prima stima del numero di corsie necessarie ad assicurare un certo livello di servizio.

Si descrivono ora le metodiche usate nel Manuale Hcm '85 per affrontare i problemi caratteristici dei segmenti autostradali.

6.9.1. L'analisi operativa

Per affrontare questa problematica è utile procedere per fasi che, di seguito, vengono esposte.

1. Si acquisiscono i dati-base, cioè una serie di informazioni dettagliate sulla geometria e sul traffico, da derivarsi attraverso indagini sul campo o con studi accurati; si deve allora disporre di:

- caratteristiche di traffico: volume 30^a hdp, composizione della corrente (autovetture, mezzi pesanti distinti per categorie), FhP, tipo di conducenti (abituali, occasionali)
- caratteristiche stradali: larghezza di corsie e banchine, franchi laterali, velocità di progetto, pendenze, curve, tronchi a caratteristiche uniformi per volumi, tipo di strada e di traffico (segmenti-base); i punti critici (rampe d'immissione e uscita, livellette a pendenza elevata, zone di scambio, ecc.) richiedono analisi separate e particolari.

2. Fase operativa: per stabilire le prestazioni di un segmento-base, note le caratteristiche di strada e traffico descritte in precedenza, ci si basa sulle formule 1/2/3 che consentono di calcolare la PSM o il rapporto v/c ; questi valori possono essere usati per entrare nella Tab. 3 per determinare il LdS o nelle Figg. 3/4 per individuare in via approssimata densità e velocità attese.

In particolare, si seguono i seguenti passi:

- si trasformano i volumi orari effettivi in intensità di traffico base 15min mediante il FhP con la:

$$PS = IT = V_E / FhP \quad [vei/h] \quad 5$$

PS = Portata di Servizio (IT) del segmento in esame, vei/h
 V_E = domanda effettivam. rilevata, vei/h
 FhP = fattore dell'ora di punta per il segmento in esame

- si calcolano dalle apposite tabelle i fattori correttivi che fanno riferimento alle condizioni prevalenti: f_w, f_{hv}, f_p
- si determinano la PSM o il rapporto v/c dalle equazioni 2/3 risolte per i parametri cercati:

$$PSM = PS/N f_w f_{hv} f_p \quad [av/h-c] \quad 6$$

$$v/c = PS/c_j N f_w f_{hv} f_p \quad 7$$

- si confrontano PSM o rapporti v/c ottenuti dalle 6 o 7 con i valori riportati in Tab. 3 per individuare il LdS del segmento; perché il deflusso rientri in un certo livello, sia la PSM che il rapporto v/c dovranno essere compresi nei valori-limite del LdS relativo
- si entra, infine, nei grafici delle curve di deflusso delle Figg. 3/4 con il rapporto v/c o con la PSM per determinare, rispettivamente, densità e velocità media di viaggio attese.

Si supponga di aver determinato per un segmento autostradale in piano a 2corsie/senso e $VdP=113km/h$ un rapporto $v/c=0,8$; tale valore deriva da una domanda rilevata amplificata (V_E/FhP) di 2460 vei/h-senso, $f_w = 0,9$, $f_{hv} = 0,9$ e $f_p = 0,95$. Infatti:

- il $V_E = 2200vei/h-sdm$; $FhP = 0,894$
- le corsie sono larghe 3,05m e esiste un guardrail a 1,52 m dal ciglio esterno (quindi $f_w = 0,9$)
- i mezzi pesanti sono solo autocarri (15%) con $E_t=1,7$ e, applic. la (4), $f_{hv} = 0,9$
- la popolazione dei conducenti è prevalentemente di abituali e si assume $f_p = 0,95$.

Entrando con $v/c=0,8$ in Tab. 3 si vede che questo valore è $>0,77$ (massimo ammesso per il LdS "C") ma $<0,93$ (massimo ammesso per il LdS "D"), per cui si deduce che il segmento sta operando al livello di servizio "D".

Inoltre, entrando con $v/c=0,8$ nelle Figg. 3/4 per determinare densità e velocità media di viaggio attese, si trova che la densità veicolare è $\approx 19av/km-c$ mentre la velocità media è $\approx 84km/h$; tali valori confermano che il deflusso avviene al LdS "D".