

IL RUOLO DELLE INTERFERENZE VEICOLARI NELLA DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI DI SICUREZZA DELLE INFRASTRUTTURE AUTOSTRADALI

SASCIA CANALE

FRANCESCO NICOSIA

SALVATORE LEONARDI

SOMMARIO

Le condizioni di sicurezza della circolazione sono diventate l'elemento prioritario su cui fondare la progettazione e la verifica delle infrastrutture di trasporto.

Il livello di sicurezza in autostrada è fortemente condizionato dalle interferenze reciproche tra i veicoli in marcia. In questo contesto, riveste particolare interesse la manovra di sorpasso, la quale, quando il flusso veicolare supera certi valori, determina la separazione delle correnti veicolari viaggianti nelle due corsie.

In questa ricerca intendiamo, in primo luogo, dissertare sul grado di sicurezza realmente associato alle configurazioni descritte dai livelli di servizio, e, in secondo luogo, attraverso lo studio della manovra di sorpasso, formulare alcune proposte di intervento mirate al miglioramento delle caratteristiche di sicurezza e mobilità delle infrastrutture autostradali.

ABSTRACT

Safety conditions are became the most important element of planning and verification of transport infrastructures.

The highway safety level is strongly influenced by mutual interferences of vehicular traffic.

In this contest is very important the manoeuvre of overtaking, because, when the traffic exceeds some fixed values, it causes the separation of traffic that travels in the two lanes.

With this research, firstly, we want dissert on the safety degrees, that are really associated with the configuration described from the Levels of Service (LOS), and, secondly, through the study of overtake manoeuvre, we want express some proposals of intervention aimed to improve the safety characteristics and the flow on the motorway infrastructures.

1. PREMESSE

L'analisi congiunta delle condizioni di circolazione e delle caratteristiche di incidentalità relative alle autostrade italiane, rappresenta, da sempre, lo strumento preposto a vagliare la natura delle inadeguatezze riscontrabili e, nel contempo, a giustificare le proposte di potenziamento e di riqualificazione mirate al miglioramento delle caratteristiche di mobilità e di sicurezza.

In questo contesto, si rivela essenziale, lo studio dei condizionamenti reciproci tra i veicoli in marcia, i quali possono degenerare in veri e propri "intralci" alla circolazione con conseguente scadimento della qualità del servizio e della sicurezza di viaggio. Studi recenti, hanno già messo in evidenza la criticità delle manovre di immissione e di uscita

dall'autostrada, arrivando anche a proporre radicali modifiche dei criteri progettuali delle corsie di accelerazione e di decelerazione.

L'iter procedurale di questa ricerca si articola in due fasi essenziali:

- 1) l'analisi delle condizioni di deflusso "normale" sulle infrastrutture autostradali, finalizzata a mettere in evidenza che, le condizioni operative descritte dai livelli di servizio (definiti e calcolabili mediante le procedure descritte dall'Highway Capacity Manual (1994)), non sono di iso-sicurezza;
- 2) lo studio delle interferenze tra i veicoli in marcia quando viene effettuata la manovra di sorpasso. In particolare verrà focalizzata l'attenzione su due aspetti:
 - l'influenza della manovra sulla distribuzione dei veicoli nelle due corsie (di marcia e di sorpasso);
 - le implicazioni sull'accettazione del rischio da parte di quegli utenti che, volendo effettuare il sorpasso, sono costretti a ritardarlo, a causa della presenza, sulla corsia di sinistra, di altri veicoli in sorpasso.

Tramite questa duplice indagine si intende, in primo luogo, dissertare sulle reali qualità operative di un'infrastruttura autostradale (anche attraverso il confronto con la procedura di calcolo del livello di servizio proposta dall'H.C.M. (1994)) e, in secondo luogo, giungere ad evidenziare la necessità di proposte di intervento mirate al miglioramento delle caratteristiche di sicurezza e mobilità.

2. I LIVELLI DI SERVIZIO IN BASE ALL'HIGHWAY CAPACITY MANUAL (1994)

Al fine di comprendere meglio la metodologia elaborata per associare diversi gradi di sicurezza ai livelli di servizio, ci sembra opportuno analizzare preliminarmente alcune interessanti novità introdotte dall'ultima edizione dell'Highway Capacity Manual a proposito della definizione stessa di Livello di Servizio.

E' noto che il livello di servizio di qualsiasi infrastruttura viaria è influenzato sia dalle caratteristiche geometriche che da quelle relative alla composizione del flusso veicolare; a tal proposito, l'Highway Capacity Manual, per il caso autostradale, propone le seguenti condizioni ideali:

- larghezza minima delle corsie pari a 12 ft (3.66 m);
- distanza minima dai cigli e da altri eventuali ostacoli pari a 6 ft (1.83 m);
- flusso veicolare composto dai soli autoveicoli (passengers cars);
- prevalenza di utenti abituali per l'infrastruttura.

In base alle predette condizioni, l'H.C.M. fornisce due diagrammi (Fig. 1 e Fig. 2), uno per autostrada a 4 corsie ed

uno per autostrada a 6 corsie, nei quali il flusso veicolare viene posto in relazione con la **velocità di flusso libero**.

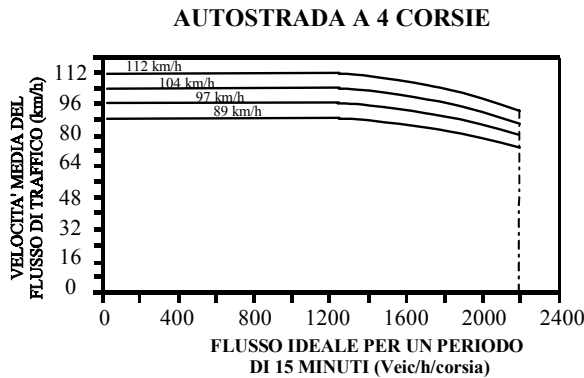


Fig. 1 - Diagramma flusso-velocità per autostrada a 4 corsie. (Highway Capacity Manual (1994)).

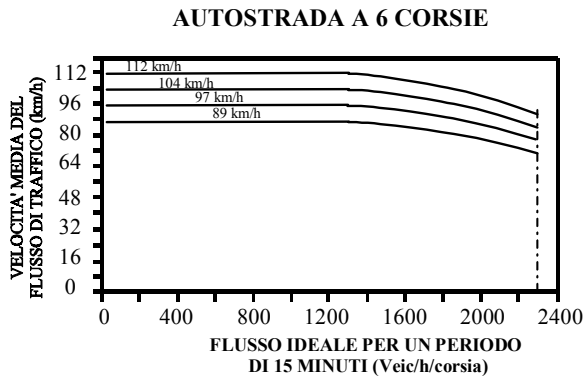


Fig. 2 - Diagramma flusso-velocità per autostrada a 6 corsie. (Highway Capacity Manual (1994)).

Dall'analisi dei due diagrammi suddetti si evince che la velocità di flusso libero risulta invariabile fino ad un determinato valore del flusso veicolare. Ad esempio, nel caso di $V=112$ km/h (70 mph) si individua un valore del flusso pari a 1300 veic/h/corsia, come limite oltre il quale la velocità di flusso libero decresce fino ad attingere al valore minimo.

Anche il valore della capacità, in condizioni ideali, subisce, rispetto all'H.C.M. 85, una rettifica, passando da 2000 veic/h/corsia a 2200 veic/h/corsia per strade a 2 corsie per ogni senso di marcia ed a 2300 veic/h/corsia per strade a 3 corsie per ogni senso di marcia.

La velocità di flusso libero, essendo poco sensibile alle variazioni del flusso, non può essere considerata una misura adeguata per la valutazione del livello di servizio; tale osservazione ci consente di introdurre la novità più eclatante del nuovo H.C.M.: il livello di servizio viene calcolato in funzione della densità veicolare e non del valore della velocità sostenibile (Tab. 1).

E' importante sottolineare che il valore del flusso veicolare, non fornendo indicazioni né sulla velocità di marcia né sul reciproco condizionamento dei veicoli, non può essere considerato un parametro qualitativo delle condizioni operative di un'autostrada.

L'H.C.M. (1994) ha pertanto preferito relazionare tutta la procedura del calcolo del livello di servizio al valore della densità. Essa fornisce precise indicazioni sui distanziamenti tra i veicoli e sul loro reciproco condizionamento; infatti ricordando che:

$$D = \text{Densità} = \frac{1000}{d_s}; \text{ con } d_s = \text{distanziamento spaziale tra i}$$

$$\text{veicoli, e } d_t = \text{distanziamento temporale tra i veicoli} = \frac{d_s}{V},$$

si deduce che dalla conoscenza della densità e della velocità è possibile ricavare sia lo spazio fisico che quello temporale tra due veicoli su una stessa corsia (parametri implicitamente indicativi di ulteriori fattori quali: il reciproco condizionamento tra i veicoli, la possibilità di eseguire sorpassi, la sicurezza di marcia dei veicoli, la libertà di manovra ed il comfort di guida).

LIVELLO DI SERVIZIO	MASSIMA DENSITA' (Veic/km/corsia)	
A	6.21	
B	9.94	
C	14.91	
D	19.88	
LIVELLO DI SERVIZIO E		
Velocità di flusso libero (km/h)	MASSIMA DENSITA' (Veic/km/corsia)	
	Autostrada a 4 corsie	Autostrada a 6 corsie
112.65	22.80	24.67
104.60	24.42	26.97
96.56	25.79	28.58
88.51	27.74	29.76
LIVELLO DI SERVIZIO F		
Il livello di servizio F, a causa degli intasamenti che producono la formazione di code, non può essere trattato come un caso di flusso ininterrotto ma come flusso congestionato. L'Highway Capacity Manual fornisce le modalità per il calcolo del Lds F.		

Tab. 1 - Valori di densità limite associati ai livelli di servizio.

Le figure 3 e 4, riportano i diagrammi, dedotti dall'Highway Capacity Manual (1994) per il calcolo dei livelli di servizio nel caso di autostrade a 4 e 6 corsie.

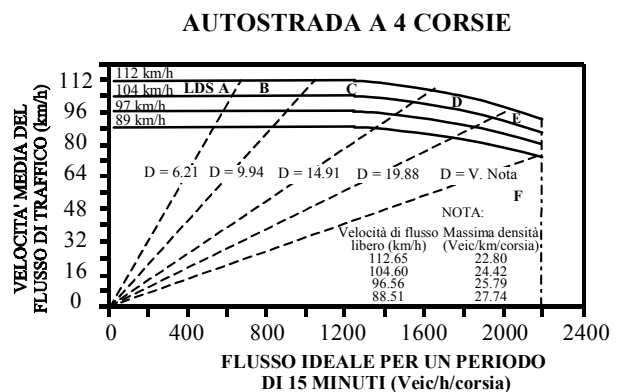


Fig. 3 - Diagramma per il calcolo del livello di servizio. (autostrada a 4 corsie - H.C.M. 1994).

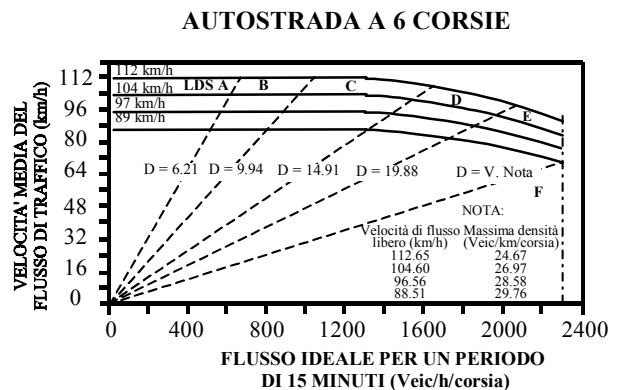


Fig. 4 - Diagramma per il calcolo del livello di servizio. (autostrada a 6 corsie - H.C.M. 1994).

3. ELABORAZIONE DI UNA METODOLOGIA DI VERIFICA DEL GRADO DI SICUREZZA ASSOCIATO AI LIVELLI DI SERVIZIO

Allo scopo di analizzare criticamente le condizioni di sicurezza associate ai diversi valori del livello di servizio assumibili da un'infrastruttura autostradale, si è elaborata una metodologia di indagine fondata su una serie di ipotesi semplificative riguardanti le caratteristiche geometriche della strada, veicolari e del flusso.

- **Caratteristiche geometriche:** si considera una carreggiata costituita da due corsie (per senso di marcia) di larghezza ≥ 3.66 m, con distanza dagli ostacoli fissi ≥ 1.75 m. Si assume inoltre una pendenza longitudinale pari allo 0 %.
- **Caratteristiche veicolari:** per ogni flusso veicolare ipotizzato si è fatto riferimento a veicoli simili con omogenee caratteristiche di potenza. La dimensione media dei veicoli è posta pari a 4.00 m.
- **Caratteristiche del flusso:** si considera un flusso veicolare omocinetico. La distribuzione dei veicoli all'interno del flusso è stata ipotizzata di tipo normale (i veicoli facenti parte del flusso omocinetico hanno la stessa distanza reciproca). La velocità del flusso veicolare viene fatta variare nell'intervallo compreso tra 10 km/h e 130 km/h.

Appare evidente che, a parte l'ipotesi restrittiva dei flussi omocinetici, lo scenario che si evince dalle ipotesi fatte rispecchia in maniera fedele le configurazioni geometrico-dinamiche di gran parte delle infrastrutture autostradali italiane.

La metodologia di analisi che proponiamo, si articola in due punti essenziali:

- il calcolo del massimo flusso veicolare e della massima densità veicolare per corsia, nel rispetto delle *condizioni di sicurezza*;
- il confronto tra le configurazioni ottenute e quelle proposte dall'Highway Capacity Manual (1994).

Per definire le *condizioni di sicurezza* cui fare riferimento per la valutazione dei valori limite di densità e flusso veicolare occorre notare che, nel "caso autostradale" non si presenta il problema dell'intralcio della corsia di sorpasso da parte di veicoli provenienti in senso opposto; la velocità di marcia dei veicoli presenta un andamento coincidente con una "gaussiana", caratterizzato da modeste differenze tra i valori della media e quelli della moda.

Lo scostamento spaziale tra i veicoli è l'elemento discriminante le condizioni di sicurezza.

La distanza di sicurezza da utilizzare è ben diversa dalla distanza di arresto valutabile a mezzo della seguente espressione:

$$D_s = D_a = v \cdot t + \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot \left(f_e \pm \frac{i}{1000} \right)} \quad [1]$$

dove:

- v = velocità (m/s);
- t = tempo di reazione (s);
- g = accelerazione di gravità (m/s^2);
- f_e = coefficiente di aderenza equivalente;
- i = pendenza della livelletta.

La distanza di arresto è fornita dalla somma di due contributi: uno dovuto alla reazione dell'utente e l'altro alla frenatura del veicolo in condizioni limiti di aderenza.

La distanza di arresto calcolata tramite la [1], fornisce la distanza di sicurezza soltanto nel caso in cui il veicolo si deve arrestare prima di urtare contro un ostacolo fisso posto nella corsia di marcia. Se facciamo riferimento alle reali condizioni

operative riscontrabili in autostrada, appare evidente l'assenza della fase di arresto del veicolo; in effetti, non appena il veicolo in marcia ha la percezione del rallentamento del veicolo che lo precede, inizia a decelerare con le stesse modalità di decelerazione (cioè in virtù delle ipotesi di distribuzione normale all'interno del flusso omocinetico). Nel nostro caso, dunque, la distanza di sicurezza sarà data dalla seguente espressione semplificata:

$$D_a = v \cdot t \quad [2]$$

Come si evince dalla [2], diventa di fondamentale importanza la scelta del tempo di reazione. Tale parametro è campo di studio degli ergonomisti, i quali ci danno una vasta gamma di informazioni sia per quanto riguarda i valori assumibili sia per ciò che concerne i fattori che possono condizionare tale parametro.

In effetti il tempo di reazione dipende da diversi fattori:

- **età:** con l'età diminuisce la capacità del cervello di ricevere ed inviare le informazioni, diminuisce la sincronia dei movimenti (del 20-30 %) e la capacità di fornire forze elevate con gli arti (fino al 65 %);
- **carico di informazioni:** durante la guida l'utente riceve una serie di informazioni (cartelli stradali, lettura della velocità, ascolto della radio, ecc.). Tutte queste informazioni devono essere elaborate dal cervello; pertanto, maggiore è questo carico, maggiore sarà il tempo di reazione richiesto;
- **stress:** quando si viaggia con valori di flusso prossimi alla capacità, il lavoro del guidatore è talmente elevato da procurare uno stato di stress psicologico che produce nell'utente una maggiore disattenzione, un ritardo nelle reazioni ed una maggiore propensione all'accettazione del rischio;
- **strumenti di bordo:** l'organizzazione ergonomica della strumentazione di cui è corredato l'interno del veicolo è oggetto di continui studi e conseguenti modifiche; in effetti, l'utente nella maggior parte dei casi, per usufruire di tale strumentazione deve distogliere la visuale dall'esterno ed indirizzarla all'interno del veicolo. Il tempo che l'utente dedica alla visuale interna varia con il compito che deve svolgere, e può andare da qualche frazione di secondo fino a qualche secondo per compiti più specifici. In genere, comunque, il pilota tiene mediamente lo sguardo all'interno del veicolo per un periodo compreso tra 0.6 ed 1.6 sec. Si viene così a creare una serie di competizioni tra l'esterno e l'interno, con l'utente che alterna lo sguardo tra le due visuali.

Tali studi comunque riferiscono che il tempo di reazione, in funzione di tutti questi fattori, può variare tra 0.8 e 2.14 sec. Il nostro studio, alla luce di tali elementi, è stato eseguito considerando un intervallo di tempi di reazione compreso tra 1 e 2 sec. Le considerazioni di carattere generale riportate in appresso, faranno riferimento ad un tempo di reazione di 2 sec. Prendendo come riferimento un pilota medio con un tempo di reazione di circa 1.5 secondi, si è voluta mettere in conto la possibilità che questi sia distratto da una qualsivoglia causa (interna o esterna) e quindi per almeno 0.5 sec. distolga lo sguardo dalla visione esterna.

Osserviamo che gli utenti autostradali sono spesso "colpevoli" di non rispettare la distanza di sicurezza, calcolata tramite la [2]; infatti, soprattutto nelle condizioni di traffico intenso, si vengono a formare plotoni di veicoli marcianti a velocità sufficientemente elevate e caratterizzati da distanziamenti spaziali insufficienti a garantire le condizioni di frenatura adeguate in caso di arresto di un veicolo del plotone.

Nota la distanza di sicurezza è possibile ricavare l'effettiva interdistanza tra i veicoli appartenenti al flusso omocinetico:

$$D'_S = D_S + L_m \quad [3]; \text{ dove:}$$

D'_S = interdistanza tra i veicoli [m];

D_S = distanza di sicurezza valutata in base alla [2];

L_m = lunghezza media degli autoveicoli (4 m).

E' possibile ricavare infine, sia la densità veicolare (D), sia il massimo numero di veicoli (N_{MAX}) che possono permanere, in sicurezza, in una stessa corsia autostradale:

$$D = \frac{1000}{D'_S} \quad [4]; \quad N_{MAX} = \frac{V \cdot 1000}{D'_S} \quad [5]$$

A questo punto, si hanno a disposizione tutti i parametri adeguati a formulare la metodologia di analisi costituente l'obiettivo della prima parte della nostra ricerca; l'elaborazione di tale procedura, tramite il supporto di un software matematico, è sintetizzabile a mezzo di una serie di "steps" successivi:

- ⇒ impostazione di una routine di calcolo che consente di far variare la velocità dei veicoli da 10 km/h fino a 130 km/h, con incrementi di 10 km/h per volta;
- ⇒ calcolo della distanza di sicurezza a mezzo della [2], assumendo un tempo di reazione pari ad 1 secondo;
- ⇒ valutazione dell'interdistanza tra i veicoli tramite la [3];
- ⇒ calcolo della densità veicolare a mezzo della [4];
- ⇒ valutazione, a mezzo della [5], del numero massimo di veicoli per corsia;
- ⇒ impostazione di un processo iterativo che consente di ripetere le ultime 4 calcolazioni, prendendo in considerazione i tempi di reazione compresi tra 1 e 2 secondi, facendo riferimento ad incrementi di 0.25 secondi.

Si riporta, in figura 5, il flow chart descrittivo della metodologia appena esposta.

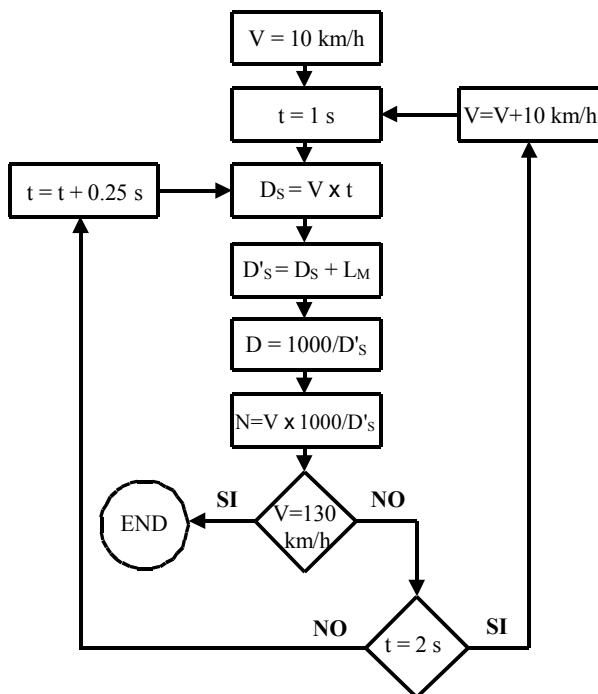


Fig. 5 - Flow Chart della metodologia di analisi elaborata.

Il passo successivo è stato quello di porre in relazione i risultati ottenuti con le configurazioni associate ai livelli di servizio calcolati in base alle procedure proposte dal nuovo HCM. Si ottengono così i grafici riportati nelle figure 6, 7, 8, 9.

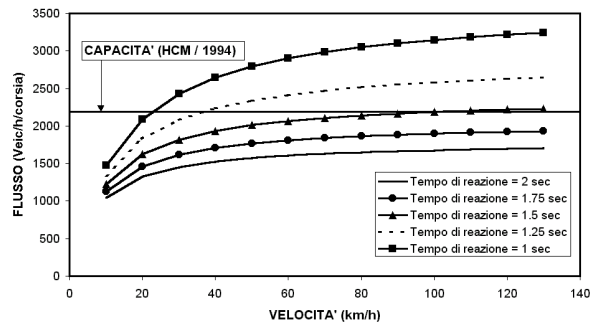


Fig. 6 - Confronto tra massimo numero di veicoli in condizioni di sicurezza e capacità calcolata in base all'HCM.

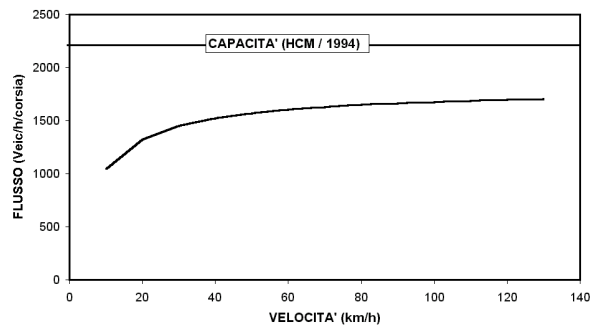


Fig. 7 - Confronto tra massimo numero di veicoli in condizioni di sicurezza e capacità calcolata in base all'HCM. (Tempo di reazione = 2 secondi).

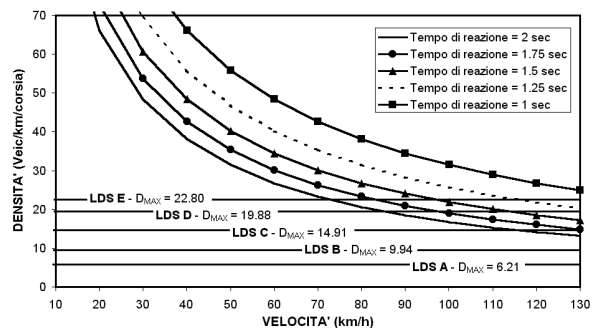


Fig. 8 - Confronto tra la densità veicolare in condizioni di sicurezza ed i valori di densità secondo l'HCM.

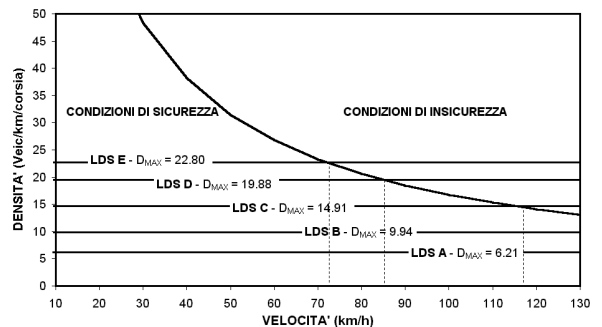


Fig. 9 - Confronto tra la densità veicolare in condizioni di sicurezza ed i valori di densità secondo l'HCM. (Tempo di reazione = 2 secondi).

Il diagramma di figura 7 descrive il numero massimo di veicoli che possono permanere in condizioni di sicurezza su una corsia autostradale, in funzione della velocità del plotone omocinetico, facendo riferimento ad un tempo di reazione di 2 sec (al fine, come già osservato, di mantenerci "in sicurezza").

Dall'analisi di tale grafico si evincono due importanti risultati:

- il flusso veicolare è poco influenzato dalle variazioni della velocità (ciò è maggiormente accentuato in corrispondenza del campo di velocità che interessa prevalentemente il traffico autostradale);
- il valore massimo del flusso veicolare, ricavato in funzione delle *condizioni di sicurezza*, è palesemente inferiore (in tutto il suo campo di variabilità) al valore della capacità ideale valutato in base alle direttive dell'Highway Capacity Manual (1994).

Quest'ultima osservazione, giunge a conferma di un concetto che fino ad ora era solamente intuitivo: le condizioni di deflusso associate alla capacità (calcolata secondo l'HCM) sono da ritenersi ampiamente al di sotto dei limiti di sicurezza.

Il diagramma riportato in figura 9 è rappresentativo del valore della densità veicolare per corsia associata alle condizioni di sicurezza, in funzione della velocità di marcia e del tempo medio di reazione pari a 2 secondi.

In tale grafico, le curve di densità, ricavate a mezzo della procedura da noi elaborata, sono state affiancate a quelle indicative dei livelli di servizio; da questo accostamento scaturisce il risultato che ci eravamo prefissi di raggiungere: le condizioni operative associate ai diversi livelli di servizio non sono rappresentative di un uguale grado di sicurezza.

Da un'attenta analisi di tale diagramma si possono rilevare alcuni interessanti risultati:

- ↗ I livelli di servizio A e B sono sempre rappresentativi di situazioni di sicurezza (fermo restando il campo di variabilità della velocità compreso tra 10 km/h e 130 km/h);
- ↗ Il livello di servizio C, caratterizzato da una densità veicolare di 14.91 veic/km/corsia, diventa indicativo di condizioni di insicurezza non appena il flusso veicolare attinge a velocità intorno a 120 km/h; questo risultato riveste particolare importanza se si pensa che il campo di velocità che innesca le situazioni di pericolo è proprio quello prevalentemente riscontrabile nelle infrastrutture autostradali, e dovrebbe indurre quantomeno a riflettere sull'adozione del livello di servizio C come parametro da utilizzare nelle fasi di progetto e/o verifica delle arterie autostradali.
- ↗ I livelli di servizio D ed E risultano forieri di pericolosità per velocità all'incirca superiori, rispettivamente, ad 85 km/h ed a 70 km/h.

I grafici riportati nelle figure 6 e 8, omologhi di quelli di Fig. 7 e Fig. 9, riportano una serie curve associate a diversi tempi di reazione (compresi tra 1 e 2 secondi). Si è voluto così investigare su come il campo di variabilità che interessa i tempi di reazione degli automobilisti, influisca sulle condizioni di sicurezza di marcia.

In effetti, dall'analisi di tali diagrammi è possibile evincere due interessanti considerazioni:

- ↗ il rischio di incidentalità è ridotto al minimo soltanto per tempi di reazione molto prossimi ad 1 secondo (valore considerato insufficiente da tutti gli ergonomisti);
- ↗ la soglia "di attenzione" viene raggiunta già per $t = 1.5$ secondi; ciò rende conto dell'elevato livello di pericolo associato a tutte quelle situazioni in cui i tempi di reazione si allungano (utente distratto, cattive condizioni di visibilità, guida in stato di ebbrezza, ecc.).

4. LA MANOVRA DI SORPASSO IN AUTOSTRADA

La seconda parte di questo studio è orientata all'analisi critica della manovra di sorpasso in autostrada. Al fine di rendere maggiormente comprensibili le considerazioni che verranno svolte nei paragrafi successivi, ci sembra opportuno analizzare preliminarmente le modalità di esecuzione del sorpasso in autostrada con particolare riferimento alle condizioni di deflusso che la rendono pericolosa per la circolazione.

Lo schema della manovra di sorpasso (Fig. 10), consente l'individuazione di tre intervalli di tempo principali:

- si impiegano circa 4 secondi dal momento in cui il conducente del veicolo decide di sorpassare fino al momento in cui, cambiata la corsia di marcia, esso si trova con il suo paraurti anteriore in corrispondenza del paraurti posteriore del veicolo che lo precede (t_1);
- lo stesso tempo viene impiegato dal veicolo per riportarsi nella corsia di marcia dopo il sorpasso (t_3);
- il tempo impiegato per superare il veicolo più lento (t_2), cioè per portarsi con il paraurti posteriore allineato con il paraurti anteriore del veicolo lento è all'incirca uguale ad 1-2 secondi (questo tempo dipende infatti dalla lunghezza media dei due veicoli e dalla differenza delle loro velocità).

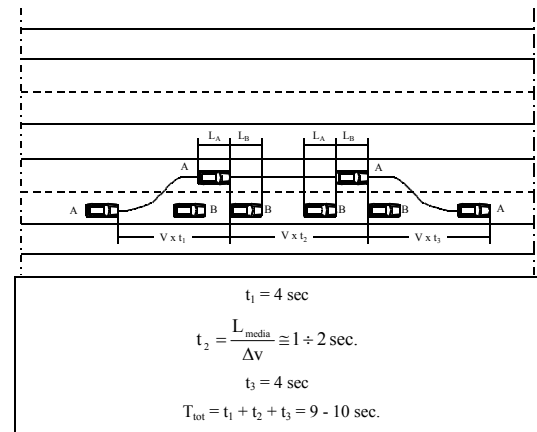


Fig. 10 - Schematizzazione della manovra di sorpasso in autostrada.

E' importante rilevare che il desiderio di effettuare un sorpasso (**vocazione al sorpasso**) dipende dalle condizioni locali di interferenza veicolare a cui il conducente è soggetto. Queste sono espresse dalla differenza tra la velocità desiderata dall'utente e la velocità del veicolo che lo precede, nei riguardi del quale si manifesta la domanda di sorpasso.

Un parametro che condiziona pesantemente la vocazione al sorpasso del guidatore è costituito dalla densità veicolare; infatti, le indagini condotte "in situ" hanno messo in evidenza come il tempo di permanenza del veicolo veloce⁽¹⁾ nella corsia di marcia normale (definito come quel tempo compreso tra la manovra di rientro in corsia dopo aver effettuato il sorpasso e quella di uscita dalla corsia per un successivo sorpasso), tende a ridursi progressivamente con l'aumentare della densità dei veicoli lenti. In particolare si è notato che per valori di densità oltre i 10 veic/km sulla corsia di marcia, il conducente del veicolo veloce è soggetto ad uno stress continuo, dovuto alle

⁽¹⁾ Da questo momento in poi utilizzeremo la dizione "veicoli veloci" per indicare i veicoli che manifestano una spiccata vocazione al sorpasso nei confronti dei veicoli marcianti a velocità inferiore, i quali verranno definiti "veicoli lenti".

numerose manovre di rientro ed uscita dalla corsia, eseguite in intervalli di tempo molto piccoli. In tali condizioni si instaura nel conducente del veicolo veloce un fattore psicologico "anti-stress"; egli decide di evitare il rientro nella corsia di marcia normale proseguendo lungo la corsia di sorpasso, permanendovi il tempo necessario per superare tutti i veicoli lenti che incontra. In queste condizioni di marcia, avviene una diversa "specializzazione" della corsia di sorpasso, rispetto a quanto descritto dalla normativa italiana; essa assume il ruolo di corsia di marcia per veicoli veloci.

E' importante sottolineare che la situazione appena descritta è un elemento pregiudicante le condizioni di sicurezza della circolazione; in queste circostanze, il veicolo veloce in moto lungo la corsia di marcia, si troverà spesso nell'impossibilità di eseguire la manovra di sorpasso, poiché troverà la corsia di sinistra già occupata da altri veicoli; sarà pertanto costretto al mantenimento delle sue condizioni di marcia (velocità e corsia) in attesa che si liberi lo spazio necessario per la manovra.

All'aumentare del tempo di attesa è ipotizzabile che cresca da parte del conducente la propria condizione di disagio per non poter marciare alla velocità desiderata. Questo fatto porterà il conducente del veicolo veloce all'accettazione di un rischio elevato pur di immettersi nella corsia di sinistra, anche quando non siano verificate le condizioni di sicurezza per l'effettuazione della manovra.

Per poter ottenere un riscontro a quanto detto, è stato ideato un software che ci permette di:

- verificare come si separa il flusso veicolare lungo le due corsie di marcia all'aumentare dello stesso;
- valutare l'incremento dei tempi di attesa dei veicoli veloci all'aumentare del flusso veicolare.

5. ELABORAZIONE DI UNA PROCEDURA DI CALCOLO PER LA SIMULAZIONE DELLA MANOVRA DI SORPASSO IN AUTOSTRADA

Al fine di procedere all'elaborazione del modello di simulazione descritto nel precedente paragrafo, si è fatto riferimento, per quanto riguarda le caratteristiche geometriche e veicolari, alle stesse ipotesi semplificative che ci hanno consentito di valutare il grado di sicurezza associato ai diversi livelli di servizio.

Per quanto concerne le caratteristiche del flusso, ferma restando l'ipotesi di omocineticità, si sono definite due classi di veicoli:

- veicoli veloci (marcianti a velocità comprese tra 80 km/h e 120 km/h);
- veicoli lenti (marcianti a velocità di 80 km/h).

La diversificazione delle velocità per i veicoli veloci consente una simulazione della dinamica del sorpasso più aderente alla realtà; si possono verificare tre situazioni principali:

- **sorpasso:** velocità dei veicoli veloci pari a 120 km/h, mantenuta per tutto il tempo necessario ad effettuare il sorpasso e, in ogni caso, per tutto il tempo di marcia sulla corsia di sorpasso;
- **marcia normale:** velocità dei veicoli veloci pari a 100 km/h, mantenuta durante la marcia sulla corsia di destra fino a quando non si manifesta l'esigenza di superare un veicolo lento
- **stato di attesa:** velocità dei veicoli veloci pari a 80 km/h, mantenuta per un intervallo di tempo valutabile in funzione dello spazio disponibile sulla corsia di destra per effettuare in sicurezza il sorpasso di un veicolo lento (marciante a velocità costante di 80 km/h).

Tramite queste differenziazioni della velocità del flusso "veloce" è stato possibile simulare le interazioni tra i vari veicoli, determinando la variazione dei tempi di attesa al variare del flusso veicolare.

Le velocità dei flussi risultano pertanto pari a:

- $V_{V(MAX)} = 120 \text{ km/h} = 33.33 \text{ m/s}$ (veicoli veloci in sorpasso);
- $V_{V(MED)} = 100 \text{ km/h} = 27.77 \text{ m/s}$ (veicoli veloci in marcia normale);
- $V_{V(MIN)} = 80 \text{ km/h} = 22.22 \text{ m/s}$ (veicoli veloci in stato di attesa);
- $V_L = 80 \text{ km/h} = 22.22 \text{ m/s}$ (veicoli lenti).

Dalle ipotesi fatte possiamo affermare che i parametri essenziali da considerare per la simulazione della distribuzione del flusso nelle corsie sono:

- la distanza di sicurezza (calcolata tramite la [2]);
- la densità in condizioni di sicurezza.

Con riferimento ad un tempo di reazione medio di 2 sec otteniamo le distanze di sicurezza per i flussi:

- $D_{avS} = 33.33 \cdot 2 = 66.66 \text{ m}$ (Distanza di sicurezza del flusso di veicoli veloci in fase di sorpasso);
- $D_{avM} = 27.77 \cdot 2 = 55.55 \text{ m}$ (Distanza di sicurezza del flusso di veicoli veloci in marcia);
- $D_{avA} = 22.22 \cdot 2 = 44.44 \text{ m}$ (Distanza di sicurezza del flusso di veicoli veloci in attesa di sorpasso);
- $D_{aL} = 22.22 \cdot 2 = 44.44 \text{ m}$ (Distanza di sicurezza del flusso di veicoli lenti).

Per quanto riguarda la distanza di sorpasso, con riferimento alla schematizzazione della manovra riportata in figura 5, possiamo dedurre i seguenti risultati:

$$t_1 = t_3 = 4 \text{ sec};$$

$$t_2 = \frac{L}{\Delta v} = \frac{8 \text{ m}}{(33.33 \text{ m/s} - 22.22 \text{ m/s})} = 0.72 \text{ sec};$$

$$T_{tot} = t_1 + t_2 + t_3 = 8.72 \text{ sec}.$$

E' pertanto adesso possibile ricavare lo spazio relativo (S_R) percorso dal veicolo veloce alla fine della manovra di sorpasso (si tratta dello scostamento spaziale del veicolo veloce rispetto al veicolo lento a conclusione della manovra di sorpasso):

$$S_R = \Delta v \cdot T_{tot} = (33.33 - 22.22) \cdot 8.72 = 96.88 \text{ m} \approx 97.0 \text{ m}$$

Osserviamo inoltre che, al fine di rispecchiare quanto più fedelmente le reali modalità di esecuzione della manovra di sorpasso in autostrada, si è ipotizzato che i veicoli "veloci" abbiano convenienza a rientrare nella corsia di marcia, dopo aver effettuato il sorpasso, soltanto se il tempo di permanenza nella corsia di destra è ≥ 8 secondi, altrimenti il loro moto si svolgerà nella corsia di sinistra finché non verranno sorpassati tutti i veicoli "lenti".

La scelta del tempo limite di permanenza di 8 secondi nella corsia di marcia, deriva da una analogia intrinseca tra la manovra necessaria per inserirsi in una corrente veicolare e quella effettuata per abbandonare la corsia di marcia ed immettersi nella corsia di sorpasso.

In effetti, la vocazione al sorpasso dipende dalle condizioni locali di interferenza veicolare a cui il conducente del veicolo è soggetto; queste, a loro volta, possono venire espresse in funzione della differenza tra la velocità desiderata dall'utente ed il valore di velocità imposto dal flusso veicolare, in particolare dal veicolo che lo precede, nei riguardi del quale si manifesta la domanda di sorpasso.

Il disagio cumulato dall'utente si può tradurre, nel "caso" autostradale, nel valore del tempo speso in attesa di potersi immettere nella corsia di sorpasso.

All'aumentare del tempo di attesa, cresce la volontà del conducente di effettuare il sorpasso per portarsi nelle condizioni di moto desiderate e, conseguentemente, si incrementa anche il livello di accettazione del rischio di effettuare una manovra azzardata. Nelle reali condizioni di moto, questa situazione è facilmente riscontrabile soprattutto quando si verifica il sorpasso tra due mezzi pesanti. In questo caso sulla strada si originano due "code", una lungo la corsia di marcia (dietro il veicolo lento che subisce il sorpasso) ed una sulla corsia di sinistra (in quanto il veicolo lento che esegue il sorpasso rallenta inevitabilmente gli altri veicoli in fase di sorpasso sulla stessa corsia).

In questa situazione, tutti i conducenti accodati sulla corsia di marcia si trovano nella condizione di non poter sorpassare poiché la corsia di sinistra è occupata. Il perdurare di queste condizioni, dipendente sia dal tempo impiegato dal mezzo pesante per sorpassare che dalla lunghezza del plotone di veicoli che nel frattempo si è generato, provoca l'aumento dello stato di disagio dei conducenti e l'accettazione di un livello rischio tanto più elevato quanto maggiore è il tempo di attesa sulla corsia di marcia.

E' possibile ricavare infine i seguenti ulteriori parametri:

$$\Rightarrow D = \frac{1000}{D_S} \text{ (densità veicolare);}$$

$$\Rightarrow N = \frac{V \cdot 1000}{D_S} \text{ (massimo numero di veicoli per corsia in condizioni di sicurezza);}$$

$$\Rightarrow D_V = \frac{V_V \cdot 1000}{N_V} \text{ (distanza tra i veicoli veloci);}$$

$$\Rightarrow D_L = \frac{V_L \cdot 1000}{N_L} \text{ (distanza tra i veicoli lenti);}$$

$$\Rightarrow T_S = \frac{D_L}{V_V - V_L} \text{ (intervallo di tempo tra due sorpassi consecutivi; le velocità sono in m/s);}$$

$$\Rightarrow N_S = \frac{3600}{T_S} \text{ (numero di sorpassi effettuabili in 1 ora).}$$

Avendo a disposizione tutti i parametri adeguati a formulare la metodologia di analisi costituente l'obiettivo della seconda parte della ricerca, si è passati, tramite il supporto di un software, all'elaborazione della procedura sintetizzabile mediante una serie di "steps" successivi:

- introduzione degli input (velocità delle due classi di veicoli, flusso veicolare iniziale, posizione di partenza dei veicoli, spazio relativo di sorpasso, step di incremento per le due classi di veicoli);
- calcolo delle distanze ed inizializzazione del vettore con la posizione iniziale dei veicoli;
- avvio di un ciclo iterativo che consente di aggiornare la posizione relativa dei due flussi veicolari al trascorrere del tempo. All'interno del ciclo vi è una serie di "controlli" che permettono di stabilire, istante per istante, il numero di veicoli veloci in sorpasso. In particolare è "attiva" una routine di calcolo che "controlla" i veicoli veloci, assegnando loro la velocità dei veicoli lenti non appena si verifica la condizione di "sorpasso impedito"; questo ciclo di calcolo aggiuntivo, comprende anche un "contatore" che misura il tempo di attesa sulla corsia di marcia;
- avvio di un ciclo di controllo preposto a determinare, per ogni configurazione elaborata tramite le iterazioni del ciclo precedente, l'intervallo di tempo che ciascun

veicolo del flusso "veloce" impiega tra due sorpassi successivi (si tratta del tempo di permanenza nella corsia di marcia);

- calcolo del numero di sorpassi effettuati in un intervallo di tempo pari ad 1 ora;
- visualizzazione degli output (distribuzione dei flussi veicolari, densità veicolare nelle corsie, numero di sorpassi, numero di veicoli veloci in attesa di sorpasso, tempi di permanenza sulla corsia di marcia da parte dei veicoli veloci).

Il diagramma di flusso inerente alla metodologia elaborata è riportato in Fig. 11).

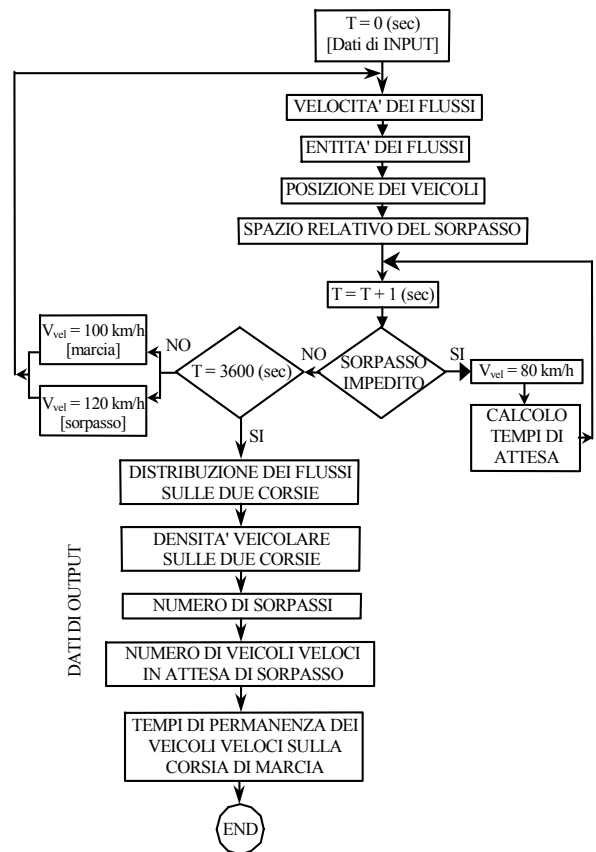


Fig. 11 - Flow Chart della metodologia di analisi elaborata.

I principali risultati delle elaborazioni appena descritte vengono sinteticamente rappresentati in una serie di grafici (Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16).

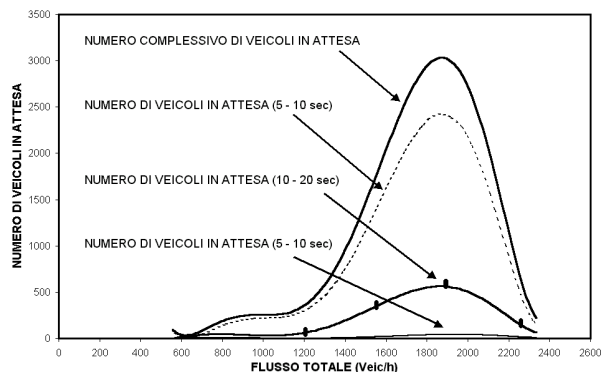


Fig. 12 - Numero totale di veicoli in attesa al variare del flusso e suddivisione in funzione dei tempi.

Dall'analisi del diagramma di figura 12, in cui vengono riportati, in funzione del flusso veicolare totale, il numero complessivo di veicoli in attesa e le classi dei tempi di attesa compresi tra 5 e 30 secondi, è possibile condurre alcune interessanti osservazioni:

- la conformazione "a campana" delle distribuzioni dei veicoli in attesa;
- i valori massimi dei tempi di attesa in corrispondenza di un flusso veicolare pari a circa 1900 veic/h;
- la prevalenza di tempi di ritardo compresi tra 5 e 10 secondi;
- la scarsa influenza di tempi di attesa superiori a 20 secondi.

Il diagramma di figura 13, mostra come varia la distribuzione dei veicoli lungo le due corsie al variare del flusso. Si può notare come, fino a valori di flusso nell'intorno di 2200-2400 veic/h, la corsia di sorpasso sia occupata da un numero di veicoli molto inferiore rispetto alla corsia di marcia; oltre tali valori si manifesta invece una netta separazione dei flussi con una inversione di tendenza, cioè la corsia di sorpasso risulta molto più carica di veicoli rispetto alla corsia di marcia.

Questo andamento disomogeneo nella distribuzione dei flussi sulle due corsie è da imputare al fatto che, in corrispondenza dei valori di flusso suddetti, viene raggiunta la condizione limite per cui l'intervallo temporale che separa il veicolo veloce da due sorpassi consecutivi, risulta essere inferiore a 8 secondi. In virtù di questo scenario, il veicolo veloce non rientra più nella corsia di marcia normale ma continua la marcia lungo la corsia di sorpasso, provocandone il sovraccaricamento.

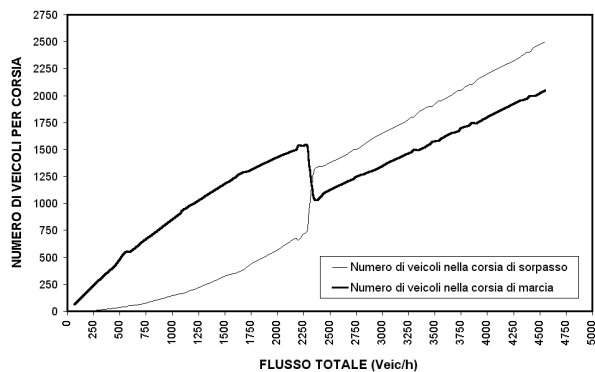


Fig. 13 - Distribuzione del flusso veicolare nelle due corsie autostradali.

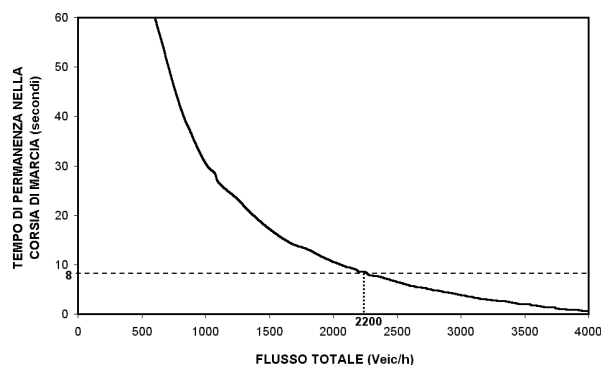


Fig. 14 - Tempi di permanenza sulla corsia di marcia da parte dei veicoli veloci, al variare del flusso.

Per un ulteriore chiarimento dei concetti appena espressi viene realizzato il grafico di figura 14 in cui si analizza il tempo di permanenza sulla corsia di marcia da parte dei veicoli veloci prima della effettuazione della successiva manovra di sorpasso. Si può notare come questo tempo diminuisca notevolmente all'aumentare del flusso, fino ad attingere a valori anche inferiori al tempo impiegato dal conducente per eseguire il sorpasso di un veicolo più lento. E' pertanto lecito ipotizzare che il conducente del veicolo veloce, percependo questa progressiva diminuzione dei tempi di permanenza sulla corsia di marcia, agisca di conseguenza, evitando il rientro in corsia dopo aver sorpassato e proseguendo fino al successivo veicolo da superare.

Nel grafico di figura 15, sono riportate le variazioni della densità nelle due corsie al variare del flusso.

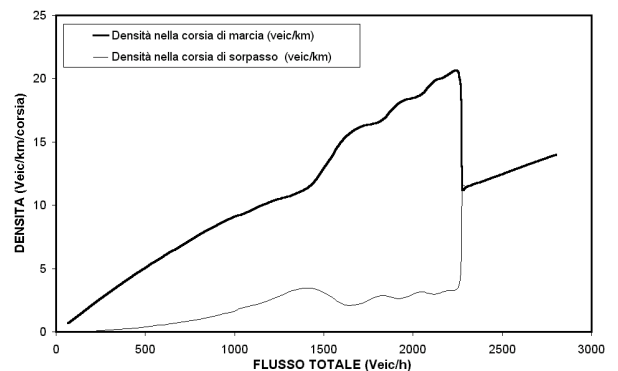


Fig. 15 - Variazione della densità veicolare sulle due corsie autostradali.

Anche in questo caso è possibile evincere alcuni interessanti risultati:

- per flussi veicolari ≤ 2200 veic/h, la corsia di marcia risulta molto più "affollata" di quella di sorpasso;
- per valori di flusso ≥ 2200 veic/h, quando cioè il veicolo veloce non rientra dopo il sorpasso, avviene la "separazione" dei due flussi (con l'originarsi di una condizione di "moto parallelo" sulle due corsie);
- le densità veicolari delle due corsie, per valori di flusso superiori a 2200 veic/h diventano pressoché uguali poiché, in virtù delle ipotesi fatte, ad una variazione di velocità tra i due flussi corrisponde proporzionalmente una variazione della interdistanza veicolare (le due corsie presentano carattere di iso-sicurezza).

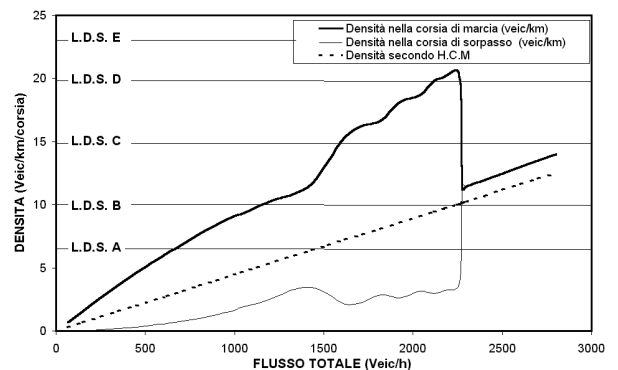


Fig. 16 - Densità veicolare sulle corsie autostradali e confronto con i livelli di servizio calcolati in base all'Highway Capacity Manual (1994).

Nel grafico di figura 16, viene visualizzato il confronto tra i valori della densità veicolare nelle due corsie autostradali in funzione del flusso veicolare complessivo ed i valori di densità corrispondenti ai livelli di servizio riportati nell'Highway Capacity Manual (1994).

Nell'H.C.M., i valori dei livelli di servizio vengono calcolati partendo dall'ipotesi che la distribuzione del flusso veicolare tra le varie corsie sia quasi uniforme. Rappresentando nel diagramma di figura 17 i valori in percentuale delle distribuzioni veicolari in diverse autostrade americane a 3 corsie, si può notare chiaramente il modesto scarto di carico veicolare esistente tra le "lanes". Analogamente, il valore della capacità di deflusso relativo ad una corsia, stimato in 2200 veic/h/corsia, è da considerarsi un valore medio.

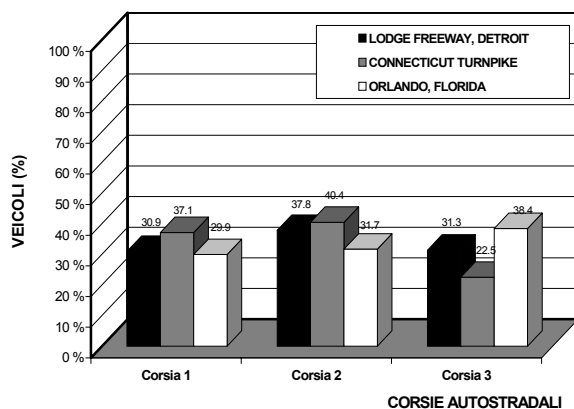


Fig. 17 - Distribuzione veicolare sulle autostrade americane.

Tenendo conto delle osservazioni appena svolte ed analizzando attentamente il diagramma di figura 16, è possibile esprimere le seguenti considerazioni:

- I risultati ottenuti, apparentemente in contraddizione con le ipotesi di base dell'HCM, in realtà ne confermano i presupposti, in quanto le metodologie espone nell'Highway Capacity Manual sono ricavate da osservazioni sulle strade americane caratterizzate dal corsie equamente caricate. E' quindi logico considerare il livello di servizio come risultato di una condizione media di viaggio nelle varie "linee".
- I valori di densità associati ai livelli di servizio in base all'H.C.M. (1994) non sono indicativi delle reali condizioni di deflusso presenti sulle due corsie autostradali italiane, infatti:
 - per flussi veicolari compresi tra 1500 veic/h e 1600 veic/h, l'Highway Capacity Manual fornisce un livello di servizio pari a B; nella realtà si ha un livello di servizio C nella corsia di marcia ed A nella corsia di sorpasso;
 - per flussi compresi tra 1600 veic/h e 2200 veic/h, l'H.C.M. indica un livello di servizio pari a B; si ha invece un livello di servizio E sulla corsia di marcia ed A su quella di sorpasso;
 - per flussi veicolari superiori a 2200 veic/h si manifesta la separazione dei flussi sulle due corsie e la specializzazione delle corsie medesime in funzione della velocità dei flussi veicolari; il livello di servizio è C per entrambe le corsie, concordemente a quello fornito dall'H.C.M.

In definitiva, le simulazioni effettuate mediante il software elaborato hanno messo in evidenza che la manovra di sorpasso è un elemento fortemente condizionante la marcia in autostrada, soprattutto quando il flusso veicolare diventa elevato.

6. CONCLUSIONI

Lo studio della procedura di valutazione del livello di servizio di una infrastruttura autostradale in base alle indicazioni dell'Highway Capacity Manual (1994) ci ha consentito di sottolineare particolari "aggiustamenti" e revisioni rispetto alle precedenti edizioni. Risultano particolarmente apprezzabili la scelta, da parte degli autori del nuovo HCM, di relazionare il livello di servizio alla densità veicolare e l'introduzione del concetto di velocità di flusso libero. In questo modo vengono superate alcune ambiguità ed inesattezze concettuali che gravavano pesantemente sulle precedenti metodologie di calcolo del LdS. Tuttavia, per stessa ammissione degli autori, l'HCM non contempla la considerazione del livello di pericolosità associato alle configurazioni operative descritte dai diversi livelli di servizio.

Con questo studio, riteniamo, in primo luogo, di aver adeguatamente dimostrato che gli scenari geometrici-dinamici correlati ai differenti livelli di servizio non sono di iso-sicurezza, ma, al contrario, assumono caratteristiche di sicurezza diverse al variare della velocità di deflusso.

Si ritiene inoltre di aver posto in discussione la scelta del livello di servizio C, quale parametro discriminante nelle fasi di progetto e/o verifica delle infrastrutture autostradali.

In conclusione, attingendo alle considerazioni svolte nella seconda parte di questa ricerca, ci proponiamo di fornire qualche indicazione su come indirizzare i risultati ottenuti verso la proposizione di modalità operative per il miglioramento della mobilità sulle infrastrutture autostradali.

Osserviamo preliminarmente come, nel nostro paese, la normativa vigente imponga per le corsie autostradali un sorta di settorializzazione delle funzioni: vengono infatti distinte una corsia di marcia ed una corsia di sorpasso. Da analisi effettuate in diversi tratti autostradali, si è però riscontrato che questa netta distinzione spesso non esiste, soprattutto quando il flusso veicolare risulta particolarmente elevato.

Partendo dalle osservazioni sul campo si è cercato, tramite alcuni software simulativi, di analizzare il fenomeno della percorrenza veicolare in autostrada. I risultati delle analisi effettuate, hanno messo in risalto come, al variare del flusso veicolare, è la manovra del sorpasso ad influenzare la sicurezza della circolazione autostradale.

In particolar modo, è stato possibile determinare la distribuzione dei veicoli sulle corsie al variare delle condizioni di deflusso. Si è così riscontrata una differenziazione nello sfruttamento delle corsie autostradali e nella qualità della circolazione valutata mediante il livello di servizio; infatti mentre nella corsia di marcia normale si hanno valori di livello di servizio variabili fino ad E, in funzione del flusso veicolare, nella corsia di sorpasso si viaggia con valori di livello di servizio pari ad A. Viceversa, l'analisi condotta secondo le metodologie dell'H.C.M (94) fornisce un livello di servizio B, cioè un valore che non rispecchia le reali condizioni di qualità della circolazione di nessuna delle due corsie

Volendo passare alla "fase propositiva", riteniamo che molti problemi potrebbero essere, se non eliminati, almeno mitigati, se, alla stessa stregua della circolazione autostradale americana, si "specializzassero" le corsie autostradali, soprattutto quando il valore del flusso in transito risulta elevato. Ciò porterebbe all'ottenimento di migliori condizioni operative in termini di livello di servizio, ed inoltre si ridurrebbe la probabilità di eseguire la manovra del sorpasso in condizioni di non sicurezza, riducendo gran parte dei rischi che la stessa comporta.

Dal punto di vista dei possibili interventi di riqualificazione, la prospettata specializzazione delle corsie potrebbe basarsi sulla attivazione di un sistema di controllo informatizzato del flusso circolante in corrispondenza degli accessi autostradali

presidiati dai "caselli". In questa maniera, non appena il flusso veicolare dovesse attingere a valori elevati, potrebbe essere segnalato ai conducenti, a mezzo di una serie di pannelli indicatori, l'"invito" a disporsi su file parallele in funzione di velocità di marcia differenti.

La soluzione prospettata, quindi, cambia alla radice la "destinazione d'uso" delle corsie autostradali, e si propone come intervento di sicurezza attiva, in quanto contribuisce in maniera determinante a ridurre le restrizioni ed i condizionamenti dovuti alla manovra di sorpasso.

In definitiva, si potrebbe pensare ad una gestione dinamica delle autostrade tramite l'inserimento di sistemi di controllo di traffico in grado di "organizzare" la circolazione stradale in funzione delle effettive condizioni di flusso e densità veicolare. In tal senso, basti ricordare come le ricerche nel settore si stiano orientando anche verso l'utilizzo dei sistemi di assistenza G.P.S. (Global Positioning System) come strumenti di controllo della circolazione e di ausilio alla guida.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Atti del Simposio Internazionale "*Road development and safety*" - Lussemburgo - 1989.
- 2) AA. VV.; "*Highway Capacity Manual - Special Report 209*" - Ed. Transportation Research Board - 1994.
- 3) "*Nuovo Codice della Strada*" - Ed. Simone - 1993.
- 4) AA. VV.; "*Generic Intelligent Driver Support*" - Ed. Taylor & Francis - 1993.
- 5) S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi; "*Inadeguatezza delle corsie di decelerazione proposte dalla Normativa CNR*" - Atti della Giornata di Studio sul tema: La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali - Roma 20/21 Febbraio 1997.
- 6) G. Genta; "*Meccanica dell'autoveicolo*" - Ed. Levrotto & Bella - 1993.
- 7) F. Giannini, F. La Camera, A. Marchionna; "*Appunti di Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti*" - MASSON Editoriale SEA - 1993.
- 8) C. Kraemer, S. Boccalieri Rocci, V. Blanco Sanchez; "*Trazado de Carreteras*" - Ed. Rugart S.L. - 1992.
- 9) F. La Camera; "*Il calcolo del progetto stradale*" - MASSON Editoriale SEA - 1992.
- 10) A. Orlandi; "*Meccanica dei trasporti*" - Pitagora Editrice - Bologna - 1993.
- 11) A. M. Parkes, S. Franzen; "*Driving Future Vehicles*" - Ed. Taylor & Francis - 1993.
- 12) B. Peacock, W. Karwowski; "*Automotive Ergonomics*" - Ed. Taylor & Francis - 1993.
- 13) G. Tesoriere; "*Strade Ferrovie Aeroporti - Il progetto e le opere d'arte*" (Vol. 1) - Ed. UTET - 1990.