

ADEGUAMENTO DELLE CORSIE DI USCITA AUTOSTRADALI MEDIANTE INFORMAZIONI RICAVATE DAI RILIEVI SPERIMENTALI

SASCIA CANALE

SANTI TORRISI

FRANCESCO NICOSIA

SALVATORE LEONARDI

1. PREMESSE.

Gli studi sulla percorribilità autostradale hanno da tempo messo in evidenza come l'analisi delle modalità con cui l'utente affronta il tracciato è, in generale, complessa e quindi non riconducibile alla semplice schematizzazione del modello di comportamento "a veicolo isolato".

Un approccio più adeguato allo studio di un fenomeno articolato, qual è quello della percorrenza stradale, non può prescindere dall'osservazione degli atteggiamenti istintivi eseguiti dal guidatore.

Nel presente lavoro, la nostra attenzione verrà rivolta alle corsie di uscita autostradali. Molti ricercatori concordano nell'affermare che la loro modalità costruttiva, secondo le indicazioni del CNR, non risulta quella ottimale, in quanto costringe l'automobilista ad eseguire una successione "innaturale" di manovre (sterzata e controsterzata) che potrebbero provocare lo svio dell'autoveicolo.

Inoltre, dai dati di incidentalità riferiti alle aree limitrofe alle corsie di uscita è possibile evincere l'elevato grado di pericolosità delle stesse, a causa dei tamponamenti dovuti all'eccessivo rallentamento sulla corsia di marcia da parte dei veicoli in uscita.

Nell'ambito di questa ricerca, al fine di investigare sulle traiettorie che istintivamente vengono impostate dagli automobilisti, è stato condotto un rilievo sperimentale, a mezzo di videocamera, in corrispondenza di un'intersezione a livelli sfalsati (svincolo di San Giovanni Galermo), ubicata nella "Tangenziale Nord di Catania".

Si è poi tentato di approfondire le problematiche connesse alla sicurezza di percorribilità delle traiettorie, tramite l'apporto dei fondamenti di una scienza che, ultimamente, sta trovando proseliti anche tra gli studiosi delle tematiche stradali: l'ergonomia.

Si ritiene infatti che lo studio ergonomico della percorrenza, esplicitando le interconnessioni derivanti dall'interazione uomo-veicolo, debba divenire uno strumento a supporto del processo decisionale finalizzato al miglioramento della qualità della progettazione stradale.

La restituzione "a video" dei filmati ottenuti ed il supporto di software specifici hanno consentito, infine, la verifica del grado di affidabilità delle manovre di uscita, in funzione sia dei parametri ergonomici sia del sistema di forze che sollecita il veicolo durante la percorrenza delle traiettorie.

2. IL "SISTEMA-UOMO" NELLA PROGETTAZIONE.

E' ormai convinzione comune che una buona progettazione (sia in campo stradale che in qualunque altro campo) debba essere mediata dalle osservazioni dirette dell'interazione dell'uomo con l'ambiente esterno. Nel caso stradale, lo studio della geometria dei tracciati dovrebbe essere in grado di interpretare nel modo migliore le esigenze dell'automobilista, mettendo in conto anche quegli atteggiamenti particolari che diventano l'elemento caratterizzante del contatto uomo-autoveicolo.

La guida è un susseguirsi di percezioni e reazioni. In ogni istante il guidatore è chiamato ad esercitare un controllo sulla propria velocità, sulle traiettorie impostate, sui segnali che gli derivano dall'esterno. La libertà di azione del guidatore esplica la sua attività prioritaria nella scelta della velocità di percorrenza, la quale deriva sempre da un compromesso tra velocità desiderata e velocità attuata in funzione della percezione della sicurezza e del comfort.

Il guidatore chiuso nel suo abitacolo si affida per la conduzione del veicolo agli stimoli provenienti dal senso della vista, dal senso dell'udito e dalla percezione tattile. La fase dell'individuazione degli stimoli inizia quando il guidatore percepisce il nascere del fenomeno, e finisce con la chiara percezione dello stimolo, il quale suscita la reazione in base all'attenzione che egli può prestare.

Una volta che lo stimolo conquista l'attenzione del guidatore, si passa alla fase dell'elaborazione, finita la quale vengono impartite delle reazioni biomeccaniche agli arti, con i quali (agendo sui comandi) si esegue la guida del veicolo (Fig. 1). Un fallimento della identificazione degli stimoli porta ad una non tempestiva reazione nella risposta con conseguenze spesso gravi.

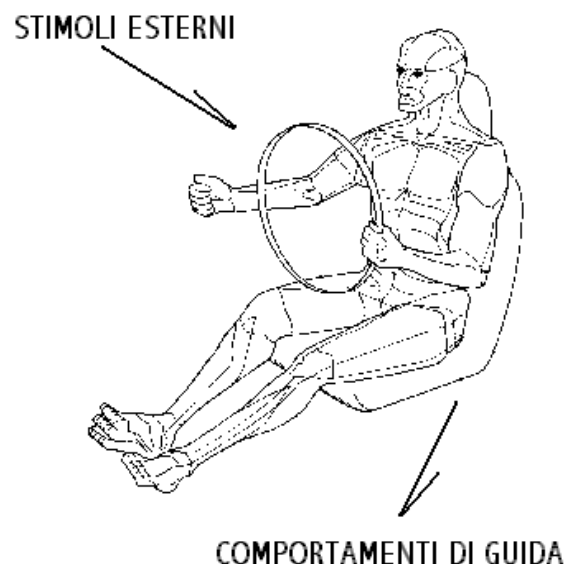


Fig. 1 Schematizzazione del processo che determina il comportamento di guida degli utenti stradali.

2.1. Apparato visivo.

Alcuni studiosi ritengono che almeno il 90% delle informazioni essenziali al controllo del veicolo venga acquisito tramite il senso della vista.

L'organo della vista consente di percepire le radiazioni luminose che provengono dall'esterno; queste vengono rifratte dal cristallino, che funge da lente a curvatura variabile, e trasferite sulla retina dove si formano le immagini.

La struttura anatomica dell'occhio si presenta come un normale sistema ottico cinematografico. In particolare esso risulta formato da un bulbo di circa 24 mm di diametro, contenuto nella cavità orbitale ed immerso in un'atmosfera di grasso naturale che svolge la funzione di cuscinetto e gli consente diversi movimenti di rotazione sferica.

Il globo oculare è formato da tre tuniche concentriche, dall'esterno verso l'interno:

- la *sclera*, che nella parte anteriore continua nella cornea;
- la *tunica media o vascolare* che anteriormente presenta un orifizio detto pupilla circondato da un anello colorato detto iride;
- la *retina*.

Quest'ultima tunica nervosa costituisce il rivestimento del fondo dell'occhio ed è formata da uno strato fotosensibile contenente i recettori per la visione (coni e bastoncelli). Questi convertono l'energia luminosa in impulsi nervosi, i quali vengono convogliati, attraverso il nervo ottico, ai centri della visione situati nella parte occipitale posteriore del cervello.

Ciò che noi chiamiamo luce è una radiazione elettromagnetica. Lo spettro elettromagnetico, va dai raggi cosmici aventi una lunghezza d'onda $\lambda = 10^{-5}$ m fino all'uscita di alcuni circuiti AC che hanno λ dell'ordine di qualche km.

L'occhio umano è sensibile solo ad una piccolissima parte dello spettro elettromagnetico, detta del visibile, che varia in un intervallo che va da 380 a 750 nanometri. Studi effettuati sulla capacità visiva necessaria per l'attività di guida hanno mostrato l'importanza dell'acuità visiva (percezione dei dettagli delle immagini), della percezione del movimento, e del campo visivo di ciascun occhio. Per determinare la composizione della vista e i confini del campo visivo, è necessario conoscere dove gli occhi sono orientati nello spazio.

Ogni guidatore ha una visione diversa della strada. Da studi condotti nel Regno Unito è possibile evincere che l'altezza da terra degli occhi di un guidatore varia in un intervallo compreso tra 0.87 m ed 1.28 m con una media di 1.14 m.

Quando si trattano problemi di visione in campo automobilistico, più che di linea di vista è necessario parlare di campo visivo, in quanto il guidatore per la conduzione del veicolo sfrutta la possibilità offerta dalla visione periferica. Il campo visivo bioculare umano nel piano orizzontale ha un'ampiezza di circa 120°, ma la visione è nitida su una piccola area (Fovea Centralis) in prossimità della "linea di vista" (Fig. 2).

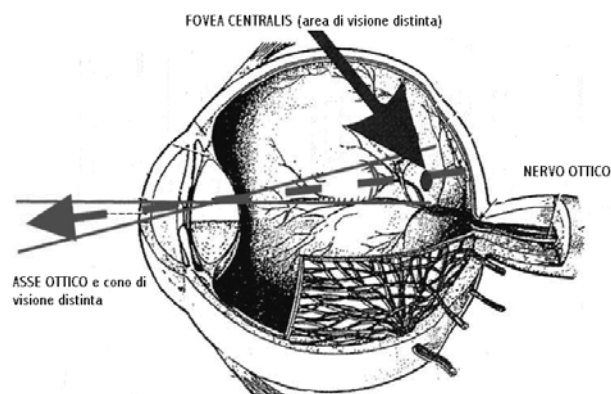


Fig. 2 Cono di visione distinta corrispondente alla Fovea Centralis.

In condizioni dinamiche l'ampiezza del campo visivo deve essere correlata con la velocità di percorrenza. Poiché la possibilità di messa a fuoco di un oggetto non è istantanea (in un soggetto normale occorrono circa 0.9 secondi), il guidatore tenderà, all'aumentare della velocità, a spostare la sua attenzione verso oggetti più lontani, in modo che per lui possano considerarsi come fissi e possano rappresentare un punto di riferimento fermo o comunque dotato di velocità relativa bassa rispetto al veicolo; ciò gli consentirà di trascurare la visione di quegli oggetti posti lateralmente all'abitacolo che avrebbero velocità relativa elevata e concentrare la sua attenzione su alcuni punti utili come riferimento per la guida.

La caratteristica del campo visivo umano è possibile esprimerla mediante due grandezze:

- la distanza di accomodamento (ossia la distanza misurata tra l'occhio dell'osservatore e l'elemento su cui si fissa l'immagine)
- l'ampiezza del campo visivo (ossia la grandezza del cono visivo su cui il guidatore focalizza la sua attenzione).

Ambedue le grandezze che definiscono il campo visivo in condizioni dinamiche risultano variabili con la velocità (Fig. 3).

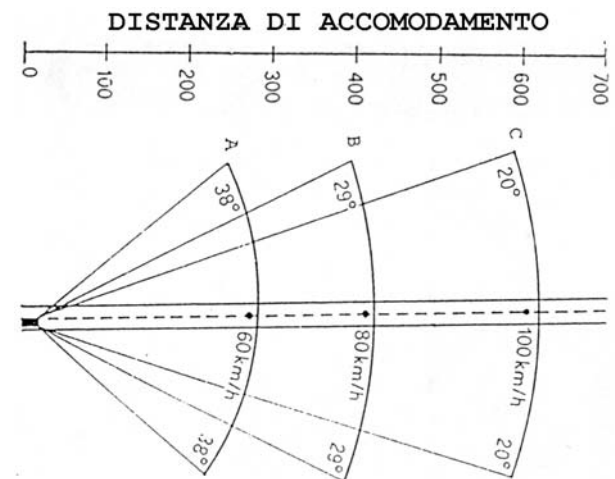


Fig. 3 Variabilità della distanza di accomodamento e del cono visivo con la velocità di marcia.

2.2. Apparato vestibolare.

Durante il moto, il corpo del guidatore e degli eventuali passeggeri viene sottoposto ad un sistema di forze proveniente dal veicolo. Tali forze sollecitano l'apparato uditivo vestibolare, il quale è l'organo demandato a svolgere due funzioni distinte:

- ◆ trasporto di energia meccanica vibratoria e trasformazione in energia nervosa;
- ◆ mantenimento dell'equilibrio del corpo nello spazio sottoposto alla forza di gravità ed alle sollecitazioni meccaniche esterne.

Il sistema recettoriale-vestibolare mediante le sue connessioni con il sistema nervoso centrale costituisce un fondamentale elemento della funzione dell'equilibrio; i recettori vestibolari sono in grado di trasformare lo stimolo in eccitazione nervosa.

Esistono due tipi di recettori sensibili (Fig. 4):

- quelli sensibili alle accelerazioni di tipo rotatorio (le creste ampollari dei canali semicirculari);
- quelli sensibili alle accelerazioni lineari (le macule dell'utrículo e del sacculo).

Naturalmente ambedue questi recettori trovano ampio riscontro nelle fasi della guida.

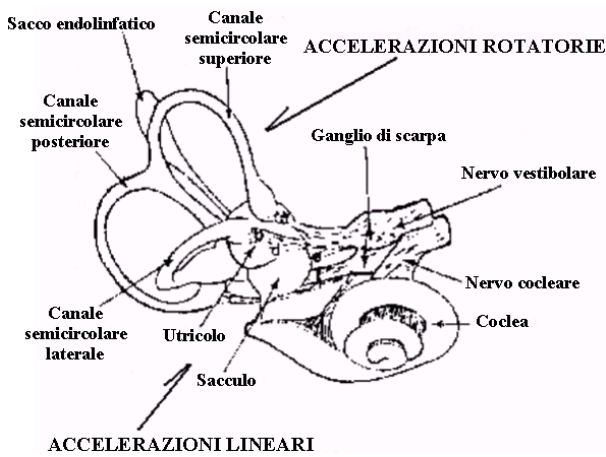


Fig. 4 Rappresentazione del sistema recettoriale-vestibolare umano.

Per schematizzare le azioni che sollecitano tali organi durante le fasi di guida si può far riferimento alle analogie esistenti con le azioni applicate ad un pendolo di torsione a forte smorzatura, il quale una volta allontanato dalla posizione di riposo vi ritorna spontaneamente con oscillazioni progressivamente decrescenti.

Il guidatore che realizza una accelerazione (sia lineare durante le fasi di moto vario o angolare durante la percorrenza di traiettorie non rettilinee) subisce il movimento del liquido viscoso presente negli organi vestibolari. Quando il movimento del liquido risulta ritardato rispetto alla causa che lo genera, nascono delle sollecitazioni nei recettori (Fig. 5).

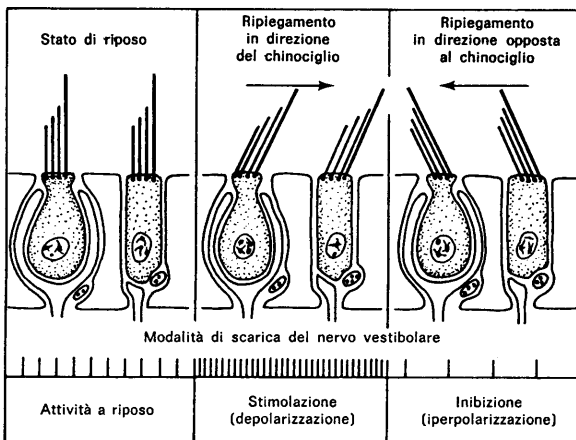


Fig. 5 Sollecitazioni generate sul nervo vestibolare in funzione dei diversi gradi di stimolazione.

L'alterazione degli impulsi vestibolari può generare incongruenza con i segnali di origine visiva, tattile ed acustica; tale incongruenza porta ad una distorsione della percezione dello spazio ambiente con una erronea sensazione di movimento corporeo ed ambientale che può provocare vertigini. Le vertigini sono un turbamento della sensibilità spaziale derivante da una erronea sensazione di movimento del corpo o dell'ambiente circostante, esse nascono dal contrasto che il soggetto avverte tra la consapevolezza della posizione spaziale del proprio corpo e l'illusoria sensazione di movimento degli oggetti compresi sul campo visivo.

Se gli stimoli provenienti dalla strada sono compatibili con la fisiologia dell'uomo, il sistema vestibolare contribuisce alla stabilizzazione del campo visivo

mediante la corretta programmazione dei movimenti compensatori binoculari in rapporto ai movimenti del capo in modo da avere una corretta percezione dello spazio circostante.

2.3. Sollecitazioni dovute alla guida.

Durante la guida deve esserci una stretta interrelazione funzionale occhio – vestibolare, affinché, ad ogni istante, la direzione dello sguardo ricada sempre sull'oggetto di interesse, sia che esso stia fermo oppure in movimento.

L'apparato vestibolare assieme alle altre strutture nervose concorre, in modo preminente, attraverso complessi meccanismi riflessi, ad influenzare il tono dei muscoli scheletrici provocando il corretto adattamento statico-dinamico del corpo alle forze esterne derivanti dalla guida.

Tutto ciò implica una continua variazione del tono di fase delle coppie muscolari agoniste ed antagoniste che realizzano la cosiddetta attività posturale (cioè la immobilizzazione di tratti scheletrici mobili indispensabili al mantenimento di una determinata attitudine dell'insieme corporeo). Le forze esterne che si generano durante la guida, per non creare discomfort, devono essere monotone crescenti.

Nella percorrenza delle traiettorie curvilinee, il veicolo, e così pure gli occupanti, sono sottoposti all'azione della forza centrifuga, direttamente correlata con la velocità di percorrenza e con la curvatura del tracciato; un veicolo che percorre una traiettoria non rettilinea, è soggetto all'accelerazione:

$$a = \sqrt{a_r^2 + a_t^2}$$

dove:

- a_r = accelerazione centripeta;
- a_t = accelerazione tangenziale.

Le norme del CNR, trattando della percorribilità di una curva, fanno riferimento all'accelerazione trasversale non compensata, data dalla differenza tra una quota parte della forza centrifuga e la componente di peso stabilizzante pari a:

$$a_{tnc} = \left(\frac{v^2}{r} \right) - g \cdot P_t$$

Le stesse norme forniscono anche le indicazioni sul valore del contraccolpo ammissibile (definito come variazione della accelerazione trasversale non compensata nel tempo) imponendo la limitazione che la variazione della accelerazione trasversale sia proporzionale alla velocità di percorrenza:

$$C = \frac{da_{tnc}}{dt} = \frac{50.4}{V} \quad [1]$$

Nella [1] la velocità è supposta costante; nel caso di tracciati in cui la velocità è variabile, è indispensabile eseguire la verifica puntuale del limite imposto. In particolare può scriversi:

$$C = \frac{da_{tnc}}{dt} = \frac{da_{tnc}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = v \cdot \frac{da_{tnc}}{ds} = v \cdot \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{r} - g \cdot p_t \right) \quad [2]$$

Altro elemento da prendere in considerazione è la percezione del nastro stradale e delle informazioni in esso riportate.

Le curve di transizione devono presentarsi in maniera da non creare problemi di gradualità prospettica, perché un rapido o un concentrato aumento della curvatura origina discontinuità nelle linee di guida ottica, portando l'utente

a sopravvalutare o a sottovalutare la reale curvatura del cerchio nel quale si sta inserendo o dal quale sta uscendo, e quindi a rallentare o ad accelerare oltre il necessario.

Il guidatore che percorre una curva a velocità V , ha lo sguardo diretto, in condizioni di vista istintiva, secondo la tangente alla traiettoria del veicolo e lo scenario che egli percepisce è quello contenuto all'interno del campo della visione periferica di ampiezza 2ϕ ; la distanza di focalizzazione è, invece, d_0 (Fig. 6).

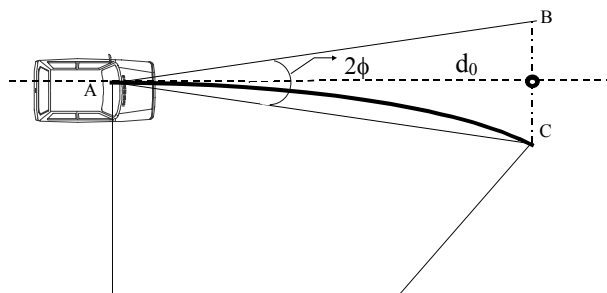


Fig. 6 Calcolo del raggio in base al comportamento ottico del conducente.

Il criterio della sicurezza ottica impone che la traiettoria curvilinea debba sempre ricadere all'interno del campo della visione periferica; dal punto di vista geometrico ciò vuol dire che il segmento AC (funzione della velocità) deve sempre intersecare la curva, deve cioè verificarsi la seguente condizione:

$$\frac{AC}{2} = R_{\text{Ottico}} \cdot \sin \phi \quad \text{e, poiché: } AC = \frac{d_0}{\cos \phi}, \quad \text{si ha:}$$

$$R_{\text{Ottico}} = \frac{d_0}{2 \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi} \quad [3]$$

Definiamo il valore del raggio così trovato come **raggio ottico** (o raggio della "curva ottica").

Qualora dovesse verificarsi che il raggio della traiettoria curvilinea sia sensibilmente inferiore al raggio ottico, si manifesta il venir meno delle condizioni di guida istintiva, cioè l'occhio umano riesce a percepire con sforzo l'andamento della strada. In questa situazione il conducente del mezzo automobilistico è costretto a modificare il proprio comportamento ottico rispetto a quello che, spontaneamente, sarebbe portato a tenere; questa situazione provoca fondamentalmente una situazione di mancanza di comfort per il conducente, e, a lungo andare, può dar luogo a ripercussioni negative anche sulla fluidità del comportamento di guida e sulle condizioni di sicurezza di marcia.

3. IL RILIEVO DELLE TRAIETTORIE.

Al fine di valutare le traiettorie *istintivamente* impostate dagli automobilisti nelle rampe autostradali, è stato condotto un rilievo sperimentale, a mezzo di videocamera, in corrispondenza di un'intersezione a livelli sfalsati (svincolo di San Giovanni Galermo), ubicata nella "Tangenziale Nord di Catania".

La scelta dello svincolo di indagine è derivata dalle seguenti motivazioni:

- la geometria della corsia di decelerazione è realizzata in pieno accordo con le indicazioni fornite dal C.N.R.;
- la corsia di decelerazione, si innesta in un tratto rettilineo del tracciato e consente all'utente di programmare anticipatamente la manovra di uscita;

- le condizioni della pavimentazione stradale sono ottime e non presentano alcuna disuniformità.

Le ampie dimensioni trasversali della corsia di decelerazione offrono all'automobilista due possibilità:

- 1) seguire la segnaletica percorrendo la pista di decelerazione progettata in base alle attuali norme del C.N.R.;
- 2) seguire la guida istintiva che gli consente maggior comfort e maggior sicurezza.

Nella figura 7 si è riportata una visione planimetrica della zona in studio, in cui viene raffigurata la rampa utilizzata per il rilievo delle traiettorie.



Fig. 7 Visione planimetrica dello svincolo di S. G. Galermo. Viene anche rappresentato il sistema di assi cartesiani utilizzato come riferimento per lo studio delle traiettorie.

Per le operazioni di ripresa delle traiettorie si è adottata una telecamera S-VHS che è stata collocata su un cavalcavia antistante la zona di svincolo in maniera da coprire la parte del percorso veicolare di nostro interesse e, nel contempo, minimizzare gli errori di approssimazione nel rilievo delle distanze.

Le riprese effettuate sono state analizzate criticamente estrapolando quelle "più significative" per le finalità del presente studio.

Dai dati ricavati dal rilievo sono state stralciate:

- le riprese relative alle manovre di uscita caratterizzate dalla presenza di plotoni automobilistici (in tal caso, infatti, la manovra risulta condizionata dal comportamento del leader, e spesso l'intero gruppo si adegua al "leader" seguendone il comportamento sia in termini di velocità che di traiettoria);
- le immagini relative ai veicoli posti nelle posizioni retrostanti il leader (poiché tali veicoli presentano delle traiettorie irregolari a causa della ricerca della posizione ottimale per il sorpasso);
- le riprese concernenti i vecchi autoveicoli, quelli che presentano incertezze nell'effettuare la manovra di uscita e quelli che si trovano a percorrere le traiettorie in condizioni di elevata densità del traffico (in tutte queste situazioni, infatti, si vengono a creare fenomeni di instabilità che si ripercuotono negativamente sulla scelta del tracciato "istintivo" dell'automobilista).

In definitiva, esaminate le diverse situazioni di marcia che si vengono a creare e gli effetti che queste producono sul comportamento dell'utente, sono state scelte, come significative, le traiettorie esibite dall'autoveicolo moderno isolato e viaggiante in

condizioni di densità di traffico non troppo intense. Pertanto, nell'ambito del presente studio sperimentale, dei 267 autoveicoli che si sono immessi nella rampa di uscita per S. Giovanni Galermo nell'arco delle 4 ore consecutive del rilievo, ne sono stati considerati 83.

Il passo successivo è stato quello di allestire una videocassetta contenente soltanto le porzioni di filmato relative alle traiettorie eseguite dagli 83 veicoli che si intendeva analizzare.

Gli spezzoni della registrazione (VHS) sono stati poi elaborati attraverso un sistema integrato di gestione delle immagini composto da:

- videoregistratore;
- modulo hardware per l'acquisizione delle immagini, implementato su Personal Computer;
- moduli software per la gestione e l'elaborazione dei fotogrammi acquisiti.

Il sito oggetto del rilievo è stato caratterizzato topograficamente mediante un rilievo di dettaglio delle strisce di segnaletica esistenti. Ogni striscia è stata identificata mediante un codice alfanumerico.

L'asse di riferimento del rilievo è stato fissato coincidente con la linea mediana della striscia di separazione tra le corsie (Fig. 7).

La restituzione fotografometrica, eseguita sulle immagini acquisite ed opportunamente calibrate in funzione delle misure effettuate "in situ" ha riguardato la distanza (x) tra il punto che individua il baricentro geometrico dei veicoli e l'asse (Oy) che divide longitudinalmente la linea di separazione tra la corsia di marcia e quella di uscita (Fig. 8).

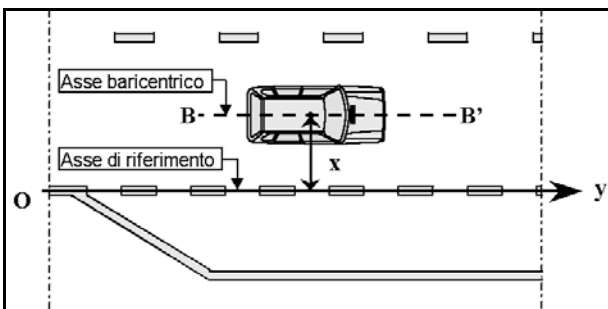


Fig. 8 Elementi di riferimento scelti per l'impostazione della restituzione fotografometrica delle traiettorie rilevate.

La scelta dell'asse di riferimento Oy garantisce la riduzione del margine di errore che si commette nella fase di acquisizione numerica delle traiettorie.

La sensibilità dell'apparecchiatura di ripresa, la postazione scelta per l'acquisizione dei filmati ed i comandi di visualizzazione offerti dal software per il trattamento delle immagini, hanno consentito di ottenere misure della distanza laterale (x) con una precisione dell'ordine del centimetro.

La misura dei tempi intercorrenti per l'attraversamento di determinati punti della traiettoria, è stata effettuata con estrema precisione sfruttando una funzione avanzata del software di gestione delle immagini. Questa funzione consente:

- ⚡ di analizzare "frame by frame" i fotogrammi di un filmato, per "step" di tempo selezionabili dall'operatore (nel nostro caso si è scelto uno step pari ad 1/25 di secondo);
- ⚡ di valutare i tempi intercorrenti per percorrere le varie sezioni di cui si compone la traiettoria effettuata;
- ⚡ di ricavare le grandezze geometriche per descrivere la posizione occupata dal veicolo.

I dati così acquisiti, registrati su apposito foglio di calcolo proprio del sistema integrato (Fig. 9), sono stati quindi utilizzati per le successive elaborazioni.

Veicolo N° : Utilitaria <input type="checkbox"/>		Media <input type="checkbox"/>	Lusso <input type="checkbox"/>
N° Frame	Scostamenti dall'asse di riferimento [m]	Tempo [s]	Spazio percorso [m]
1			
2			
3			
n			

Fig. 9 Foglio di lavoro "tipo" per ognuno degli autoveicoli analizzati.

In particolare, per ognuno degli 83 veicoli, è stato possibile tracciare la traiettoria in funzione degli scostamenti dall'asse di riferimento (Fig. 10), il diagramma dello spazio in funzione del tempo $s = s(t)$ (Fig. 11) ed il grafico delle velocità $v = v(t)$ (Fig. 12).

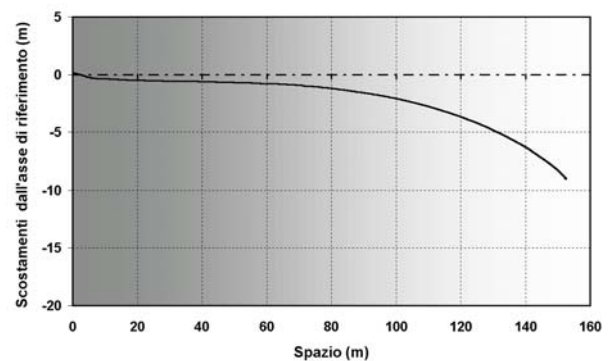


Fig. 10 Diagramma della traiettoria percorsa da uno degli autoveicoli rilevati.

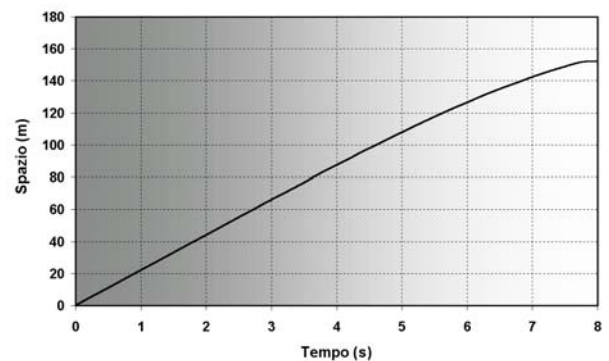


Fig. 11 Diagramma dello spazio in funzione del tempo relativo ad uno dei veicoli oggetto del rilievo.

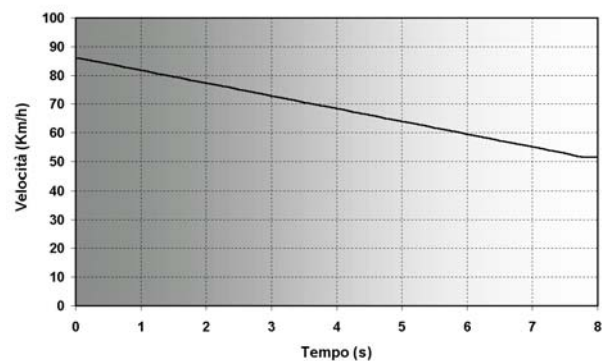


Fig. 12 Diagramma dello spazio in funzione del tempo relativo ad uno dei veicoli oggetto del rilievo.

4. ANALISI DEI RILEVAMENTI.

Dall'analisi delle traiettorie realmente descritte dagli utenti si è constatato che la manovra reale di immissione nella rampa di uscita si discosta notevolmente da quella teorica ipotizzata.

La **prima considerazione** che scaturisce dai rilievi effettuati è che l'automobilista affronta le zone di svincolo a velocità paragonabile alla "velocità di crociera". La "Tangenziale Nord", secondo le indicazioni delle Norme del CNR, può essere classificata come strada di tipo II, con velocità di percorrenza $90 < V < 120$ km/h, ed in effetti le velocità rilevate in prossimità dell'inizio della rampa presentano valori variabili tra 80 km/h e 110 km/h per il 75% degli autoveicoli, con un valore medio prossimo a 90 km/h (Fig. 13); la velocità alla fine della zona della segnaletica, in prossimità dell'ingresso dell'elemento a curvatura costante, varia, invece, entro l'intervallo 40-50 km/h.

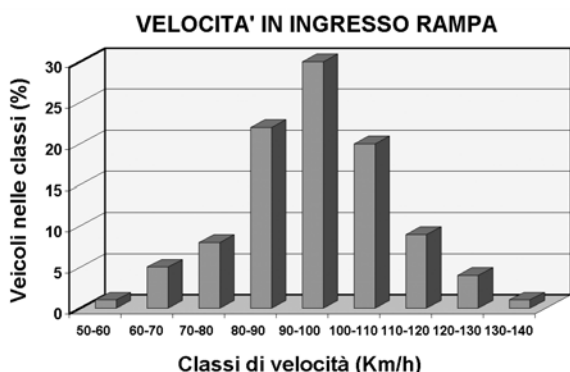


Fig. 13 Distribuzione percentuale, all'interno delle classi di velocità, dei veicoli rilevati all'ingresso della rampa.

Dai rilievi eseguiti, si è osservato che gli automobilisti rallentano sulla corsia di marcia per passare dalla velocità di crociera ($V=90$ km/h) ad una velocità compatibile con la manovra di uscita ($V=50$ km/h). Tale rallentamento è una delle cause potenziali di tamponamento da parte di quei veicoli che, trovandosi in coda al veicolo in uscita, non hanno il tempo di reagire adeguatamente all'"inspiegabile" rallentamento.

La decelerazione con cui l'automobilista affronta la uscita autostradale, riducendo la propria velocità da 90 km/h a 40 km/h, si aggira generalmente intorno a 1.6 m/s^2 (a tale valore corrisponde un tratto percorso pari a circa 156 metri); si tratta della decelerazione tipica di una manovra eseguita sfruttando solo la forza frenante data dal "freno motore".

La **seconda considerazione** è che gli utenti preferiscono effettuare una manovra di uscita di tipo "divergente", percorrendo una traiettoria con variazione di direzione graduale. Si sono riscontrate tre manovre tipiche con cui viene affrontata l'uscita (Fig. 14):

- **manovra A:** l'utente abbandona la corsia di marcia normale staccandosi prima della zona triangolare, percorre (a velocità pari alla velocità di marcia normale) una traiettoria a cavallo della striscia di margine per poi immettersi nella corsia parallela;
- **manovra B:** il guidatore percorre la corsia di marcia per un tempo più lungo, decelera lungo la corsia di marcia riducendo la velocità fin tanto da poter eseguire le manovre di sterzata e controsterzata per immettersi nella corsia parallela;
- **manovra C:** l'automobilista prosegue con la sua marcia lungo la corsia di destra fino ad arrivare in prossimità del punto di divergenza con la rampa, in corrispondenza del quale, effettuando una forte decelerazione, si immette nella rampa di uscita.

Nella zona in cui sono stati effettuati i rilievi, l'automobilista dispone di una notevole "libertà di manovra" e di tutta una serie di condizioni favorevoli che rendono i risultati ottenuti attendibili e allo stesso tempo generalizzabili alle situazioni reali di pratica applicazione.

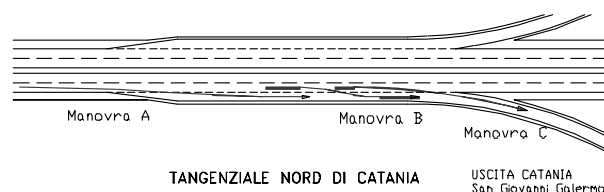


Fig. 14 Tipologie di manovre di diversione riscontrate nell'area dello svincolo oggetto del rilevamento.

4.1. Determinazione della traiettoria descritta dagli autoveicoli.

Le elaborazioni effettuate tramite i moduli software del sistema integrato hanno consentito la valutazione delle coordinate relative alle traiettorie descritte dagli autoveicoli in uscita. Involupando tutti i valori trovati è stato possibile costruire un intervallo entro cui ricade almeno il 75 % delle traiettorie rilevate (Fig. 15).

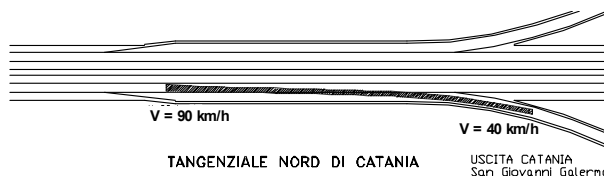


Fig. 15 Inviluppo delle traiettorie rilevate.

Una volta ricavati i limiti superiore ed inferiore delle curve che descrivono le traiettorie realmente eseguite, si è adoperato un programma di modellazione precedentemente sviluppato⁽¹⁾ al fine di dedurre la curva che meglio approssima la traiettoria media rilevata.

Il programma utilizza la famiglia di curve di equazione $r \cdot s^n = A^{n+1}$. Le elaborazioni effettuate hanno permesso di identificare nella clotoide multiparametro con $n = 2$, la curva che ricalca meglio la traiettoria mediamente effettuata dagli automobilisti.

Se specializziamo i valori delle sollecitazioni e dei parametri ergonomici in funzione della condizione (peraltro non prevista dal CNR) di velocità variabile è possibile esprimere il valore del contraccollo e della curvatura ottica mediante le espressioni:

➤ **contraccollo:**

$$C = \pm \left[2 \cdot V \cdot a \cdot \left(\frac{s^n}{A^{n+1}} \right) + V^3 \frac{n \cdot S^{n-1}}{A^{n+1}} - g \cdot V \cdot \left(\frac{dp}{ds} \right) \right]$$

in questo modo il valore del contraccollo puntuale viene fatto dipendere dalla velocità puntuale (V), dall'accelerazione del veicolo (a), dall'ascissa curvilinea (s), dallo sviluppo della curva (S) e dalla variazione della sopraelevazione del ciglio esterno (dp/ds)

➤ **curvatura:** $\rho = \frac{1}{r} = \frac{S^n}{A^{n+1}}$

(1) S. Torrisi, F. Nicosia. "Nuovi criteri per la modellazione geometrica delle traiettorie veicolari curvilinee percorse a velocità fortemente variabili" - Quaderno I.S.F.A. n° 63 - Maggio 1994.

Riportiamo di seguito i grafici, ricavati con il programma di modellazione geometrica, che visualizzano le migliori condizioni in termini di contraccollo, di accelerazione trasversale, e di comfort ottico che offre il la clotoide con parametro $n = 2$, rispetto a quelle che si avrebbero con la clotoide a parametro unitario avente caratteristiche geometriche simili.

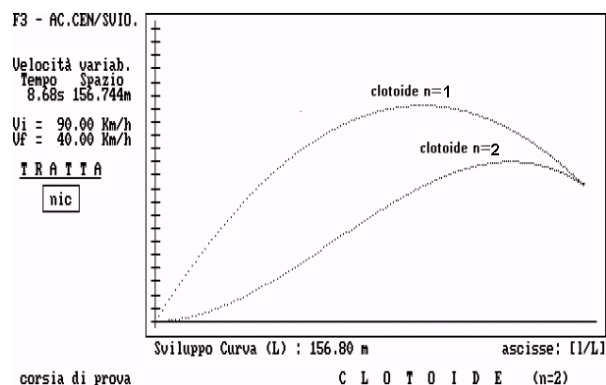


Fig. 16 Variazione dell'accelerazione trasversale sulla clotoide a parametro unitario e sulla clotoide a parametro $n=2$.

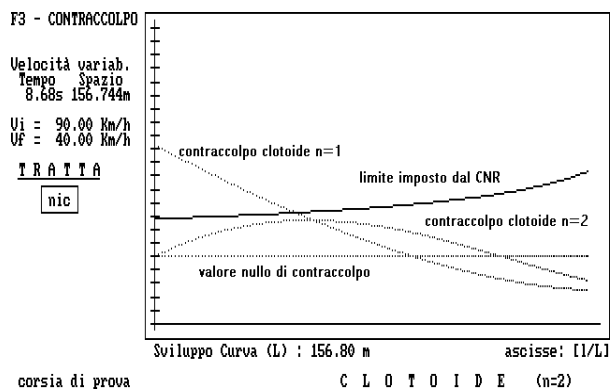


Fig. 17 Confronto dei valori di contraccollo lungo lo sviluppo della clotoide a parametro unitario e della clotoide a parametro $n=2$ con i limiti consentiti dal CNR.

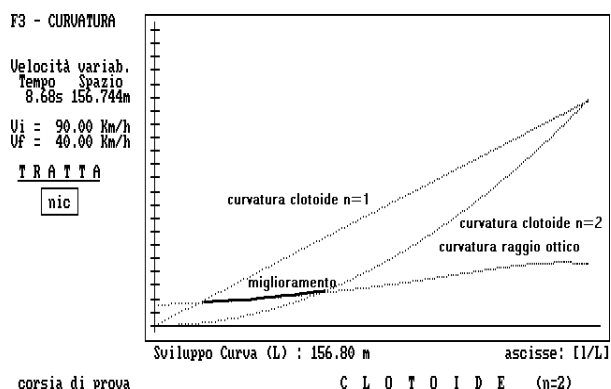


Fig. 18 Confronto dei valori di curvatura relativi alla clotoide a parametro unitario ed alla clotoide a parametro $n=2$ con i valori derivanti dal "criterio di verifica ottica".

Dall'analisi del diagramma riportato in figura 16 è possibile trarre le seguenti osservazioni:

⇒ l'accelerazione trasversale che si genera percorrendo la clotoide monoparametrica evidenzia un punto di massimo elevato prima della fine dello sviluppo, mentre, nel caso della clotoide a parametro $n=2$, manifesta un andamento crescente lungo tutto lo sviluppo, raggiungendo il massimo alla fine;

⇒ la differenza tra le accelerazioni trasversali delle due curve rappresenta un surplus di accelerazioni che subisce il guidatore che percorre la clotoide consigliata dal CNR rispetto alla clotoide biparametrica.

Il grafico riportato in figura 17 evidenzia che:

⇒ la clotoide a parametro unitario presenta, nel tratto iniziale del suo sviluppo, valori del contraccollo superiori a quelli imposti come limite dal CNR;

⇒ la clotoide con $n=2$ manifesta valori del contraccollo molto prossimi a zero nella prima parte della curva, palesando, lungo tutto lo sviluppo, valori sempre inferiori ai limiti imposti dalle norme del CNR.

Dal diagramma di figura 18, infine, si evince che:

⇒ la curvatura della clotoide monoparametrica interseca quella del raggio ottico in un punto prossimo all'inizio del proprio sviluppo, ciò indica che è minima la zona in cui il guidatore ha una visione istintiva della traiettoria;

⇒ la curvatura della clotoide con $n=2$ interseca la curvatura ottica in un punto prossimo alla parte centrale del proprio sviluppo, garantendo la visione istintiva della traiettoria per un tratto maggiore.

4.2. Verifica della sicurezza di percorribilità.

Si è visto come la clotoide parametrata con $n=2$, percorsa a velocità variabile, oltre ad approssimare adeguatamente la traiettoria geometrica mediamente eseguita dagli utenti stradali, soddisfa i criteri ergonomici in maniera migliore rispetto alla clotoide monoparametrica proposta dal CNR. Si vuole adesso dimostrare che, anche dal punto di vista della stabilità del veicolo, la clotoide biparametrica fornisce un elevato grado di sicurezza.

Utilizzando un modello analitico, sviluppato per simulare il comportamento del veicolo, è possibile effettuare lo studio del moto a velocità variabile del veicolo considerato come corpo rigido. La procedura di calcolo cui si fa riferimento è stata "tradotta" in software, ed ha già trovato applicazione in studi precedentemente portati a compimento da questo stesso gruppo di ricerca⁽²⁾.

L'ipotesi di veicolo come corpo rigido implica due importanti conseguenze:

- ◆ il moto del veicolo è un moto piano;
- ◆ il veicolo è un sistema iperstatico (quindi le reazioni normali al piano del moto sono indeterminate).

L'analisi verrà condotta per un autoveicolo tipo (FIAT Uno), che può essere assunto come modello rappresentativo del parco veicolare italiano.

Tenendo conto delle indicazioni provenienti dal rilievo sperimentale, si è ipotizzato che gli autoveicoli diano inizio, alla velocità di 90 km/h, alla manovra di deviazione dalla traiettoria rettilinea, per arrivare, dopo una lunghezza di 156.80 metri (sviluppo complessivo dell'arco di clotoide), alla velocità finale di 40 km/h da mantenere sulla rampa.

Introdotti i dati nel programma (Fig. 19) e ripetute iterativamente le elaborazioni consentite (riducendo di volta in volta la velocità di riferimento e variando i raggi della traiettoria), si sono ottenuti dei valori di output, tutti variabili nell'intervallo di velocità prescelto (90 km/h – 40 km/h). In particolare è stato possibile graficizzare le seguenti funzioni:

- gli angoli di deriva ($\varepsilon_1(V)$, $\varepsilon_2(V)$), relativi all'asse posteriore ed all'asse anteriore del veicolo (Fig. 20);

⁽²⁾ S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. "Inadeguatezza delle corsie di decelerazione proposte dalla Normativa CNR" - Atti del Convegno SIIV - Roma 20/21 Febbraio 1997.

- le forze trasversali ($F_{y1}(V)$, $F_{y2}(V)$), che sollecitano gli assali del veicolo durante la percorrenza del tratto clotoidico (Fig. 21).

DATI DI INPUT			
VEICOLO			
Velocità in rettilineo (km/h)	V	m/s	km/h
Peso del veicolo (kg)	m	900	90
Momento d'inerzia ($kg \cdot m^2$)	Jz	1400	
Distanza baricentro anteriore (m)	a	1.1045	
Distanza baricentro posteriore (m)	b	1.257	
Lunghezza passo longitudinale (m)	l	2.3615	
Superficie anteriore del veicolo (m^2)	S	1.83	
Larghezza passo trasversale (m)	l_t	1.321	l_b 1.34
Altezza del baricentro (m)	H_g	0.75	
PNEUMATICI			
Rigidità di deriva (N/rad)	C1	31000	C2 31000
Momenti di autoallineamento (Nm/rad)	N _{at1}	600	N _{at2} 600
Forza trasversale massima (N)	Y _{max}	3000	
Coefficiente di rotolamento	F_a	0.013	
Coefficiente di resistenza all'avanzamento (s^2/m^2)	K	6.9E-06	
CARATTERISTICHE AERODINAMICHE (l/rad)			
Densità dell'aria (kg/m^3)	$(C_{Dy})\beta$	-2.2	$(C_{Dy})\beta$ -0.6
	ρ	1	

Fig. 19 Schermata relativa ai dati di input.

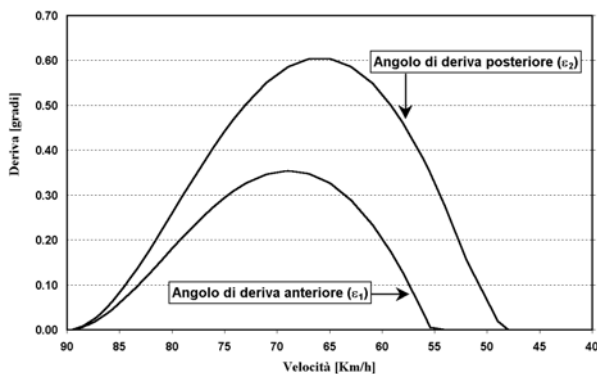


Fig. 20 Variazione degli angoli di deriva lungo lo sviluppo della clotoide.

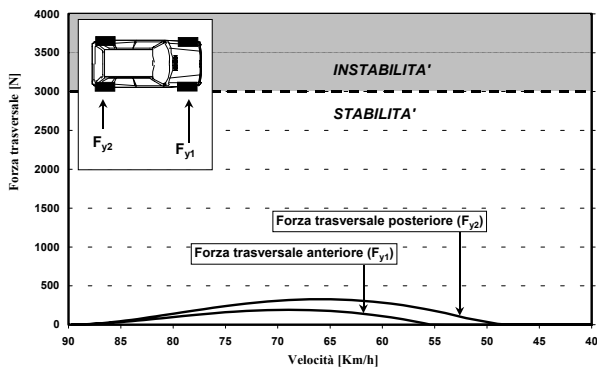


Fig. 21 Variazione delle forze agenti trasversalmente sul veicolo che percorre la clotoide biparametrica.

Dall'osservazione dei diagrammi riportati nelle figure 20 e 21 è possibile dedurre che le funzioni $\varepsilon_1(V)$, $\varepsilon_2(V)$, $F_{y1}(V)$ ed $F_{y2}(V)$:

- presentano un andamento "a campana" con un massimo in prossimità della parte centrale dello sviluppo complessivo della clotoide;
- si annullano (oltre che all'inizio), in corrispondenza di punti del tracciato precedenti la parte conclusiva dello sviluppo della traiettoria. Ragionando in termini delle forze trasversali, ciò è spiegabile considerando che il software "restituisce" la risultante tra le forze instabilizzanti (come la forza centrifuga) e le forze stabilizzanti (quelle dovute all'aderenza); l'annullarsi delle forze indica evidentemente che, in prossimità

del tratto finale della curva, viene ad ingenerarsi l'equilibrio delle forze in gioco. Per quanto riguarda l'andamento delle funzioni $\varepsilon_1(V)$ ed $\varepsilon_2(V)$, sussistendo una proporzionalità diretta tra gli angoli di deriva e le forze trasversali, valgono le stesse considerazioni svolte per le funzioni $F_{y1}(V)$ ed $F_{y2}(V)$;

- raggiungono valori "di massimo" notevolmente inferiori a quelli che possono provocare lo svio del veicolo. A tal proposito, riferendoci al grafico di figura 22 che fornisce l'andamento delle forze trasversali al variare della deriva, e comparando i valori massimi delle forze F_{y1} ed F_{y2} conseguiti durante la percorrenza della traiettoria curvilinea, si evince che il regime di forze (e di angoli) risulta ampiamente compatibile con quello dei pneumatici "montati" sul nostro veicolo tipo (ricordiamo che, in virtù della schematizzazione adottata, il sistema di forze valutato per una ruota è pari alla metà di quello relativo alle ruote di uno stesso asse).

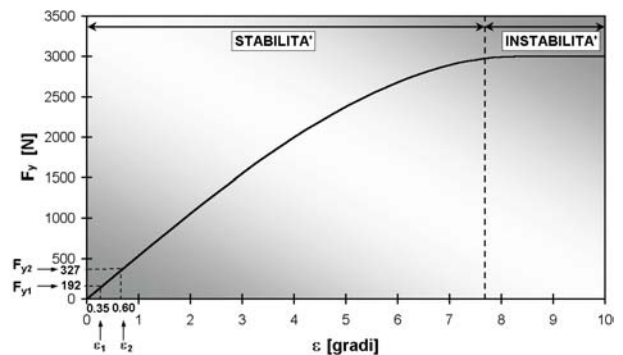


Fig. 22 Diagramma $F_y(\varepsilon)$ per un pneumatico caratterizzato da: $C = 31$ kN/rad; $F_{y\max} = 3$ kN.

Si è infine valutata la sicurezza della percorribilità della traiettoria, calcolando la distribuzione dei carichi verticali sulle quattro ruote del veicolo che transita lungo il tratto a curvatura variabile; a tal fine si è svolta una serie di elaborazioni con il supporto del software "PESI"⁽³⁾. Dal grafico di figura 23 si evince immediatamente come, fin dall'inizio dell'arco di clotoide, la "tendenza" sia quella di un assetamento delle forze in gioco verso i valori che competono al tratto successivo a curvatura costante. In nessun caso si presentano situazioni di squilibrio tali da favorire l'insorgere di coppie imbarbanti o di altri fenomeni di instabilità direzionale del veicolo.

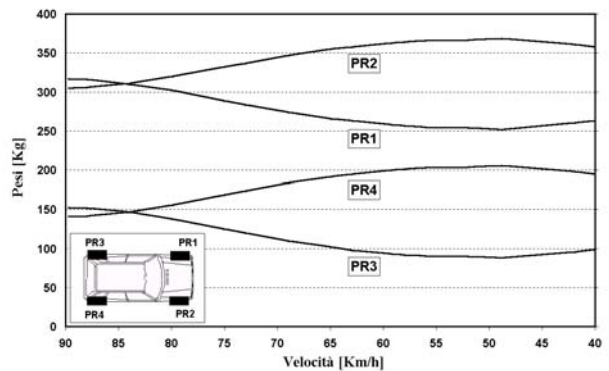


Fig. 23 Distribuzione dei carichi sulle quattro ruote, al variare della velocità, lungo la clotoide biparametrica.

(3) S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. "Nuovi criteri progettuali per le curve stradali" - Autostrade - anno XXXVII - n.3 - 1995.

5. PROPOSTE PROGETTUALI.

Il rilievo sperimentale eseguito presso un'intersezione a livelli sfalsati appartenente alla Tangenziale Nord di Catania ci ha consentito di individuare e classificare le manovre eseguite istintivamente dagli automobilisti in corrispondenza delle zone di uscita. Tramite l'utilizzo di programmi di simulazione è stato possibile assimilare la traiettoria mediamente percorsa dagli utenti stradali ad una clotoide di parametro $n=2$, che garantisce un andamento delle accelerazioni centrifughe monotono crescente, ed un grado di comfort vestibolare, espresso tramite il valore del contraccolpo, sempre compatibile con le limitazioni proposte dal CNR. Anche per quanto riguarda il comfort ottico, le traiettorie descritte consentono di ridurre al minimo il periodo entro il quale l'utente si trova a dover sforzare la sua visione per comprendere il corretto "funzionamento" della traiettoria. Si è infine verificato che la relazione tra velocità e grado di curvatura della traiettoria origina uno stato di sollecitazione sull'autoveicolo tale da garantire la percorribilità del tratto curvilineo con un ampio margine di sicurezza ed in perfetta stabilità.

Fatte queste premesse, occorre però ricordare che l'utente, nell'eseguire la manovra di uscita, penalizza enormemente la funzionalità della corsia di marcia, rallentando lungo la stessa ed incrementando la pericolosità dell'area che, spesso, diviene sede di tamponamenti.

A nostro avviso, dunque, la manovra di uscita dalle corsie autostradali dovrebbe compiersi in modo tale che la riduzione di velocità avvenga in una area in cui non possa esserci interferenza con la marcia degli altri veicoli; a tal fine, le corsie di uscita dovrebbero essere così organizzate:

- 1) una zona in cui l'utente possa staccarsi dalla corsia di marcia senza dover ridurre la sua velocità; lo stacco occorrente deve essere quello minimo indispensabile per non intralciare le corrette condizioni di viabilità nella corsia di marcia;
- 2) un'area in cui l'utente possa ridurre la propria velocità da quella di marcia a quella dell'elemento più restrittivo, in maniera ottimale e nel rispetto dei limiti imposti dalla ergonomia di guida;
- 3) una zona in cui l'automobilista possa viaggiare a velocità ridotta fino a raggiungere l'area di svincolo.

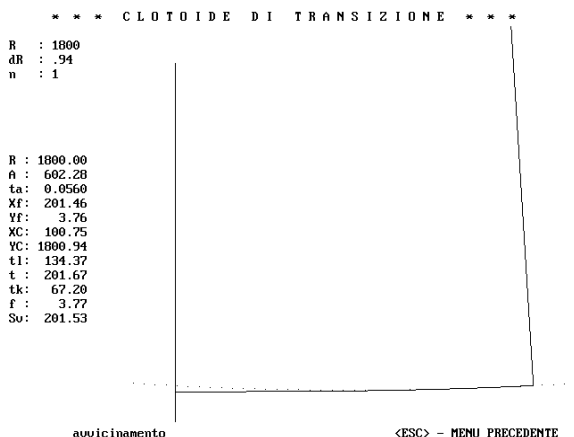


Fig. 24 Arco di clotoide monoparametrica, costituente la prima parte della traiettoria di uscita.

Schematizzando un'uscita siffatta, è possibile ipotizzare che lo stacco dalla corsia di marcia normale, a velocità costante, possa essere realizzato tramite l'utilizzo di una clotoide di parametro unitario (è noto che la clotoide monoparametrica, quando viene percorsa a velocità

costante, fornisce ottime condizioni di guidabilità) (Fig. 24). Il valore del raggio terminale della clotoide si assume pari a 1800 m, che risulta compatibile con la velocità di percorrenza di 90 km/h e con la pendenza trasversale pari al 2.5% (pendenza che viene normalmente utilizzata per smaltire il flusso meteorico). La scelta della pendenza trasversale del 2.5% è necessaria affinché nella parte terminale della traiettoria non si creino discontinuità (in termini di quota) tra la piattaforma della zona di uscita e quella della corsia di marcia normale.

La seconda parte della zona di uscita dovrebbe essere realizzata mediante una curva di transizione in cui l'utente possa portare idoneamente la sua velocità di marcia, da quella di crociera, a quella corrispondente all'elemento più vincolante della zona (il tratto a curvatura costante). Il raccordo da utilizzare dovrebbe approssimare la traiettoria che spontaneamente viene descritta dagli automobilisti; a tale scopo, si propone l'impiego di una clotoide di continuità con parametro $n=2$ che si raccorda con il raggio finale ($R = 1800$) della clotoide monoparametrica percorsa a $V = 90$ km/h e con l'elemento di raggio pari a 60 m associato a $V = 40$ Km/h. Lo sviluppo di tale curva deve essere compatibile con la lunghezza necessaria al veicolo per decelerare con la frenatura consentita dal freno motore (decelerazione di circa 1.6 m/s^2) (Fig. 25).

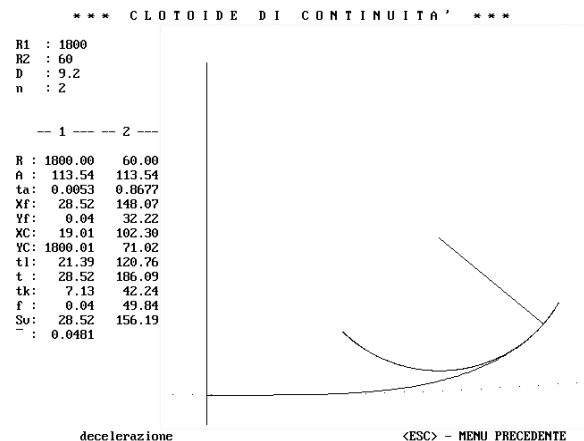


Fig. 25 Clotoide di continuità biparametrica, costituente la seconda parte del raccordo nella zona di uscita.

L'ultimo tratto della area di uscita dovrebbe essere eseguito a raggio costante, con velocità di percorrenza ridotta (art.116 reg. N.C.S.), pari a 40 Km/h.

In figura 26 è riportata la schematizzazione geometrica dell'area di uscita derivante dalle osservazioni compiute in questo studio.

Dall'analisi dello schema geometrico riportato in figura 26, si evince chiaramente che le variazioni più consistenti, rispetto ai consigli del CNR, riguardano soprattutto la parte della corsia stradale esistente, dove dovrà ricavarsi lo spazio affinché i veicoli in uscita possano allontanarsi alla stessa velocità di percorrenza. Dal punto di vista dell'adeguamento funzionale della zona di svincolo, è evidente che i maggiori oneri riguardino il tratto di rampa realizzato con la clotoide di parametro $n=2$, dove la diversa curvatura obbliga alla realizzazione di un tracciato differente. Il tratto a curvatura costante, invece, cambierà di posizione solo nella parte terminale.

Anche la segnaletica dovrà essere realizzata e posizionata in maniera differente rispetto a quanto si fa attualmente.

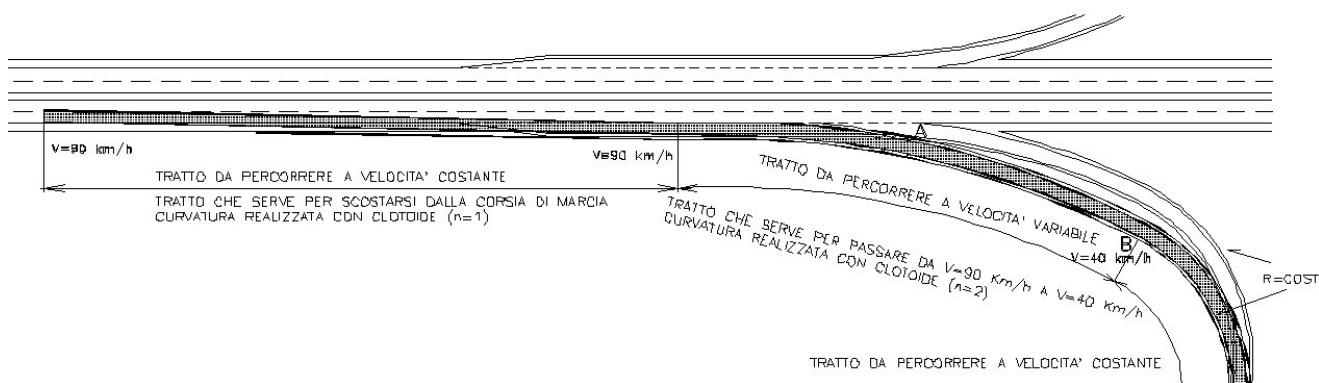


Fig. 26 Confronto tra la zona di uscita proposta dal CNR e quella che scaturisce dalle considerazioni svolte nel presente studio.

Il segnale di limite di velocità di 40 km/h dovrà essere posto all'inizio del tratto a curvatura costante (punto B, Fig. 26). Attualmente, invece, il segnale, in base alle indicazioni del Nuovo Codice della Strada, viene situato alla fine della corsia parallela (punto A, Fig. 26) (Fig. 27). Ciò è in contrasto con i consigli del CNR (B.U. 90/83) in base ai quali la corsia di decelerazione si sviluppa per 1/3 parallelamente alla corsia di marcia e per 2/3 con tratto a curvatura variabile; pertanto, alla fine del tratto parallelo, il veicolo, ancora in decelerazione, si troverà a percorrere il tratto curvilineo ad una velocità senz'altro superiore al valore di 40 Km/h imposto dal N.C.S. Infine, sulle rampe di uscita, a nostro avviso, dovrebbe esserci l'obbligo dell'utilizzo delle strisce di guida (art. 143 reg. N.C.S.), preposte ad indirizzare l'automobilista verso la traiettoria corretta (Fig. 26).



Fig. 27 Posizionamento del segnale di limite massimo di velocità in base al Nuovo Codice della Strada.

6. CONCLUSIONI.

Nella presente trattazione abbiamo analizzato criticamente i rilievi di traiettorie eseguiti lungo una uscita autostradale esistente. Il nostro atteggiamento verso l'interpretazione dei dati rilevati è stato rivolto alla giustificazione ed alla ricerca dell'origine di determinati atteggiamenti caratteristici della condotta di guida. Investigando sui parametri ergonomici che entrano in gioco durante la percorrenza veicolare di tratti non rettilinei, si è riscontrata l'influenza preponderante della visione del tracciato e del comfort vestibolare. La modellazione e la ricostruzione delle traiettorie medie descritte dai veicoli ci ha indotto a proporre una geometria differente per le corsie di uscita, in funzione di un maggiore adattamento alle caratteristiche di sicurezza e di comfort richieste dall'utente stradale.

La geometria proposta si realizza in tre parti: una prima parte che consente all'automobilista di allontanarsi dalla corsia di marcia normale a velocità costante (cloide monoparametrica), una seconda parte in cui si consente all'automobilista di portare la sua velocità da quella di crociera a quella compatibile con l'area dello svincolo (cloide a parametro $n = 2$) e, infine, una terza parte in cui si ha la percorrenza a velocità costante entro la zona di svincolo (tratto a raggio costante).

7. BIBLIOGRAFIA.

- [1] C.N.R. **Norme sulle caratteristiche geometriche e di traffico delle intersezioni stradali urbane** - Bollettino Ufficiale N.90 - 1983.
- [2] **Nuovo Codice della Strada** - Ed. Simone - 1993.
- [3] M. Bordin, M. Stefanutti. **Determinazione dei parametri delle curve di transizione in funzione della sicurezza e del comfort** - Atti del convegno SIV - Pisa 29/30 Ottobre 1997.
- [4] S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. **Nuovi criteri progettuali per le curve stradali** - Autostrade - anno XXXVII - n.3 - 1995.
- [5] S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. **Inadeguatezza delle corsie di decelerazione proposte dalla Normativa CNR** - Atti del convegno SIV - Roma 20/21 Febbraio 1997.
- [6] P. Colonna, P. Delcarmine. **Indicazioni progettuali desunte da un'indagine sperimentale, per le corsie di decelerazione in curva** - Atti del convegno SIV - Roma 20/21 Febbraio 1997.
- [7] G. Genta. **Meccanica dell'autoveicolo** - Ed. Levrotto & Bella - 1993.
- [8] L.R. Hartley. **Fatigue and Driving**. Taylor & Francis - 1995
- [9] B. Peacock, V. Karwowski. **Automotive Ergonomics** - Taylor & Francis - 1993
- [10] S. Torrisi, F. Nicosia. **Nuovi criteri per la modellazione geometrica delle traiettorie veicolari curvilinee percorse a velocità fortemente variabili** - Quaderno I.S.F.A. n° 63 - Maggio 1994.