

LE CONDIZIONI DI SICUREZZA IN PRESENZA DI RAFFICHE DI VENTO TRASVERSALI: INTRODUZIONE DEI CRITERI PROBABILISTICI COME SUPPORTO PER LA SCELTA DEGLI INTERVENTI PROGETTUALI

Prof. Ing. Sascia Canale, Ing. Francesco Nicosia, Ing. Salvatore Leonardi.

1. Premessa.

La progettazione di un'infrastruttura stradale è il risultato finale di un insieme di attività tendenti ad ottenere un'opera capace di consentire che l'attività di guida si svolga con la massima sicurezza.

L'evoluzione meccanica del mezzo automobilistico, che ha consentito il raggiungimento di elevate velocità, obbliga i progettisti stradali a rivolgere la loro attenzione anche verso i problemi connessi con la meccanica dell'autoveicolo ed in particolare con l'insieme delle forze scambiate tra veicolo e strada. La "guida" di un veicolo avviene attraverso il continuo susseguirsi di **rischi** accettati dall'utente (rischio = probabilità del danno x entità del danno); gli stimoli che arrivano all'utente devono essere chiari e capaci di indirizzarlo verso atteggiamenti corretti. Gli "stimoli" devono cioè indurre reazioni "aspettate" nel guidatore; se una qualunque causa può alterare gli stimoli, si rende necessario prevedere degli accorgimenti di "minimizzazione".

Un caso particolare da analizzare durante la fase della progettazione è quello riguardante le probabili azioni derivanti dal "vento".

Quando il vento agisce frontalmente al veicolo, esso provoca principalmente azioni di resistenza al moto (superabili attraverso l'incremento della spinta applicata dal motore); se l'azione del vento si manifesta in direzione trasversale a quella del moto, al veicolo viene impresso un sistema di sollecitazioni trasversali a cui esso può reagire solo in modo "passivo", attraverso le sue componenti di stabilità di marcia.

Quando la componente trasversale del vento risulta elevata, il veicolo può subire spostamenti laterali che possono portare alla fuoriuscita dalla corsia di marcia.

Gli scostamenti dalla traiettoria risultano funzione della velocità del vento e della velocità di marcia del mezzo. Essendo la velocità e la direzione del vento variabili aleatorie, durante la fase di studio di un tracciato stradale, soprattutto in presenza di elementi di tracciato particolari (uscita dalle gallerie, alti viadotti, strade di gola, ecc.), è

necessario prevedere un'indagine comparata delle azioni sul veicolo ed individuare specificatamente le limitazioni indotte dall'agire del vento.

2. Azioni aerodinamiche.

Un qualsiasi veicolo terrestre mentre svolge la sua "attività di moto" si trova ad interagire con un ambiente circostante determinato dall'aria. Durante il moto l'aria presente nell'atmosfera esercita in ogni punto P della superficie esterna del veicolo una tensione \bar{t} definibile come: $\bar{t} = \lim \frac{\Delta\bar{F}}{\Delta S}$, dove $\Delta\bar{F}$ e ΔS sono rispettivamente l'area di una porzione di superficie che circonda il punto P e la forza che agisce su di essa.

La tensione \bar{t} può essere scomposta in una tensione normale alla superficie \bar{t}_N , coincidente con la pressione locale ed una tensione \bar{t}_T risultante delle azioni viscosse che agiscono su ΔS , contenuta nel piano tangente alla superficie in P.

Le azioni aerodinamiche sul veicolo sono riconducibili ad una forza e a un momento esprimibili, in modo semplice, attraverso le seguenti espressioni:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot C_f$$

$$M = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot l \cdot C_m$$

si suppone cioè che essi siano proporzionali alla pressione dinamica della corrente indisturbata $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2$, ad una superficie di riferimento S ed ad un coefficiente adimensionale da determinare sperimentalmente.

Se la forza aerodinamica viene scomposta secondo gli **assi vento** Ox "y" z", le componenti assumono le denominazioni seguenti (Fig. 1):

- *resistenza*, componente secondo x;
- *devianza*, componente secondo y;
- *portanza*, componente secondo z.

La *resistenza aerodinamica* è la forza diretta secondo la velocità relativa ed è quindi la forza che si oppone al moto del corpo nel fluido. Nel caso in cui la velocità relativa sia

contenuta nel piano di simmetria del veicolo (marcia con deriva nulla e senza vento laterale) la differenza tra la resistenza e la forza X_a risulta nulla.

La *portanza* è un fenomeno che può essere trascurato quando si analizzano vetture di classe sportiva; al contrario, le forze trasversali (*devianza*) che sollecitano il veicolo devono essere valutate attentamente perché sollecitano il veicolo in modo anomalo.

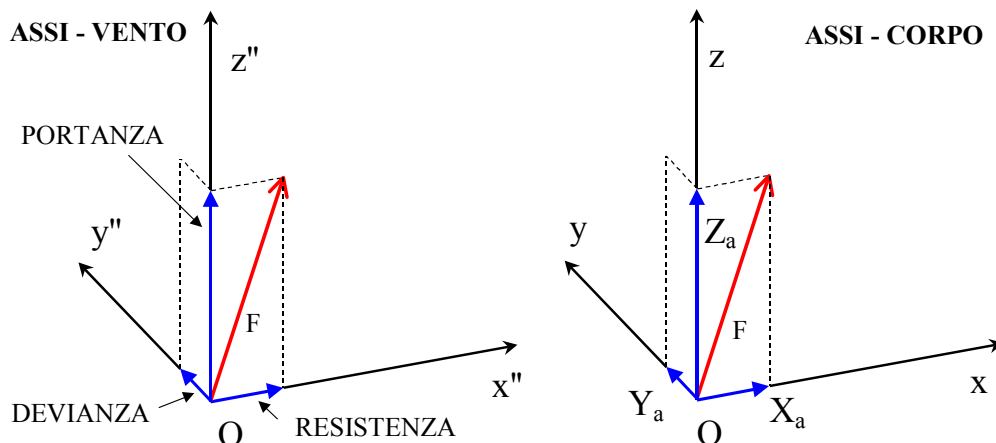


Fig. 1 - Scomposizione della forza aerodinamica F secondo gli assi vento e secondo gli assi corpo.

La devianza risulta nulla se il veicolo ammette un piano di simmetria e se la velocità relativa (vento-veicolo) è contenuta in questo piano, mentre risulta non nulla quando si ha l'azione di una forza di disturbo laterale (ad es. raffiche di vento).

3. La velocità di marcia e le raffiche di vento laterale.

Molti eventi che si succedono durante le fasi dell'attività di guida non hanno un carattere deterministico, pertanto possono essere analizzati e studiati solo mediante l'introduzione di leggi probabilistiche e statistiche. Quando non esiste una corrispondenza diretta tra causa ed effetto, un modo semplice per valutare la correlazione è individuare la "legge" con cui essi si presentano all'osservatore.

La velocità con cui i vari veicoli si muovono su una strada non è univocamente determinata, anzi deve essere considerata come una variabile aleatoria, in quanto trattasi di una "grandezza" dipendente da molti fattori legati sia all'autoveicolo che al tipo di traffico ed al guidatore. La velocità di marcia di un veicolo deriva sempre da un compromesso tra la velocità possibile (definita dalle condizioni geometriche della strada) e la velocità desiderabile (funzione dell'utente e dell'uso che esso fa della strada).

Studi condotti da vari autori hanno mostrato che la distribuzione delle velocità è una variabile aleatoria continua che spesso coincide con la gaussiana (Fig. 2).

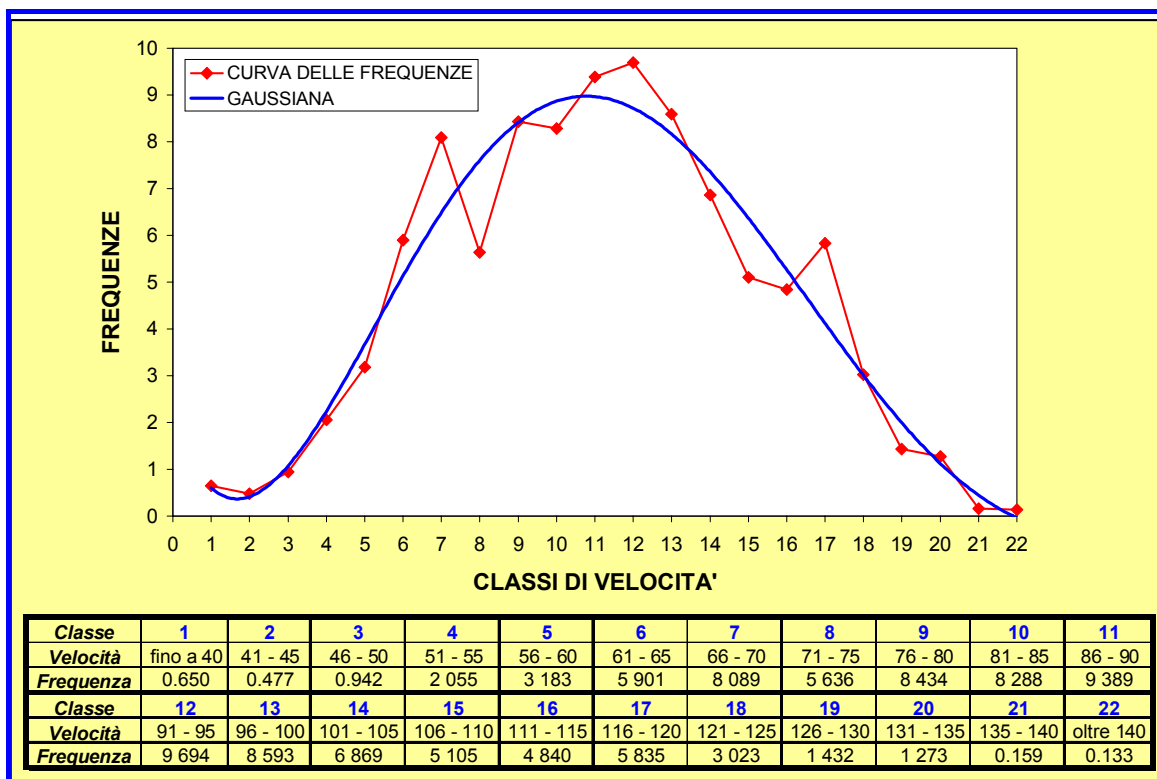


Fig. 2 - Esempio di distribuzione delle velocità e confronto con la curva gaussiana.

Quando si trattano variabili continue non si parla di probabilità che si verifichi un determinato valore di esse, ma solo di probabilità che queste assumano valori compresi entro un determinato intervallo.

Il regime delle velocità del veicolo, potendo assumere un insieme continuo di valori, può essere rappresentato dal poligono delle frequenze relative che è una curva continua di equazione $Y = P(x)$. Possiamo definire $P(x)$ funzione densità di probabilità, o, più brevemente, funzione di densità.

Il fenomeno delle raffiche di vento segue lo stesso andamento di una qualsiasi variabile aleatoria meteorologica⁽¹⁾.

I dati relativi ai fenomeni anemometrici, di norma, costituiscono un insieme molto consistente; per analizzarli, è necessario prima ordinarli numericamente in classi e poi

⁽¹⁾ I dati anemometrici rappresentano l'elemento cardine su cui si basa la progettazione di un aeroporto, mentre sono spesso trascurati per la progettazione delle infrastrutture stradali.

determinare la cosiddetta *frequenza di classe*, ovverosia il numero dei dati appartenenti a ciascuna classe.

Le regole per determinare la distribuzione di frequenze sono:

- determinare il più grande ed il più piccolo numero fra i dati grezzi in modo da trovare il campo di variazione;
- dividere il campo di variazione in un numero conveniente di classi della stessa ampiezza;
- determinare il numero di osservazioni che cadono all'interno di ciascuna classe, cioè trovare le frequenze di classe.

Per rappresentare graficamente le distribuzioni di frequenza si è soliti fare uso di “istogrammi”.

I venti, in base alla loro consistenza, possono essere così classificati:

- ◆ **costanti** (spirano tutto l'anno nella stessa direzione e con lo stesso verso);
- ◆ **periodici** (spirano con direzione costante ma senso alternato, appunto con una certa periodicità, la quale può essere giornaliera);
- ◆ **irregolari** (spirano in modo variabile a seconda delle disposizione che le zone di alta e bassa pressione vanno assumendo nel tempo e nello spazio).

Un effetto generato dall'interazione del vento col suolo è la formazione delle raffiche: le asperità del terreno ostacolano infatti il fluire del vento, per cui il suo moto, da uniforme che è al di sopra della quota di influenza del terreno, si trasforma via via in pulsante al diminuire dell'altezza. L'intensità massima delle pulsazioni in rapporto alla velocità di scorrimento uniforme prende il nome di raffica; essa è tanto più intensa quanto maggiore è la velocità del vento, e quanto più accidentato o cosparso di ostacoli è il profilo del terreno.

Per alcune zone particolari è possibile utilizzare la rappresentazione del vento a terra mediante il grafico di Fig. 3.

Tale diagramma anemometrico è diviso in sedici spicchi di $22^{\circ} 30'$ l'uno, e in circonferenze concentriche, i cui raggi rappresentano le intensità dei venti, corrispondenti ai valori di 24 km/h, 37 km/h, 50 km/h e 75 km/h. In questo caso i sedici spicchi risultano divisi in quarantotto settori; entro ciascuno di essi si può individuare la frequenza, in percentuale, dei venti che per un anno intero di osservazioni hanno spirato nella direzione del settore, con intensità compresa fra quelle delle circonferenze che lo delimitano.

Conosciuta la direzione preminente del vento e la sua intensità è possibile ricavare, per quei punti particolarmente pericolosi, la “probabilità” che si verifichi l'evento temuto.

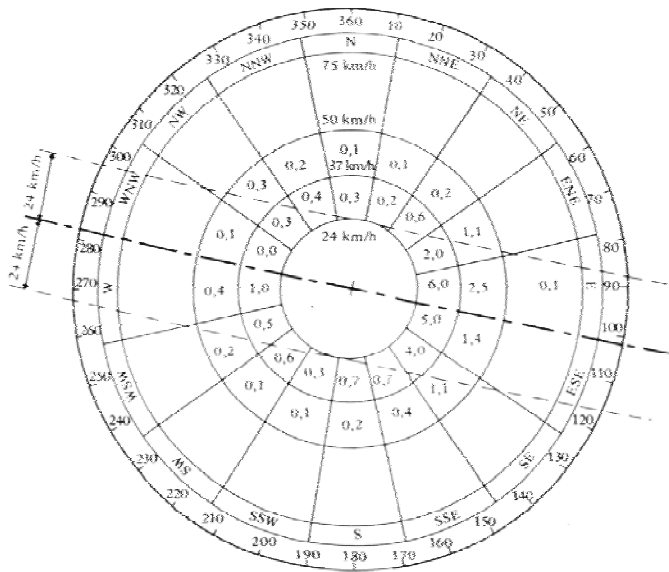


Fig. 3 - Esempio di diagramma anemometrico utilizzato per l'orientamento delle piste aeroportuali.

Supponiamo che un evento E possa presentarsi in h modi su un totale di n ugualmente possibili. La probabilità dell'avverarsi dell'evento (detto successo) è indicata con $P = P_R(E) = \frac{h}{n}$. La probabilità del non avverarsi dell'evento (detta insuccesso) è indicata con $Q = P_R(\text{non}E) = 1 - P_R(E)$. Nel caso della velocità del veicolo e della velocità del vento, abbiamo a che fare con eventi per cui il presentarsi dell'uno non influisce sulla probabilità di presentarsi dell'altro; siamo di fronte pertanto ad "eventi indipendenti".

Durante le fasi di guida l'azione del vento laterale costituisce un motivo di disturbo e di squilibrio a cui difficilmente l'utente è capace di reagire anche perché il veicolo non ha alcuna capacità di reazione, può solo offrire un'azione passiva.

E' compito dei progettisti di strade prevedere tutti quegli accorgimenti che possono portare ad un beneficio per l'attività di guida, soprattutto quando il fenomeno non è atteso come accade all'uscita delle gallerie, o all'uscita di un fitto bosco oppure quando la strada si trova a percorrere una vallata su cui facilmente può incunearsi il vento.

Per contrastare l'effetto del vento trasversale si sono adottati in tutti i punti critici delle soluzioni che vanno dalla presenza di “maniche a vento” (Fig. 4) fino alla installazione di barriere frangivento



Fig. 4 - Segnale di pericolo che presegna un tratto di strada soggetto a possibili forti raffiche di vento.

Spesso l'installazione delle barriere frangivento avviene più per sensibilità progettuale che per una scelta basata su conti analitici scaturenti dalla conoscenza del fenomeno.

Se indichiamo con P la probabilità che un determinato veicolo, appartenente ad una classe, si presenti con una certa velocità v , e con Q la probabilità che in un determinato punto del tracciato si abbia una raffica di vento con velocità w , la probabilità che si verifichino contemporaneamente i due eventi (tra loro indipendenti) è ancora uguale ad una variabile aleatoria discreta pari al prodotto delle singole probabilità.

4. Affidabilità del percorso.

Nella costruzione di una infrastruttura stradale, la quantizzazione dei benefici derivanti dalla realizzazione di un'opera migliorativa è legata alla possibilità che essi siano percepiti dagli utenti. La percezione dei benefici sulla strada garantisce la traslazione degli autoveicoli in tempi e costi minori, e maggiori comfort e sicurezza.

L'affidabilità di un tracciato stradale non è una proprietà intrinseca della strada, quale essa è progettata e realizzata, ma è funzione del comportamento non prevedibile degli utenti ed in particolare della velocità di transito.

Nota la funzione densità di probabilità della velocità del veicolo e quella del vento, la probabilità che i due valori si presentino contemporaneamente è data dal prodotto delle probabilità: $P(x_j, y_k) = f(x_j) \cdot g(y_k)$

Se consideriamo intervalli finiti, la probabilità congiunta che X sia compreso nell'intervallo (x_1, x_2) mentre Y sia compreso nell'intervallo (y_1, y_2) sarà data da:

$$P[x_1 < X \leq x_2, y_1 < Y \leq y_2] = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} p(x, y) dx dy$$

La rappresentazione grafica dei due eventi viene riportata in Fig. 5.

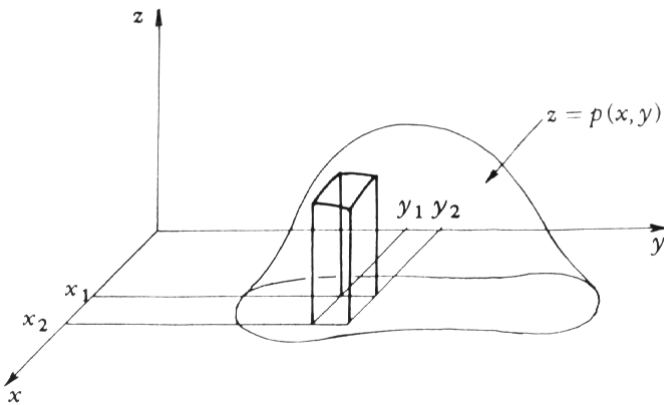


Fig. 5 - Rappresentazione grafica della funzione di probabilità.

Anche per la funzione rappresentata in figura vale l'assioma della probabilità:

$$\int_{-\infty_1}^{+\infty_2} \int_{y-\infty_1}^{+y_2} p(x, y) dx dy = 1$$

Analizzando la combinazione tra la velocità del veicolo e quello del vento, mediante modelli di causalizzazione parziali, viene determinata una serie di scenari possibili, fissando di volta in volta le condizioni atmosferiche e le velocità del veicolo, e attribuendo ad ogni scenario un valore di probabilità che esso si verifichi. Tutti i possibili scenari o eventi devono essere esaminati, e, per essi devono essere determinati i valori delle probabilità in modo che la sommatoria estesa a tutti gli eventi risulti uguale all'unità.

Da studi eseguiti nell'analisi del moto del veicolo soggetto a forze trasversali ⁽²⁾ risulta che è possibile individuare per ogni valore della velocità del vento, una velocità di avanzamento del veicolo al limite dello sbandamento (V_L) (Fig. 6, Fig. 7).

⁽²⁾ S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. *"Il fenomeno delle raffiche di vento trasversali: elaborazione di un modello di simulazione del moto di un veicolo soggetto a sollecitazioni laterali"* - Pubblicazione in fase di stampa sulla rivista "Strade & Autostrade" al momento della preparazione della presente memoria.

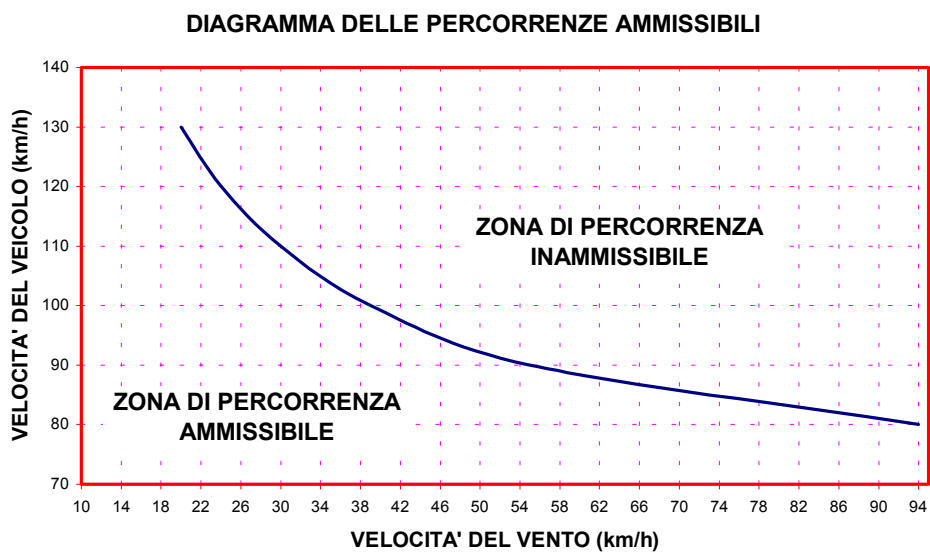


Fig. 6 - Diagramma delle percorrenze ammissibili in presenza di raffiche di vento trasversali.

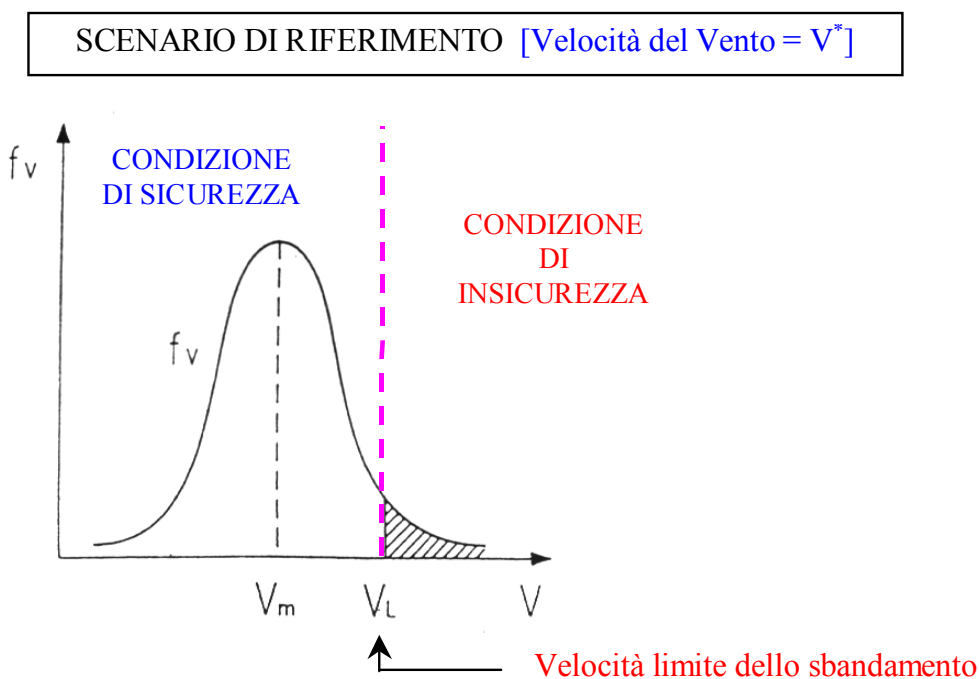


Fig. 7 - Individuazione qualitativa della velocità limite per uno scenario possibile ipotizzato.

Considerando lo scenario “S” e riferendo ad esso tutte le grandezze, si indica con “ P_{es} ” la probabilità che la velocità di transito del veicolo risulti maggiore di V_L , “ V_{LS} ” la velocità limite, “ f_{vs} ” la densità di distribuzione della velocità nella sezione considerata.

In virtù delle predette posizioni, risulta:

$$P_{es} = \int_{V_{LS}}^{+\infty} f_{vs}(x) dx$$

Con i dati relativi alle condizioni atmosferiche della zona si può determinare la probabilità di verifica dello scenario anemometrico; tale probabilità (assimilabile alla frequenza temporale dello scenario anemometrico ipotizzato) si indica con “P_s”.

La **probabilità di sbandamento** (o della condizione di insicurezza) risulta pari a:

$$P_{SBAND.} = \sum_S P_{es} \cdot P_s$$

con la sommatoria estesa all’insieme degli scenari possibili.

Il prodotto $P_{es} \cdot P_s$ è l’espressione della probabilità di accadimento contemporaneo di due eventi, in questo caso l’evento temuto e lo scenario di riferimento. La variabile P_{es} deve essere intesa come probabilità che si verifichi l’evento “e” ($V > V_L$), subordinata al verificarsi dello scenario “S”, e in tale ambito deve essere determinata.

Operando mediante l’analisi degli scenari, il problema viene ricondotto alla determinazione della velocità limite “ V_L ” di transito. Quando la probabilità di accadimento di un evento indesiderato risulta elevata è necessario prevedere una serie di accorgimenti mirati alla riduzione della velocità del veicolo (ad es. mediante apposita segnaletica) o mitigatori delle sollecitazioni indotte dalle raffiche di vento (ad es. attraverso l’introduzione di elementi costruttivi capaci di schermare l’azione del vento).

L’efficienza di una barriera frangivento viene misurata dal rapporto fra la spinta esercitata dal vento in condizione libera e la spinta filtrata dalle barriere. La spinta del vento filtrata dalle lame frangivento viene trasformata in una turbolenza uniforme.

Le forme degli alettoni sono tali da fornire la massima componente di resistenza ortogonale al flusso. L’angolo di incidenza degli alettoni è tale che l’aria venga “cacciata” verso l’alto (Fig. 8).

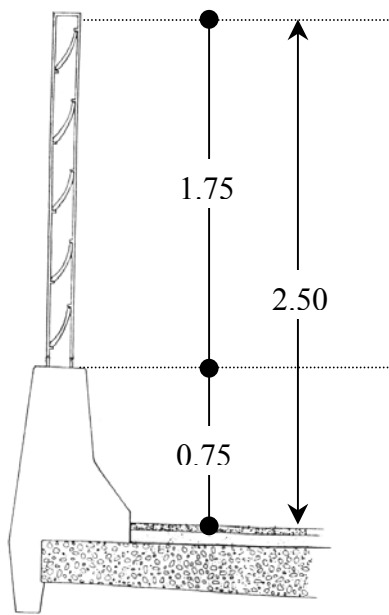


Fig. 8 - Esempio di barriera frangivento da viadotto.

5. Conclusioni.

Nel presente lavoro è stato messo in evidenza come una progettazione basata solo sull'utilizzo delle norme del CNR è a volte insufficiente al perseguimento delle condizioni ottimali di sicurezza. Lo studio delle prestazioni degli autoveicoli e delle forze che si scambiano durante il moto ha messo in risalto l'influenza a volte negativa delle raffiche di vento trasversali.

Studi svolti hanno messo in evidenza che la velocità di marcia dei veicoli può essere espressa mediante leggi probabilistiche, inoltre, mediante l'analisi degli scenari possibili è stata indicata una metodologia attraverso la quale verificare la probabilità della presenza di raffiche.

Mediante la determinazione probabilistica delle funzioni velocità del veicolo e del vento si può dare al progettista stradale la possibilità di ricavare, per alcuni "punti critici" del tracciato stradale, particolari informazioni circa la necessità di installare delle barriere frangivento o di prevedere altri interventi atti a mitigare l'azione trasversale delle raffiche ventose.

6. Bibliografia.

- 1) N. Ashford, P.H. Wright. *"Airport Engineering"* - Ed. Wiley - Interscience Publication, John Wiley & Sons - 1984.
- 2) F. Bella, M. R. De Blasiis. *"Lo studio dei deflussi per la sicurezza d'esercizio"* - Giornata di Studio sul tema: *La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali* - Roma 20/21 Febbraio 1997.
- 3) N. Bottura, G. Camomilla, E. Mancino. *"Barriere di calcestruzzo più frangivento: un sistema di sicurezza integrato per i ponti autostradali"* - Autostrade - 1980.
- 4) R. Buchheim, J. Marezke, R. Piatek. *"The control of aerodynamics vehicle dynamics"* - Society of Automotive Engineers - publication n. 850279 - 1985.
- 5) S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. *"Il fenomeno delle raffiche di vento trasversali: elaborazione di un modello di simulazione del moto di un veicolo soggetto a sollecitazioni laterali"* - Pubblicazione in fase di stampa sulla rivista "Strade & Autostrade" al momento della preparazione della presente memoria.
- 6) E. Cavuoti. *"Affidabilità del Percorso"* - Atti del Convegno S.I.I.V. - Perugia - 1993.
- 7) G. Ciccìa. *"Influenza del vento laterale sulla sicurezza stradale"* - Tecnica e ricostruzione - Catania - Anno XLVIII - N° 2 - maggio/dicembre 1993.
- 8) J.P. Davis. *"Cross wind stability of high performance road cars"* - Lotus Engineering Ltd. SAE - paper n. 870724 - 1987.
- 9) G. Dell'Aglio. *"Calcolo delle probabilità"* - Zanichelli - 1986.
- 10) H.J. Emmelmann. *"Fahrstabilität bei seitenwind"* - Aerodynamik d. Automobils - Vogel-Verlag - 1981.
- 11) P. Galeotti. *"Elementi di Probabilità e Statistica"* - Ed. Levrotto & Bella - 1984.
- 12) G. Genta G.; *"Meccanica dell'autoveicolo"* - Ed. Levrotto & Bella - 1993.
- 13) F. Giannini, F. La Camera, A. Marchionna; *"Appunti di Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti"* - MASSON Editoriale SEA - 1993.
- 14) G.I. Glushkov, V.F. Babkov, L.I. Goretsky, A.S. Smirnov. *"Airport Engineering"* - Ed. Mir Publishers Moscow - 1988.
- 15) H. Noguchi. *"An analysis of vehicle behaviour in a cross wind"* - Special Issue on vehicle Safety - Inderscience Enterprises Ltd. U.K. - 1986.
- 16) A. Orlandi; *"Meccanica dei trasporti"* - Pitagora Editrice Bologna - 1993.
- 17) QUATTRORUOTE - (annate 1984-1997) - Ed. Domus.
- 18) E. Zagatti, R. Zennaro, P. Pasqualetto, *"L'assetto dell'autoveicolo"* Ed. Levrotto & Bella - 1994.