

IL FENOMENO DELLE RAFFICHE DI VENTO TRASVERSALI: ELABORAZIONE DI UN MODELLO DI SIMULAZIONE DEL MOTO DI UN VEICOLO SOGGETTO A SOLLECITAZIONI LATERALI

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

1. Premessa.

Il moto di un veicolo comporta sempre l'assunzione di un certo grado di rischio.

Molti pericoli, giacché insiti nella natura stessa del sistema di locomozione, non possono essere totalmente eliminabili. E' pertanto compito di quanti si occupano dei problemi "trasportistici", cercare di individuare gli elementi ad alta pericolosità al fine di proporre metodologie adeguate a minimizzarne gli effetti negativi. Tenendo conto della correlazione diretta tra le cause di incidentalità stradale e le condizioni atmosferiche ed ambientali, si vuole, nella presente memoria, rivolgere la nostra attenzione alle conseguenze indotte nell'attività del moto dall'azione delle forze trasversali dovute al vento.

2. Analisi del moto dei veicoli.

Un veicolo stradale che si muove immerso in un mezzo fluido (aria) con velocità V rispetto al terreno (ipotizzando altresì l'aria ferma rispetto al suolo), dà luogo ad una resistenza R_a che può ritenersi funzione:

- della forma e delle dimensioni del veicolo;
- della densità ρ e della viscosità μ del mezzo fluido;
- della velocità V di avanzamento.

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 viscose 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, le cui componenti rispetto alla terna Oxyz valgono:

| FORZE |
|---|
| $X_a = \int_S \bar{t}_T \cdot \bar{i} \cdot ds + \int_S \bar{t}_N \cdot \bar{i} \cdot ds$ |
| $Y_a = \int_S \bar{t}_T \cdot \bar{j} \cdot ds + \int_S \bar{t}_N \cdot \bar{j} \cdot ds$ |
| $Z_a = \int_S \bar{t}_T \cdot \bar{k} \cdot ds + \int_S \bar{t}_N \cdot \bar{k} \cdot ds$ |

| MOMENTI |
|--|
| $L_a = -\int_S z \cdot \bar{t}_T \cdot \bar{j} \cdot ds + \int_S y \cdot \bar{t}_T \cdot \bar{k} \cdot ds - \int_S z \cdot \bar{t}_N \cdot \bar{j} \cdot ds + \int_S y \cdot \bar{t}_N \cdot \bar{k} \cdot ds$ |
| $M_a = -\int_S x \cdot \bar{t}_T \cdot \bar{k} \cdot ds + \int_S z \cdot \bar{t}_T \cdot \bar{i} \cdot ds - \int_S x \cdot \bar{t}_N \cdot \bar{j} \cdot ds + \int_S z \cdot \bar{t}_N \cdot \bar{k} \cdot ds$ |
| $N_a = -\int_S y \cdot \bar{t}_T \cdot \bar{i} \cdot ds + \int_S x \cdot \bar{t}_T \cdot \bar{j} \cdot ds - \int_S y \cdot \bar{t}_N \cdot \bar{i} \cdot ds + \int_S x \cdot \bar{t}_N \cdot \bar{j} \cdot ds$ |

Per esprimere la generica forza F ed il generico momento aerodinamico M in modo semplice, si ricorre alle seguenti espressioni:

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

si suppone cioè che essi siano proporzionali alla pressione dinamica della corrente indisturbata $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a$, 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.

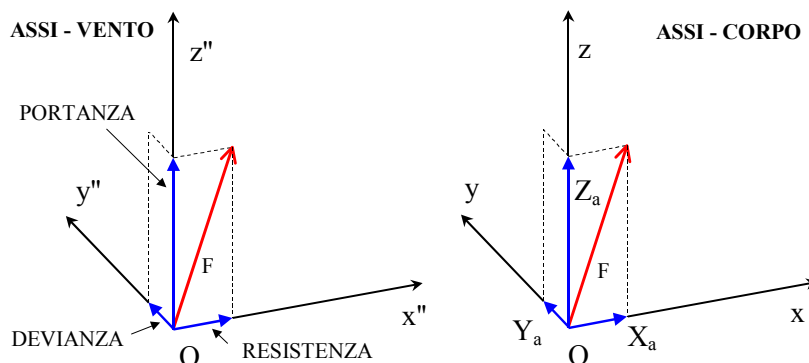


Fig. 1 - Scomposizione della forza aerodinamica F secondo gli assi vento e secondo gli assi corpo.

Nel nostro studio analizzeremo le sollecitazioni che derivano dall'azione del vento durante la marcia del veicolo e come esse devono essere limitate in modo da rendere più sicura la marcia, soprattutto in quelle zone in cui l'incunarsi del vento può provocare la perdita di stabilità del veicolo. La forza trasversale Y ed i momenti di rollio L e di imbardata N sono nulli se il veicolo ammette un piano di simmetria e se la velocità relativa (vento-veicolo) è contenuta in questo piano, mentre risultano non nulli quando si ha l'azione di una forza di disturbo laterale (ad es. raffiche di vento).

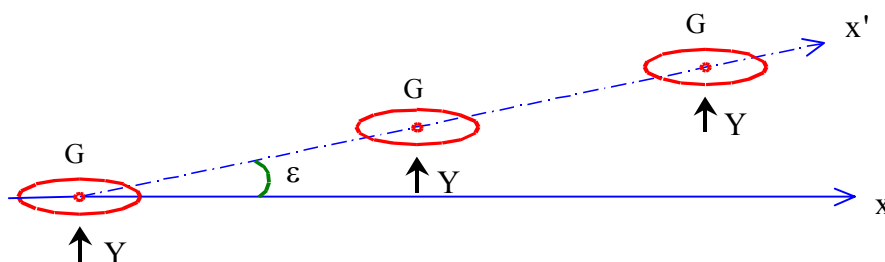


Fig. 2 - Deriva (ϵ) di un generico veicolo soggetto ad una forza trasversale Y .

Un veicolo in moto secondo una direzione x , determinata dall'assetto neutro dei dispositivi di guida (ruote sterzanti, timone) ed in assenza di forze laterali, segue un percorso che coincide necessariamente, con l'asse x stesso. In presenza di una forza trasversale Y (in genere prodotta o dalla spinta del vento o dalla forza centrifuga che si genera in curva), il veicolo segue un percorso (Fig. 2) che non coincide più con l'asse x , ma è inclinato rispetto a questo di un certo angolo ϵ , detto di *deriva*, dipendente dalla

composizione dei due movimenti elementari: l'uno secondo l'asse x determinato dalla forza motrice e l'altro secondo l'asse y determinato dalla forza laterale Y.

L'esempio di Fig. 2 evidenzia dunque un generico veicolo in moto rettilineo che, sottoposto a forza trasversale, è interessato da un moto risultante secondo la direzione x'; è importante osservare che tale moto si accompagna, in genere, a rotazioni dell'assetto piano del veicolo rispetto all'asse x di traslazione primitiva a causa della presenza di un momento M_z che si realizza se le risultanti dei due sistemi di forze, attive e di reazione (propulsiva secondo l'asse x e di deriva secondo l'asse y) non sono perfettamente equilibrate (uguali, contrarie e con la stessa retta d'azione). Il caso considerato in Fig. 2, che può essere definito neutro in quanto il veicolo non modifica il proprio assetto planimetrico, si potrebbe riferire ad un moto rettilineo in presenza di forza trasversale di tipo esterno (es. azione del vento).

Negli studi sul veicolo sottoposto ad azioni trasversali è interessante conoscere i valori che tali forze assumono in funzione di alcuni parametri, quali l'angolo di deriva β_a e l'angolo di sterzo δ . Per piccole variazioni di tali angoli intorno allo zero, valori che normalmente si riscontrano nelle normali condizioni di guida, i coefficienti che sovrintendono a tali forze sono lineari, ossia C_Y, C_L, C_N sono lineari al variare di β_a e δ , e le derivate $(C_Y)_{\beta_a}, (C_Y)_{\delta}, (C_L)_{\beta_a}, (C_L)_{\delta}, (C_N)_{\beta_a}, (C_N)_{\delta}$ sono spesso costanti.

3. Schematizzazione analitica del veicolo soggetto a raffiche di vento laterali.

Per lo studio del veicolo soggetto all'azione di raffiche di vento trasversali si è fatto riferimento ad un "modello" che consente l'analisi del moto non a regime ed a velocità costante del veicolo considerato come corpo rigido. Si tratta del modello di simulazione che, con opportune manipolazioni, è stato già utilizzato per l'analisi critica della manovra di immissione nelle corsie di decelerazione⁽¹⁾.

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).

⁽¹⁾ S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. "Inadeguatezza delle corsie di decelerazione proposte dalla Normativa CNR" - Giornata di Studio sul tema: *La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali* - Roma 20/21 Febbraio 1997.

Si considerino due sistemi di riferimento (Fig. 3):

- ◆ uno inerziale fisso $Ox'y'$, avente gli assi giacenti sul piano stradale;
- ◆ uno mobile Gxy , fisso al veicolo e con origine nel baricentro del veicolo medesimo.

Mediante l'adozione dei due sistemi di riferimento suddetti, è possibile descrivere la traiettoria (rispetto al sistema fisso $Ox'y'$) del baricentro (G) del veicolo assoggettato ad un angolo di imbardata ψ ed ad un angolo di deriva β .

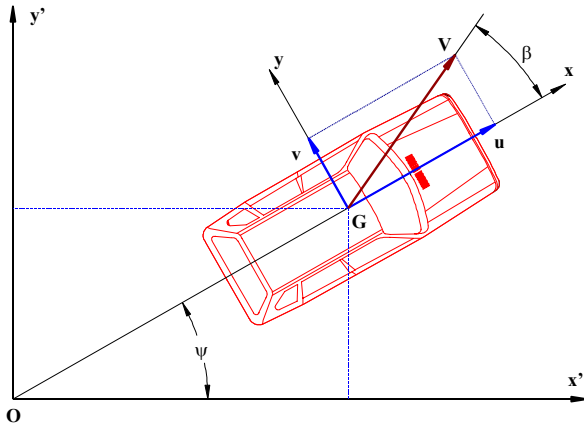


Fig. 3 - Sistemi di riferimento per l'analisi del moto non a regime ed a velocità costante del veicolo.

Le equazioni che caratterizzano il moto del veicolo sono:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad [1]; \quad \vec{M} = \frac{d\vec{H}}{dt} \quad [2]$$

dove \vec{F} ed \vec{M} sono le risultanti delle forze e dei momenti applicati al corpo dall'esterno ed \vec{L} e \vec{H} rappresentano la quantità di moto ed il momento della quantità di moto del corpo, descrivibili dalle seguenti relazioni:

$$\vec{L} = m \cdot \vec{V} \quad [3]; \quad \vec{H} = J_z \cdot \dot{\psi} \quad [4], \text{ essendo:}$$

m = massa del veicolo.

\vec{V} = vettore velocità.

J_z = momento d'inerzia rispetto all'asse baricentrico ed ortogonale al piano del moto.

$\dot{\psi}$ = accelerazione angolare.

Sviluppando le equazioni del moto rispetto al sistema inerziale $Ox'y'$ si ottiene il sistema di forze che regola il moto:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x}' = F_x' \\ m \cdot \ddot{y}' = F_y' \\ J_z \cdot \ddot{\psi} = M_z \end{cases} \quad [5]$$

Nel caso invece del sistema di riferimento solidale al “corpo”, occorre analizzare cosa accade, dopo un intervallo di tempo Δt , nel passaggio da un punto all’altro lungo una traiettoria curvilinea.

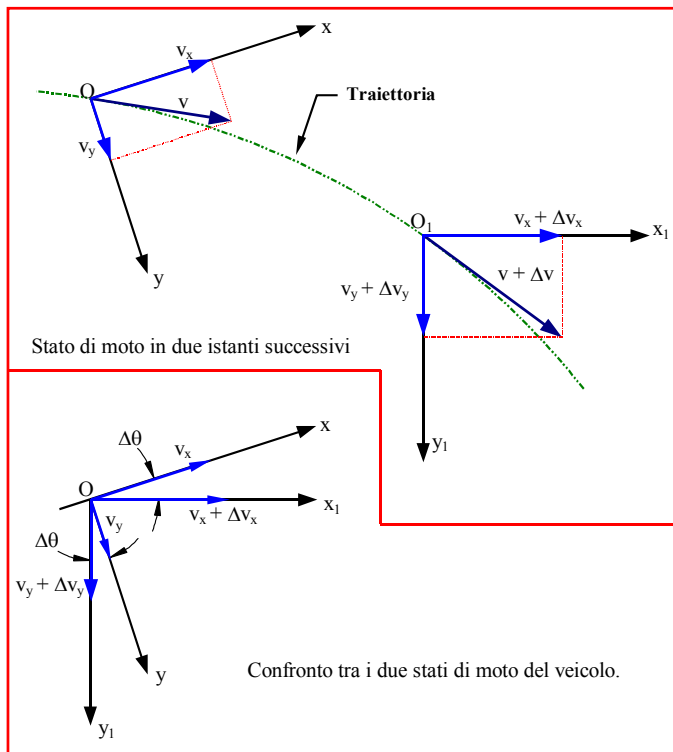


Fig. 4 - Schematizzazione del moto del baricentro di un veicolo lungo una traiettoria curvilinea.

Con riferimento alla figura 4, indichiamo con v_x e v_y le componenti della velocità v all’istante t secondo i due assi x, y fissi al veicolo, con origine nel baricentro $G \equiv O$.

Dopo un certo intervallo di tempo Δt , il veicolo si troverà ad occupare una nuova posizione O_1 caratterizzata da una rotazione $\Delta\theta$ degli assi x e y .

E’ evidente che nell’intervallo di tempo considerato, il veicolo subirà le variazioni di velocità δv_x e δv_y nel passare dal punto O ad O_1 .

Le equazioni del moto rispetto al sistema di riferimento solidale al veicolo possono essere scritte come:

$$\begin{cases} \sum X = m \cdot (\dot{V} - r \cdot v) = m \cdot (\dot{V} - r \cdot V \cdot \beta) \\ \sum Y = m \cdot (v + r \cdot V) = m \cdot V \cdot (\beta + r) + m \cdot \beta \cdot V \\ \sum N = J_z \cdot \dot{r} \end{cases} \quad [6]$$

Per lo studio della traiettoria assunta dal veicolo per effetto dell'azione trasversale dovuta al vento facciamo adesso riferimento al veicolo a due ruote riportato in Fig. 5.

L'adozione di questo tipo di schematizzazione può esprimere, seppur con elevata semplificazione, un primo approccio di studio di un veicolo a due assi e quattro ruote che, all'istante t , viene investito da una raffica di vento laterale mentre sta muovendosi di moto rettilineo uniforme in assenza di altre forze esterne (e quindi con angolo di sterzata $\delta = 0$).

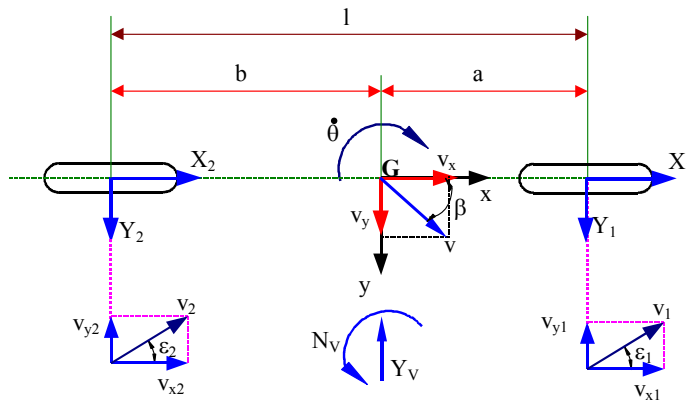


Fig. 5 - Schematizzazione semplificata del moto rettilineo uniforme di un veicolo.

Osserviamo che nello schema di figura 5, sono evidenziati *gli angoli di deriva* ϵ_1 ed ϵ_2 , i quali rappresentano gli scostamenti angolari subiti dai pneumatici nel momento in cui vengono sottoposti ad una forza ortogonale al proprio piano di rotolamento.

Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, le equazioni che definiscono la stabilità di marcia di un veicolo possono essere esplicitate in forma compatta:

$$\sum Y = Y_\beta \cdot \beta + Y_r \cdot r + Y_v \quad [7]; \quad \sum N = N_\beta \cdot \beta + N_r \cdot r + N_v \quad [8], \text{ essendo:}$$

$$\begin{cases} Y_\beta = -C_1 - C_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (C_Y)_\beta \\ Y_r = \frac{1}{V} \cdot (-a \cdot C_1 + b \cdot C_2) \end{cases} \quad [9]$$

$$\begin{cases} N_\beta = -a \cdot C_1 + b \cdot C_2 + N_{\alpha_1} + N_{\alpha_2} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot l \cdot (C_N)_\beta + H_G \cdot (C_1 + C_2) \cdot (f_0 + K \cdot V^2) \\ N_r = \frac{1}{V} \cdot [-a^2 \cdot C_1 - b^2 \cdot C_2 + a \cdot N_{\alpha_1} - b \cdot N_{\alpha_2} + H_G \cdot (a \cdot C_1 - b \cdot C_2) \cdot (f_0 + K \cdot V^2)] \end{cases} \quad [10]$$

Le espressioni costituenti i sistemi [9] e [10] rappresentano le cosiddette “derivate di stabilità”; tali valori risultano costanti nel caso in cui vengono trascurati gli effetti delle forze aerodinamiche e del momento imbarcante dovuto al trasferimento di carico. Nelle espressioni delle derivate di stabilità, oltre le quantità ben note viste in precedenza, sono stati introdotti i valori caratteristici dell’autoveicolo e del sistema, ossia:

ρ = densità dell’aria;

S = superficie maestra del veicolo;

a = distanza del baricentro del veicolo dall’asse anteriore;

b = distanza del baricentro del veicolo dall’asse posteriore;

l = distanza tra gli assi del veicolo;

H_G = altezza del baricentro;

$(C_Y)_\beta$ e $(C_N)_\beta$ = caratteristiche aerodinamiche del veicolo;

f_0 = coefficiente di rotolamento;

K = coefficiente di resistenza all’avanzamento.

Combinando il sistema [6] con le equazioni [7] e [8], si ottiene:

$$\begin{cases} \sum Y = m \cdot V \cdot (\dot{\beta} + r) + m \cdot \dot{V} \cdot \beta = Y_\beta \cdot \beta + Y_r \cdot r + Y_v \\ \sum N = J_z \cdot \dot{r} = N_\beta \cdot \beta + N_r \cdot r + N_v \end{cases} \quad [9]$$

Per lo studio del moto non a regime ed a velocità costante è possibile trascurare il termine $\dot{V} = 0$, ottenendo un sistema di equazioni il quale, in forma sintetica, risulta siffatto:

$$\begin{cases} P \cdot \ddot{\beta} + Q \cdot \dot{\beta} + U \cdot \beta = -N_r \cdot Y_v - (m \cdot V - Y_r) \cdot N_v + J_z \cdot \dot{Y}_v \\ P \cdot \ddot{r} + Q \cdot \dot{r} + U \cdot r = N_\beta \cdot Y_v - Y_\beta \cdot N_v + m \cdot V \cdot \dot{N}_v \end{cases} \quad [10]$$

$$\text{Dove: } \begin{cases} P = J_z \cdot m \cdot V \\ Q = -J_z \cdot Y_\beta - m \cdot V \cdot N_r \\ U = N_\beta \cdot (m \cdot V - Y_r) + N_r \cdot Y_\beta \end{cases} \quad [11]$$

Nel caso di vento laterale, spirante cioè perpendicolarmente alla direzione di marcia, detta V_v la velocità del vento, si ha:

$$\psi_v = \arctg \frac{V_v}{V} \quad [12]$$

In virtù della [12] è pertanto possibile esprimere la forza ed il momento dovuti al vento, all'istante $t = 0$, nel seguente modo:

$$\begin{cases} Y_{0v} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (C_Y)_\beta \cdot \arctg \left(\frac{V_v}{V} \right) \\ N_{0v} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot l \cdot (C_N)_\beta \cdot \arctg \left(\frac{V_v}{V} \right) \end{cases} \quad [13]$$

E' opportuno rilevare che le [13] sono valide in prima approssimazione, solo fino a quando la traiettoria non risulti tanto deviata rispetto alla direzione originale da rendere inaccettabile l'aver considerato costante l'angolo ψ_v .

Supponiamo adesso che la forza Y_v ed il momento N_v presentino una variazione del tipo "a gradino", ossia:

$$Y_v = Y_{0v} \cdot u(t) \quad [14]; \quad N_v = N_{0v} \cdot u(t) \quad [15]$$

$$\text{dove: } \begin{cases} u(t) = 0 & \text{per } t < 0 \\ u(t) = 1 & \text{per } t \geq 0 \end{cases}$$

Tale andamento è in realtà soltanto un'astrazione, in quanto le forze aerodinamiche non possono avere un andamento a gradino, richiedendo un tempo finito per raggiungere il loro valore di regime, ma approssima alcune situazioni di notevole interesse pratico. Sono infatti assimilabili a raffiche a gradino le condizioni che si hanno quando un veicolo viene investito dal vento laterale all'uscita da una galleria o da un fitto bosco o da una zona in cui esso si trova in ombra aerodinamica a causa di un altro veicolo (ad esempio, al termine del sorpasso di un veicolo industriale).

L'obiettivo che ci si prefigge a questo punto, è quello di valutare l'effettiva traiettoria descritta dal veicolo per effetto della sollecitazione trasversale; a tal fine, si ipotizza che all'istante $t=0$ il sistema inerziale ed il "sistema-corpo" (Fig. 3) siano coincidenti.

La rotazione complessiva del veicolo, dopo un certo intervallo di tempo, si può calcolare attraverso l'integrazione della velocità d'imbardata r :

$$\psi(t) = \int_0^t r(u) du \quad [16]$$

Le leggi descrittive la traiettoria del veicolo rispetto al sistema di riferimento inerziale possono essere così espresse:

$$\begin{cases} x'(t) = V \cdot \int_0^t [\cos \psi - \beta \cdot \sin \psi] du \\ y'(t) = V \cdot \int_0^t [\sin \psi + \beta \cdot \cos \psi] du \end{cases} \quad [17]$$

E' importante, a questo punto, osservare che, in virtù della schematizzazione del veicolo come corpo rigido, risulta fondamentale la conoscenza dell'*instabilità direzionale* del veicolo, definibile come l'attitudine di un veicolo ad assumere nuovamente l'assetto corretto dopo che una causa esterna lo ha allontanato dalla posizione di equilibrio iniziale. In pratica possono presentarsi tre particolari situazioni:

- il veicolo riprende subito l'assetto corretto mediante un "comportamento ideale";
- il veicolo raggiunge la condizione di stabilità con moto aperiodico smorzato o dopo alcune oscillazioni attorno allo stato di equilibrio;
- il veicolo si allontana definitivamente dalla configurazione di equilibrio.

Nel caso degli autoveicoli, lo studio del fenomeno dell'instabilità assume un rilievo particolare a causa degli accoppiamenti di forza tra pneumatico e pavimentazione attraverso il meccanismo dell'aderenza. Tale meccanismo non si esplica in un contatto diretto come quello che può verificarsi, ad esempio, tra gli ingranaggi, ma si concretizza in una situazione in cui coesistono contatti e strisciamenti condizionati, longitudinalmente, dagli slittamenti e, trasversalmente, dall'angolo di deriva.

Nell'ipotesi di un veicolo che percorre una traiettoria rettilinea a velocità costante ed a moto vario, e da essa viene deviato per effetto di una raffica di vento trasversale, è necessario valutare il seguente rapporto:

$$\zeta = \frac{\text{Smorzamento}}{\text{Smorzamento critico}} = \frac{Q}{Q_{\text{crit}}} = \frac{Q}{2 \cdot \sqrt{P \cdot U}} \quad [18]$$

Il sistema ha un comportamento non oscillatorio se $\zeta \geq 1$, in caso contrario ($\zeta < 1$) il comportamento è oscillatorio e, pertanto, diviene necessario conoscere le frequenze proprie di oscillazione.

4. Applicazione numerica del modello proposto.

La formulazione del “modello” di simulazione esposta al paragrafo precedente, opportunamente trasposta sottoforma di software, rappresenta lo strumento preposto per la valutazione delle deviazioni laterali che i veicoli subiscono per effetto delle raffiche di vento trasversali. L’analisi è stata condotta per un autoveicolo tipo, la FIAT Uno, che può essere considerato il modello rappresentativo del parco veicolare italiano.

Per evitare di mettere in conto i fattori aleatori legati al comportamento del guidatore, si è fatto riferimento alla “risposta passiva” dell’autoveicolo (mantenuto, cioè, a sterzo fisso), nella consapevolezza che la seppur tempestiva correzione del conducente, si esplica dopo un certo ritardo τ_0 tra l’istante in cui si rende conto che occorre effettuare la correzione e quello in cui aziona lo sterzo.

Il ritardo τ_0 del sistema di controllo viene generalmente considerato come la somma di un ritardo di elaborazione (tempo necessario per elaborare i segnali provenienti dal veicolo e decidere la correzione), un ritardo neuromuscolare (tempo necessario per passare dalla decisione all’inizio dell’esecuzione del comando) ed un ritardo di attuazione (tempo necessario per impartire la correzione dovuta). Generalmente, nella letteratura, il ritardo τ_0 viene considerato costante e variabile nell’intervallo compreso tra 0.08 s e 0.7 s. Nella nostra trattazione faremo riferimento ad un ritardo medio pari a $\tau_0 = 0.5$ s.

E’ importante, a questo punto, definire il limite al di sopra del quale lo spostamento laterale del veicolo debba considerarsi oltremodo pericoloso. Si può affermare che, dal punto di vista della sicurezza, una deviazione trasversale deve considerarsi eccessiva quando determina nel veicolo uno spostamento che lo avvicina troppo al margine della corsia di marcia. In particolare, facendo riferimento ad una corsia di larghezza pari a 3.75 m, il margine è di circa metro per evitare l’invasione dell’altra corsia o l’urto contro il guardrail di protezione. D’altra parte, si può ipotizzare che l’autoveicolo devii dalla direzione desiderata, in totale di una quantità pari al doppio di quella ricavata col software di simulazione, in quanto, come dimostrano numerosi risultati sperimentali, è impensabile che la reazione del guidatore, subito dopo i primi 0.5 secondi, sia sufficiente a “reindirizzare” il veicolo verso la corretta traiettoria.

Per tener conto delle ipotesi appena formulate, si è ritenuto lecito, anche al fine di mantenere adeguatamente basso il livello di pericolo, far riferimento ad un valore massimo

della deviazione laterale pari a 60 cm (teorizzando che per scostamenti laterali intorno al metro la probabilità di incidente sia quella massima).

Per comprendere il meccanismo di funzionamento del software elaborato, supponiamo, inizialmente, che il veicolo tipo si trovi a viaggiare alla velocità di 120 km/h e venga improvvisamente assoggettato ad una raffica di vento trasversale di velocità $V_v = 30$ km/h.

I dati forniti come input al nostro software sono evidenziati in figura 6.

Una volta forniti i dati di input, il software provvede alla valutazione delle derivate di stabilità (Y_β , Y_r , N_β , N_r) (Fig. 7) e delle altre variabili di sistema (P, Q, U) (Fig. 8); con questi dati a disposizione, il “programma” è in grado di definire il comportamento del veicolo dal punto di vista delle modalità di oscillazione: in questo caso, essendo $\zeta < 1$ ($\zeta = 0.69$) si ha a che fare con un sistema di tipo oscillatorio.

| DATI DI INPUT | | | |
|--|---------------------------|----------|--------------------------------|
| VEICOLO | | | |
| Velocità in rettilineo (km/h) | V | 33.33333 | 120 |
| Peso del veicolo (kg) | m | 900 | |
| Momento d'inerzia (kg*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) | t ₁ | 1.321 | t ₂ 1.34 |
| Altezza del baricentro (m) | H _G | 0.75 | |
| PNEUMATICI | | | |
| Rigidezza di deriva (N/rad) | C1 | 31000 | C2 31000 |
| Momenti di autoallineamento (Nm/rad) | N α 1 | 600 | N α 2 600 |
| Forza trasversale massima (N) | Y _{max} | 3000 | |
| Coefficiente di rotolamento | f ₀ | 0.013 | |
| Coefficiente di resistenza all'avanzamento (s ² /m ²) | K | 6.5E-06 | |
| CARATTERISTICHE AERODINAMICHE (1/rad) | | | |
| Densità dell'aria (kg/m ³) | (C _y) β | -2.2 | (C _N) β -0.3 |
| | p | 1 | |

Fig. 6 - Schermata relativa ai dati di input.

| DERIVATE DI STABILITA' | | | |
|-------------------------------------|----------------------|-------------|--|
| V = 120 km/h | | | |
| $Y_\beta = -62000 - 2.0130 * V^2$ | $Y_\beta = -64236.7$ | [N/rad] | |
| $Y_r = 4727.5 / V$ | $Y_r = 141.825$ | [N*s/rad] | |
| $N_\beta = 6532 - 0.3460 * V^2$ | $N_\beta = 6147.576$ | [N*m/rad] | |
| $N_r = (-86937 - 0.0230 * V^2) / V$ | $N_r = -2608.87$ | [N*m*s/rad] | |

Fig. 7 - Visualizzazione delle derivate di stabilità.

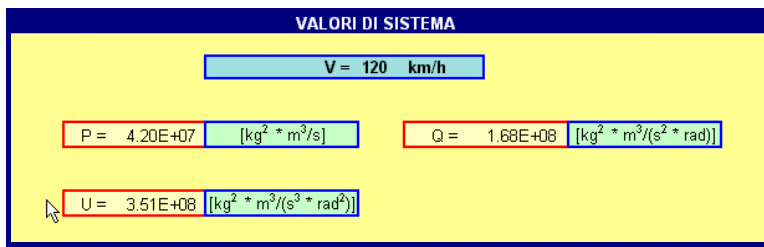


Fig. 8 - Schermata indicativa delle “variabili di sistema”.

Dal sistema di equazioni [17] è facile ricavare il grafico della traiettoria assunta dal veicolo per effetto della sollecitazione trasversale dovuta al vento (Fig. 9). Da tale diagramma si evince che, in corrispondenza dell’ascissa $x = 16.66 \text{ m}$ (tale è infatti la distanza percorsa dal veicolo dopo 0.5 s , alla velocità di 120 km/h), si ha uno spostamento laterale pari a circa 38 cm , intollerabile in virtù delle ipotesi fatte.

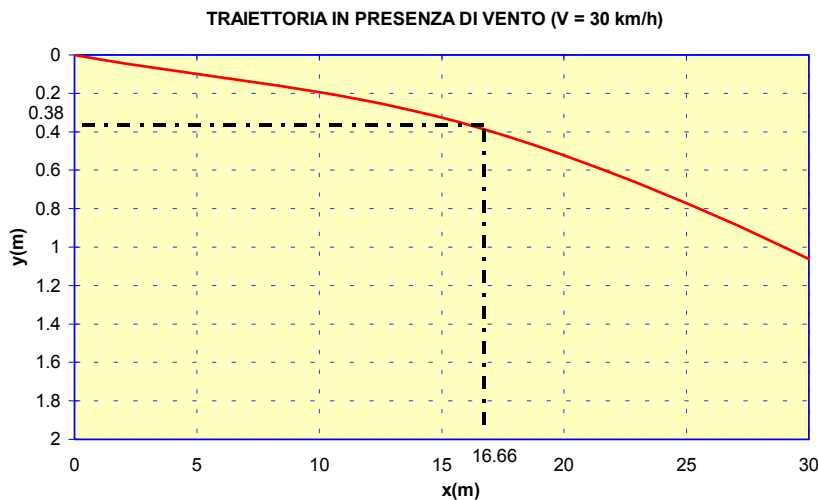


Fig. 9 - Diagramma della traiettoria assunta dal veicolo in presenza di vento ($V_v = 30 \text{ km/h}$).

Ripetendo iterativamente la procedura fin qui esposta si ricava che la velocità del vento compatibile con quella della vettura è pari a $V_v = 24 \text{ km/h}$; infatti, come si evince dal grafico di Fig. 10, in corrispondenza di $V_v = 24 \text{ km/h}$ si ottiene uno spostamento laterale pari proprio a 30 cm .

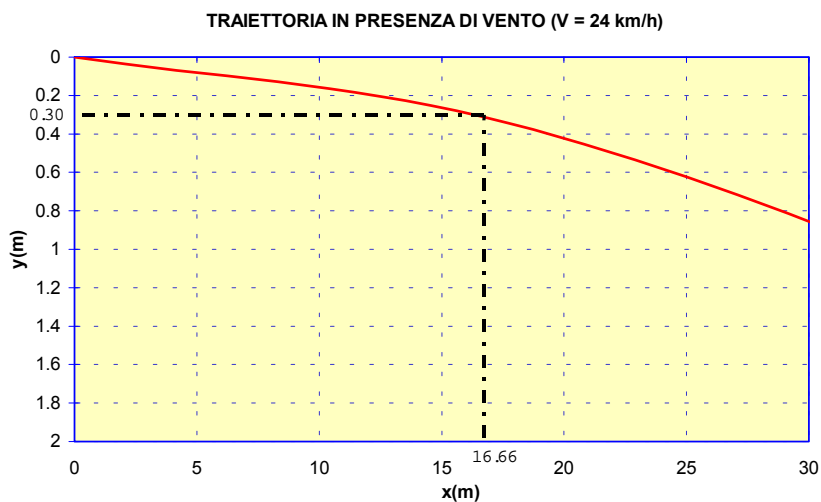


Fig. 10 - Diagramma della traiettoria assunta dal veicolo in presenza di vento ($V_v = 24$ km/h).

Seguendo un procedimento del tutto analogo possiamo ricavare, per ogni velocità assumibile dal veicolo, il corrispondente valore della velocità del vento compatibile con lo spostamento laterale complessivo di 60 cm. Si ottiene così (Fig. 11) il **grafico delle percorrenze ammissibili**, in cui, la curva rappresentata, funge da demarcazione tra la zona di percorrenza ammissibile e quella di percorrenza inammissibile.

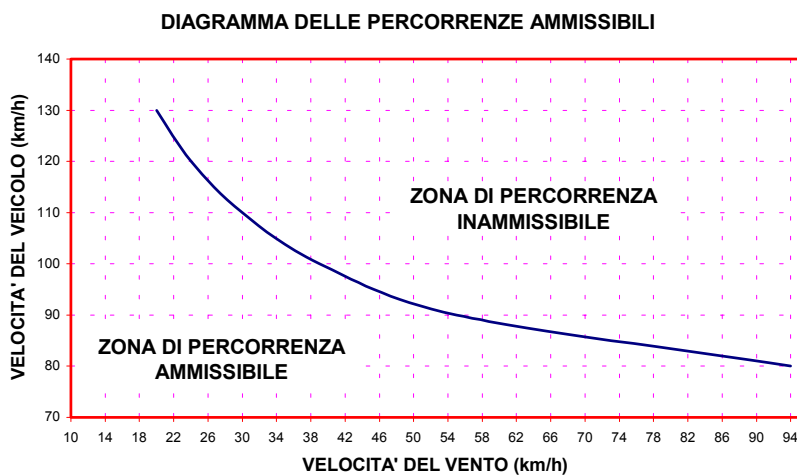


Fig. 11 - Diagramma delle percorrenze ammissibili in presenza di raffiche di vento trasversali.

5. Conclusioni.

L'analisi della dinamica del moto di un veicolo è da molti considerato l'elemento di partenza per lo studio delle problematiche inerenti alla sicurezza di marcia lungo i tracciati stradali. L'azione delle forze trasversali dovuta alla presenza di "elementi di disturbo", quali le raffiche di vento, è stata, finora, studiata poco approfonditamente, come si evince dalla totale mancanza di indicazioni a riguardo, nelle Norme del CNR.

Lo studio proposto evidenzia invece, in maniera inequivocabile, che l'azione del vento trasversale su un veicolo in moto costituisce un evento di alta pericolosità, soprattutto se essa viene analizzata al variare della velocità di percorrenza. La combinazione fra la velocità del vento spirante in direzione trasversale e quella del veicolo, consente di individuare due insiemi di valori caratterizzati da un dominio di sicurezza ed uno di insicurezza.

Sarà oggetto di uno studio futuro l'approfondimento delle questioni relative alla dinamica dei veicoli assoggettati a forze agenti trasversalmente al fine di poter definire metodologie progettuali sempre più indirizzate al perseguimento dell'"obiettivo-sicurezza".

8. Bibliografia.

- 1) N. Ashford, P.H. Wright. *"Airport Engineering"* - Ed. Wiley - Interscience Publication, John Wiley & Sons - 1984.
- 2) R. Buchheim, J. Marezke, R. Piatek. *"The control of aerodynamics vehicle dynamics"* - Society of Automotive Engineers - publication n. 850279 - 1985.
- 3) S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi. *"Inadeguatezza delle corsie di decelerazione proposte dalla Normativa CNR"* - Giornata di Studio sul tema: *La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali* - Roma 20/21 Febbraio 1997.
- 4) G. Ciccìa. *"Influenza del vento laterale sulla sicurezza stradale"* - Tecnica e ricostruzione - Catania - Anno XLVIII - N° 2 - maggio/dicembre 1993.
- 5) J.P. Davis. *"Cross wind stability of high performance road cars"* - Lotus Engineering Ltd. SAE - paper n. 870724 - 1987.
- 6) H.J. Emmelmann. *"Fahrstabilitat bei seitenwind"* - Aerodynamik d. Automobils - Vogel-Verlag - 1981.
- 7) G. Genta G.; *"Meccanica dell'autoveicolo"* - Ed. Levrotto & Bella - 1993.
- 8) F. Giannini, F. La Camera, A. Marchionna; *"Appunti di Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti"* - MASSON Editoriale SEA - 1993.
- 9) G.I. Glushkov, V.F. Babkov, L.I. Goretsky, A.S. Smirnov. *"Airport Engineering"* - Ed. Mir Publishers Moscow - 1988.
- 10) H. Noguchi. *"An analysis of vehicle behaviour in a cross wind"* - Special Issue on vehicle Safety - Interscience Enterprises Ltd. U.K. - 1986.
- 11) QUATTORUOTE - (annate 1984-1997) - Ed. Domus.
- 12) E. Zagatti, R. Zennaro, P. Pasqualetto, *"L'assetto dell'autoveicolo"* Ed. Levrotto & Bella - 1994.