



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

SASCIA CANALE

SALVATORE LEONARDI

FRANCESCO NICOSIA

**ANALISI CRITICA DEL FENOMENO
DELL'ADERENZA IN CAMPO
STRADALE E FERROVIARIO**

Quaderno n. 88

ISTITUTO STRADE FERROVIE AEROPORTI

VIALE A. DORIA, 6 - 95100 CATANIA

SETTEMBRE 1996

ANALISI CRITICA DEL FENOMENO DELL'ADERENZA IN CAMPO STRADALE E FERROVIARIO

di: **Sascia Canale** (1)
Salvatore Leonardi (2)
Francesco Nicosia (3)

- (1) Professore associato di “Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti” presso l’Istituto di Strade Ferrovie ed Aeroporti dell’Università di Catania.
- (2) Ingegnere collaboratore all’attività di ricerca e culture della materia presso l’Istituto di Strade Ferrovie ed Aeroporti dell’Università di Catania.
- (3) Ingegnere contrattista e culture della materia presso l’Istituto di Strade Ferrovie ed Aeroporti dell’Università di Catania.

Istituto di Strade Ferrovie ed Aeroporti
dell’Università degli Studi di Catania

Direttore della Ricerca: Prof. Ing. Sascia Canale

Indice

1. Premesse.....	1
2. Cenni sulla teoria dell'aderenza.....	2
3. Il meccanismo di aderenza lungo la direzione longitudinale.....	5
4. Pavimentazione stradale e pneumatici: fattori determinanti per le modalità di aderenza.....	12
5. I manti drenanti.....	33
6. Studio dell'aderenza trasversale.....	36
7. Forze scambiate in senso trasversale: effetti della deriva dei pneumatici sulla marcia curvilinea degli autoveicoli.....	37
8. Metodi ed apparecchi di misurazione dell'aderenza.....	46
9. Apparecchi di misurazione dell'aderenza impegnabile.....	47
10. Apparecchi di misura della tessitura superficiale.....	53
11. Apparecchi di misura della regolarità superficiale.....	56
12. Risultati sperimentali.....	59
13. Risultati relativi all'aderenza longitudinale e trasversale.....	63
14. Il meccanismo di aderenza in campo ferroviario.....	73
15. Caratteristiche costruttive del complesso ruota-rotaia.....	73
16. Definizione del coefficiente di aderenza longitudinale.....	75
17. Definizione del coefficiente di aderenza relativo al veicolo nel suo complesso.....	77
18. Il fenomeno dello svio.....	79
 Bibliografia.....	 82

ANALISI CRITICA DEL FENOMENO DELL'ADERENZA IN CAMPO STRADALE E FERROVIARIO.

1. Premesse.

Il fenomeno dell'*aderenza* risulta essere determinante nella caratterizzazione di gran parte delle problematiche legate alla progettazione stradale (ma anche ferroviaria ed aeroportuale), dall'organizzazione della sovrastruttura (con particolare riferimento agli strati superficiali), alla scelta delle pendenze trasversali, dallo studio delle caratteristiche prestazionali e di sicurezza dei veicoli, al problema della sopraelevazione in curva.

Inoltre il fenomeno dell'aderenza è, in maniera determinante, connesso al continuo progresso che ha interessato, in questi ultimi anni, tanto la meccanica degli autoveicoli, quanto la tecnologia dei pneumatici.

E' infine importante osservare che le precedenti considerazioni si inquadrano tutte nell'ottica di un quadro più ampio, che è proprio quello della sicurezza delle infrastrutture viarie.

Ma in che cosa consiste il fenomeno dell'aderenza ?

Non è possibile rispondere con esattezza a questa domanda; al massimo possiamo definire sotto quali condizioni il fenomeno si verifica e, col supporto di verifiche sperimentali, definire un coefficiente di aderenza.

In pratica, si può affermare che l'aderenza è quel meccanismo in virtù del quale una ruota in moto di rotolamento trasmette al terreno, attraverso le zone di reciproco contatto, tre sistemi di forze:

- forze normali (F_z);
- forze trasversali (F_y);
- forze dirette nella direzione del moto (F_x).

Nel caso stradale, più che in quello ferroviario (dove le forze trasversali sono trasmesse dal bordino della ruota) ha senso distinguere due aspetti del fenomeno dell'aderenza:

- 1) aderenza longitudinale;
- 2) aderenza trasversale.

L'aderenza longitudinale interessa le ruote gravate da un peso verticale P e da uno sforzo tangenziale F_x (o di trazione o di frenatura); le condizioni di aderenza sono verificate allorquando la ruota rotola sul terreno senza slittare.

L'aderenza trasversale interessa le ruote soggette ad un peso verticale ed ad uno sforzo trasversale F_y ; analogamente al caso dell'aderenza longitudinale si può affermare che le condizioni di aderenza risultano verificate se la ruota avanza sul piano viabile senza slittare lateralmente.

Come vedremo meglio in seguito, è possibile definire due coefficienti di aderenza (trasversale e longitudinale) la cui somma vettoriale dà il coefficiente di aderenza effettivo.

E' infatti opportuno sottolineare come la distinzione tra aderenza longitudinale e trasversale (o laterale) sia un puro fatto formale, in quanto le modalità con cui si manifesta il fenomeno sono le stesse in entrambi i casi.

2. Cenni sulla teoria dell'aderenza.

Con riferimento alla figura 1, consideriamo due corpi (per il momento generici) posti a contatto tra loro in maniera da individuare un'area d'impronta; supponiamo che sul blocchetto di materiale posto superiormente, agiscano sia una forza normale P , sia una forza tangenziale T , tali da potersi ritenere uniformemente distribuite entro l'area d'impronta.

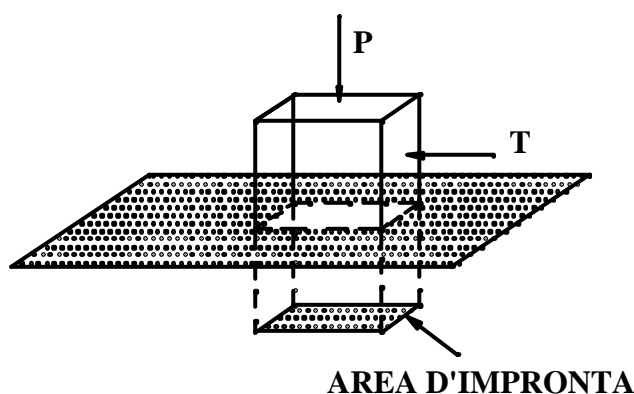


Fig. 1 - Schematizzazione delle forze agenti fra due superfici piane a contatto.

In virtù del sistema di forze applicato, si ammette:

- ◆ il manifestarsi di deformazioni normali nei punti a contatto;

- ◆ l'instaurarsi di una sorta di combaciamento tra le rugosità interessanti le superfici a contatto (trattasi, in definitiva, di una vera e propria mutua compenetrazione delle due superfici);
- ◆ il sussistere di una proporzionalità tra la forza tangenziale T e lo spostamento X del suo punto di applicazione rispetto alla superficie sottostante. Questa proporzionalità è evidenziata dal grafico riportato in figura 2.

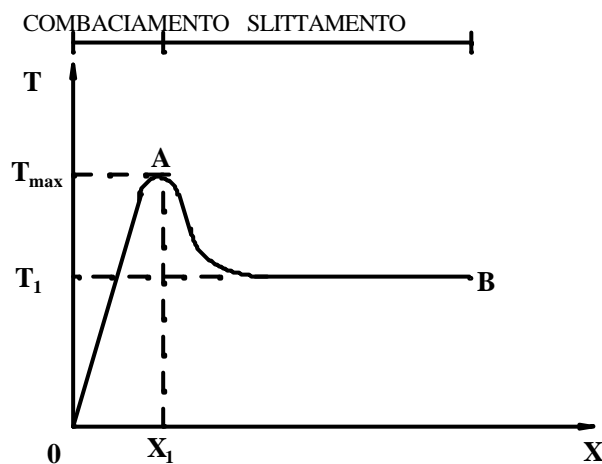


Fig. 2 - Proporzionalità tra la forza tangenziale (T) agente tra due superfici piane, e lo spostamento reciproco (X).

Il tratto OA è indicativo di una situazione in cui persiste ancora il mutuo combaciamento delle superfici a contatto, e lo spostamento X è dovuto a deformazioni tangenziali di tipo elastico; ciò rende conto della proporzionalità diretta tra spostamento e deformazione, descritta dalla legge di Hooke; è inoltre importante rilevare che questo comportamento di tipo elastico presenta un limite superiore definito da $T = T_{\max}$ e da un particolare valore dello spostamento $X = X_1$.

In corrispondenza di T_{\max} si ammette, in pratica la rottura del mutuo combaciamento.

Il rapporto T_{\max} / P rappresenta il coefficiente di attrito di primo distacco f^* riferibile, in virtù dell' ipotesi di uniforme distribuzione delle forze, alle forze unitarie : $f^* = \frac{t_{\max}}{p}$.

Il tratto AB è, invece, indicativo dell'instaurarsi dello slittamento reciproco tra le due superfici; il fenomeno è manifestamente di tipo attritivo, e, la forza tangenziale assume un valore T_1 sensibilmente inferiore a T_{max} ; è pertanto possibile definire, analogamente a prima, il coefficiente di attrito cinetico $f_1 = \frac{t_1}{p}$.

E' da osservare che il diagramma di figura 2 descrive il comportamento di materiali compatti e rugosi (tipo manti stradali bituminosi) in cui si verifica che $f^* > f_1$; in realtà esistono dei materiali (tipo manti stradali resi viscidi dal fango o interessati da uno strato d'acqua superficiale) in cui $f^* = f_1$ o addirittura $f^* < f_1$ (curve 1 e 2, Fig. 3).

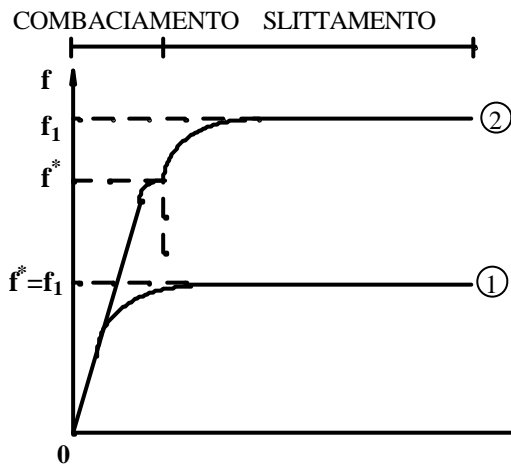


Fig. 3 - Proporzionalità tra f ed X nel caso in cui $f^* = f_1$ (curva 1) o $f^* < f_1$ (curva 2).

Se volessimo adesso trasferire queste considerazioni sul meccanismo attraverso cui si esplica il fenomeno dell'aderenza, al caso della ruota rotolante su un terreno compatto, bisogna notare, che, pur essendo evidente che la dinamica del fenomeno sia condizionata dalle stesse cause che danno luogo, prima, all'attrito di primo distacco, poi, all'attrito cinetico, non è tuttavia possibile identificare il coefficiente di aderenza f ruota-terreno né con il coefficiente f^* di primo distacco, né col coefficiente f_1 di attrito cinetico; ciò è dovuto a due motivi :

- ◆ perché il sistema di forze agente sulla ruota (il peso P e le forze tangenziali F_x ed F_y) non può considerarsi uniformemente distribuito entro l'area d'impronta;

- ◆ perché non vi è una marcata separazione tra i due meccanismi di attrito; infatti, in una stessa impronta, e nel medesimo istante, possono esservi contemporaneamente punti in cui si verifica il mutuo combaciamento e punti in cui si manifesta lo slittamento.

Queste differenze rispetto al caso dell'elementino generico rappresentato in figura 1 sono dovute essenzialmente alla deformabilità della gomma di cui è costituito il pneumatico ed all'intervento del fattore tempo nelle relazioni di contrazione e deformazione (proprietà visco-elastiche).

3. Il meccanismo di aderenza lungo la direzione longitudinale.

Consideriamo una ruota, sottoposta al carico verticale P , che ruota, alla velocità (v) di traslazione del proprio asse, sotto l'azione della forza di trazione (T).

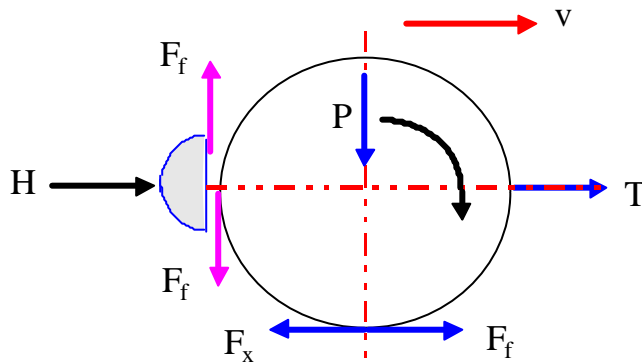


Fig. 4 - Sistema di forze agente su una ruota frenata.

Un ceppo, premuto contro la ruota con una forza H produce una forza frenante (F_f) la quale, trasmettendosi al suolo, dà origine alla reazione F_x che si mantiene uguale e contraria ad F_f fino a che questa non supera un certo valore critico (Fig. 4).

Se si incrementa l'entità della forza H che preme sul ceppo frenante, la forza frenante F_f aumenta, con la ruota che continua a rotolare, fino a che F_x non raggiunge un certo valore massimo, dopodiché, se H cresce ancora, la ruota si blocca, pur continuando ad avanzare strisciando (fenomeno del pattinamento), ed F_x si porta ad un valore inferiore F_x' (Fig. 5).

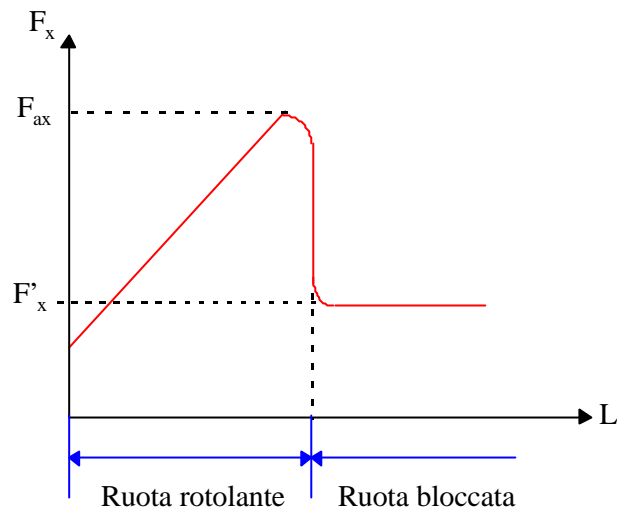


Fig. 5 - Andamento della forza longitudinale F_x nel caso di ruota frenata.

Si definisce limite di aderenza il valore massimo della forza longitudinale (F_{ax}) che, per un dato valore del carico verticale, si può trasmettere fra ruota e pavimentazione in condizioni di rotolamento.

E' pertanto possibile definire il cosiddetto **coefficiente di aderenza longitudinale**:

$$f_x = \frac{F_{ax}}{P}$$

A ruota bloccata, la ruota stessa sviluppa una forza F'_x di attrito radente; è quindi possibile definire il **coefficiente di attrito radente (o cinetico)**:

$$f'_x = \frac{F'_x}{P}$$

E' importante rilevare che, nella realtà, il moto della ruota non è di puro rotolamento, ma presenta scorrimenti fra ruota e suolo che variano a seconda del tipo di ruota e di suolo, del carico, della coppia applicata, del tipo di sollecitazione (motrice o frenante) e della velocità. Infatti il moto della ruota sulla quale agisce un momento attivo (motore o frenante) si accompagna a deformazioni elastiche tangenziali, necessarie alla generazione delle forze di contatto che, localmente, danno luogo ad uno strisciamento reciproco ruota-suolo.

In definitiva, questo strisciamento fa sì che l'avanzamento della ruota sia differente da quello che si avrebbe nella condizione di puro rotolamento. E' evidente che, nel caso di ruota motrice, l'avanzamento reale della ruota sarà minore di quello che, nello stesso tempo, si avrebbe, teoricamente, nelle condizioni di puro rotolamento; il contrario accade nel caso di ruota frenata.

Se indichiamo con L_0 lo spazio effettivamente percorso nell'unità di tempo ed L lo spazio corrispondente in condizioni di puro rotolamento, possiamo definire lo *scorrimento* s come rapporto tra la differenza degli spazi ed il maggiore di essi e precisamente:

$$s = \frac{L - L_0}{L} = 1 - \frac{L_0}{L} \quad (\text{ruota motrice}) \quad [1]$$

$$s = \frac{L_0 - L}{L_0} = 1 - \frac{L}{L_0} \quad (\text{ruota frenata}) \quad [2]$$

Dalle [1] e [2] si vede che in condizioni di scorrimento totale ($s = 1$) la ruota, se motrice, gira su se stessa senza avanzare ($L_0 = 0$) e viceversa, se frenata, avanza strisciando senza rotolare ($L = 0$); in entrambi i casi lo spazio teorico è uguale a quello effettivo ($L = L_0$); in caso di scorrimento parziale ($0 < s < 1$) risulta $L_0 < L$ con ruota motrice ed $L_0 > L$ con ruota frenata.

L'aver definito lo scorrimento s ci consente di parlo in relazione con le forze longitudinali.

Nel caso di strada asciutta e caratterizzata da strato superficiale in buone condizioni si ha il grafico riportato in figura 6.

Tratto OA : è indicativo di una situazione in cui si manifesta un comportamento di tipo elastico senza che si verifichi scorrimento alcuno; la proporzionalità tra forza tangenziale e scorrimento obbedisce al modello elastico di Hooke.

Punto A: è indicativo del raggiungimento del valore massimo (F_{ax}) della forza tangenziale corrispondente ad un dato valore di $s = s_0$.

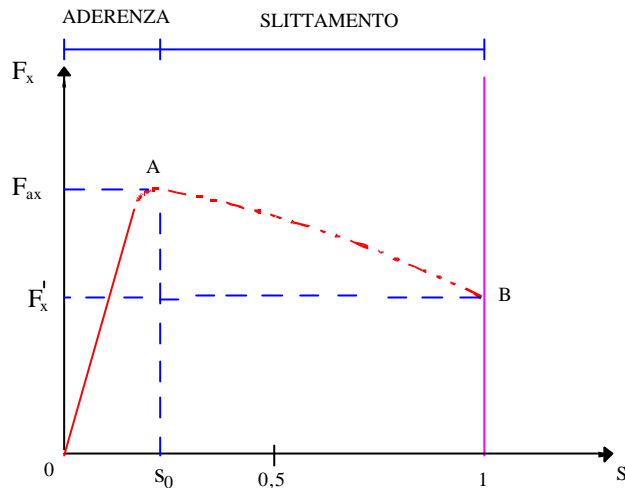


Fig. 6 - Aderenza e scorrimento longitudinale di un pneumatico: curve di scorrimento $F_x(s)$.

Tratto AB : è indicativo del progressivo diminuire del valore di F_x fino ad assumere un valore (F'_x) sensibilmente più basso di F_{ax} , in corrispondenza dello slittamento totale ($s=1$). E' importante osservare che questo tratto è in realtà indeterminato, in quanto non appena si raggiunge il valore F_{ax} , si passa quasi istantaneamente allo slittamento totale; ciò vuol dire che, ad esempio, in caso di sforzi tangenziali di frenatura si verifica il bloccaggio delle ruote una volta raggiunto il valore F_{ax} ; pertanto affinché la ruota riprenda a rotolare e vengano ripristinate le condizioni di aderenza, occorre ridurre la forza F_x fino ad un valore sensibilmente inferiore ad F_{ax} .

Nel caso di strada liscia o resa viscida, si ha il diagramma riportato in figura 7.

In questo caso, per $s > s_0$, il valore di F_x non presenta un massimo ma si mantiene praticamente costante fino ad $s=1$. Ciò è evidentemente una situazione estremamente gravosa dal punto di vista della sicurezza, in quanto lo slittamento totale viene raggiunto senza che si manifestino sensibili variazioni dello sforzo tangenziale ed il guidatore non è "invogliato" a prendere le dovute precauzioni (riduzione della velocità, aumento della distanza di sicurezza) atte a ridurre i rischi legati ad una situazione particolarmente gravosa quale è appunto il raggiungimento dello slittamento totale.

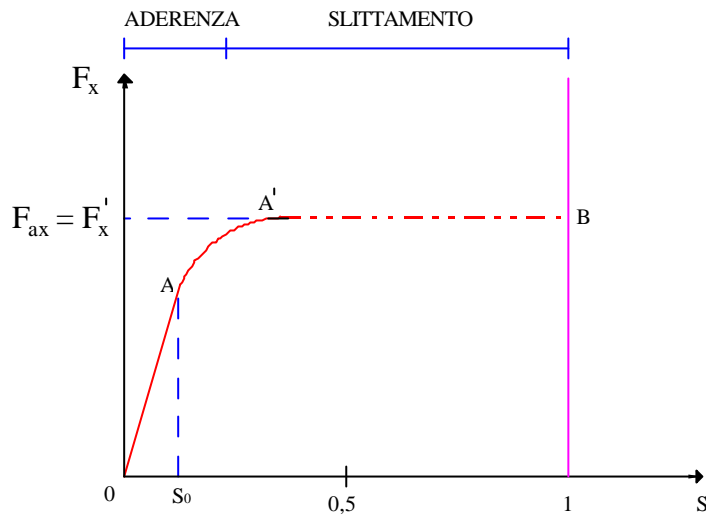


Fig. 7 - Curve di scorrimento $F_x(s)$ nel caso di strada liscia o viscida.

Se facciamo nuovamente riferimento alla figura 6 possiamo affermare che:

$$\Rightarrow \text{c'è aderenza allorché sussiste la disuguaglianza: } F_x \leq f_x \cdot P \quad [3]$$

$$\Rightarrow \text{c'è slittamento non appena si verifica che: } F_x = f'_x \cdot P \quad [4]$$

Dove, come abbiamo già detto f_x ed f'_x sono, rispettivamente, il coefficiente al limite di aderenza, ed il coefficiente di attrito radente.

E' tuttavia difficile poter dire se e quando si verificano le condizioni di aderenza secondo la [3] e non quelle di slittamento secondo la [4].

E' però vero che le osservazioni sperimentali confermano due importanti risultati:

- gli spostamenti reciproci tra gli elementi a contatto sono minimi nella parte anteriore dell'area di contatto (bordo d'entrata), e sono molto più sensibili man mano che si procede verso la parte posteriore (bordo d'uscita);
- al crescere del rapporto d'aderenza (F_x / P), la zona di slittamento si estende dal bordo di uscita verso quello di entrata.

Ad ulteriore chiarimento dei fenomeni di combaciamento e distacco, possiamo esporre altre argomentazioni che fanno capo alle seguenti ipotesi:

- ◆ sussiste il combaciamento al bordo d'entrata;

- ◆ l'area d'impronta è rettangolare, anziché ellittica; (in tal caso le forze unitarie p e t divengono funzione della sola x , ascissa corrente entro la lunghezza d'impronta con origine nel bordo d'entrata).

In virtù della seconda ipotesi si ha che $p=p(x)$; la prima ipotesi garantisce invece che, in corrispondenza del bordo d'entrata, si verifichi $t = 0$ (Fig. 8).

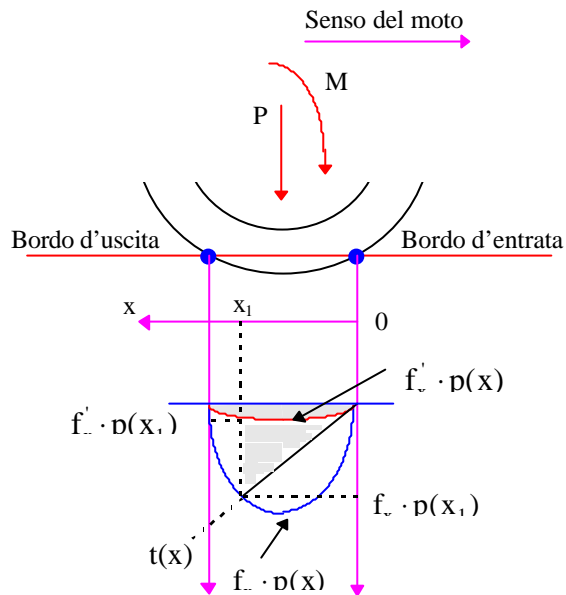


Fig. 8 - Distribuzione delle forze entro l'area d'impronta.

L'andamento della forza tangenziale unitaria è di tipo lineare fino al raggiungimento di un valore massimo pari a:

$$t = f_x \cdot p(x_1)$$

per una certa ascissa $x = x_1$ in corrispondenza della quale la retta $t(x)$ interseca la curva ad andamento parabolico di equazione $f_x \cdot p(x)$.

Oltre l'ascissa x_1 , fino al bordo d'uscita, si verificherebbe la condizione impossibile:

$$t > f_x \cdot p(x)$$

Conseguentemente, da x_1 fino al bordo d'uscita, deve verificarsi necessariamente lo slittamento, e la legge di variazione della forza tangenziale diviene:

$$t = f'_x \cdot p(x)$$

Le osservazioni appena svolte ci consentono di rendere conto della riduzione dell'aderenza con l'aumentare della velocità.

Poniamo la nostra attenzione nuovamente sul diagramma di Fig. 8, ed osserviamo che l'area sottesa dalla curva $t(x)$ (punteggiata in figura) varia al variare dell'inclinazione del tratto iniziale rettilineo; ciò vuol dire che esisterà una certa inclinazione del tratto iniziale per cui l'area punteggiata risulterà massima (Fig. 9/A), e misurerà il limite di aderenza F_{ax} , ovvero il massimo valore della forza tangenziale F_x che il pneumatico, sotto il carico agente (P), è in grado di trasmettere al terreno.

Se consideriamo adesso il caso dinamico (pneumatico in moto), si deve necessariamente rilevare che, all'aumentare della velocità V , pur non variando l'area d'impronta, si manifestano fenomeni di inerzia meccanica e di isteresi elastica nel pneumatico, che danno origine ad un'alterazione significativa del diagramma di distribuzione delle $p(x)$, che diventa asimmetrico rispetto all'asse trasversale dell'impronta (Fig. 9/B).

Il diagramma relativo al caso dinamico, evidenzia inoltre, rispetto al caso statico, una riduzione abbastanza evidente dell'area puntinata; ciò vuol dire che è diminuita l'aderenza impegnabile in quanto si è abbassato il limite di aderenza F_{ax} ed il relativo coefficiente f_x .

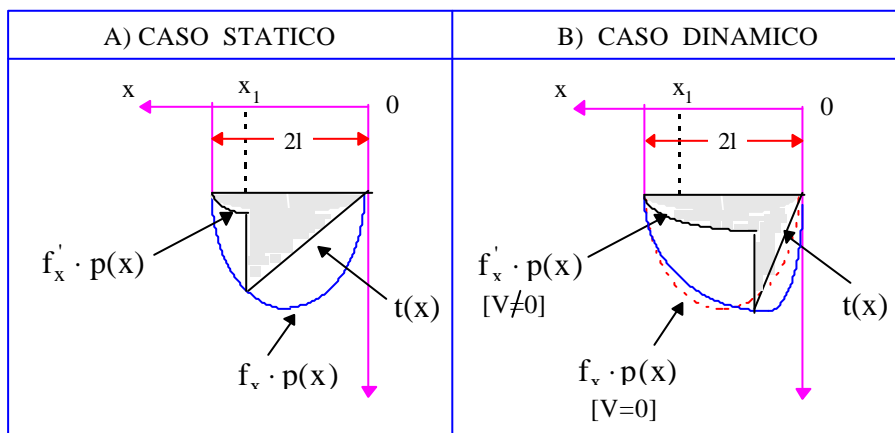


Fig. 9 - Distribuzione delle forze nell'area d'impronta di un pneumatico fermo (A) e di uno in moto (B).

4. Pavimentazione stradale e pneumatici: fattori determinanti per le modalità di aderenza.

E' importante notare che le caratteristiche di aderenza dipendono, oltre che dalla velocità del mezzo stradale, anche da una molteplicità di parametri associabili ad una triade di fattori:

1. fattori legati alle caratteristiche dei pneumatici;
2. fattori associati alle caratteristiche del manto superficiale;
3. fattori relativi alle condizioni ambientali.

Vogliamo adesso, sinteticamente, chiarire il ruolo dei singoli fattori.

Fattori legati alle caratteristiche dei pneumatici

La ruota per “veicoli stradali” è composta da due parti: il *pneumatico*, di gomma, che costituisce l'organo di rotolamento ed il *disco* o *cerchione*, metallico, che ha la funzione di supporto per il pneumatico e di attacco al perno o all'asse.

Il pneumatico, tramite le caratteristiche elastiche e di aderenza, ha il compito fondamentale di sviluppare forze di reazione tangenziali sia longitudinalmente che trasversalmente; deve inoltre svolgere i seguenti compiti:

- ◆ sopportare il peso del veicolo;
- ◆ assorbire le irregolarità del manto superficiale stradale.

Il pneumatico (Fig. 10) ha una struttura toroidale elastica di caucciù vulcanizzato, costituita dalla carcassa e dal battistrada.

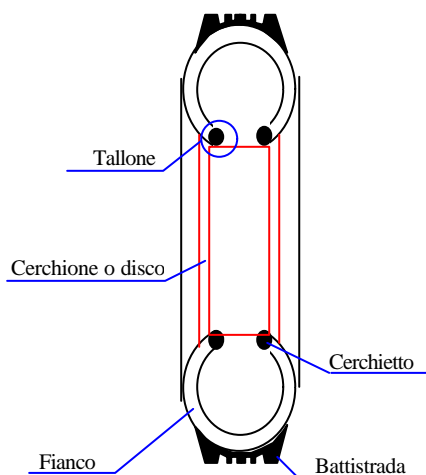


Fig. 10 - Elementi di un pneumatico.

La carcassa è formata da più tele sovrapposte e realizzate con cordicelle di fibre come il rayon ed il nylon.

Le due estremità del pneumatico destinate ad inserirsi nel cerchione sono dette talloni; internamente ad essi sono posti i cerchietti (ai quali vanno ad ancorarsi le tele), composti da più fili in acciaio. I talloni hanno il compito di incrementare la resistenza alle sollecitazioni radiali, riducendone anche l'entità; i cerchietti contribuiscono a mantenere la carcassa ben aderente al cerchione.

Il battistrada è la parte del pneumatico che entra in contatto con il suolo e consiste in un anello di gomma compatta che avvolge la carcassa nella zona di rotolamento; in esso sono ricavate particolari sculture aventi il compito di ottimizzare determinate caratteristiche (aderenza longitudinale e trasversale, silenziosità, prestazioni alle alte velocità, ecc.).

L'area di contatto sul suolo ha generalmente forma pseudo-ellittica e dimensioni abbastanza grandi e variabili. Ad esempio, le dimensioni medie dell'orma sono di cm 10×20 per una ruota di autovettura ($D \cong 0.5$ m) e di cm 20×40 per quelle di un mezzo pesante ($D \cong 1$ m).

Come già osservato, la carcassa è ottenuta dalla sovrapposizione di tele rese solidali tra loro a mezzo di un processo di vulcanizzazione. In base all'orditura delle tele sovrapposte, il pneumatico può essere di due tipi:

- ◆ convenzionale
- ◆ radiale

Il "convenzionale" (Fig. 11) è costituito da tele che si estendono fra i due talloni e che sono sovrapposte ed incrociate in modo da formare un angolo di circa 40° .

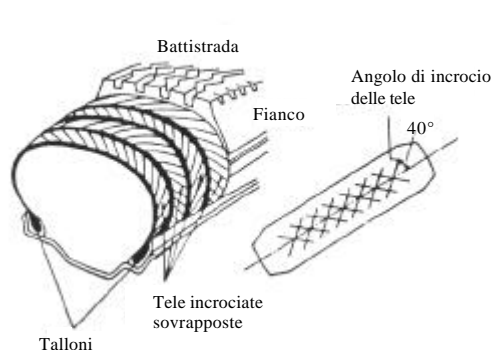


Fig. 11 - Caratteristiche costruttive di un pneumatico convenzionale.

Il tipo radiale (Fig. 12) è invece caratterizzato dal fatto che alcune tele si estendono fra i due talloni con orditura radiale; su questa prima orditura viene sovrapposta una seconda, limitata alla sola zona corrispondente alla fascia di rotolamento (che verrà poi coperta dal battistrada) formata, analogamente al tipo convenzionale, dalla sovrapposizione di tele ad orditura incrociata ma con angolo di circa 20° .

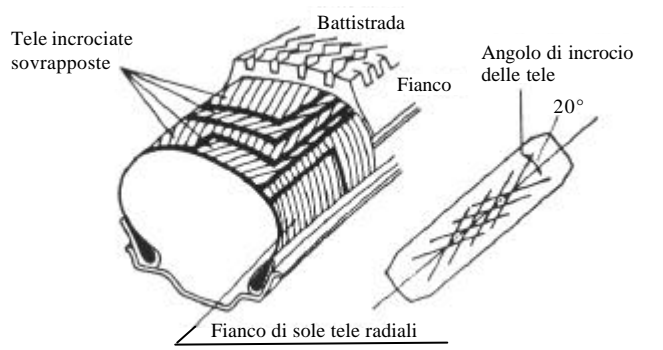


Fig. 12 - Caratteristiche costruttive di un pneumatico radiale.

I due tipi di pneumatici presentano le seguenti caratteristiche:

- ⇒ Struttura convenzionale: maggiore resistenza ai fianchi, maggiore rigidità a flessione, minore aderenza, maggiori pressioni sul terreno con minore pressione di gonfiaggio.
- ⇒ Struttura radiale: minore resistenza ai fianchi, maggiore flessibilità pur con maggiori pressioni interne, maggiore aderenza a motivo della più uniforme distribuzione delle pressioni sul suolo.

Qualche considerazione aggiuntiva merita la “questione” della pressione di gonfiaggio.

Una delle caratteristiche particolari del pneumatico a struttura radiale è la maggiore costanza dell'impronta a terra (ma non la distribuzione delle pressioni a terra del battistrada) indipendentemente dalla pressione di gonfiaggio; questa costanza non è garantita dal pneumatico convenzionale che tende, a causa dell'elasticità della zona del battistrada, ad assumere una forma tondeggiante della sezione all'aumentare della pressione di gonfiaggio (Fig. 13).

Non è dunque corretto pensare che diminuendo o aumentando di poco la pressione di gonfiaggio di un pneumatico radiale se ne vari in modo rilevante l'entità dell'impronta a terra; ciò che in realtà varia è la distribuzione delle pressioni a terra del battistrada il cui effetto influenza sia il comportamento dinamico (un pneumatico sottogonfiato è soggetto a maggior deriva, uno sovragonfiato a minore) sia la durata (un pneumatico sottogonfiato è soggetto ad un consumo più rapido delle spalle poiché esse esercitano una pressione a terra maggiore rispetto al resto del battistrada, uno sovragonfiato è soggetto, per lo stesso motivo a un consumo più veloce della zona centrale del battistrada (Fig. 14)).

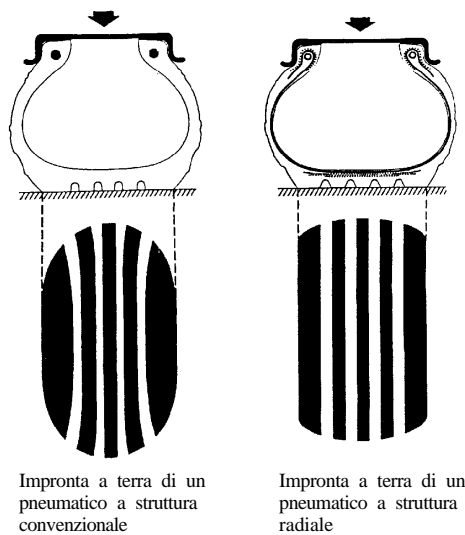


Fig. 13 - Differenza tra le impronte di un pneumatico convenzionale e di uno radiale.

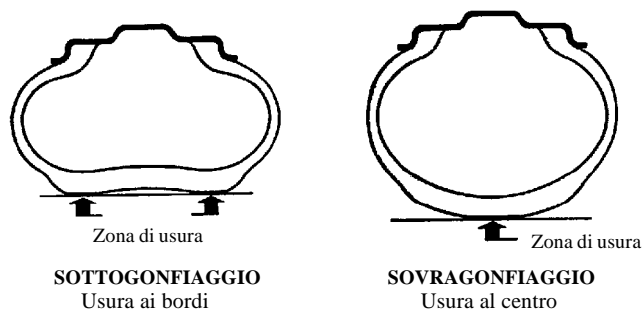


Fig. 14 - Consumo anomalo di un pneumatico per sottogonfiaggio o per sovragonfiaggio.

L'unico caso in cui una riduzione della pressione di gonfiaggio può avere come effetto una variazione dell'impronta a terra del pneumatico (e cioè un incremento della lunghezza della

sezione che tocca il terreno), è durante la marcia su terreni molto cedevoli (neve, sabbia, fango); infatti in questi casi il notevole abbassamento della pressione di gonfiaggio fa aumentare la lunghezza dell'impronta a terra e la deformazione del fianco del pneumatico che, affondando nel terreno cedevole offre una maggiore impronta (Fig. 15).

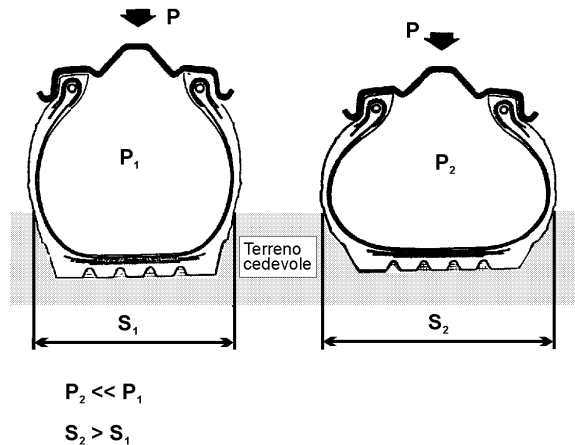


Fig. 15 -Variazione dell'area d'impronta con la pressione di gonfiaggio ed il terreno.

La marcia a pressione di gonfiaggio ridotta dovrebbe essere assolutamente evitata, perché la notevole deformazione a cui è soggetto il pneumatico fa aumentare la temperatura della gomma sino a raggiungere valori talmente elevati da divenire causa potenziale della disgregazione della carcassa. Tale effetto, insieme ad un notevole peggioramento delle caratteristiche di tenuta di strada, è di maggiore rilevanza nel pneumatico convenzionale piuttosto che nel radiale, in quanto in quest'ultimo è il fianco che sopporta il maggior lavoro di deformazione; dato che però esso è costituito da una quantità di gomma percentualmente inferiore rispetto al convenzionale, deformandosi produce meno calore, che, per di più, smaltisce con maggiore rapidità mantenendo più a lungo la temperatura entro intervalli accettabili.

Questo effetto è ottenuto anche mediante l'adozione di mescole di gomma a bassa isteresi, in grado cioè di limitare il processo di trasformazione in calore dell'energia di deformazione.

Questa caratteristica è molto più importante di quanto non si possa pensare, dato che la marcia a pressione di gonfiaggio inferiore alla prescritta non è caratteristica solamente delle situazioni particolari appena menzionate.

Infatti è provato statisticamente che una grande percentuale dei veicoli circola con scostamenti, anche rilevanti, dal valore corretto della pressione di gonfiaggio sia in eccesso (sovragonfiaggio) ma molto più spesso in difetto (sottogonfiaggio).

Secondo una recente rilevazione, su un campione di 82000 pneumatici casualmente scelti, oltre il 50% risultava avere una pressione di gonfiaggio non corretta ⁽¹⁾

In definitiva, il pneumatico, per possedere le necessarie caratteristiche di elasticità, deve essere gonfiato con aria ad una pressione che è quella indicata dalla Casa costruttrice. Per motivi di tenuta, l'aria può essere contenuta in un tubo di gomma sottile (camera d'aria) alloggiato all'interno della carcassa ed aderente, in pressione, alle pareti della stessa e del cerchio; altrimenti la tenuta dell'aria può essere assicurata dalla carcassa medesima combaciante strettamente col cerchio mediante il tallone (pneumatici tubeless).

Relativamente all'adozione dei pneumatici tubeless, si deve osservare che essi presentano l'indubbio vantaggio di essere esenti, in caso di foratura, dal fenomeno di rapido afflosciamento. Infatti (Fig. 16) se nel pneumatico con camera d'aria (detto tube type) si verifica una foratura, l'aria, fuoriuscendo rapidamente anche attraverso la sede della valvola, ne causa l'improvviso e pericoloso afflosciamento; viceversa, nel pneumatico tubeless tale fenomeno è meno accentuato poiché l'aria tende a fuoriuscire con velocità minore avendo a disposizione solo la zona della perdita.

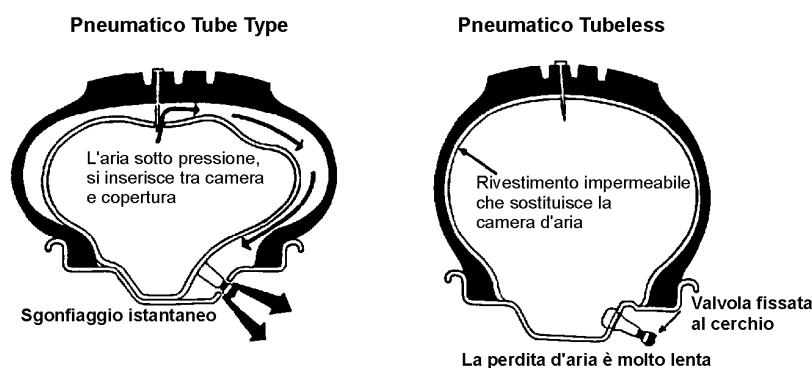


Fig. 16 - Diversità di velocità di sgonfiaggio in caso di foratura tra un pneumatico con e senza camera d'aria.

¹ Dati statistici ricavati dal "Il Sole 24 Ore" (3/7/93)

Ai giorni nostri, i pneumatici radiali e privi di camera d'aria hanno pressoché soppiantato i convenzionali dotati di camera d'aria, i quali hanno un uso limitato ai veicoli industriali per impieghi gravosi a bassa velocità

Osserviamo infine che le caratteristiche delle ruote pneumatiche sono ampiamente variabili non solo nel disegno del battistrada (che è proprio della Casa costruttrice) ma anche nella forma e nelle dimensioni, nelle pressioni di gonfiaggio, nelle prestazioni (carichi, velocità, aderenza, durata, ecc.) e nell'uso del veicolo (su strada o fuoristrada, per trasporto o per lavoro, ecc.).

La misura di un pneumatico è indicata dal diametro di calettamento del cerchio e si esprime sempre in pollici (ad esempio 13) e da due numeri separati da una barra.

Il primo di essi (ad esempio 155) indica la larghezza nominale della sezione del pneumatico (in millimetri) ed il secondo (ad esempio 70) il rapporto, espresso in percentuale, tra l'altezza e la larghezza della sezione del pneumatico. Vale a dire che il pneumatico in questione è un "155/70-13".

Inoltre, accanto alle indicazioni suddette, sul fianco dei pneumatici è stampata una serie notevole di sigle e di numeri atti ad individuare ogni elemento caratteristico della copertura (capacità di carico, tipo di struttura, marchi di fabbrica, ecc.).

Fattori associati alle caratteristiche del manto superficiale, e fattori relativi alle condizioni ambientali.

In primo luogo osserviamo che, nella trattazione che segue, faremo riferimento ad uno studio congiunto dei fattori associati alle caratteristiche superficiali e di quelli relativi alle condizioni ambientali. Ciò è lecito in virtù dello strettissimo legame presente tra i fattori suddetti; del resto, come vedremo, anche le prestazioni dei pneumatici sono condizionate dalle caratteristiche superficiali (micro, macro, megatessitura ed altre irregolarità) e dalle condizioni di esercizio del manto stradale (presenza di acqua, di olii, ecc..).

E' noto che, con il termine sovrastruttura (o pavimentazione) stradale si intende quella struttura idonea a garantire la transitabilità del traffico veicolare secondo le previsioni progettuali. Essa ha tre compiti fondamentali:

- ◆ garantire ai veicoli una superficie di rotolamento regolare e poco deformabile;

- ◆ ripartire sul terreno sottostante le azioni dei veicoli, in maniera tale da non indurre deformazioni sul piano viabile particolarmente condizionanti per le caratteristiche di sicurezza e di comfort;
- ◆ proteggere il terreno sottostante dagli agenti atmosferici.

Si distinguono fondamentalmente due tipologie di pavimentazioni:

flessibili (Fig. 17): sono costituite da più strati sovrapposti, realizzati mediante miscele di aggregati lapidei e di leganti (bitumi), di qualità via via crescente verso lo strato superficiale; l'organizzazione "a strati" delle pavimentazioni flessibili assicura la distribuzione del carico al piano di posa piuttosto che assorbire gli sforzi mediante lavoro di flessione.

rigide (Fig. 18): sono generalmente costituite da piastre caratterizzate da un elevato modulo di elasticità. In questo caso, la maggior parte delle sollecitazioni è sopportata dalla piastra stessa realizzata in calcestruzzo di cemento; per sovrastrutture di questo tipo, piccole variazioni della portanza del piano di posa hanno poca influenza sul comportamento strutturale e sullo stato di sollecitazione.

Nel nostro studio ci occuperemo principalmente delle pavimentazioni di tipo flessibile.

Abbiamo già osservato come i veicoli trasmettano alle pavimentazioni stradali sia sollecitazioni verticali, dovute al peso, sia orizzontali (forze di trazione, di frenatura o forze centrifughe nel caso di moto lungo traiettorie curvilinee), cioè tangenti al piano viabile.

Le azioni orizzontali determinano sollecitazioni tangenziali molto forti negli strati più superficiali della pavimentazione, le quali si vanno rapidamente smorzando negli strati più profondi.

Per questo motivo, nelle pavimentazioni flessibili, gli strati superficiali (in genere due, di usura e di collegamento, per uno spessore complessivo compreso tra 7 e 10 cm) si realizzano con miscele caratterizzate da una notevole resistenza al taglio.

Gli strati posti al di sotto di quelli superficiali presentano invece una resistenza prevalente alle azioni flessionali; il primo di questi ultimi (procedendo dall'alto verso il basso) è detto strato di base e svolge il compito di ripartire sul terreno di sottofondo i carichi verticali trasmessi dai veicoli. In passato lo strato di base era realizzato con materiale granulare non legato (in genere pietrisco, e lo strato prendeva il nome di massiccata); oggi viene confezionato con una miscela di materiali lapidei e legante bituminoso.

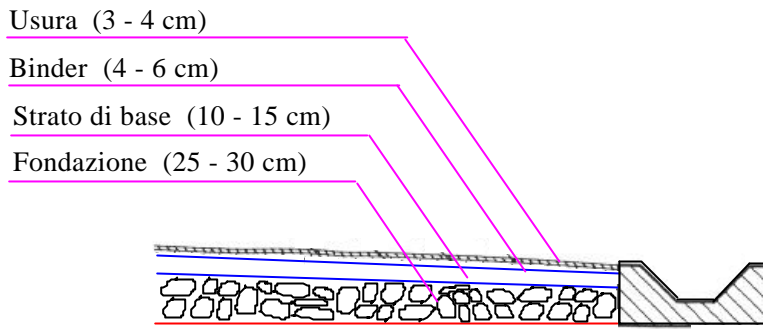


Fig. 17 - Schema di una pavimentazione flessibile di tipo moderno.

Sotto lo strato di base si dispone lo strato di fondazione, spesso realizzato con materiale granulare sciolto; esso ha una duplice funzione:

- contribuire alla ripartizione dei carichi trasmessi dai veicoli;
- realizzare una superficie regolare su cui si possa stendere lo strato di base, non alterabile dalle macchine da cantiere impiegate a tale scopo.

Le pavimentazioni rigide sono invece costituite da una lastra di calcestruzzo di cemento, la quale, essendo dotata di notevole resistenza flessionale, svolge contemporaneamente le funzioni sia degli strati superficiali sia dello strato di base delle pavimentazioni flessibili.

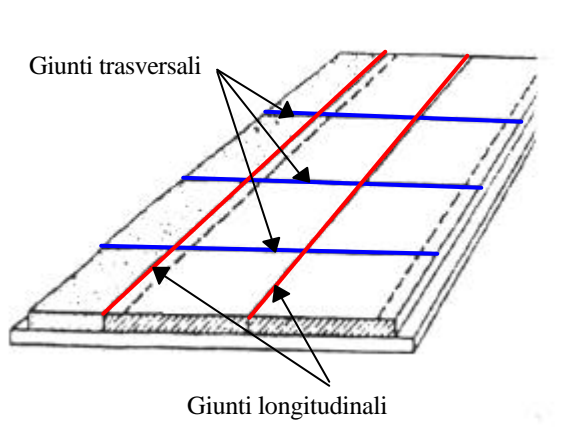


Fig. 18 - Schema di una pavimentazione in calcestruzzo per strada a carreggiate separate.

Al di sotto di questa lastra si usa disporre, anche in questo caso, uno strato di fondazione in materiale lapideo non legato o, più spesso, di misto cementato.

Ai fini degli studi sull'aderenza interessa porre la nostra attenzione sugli strati superficiali i quali devono fondamentalmente svolgere una triplice funzione:

- di *protezione* degli strati sottostanti della sovrastruttura: l'impermeabilizzazione deve essere conferita dall'esterno ed, in particolare, si deve assolutamente evitare la penetrazione di acqua ed agenti chimici;
- di *sicurezza* per l'utente: è pertanto necessario fornire condizioni adeguate di aderenza con qualunque tipo di pneumatico, specialmente in presenza di acqua sulla superficie;
- di *comfort* per il guidatore: lo strato di usura deve presentare caratteristiche di uniformità al fine di evitare:
 - * brusche sollecitazioni alle ruote;
 - * accelerazioni verticali al veicolo (causa potenziale di usura alle sospensioni);
 - * consumo dei pneumatici e vibrazioni ai sedili che provocano affaticamento e quindi riducono il grado di sicurezza;
 - * rumore da rotolamento e disturbo ai passeggeri.

Le tecniche sviluppate negli ultimi vent'anni in merito al confezionamento degli strati superficiali hanno consentito di:

- ◆ ridurre lo spessore dello strato di usura; si distinguono manti sottili di spessore pari a 4 cm, manti molto sottili di spessore variabile tra 2 e 3 cm, manti ultra-sottili di spessore compreso tra 1.5 e 2 cm;
- ◆ usare i leganti e gli additivi modificati che conferiscono allo strato di usura maggiore sicurezza e migliore adeguatezza a strade con traffico pesante.

I vantaggi offerti dai manti sottili, molto sottili ed ultra-sottili sono:

- buona macro-tessitura superficiale e quindi resistenza all'attacco degli agenti esterni (clima e traffico);
- livello di rumore da rotolamento inferiore a quello del tradizionale trattamento superficiale;
- effetto impermeabilizzante adeguato alla protezione degli strati inferiori del manufatto stradale;
- migliore uniformità;
- migliore predisposizione agli interventi manutentori; lo strato di usura diviene una sorta di "tappetino" che deve essere periodicamente sostituito prima ancora che si giunga al totale decadimento delle sue proprietà

Ci interessa, a questo punto, soffermarci sulle caratteristiche di rugosità dello strato superficiale. A tale scopo possiamo far riferimento ad una schematizzazione basata sull'assimilazione del profilo superficiale stradale ad un profilo ondulato di lunghezza d'onda λ e di ampiezza h (Fig. 19). Proprio in base alla suddetta schematizzazione, nel corso del XVIII Congresso Mondiale di Strade (Bruxelles, 1987), il Comitato Tecnico delle Caratteristiche Superficiali dell'AIPCR ha proposto la classificazione delle caratteristiche geometriche superficiali della pavimentazione stradale riportata nella tabella di figura 20.

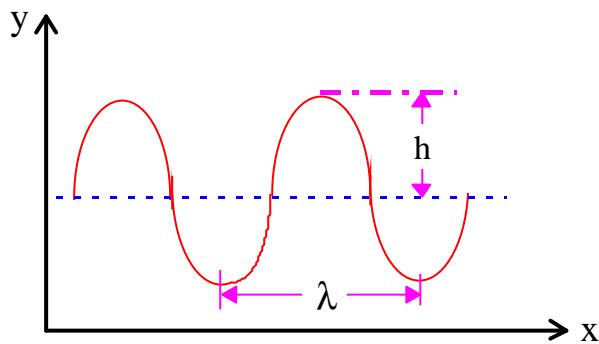


Fig. 19 - Schematizzazione della geometria superficiale del manto stradale.

DOMINIO	INTERVALLO DI DIMENSIONI	
	ORIZZONTALE	VERTICALE
MICROTESSITURA	0 - 0.5 mm	0 - 0.2 mm
MACROTESSITURA	0.5 - 50 mm	0.2 - 10 mm
MEGATESSITURA	50 - 500 mm	1 - 50 mm
REGOLARITA' SUPERFICIALE		
ONDE CORTE	0.5 - 5 m	1 - 20 mm
ONDE MEDIE	5 - 15 m	5 - 50 mm
ONDE LUNGHE	15 - 50 m	10 - 200 mm

Fig. 20 - Classificazione delle irregolarità superficiali di una pavimentazione stradale.

La macro-rugosità è la rugosità dovuta all'insieme delle asperità superficiali intergranulari della pavimentazione; la micro-rugosità, invece, è quella dovuta alla scabrezza (ruvidezza) dei singoli elementi lapidei granulari impiegati nello strato superficiale della pavimentazione stradale (Fig. 21).

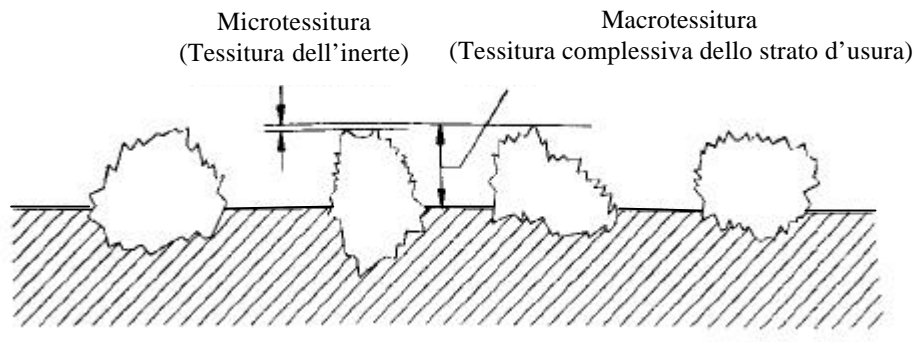


Fig. 21 - Micro e macro tessitura delle pavimentazioni stradali.

Osserviamo che il ruolo della micro e dalla macro rugosità è di fondamentale importanza nel caso di pavimentazione bagnata; vediamo di analizzarne i motivi.

Osserviamo preliminarmente che il valore dell'aderenza fra due superfici può essere espresso come somma di due termini (Fig. 22):

- 1) adesione molecolare;
- 2) isteresi.

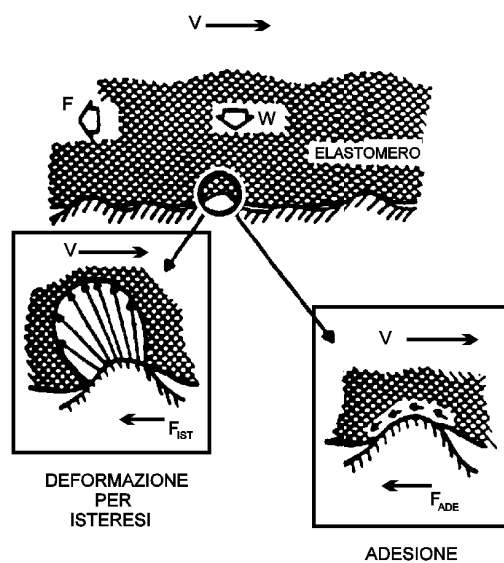


Fig. 22- Fattori di adesione ed isteresi influenzanti lo scorrimento pneumatico-terreno.

La componente adesiva si sviluppa con il processo di attacco e stacco a livello molecolare (stick-slip process), dovuto alla maggiore morbidezza della gomma rispetto a quella stradale. Lo slittamento della ruota procura un distacco di questa adesione, quasi uno strappo.

E' quindi necessario, affinché il meccanismo di adesione molecolare possa esplicarsi, che, nei punti in cui le due superfici sono a contatto, nel caso di pavimentazione bagnata, si debba eliminare lo strato d'acqua e si debbano stabilire aree di contatto asciutte.

La componente di isteresi è dovuta invece al fatto che la gomma, passando sopra un'asperità del manto stradale, crea, in virtù delle sue proprietà di isteresi, una distribuzione asimmetrica di pressioni, la cui componente orizzontale si oppone allo slittamento.

Le deformazioni per isteresi sono pertanto causate dalle irregolarità superficiali e, proprio per questo, possono avvenire anche in presenza d'acqua senza che si venga a stabilire un effettivo contatto asciutto tra le due superfici.

Per valori di velocità fino ai 50 Km/h, la microtessitura superficiale della pavimentazione è il fattore dominante nel determinare i valori di aderenza; le componenti di adesione molecolare sono prevalenti.

A velocità più elevate diviene sempre più difficile penetrare il film d'acqua nel tempo disponibile; l'aderenza dipende largamente dalla componente di deformazione, e, le asperità presenti devono essere sufficientemente grandi ed angolose da deformare il pneumatico anche in presenza di uno strato d'acqua.

Alle basse velocità quindi la micro-rugosità della superficie di una pavimentazione è il fattore principale nel determinare i valori di aderenza impegnabile; alle alte velocità la dimensione e la forma delle asperità visibili, ovvero la macro-rugosità, diventano fattori egualmente importanti se non i principali.

E' possibile schematizzare l'influenza dell'acqua interposta fra pneumatico e pavimentazione distinguendo nell'area di contatto tre zone (Fig. 23):

A) Zona di evacuazione: in questa zona i pneumatici devono rompere lo strato d'acqua e ridurre il suo spessore. La maggior parte dell'acqua è allontanata attraverso il battistrada, ed inoltre la pendenza longitudinale, trasversale (o il drenaggio della

pavimentazione nel caso di utilizzazione dei conglomerati bituminosi aperti), ne favoriscono l'evacuazione.

B) Zona di attrito: è la zona di rottura dello strato d'acqua rimanente, dovuta alla macro-tessitura e anche alla micro-tessitura dello strato superficiale. Il dato caratteristico è il coefficiente di aderenza longitudinale.

C) Zona di contatto: è l'area di contatto fra i pneumatici e la superficie stradale, la sua efficienza dipende dalla micro-tessitura.

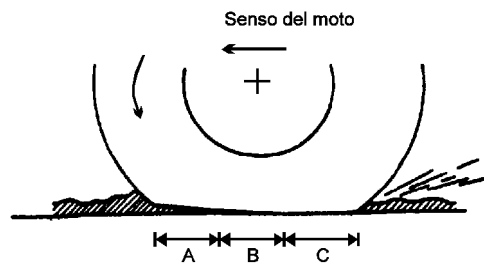


Fig. 23 - Zone individuabili nell'area di contatto ruota-suolo, nel caso di pavimentazione bagnata: A) Zona di evacuazione; B) Zona di attrito; C) Zona di contatto.

Qualora il velo d'acqua presente nella superficie di contatto ruota-suolo non venga allontanato o penetrato, le pressioni idrodinamiche di natura viscosa e dinamica che si vengono a generare nel fluido possono arrivare a valori tali da eguagliare quella di contatto pneumatico-pavimentazione; in tal caso viene meno l'effettivo contatto pneumatico-terreno e si genera il fenomeno che va sotto il nome di aquaplaning (Fig. 24).

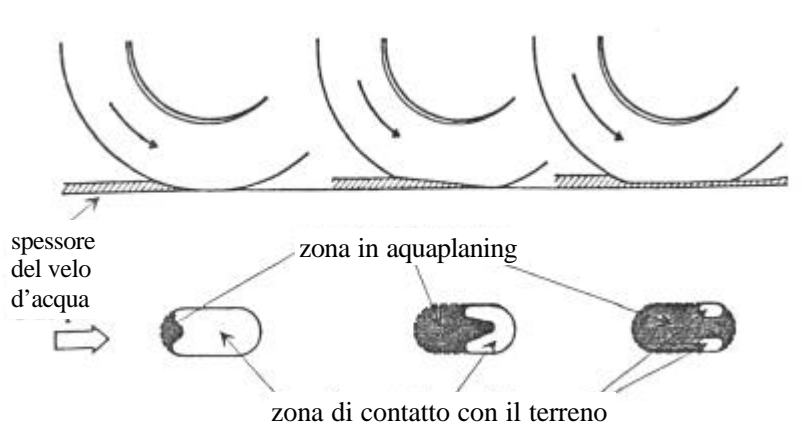


Fig. 24 - Visualizzazione delle zone di contatto e delle zone in aquaplaning nel caso di pavimentazione bagnata.

A seconda del predominare, nell'area d'impronta, di un tipo o dell'altro di pressioni idrodinamiche si possono considerare due tipi di aquaplaning:

1) aquaplaning di natura dinamica: si verifica quando sia la velocità del veicolo che il velo d'acqua presente sulla pavimentazione stradale superano un certo valore critico. Lo spessore dello strato d'acqua necessario ad innescare il fenomeno dell'aquaplaning varia notevolmente in funzione dello stato di usura del battistrada e della rugosità della superficie della pavimentazione; in ogni caso esso diventa critico quando supera la profondità delle gole del battistrada (1 cm di spessore mediamente) (Fig. 25).

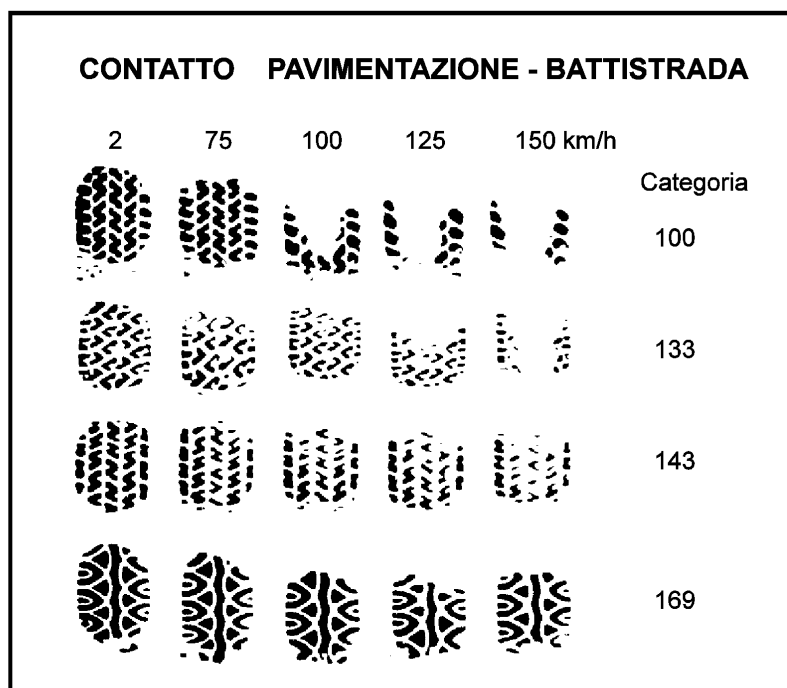


Fig. 25 - Illustrazione dell'uso di tecniche fotografiche, a mezzo di lastra di vetro, per lo studio delle prestazioni dei pneumatici e delle aree di contatto nelle condizioni di aquaplaning dinamico ad elevate velocità.

2) aquaplaning di natura viscosa: si ha quando, indipendentemente dalla velocità e dallo spessore del velo idrico, sussista l'incapacità da parte del pneumatico di forare e spostare il sottilissimo velo d'acqua rimasto sulla pavimentazione dopo che la maggior parte del fluido è stata già spostata dal pneumatico in movimento. Ciò può essere causato dall'insufficienza di tessitura superficiale della pavimentazione e/o dall'eccessivo grado di usura del battistrada del pneumatico. Il fatto che il fenomeno sussista anche a basse velocità lo rende sicuramente più insidioso dell'aquaplaning dinamico.

In figura 26 vengono rappresentate le sagomature dei battistrada e le impronte dei pneumatici in caso di aquaplaning viscoso alla velocità di 100 km/h.

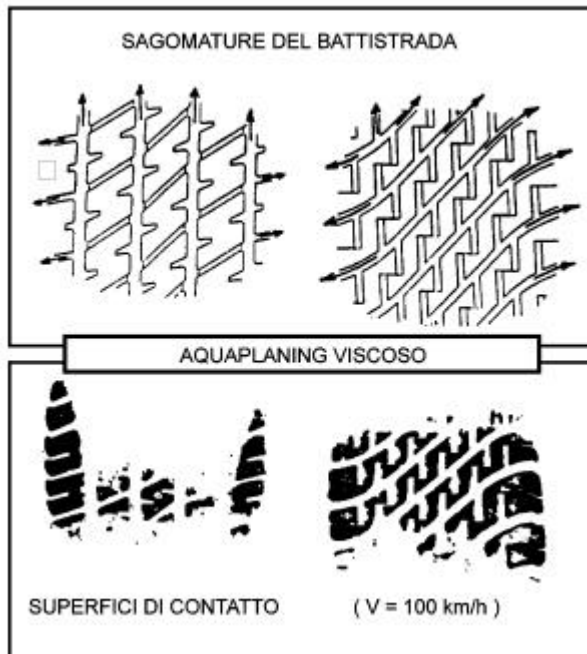


Fig. 26 - Diverse prestazioni, in condizioni di aquaplaning viscoso, di due pneumatici con diversa sagomatura del battistrada.

Si può notare come i due battistrada presentino la stessa quantità di scanalature, ciononostante si verifica una notevole differenza tra le superfici di contatto; ciò è da imputarsi principalmente ad una diversa conformazione del disegno del battistrada ed alla conseguente diversità dei flussi di fluido nelle scanalature del battistrada.

Al fine di comprendere meglio la pericolosità della presenza del velo idrico sulle pavimentazioni stradali occorre analizzare le due manovre critiche della marcia su strada, che sono la sterzata e la frenatura.

Per quanto riguarda la sterzata, è noto che in curva è applicata sulle ruote una forza trasversale, che, finché è contrastata dall'aderenza trasversale fra ruota e suolo fa deformare elasticamente la carcassa del pneumatico, che subisce quindi un leggero slittamento nella sua parte più esterna; dobbiamo però notare che la forza laterale, che è quella che permette il controllo della traiettoria, è proporzionale al valore del tasso di slittamento (ciò accade per valori piccoli dello stesso) e raggiunge il valore critico molto prima su bagnato che su asciutto .

Ad 80 km/h su strada bagnata la forza laterale si riduce di circa il 25% rispetto alle condizioni di asciutto. A 140 km/h c'è una notevole ulteriore riduzione della forza laterale tanto più quanto aumenta l'altezza del velo d'acqua.

Questo rende conto della facile perdita di controllo dell'autoveicolo per improvvise e brusche sterzature ad elevata velocità su strada bagnata.

Per quanto riguarda la frenatura si evidenzia un fenomeno estremamente insidioso: per bassi valori del tasso di slittamento delle ruote, quali si riscontrano in condizioni di marcia normali, non esiste praticamente alcuna sostanziale differenza di comportamento fra le condizioni di asciutto e bagnato.

Ciò fa sì che il guidatore medio si trovi impreparato ad affrontare le ben diverse condizioni di frenatura che si verificano all'aumentare del tasso di slittamento delle ruote fino alla situazione drammaticamente diversa che si verifica a ruote completamente bloccate.

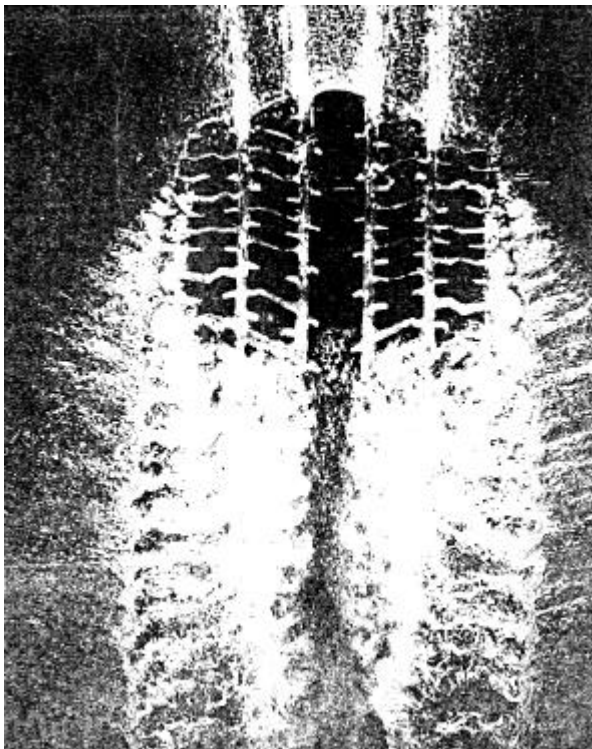


Fig. 27 - Visualizzazione di un pneumatico in aquaplaning parziale.

Il vero problema della strada bagnata è pertanto legato alla particolare condizione di esercizio che porta il guidatore medio a percepire più facilmente le condizioni di guida al limite di aderenza piuttosto che quelle, altrettanto pericolose, di basso coefficiente di

aderenza; in definitiva il calo del livello di aderenza non viene percepito in condizioni di marcia normale per cui il guidatore non è indotto ad adottare quelle misure precauzionali (riduzione della velocità, aumento della distanza di sicurezza) che meglio predispongono al controllo del veicolo in caso di manovra di frenatura o di sterzata

In virtù di tali considerazioni, si evidenzia come l'obiettivo dell'aumento della sicurezza in caso di pioggia non può essere altro che quello di avvicinare le prestazioni del veicolo alle aspettative del guidatore; ciò, dal punto di vista, dell'ingegnere stradale, è perseguibile attraverso l'aumento dell'offerta di aderenza in condizioni di strada bagnata; in effetti, come si è già avuto modo di far notare, le moderne tendenze costruttive si stanno orientando verso una specializzazione degli strati costituenti la pavimentazione, affidando la portanza agli strati inferiori, dimensionati in maniera tale da non richiedere alcuna manutenzione per un periodo di 20-30 anni, ed assegnando allo strato di usura (a mezzo di nuove tecniche di confezionamento del conglomerato bituminoso, tra le quali spicca il conglomerato bituminoso drenante) il ruolo di garantire le migliori condizioni di aderenza.

Tornando a considerare la tabella di figura 20, si deve notare come compaia una tipologia "nuova" di tessitura accanto alle "tradizionali" micro e macro tessitura; si tratta della megatessitura che può presentarsi sotto forma di degradazioni del rivestimento: fessurazioni a "pelle di coccodrillo", piccole buche, desquamazioni, striature, ecc..

Ma essa spesso può presentarsi, anche nel caso di strati superficiali in buono stato o di moderna realizzazione, come sottoprodotto del processo di ottenimento della macro-tessitura: una spanditura doppia di ghiaietto, un conglomerato bituminoso o cementizio non ben dosato, possono offrire ai pneumatici una superficie di contatto irregolare dovuta ad una mancanza di omogeneità della macro-tessitura.

La megatessitura può essere infine generata dalle stesse tecniche di posa: si possono infatti talvolta osservare, sulla superficie stradale realizzata in conglomerato cementizio, delle piccole ondulazioni trasversali o altri tipi di ondulazioni dovute verosimilmente alle vibrazioni della macchina di posa, all'azione della barra lisciatrice o ad altri fattori e circostanze particolari.

Per quanto riguarda l'irregolarità superficiale, osserviamo che lo studio di questa caratteristica è molto importante al fine della sicurezza di un dato tratto stradale.

Nelle irregolarità superficiali rientrano i difetti superficiali "di ampia scala": avvallamenti, ondulazioni, dislivelli (dovuti ad un adattamento topografico od a un'evoluzione "patologica" degli strati di fondazione e/o superficiali). Secondo la natura dei difetti superficiali, le forze che si generano sul veicolo possono dar luogo a moti parassiti (ad es. amplificazione del moto di rollio o di beccheggio).

In curva, ad esempio, il veicolo è fortemente sollecitato, e le irregolarità superficiali sono tanto più pericolose dal momento che i moti generati danno luogo ad una ripartizione irregolare degli sforzi sulle ruote causando una destabilizzazione del veicolo e rendendo, di conseguenza, la sua traiettoria più difficile da controllare.

E' pertanto necessario prendere ogni precauzione tecnica possibile, affinché tali irregolarità superficiali non si verifichino, o almeno siano ridotte al minimo.

Purtroppo, si nota frequentemente come manti superficiali perfettamente rullati all'atto della loro realizzazione, assoggettati ai carichi di traffico, dopo un certo intervallo di tempo cominciano a presentare ondulazioni sempre più marcate che alla fine compromettono l'integrità del manto stradale.

Le cause di questi fenomeni hanno diversa origine, ad esempio:

- ◆ cattivo comportamento delle fondazioni e/o degli strati di base;
- ◆ scarsa omogeneità dello strato di conglomerato posto in opera;
- ◆ uso di macchinari non dotati di tutte quelle predisposizioni atte a dare, in opera, il manto finito perfettamente omogeneo ed accuratamente livellato.

Se in uno stesso manto stradale si presentano due zone caratterizzate da conglomerati di caratteristiche e composizioni diverse, è evidente che, sia l'operazione di rullatura che il traffico agiranno su questi due campioni di conglomerato, allo stesso modo solo all'inizio. In realtà, nel tempo, la differenza di caratteristiche intrinseche comporta, come conseguenza, la formazione di un'onda che a sua volta induce sul traffico una sollecitazione verticale alla quale segue, per reazione, un impatto violento che provoca la formazione di nuove ondulazioni, fessurazioni, ed il dissesto della strada.

Se facciamo riferimento alla schematizzazione riportata in figura 19 e ci ricordiamo che la frequenza è data dal rapporto tra la velocità del veicolo e la lunghezza d'onda teorica del profilo stradale, possiamo valutare i livelli di frequenza ai quali è soggetto il veicolo.

In funzione della loro importanza (altezza e lunghezza) e della velocità del veicolo, le irregolarità superficiali agiranno (messa in vibrazione) al livello di frequenza della massa sospesa (scocca), influenzando il comfort di marcia, al livello della massa non sospesa (sistema ruote/sospensioni) o dei pneumatici, influenzando la sicurezza a causa del deterioramento del contatto pneumatico-pavimentazione (quest'ultimo livello di risonanza, non essendo avvertito dall'utente, può essere estremamente pericoloso).

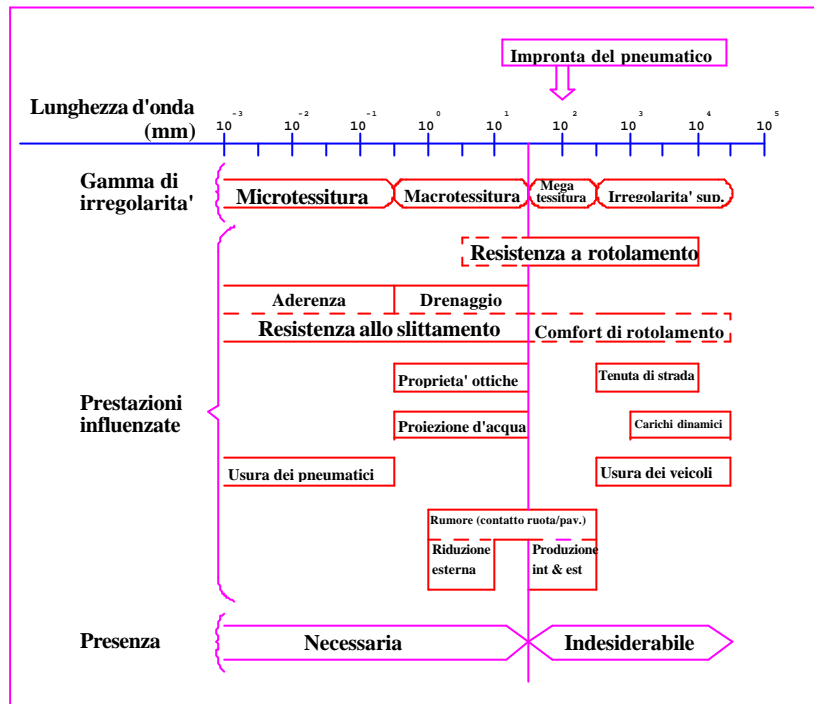


Fig. 28 - Influenza della gamma di irregolarità superficiali sui fenomeni di interazione tra veicolo e strada (AIPCR 1987).

Gli intervalli di frequenza da prendere in considerazione sono: da 0.3 a 3 Hz sulla scocca dell'autoveicolo, da 3 a 6 Hz sull'insieme ruota-pavimentazione, valori maggiori di 6 Hz sui pneumatici.

Osserviamo inoltre che nel corso del Simposio Internazionale dal titolo "Sviluppo stradale e sicurezza" tenutosi nel 1989 in Lussemburgo sono stati presentati i risultati relativi alle differenti prestazioni dei rivestimenti superficiali in funzione delle lunghezze d'onda critiche delle irregolarità superficiali (Fig. 28 e Fig. 29).

Questo approccio, reso possibile dagli studi recenti - che, grazie all'utilizzazione di metodi di misura profilometrici moderni, hanno messo in evidenza il ruolo della mega-tessitura, fino

ad allora ignorato - permette di risolvere gli apparenti conflitti tra certe questioni in merito di aderenza ed altre relative invece alla qualità del rotolamento (rumore, vibrazioni, resistenza al rotolamento) che sembravano dover imporre delle specificazioni contraddittorie in materia di macro tessitura. In effetti, la Fig. 29, evidenzia come gli effetti indesiderabili spesso imputati alla macro tessitura sono, di fatto, dovuti alla megatessitura. In definitiva, esistono due categorie di difetti superficiali; una la cui presenza è necessaria (micro e macro tessitura), l'altra la cui presenza è indesiderabile (megatessitura e difetti di regolarità); la frontiera tra le due classi si situa intorno ai 50 mm di lunghezza d'onda.

Anche il caso dei manti drenanti (per il quale si rimanda al paragrafo successivo) può essere incluso in questo schema generale, a condizione che la funzione della macro tessitura sia assolta dalla porosità (assimilabile ad una macro tessitura inversa).

	Tessitura			Regolarità superficiale
	Micro	Macro	Mega	
Resistenza allo slittamento	+	+		
Tenuta di strada				-
Proiezione d'acqua		+		
Riflessione		+		
Carichi dinamici				-
Usura dei veicoli				-
Usura dei pneumatici	-			
Resistenza al rotolamento		(-)	-	(-)
Vibrazioni (all'interno)			(-)	-
Rumore (interno)			-	
Rumore (esterno)		+	-	

Fig. 29 - Relazioni tra prestazioni e caratteristiche dei rivestimenti. Le influenze favorevoli e quelle sfavorevoli sono indicate rispettivamente con i segni + e - .

Le parentesi denotano influenze meno importanti o controverse.

5. I manti drenanti.

I cosiddetti “manti drenanti” (in conglomerato bituminoso aperto) rientrano nell'ottica della sicurezza attiva, dovendo assolvere il compito di allontanare l'acqua dalla superficie stradale e di ridurre quindi la pericolosità della strada.

In Italia i manti drenanti hanno trovato il loro maggiore sviluppo in campo autostradale, inizialmente in tratti particolarmente pericolosi e, successivamente, per la realizzazione di interi lotti di manto di usura.

Molto modesto è stato finora l'impiego di questo particolare tipo di conglomerato bituminoso aperto nelle strade statali e provinciali e in campo urbano dove, peraltro, oltre ai vantaggi derivanti dalla sua capacità drenante potrebbero essere molto valorizzate anche le sue proprietà fonoassorbenti.

Il manto drenante richiede però maggiori attenzioni, e quindi maggiori investimenti, rispetto a quello chiuso di tipo tradizionale, sia in fase di studio che durante la preparazione del piano di posa, la produzione all'impianto e la stesa, e ciò potrebbe essere alla base del suo limitato impiego in settori diversi da quello autostradale. Inoltre, l'efficacia del drenaggio nel tempo può essere compromessa dalla demolizione, con successiva ricostruzione, di parti della sovrastruttura stradale, soprattutto quando questa taglia la pavimentazione in direzione longitudinale come succede, purtroppo frequentemente, in campo urbano durante gli scavi per la posa o la manutenzione di cavi e/o tubazioni situate sotto la strada.

La particolare natura ed il maggiore costo del manto drenante impongono quindi molta cura in fase di studio, nella scelta dei materiali, prima e durante la realizzazione e per tutta la vita utile della pavimentazione, ma non dovrebbero costituire un freno allo sviluppo di un'applicazione di così alto valore in termini di sicurezza. Passando a considerazioni di natura tecnica, osserviamo che come tutti gli strati superficiali a base bituminosa, il conglomerato aperto è costituito da tre componenti: inerti, legante, aria.

Riguardo i leganti utilizzati per il confezionamento dei manti drenanti si possono utilizzare sia i bitumi puri sia i bitumi modificati con l'aggiunta di fibre, polimeri o gomma.

Nella maggior parte dei paesi europei si usa bitume di penetrazione 60-70 anche se, in certi casi, si può utilizzare bitume 40-50 o 80-100.

L'aggiunta di fibre o di gomma incrementa la viscosità del legante, consentendo l'aumento dello spessore di bitume sugli inerti al fine di migliorare la durata del manto, ridurre il pericolo di ormaiamento ed evitare il rischio che il legante si separi o coli durante la fase di trasporto o di posa; l'aggiunta di polimeri -i cui tipi più comuni sono gli elastomeri

termoplastici SBS (Stirene-Butadien-Stirene) e i copolimeri EVA (Etilene-Vinile-Acetato)-provoca l'incremento delle proprietà elastiche, una minore suscettività termica, maggiore adesività e miglior comportamento alle basse temperature.

L'aria è contenuta nei pori, o vuoti, fra inerti ricoperti di legante.

Ci sono tre tipi di vuoti:

- ◆ vuoti “attivi”: intercomunicanti fra di loro, permettono la raccolta e il drenaggio dell'acqua;
- ◆ vuoti “semiattivi”: hanno la sola funzione di trattenere l'acqua se le dimensioni sono sufficienti;
- ◆ vuoti “inattivi”: sono le inclusioni di aria non in contatto tra loro.

Per poter agire efficacemente il conglomerato aperto deve avere un'elevata percentuale di vuoti attivi (20% o più) comunicanti tra loro per almeno il 75% del totale.

Per ottenere un contenuto di vuoti del 20% o più, gli inerti devono contenere un'alta percentuale di pietrischetto da 6 a 10 mm o da 10 a 14 mm ed una bassa percentuale di sabbia. In queste condizioni le prove normalizzate con il permeometro a carico variabile hanno evidenziato una capacità di drenaggio in meno di 25 secondi di un volume d'acqua di 1400 cc attraverso una sezione di 30 mm di diametro.

Come è evidente, in queste condizioni l'acqua non scorre più sulla superficie stradale ma penetra all'interno dello strato d'usura per scorrere lungo il piano di attacco impermeabile con lo strato sottostante.

Si capisce quindi che non è sufficiente realizzare un'elevata percentuale di vuoti ma è necessario seguire l'acqua lungo il suo percorso fino allo scarico nelle cunette laterali per evitare l'eventuale saturazione dei vuoti e quindi l'inefficacia del sistema. E' evidente che, se il meccanismo di funzionamento del manto drenante fosse perfetto e non si verificassero problemi di intasamento dei vuoti, allora si assicurerebbe sempre l'assenza di qualsiasi velo d'acqua sulla pavimentazione e si raggiungerebbe l'obiettivo di offrire le stesse condizioni di aderenza con e senza pioggia.

In sintesi, gli obiettivi che si perseguono attraverso l'eliminazione dello strato d'acqua superficiale sono:

- eliminazione della nebulizzazione (spray);

- aumento della resistenza allo slittamento;
- riduzione dell'abbagliamento da riflesso sulla superficie bagnata.

Inoltre il conglomerato aperto riduce in modo significativo il rumore dovuto al rotolamento, cioè il rumore generato dal contatto fra pneumatici e pavimentazione, il quale gioca un ruolo importante nel rumore complessivo del traffico specialmente quando la velocità del mezzo supera i 50-60 km/h.

Il rumore provocato dal contatto pneumatici-strada dipende dal tipo di pneumatici usati (forma del battistrada, conformazione delle scanalature ecc.) e dal tipo di pavimentazione ed è causato dai seguenti tre fattori:

- "rumore di impatto": è generato dall'impatto del battistrada sulla superficie e la sua intensità dipende dal disegno del battistrada, dal tipo di inerte usato e dalla macrotestitura dello strato;
- "pompaggio dell'aria": è dovuto essenzialmente alla vibrazione dell'aria compressa fra i tasselli del battistrada per effetto della deformazione del pneumatico;
- "slip and stick": è simile all'effetto di risucchio ed è dovuto all'aggrappamento del pneumatico sugli inerti dello strato superficiale della pavimentazione stradale.

Il rumore generato dal contatto strada-pneumatici dipende in gran parte dalla granulometria del pietrisco del manto di usura.

Non è facile ridurre il rumore generato dal contatto superficie stradale-pneumatici perché la riduzione dell'effetto di uno di questi fattori può aumentare l'effetto degli altri due. Ad esempio, una superficie molto liscia potrebbe ridurre il rumore d'impatto ma aumenterebbe il rumore dovuto all'effetto "slip and stick" e avrebbe caratteristiche di resistenza allo slittamento del tutto insoddisfacenti.

In quest'ottica, il manto drenante rappresenta lo strato superficiale che garantisce il più basso livello di rumore; ciò è fondamentalmente dovuto alla specializzazione dello strato drenante come setto assorbente di particolari frequenze: questo può avvenire, ad esempio, sagomando il piano d'appoggio del manto di usura con una serie di concavità rivolte verso l'alto, che diventano selettive nell'assorbimento delle frequenze volute.

Oltre ad un minor rumore di rotolamento, il conglomerato bituminoso aperto offre altri effetti positivi dovuti all'assorbimento delle vibrazioni da parte della conformazione stessa del manto superficiale stradale:

- si evita il fenomeno delle riflessioni multiple (i cosiddetti riverberi) fra i pneumatici e la pavimentazione o fra il pianale della vettura ed il terreno;
- l'energia che penetra nel conglomerato può essere dissipata gradualmente per rifrazione fra i granuli di pietrisco. Più complesso è il percorso delle onde sonore nella massa, tanto maggiore risulta essere l'assorbimento.

E' stato visto sperimentalmente a mezzo di misure audiometriche, che il livello di rumore emesso, riferito a manti di usura in conglomerato bituminoso aperto, risulta essere generalmente inferiore di 2-3 dB(A) rispetto a quello relativo ai manti in conglomerato chiuso.

6. Studio dell' aderenza trasversale.

Lo studio delle problematiche legate all'aderenza trasversale (o laterale) risulta “più giovane” di quello relativo all'aderenza longitudinale.

Il motivo di questa “genesi ritardata” è da ricercarsi nell'origine stessa degli studi di aderenza.

Infatti, le problematiche relative al fenomeno dell'aderenza si sono sviluppate, per la prima volta, nel caso dei veicoli su rotaia, per i quali, l'aderenza interessa essenzialmente per trasmettere alla via forze longitudinali (in direzione del moto), in quanto le forze trasversali (normali al moto) sono trasmesse da un apposito organo di guida (bordino della ruota).

E' evidente quindi che l'aderenza trasversale, nel caso ferroviario, assuma un ruolo secondario rispetto all'aderenza longitudinale (non è tuttavia irrilevante, in quanto importa agli effetti della resistenza in curva); mentre, nel caso dei veicoli su gomma, acquista un'importanza pari a quella dell'aderenza longitudinale, in quanto, proprio all'aderenza è affidata la funzione di guida.

7. Forze scambiate in senso trasversale: effetti della deriva dei pneumatici sulla marcia curvilinea degli autoveicoli.

Una ruota rotolante quando è sottoposta, oltre al carico verticale P , ad una forza trasversale F_y devierà dalla direzione originaria (x), muovendosi secondo una direzione x' inclinata rispetto ad x di un angolo ϵ , detto *angolo di deriva* o semplicemente *deriva* (Fig. 30).

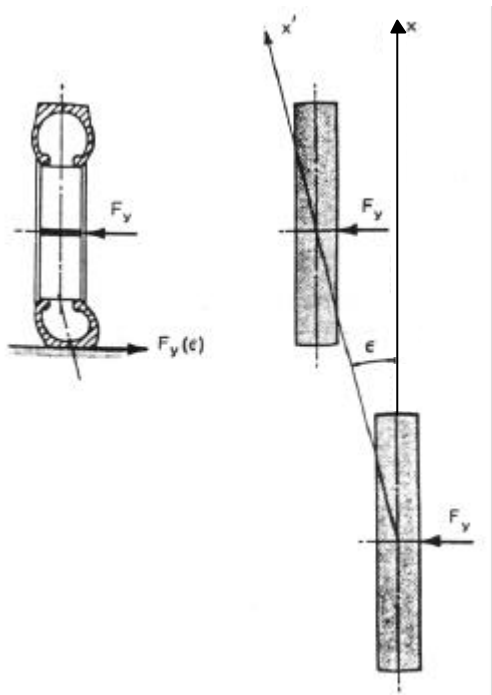


Fig. 30 - Fenomeno di deriva del pneumatico.

La relazione fra angolo di deriva ϵ e forza trasversale F_y è descritta dalle curve sperimentali di figura 31.

Si può notare come, fino ad un certo valore di ϵ (dipendente dalle caratteristiche del pneumatico, dal carico sulla ruota, dalla pressione di gonfiaggio, ecc.) esista un rapporto di proporzionalità fra la forza trasversale e l'angolo di deriva. Poi, raggiunto il valore limite F_{ay} , gli angoli di deriva crescono rapidamente fino ad una condizione di slittamento totale ($\epsilon = 90^\circ$).

F_{ay} si definisce limite di aderenza trasversale; possiamo inoltre definire il coefficiente di aderenza trasversale (CAT) o Sideway Force Coefficient (SFC):

$$f_y = \frac{F_{ay}}{P}$$

La differenza di comportamento, rilevata sperimentalmente, tra pneumatici radiali e convenzionali può essere così interpretata, tenendo presente le differenti caratteristiche elastiche dei due tipi: i pneumatici radiali sono più deformabili dei convenzionali, soprattutto sui fianchi; a parità di forza laterale F_y hanno inizialmente una deriva minore in quanto si adattano meglio al terreno, ma, proprio a causa della minore rigidezza, raggiungono più rapidamente la condizione limite; viceversa i pneumatici convenzionali si adattano meno bene al suolo e quindi presentano angoli di deriva maggiori in relazione alla forza laterale applicata, ma raggiungono lo slittamento per angoli più elevati.

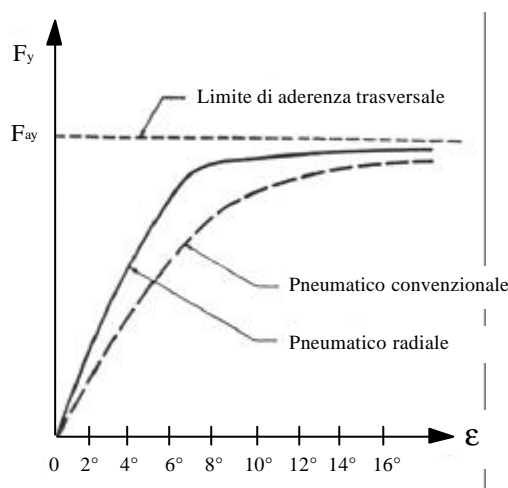


Fig. 31 - Andamento schematico della forza F_y con l'angolo di deriva per un pneumatico radiale e per uno convenzionale.

Le modalità attraverso cui si esplica il meccanismo di aderenza trasversale risultano palesemente analoghe a quelle relative all'aderenza longitudinale: anche in questo caso, infatti, si parlerà di aderenza trasversale fino a che sussiste la proporzionalità tra forza ed angolo di deriva (fase stabile del fenomeno); oltre, non si può più parlare di deriva, bensì di vero e proprio slittamento laterale (fase instabile del fenomeno). La differenza della forma della curva $F_y(\epsilon)$ di figura 31 rispetto a quella $F_y(s)$ di figura 6 (relativa a pavimentazione non scivolosa) e di figura 7 (relativa a suolo scivoloso) dipende essenzialmente dal meccanismo del movimento trasversale (deriva) rispetto a quello longitudinale (scorrimento). Infatti il moto lungo l'asse x avviene con il normale rotolamento

in presenza di deformazioni del pneumatico, longitudinali (cioè secondo la direzione di x) che producono lo scorrimento s e trasversali se agisce anche la forza F_y (secondo l'asse y , quindi perpendicolari alla direzione del moto) che producono la deriva.

Le prime, di scorrimento, possono crescere fino ad un valore limite che dipende dal combaciamento degli elementi della ruota a contatto con il suolo mentre le seconde, di deriva, dipendono dalle successive deformazioni laterali del pneumatico e quindi dalla elasticità della gomma, fino al raggiungimento del limite della forza di combaciamento pneumatico-pavimentazione dopodiché si entra progressivamente nel campo dell'attrito radente.

Per quanto riguarda il coefficiente di aderenza trasversale (f_y), esso dipende, ovviamente, dalle caratteristiche sia del pneumatico sia della strada e l'esperienza ha dimostrato che esso non si discosta di molto (come ordine di grandezza) dal corrispondente valore di f_x ricavato nelle medesime condizioni; rileviamo, a tal proposito come, dal confronto tra risultati ricavati a mezzo di regressioni non lineari su numerose misure sperimentali, sia stata recentemente ricavata la seguente relazione sperimentale tra i coefficienti f_x ed f_y :

$$f_y = 0.925 \cdot f_x$$

Volendoci soffermare ad esporre alcuni valori numerici del coefficiente f_y osserviamo, in primo luogo, come recenti osservazioni sperimentali abbiano evidenziato, nel caso di buoni manti e di basse velocità, valori del CAT compresi tra 0.5 e 0.7. Il coefficiente f_y scende a valori compresi tra 0.35 e 0.40 nel caso di velocità variabili tra 80 e 100 Km/h, fino a ridursi a 0.3 per velocità ancora maggiori.

L' A.A.S.H.O., in base a proprie esperienze, ha assunto per f_y un valore massimo di 0.16 (per velocità di 48 Km/h) ed un minimo di 0.12 (per velocità pari a 112 Km/h) facendo variare i valori intermedi con la seguente legge:

$$f_t = 0.19 - \frac{V}{1609.34} \quad (V \text{ espressa in Km/h}).$$

La scelta di questi valori di f_y , notevolmente inferiori rispetto a quelli menzionati precedentemente, è dovuta anche al fatto che, in tal modo, si vuole tenere conto di una "velocità di moto comodo" cioè una velocità tale da garantire sempre un margine sufficiente rispetto alle condizioni limiti (cioè quelle, estremamente gravose, di perdita d'aderenza).

Quando le condizioni climatiche lo permettono, i valori del CAT possono assumersi più elevati: per esempio tra 0.20 e 0.25 alle basse velocità e tra 0.12 e 0.16 alle velocità elevate (80 - 100 Km/h).

Il C.N.R. suggerisce invece i valori riportati nella tabella di figura 32:

Velocità (km/h)	40	60	80	100	120	140
f_y	0.24	0.17	0.13	0.11	0.10	0.09

Fig. 32 - Valori del coefficiente di aderenza trasversale proposti dal CNR.

Adesso, dopo aver ribadito che gli elementi che definiscono il meccanismo dell'aderenza non sono avulsi gli uni dagli altri, ma sono tra loro dipendenti e collegati da leggi aleatorie al momento ancora oggetto di studi ed approfondimenti, si può ragionevolmente affermare, senza incorrere in semplificazioni eccessive, che il coefficiente f_y è esprimibile attraverso la seguente relazione implicita :

$$f_y = f (V, T^\circ, a, t, i, w, b, c, N, g)$$

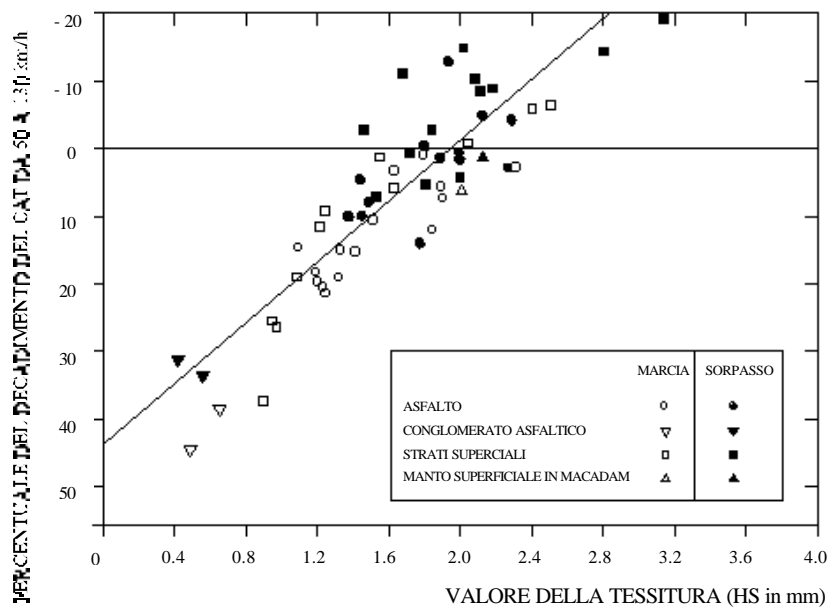
Ove le variabili indicate sono le seguenti :

V: rappresenta il valore della velocità, parametro determinante relativamente alla natura del contatto pneumatico-pavimentazione ed all'aderenza che si sviluppa tra esse. Si può inoltre osservare, a conferma della interdipendenza dei parametri in gioco, che la diminuzione di f_y , stimata in media di 0.01 unità per ogni 4 Km/h di aumento di V, risulta fortemente marcata nel caso di pavimentazioni stradali caratterizzate da rivestimenti con pessime condizioni di micro e macro rugosità, e molto contenuta nel caso di rivestimenti con migliori caratteristiche di tessitura;

T°: rappresenta la temperatura dell'aria e/o della pavimentazione. Le variazioni di temperatura influenzano le proprietà meccaniche del pneumatico (in genere, ad un incremento di temperatura corrisponde un aumento della tenacità propria del pneumatico ed una diminuzione delle perdite per isteresi). Si è visto sperimentalmente che ad ogni incremento di 1 °C di temperatura, corrisponde una riduzione di circa 0.003 unità del valore di f_y ;

a: si riferisce alle proprietà dell'aggregato, il quale contribuisce alle caratteristiche superficiali della pavimentazione, mediante la sua forma, le dimensioni, la durezza, la resistenza al gelo, oltre che con il valore della micro-tessitura ossia la presenza di asperità sulla superficie dell'aggregato. La micro-tessitura, o scabrezza superficiale, funzione della natura petrografica dell'inerte, influenza fortemente la tendenza alla lucidatura della superficie stradale ovvero dell'aggregato stesso, ed è generalmente espressa attraverso il valore del PSV, Polished Stone Value (Norme Bs 812). Tale valore quantifica non solo la scabrezza dell'inerte ma anche il suo mantenimento nel tempo, essendo noto che, a parità di traffico, per ogni unità di cui varia il PSV, il valore del CAT varia di 0.01.

t : indica il valore tessitura ed in particolare della macro-tessitura anch'essa legata direttamente alle caratteristiche dell'inerte. La macro-tessitura della superficie stradale, definita come l'altezza media delle irregolarità del piano viabile aventi lunghezza d'onda compresa tra 0.5 mm e 50 mm (si veda la tabella di figura 20), svolge un ruolo fondamentale nell'influenzare la diminuzione dei valori di aderenza, soprattutto all'aumentare



della velocità (Fig. 33).

Fig. 33 - Decadimento del CAT con la velocità, in funzione dei valori di tessitura.

Nella figura 33, si riporta, da esperienze svolte in Gran Bretagna, la percentuale di decremento del CAT, all'aumentare della velocità da 50 Km/h a 130 Km/h, che si ottiene per diversi tipi di pavimentazioni sia rigide che flessibili;

i: si riferisce alla presenza di polveri, residui della combustione o impurità in genere che attutiscono le asperità sia dell'inerte che della superficie stradale;

w: si riferisce alla presenza di acqua sulla pavimentazione; si è infatti visto sperimentalmente che quando il velo d'acqua sulla strada è eccessivo (oltre 1-2 mm), l'aderenza diminuisce notevolmente, specialmente con pneumatici lisci;

b: riassume le caratteristiche e la percentuale di bitume presente nella miscela. E' importante che il bitume utilizzato sia dosato in modo tale da soddisfare le reali esigenze d'esercizio del manto stradale, in quanto un eccesso di bitume e della pellicola che avvolge gli inerti, avrebbe un effetto fortemente attenuante sui valori della macro-tessitura mentre non porterebbe gravi conseguenze sulla microtessitura, che, sotto traffico, verrebbe rapidamente ripristinata;

c: indica l'influenza del clima e delle caratteristiche pluviometriche del sito;

Gli ultimi due parametri (N e g) tengono conto della variabile traffico, fattore che introduce il problema del decadimento delle caratteristiche di aderenza nel tempo, dovuto alle azioni tangenziali originate al contatto ruota pavimentazione in seguito allo sforzo di trazione esercitato prevalentemente dalle ruote motrici. Le ruote non motrici, infatti, esercitano un'azione tangenziale molto ridotta, provocata dalla trazione necessaria a vincere la sola resistenza al rotolamento.

Pertanto il traffico non interviene direttamente nella misura del valore di f_y , ma è determinante nella definizione delle condizioni di esercizio in cui un prefissato valore di SFC deve risultare garantito.

Con riferimento ai succitati parametri, si ha che :

N: si riferisce alla natura del traffico di esercizio, espresso, per esempio, dal valore del TGM di veicoli pesanti, quale primo fattore che stabilisce la rapidità di decadimento nel tempo delle caratteristiche di rugosità del manto;

g: si riferisce al traffico cumulato, cioè al tempo complessivo di esercizio in particolari condizioni di traffico.

Passiamo adesso a considerare l'influenza della deriva sul moto dei veicoli lungo una traiettoria curvilinea.

Adottiamo la schematizzazione di un veicolo a due assi con un avantreno sterzante A ed un retrotreno fisso P; se ipotizziamo di sterzare l'assale anteriore di un angolo α (Fig. 34) possiamo avere tre comportamenti diversi del veicolo in funzione degli angoli di deriva assunti rispettivamente dall'avantreno e dal retrotreno.

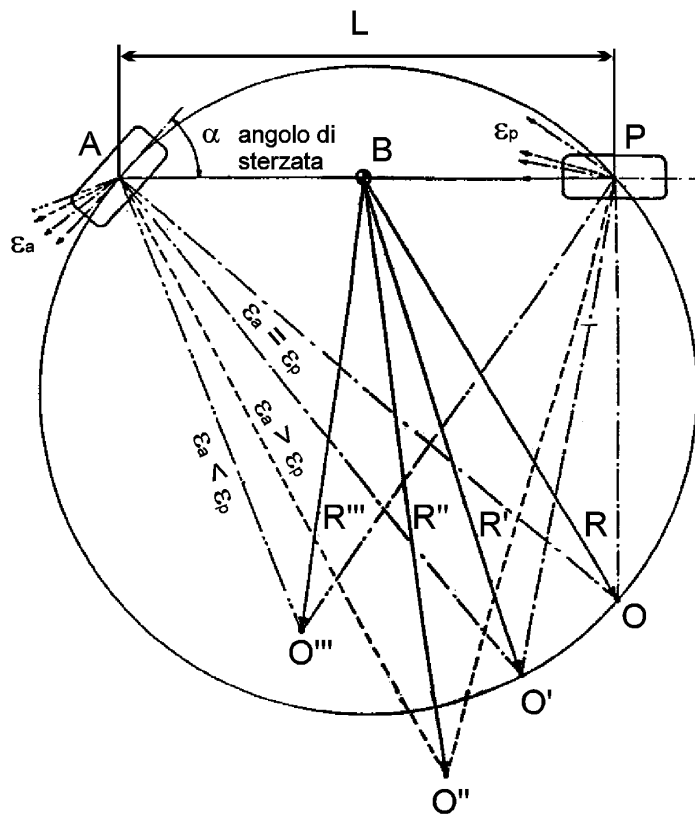


Fig. 34 - Effetto della deriva dei pneumatici sulla marcia curvilinea.

1° caso: deriva dell'avantreno uguale alla deriva del retrotreno.

In questo caso, essendo $\epsilon_a = \epsilon_p$, si può dimostrare che il centro di istantanea rotazione si sposta da O (centro di istantanea rotazione nel caso di sterzata cinematica, cioè senza considerare gli effetti della deriva $\epsilon_a = \epsilon_p = 0$) ad O' (centro di istantanea rotazione nel caso di sterzata dinamica, cioè considerando la deriva) lungo l'arco di cerchio passante per A, P e O.

Se ipotizziamo raggi di curvatura molto ampi, si verifica che $L \ll R$ ed O' è in posizione tale che R è all'incirca pari ad R' .

La precedente osservazione è importante perché evidenzia come il raggio di curvatura del veicolo rimanga invariato in presenza o meno di deriva. In questo caso si dice che il veicolo ha un comportamento neutro (Fig. 35).

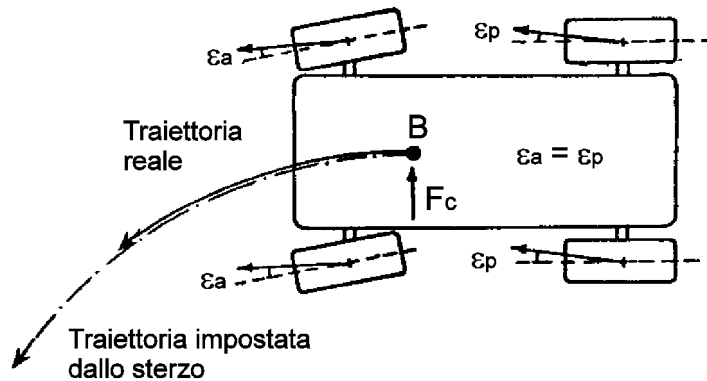


Fig. 35 - Traiettorie di un veicolo con comportamento neutro.

2° caso: deriva dell'avantreno maggiore della deriva del retrotreno..

Svolgendo considerazioni analoghe a quelle del caso precedente, si può dimostrare che se $\epsilon_a > \epsilon_p$ allora anche $R'' > R$.

In questo caso si dice che il veicolo ha un comportamento sottosterzante, cioè tende a percorrere una traiettoria con raggio di curvatura maggiore di quello impostato dallo sterzo (Fig. 36).

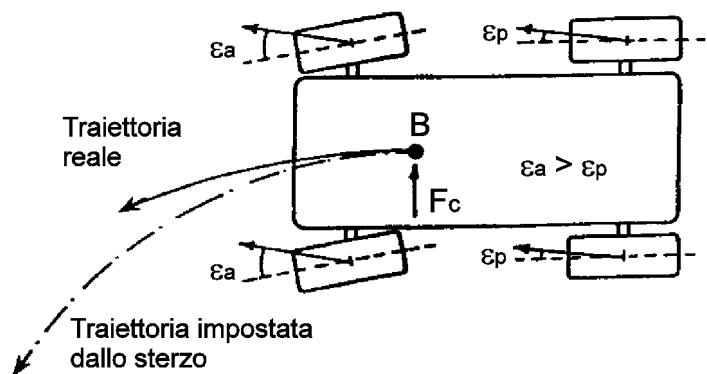


Fig. 36 - Traiettorie di un veicolo con comportamento sottosterzante.

3° caso: deriva dell'avantreno minore della deriva del retrotreno..

Si può dimostrare che se $\varepsilon_a < \varepsilon_p$ allora si verifica $R''' < R$.

In questo caso si dice che il veicolo ha un comportamento sovrasterzante, cioè tende a stringere la traiettoria impostata dallo sterzo (Fig. 37).

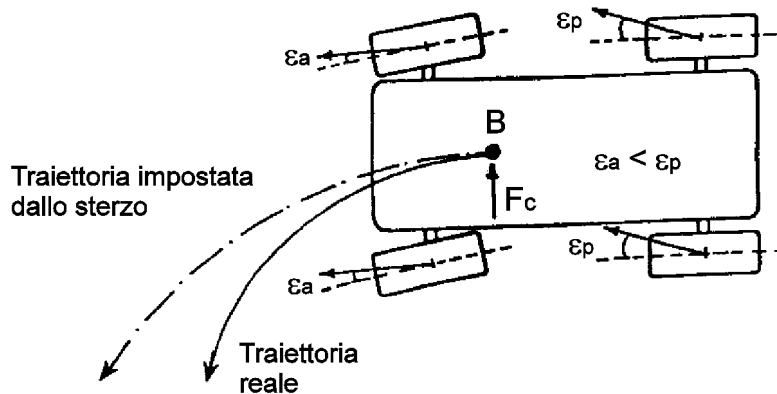


Fig. 37 - Traiettorie di un veicolo con comportamento sovrasterzante.

Si deve osservare come, dei tre comportamenti analizzati, quello sottosterzante sia considerato il più sicuro; ciò essenzialmente per due motivi:

- il veicolo sottosterzante si porta da solo su di una traiettoria più larga che limita automaticamente la forza centrifuga e l'angolo di deriva dei pneumatici anteriori;
- l'eventuale correzione del conducente è naturale ed inconscia, consistendo semplicemente in un incremento dell'angolo di sterzata.

Il sovrasterzo invece è considerato meno sicuro, infatti:

- il veicolo sovrasterzante, poiché tende a percorrere una traiettoria con raggio di curvatura minore di quello impostato dallo sterzo, è soggetto ad un incremento della forza centrifuga e di conseguenza del sovrasterzo, dato che i pneumatici dell'assale posteriore raggiungono più facilmente il loro limite massimo di aderenza;
- tale comportamento è generalmente più difficile da controllare dal conducente medio, poiché in questa situazione sono richieste delle manovre di correzione non sempre naturali, facili e inconsce.

Queste osservazioni giustificano la considerazione del sottosterzo come un fattore di sicurezza passiva e, quasi tutte le vetture di serie sono progettate in maniera tale da avere, in curva, questo comportamento.

Spesso anche vetture che potenzialmente avrebbero un comportamento neutro sono costruite preferendo un leggero sottosterzo.

Infatti, benché teoricamente il comportamento neutro si presenti come il più sicuro, in pratica si è visto che un veicolo con tale caratteristica se inizia a sbandare in curva perde aderenza su tutte e quattro le ruote contemporaneamente; se inoltre si considera la grande difficoltà di ripresa con le normali manovre si comprende facilmente come la neutralità di un veicolo in curva sia un potenziale pericolo.

Si deve poi osservare, che le notevoli prestazioni dei veicoli a comportamento neutro, portano a percorrere le curve a velocità maggiori che non con un veicolo sotto o sovrasterzante.

Non è inutile, infine, rilevare come gran parte degli interventi mirati ad ottimizzare il comportamento in curva del veicolo (aumentando, ad esempio, il comportamento sottosterzante) si basano su modifiche del sistema sospensivo (interventi sugli ammortizzatori, sulla rigidità degli elementi elastici, sulla convergenza, sulla campanatura, ecc.).

Non si deve però pensare che se un veicolo viene progettato in maniera tale da presentare preferibilmente un comportamento particolare in curva, esso rimanga tale in tutte le situazioni; infatti, in realtà, può capitare che se un veicolo presenta, per esempio, un comportamento in curva tendenzialmente sottosterzante può, in certe situazioni, diventare neutro o anche sovrasterzante.

8. Metodi ed apparecchi di misurazione dell'aderenza.

Le apparecchiature ed i metodi di misura dei valori di aderenza si possono suddividere in due categorie tra loro differenti.

- la prima consente di determinare direttamente i valori di aderenza impegnabile sulla superficie di una pavimentazione;

- la seconda consiste nella misurazione di parametri che condizionano questi valori (principalmente la tessitura superficiale e le caratteristiche di regolarità della superficie stessa).

L'obiettivo che ci prefiggiamo è, pertanto, quello di analizzare sinteticamente gli apparecchi di misura appartenenti ad entrambe le categorie, evidenziandone, più che le caratteristiche tecniche, il principio di funzionamento ed i limiti di validità dei risultati ottenibili.

9. Apparecchi di misurazione dell'aderenza impegnabile.

Numerose sono le attrezzature utilizzabili per la misura dell'aderenza impegnabile; le principali sono le seguenti:

Strumento portatile per misure puntuali - Skid Tester

E' l'apparecchio più comune e più utilizzato in Italia .

Esso consiste in un pendolo dotato all'estremità di un pattino di gomma che striscia sulla superficie della pavimentazione in precedenza inumidita (Fig. 38).

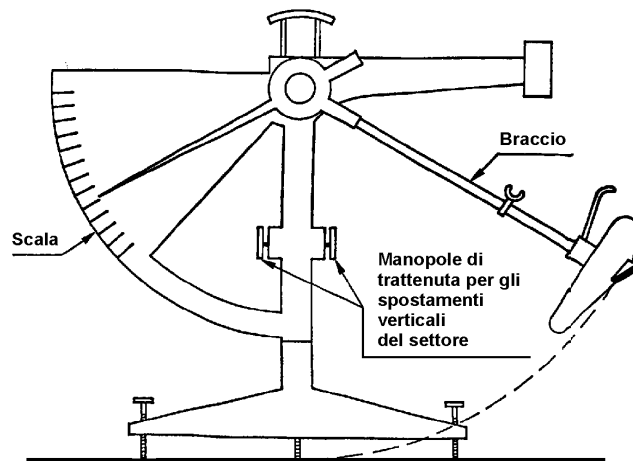


Fig. 38 - Apparecchio Skid Tester.

La differenza in altezza del centro di gravità della estremità strisciante, tra la posizione orizzontale di inizio prova e quella più alta raggiunta dopo il rilascio, è utilizzata per calcolare la perdita di energia dovuta a fenomeni di attrito.

Le condizioni della prova, che devono essere attentamente controllate, sono state scelte in modo tale che i valori letti su di una scala tarata presente nello strumento corrispondano a valori di attrito di un pneumatico dotato di battistrada che slitti ad una velocità di 50 Km/h.

La misurazione è condotta, con la superficie della pavimentazione bagnata secondo modalità standardizzate, effettuando numerose prove intervallate di 5-10 m al fine di poter ottenere un valore medio.

I principali vantaggi di questo strumento sono la sua portatilità e semplicità. È particolarmente utile nelle ricerche di laboratorio per lo studio di superfici resistenti allo scivolamento ed è di interesse per il tecnico stradale al fine di valutare l'aderenza nei punti di potenziale incidentalità.

Lo skid tester presenta però il grosso limite di basarsi su una specifica simulazione (pneumatico che slitta alla velocità di 50 km/h), lasciando fuori gran parte delle situazioni di rischio potenzialmente verificabili a velocità più elevate. Per di più i valori di aderenza che possono essere valutati sono associati al singolo pneumatico, e questo è sicuramente un principio valutativo estremamente limitato, in quanto non tiene conto di tutti gli elementi che entrano in gioco nell'assetto dell'autoveicolo.

Infatti, come più volte osservato, l'analisi più corretta delle condizioni di aderenza dovrebbe basarsi sullo studio del veicolo nel suo complesso, tenendo conto soprattutto del fatto che esso è dotato di meccanismi "elastici" come le sospensioni e le ruote le quali, a loro volta, sopportano carichi che possono essere anche notevolmente differenti tra una ruota e l'altra a seconda della configurazione geometrica del tracciato; tutto ciò si ripercuote evidentemente sul meccanismo di scambio di forze tra veicolo e pavimentazione, e quindi sull'aderenza.

È chiaro pertanto che, soprattutto nel caso di traiettorie curvilinee, è impensabile poter fare affidamento ad una simulazione che tenga conto di un solo pneumatico escludendo del tutto le problematiche legate alla stabilità del veicolo stesso.

È importante notare che, su questo punto, possiamo muovere critiche analoghe anche nei confronti di apparecchiature di misura ben più complesse e sofisticate (SCRIM, SUMMS), in quanto, come vedremo tra breve, anch'esse forniscono valori di aderenza relativi al singolo pneumatico.

Misure di distanza di arresto

Alle apparecchiature in grado di fornire questi valori, appartiene il Diagonal Braked Vehicle (DBV) della Federal Aviation Administration. Esso misura le distanze necessarie all'arresto di un veicolo dotato di una certa velocità (95 km/h) in riferimento ad una sezione fissata.

Per valutare l'aderenza impegnabile di una pavimentazione devono essere condotte delle prove sia in condizioni asciutte che bagnate .

Viene quindi calcolato un coefficiente pari al rapporto tra la distanza di arresto in condizioni bagnate e la distanza di arresto in condizioni asciutte.

Misure del coefficiente di frenata (Braking Force Coefficient, BFC)

Originariamente si utilizzavano veicoli dei quali si misurava il momento frenante necessario a bloccare le ruote e a portarle in una fase di completo slittamento.

Successivamente sono state realizzate diverse attrezzature trainate.

Dalla misura dei momenti frenanti si ottiene la forza esplicitata fra pneumatico e pavimentazione che viene espressa come percentuale del carico verticale agente sulla ruota.

Durante le prove, la ruota trainata viene bloccata per periodi di circa due secondi e quindi rilasciata per ottenere una serie di misure isolate piuttosto che una registrazione continua.

Apparecchi “a ruota bloccata” per il calcolo dell'aderenza longitudinale

Si tratta di attrezzature derivanti direttamente da quelle analoghe utilizzate in campo ferroviario; c'è un carrello provvisto di ruota che viene bloccata gradualmente mediante il progressivo aumento dello sforzo frenante. Un dispositivo di misura consente la valutazione, istante per istante, della forza F_x trasmessa nel contatto ruota-terreno. E' così possibile determinare sia il coefficiente di aderenza longitudinale che il coefficiente di attrito radente (o cinetico).

Apparecchi a ruota inclinata per il calcolo dell'aderenza trasversale

Si tratta di apparecchi per la determinazione del coefficiente di aderenza trasversale f , caratterizzati da una ruota rotolante orientabile con un angolo di deriva obbligato, mentre un dinamometro registra la forza F_y normale al piano della ruota.

Appartengono a questa categoria lo SCRIM ed il SUMMS.

L'apparecchiatura SCRIM (Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine) consente la rilevazione sistematica delle caratteristiche di aderenza trasversale di un manto stradale in presenza d'acqua.

Il mezzo consiste in un autocarro sul quale è posizionato il complesso di misura, costituito da una ruota gonfiata alla pressione di 3.5 kg/cm^2 , dotata di caratteristiche di resilienza standard, libera di ruotare intorno all'asse di calettamento, inclinata di 20° rispetto alla direzione del moto e caricata mediante una massa sospesa di 200 kgp (Fig. 39).

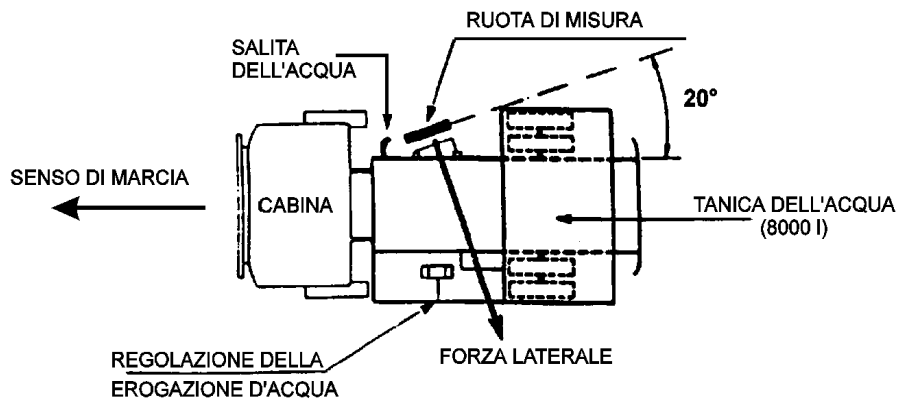


Fig. 39 - Apparecchiatura SCRIM per la misura del CAT.

Un dispositivo d'innaffiamento consente il controllo manuale dell'erogazione dell'acqua in funzione della velocità di prova al fine di garantire la presenza di un velo d'acqua, di fronte alla ruota di misura, di spessore rigorosamente costante e non inferiore a 0.5 mm.

Per tale ragione il flusso dell'acqua all'uscita della cisterna non deve essere minore di 0.95 l/sec, fino ai 60 km/h corrispondenti alla velocità di prova.

Quando la ruota, libera di ruotare ed opportunamente orientata, viene posta attraverso un idoneo sistema idraulico che ne controlla i movimenti indipendentemente da quelli del mezzo, a contatto con la pavimentazione, in corrispondenza dell'area di contatto si genera una forza N , ortogonale al piano di rotolamento corrispondente alla componente trasversale dell'aderenza tra ruota e pavimentazione, rilevabile, in modo continuo, in corrispondenza del mozzo della ruota mediante idonei trasduttori di pressione.

Un complesso molla-ammortizzatore permette alla ruota, di mantenere un contatto assolutamente continuo con la superficie della pavimentazione.

Per riguarda il SUMMS (Sunvey Machine for Macrotexture and Skid), osserviamo che si tratta di un'attrezzatura che consente di valutare le condizioni di aderenza di una

pavimentazione attraverso la misura contemporanea del CAT a 60 km/h e della macrorugosità

Il SUMMS dal 1987 e prima ancora lo SCRIM dal 1982 sono impiegati sulla rete autostradale acquisendo 100 misure per chilometro ad una velocità di 60 km/h, velocità che permette di realizzare una capacità di lavoro oraria di circa 6000 misure.

Il valore del CAT viene ricavato, allo stesso modo dello SCRIM misurando, con una cella di pressione, la forza agente perpendicolarmente al piano medio di una ruota di misura dotata di pneumatico liscio standard, mentre tale ruota rotola sulla superficie stradale preventivamente irrorata con una quantità d'acqua prefissata.

Il rapporto, espresso in percentuale, fra il valore di tale forza ed il valore del carico verticale agente sulla ruota stessa rappresenta la misura di SFC.

La traccia del piano medio della ruota di misura viene mantenuta inclinata, rispetto all'asse longitudinale del veicolo sul quale tale ruota è montata, di un angolo costante; in tali condizioni il rotolamento del pneumatico è assicurato dalla presenza di una forza agente perpendicolarmente al piano medio della ruota, che produce un angolo di deriva pari all'angolo suddetto. Per quanto riguarda la macrorugosità, definita come altezza media delle irregolarità del piano viabile di lunghezza d'onda compresa fra 0,5 e 50 mm, la misura viene effettuata in velocità con un dispositivo a laser montato sullo stesso veicolo.

Il tipo di laser montato in un primo tempo sul veicolo ha dimostrato un comportamento poco affidabile, recentemente esso è stato sostituito con un nuovo tipo.

Il SUMMS ha la particolarità di montare i dispositivi di misura in doppio disposti cioè su entrambi i lati del veicolo, in tale modo è possibile effettuare contemporaneamente misure di SFC e di macrorugosità nelle due "Wheel path" di ciascuna corsia.

Osserviamo nuovamente che entrambi i dispositivi ora citati presentano l'inconveniente di far riferimento a valori di aderenza che si discostano da quelli che si avrebbero considerando l'effettivo assetto del veicolo soprattutto nel caso di traiettorie curvilinee; il SUMMS, però presenta, la possibilità di valutare il CAT contemporaneamente in due fasce longitudinali della pavimentazione; ciò è un indubbio vantaggio rispetto allo SCRIM, anche se ancora siamo lontani dalle reali condizioni di aderenza relative al veicolo "a quattro ruote".

Notiamo infine che i valori del CAT misurati dal SUMMS presentano una variabilità che dipende fondamentalmente da tre categorie di fattori:

- 1) Fattori che possono essere individuati fissando le condizioni operative: caratteristiche e pressioni di gonfiaggio del pneumatico di misura, carico verticale applicato, angolo della ruota rispetto alla direzione di marcia, altezza d'acqua sulla pavimentazione, velocità a cui viene effettuata la prova.
- 2) Fattori per i quali non è possibile fissare forti limitazioni senza perdere i vantaggi operativi dello strumento di misura: condizioni meteorologiche ed ambientali, data ed ora della misura, stato di usura del battistrada del pneumatico, condizioni di pulizia del manto superficiale.
- 3) Fattori che non possono essere controllati, come la posizione del SUMMS lungo la sezione trasversale della corsia.

Queste osservazioni e le precedenti, evidenziano ancora una volta l'impossibilità di associare alle misurazioni di aderenza "un'impronta" deterministica e la necessità di rivolgersi a "strumenti" di stampo prettamente probabilistico.

Abrasimetro rotazionale

L'abrasimetro rotazionale è una macchina, ancora in fase di sperimentazione, che viene usata per studiare e controllare l'aderenza delle pavimentazioni.

Si tratta di una macchina di laboratorio che è stata recentemente pensata e sviluppata dalla Società Autostrade per simulare, su carote di conglomerato bituminoso, l'effetto di levigazione delle superfici prodotto dal traffico.

Per questo scopo viene usata una testa speciale con rulli di gomma, sulla quale viene applicato un carico, facendola poi girare sulla superficie del provino; sia il carico che la velocità di rotazione possono essere impostati a piacere entro un determinato intervallo; se si vuole, l'effetto di levigazione può essere opportunamente accelerato adottando dei rulli in gomma nei quali è stata dispersa della polvere abrasiva.

Usando un'altra testa munita di pattini di gomma è poi possibile misurare a differenti velocità e nei vari stati di usura il coefficiente di attrito a strisciamento della superficie.

La novità di questa macchina sta nel fatto che è possibile studiare l'evoluzione dell'aderenza della miscela aggregati-bitume non di uno solo dei componenti (aggregati) come si è fatto finora, nelle condizioni di messa in opera su strada.

Utilizzando questa apparecchiatura è possibile prevedere e studiare il comportamento di nuove miscele e migliorare le conoscenze, in termini di curve di decadimento dell'aderenza, su quelle attualmente utilizzate in quanto vengono eliminate una serie di variabili non controllabili che sono presenti invece nel caso delle misure effettuate con gli apparecchi SCRIM o SUMMS (pulizia delle superfici, situazione ambientale ecc.).

La macchina è completamente automatizzata per quel che riguarda l'impostazione delle prove, la loro esecuzione e l'acquisizione dei dati: tali compiti sono demandati ad un calcolatore che pilota un sistema di azionamento pneumatico e rileva i dati da una serie di sensori (celle di carico, dinamo tachimetrica, ecc.) attraverso cui è possibile avere una visione completa e precisa dei risultati.

10. Apparecchi di misura della tessitura superficiale.

Abbiamo già osservato (e ciò sarà ancora evidenziato nel paragrafo 12 relativo all'esposizione dei risultati sperimentali) come il coefficiente di aderenza, nel caso di valori elevati della velocità e nelle condizioni di pavimentazione caratterizzata da macrotessitura liscia (non rugosa), sia, in generale, sensibilmente inferiore che a velocità medie.

Per tali motivi nel caso di strade ad alta velocità di circolazione è conveniente conoscere questo coefficiente tanto a bassa (60 km/h) quanto ad alta velocità (120 km/h).

E' però evidente come le misure di aderenza ad alta velocità presentino molte difficoltà di esecuzione per quelle strade caratterizzate da un notevole flusso veicolare; in questi casi ci si deve accontentare di misure effettuabili in periodi particolari e per fini esclusivamente sperimentali, senza cioè procedere ad un vero e proprio monitoraggio di routine.

Per questo motivo, la stima delle caratteristiche di aderenza ad alta velocità si effettua, indirettamente, mediante le misure di macrotessitura e di rugosità della pavimentazione.

Misure puntuali di macrotessitura si realizzano mediante il metodo dell'altezza in sabbia (o metodo del cerchio di sabbia), che consiste nel porre sopra la superficie stradale un

determinato volume (50 cm^3) di sabbia fina uniforme, in grado cioè di ricoprire tutte le irregolarità della superficie (Fig. 40).

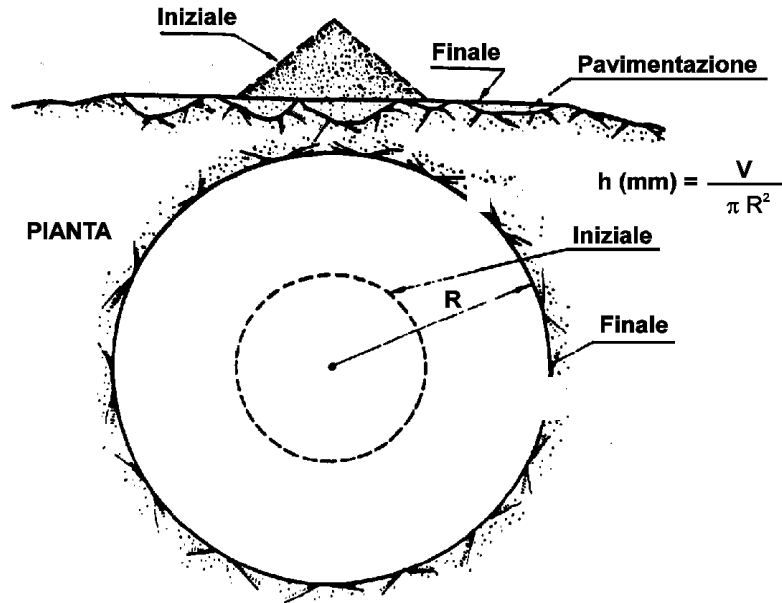


Fig. 41 - Metodo dell'altezza in sabbia.

Si provvede poi a stendere la sabbia formando un cerchio, in modo tale che risulti facile determinare l'area coperta dalla sabbia.

La profondità media della tessitura si ottiene quindi come il rapporto:

$$h = \frac{\text{Volume della sabbia}}{\text{Area ricoperta}}$$

Sono stati effettuati degli esperimenti per mettere in relazione, al variare della velocità, la profondità media ottenuta col metodo del cerchio di sabbia ed il coefficiente di aderenza.

Studi condotti in Gran Bretagna hanno permesso di ottenere una relazione tra la differenza dei valori del coefficiente a 50 e 130 km/h e la profondità media della tessitura:

a) Pavimentazioni in conglomerato bituminoso

$$\frac{f_{50} - f_{130}}{f_{50}} = 0.40 - 0.20 \cdot h$$

b) Pavimentazioni in conglomerato cementizio

$$\frac{f_{50} - f_{130}}{f_{50}} = 0.60 - 0.75 \cdot h$$

essendo f_v il coefficiente di aderenza alla velocità v (in km/h) ed h la profondità media (in mm) ottenuta col metodo dell'altezza in sabbia.

Maggiore precisione si ottiene misurando la macrotessitura in continuo con un Texturometro laser (Fig. 41).

Il raggio emesso tocca la superficie e si riflette in un potenziometro ottico: in funzione della posizione del punto illuminato sul potenziometro, si ricava l'altezza del punto di riflessione.

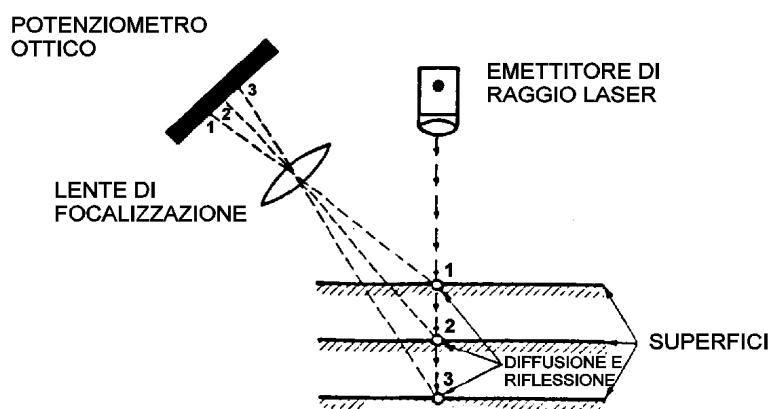


Fig. 41 - Principio di funzionamento del Texturometro laser.

Se l'apparecchiatura viene montata su un'automobile, la velocità di misura può arrivare anche ad 80-100 km/h.

Per quanto riguarda poi le misure puntuali di microtessitura, esse si realizzano con degli strumenti "a pendolo" del tutto analoghi allo Skid Tester analizzato all'inizio di questo paragrafo.

11. Apparecchi di misura della regolarità superficiale.

Il valore di regolarità, strettamente connesso al comfort dell'utente ed alla sicurezza del veicolo, caratterizza le condizioni funzionali della pavimentazione e viene rilevato per mezzo di apparecchiature ad elevato rendimento del tipo APL e del tipo ARAN.

La misura della regolarità geometrica del profilo longitudinale della strada viene ottenuta con l'APL (Analizzatore del Profilo Longitudinale), messo a punto dal Laboratorio Centrale Francese "Ponts et Chaussées".

L'APL si presenta sottoforma di un rimorchio monoruota, che viene trascinato a velocità costante, da un'autovettura (Fig. 42).

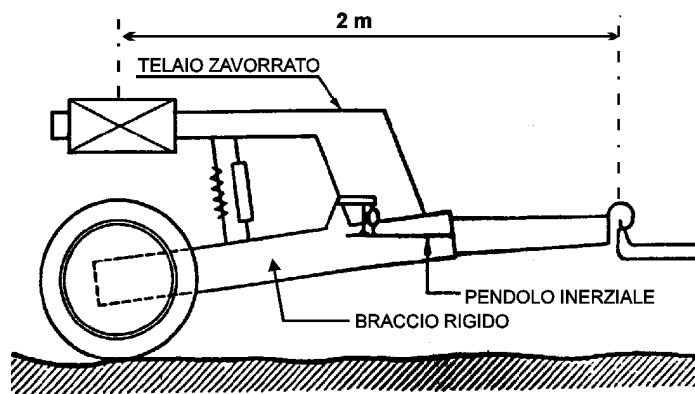


Fig. 42 - Schema di funzionamento dell'APL.

Il veicolo di misura utilizzato è dotato in genere di due rimorchi APL; in tal modo è possibile valutare la regolarità geometrica lungo due allineamenti nell'ambito di una corsia.

Con questa apparecchiatura, in pratica, è possibile misurare, gli spostamenti verticali, subiti dalla ruota di misura utilizzando il riferimento "pseudo orizzontale" dato da un pendolo inerziale a bassa frequenza.

La funzione di trasferimento degli spostamenti verticali è pressochè uguale ad 1 nel campo di lunghezze d'onda compreso tra $V/20$ e $V/0.4$ (con V , velocità di misura in m/sec).

L'analisi dei risultati può essere successivamente filtrata in lunghezze d'onda corte, medie e lunghe.

La conoscenza dell'ampiezza delle irregolarità per onde corte (1-3.3 m), medie (3.3-13 m) e lunghe (13-40 m) è molto importante per individuare la causa delle irregolarità.

Infatti se l'irregolarità è dovuta alle onde corte è presumibile che la causa sia da ricercare negli strati superficiali della pavimentazione (ammaloramenti e stesa irregolare), mentre per onde lunghe la irregolarità può essere dovuta a problemi di assestamento anomali degli strati di fondazione o sottofondo della strada.

Da queste grandezze possono essere desunte in maniera indiretta anche le condizioni di portanza della pavimentazione.

L'altro apparecchio che consente di valutare le irregolarità del profilo longitudinale è l'ARAN (Automatic Road Analyzer) (Fig.43).

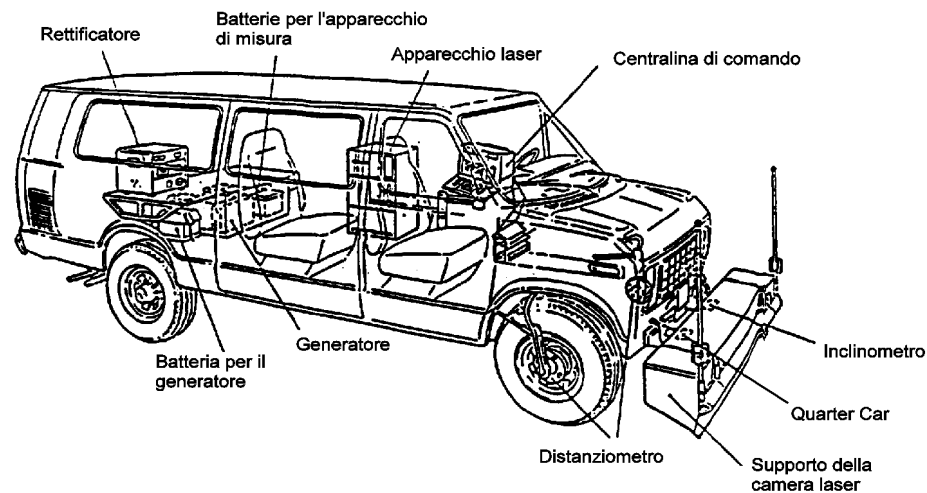


Fig. 43 - Schematizzazione dell'attrezzatura ARAN.

Originariamente con questo apparecchio, la misura della regolarità del profilo longitudinale della strada era indiretta, infatti non venivano misurate le irregolarità geometriche del profilo longitudinale, bensì, a mezzo di un accelerometro, le accelerazioni verticali cui è soggetto l'asse posteriore dell'ARAN quando percorre la pavimentazione.

Valutando così l'accelerazione verticale efficace, è possibile poi ricavare un indice delle condizioni della strada (RCI - Road Comfort Index) attraverso una funzione matematica ottenuta su base statistica: tale funzione è stata costruita utilizzando il giudizio di un campione di guidatori medi su una serie di strade a caratteristiche note; pertanto l'RCI esprime una valutazione non di tipo oggettivo, ma oggettivizzato sulla qualità della strada.

Di recente l'ARAN è stato dotato di un secondo accelerometro, montato sul telaio; in tal modo è possibile risalire agli spostamenti verticali impressi dalle irregolarità del piano viabile e quindi direttamente alle irregolarità del profilo longitudinale.

Utilizzando i dati dei due accelerometri si è in grado di determinare il coefficiente IRI (International Roughness Index), indice standardizzato dal World Bank Technical Paper n. 45 per la misura delle azioni di disturbo generate dalla geometria della strada.

Per definire l'IRI si impiega un modello matematico che simula il sistema sospensivo di un veicolo tipo che circola per un tratto di strada alla velocità di 80 km/h. Questo modello è denominato QCS (Quarter Car Simulation), dal momento che fa riferimento alla quarta parte di un veicolo a quattro ruote o ad un rimorchio ad una sola ruota.

Il valore dell'IRI in un punto della strada si definisce come il rapporto tra lo spostamento relativo accumulato dalla sospensione del veicolo tipo e la distanza percorsa dal veicolo stesso; si esprime pertanto in millimetri al metro.

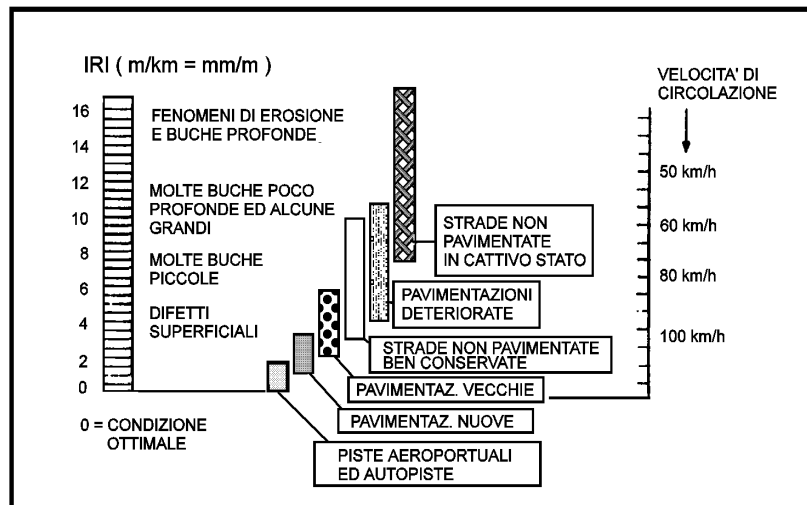


Fig. 44 - Scala IRI (International Roughness Index).

Valori inferiori a 2 mm/m rappresentano condizioni di ottima regolarità per tutti i tipi di strade; per strade secondarie, a velocità di percorrenza intorno ad 80 km/h, basta che l'IRI sia inferiore a 5 mm/m (Fig. 44).

Con l'ARAN vengono effettuate 20 misure per chilometro ad una velocità di 60 km/h, che permette di realizzare una capacità di lavoro oraria di circa 1200 misure.

I rilievi di routine vengono effettuati per determinare la curva di decadimento dell'RCI nel tempo, al fine di individuare la necessità di intervento, nonché per definire i valori minimi delle specifiche prescritte nel Capitolato per i lavori di primo impianto o di manutenzione.

L'ARAN è in grado inoltre di misurare automaticamente il raggio di curvatura, la pendenza longitudinale e trasversale (per mezzo di due giroscopi), il profilo trasversale (per mezzo dei sensori ad ultrasuoni), può misurare anche la tessitura geometrica (attraverso misure acustiche indirette) ed il tipo e l'estensione delle irregolarità superficiali (grazie ad una telecamera montata sul veicolo). Queste ultime 2 funzioni non sono sempre attivate nelle misure di routine.

12. Risultati sperimentali.

In questo paragrafo si procederà ad esporre una serie di risultati sperimentali ricavati da campagne di misurazione condotte sia in campo nazionale che internazionale; ci teniamo ancora una volta a ribadire il fatto che tutte le misure d'aderenza sono condizionate da una serie di fattori estremamente aleatori i quali fanno sì che, su uno stesso argomento (ad es. la dipendenza di f_x dalla pressione di gonfiaggio o l'influenza delle condizioni superficiali sul CAT), si abbiano risultati non sempre concordanti.

Osserviamo inoltre che i grafici di seguito riportati presentano la “solita” distinzione tra i dati relativi all'aderenza trasversale e quelli relativi all'aderenza longitudinale.

Si è già notato più volte come, in realtà, il fenomeno sia unico e, a tal proposito, ricordiamo la relazione sperimentale che sussiste tra i coefficienti f_x ed f_y :

$$f_y = 0.925 \cdot f_x \quad [5]$$

Per comprendere meglio l'importanza della [5], consideriamo la relazione di Lamm e Haring che fornisce il valore del coefficiente di aderenza longitudinale nel caso di pavimentazione bagnata e pneumatici in condizioni medie:

$$f_x = 0.214 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 - 0.640 \cdot \left(\frac{V}{100}\right) + 0.615 \quad (V \text{ in km/h})$$

Tenendo conto della [5] è possibile ricavare un'analogia espressione per f_y :

$$f_y = 0.198 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 - 0.592 \cdot \left(\frac{V}{100}\right) + 0.569 \quad (V \text{ in km/h})$$

Considerando le due precedenti espressioni, è facile esprimere la variazione dei coefficienti f_x ed f_y con la velocità (Fig. 45).

V (km/h)	40	60	80	100	120	140
f_x	0.39	0.31	0.24	0.19	0.16	0.14
f_y	0.36	0.28	0.22	0.17	0.14	0.13

Fig. 45 - Tabella indicativa della variazione dei coefficienti di aderenza con la velocità

Osserviamo che l'aver applicato la [5] alla relazione di Lamm e Haring è soltanto un esempio mirato ad evidenziare quantitativamente l'andamento dei due coefficienti di aderenza al variare della velocità; in realtà l'importanza della [5] sta nel fatto che essa consente, una volta in possesso dei dati sperimentali relativi ad f_x (o ad f_y), di avere un'indicazione attendibile dell'andamento di f_y (o di f_x) nelle stesse condizioni dell'esperimento di partenza.

Notiamo inoltre che, quando sono stati definiti i due coefficienti f_x ed f_y , si è detto che essi sono dati dal rapporto tra le forze tangenziali applicate al pneumatico (F_{ax} ed F_{ay}) ed il peso (P) gravante sul pneumatico stesso; ciò sta a significare che, in realtà si ha a che fare con grandezze vettoriali, pertanto, quando si parla di coefficienti di aderenza si sta facendo implicitamente riferimento ai moduli dei corrispondenti vettori.

Possiamo pertanto definire il vettore di aderenza globale come somma dei vettori di aderenza longitudinale e trasversale:

$$\vec{f} = \vec{f}_x + \vec{f}_y$$

e, in modulo:

$$|\vec{f}| = \sqrt{|\vec{f}_x|^2 + |\vec{f}_y|^2}$$

o meglio:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad [6]$$

dove f è il modulo del vettore di aderenza globale, definito *coefficiente di aderenza globale* o, semplicemente, *coefficiente di aderenza*.

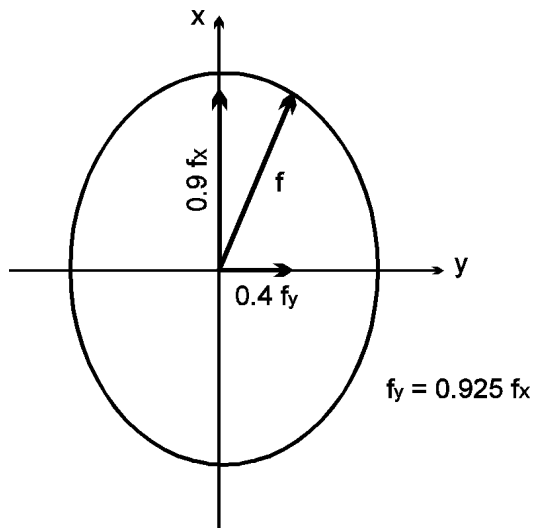


Fig. 46 - Ellisse di aderenza.

E' possibile ricorrere ad una rappresentazione polare indicativa dell'andamento del coefficiente di aderenza al variare della direzione della risultante delle forze trasversali applicate alla ruota; ne nasce il cosiddetto *ellisse di aderenza* (Fig 46) di equazione:

$$\frac{x^2}{f_x^2} + \frac{y^2}{f_y^2} = 1 \quad [7]$$

Dove x ed y rappresentano i valori di aderenza longitudinale e trasversale che è possibile impegnare.

Se ad esempio si fosse a conoscenza che l'aderenza impegnata in senso longitudinale è pari al 90 % di quella potenzialmente impegnabile ($x = 0.9 \cdot f_x$), si potrebbe, dalla [7] ricavare l'aliquota di aderenza trasversale corrispondentemente impegnata, infatti si avrebbe:

$$\frac{(0.9 \cdot f_x)^2}{f_x^2} + \frac{y^2}{f_y^2} = 1$$

$$y = f_y \cdot \sqrt{1 - 0.9^2}$$

e quindi:

$$y \cong 0.4 \cdot f_y$$

Essendo inoltre:

$$f = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{è solo formalmente diversa dalla [6]})$$

si ha:

$$f = \sqrt{(0.9 \cdot f_x)^2 + (0.4 \cdot f_y)^2}$$

e quindi dalla [5] si ottiene:

$$f = \sqrt{(0.9 \cdot f_x)^2 + (0.4 \cdot 0.925 \cdot f_x)^2} = 0.973 \cdot f_x$$

oppure, equivalentemente:

$$f = \sqrt{(0.9 \cdot 1.081 \cdot f_x)^2 + (0.4 \cdot f_y)^2} = 1.052 \cdot f_y$$

L'esempio appena svolto serve ad evidenziare come, partendo dalla conoscenza di un solo dato (in questo caso $x = 0.9 \cdot f_x$), sia possibile avere una panoramica completa delle relazioni che intercorrono tra i parametri che entrano in gioco nel meccanismo di aderenza.

13. Risultati relativi all'aderenza longitudinale e trasversale.

I grafici di Fig. 47 e Fig. 48, relativi a strade asfaltate, ed il grafico di Fig. 49, relativo a strade in cemento, rappresentano l'andamento del coefficiente f_x con lo scorrimento, in diverse condizioni ambientali. Si può notare come l'andamento delle curve sia molto simile a quello delle curve riportate in Fig. 6 e Fig. 7, ottenute a mezzo di considerazioni teoriche. Si evidenzia in particolare il notevole decadimento del coefficiente di aderenza con il peggioramento delle caratteristiche superficiali della pavimentazione, causato dalla presenza di acqua.

Nel grafico di Fig. 50 sono riportate delle curve parametrize in funzione della velocità ed indicative dell'andamento di f_x con lo scorrimento. Si noti come i valori di f_x si mantengano pressoché costanti nell'intervallo di velocità 10 - 40 km/h, nel caso di assenza d'acqua sulla superficie stradale; è evidente invece la riduzione del coefficiente di aderenza con la velocità, non appena subentrino peggioramenti delle condizioni superficiali.

Il diagramma di Fig. 51 rappresenta i vari domini di variabilità di f_x con la velocità, in funzione delle diverse condizioni dello strato superficiale. Si evidenzia in particolare la criticità delle situazioni legate a pavimentazioni innevate o ghiacciate, anche per valori non elevati di velocità

Il grafico riportato in Fig. 52 evidenzia l'andamento $f_x(V)$ nel caso di pavimentazione bagnata, con riferimento a tre possibili spessori del velo idrico; nel grafico sono rappresentate due famiglie di curve: una relativa a pneumatici muniti di battistrada, l'altra a pneumatici privi di battistrada. E' interessante notare come, alle alte velocità, il campo di variabilità del coefficiente di aderenza risulti essere molto ristretto, nel senso che i valori di f_x , per valori molto elevati di velocità, sono condizionati in misura minore (ma in maniera determinante) dalla presenza d'acqua e dalle condizioni del pneumatico.

Il grafico di Fig. 53 mette in risalto l'estrema importanza della tessitura superficiale, nel caso di pavimentazione bagnata. Si deve osservare come al peggiorare delle caratteristiche di rugosità dello strato di usura, si manifesti un netto decadimento dei valori di f_x . Anche in questo caso si deve ribadire il ruolo determinante svolto dalla velocità

Le curve del diagramma di Fig. 54, parametrize in funzione della velocità, evidenziano, per una superficie caratterizzata da assenza d'acqua, l'influenza del tasso di usura del

pneumatico sul coefficiente di aderenza longitudinale. Questo diagramma è interessante soprattutto se confrontato con quello riportato in Fig. 55, relativo ad un film d'acqua di 7.5 mm. Da questo confronto si evince facilmente come il tasso di usura del pneumatico svolga un ruolo maggiormente determinante nel caso di presenza del velo idrico e per velocità medio-alte. E' stato dimostrato che, nel caso di pavimentazione interessata da un film idrico di 7.5 mm, nelle condizioni di velocità di marcia pari a 80 km/h e nella situazione di tasso di usura del copertone uguale al 60%, è molto probabile il verificarsi del fenomeno di aquaplaning.

Il grafico di Fig. 56 mette in rilievo il ruolo della pressione di gonfiaggio del pneumatico nel caso di velo idrico pari a 7.5 mm e per un tasso di usura del pneumatico pari all'80 %; anche in questo caso l'influenza della pressione di gonfiaggio diventa importante per velocità superiori a 80 km/h.

I diagrammi di Fig. 57, Fig. 58 e Fig. 59 si riferiscono ad esperienze condotte in Giappone su manti drenanti posti a confronto con i tradizionali strati di usura in conglomerato bituminoso. Il coefficiente di aderenza longitudinale nel caso di manti drenanti è, all'apertura al traffico, in media pari a 0.40-0.45; si tratta di valori comparabili con quelli dei manti bituminosi. Un anno più tardi, il potere drenante diminuisce a causa dell'intasamento superficiale, ma il coefficiente di aderenza aumenta portandosi a valori dell'ordine di 0.52-0.62. Anche dopo due anni di apertura al traffico si hanno ulteriori incrementi di f_x . Nello stesso intervallo di tempo, nel caso dei manti ordinari in conglomerato bituminoso, si manifesta invece il progressivo decadimento delle caratteristiche di aderenza. Inoltre la diminuzione dell'aderenza che accompagna l'incremento della velocità è di 0.0025 sui manti drenanti e non varia in maniera significativa; sui manti bituminosi, invece, i valori del decadimento dell'aderenza sono più importanti (da 0.0058 a 0.0070). Ciò dimostra l'efficacia dei manti drenanti alle alte velocità.

Il diagramma di Fig. 60, inoltre, evidenzia una variabilità (invero minima) del coefficiente di aderenza longitudinale con la forza normale P agente sul pneumatico. Riferendoci alla variabile traffico, si riporta (Fig. 61) a titolo di esempio una legge di decadimento del CAT determinata sulla base delle misure raccolte su alcune autostrade italiane. Sono state prese in considerazione le misure effettuate dalla Società Autostrade dallo SCRIM prima e dal

SUMMS poi, in un intervallo di tempo compreso tra il 1983 ed il 1988, su alcuni tratti autostradali nei quali lo strato superficiale della pavimentazione era costituito da una usura tradizionale.

La legge di decadimento del CAT è stata ricavata utilizzando la tecnica delle “regressioni fuzzy” (si tratta di una metodologia di regressione matematica che consente di collegare l'evoluzione nel tempo degli indicatori al traffico passato o residuo mediante opportune leggi matematiche che tengano presente l'effetto che hanno, sia sui valori misurati degli indicatori, sia sulla loro evoluzione nel tempo, variabili quali: la temperatura di misura, le condizioni delle superfici al momento della misura, le condizioni medie ambientali, la tipologia dei materiali impiegati etc.).

In figura 61 è rappresentato di SFC relativamente alle condizioni suddette. In ordinata è riportato il valore del coefficiente di aderenza trasversale, mentre in ascissa è riportato il numero N di passaggi di veicoli merci sulla carreggiata.

Le leggi matematiche a cui fanno capo le curve graficizzate sono:

$$f_t = 115.30 - 11.21 \cdot \log N \quad (\text{per i valori centrali})$$

$$f_t = 115.30 - (11.21 \pm 2.88) \cdot \log N \quad (\text{per i valori limiti})$$

In base ad uno studio sulla distribuzione trasversale dei veicoli lungo una corsia autostradale, è risultato che i veicoli merci sono quelli che percorrono prevalentemente la fascia della corsia lenta interessata dalle ruote di misura del SUMMS, risultando quindi la causa principale del decadimento dell'aderenza. Le leggi così ottenute, inglobando nei loro coefficienti alcuni fattori, come la composizione del traffico, il comportamento degli utenti, le condizioni ambientali, risultano essere specifiche dei tronchi autostradali analizzati. L'applicazione sistematica del metodo delle regressioni fuzzy permetterà di ricavare, sfruttando l'enorme massa di dati rilevati sull'intera rete, leggi di decadimento del CAT specifiche per le situazioni tipiche che potranno essere individuate sulla rete Autostrade.

Sempre con riferimento alle differenti quantificazioni del coefficiente di aderenza, si è sperimentalmente osservato come la difficoltà maggiore che emerge nella valutazione del CAT è che tale valore risente di variazioni cicliche della temperatura e di umidità sia di

breve che di lungo periodo, quali le variazioni stagionali. Infatti, sono state riscontrate variazioni cicliche annuali con valori della rugosità più elevati nel periodo inverno-primavera rispetto al periodo autunno-estate, con la sovrapposizione di ulteriori variazioni di breve periodo attribuibili alle precipitazioni e/o alle variazioni climatiche locali che si manifestano pressoché in tutte le tipologie di pavimentazioni.

Il maggior numero di sperimentazioni a riguardo giunge dal Pennsylvania Department of Transportation che ha condotto un'approfondita raccolta di misurazioni dei valori di SFC su numerose autostrade dello Stato. Tali misure, confortate da molte altre fornite da altri stati al Federal Highway of Transportation (Fhwa), mostrano la presenza di una prima fase di stabilizzazione delle caratteristiche superficiali, durante la quale la pavimentazione è esposta al clima ed al traffico per un arco di tempo compreso tra uno e due anni di esercizio; successivamente la superficie comincia ad evidenziare le suddette variazioni cicliche.

Possiamo pertanto pensare di configurare il valore di f_y attraverso la somma di tre termini : $f_y = f_{y1} + f_{y2} + f_{y3}$, dove:

- ◆ f_{y1} : è un valore di f_y in un certo senso assoluto, cioè indipendente dalle variazioni cicliche sia di breve che di lungo periodo;
- ◆ f_{y2} : rappresenta il valore della variazione ciclica di breve periodo;
- ◆ f_{y3} : rappresenta il valore della variazione ciclica di lungo periodo.

Essendo l'ampiezza delle variazioni stagionali molto variabile di anno in anno, il valore minimo raggiunto dal CAT non solo varia da un anno all'altro, ma, pur se in modo più contenuto, anche all'interno dello stesso periodo di misura.

Le figure 62 e 63, relative ad alcuni rilevamenti eseguiti in Inghilterra su strade sottoposte a controlli periodici e di routine del SFC, confermano palesemente tale fenomeno, mostrando un andamento sinusoidale nell'anno, con un massimo in gennaio e con la presenza di un forte calo tra giugno ed agosto.

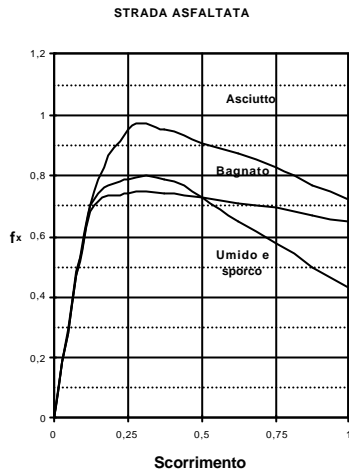


Fig. 47 - Curve $f_x(s)$ in diverse condizioni ambientali.
 Strada in asfalto, pneumatici Dunlop C41, 5, 90-15, $p = 1.6 \text{ kg/cm}^2$, $V = 30 \text{ km/h}$.

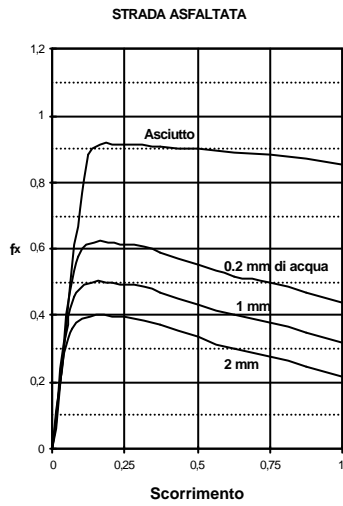


Fig. 48 - Curve $f_x(s)$ in diverse condizioni ambientali.
 Strada in asfalto, pneumatici Dunlop C41, 5, 90-15, $p = 1.6 \text{ kg/cm}^2$, $V = 30 \text{ km/h}$.

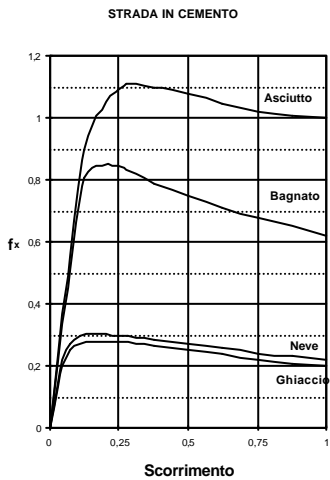


Fig. 49 - Curve $f_x(s)$ in diverse condizioni ambientali.
 Strada in cemento, pneumatici Dunlop C41,5,90-15, $p = 1.6 \text{ kg/cm}^2$, $V = 30 \text{ km/h}$.

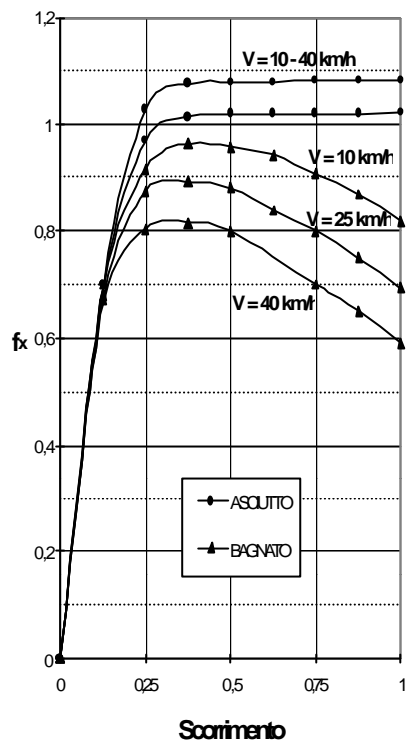


Fig. 50 - Influenza della velocità sulle curve $f_x(s)$ su strada asciutta e su strada bagnata. Pneumatici convenzionali e radiali 6.40 - 13 e 6.00-15, P = 375 kg

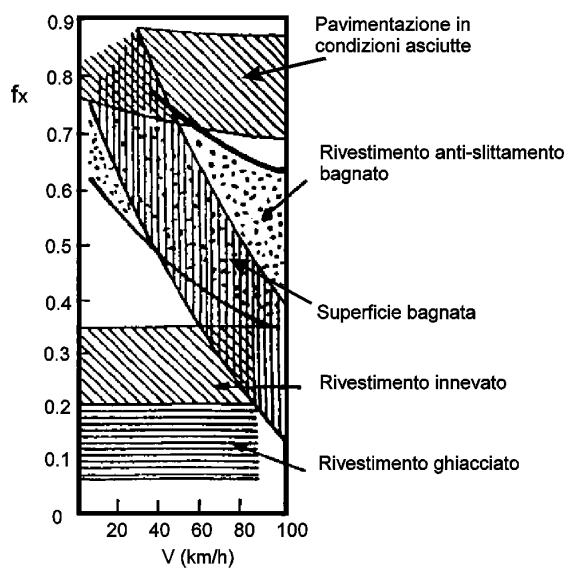


Fig. 51 - Stato della superficie stradale e coefficiente di aderenza. Esperienze condotte in Giappone.

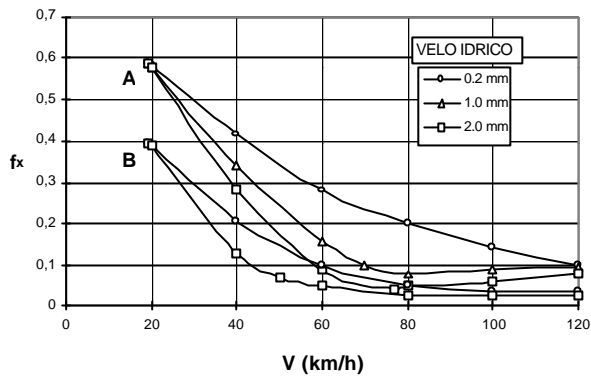


Fig. 52 - Andamento del coefficiente f_x con la velocità V su strada bagnata.
Pneumatico 5.60-15 con battistrada (curve A) e senza (curve B); $P = 300 \text{ kg}$, $p = 1.50 \text{ Kg/cm}^2$

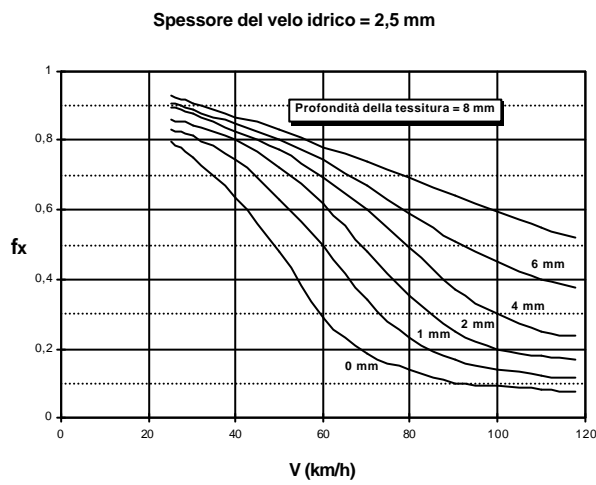


Fig. 53 - Curve $f_x(V)$ in funzione della profondità della tessitura superficiale.
Spessore del film idrico = 2.5 mm. (Esperienze condotte in Giappone).

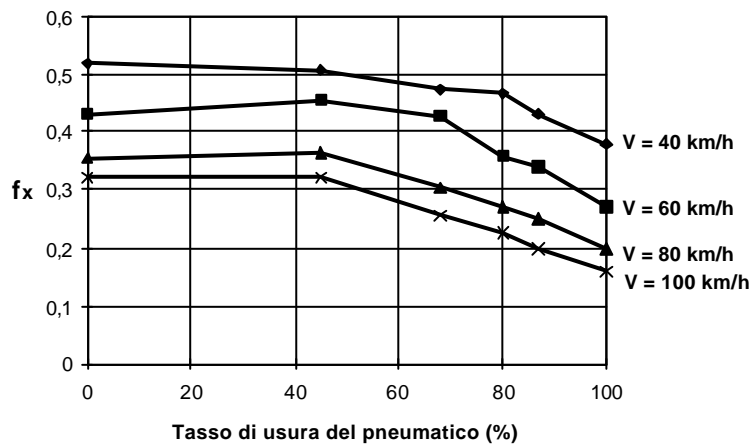


Fig. 54 - Influenza del tasso di usura del pneumatico sul coefficiente f_x .
Strada asciutta (Esperienze condotte in Giappone).

Pavimentazione in cemento - Spessore del velo idrico pari a 7.5 mm

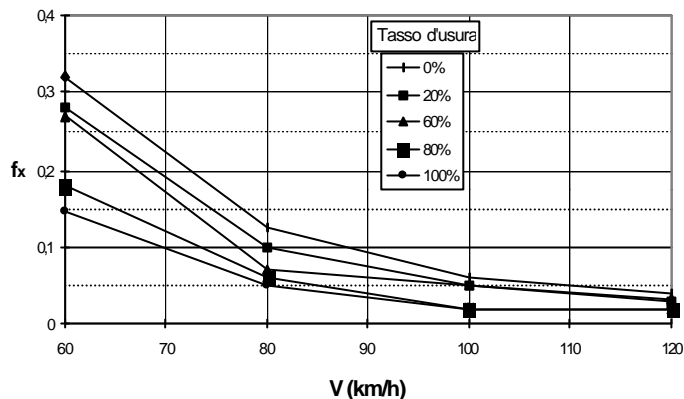


Fig. 55 - Relazione tra il tasso di usura del pneumatico ed il coefficiente di aderenza.
 Spessore del film idrico = 7.5 mm, strada in cemento, pressione di gonfiaggio del pneumatico = 0.17 MPa. (Esperienze condotte in Giappone).
 Pavimentazione in cemento - Spessore del velo idrico pari a 7.5 mm

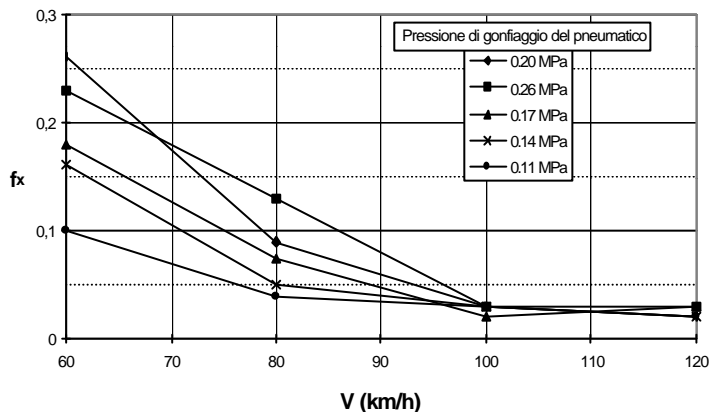


Fig. 56 - Relazione tra la pressione di gonfiaggio del pneumatico ed il coefficiente f_x .
 Spessore del film idrico = 7.5 mm, strada in cemento, tasso di usura del pneumatico = 80%. (Esperienze condotte in Giappone).

Inizio dell'apertura al traffico

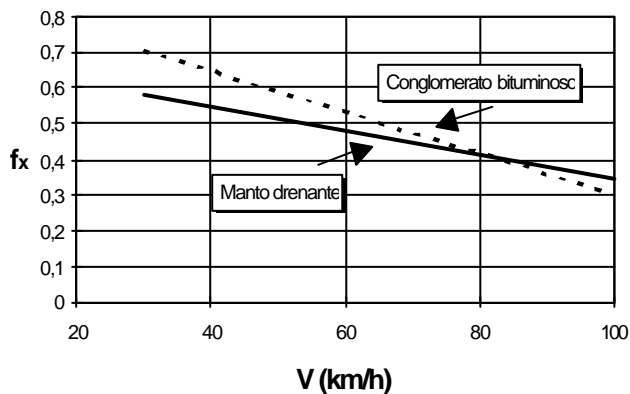


Fig. 57 - Relazione tra la velocità ed il coefficiente di aderenza, sui manti drenanti e sui manti in

conglomerato bituminoso. Inizio dell'apertura al traffico (Esperienze condotte in Giappone).

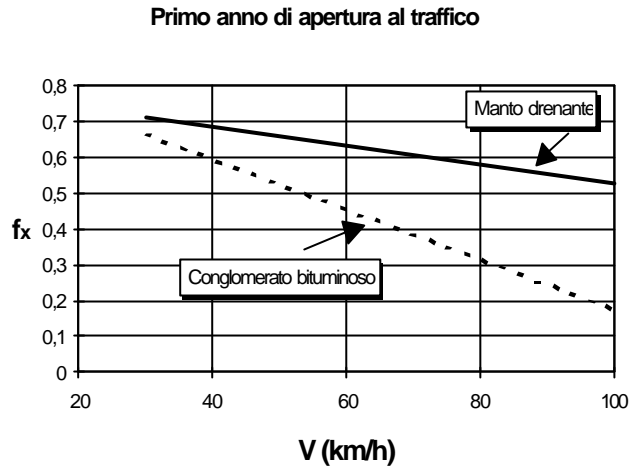


Fig. 58 - Relazione tra la velocità ed il coefficiente di aderenza, sui manti drenanti e sui manti in conglomerato bituminoso. Primo anno di apertura al traffico (Esperienze condotte in Giappone).

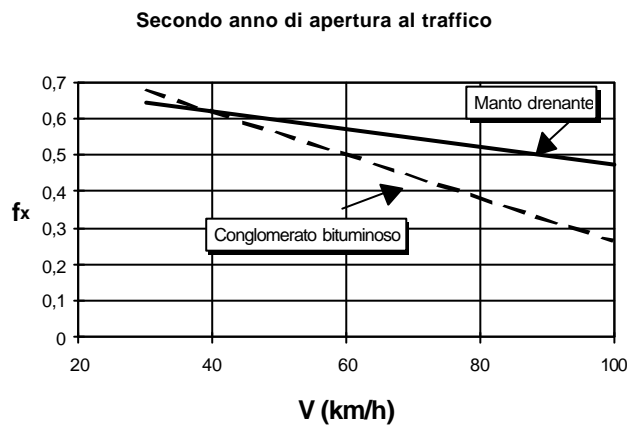


Fig. 59 - Relazione tra la velocità ed il coefficiente di aderenza, sui manti drenanti e sui manti in conglomerato bituminoso. Secondo anno di apertura al traffico (Esperienze giapponesi).

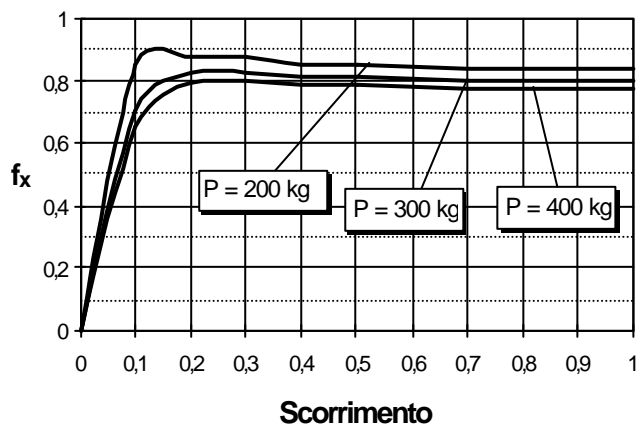


Fig. 60 - Influenza del peso P sulla curva $f_x(s)$. Pneumatico 6.00-15, $p=1.7 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ km/h}$.

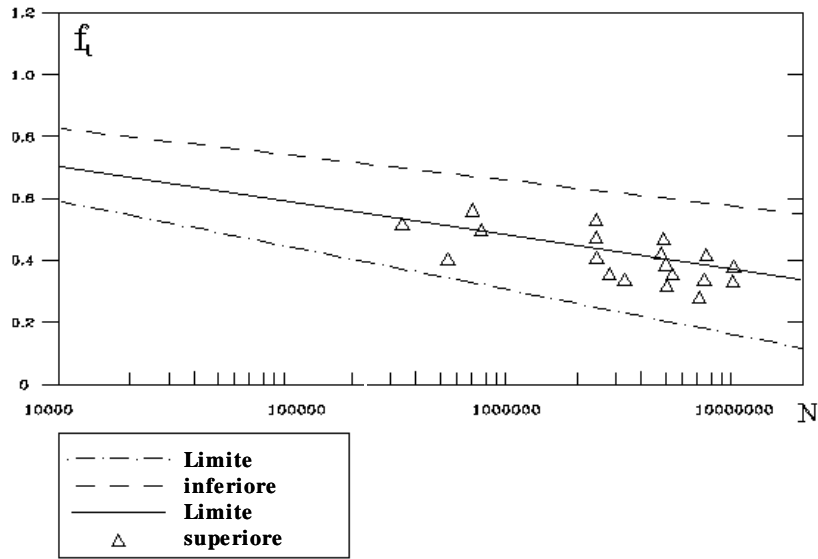


Fig. 61 - Legge di decadimento di f_t ottenuta con la tecnica dei "fuzzy sets".

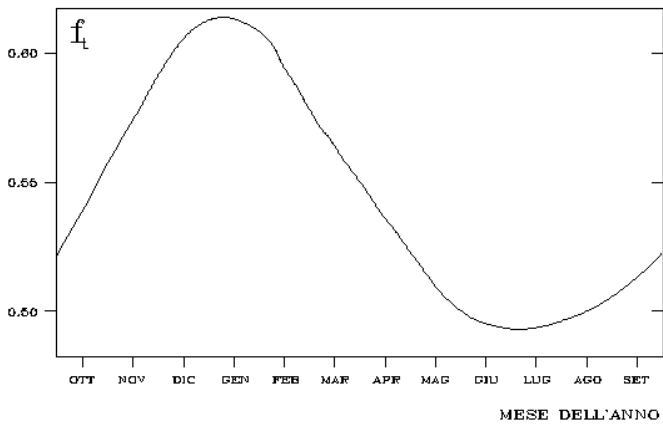


Fig. 62 - Variazione stagionale (stimata) del CAT (esperienze inglesi).

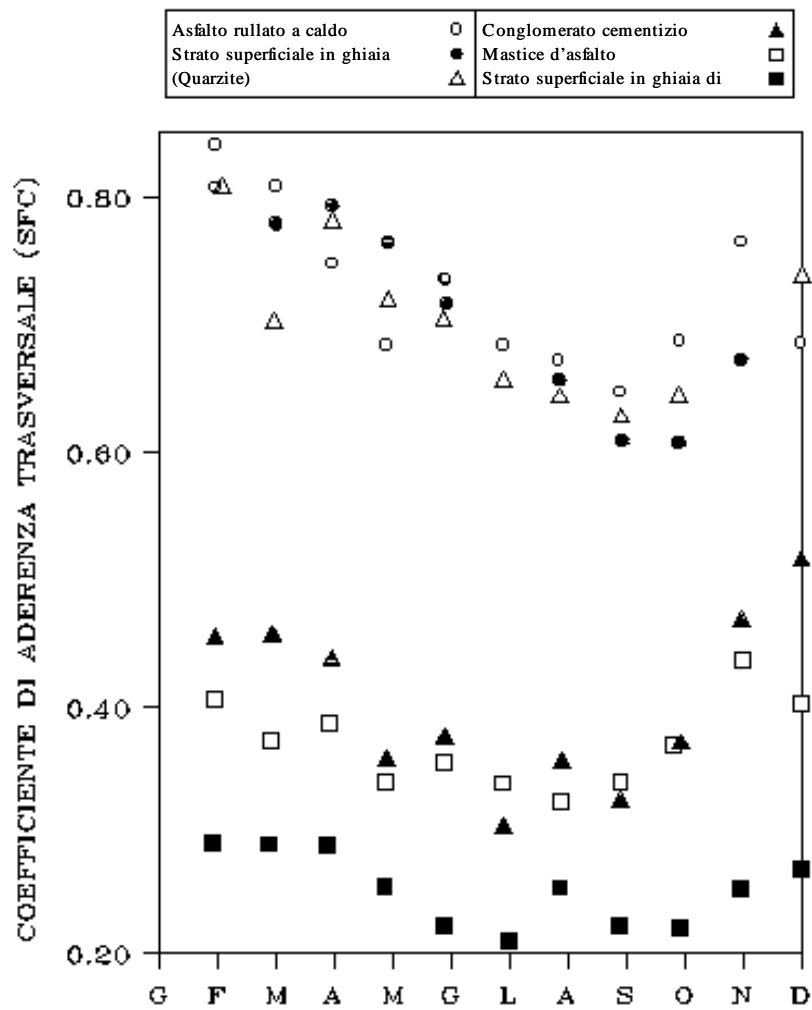


Fig. 63 - Variazione stagionale (stimata) del CAT. Valori relativi a diverse tipologie di strati di usura. (Esperienze inglesi).

14. Il meccanismo di aderenza in campo ferroviario.

Come è stato in precedenza osservato, tutte le problematiche relative al fenomeno dell'aderenza hanno origine "ferroviaria".

E' pertanto opportuno analizzare, sinteticamente, le modalità attraverso cui si esplica il meccanismo di aderenza in campo ferroviario, mettendo in evidenza soprattutto la natura delle superfici a contatto che, a differenza del "caso stradale" in cui si aveva a che fare con un contatto gomma-conglomerato, si traduce nel contatto acciaio-acciaio.

L'approfondimento di tale aspetto renderà conto delle notevoli differenze, in termini numerici, dei valori del coefficiente di aderenza rilevabili in campo stradale e ferroviario.

15. Caratteristiche costruttive del complesso ruota-rotaia.

La ruota ferroviaria consta, in generale, di due elementi: il disco ed il cerchione.

Il cerchione, calettato a caldo sul disco, viene generalmente ottenuto in acciaio laminato e comprende il *bordino di guida* che garantisce il contatto con la rotaia.

I veicoli ferroviari hanno le ruote di uno stesso asse rigidamente collegate tra loro; l'insieme di due ruote e dell'asse corrispondente (*assile*) prende il nome di *sala montata*.

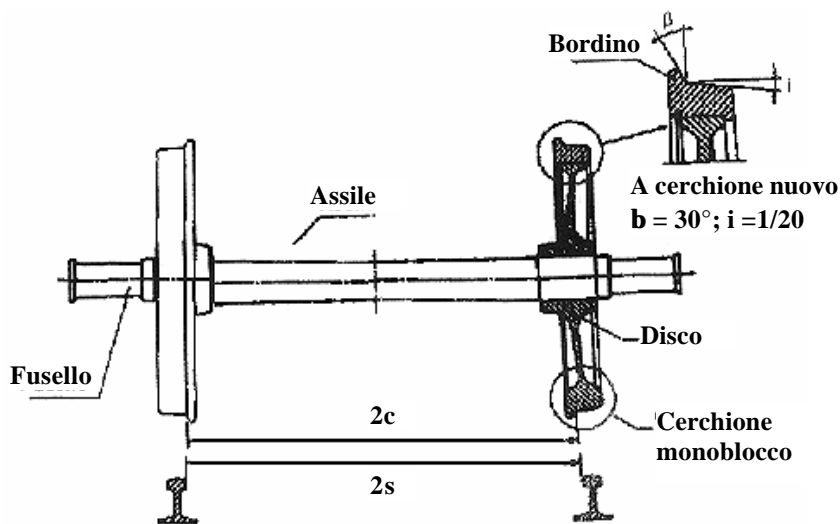


Fig. 64 - Ruota ferroviaria e sala montata.

L'assile, in acciaio fuso o fucinato, è di sezione circolare (a diametro variabile) e presenta alle due estremità i *fuselli*, i quali costituiscono, tramite l'interposizione di una boccola metallica lubrificata, l'appoggio della carrozza ferroviaria (Fig. 64).

Le rotaie in acciaio dolce, sono gli organi di sostegno e guida del materiale mobile; su di esse rotolano le ruote dei veicoli ferroviari e sono da considerare, dal punto di vista statico, come solidi soggetti prevalentemente a flessione e taglio per carichi normali al proprio asse.

Le rotaie, quindi, presentano forme e sezioni idonee a resistere nel miglior modo possibile a dette sollecitazioni.

Nelle ferrovie il tipo di rotaia usato è quello a suola o Vignole (Fig. 65); tale tipologia di rotaia è caratterizzata dal fungo, che è la parte su cui rotolano i carichi, dalla suola, per l'appoggio delle rotaie sulle traverse, e dal gambo, elemento verticale che collega il fungo alla suola.

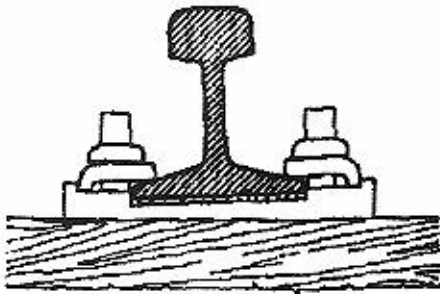


Fig. 65 - Rotaia tipo Vignole.

Il fungo, e precisamente la parte superiore del fungo, costituisce la superficie di rotolamento propriamente detta, su cui appoggia il cerchione; a sua volta il fianco interno del fungo costituisce la superficie di guida, contro la quale insiste il bordino.

E' essenziale notare che la superficie di rotolamento della rotaia è inclinata sull'orizzontale di un angolo $i=1/20$: ciò si ottiene inclinando di tale angolo l'appoggio della suola sulla traversa. Di uguale angolo $i=1/20$ è inclinata la superficie esterna del cerchione.

La distanza tra i fianchi esterni dei bordini, misurata a 10 mm sotto il cerchio di rotolamento, viene detta *scartamento di bordino* ($2c$ in Fig. 64); trattasi di una dimensione molto importante perché, se messa in relazione con la distanza tra i fianchi interni delle rotaie (*scartamento del binario* $2s$), valutata a 14 mm sotto la superficie di rotolamento, determina l'accoppiabilità della sala montata con il binario.

Il valore normale dello scartamento del binario $2s$ delle ferrovie italiane è di 1435 mm con una tolleranza di +5 e -2 mm. Questo valore è comune a quasi tutti i Paesi europei ed a

molti extraeuropei. Alcuni Paesi come la Spagna e la Russia, hanno adottato uno scartamento maggiore, ciò impedisce evidentemente la libera circolazione delle vetture con scartamento standard e crea difficoltà per l'integrazione delle reti ferroviarie di questi Paesi con quella europea. A tal proposito, la Spagna sta studiando la possibilità di creare almeno alcune linee principali a scartamento standard da connettere con la rete europea.

Il valore dello scartamento di bordino $2c$ è di 1416 ± 9 mm.

16. Definizione del coefficiente di aderenza longitudinale.

Quando si è affrontata la trattazione del meccanismo di aderenza longitudinale nel caso stradale, si è fatto riferimento ad una ruota, soggetta ad un carico normale, la quale viene gradualmente sollecitata a mezzo di una forza orizzontale prodotta da un ceppo frenante. Questa stessa tecnica è quella utilizzata per la determinazione del coefficiente di aderenza longitudinale in campo ferroviario; anzi, è più corretto affermare che la metodologia appena ricordata “nasce” in ferrovia per poi essere “trasposta” su strada.

Il grafico riportato in Fig. 66 evidenzia l'andamento della forza longitudinale (F_x) trasmessa nell'area d'impronta; anche in questo caso è possibile definire i due seguenti parametri:

- $f_x = \frac{F_{ax}}{P}$ (coefficiente di aderenza longitudinale);
- $f'_x = \frac{F'_x}{P}$ (coefficiente di attrito radente o cinetico).

Osserviamo come il limite di aderenza (F_{ax}) rappresenti la massima forza che la ruota può trasmettere alla rotaia in condizioni di rotolamento (o di aderenza); il limite di attrito radente (F'_x) è la massima forza che la ruota può trasmettere in condizioni di slittamento (o di attrito radente).

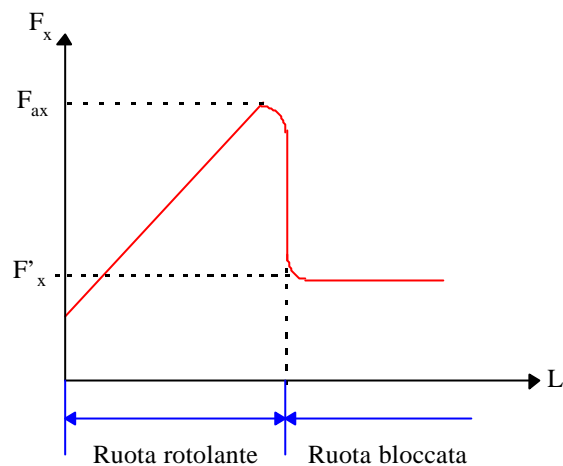


Fig. 66 - Andamento della forza longitudinale F_x (prova con ruota frenata).

In Fig. 67 è mostrato l'andamento del coefficiente di aderenza nel caso ferroviario in funzione della velocità fra 0 e 150 km/h (sarà necessario spostare questi valori almeno fino a 250-300 km/h per le alte velocità; oltre questi valori il fenomeno non è ancora ben studiato) ed in relazione alle condizioni della rotaia (asciutta o umida)

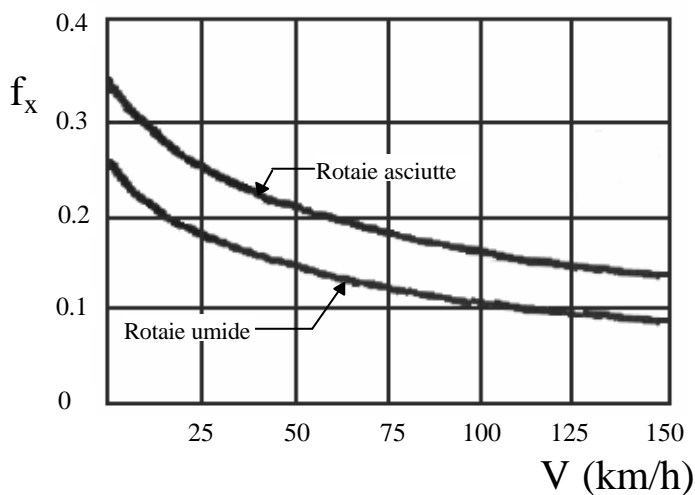


Fig. 67 - Valori del coefficiente di aderenza f_x in funzione della velocità e delle condizioni della rotaia.

Si può osservare che il coefficiente f_x aumenta, a parità di altre condizioni, all'aumentare del peso P , od anche all'aumentare dell'area d'impronta; tuttavia i dati sperimentali, a causa della loro dispersione, non permettono di ricavare una relazione precisa.

Inoltre il coefficiente di aderenza f_x relativo ad un asse isolato subisce variazioni, più spesso in diminuzione, rispetto ai valori di Fig. 67, per altri motivi, tra cui indicheremo i principali:

- 1) essendo le ruote dei veicoli ferroviari calettate rigidamente all'assile, possono verificarsi slittamenti su una delle due ruote che possono far sì che nella marcia in curva il coefficiente f_x risulti minore che in rettilineo;
- 2) il materiale acciaioso di cui sono costituite le due superfici a contatto influenza il valore di f_x : in particolare f_x diminuisce con la tenacità e la durezza dell'acciaio, poiché, a parità di peso, si hanno minori aree d'impronta e quindi maggiori pressioni specifiche sulla rotaia;
- 3) l'umidità delle superfici di rotolamento, nonché la patina costituita da sostanze interposte sulla rotaia (fango, lubrificanti, ecc.) diminuiscono il coefficiente f_x ;
- 4) l'acqua diminuisce il coefficiente f_x quando è in piccola quantità e si mescola alla patina preesistente (rotaie umide); lo aumenta od almeno lo riporta al valore corrispondente a rotaie asciutte quando è in quantità tale da ripulire la rotaia dalla patina (rotaie lavate);
- 5) l'interposizione di materiali duri (tipo la sabbia silicea) aumenta il coefficiente f_x fino a valori superiori a quello di rotaie asciutte (fino a qualche tempo fa si incrementava artificialmente il coefficiente di aderenza a mezzo di lanci di sabbia (a mezzo di opportuni eiettori ad aria compressa) sotto le ruote motrici o frenanti);
- 6) il passaggio di corrente elettrica nell'area di contatto fra ruota e rotaia migliora il coefficiente di aderenza, in quanto dà luogo ad un riscaldamento locale che favorisce il contatto medesimo.

17. Definizione del coefficiente di aderenza relativo al veicolo nel suo complesso.

Analogamente a quanto già osservato nella trattazione relativa al coefficiente di aderenza nel caso stradale, si deve rilevare che, anche nel caso ferroviario, interessa prendere in considerazione non tanto il coefficiente di aderenza riferito ad un asse isolato, quanto lo stesso coefficiente relativo all'intero veicolo motore e cioè:

$$f_m = \frac{F_{ad}}{P_{ad}}$$

dove:

P_{ad} = peso aderente (somma dei pesi sugli assi che trasmettono forze tangenziali di trazione o di frenatura);

F_{ad} = massimo valore della somma delle forze tangenziali stesse prima che si verifichi qualsiasi slittamento (anche di un solo asse).

Prendiamo in considerazione il caso in cui gli assi del veicolo ferroviario siano tra loro indipendenti, ossia non collegati da alcun organo meccanico (come avviene nella gran parte dei locomotori elettrici); in questa situazione slitterà per primo quell'asse i -esimo per cui la forza tangenziale F_i raggiunge per prima il valore limite di aderenza: $F_i = f_{xi} \cdot P_i$

Supponiamo inoltre che il peso aderente P_{ad} si suddivida nei pesi P_1, P_2, \dots, P_n sugli assi motori, ed indichiamo con $P_i = \alpha_i \cdot P_{ad}$ la frazione di peso sull'asse i -esimo; analogamente sia $F_i = \beta_i \cdot F_{tot}$ la frazione di forza di trazione (o frenante) sullo stesso asse i -esimo.

Nel caso dell'asse i -esimo che slitta per primo, si avrà pertanto:

$$P_i = \alpha_i \cdot P_{ad}$$

$$F_i = \beta_i \cdot F_{tot}$$

inoltre:

$$F_i = f_{xi} \cdot P_i$$

pertanto:

$$\beta_i \cdot F_{ad} = f_{xi} \cdot \alpha_i \cdot P_{ad}$$

ed, in definitiva:

$$f_m = \frac{F_{ad}}{P_{ad}} = \frac{\alpha_i}{\beta_i} \cdot f_{xi}$$

E' chiaro che se il coefficiente f_x fosse identico per tutti gli assi ($f_{x1}=f_{x2}=\dots=f_{xn}=f_x$) e si verificasse sempre $\alpha_i = \beta_i$, allora il coefficiente f_m relativo al veicolo sarebbe sempre uguale al coefficiente originario f_x e, nelle condizioni limite, gli assi slitterebbero tutti insieme, anche se indipendenti.

In realtà queste condizioni ideali non si verificano mai almeno per 3 ragioni:

- 1) il coefficiente di aderenza può essere diverso per i vari assi motori (o frenati) dello stesso veicolo, o per una delle cause precedentemente elencate, oppure perché le superfici di rotolamento (specie le rotaie) possono trovarsi in condizioni diverse. L'esperienza suggerisce che, per rotaie umide, il coefficiente f_x è più basso per il primo asse motore e migliore per gli assi successivi (nel senso di marcia), ma che per rotaie asciutte può invece verificarsi il contrario;
- 2) la ripartizione α_i del peso sugli assi motori non è mai uniforme: in pratica se n è il numero degli assi aderenti, su ogni asse dovrebbe gravare esattamente un peso P_{ad}/n , ciò che non è mai possibile per ragioni costruttive; per di più al variare della forza di trazione, varia anche la ripartizione iniziale del peso sui vari assi (per F positiva, si caricano maggiormente gli assi posteriori);
- 3) neppure la forza di trazione F_{tot} , nel caso di assi indipendenti, si ripartisce esattamente tra i vari assi, perché più motori, anche se dello stesso tipo, non danno mai coppie motrici esattamente uguali; analogo inconveniente può verificarsi per le forze frenanti.

18. Il fenomeno dello svio.

Una forza trasversale F_y (ad es. forza centrifuga o comunque reazioni d'inerzia, componente del peso su binario sopraelevato, vento, ecc.), applicata ad un asse ferroviario, tende a spingere l'asse medesimo fuori dal binario, provocandone lo *svio* (o *deragliamento*).

Per la ruota ferroviaria, munita di bordino, la forza trasversale limite F_y non dipende più da fenomeni di aderenza e di elasticità dei due corpi a contatto, bensì da un *accoppiamento di forma* fra bordino e rotaia.

Facendo riferimento alla figura 68, il fenomeno può essere brevemente descritto nel seguente modo: la ruota per qualche motivo inizia a sollevarsi in modo che il contatto con la rotaia avvenga solo tramite il bordino che preme sul fianco del fungo della rotaia. Nel punto di contatto tra la rotaia e la ruota in rotazione si trasmette così il sistema di forze costituito dal carico verticale P e dal carico trasversale F_y (la cui risultante è H). A causa del moto della ruota che continua a rotolare (perché vincolata per mezzo dell'asse all'altra ruota ancora completamente appoggiata con il cerchione sul fungo) sfregando con il bordino

contro il fianco della rotaia, la forza risultante H produce una reazione d'attrito radente $f' \cdot H$ che tende a spingere verso l'alto la ruota.

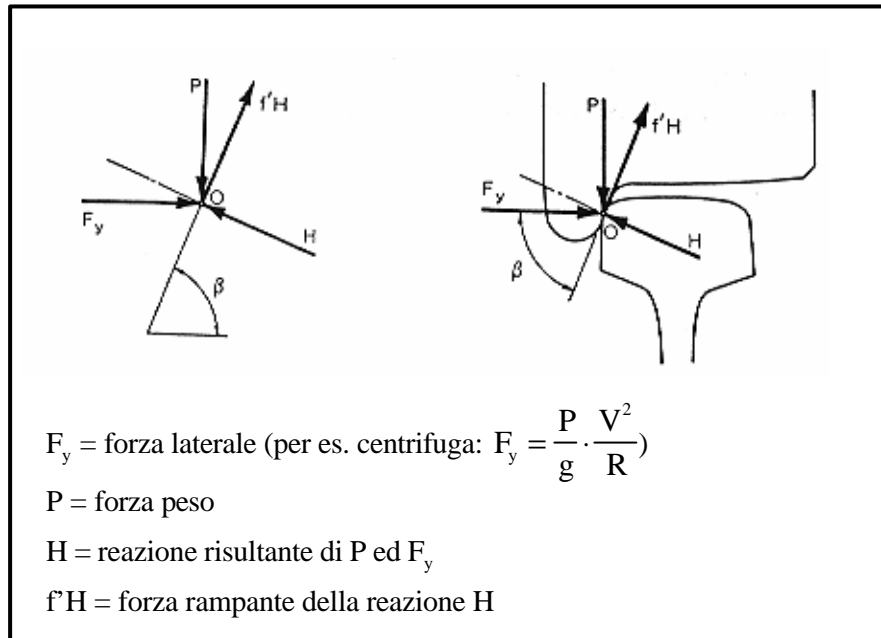


Fig. 68 - Forza trasversale limite F_y applicata ad una ruota ferroviaria.

Studiando l'equilibrio del sistema di forze applicate nel punto di contatto O, si può trovare qual è il valore limite di F_y (o meglio del rapporto F_y/P) oltre il quale la ruota sale e quindi, scavalcando la rotaia, può provocare lo svio del treno.

Perché la ruota si possa “arrampicare”, la risultante delle forze che tendono a far salire la ruota deve essere maggiore delle forze che invece tendono a riportare la ruota verso il basso.

Perciò la condizione limite, scrivendo, per comodità, l'equilibrio lungo la direzione di $f' \cdot H$, è data da:

$$P \cdot \sin \beta = F_y \cdot \cos \beta + f' \cdot H \quad [8]$$

dove H, per l'equilibrio lungo la direzione ortogonale, vale:

$$H = P \cdot \cos \beta + F_y \cdot \sin \beta \quad [9]$$

Sostituendo nella [8] il valore di H dato dalla [9] e risolvendo rispetto al rapporto F_y/P , si ricava:

$$\frac{F_y}{P} = \frac{\operatorname{tg}\beta - f'}{1 + f' \cdot \operatorname{tg}\beta} \quad [10]$$

La [10], detta *formula di Pochet*, esprime il rapporto limite F_y/P in funzione di due dati caratteristici, uno (f') dipendente dalle condizioni della rotaia (asciutta, bagnata, ecc.) e l'altro (β) dalle condizioni del cerchione (nuovo, usurato).

Si osservi che l'usura del bordino aumenta l'angolo β e quindi migliora la stabilità allo svio, anche se accentua il successivo consumo sia del bordino che della rotaia esterna.

In base ai valori normali di β ($\cong 60^\circ$) e di f' (0.15 per rotaie bagnate; 0.30 per rotaie asciutte), dalla formula di Pochet si deduce:

$$\frac{F_y}{P} = \begin{cases} 0.94 \text{ per rotaie asciutte} \\ 1.26 \text{ per rotaie bagnate} \end{cases}$$

Si noti che il valore della forza limite è maggiore nel caso delle rotaie bagnate, perché la maggiore scivolosità riduce il valore della forza $f' \cdot H$ di arrampicamento della ruota lungo la parete laterale del fungo.

Si osservi infine che la forza F_y determina degli strisciamenti laterali tra l'altra ruota e la corrispondente rotaia, per cui la forza trasversale effettivamente applicata al bordino è inferiore ad F_y e quindi la forza limite che può causare il deragliamento è superiore a quella teoricamente valutabile con la formula di Pochet.

Bibliografia

- 1) Atti del Simposio Internazionale "*Road development and safety*"
Lussemburgo - 1989.
- 2) Autori vari; "*Sovrastrutture e pavimentazioni stradali e aeroportuali*"
Ed. ESA - 1979.
- 3) Autori vari; "*Manutenzione e sicurezza. Monitoraggio delle caratteristiche di aderenza e opportunità della ripetizione annuale delle misure.*"
Rivista "LE STRADE" - n. 1293 - maggio 1993
- 4) S. Canale; "*Dispense del Corso di Infrastrutture di viabilità e trasporto*"
Università di Catania - A.A. 1992/1993.
- 5) S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi, "*Nuovi criteri progettuali per le curve stradali*" - Rivista "Autostrade" - n. 3 - luglio/settembre 1995.
- 6) G. Genta G.; "*Meccanica dell'autoveicolo*" - Ed. Levrotto & Bella - 1993.
- 7) F. Giannini, F. La Camera, A. Marchionna; "*Appunti di Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti*" - MASSON Editoriale SEA - 1993.
- 8) Gruppo di lavoro IRF; "*Contributo alla riduzione del rumore da traffico*"
Rivista "LE STRADE" - n. 1294 - giugno 1993
- 9) S. Leonardi, A. Ranzo; "*Analisi critica delle metodologie progettuali delle curve planimetriche circolari e dei raccordi di transizione stradali alla luce dei criteri di sicurezza*"
CNR (Progetto Finalizzato Trasporti 2) - Febbraio 1996.
- 10) A. Orlandi; "*Meccanica dei trasporti*" - Pitagora Editrice Bologna - 1993.
- 11) QUATTORRUOTE - (annate 1984-1995) - Ed. Domus.
- 12) E. Stagni; "*Meccanica della locomozione*" - Ed. Patron - 1980.
- 13) G. Tesoriere; "*Strade Ferrovie Aeroporti - Il progetto e le opere d'arte*"
(Vol. 1) - Ed. UTET - 1990.
- 14) E. Zagatti, R. Zennaro, P. Pasqualetto, "*L'assetto dell'autoveicolo*"
Ed. Levrotto & Bella - 1994.