

CAPITOLO 2

LE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI DEL PIANO DI ROTOLAMENTO: LA TESSITURA E LA FENOMENOLOGIA CONNESSA

2.1 LA TESSITURA SUPERFICIALE DEL PIANO DI ROTOLAMENTO: DEFINIZIONI

Come già accennato nel Capitolo 1 della presente tesi, negli ultimi decenni il concetto di *Funzionalità* della sovrastruttura stradale ha assunto un significato maggiormente ampio e complesso, non più incentrato unicamente sui tradizionali requisiti di portanza, regolarità e aderenza richiesti alle infrastrutture di trasporto su gomma. Attualmente si ricorre ad una valutazione di tipo “prestazionale” dell’infrastruttura che contempla il soddisfacimento di nuove istanze di ecosostenibilità (impatto ambientale, inquinamento acustico), efficienza (riduzione dei consumi) e sicurezza (aderenza, etc), requisiti ormai basilari nell’identificazione e nel perseguimento degli obiettivi progettuali [01]. La letteratura scientifica ha portato nel tempo ad individuare nella tessitura della superficie di rotolamento una caratteristica che ha un ruolo strategico nella definizione dei campi di risposta alla richiesta di mantenimento di ottimali soglie di Funzionalità.

La geometria superficiale del piano di rotolamento, tecnicamente nota come tessitura superficiale è definita dalla norma ISO 13473-1 (1997) [02] come la “deviazione della superficie reale della pavimentazione da un ideale piano di riferimento”; essa rappresenta uno dei principali fattori che regolano l’interazione dinamica fra veicolo e pavimentazione stradale [01], [03], [04].

Fissato un sistema di assi cartesiani (x,y,z) e considerando la superficie reale identificabile attraverso una funzione $F(x,y,z)$, è possibile rappresentare il profilo stradale come una curva bidimensionale ottenuta dal sezionamento della superficie F con un generico piano parallelo all’asse z (Fig.2.1).

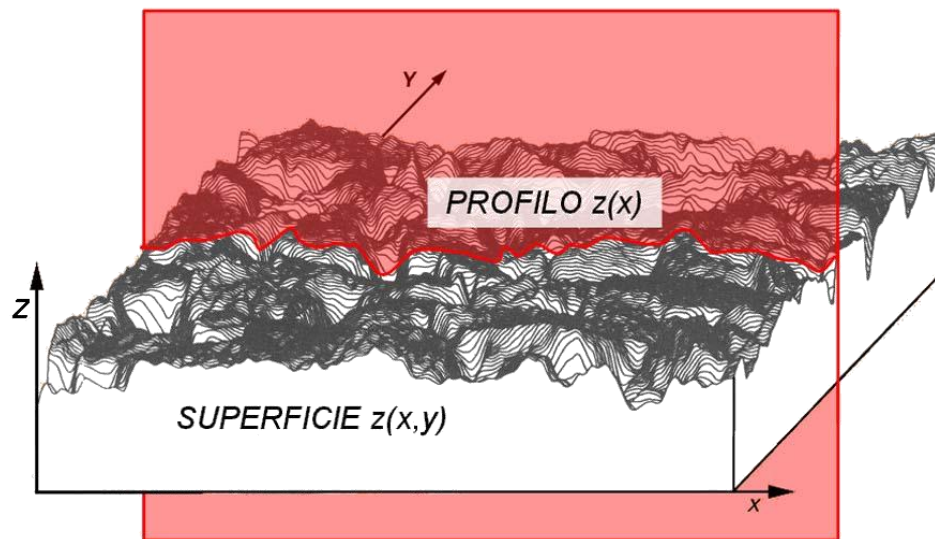


Fig. 2.1 Restituzione grafica 3D della superficie stradale e rappresentazione di un profilo $z(x)$ [05]

Il profilo è definito allora come una successione di altezze (ampiezze) misurate ortogonalmente ad una qualsiasi direzione (distanze) parallela al piano viabile e ad esso appartenente. In particolare, scegliendo per l'intersezione il piano $Y=\text{costante}$ si genera di fatto un profilo $z(x)$ (Fig. 2.2).

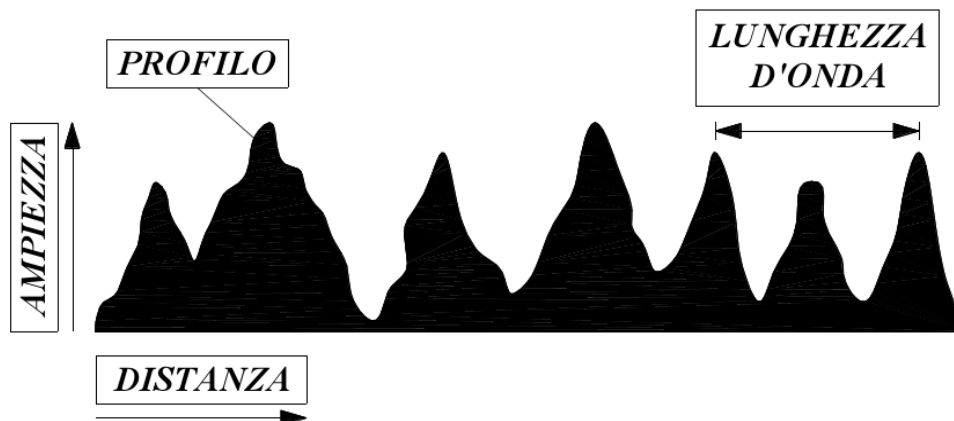


Fig. 2.2 Rappresentazione schematica del profilo $z(x)$ di una pavimentazione stradale.

Attraverso l'analisi di Fourier, il profilo così ottenuto può essere rappresentato dalla sovrapposizione continua di tante curve sinusoidali caratterizzate ciascuna da lunghezza d'onda λ e ampiezza h diverse (Tabella 2.1).

Se $h(x)$ è la funzione che esprime il profilo in funzione dell'ascissa x , si può scrivere in forma (1):

—

(1)

dove —, con L lunghezza del tratto in esame, mentre a_0 , a_n e b_n rappresentano le ampiezze delle varie armoniche [06].

Se $z(x)$ fosse una funzione periodica elementare essa sarebbe caratterizzata da un valore λ_e della lunghezza d'onda e un valore h_e di ampiezza d'onda. Il profilo reale, però, è un segnale composito, per cui si pone il problema di riordinare i concetti di lunghezza ed ampiezza d'onda per adattarli alla grandezza “profilo reale”.

In particolare le definizioni di profilo reale rintracciabili nelle normative vigenti (ISO 13473-1 [02]) ed in letteratura (AIPCR [07]) sono le seguenti:

- ISO 13473-1: “*The profile of a surface is described by two coordinates: one along the surface plane, called distance, and the other in a direction normal to the surface plane, called amplitude. Texture amplitude: the (minimum) distance between periodically repeated parts of the curve. For normal surface profiles, a profile analyzed by its Fourier components contains a continuous distribution of wavelengths*”.
- AIPCR: “*Texture amplitude and wavelength: the profile of the surface is described by its displacement along the surface and its displacement in the direction normal to the surface. Texture wavelength is defined as the (minimum) distance between periodically repeated parts of the curve in its direction along the surface plane*”.

Secondo la norma ISO 13473-1 [02] e le indicazioni fornite dall’AIPCR [07] i concetti di lunghezza d’onda e ampiezza possono essere così esplicitati:

- lunghezza d'onda (λ): distanza minima fra le parti della curva (profilo reale) che si ripetono periodicamente nel verso di avanzamento lungo il piano di via;
- ampiezza d’onda (h): dimensione caratteristica del profilo nella direzione ortogonale al rivestimento.

La lunghezza d’onda, infine, può essere espressa anche in termini di frequenza spaziale f_s ($f_s = 1/\lambda$) che, moltiplicata per il fattore 2π , prende il nome di numero d’onda angolare della tessitura (texture angular wavenumber, [rad/m]) [08].

Nel dominio delle deviazioni del profilo reale dalla superficie ideale si possono distinguere quattro classi principali di tessitura (Fig.2.3) ciascuna delle quali afferente ad un relativo intervallo di lunghezze d’onda e ampiezze (cfr. Tabella 2.1) e responsabile di specifici aspetti caratterizzanti l’ interazione pneumatico-superficie.

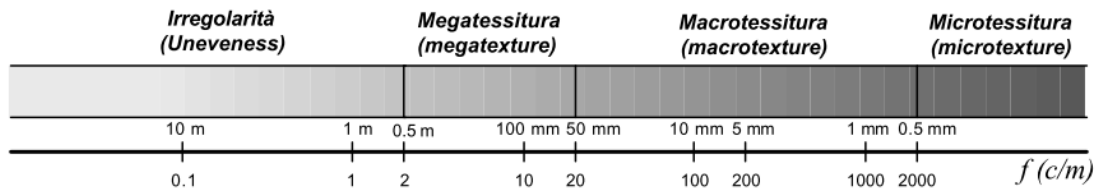


Fig. 2.3 - Rappresentazione delle classi di tessitura nel dominio delle deviazioni del profilo reale.

Classi di tessitura		Lunghezza d'onda l	Ampiezza d'onda h
Irregolarità	Onde lunghe	$15 \text{ m} < \lambda < 50 \text{ m}$	$10 \text{ mm} < h < 200 \text{ mm}$
	Onde medie	$5 \text{ m} < \lambda < 15 \text{ m}$	$5 \text{ mm} < h < 50 \text{ mm}$
	Onde corte	$0,5 \text{ m} < \lambda < 5 \text{ m}$	$1 \text{ mm} < h < 20 \text{ mm}$
Megatessitura		$50 \text{ mm} < \lambda < 0,5 \text{ m}$	$0,1 \text{ mm} < h < 50 \text{ mm}$
Macrotessitura		$0,5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$	$0,01 \text{ mm} < h < 20 \text{ mm}$
Microtessitura		$\lambda < 0,5 \text{ mm}$	$0,001 \text{ mm} < h < 0,5 \text{ mm}$

Tabella 2.1 - Lunghezze d'onda ed ampiezze caratteristiche delle singole classi di tessitura.

Le irregolarità sono i difetti della pavimentazione con dimensioni caratteristiche comprese tra 0,50 m e 50 m che influiscono soprattutto sul comfort di guida, inducendo sollecitazioni verticali anomale sul veicolo che possono provocare perdite di aderenza se non, addirittura, la perdita del contatto tra veicolo e pavimentazione compromettendo la sicurezza [01], [09]. A questa categoria appartengono non solo le irregolarità in direzione longitudinale ma anche quelle in direzione trasversale al profilo stradale, le ormaie, che spesso impediscono il deflusso ordinario delle acque meteoriche determinando, così, l'accumulo di sacche idriche insidiose soprattutto alle alte velocità. Inoltre, la presenza di irregolarità superficiali determina un incremento considerevole del fenomeno di degrado della sovrastruttura principalmente a causa del fatto che i carichi presenti su una pavimentazione irregolare si ripartiscono in modo disomogeneo, con incrementi localizzati in alcuni punti che tendono a degradarsi anticipatamente [03]. Le irregolarità possono generarsi per carenze strutturali determinate da errori progettuali; possono essere causate, inoltre, dal confezionamento della sovrastruttura con materiali scadenti, ovvero con requisiti di resistenza meccanica minori di quelli necessari per la realizzazione dell'opera. Possono, infine, essere dovute ad errate condizioni di costipamento e posa in opera dei materiali.

La megatessitura è la classe di tessitura compresa tra i 50 mm ed i 500 mm ossia di quelle dimensioni assimilabili a quelle della zona di contatto tra pneumatico e pavimentazione [01],

[02]. La megatessitura non influisce sull'aderenza ma le degradazioni che ne scaturiscono possono far nascere, o meglio amplificare, problemi legati alle vibrazioni degli organi di guida del veicolo, compromettendo il comfort e la sicurezza di marcia (*cfr. Par. 2.5.1 e Par. 2.6.4*). Oltre a questi effetti, la presenza della megatessitura può dar luogo anche a rumore di rotolamento e ad un maggior logorio dei pneumatici, nonché avere effetti indesiderati sull'aderenza. Si tratta di una caratteristica legata all'eterogeneità delle miscele e alle modalità di messa in opera. La sua presenza è dovuta essenzialmente alla varietà dei materiali posti in opera negli strati superficiali, che possono avere caratteristiche dimensionali e di resistenza all'abrasione diversa [09]. La megatessitura può presentarsi sotto forma di degradazioni del rivestimento: fessurazioni a "pelle di coccodrillo", piccole buche, desquamazioni, striature, ecc. [10]. Essa spesso può presentarsi, anche nel caso di strati superficiali in buono stato o di moderna realizzazione, come sottoprodotto del processo di ottenimento della macrotesitura: 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 macrotesitura.

La macrotesitura si riferisce al campo metrico compreso tra 0,5 mm e 50 mm con ampiezze tra 0,2 mm e 10 mm. E' la rugosità dovuta all'insieme delle asperità intergranulari ed è legata alla forma, alla dimensione ed al posizionamento degli elementi lapidei che affiorano dal conglomerato [01], [03]; nel caso di pavimentazioni in calcestruzzo essa è costituita anche dalla forma, dalla profondità, dal distanziamento, dalla larghezza, dalla simmetria e dalla direzione di eventuali striature. Tale classe di tessitura è legata, poi, alla modalità di posa in opera ed alla composizione della miscela e la sua durevolezza nel tempo deriva dalle caratteristiche mineralogiche delle rocce di provenienza degli inerti [12].

La microtesitura è il campo della tessitura cui si attribuisce soltanto un limite dimensionale superiore, fissato in lunghezze d'onda minori di 0,5 mm e ampiezze del profilo che vanno da 0,001 mm a 0,5 mm, e rappresenta la rugosità dovuta alla scabrezza e ruvidezza dei singoli elementi lapidei impiegati nello strato superficiale della pavimentazione [01], [03]. La scabrezza è generata dalle micro asperità presenti sulla superficie visibile degli inerti affioranti e dipende sia dalla natura petrografica e mineralogica degli elementi, sia dalla resistenza alla frantumazione delle rocce, da cui gli stessi hanno avuto origine e quindi dalla spigolosità del pezzo frantumato; per alcune miscele come il calcestruzzo di cemento ed il conglomerato

bituminoso, essa dipende anche dalla rugosità della malta. La microtessitura è una grandezza sensibile alle azioni del traffico, degli agenti atmosferici e del tempo e la sua persistenza dipende dalla resistenza alla levigabilità degli inerti, a sua volta funzione delle caratteristiche petrografiche, fisiche e meccaniche dell'aggregato [13].

Una schematizzazione della micro e macro tessitura superficiale è riportata in Fig.2.4:

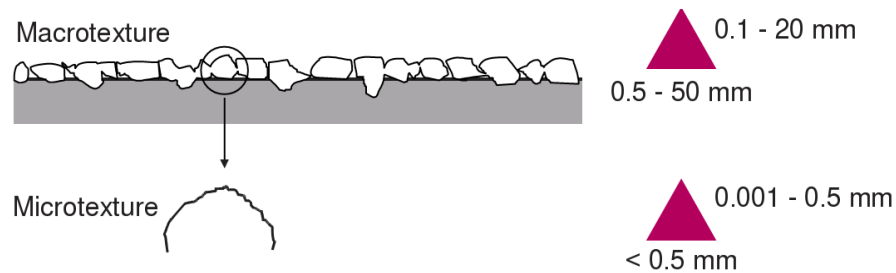


Fig. 2.4 - Rappresentazione della micro e macro tessitura di una pavimentazione stradale [14].

Il diagramma cartesiano di Fig.2.5 è indicativo della variabilità di micro e macro tessitura per diverse tipologie di pavimentazioni stradali; in particolare accanto a ciascuna immagine è riportata una rappresentazione qualitativa del profilo che caratterizza ogni superficie al fine di comprendere con più chiarezza come micro e macro rugosità superficiali determinino la “morfologia” della superficie stessa.

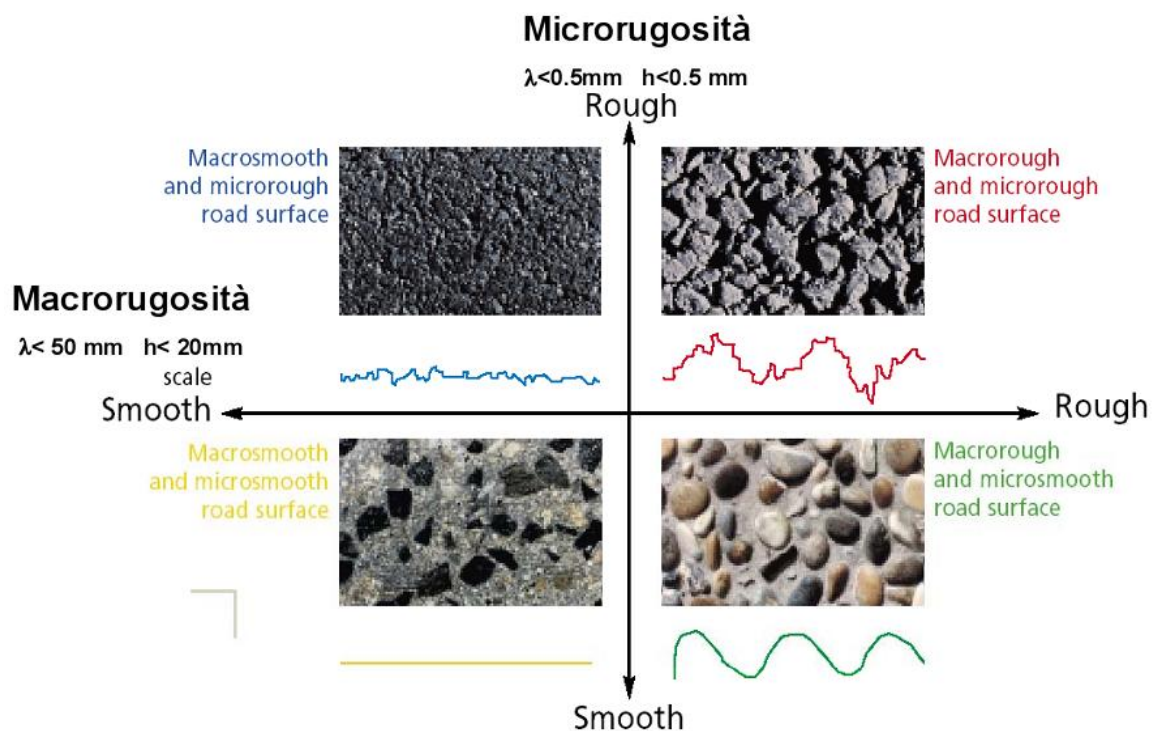


Fig. 2.5 - Micro e macro tessitura di diverse superfici: geometria del profilo.

2.2 FENOMENOLOGIA CONNESSA ALL'INTERAZIONE PNEUMATICO-PAVIMENTAZIONE: GENERALITÀ.

Lo schema di Fig. 2.6 delinea la complessa fenomenologia connessa all'interazione pneumatico-pavimentazione: ad ogni range di lunghezza d'onda corrisponde un particolare "aspetto fenomenologico" percepibile dall'utente e riconducibile ad un determinato indicatore di performance della pavimentazione stradale.

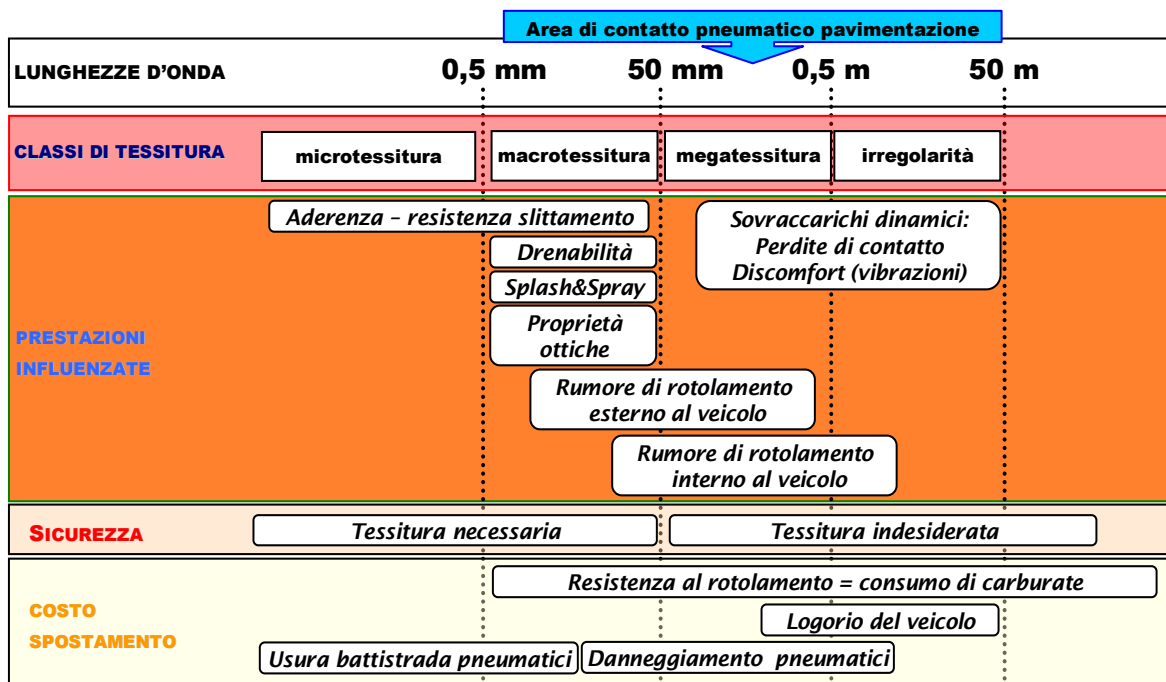


Fig.2.6 - Fenomenologia connessa all'interazione pneumatico-pavimentazione [05]

In particolare, i principali fenomeni che si esplicano al contatto fra il pneumatico e il piano di rotolamento, più in dettaglio descritti nei paragrafi successivi, sono sintetizzabili in:

- aderenza (cfr. Par. 2.3);
- splash & spray e visibilità (cfr. Par. 2.4);
- rumore di rotolamento e vibrazioni (cfr. Par. 2.5);
- costi dello spostamento (cfr. Par. 2.6).

La microtessitura influenza principalmente l'aderenza al contatto, mentre la macrotessitura governa un numero consistente di fenomeni tra cui lo splash & spray e, in parte, la generazione del rumore di rotolamento. Alle classi di tessitura con lunghezze d'onda più elevate afferiscono i fenomeni di usura del veicolo, di perdita macroscopica del contatto e discomfort per gli utenti. Ad oggi non esiste un modello di interazione complessivo e

generalizzato che possa consentire una trattazione globale e contemporanea di tutte le fenomenologie sopra elencate [15]. Pertanto, è necessario esaminare separatamente cause ed effetti di ciascun fenomeno, anche in relazione alla classe di tessitura superficiale che ne determina l'insorgere.

2.3 L'ADERENZA

2.3.1 Introduzione

Per un veicolo in moto sulla superficie stradale, l'interfaccia pneumatico-piano di rotolamento è sede di un complesso di azioni e reazioni attraverso le quali si verifica la trasformazione dell'energia motrice in energia di movimento. In campo stradale l'aderenza può essere definita come la capacità di una superficie di mobilitare le forze di attrito al contatto pneumatico-pavimentazione sotto l'effetto di sollecitazioni comuni per il veicolo quali l'accelerazione, la frenatura, etc. [03], [16].

L'aderenza, sotto specifiche condizioni al contorno, permette al veicolo di conservare in ogni momento la traiettoria desiderata in curva e di ridurre le distanze di frenatura e di arresto. In termini del tutto esemplificativi l'aderenza è il meccanismo per cui una ruota in movimento trasmette al terreno due sistemi di forze: normali F_z (che garantiscono l'equilibrio verticale del veicolo), e tangenziali, giacenti sul piano di contatto e aventi componenti che possono essere scomposte secondo le direzioni ortogonale (F_y) e parallela alla direzione del moto (F_x) (Fig.2.7). Queste ultime, nel loro complesso, rappresentano le forze di aderenza. Tali forze determinano il verificarsi di successivi istantanei regimi di equilibrio fra pneumatico e pavimentazione che hanno come effetto la "macroscopica" rototraslazione del primo sull'altra [11].

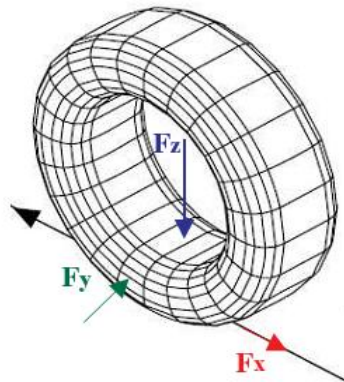


Fig. 2.7 - Schematizzazione delle forze agenti sul pneumatico in moto sulla superficie stradale.

E' possibile, dunque, distinguere due aspetti importanti del fenomeno di aderenza: aderenza longitudinale e aderenza trasversale; nel primo caso le ruote del veicolo sono soggette al peso P e ad uno sforzo tangenziale F_x (o di trazione o di frenatura), mentre nel secondo caso lo sforzo che interviene è di tipo trasversale (F_y). Il verificarsi delle condizioni di aderenza longitudinale per le ruote motrici o frenate del veicolo stradale fa sì che la ruota rotola, in linea teorica, senza slittare per la presenza di una forza tangenziale giacente sul piano della ruota stessa. Il massimo valore di questa forza tangenziale, oltre il quale si passa dall'aderenza all'innescarsi di fenomeni di slittamento, è detto limite di aderenza longitudinale. In 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 tipo di contatto (umido, asciutto, contaminato, etc.), del carico, della coppia applicata, del tipo di sollecitazione (motrice o frenante) e della velocità. Questo strisciamento porta ad avere un avanzamento della ruota in condizione di rotostraslazione.

Analogamente al caso dell'aderenza longitudinale si può affermare che le condizioni di aderenza trasversale 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. La distinzione tra aderenza longitudinale e trasversale (o laterale) è, effettivamente, un puro fatto formale, in quanto le modalità con cui si manifesta il fenomeno sono le stesse in entrambi i casi [11].

La descrizione dettagliata del fenomeno "aderenza" risulta alquanto ostica a causa delle caratteristiche non propriamente elastiche dei corpi in contatto. Il contatto, infatti, avviene fra la gomma del pneumatico, materiale relativamente flessibile e viscoelastico ed il rivestimento superficiale della pavimentazione. Quest'ultimo è assimilabile ad una superficie "ruvida", con asperità a diversa altezza, composta da un materiale eterogeneo a tre fasi, generalmente conglomerato bituminoso, costituito da aggregati, legante e vuoti.

In generale, lo studio del contatto fra corpi si differenzia in base ai diversi aspetti cui esso è legato. In particolare, si distinguono i casi di *problema normale* e *problema tangenziale*. Per problema normale si intende la definizione dell'area di contatto e la determinazione della pressione normale al contatto [17]. Per problema tangenziale, invece, si intende la determinazione delle azioni tangenziali che possono essere prodotte da uno scorrimento

locale. Nel caso di un materiale elastomerico in strisciamento su uno piano scabro (caso di una ruota su una superficie stradale) i due problemi non possono essere considerati separatamente in quanto esiste una influenza reciproca dei fenomeni. Per il problema tangenziale è fondamentale la conoscenza delle leggi di attrito in quanto esse determinano, insieme alla pressione, la distribuzione delle azioni tangenziali.

I fenomeni di carattere fisico che generano il meccanismo dell'aderenza sulla superficie di contatto fra pneumatico e pavimentazione stradale possono essere ascrivibili a tre cause principali:

- attrito fra le superfici;
- adesione molecolare;
- isteresi del pneumatico.

Nel grafico di Fig.2.8 vengono schematizzate, in maniera esemplificata, le aliquote fornite all'aderenza totale da ciascuna delle tre cause precedentemente elencate per diverse condizioni della superficie su cui si muove il pneumatico.

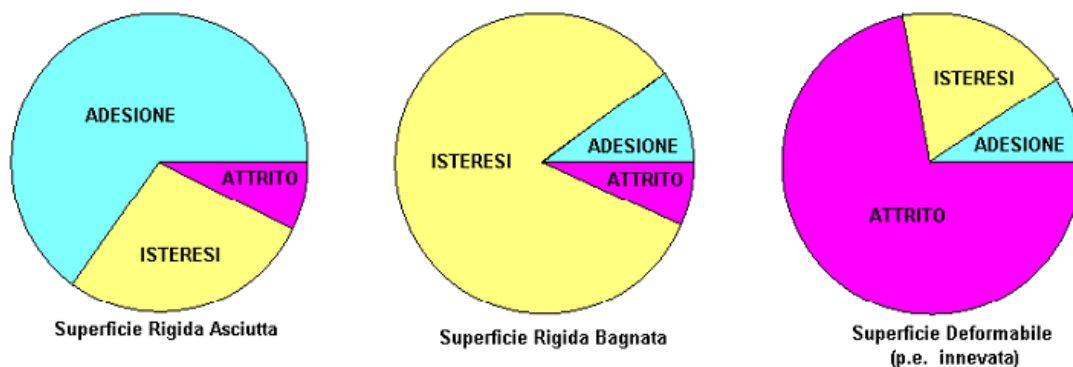


Fig.2.8 Aliquote dei meccanismi di aderenza per diverse condizioni della superficie stradale [18].

In termini del tutto generali, il coefficiente di attrito μ , la definizione del quale è legata al problema di tipo tangenziale, dipende da una serie di fattori che saranno esaminati singolarmente in questo capitolo e in particolare:

- corretta definizione del problema normale: consiste nella determinazione della variazione della pressione al contatto fra le due superfici;
- conoscenza delle caratteristiche del moto relativo fra i corpi in contatto;
- proprietà meccaniche e fisiche dei corpi in contatto: elasticità, plasticità, visco-elasticità, comprimibilità volumetrica;

- caratterizzazione delle superfici a contatto in termini di aspetti geometrici a livello microscopico e macroscopico nonché relativamente a proprietà fisico chimiche dei materiali che possono influenzare l'energia superficiale e l'adesione dei corpi;
- condizioni di interfaccia sulle superfici di contatto: riguardano la presenza, casuale o necessaria, di sostanze sulle superfici (polvere, acqua, lubrificanti) [17].

I meccanismi di adesione ed isteresi che si manifestano all'interfaccia di contatto, invece, sono due aspetti distinti ma complementari dell'aderenza superficiale. Pertanto, nei prossimi paragrafi, dopo un breve excursus storico delle teorie sull'attrito verranno definiti i coefficienti di aderenza longitudinale e trasversale e si procederà, poi, alla descrizione più dettagliata dei fenomeni di isteresi e adesione. Verranno, infine, fornite alcune indicazioni in merito alla distribuzione delle pressioni di contatto all'interfaccia e relativamente alla geometria dell'area di contatto.

2.3.2 Sintesi storica delle teorie sull'attrito.

Il comportamento di due corpi in contatto fra loro e la conoscenza della forza di attrito che si sviluppa sulla superficie di contatto sono stati, nel corso dei secoli, oggetto di teorie di diversa natura. Nel percorso evolutivo dei modelli di attrito si è partiti da un approccio empirico - fenomenologico di macroscale ad un approccio di micro-scale con l'elaborazione di modelli molto raffinati che arrivano fino all'indagine atomica [19]. Una delle prime teorie proposte fu quella di Leonardo da Vinci, il quale, con particolare riferimento al piano inclinato, concluse che la forza di attrito è indipendente dall'area di contatto ed è proporzionale al carico applicato con un coefficiente pari ad $\frac{1}{4}$ per tutti i corpi con superfici lisce e pulite [20]. Questa teoria fu ampiamente superata alla fine del XVII secolo da Amontons con l'enunciazione delle prime due leggi classiche sull'attrito secondo le quali la forza di attrito è proporzionale al carico e non dipende dall'area di contatto. Inoltre, Amontons individuò nelle asperità superficiali la causa principale dell'insorgere delle forze di attrito fra i corpi [21]. La stessa teoria fu, poi, validata dalle risultanze sperimentali di Philippe de la Hire (1640-1718) il quale, schematizzando le asperità come delle molle elastiche, introdusse il concetto di "usura" dei corpi in contatto riconoscendo in questo fenomeno l'effetto diretto dell'asportazione delle asperità superficiali durante il movimento [19].

Nello stesso periodo, la scuola inglese con Desaguliers (1683-1744) prima, e Vince (1749-1821) poi, proposero teorie sull'attrito basate sull'effetto coesivo che si sviluppa fra due superfici in contatto. In particolare, Vince affermò che proprio a causa dei meccanismi di adesione fra i corpi l'attrito statico è maggiore di quello dinamico [22], [23].

Fra il XVII ed il XVIII secolo, inoltre, furono condotti diversi studi sulla modellazione delle asperità superficiali dei corpi rugosi. Bernard Forrest de Belidor, ad esempio, introdusse il concetto di asperità sferiche e calcolò la forza richiesta per far muovere uno strato di sfere su un altro simile. I risultati sperimentali mostrarono l'indipendenza di tale forza dal numero delle sfere e quindi dall'area di contatto [19]. Euler (1707-1783) schematizzò le asperità superficiali ricorrendo alla semplificazione geometrica dei "denti di sega" e distinse, anche dal punto di vista della formulazione matematica, l'attrito statico da quello dinamico [24].

Nel XVIII secolo una delle teorie senza dubbio più valide fu quella proposta da Coulomb il quale, riprendendo i risultati di Amontons studiò l'attrito radente e di rotolamento con applicazioni pratiche alle macchine. Lo studio riguardò anche l'attrito statico e la sua dipendenza da fattori quali la natura dei materiali in contatto, l'area di contatto ed il carico agente sulle superfici. Nel caso di attrito dinamico studiò, poi, la relazione fra attrito e velocità. Per l'attrito fra i metalli affermò l'esistenza di un rapporto costante fra carico e forza di attrito indipendente dall'area di contatto e dalla velocità di scorrimento. Coulomb propose anche una spiegazione di carattere fisico dell'attrito affermando l'esistenza di due cause possibili: l'incastro delle asperità delle superfici e la coesione fra le molecole delle superfici in contatto. I risultati delle sperimentazioni lo fecero propendere per la prima delle precedenti cause, affermando che la coesione, pur non essendo nulla, ha una scarsa influenza sul verificarsi del fenomeno [25], [26].

A partire dagli anni 20-30 del XIX secolo iniziò una nuova fase di studio del fenomeno che vide una riformulazione di alcune interpretazioni classiche anche grazie alle nuove tecnologie e alle conoscenze fisiche sviluppatesi; la considerazione riguardo il problema attrito-usura fu senza dubbio di maggiore rilevanza, anche grazie alla necessità impellente manifestata dal mondo produttivo - industriale di comprendere alcuni meccanismi utili per affrontare correttamente la costruzione di macchine e di particolari organi appartenenti ad esse.

I primi studi sui meccanismi di usura furono proposti da Holm (1946), Burwell e Strang (1952), Archard e Hirst (1956) i quali elaborarono anche alcune formulazioni matematiche per il calcolo del tasso di usura di un corpo soggetto a forze di attrito [19],[27].

Tutte le ricerche condotte nella prima metà del secolo scorso trovarono una valida sintesi negli studi di Bowden e Tabor con una trattazione teorica che prese in considerazione molteplici aspetti del fenomeno attrito: struttura e topografia delle superfici, proprietà fisiche dei materiali in contatto, caratteristiche dell'attrito radente e di rotolamento, lubrificazione e usura dei corpi [28].

Una delle conclusioni più importanti fu quella relativa all'irregolarità dell'area di contatto: il contatto fra due superfici solide avviene solo attraverso le asperità più alte, per cui l'area effettiva di contatto fra le microasperità dei corpi (A_e) è sostanzialmente inferiore rispetto a quella teorica macroscopica (A_t). Il rapporto A_e/A_t dipende dallo sforzo normale agente sui corpi e dalle caratteristiche meccanico-fisiche dei corpi stessi. Le asperità che sopportano il carico si deformano plasticamente e la pressione media sui micro contatti è data dal rapporto fra la il carico normale e l'area reale di contatto. La separazione delle asperità, che aderiscono fortemente fra loro, è possibile solo attraverso uno sforzo di taglio (τ) e, quindi, una forza uguale al prodotto fra il taglio e l'area reale di contatto. La forza di attrito, dunque, è definita come la forza necessaria a separare tutte le indentazioni delle asperità superficiali e risulta, dunque, proporzionale all'area reale di contatto. $F = \tau \cdot A_e$ [29], [30].

Più recentemente, a partire dalla fine degli anni '80, si è verificata una vera e propria rivoluzione nello studio dell'attrito fra i corpi giungendo ad alcune teorie, attualmente oggetto di studio, basate sull'analisi delle forze di attrito a scala nanometrica, anche al fine di comprendere le basi atomiche dell'attrito macroscopico. Una delle teorie proposte per la spiegazione dell'attrito statico a livello nanometrico è quella di Muser et al. [30] i quali affermano la relazione fra le forze di attrito e la presenza di contaminazioni, ossia di molecole estranee, all'interfaccia delle superfici dei solidi in contatto. Le molecole "ospiti" si incastrano in specifiche posizioni di "energia minima" negli spazi superficiali liberi cosicché è necessario intervenire con una certa energia per far risistemare tali molecole e consentire lo scivolamento di un corpo sull'altro. Altri studi [31] affermano la non sussistenza di correlazioni dirette fra le caratteristiche atomiche di un corpo e gli effetti di attrito a scala macroscopica.

2.3.3 Sintesi storica delle teorie sull'attrito volvente.

L'attrito che si sviluppa fra due solidi a contatto in moto rotatorio relativo senza strisciamento con il continuo mutamento della superficie di contatto, è definito fisicamente attrito volvente. E' questo il caso riconducibile al movimento di un pneumatico su una superficie stradale. Le prime teorie sull'attrito volvente di cilindri e pulegge furono elaborate da Coulomb nel XVIII secolo e sono ancora oggi considerate scientificamente significative [19]. Coulomb affermò che la forza di attrito volvente è direttamente proporzionale al carico applicato e inversamente proporzionale al raggio del corpo rotolante. Nello stesso periodo Arthur-Jules Morin (1795-1880) [32], [33] studiò la resistenza al rotolamento di ruote di carri e carrozze su diverse superfici e concluse che tale resistenza è proporzionale al carico W e inversamente proporzionale al raggio delle ruote, confermando la teoria di Coulomb. Affermò, inoltre, che la resistenza diminuisce all'aumentare della larghezza della ruota su terreni molli ed è indipendente dalla velocità; su strade in pietra, invece, tale resistenza è indipendente dalla larghezza della ruota e aumenta in maniera proporzionale con la velocità.

Ulteriori interessanti conclusioni furono riportate da Dupuit (1804-1866) [34] il quale esplicitò il concetto di attrito volvente associandolo al fenomeno di isteresi elastica dei materiali in contatto: il materiale del piano di appoggio si deforma per effetto del carico della ruota ma tale deformazione non è immediatamente recuperata e, conseguentemente, l'entità della forza restituita è minore di quella originaria di compressione. Inoltre, lo stesso Dupuit affermò la non centralità della risultante verticale uguale e opposta al carico agente; tale verticale, infatti, risulta essere spostata in avanti rispetto all'asse verticale della ruota di una frazione δ a causa del fatto che la zona posteriore della superficie in contatto con la ruota fornisce una risposta minore, in termini di forza, rispetto a quella anteriore.

Successivamente Reynolds (1875) [35], [36] elaborò una teoria sull'attrito volvente attribuendo l'insorgere di resistenze al rotolamento all'attrito radente dovuto alla presenza di micro-slittamenti nel contatto fra ruota e superficie e descrisse il processo di rotolamento come un continuo schiacciamento e rilasciamento dei materiali in contatto (variabile a seconda della tipologia dei materiali stessi).

Una delle teorie più interessanti sul contatto fra solidi con superfici curve e sulle tensioni di contatto fra due sfere, o una sfera rigida ed un piano infinito, fu quella proposta da Hertz

(1881) [37] che consentì il calcolo dell'area della regione di contatto nonché della distribuzione delle pressioni all'interno dell'area di contatto e dello stato tensionale esistente.

2.3.4 Coefficienti di aderenza longitudinale e trasversale: ellisse di trazione

Quando due corpi generici sono in contatto fra loro così da identificare un'area di impronta in cui risultano uniformemente distribuite una forza normale P e ad una forza tangenziale T agenti sul corpo posto superiormente, si verificano deformazioni nei punti di contatto nonché la mutua compenetrazione delle superfici. Sotto l'azione di una forza tangenziale T , lo spostamento reciproco X fra i due corpi è dovuto inizialmente a deformazioni tangenziali di tipo elastico (proporzionalità diretta tra spostamento e deformazione secondo la legge di Hooke). In corrispondenza di una forza tangenziale T_{\max} , che rappresenta il limite superiore della fase elastica, la condizione di mutuo combaciamento non sussiste più ed il comportamento dei due corpi in contatto cambia radicalmente: si instaura uno scorrimento (slittamento) reciproco fra le due superfici e la forza tangenziale assume un valore (T_1) leggermente inferiore a T_{\max} (Fig. 2.9). Il rapporto T_{\max}/P rappresenta il coefficiente di *attrito di primo distacco*, mentre il *coefficiente di attrito cinetico* è dato dal rapporto fra T_1 e P [11].

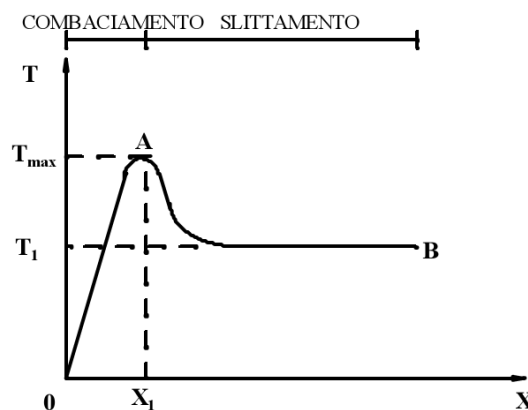


Fig. 2.9 Proporzionalità tra la forza tangenziale (T) agente tra due superfici piane, e lo spostamento reciproco (X) [11]

Nel caso di una ruota che si muove su un terreno compatto il *coefficiente di aderenza* ruota-terreno non è identificabile né con il coefficiente di attrito di primo distacco né con quello cinetico sia perché il sistema di forze agente sulla ruota non può considerarsi uniformemente distribuito nell'area di contatto, sia perché all'interno dell'area di impronta possono verificarsi

contemporaneamente entrambi i fenomeni di mutuo combaciamento e di slittamento in punti diversi della stessa area.

Tali differenze rispetto al caso ideale sono ascrivibili principalmente al fatto che la gomma è un materiale fortemente deformabile e con proprietà viscoelastiche marcate.

Per lo studio delle problematiche connesse al fenomeno dell'aderenza in questo caso occorre necessariamente distinguere due casi specifici: ruota motrice e ruota frenata.

Si consideri una ruota in movimento alla velocità V , soggetta ad un carico verticale P , all'azione di una forza di trazione T e di una forza frenante (F_f) prodotta da un ceppo premuto contro la ruota stessa (Fig. 2.10).

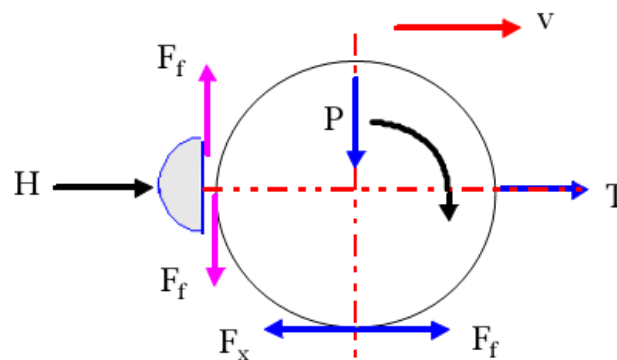


Fig. 2.10 - Sistema di forze agente su una ruota frenata [11].

E' evidente che la forza frenante si trasmette al suolo dando origine alla reazione F_x uguale e contraria ad F_f fino a che quest'ultima non raggiunge un valore critico (F_{ax}) oltre il quale la ruota si blocca pur continuando ad avanzare strisciando: si verifica il cosiddetto fenomeno di pattinamento. Si definisce, dunque, *coefficiente di aderenza longitudinale* (f_x) il rapporto:

$$f_x = F_{ax}/P \quad (2)$$

dove F_{ax} è il valore massimo della forza longitudinale che si può trasmettere fra ruota e superficie stradale in condizioni di rotolamento.

A ruota bloccata si sviluppa una forza di attrito radente F'_x ; il coefficiente di attrito radente (f'_x) è dato dal rapporto fra F'_x ed il carico verticale P .

Nella realtà il moto non è mai di puro rotolamento ma si verificano degli slittamenti fra ruota e suolo che variano a seconda della tipologia dei materiali in contatto. Inoltre, i carichi dinamici su una ruota in movimento dipendono essenzialmente dalla struttura del veicolo, nonché dalle sospensioni e dalle caratteristiche del pneumatico. A queste forze dinamiche si aggiungono

forze non perfettamente verticali dovute alla presenza di una forza orizzontale globale causata dall'accelerazione/decelerazione del veicolo. Subentrano quindi azioni tangenziali che danno luogo allo strisciamento reciproco ruota-pavimentazione: nel caso di ruota motrice l'avanzamento reale della ruota è minore di quello che si avrebbe in condizioni di puro rotolamento; il contrario si verifica nel caso di ruota frenata. Si definisce quindi lo scorrimento s in base alle (3) e (4):

$$\frac{L_0 - L}{L_0} = s \quad (3)$$

$$\frac{L - L_0}{L_0} = s \quad (4)$$

dove L_0 è lo spazio effettivamente percorso dalla ruota nell'unità di tempo e L è lo spazio teorico percorribile in condizioni di puro rotolamento. Dalle formule è facile evincere come la ruota motrice in condizioni di scorrimento totale ($s=1$) gira su se stessa senza avanzare mentre quella frenata avanza strisciando senza rotolare. Nel caso di strada in condizioni asciutte (Fig.2.11) la forza tangenziale F_x inizialmente cresce linearmente, il comportamento dei materiali in contatto è di tipo elastico e obbedisce al modello di Hooke; lo scorrimento è nullo. Quando la forza tangenziale raggiunge il valore massimo F_{ax} inizia ad innescarsi il fenomeno dello scorrimento fino ad un valore massimo di slittamento ($s=1$) in cui la forza F_x diminuisce fino al valore F'_x . Il tratto è indeterminato perché il passaggio da s_0 allo slittamento totale è quasi istantaneo. Nel caso di strada bagnata, liscia o resa viscida da sostanze presenti, per valori di s maggiori di s_0 il valore di F_x si mantiene costante fino allo slittamento massimo (Fig.2.11). Questa situazione è gravosa ai fini della sicurezza in quanto lo slittamento totale si raggiunge senza che ci siano variazioni sensibili dello sforzo tangenziale [11], [38].

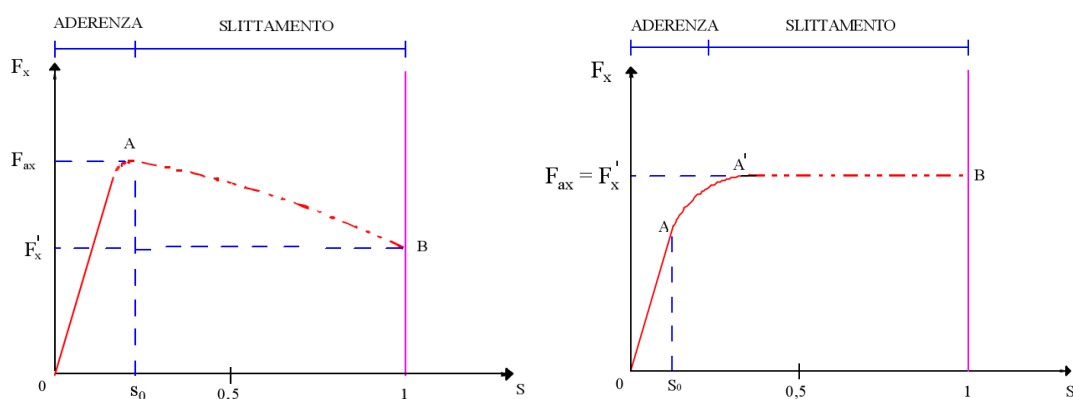


Fig.2.11 - Aderenza e scorrimento longitudinale di un pneumatico: curve di scorrimento $F_x(s)$ nel caso di superficie asciutta (s_x) e bagnata (s_x).

Quando una ruota in movimento è soggetta, oltre al carico P verticale, anche ad una forza laterale F_y devierà dalla direzione originaria (x), muovendosi secondo una direzione x' inclinata rispetto ad x di un angolo ϵ , detto di deriva (ϵ dipende dalle caratteristiche del pneumatico, dal carico dalla pressione di gonfiaggio etc.) (Fig. 2.12).

Raggiunto il limite di aderenza trasversale, l'angolo di deriva cresce rapidamente fino ad una condizione di slittamento totale ($\epsilon = 90^\circ$) [39]. Per quanto riguarda il coefficiente di aderenza trasversale (f_y), esso dipende, ovviamente, dalle caratteristiche sia del pneumatico che della strada.

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_y ed f_x [40]:

$$f_y = 0.925 f_x \quad (5)$$

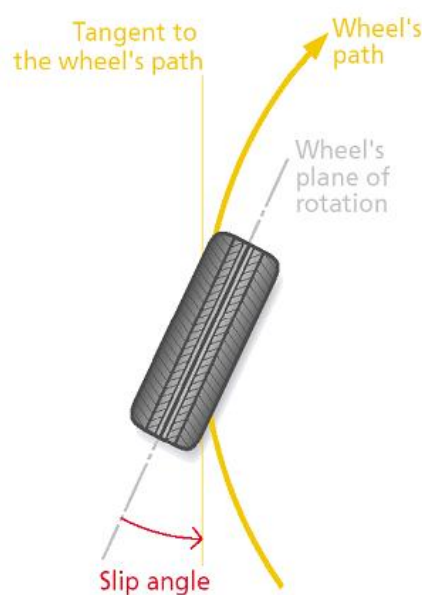


Fig. 2.12 - Rappresentazione schematica dell'angolo di deriva del pneumatico

In conclusione, dalle relazioni (2) e (5) per il calcolo dei due coefficienti di aderenza longitudinale e trasversale è possibile determinare i valori delle forze massime che il pneumatico può reggere in direzione longitudinale e trasversale:

(6)

Nel caso di qualunque altra direzione è possibile determinare il valore della forza massima esplicabile dal pneumatico sul piano orizzontale in diverse condizioni di carico attraverso l'ellisse di trazione. Tale ellisse viene costruita con l'ausilio di prove sperimentali basate sulla variabilità del carico verticale P . Se la sollecitazione a cui è sottoposto il pneumatico cade all'interno dell'ellisse si è in condizioni di aderenza, altrimenti si instaurano condizioni di perdita di aderenza (*Fig. 2.13*).

Le relazioni (6) rappresentano rispettivamente i semiassi maggiore e minore dell'ellisse nel caso in cui l'aderenza longitudinale è maggiore di quella trasversale.

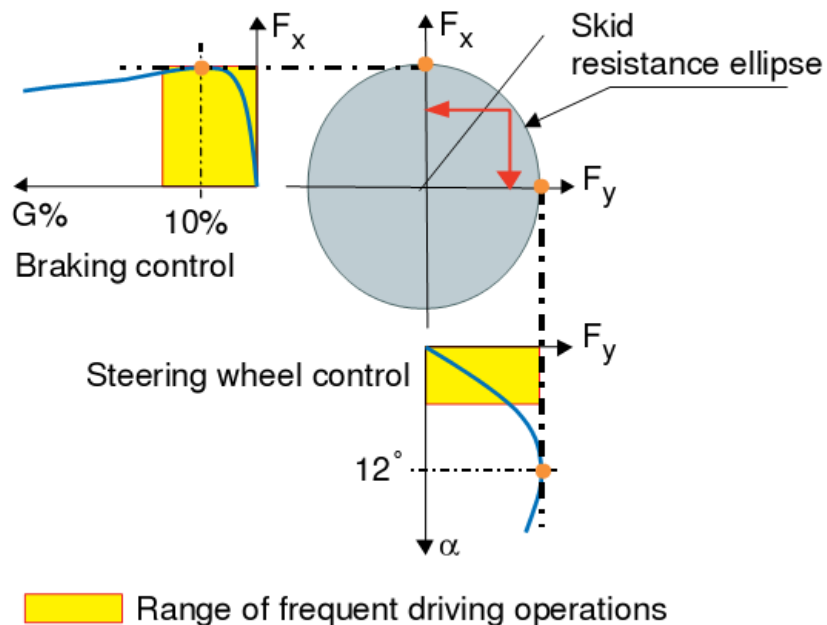


Fig. 2.13 - Ellisse di trazione [39]

Gli pneumatici moderni, nella maggior parte dei casi, hanno caratteristiche di aderenza simili sia in direzione longitudinale che trasversale per cui l'ellisse di trazione è assimilabile ad un cerchio [40].

2.3.5 L'aderenza pneumatico - pavimentazione: meccanismi di adesione ed isteresi.

Secondo quanto già introdotto nel paragrafo 2.3.1, l'aderenza è data dall'azione combinata di due meccanismi differenti: l'isteresi e l'adesione (*Fig.2.14*).

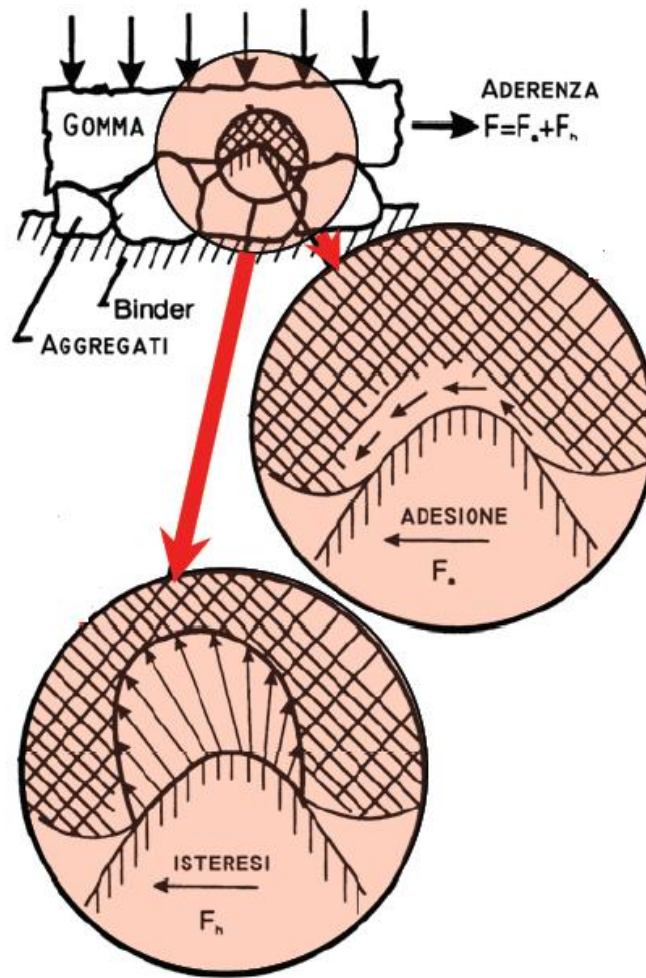


Fig. 2.14 - Meccanismi di isteresi e adesione al contatto pneumatico-pavimentazione [05]

L'adesione ha luogo quando le molecole della gomma entrano in contatto diretto con il fondo stradale, pertanto è un fenomeno che avviene ad una scala dell'ordine del centesimo di micron. Quando due corpi sono in contatto fra loro si creano legami a livello atomico tali da innescare forze di natura molecolare sulla superficie di contatto, responsabili appunto del fenomeno di adesione [05].

La gomma è un polimero, mentre l'asfalto ha una struttura cristallina. Quando queste due strutture si incontrano, le molecole della gomma si deformano. Alcuni legami si spezzano, altri si riformano e questo processo si ripete ciclicamente durante il passaggio di una superficie sull'altra. Questa rottura e compressione dei legami molecolari (stick-slip process) assorbe dell'energia, detta appunto forza di adesione [41]. Una schematizzazione del processo è riportata in Fig. 2.15.

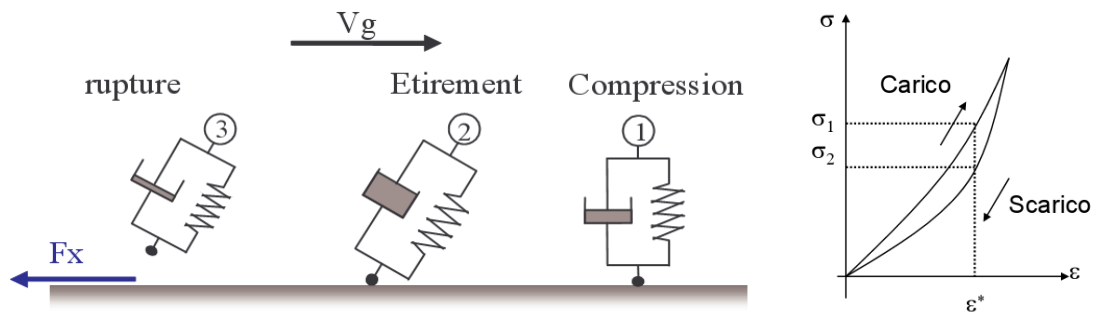


Fig. 2.15 - Schema fisico del meccanismo di adesione [41]

Il fenomeno dell'adesione molecolare ha ripercussioni anche sulla geometria dell'area di contatto. I legami di interfaccia, responsabili del fenomeno adesivo, infatti, determinano un aumento dell'area di contatto (Fig.2.16) rispetto all'area determinata attraverso la teoria di Hertz in assenza di forze di adesione.

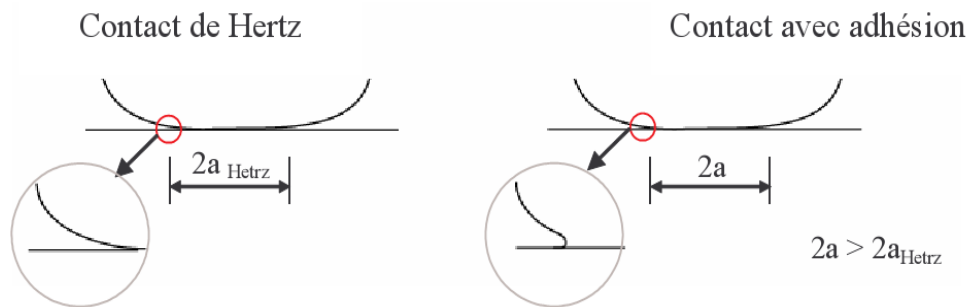


Fig. 2.16 - Effetti dovuti al fenomeno di adesione sulla morfologia dell'area di contatto [41]

Fuller e Tabor, inoltre, definirono un parametro di adesione in funzione della distanza fra le linee medie dei corpi in contatto [42]:

$$\text{---} \quad (7)$$

In riferimento all'espressione (7), è direttamente proporzionale alla distanza fra le linee medie dei corpi z , al raggio di curvatura medio delle asperità R e al modulo d'elasticità ridotto E^* . Il numeratore rappresenta la forza fisica necessaria a separare le asperità mentre il termine al denominatore rappresenta la forza di adesione. Per valori di z elevati il fenomeno adesivo è poco rilevante; viceversa i materiali con un fattore λ relativamente basso hanno proprietà adesive maggiori. Studi di letteratura mostrano, inoltre, che la componente "adesione" del

fenomeno aderenza diventa rilevante quando le due superfici in contatto hanno una distanza interfacciale inferiore ad 1mm senza la presenza di materiale interposto di diversa natura [43]. Alle alte velocità, il fenomeno dell'adesione lascia il posto in gran misura all'isteresi che esprime la capacità del pneumatico di deformarsi adattandosi alle irregolarità del manto stradale. Il materiale visco-elastico di cui è composto il pneumatico si muove sulla superficie "involuppando" in maniera dissimmetrica le asperità; si generano, dunque, delle forze di reazione che si oppongono allo slittamento. In seguito a questo processo, detto anche ingranamento, alcune zone della gomma subiscono una compressione, mentre altre uno stiramento (*Fig.2.14*). Affinché lo stiramento sia possibile, gli atomi della gomma devono subire uno spostamento reciproco ed a tale fenomeno deve accompagnarsi un attrito che provoca il riscaldamento dello pneumatico. Questo processo assorbe un'energia molto simile a quella dell'adesione, ma che in questo caso viene definita come attrito interno. L'isteresi è il meccanismo prevalente in condizioni di piano di rotolamento bagnato [03].

2.3.6 Il contatto bagnato: il fenomeno dell'aquaplaning

Come già ampiamente descritto nel paragrafo precedente, l'adesione che si esplica attraverso il contatto diretto della ruota sulla superficie della pavimentazione è di natura molecolare: le forze a livello atomico "trattengono" la ruota, nella zona di contatto, nel movimento di rotolamento. Nel caso in cui ci sia una sostanza contaminante (olio, acqua, neve, ghiaccio) sulla pavimentazione il contatto potrebbe venire a mancare se le asperità degli inerti in superficie non sono in grado di perforare la pellicola della sostanza presente. Se il pneumatico, durante il moto di rototraslazione, non riesce a rimuovere tutto il fluido presente sulla superficie, si forma un cono d'acqua di fronte all'area di contatto (*Fig. 2.17*).



Fig. 2.17 - Formazione del cono d'acqua sull'area di contatto.

In questo caso è evidente che l'aderenza viene notevolmente influenzata dalla capacità drenante del piano stradale, da cui dipende la velocità di deflusso delle acque meteoriche e quindi l'altezza dei veli idrici che si formano sulla superficie della pavimentazione in presenza di pioggia. Altro fattore determinante nell'innescarsi del fenomeno dell'aquaplaning è la velocità di marcia del veicolo. A parità di altre condizioni, infatti, l'aumento della velocità provoca il progressivo distacco del pneumatico dal suolo con una notevole riduzione dell'area di contatto. In Fig.2.18 è mostrata una fotografia dell'area di contatto in condizioni bagnate per tre diversi livelli di velocità [44].

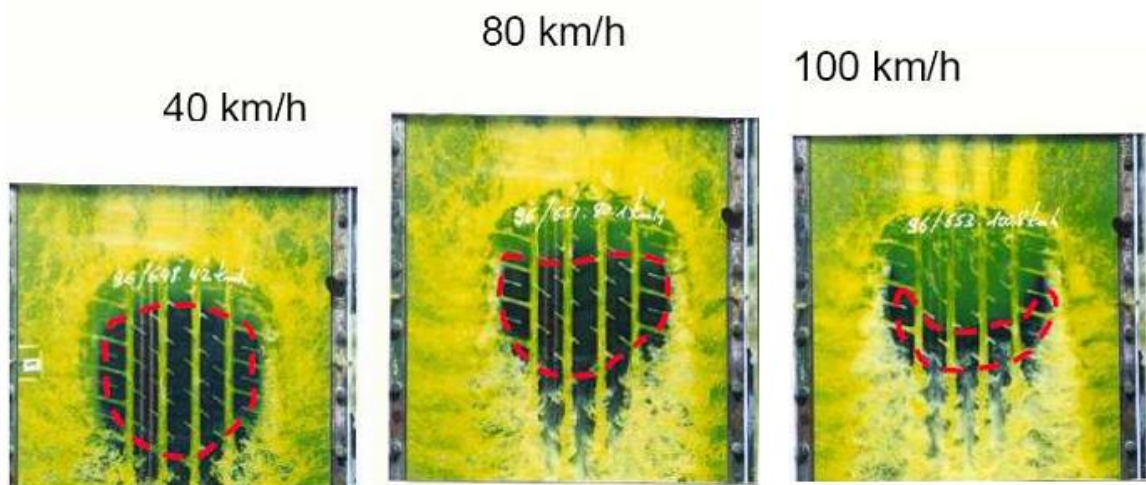


Fig. 2.18 - Estensione dell'area di contatto per diverse velocità di percorrenza del veicolo.

Nell'analizzare in maniera più dettagliata il rotolamento di un pneumatico sul fondo bagnato è possibile distinguere tre diverse fasi o fenomeni di aderenza, dipendenti dallo spessore del film d'acqua presente sulla superficie:

- *Hydro o aquaplaning*: propriamente detto per spessori del film liquido inferiori a 0,5 mm;
- *Viscoplaning*: spessori compresi fra 0,5 mm e 0.10 mm;
- *Damp o Umido*: spessori del film d'acqua inferiori a 0.10 mm.

Il fenomeno dell'hydro o aquaplaning deriva dall'azione di forze di tipo idrodinamico. In presenza di esigui spessori del velo idrico interposto fra pneumatico e pavimentazione, l'acqua viene pressurizzata dalla ruota e il drenaggio avviene attraverso i vuoti presenti nella miscela di conglomerato. Oltre una certa soglia di velocità la pressione idrodinamica dell'acqua è superiore alla pressione al suolo del pneumatico dovuta al carico veicolare e, di conseguenza, si verifica un vero e proprio distacco del pneumatico dalla superficie di rotolamento. In tali

condizioni di marcia il pneumatico non è più in grado di garantire al veicolo una forza di frenatura adeguata a mantenere le condizioni di aderenza al suolo necessarie (Fig 2.19).



Fig. 2.19 - Schematizzazione del fenomeno dell'aquaplaning

Il fenomeno del viscoplaning, invece, deriva da sforzi di taglio di tipo viscoso. L'acqua che non è stata allontanata dal fronte idrodinamico o immagazzinata nelle scolpiture del disegno del battistrada viene schiacciata dai tasselli del pneumatico che entrano nell'area di contatto e, contemporaneamente, dai picchi microscopici della superficie. In questo caso, indipendentemente dalla velocità e dallo spessore del velo idrico, l'acqua rimasta sulla pavimentazione si interpone fra il pneumatico e la sommità delle asperità della superficie stradale inducendo un fenomeno di perdita di aderenza di tipo viscoso. Ciò può dipendere dalla carenza nella tessitura degli inerti o dall'eccessivo grado di usura del pneumatico. L'aquaplaning viscoso, per il fatto che può innescarsi anche a basse velocità, è sicuramente più insidioso rispetto quello dinamico.

Il fenomeno del dump o contatto umido si verifica quando il film d'acqua interposto fra gomma e superficie è dell'ordine dei micron; in tal caso è necessario vincere la tensione superficiale per ricreare le condizioni di contatto asciutto. A questo scopo i bordi di attacco dei tasselli del battistrada applicano i picchi di pressione necessari alla rottura del film liquido [11]. In relazione ai tre fenomeni di aderenza precedentemente descritti, è opportuno suddividere l'area di contatto tra il pneumatico e la superficie stradale bagnata in tre diverse zone, schematizzate nella rappresentazione grafica di Fig.2.20 [45], [46]:

- **zona di evacuazione (A):** è la zona nella quale l'acqua presente sulla superficie viene convogliata e allontanata dal battistrada riducendo, così, lo spessore del velo idrico (cfr Fig.2.20). In questa zona la pellicola d'acqua, che ha il massimo spessore, separa nettamente pneumatico e pavimentazione: non è quindi presente nessuna forza d'attrito (l'acqua non trasmette azioni tangenziali). La pressione dell'acqua è di poco maggiore della pressione di gonfiaggio del pneumatico. Per fissata velocità di marcia, l'estensione di

questa zona dipende sia dalla profondità media delle sculture del pneumatico che dalla distribuzione ed ampiezza della macrotestitura presente sulla superficie stradale. Al crescere di queste due grandezze decresce l'area della zona A e ciò è intuitivamente comprensibile in quanto aumentano le cavità entro cui l'acqua può evacuare;

- **zona di attrito (B):** in questa porzione di superficie, grazie alla micro e macro rugosità superficiale, lo spessore d'acqua rimanente viene "rotto" e ulteriormente allontanato dall'area di contatto (cfr Fig.2.20). All'interno di questa zona l'acqua viene espulsa in parte attraverso la scultura del pneumatico ed in parte attraverso la macrotestitura superficiale. Ne consegue che la pellicola d'acqua è abbastanza sottile e questo permette alle macroasperità di arrivare al contatto con il pneumatico. I singoli inerti continuano ad essere ricoperti da un leggero "velo" idrico e ciò comporta il non innescarsi del meccanismo di adesione tra battistrada e pavimentazione, ma soltanto del fenomeno isteretico. La zona B cessa non appena la microtestitura è tale da affiorare sopra il velo idrico e penetrare la gomma del battistrada (zona C). L'estensione della zona B dipende quindi esclusivamente dalla presenza sulle facce dei singoli inerti di microasperità pronunciate;
- **zona di contatto (C):** è l'area di contatto effettivo fra pneumatico e pavimentazione (cfr Fig.2.20). Il pneumatico è in contatto "asciutto" con la superficie e le microasperità presenti sulle facce visibili degli inerti si infiggono nella gomma del battistrada. È in questa zona che si innescano entrambi i meccanismi d'attrito: l'adesione e l'isteresi.

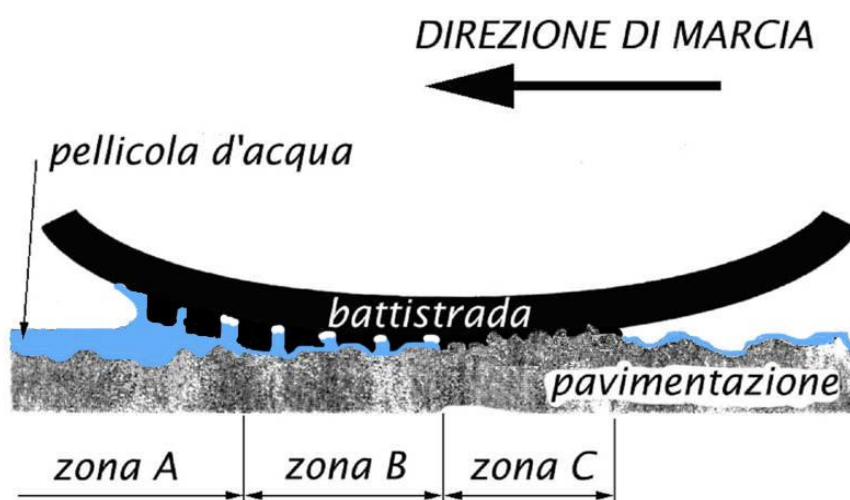


Fig. 2.20 - Zone di contatto interessate dal fenomeno

La velocità di soglia per l'attivazione del fenomeno dell'aquaplaning è funzione dei seguenti parametri [11]:

- spessore del velo liquido;
- caratteristiche reologiche del fluido;
- disegno e profondità del battistrada;
- peso del veicolo.

La velocità di soglia per l'attivazione del fenomeno può essere determinata attraverso modelli analitici di letteratura ricavati a partire da dati sperimentali [05].

Autore	Espressione analitica del modello
Gallaway B.M. [47]	$V_p = SD^{0,04} P^{0,3} (TD+1)^{0,06} A$
Agrawal & al. [48]	$V_p = 33,7 + 5,28 WD^{-0,5}$ $V_p = 26,04 WD^{-0,259}$
Horne & al.[49]	$V_p = 10,35 P^{0,5}$
Gengebach [50]	$V_p = 508 (Q/B \times WD \times C_H)^{0,5}$

Tabella 2.2- - Relazioni sperimentali per la determinazione della velocità di innesco dell'aquaplaning [05]

Le espressioni riportate in *Tabella 2.2* contengono, come variabili dipendenti, i seguenti parametri comuni:

- V_p : Velocità di innesco dell'aquaplaning;
- SD : Percentuale di Spindown (variazione percentuale della velocità della ruota in presenza di acqua rispetto a quella che la ruota avrebbe in condizioni di perfetta aderenza);
- P : Pressione di gonfiaggio delle gomme;
- TD : Profondità delle scolpiture del battistrada;
- A : Max tra $[(10,409/WD^{0,06}+3,507)TXD^{0,14}]$ & $[(28,952/WD^{0,06}-7,817)TXD^{0,14}]$;
- WD : Spessore del velo idrico [inch];
- TXD : Profondità della tessitura (in termini di macro-tessitura) [mm];
- Q : Carico su ruota;
- B : Larghezza dell'impronta di contatto del pneumatico;
- C_H : Coefficiente di portanza del pneumatico.

In letteratura [05] è proposta una rappresentazione qualitativa del modello Gallaway in cui è possibile osservare come la velocità di innesco del fenomeno dell'aquaplaning sia

direttamente proporzionale alla profondità media della macrotesttura e inversamente proporzionale allo spessore del velo idrico sul piano stradale per fissata macrotesttura (TXD) (Fig. 2.21).

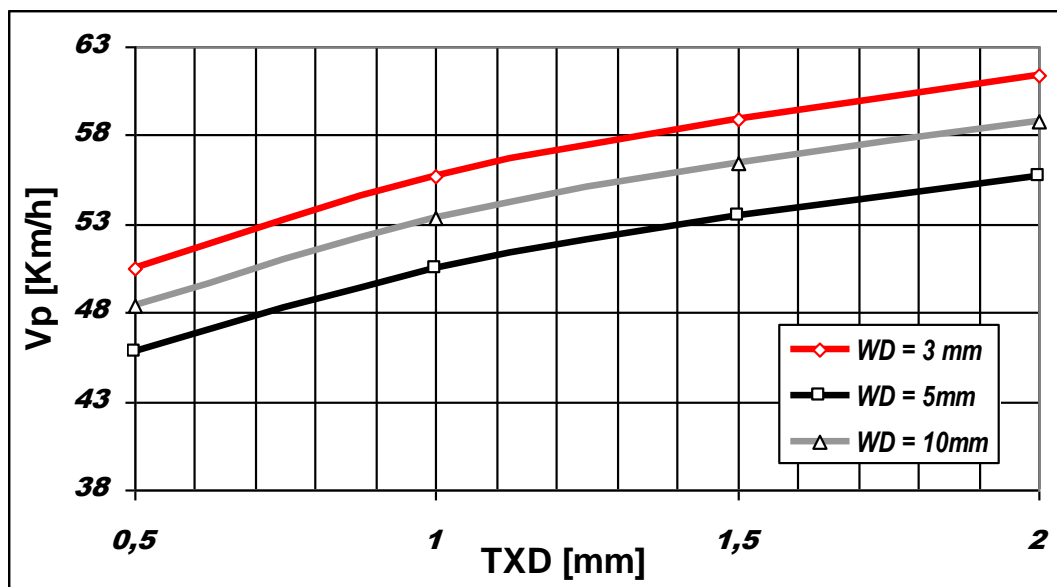


Fig. 2.21 - Rappresentazione grafica del modello Gallaway¹ [05]

2.3.7 Tessitura superficiale, aderenza e sicurezza

Da quanto finora esposto, emerge chiaramente come la tessitura superficiale rivesta un ruolo fondamentale nel determinare le condizioni di sicurezza necessarie agli utenti della strada, contribuendo in modi diversi e complementari al miglioramento delle performance dell'infrastruttura.

E' ben noto come la sicurezza stradale nasca sempre dall'interazione di diversi fattori afferenti agli ambiti del comportamento umano, delle caratteristiche dell'infrastruttura, delle condizioni del veicolo e dell'ambiente circostante. In uno studio condotto dall'AIPCR [03], è emerso, però, un dato quantitativo di particolare importanza a tale riguardo: sulla rete stradale nazionale mediamente il 30% del totale degli incidenti ha nella strada la causa principale o una concausa del loro verificarsi, e di questi circa un terzo può essere associato a difetti del piano di rotolamento, come illustrato in Fig. 2.22.

¹ Grafico determinato per SD= 50%; P=7Kg/cm²; TD= 8mm.

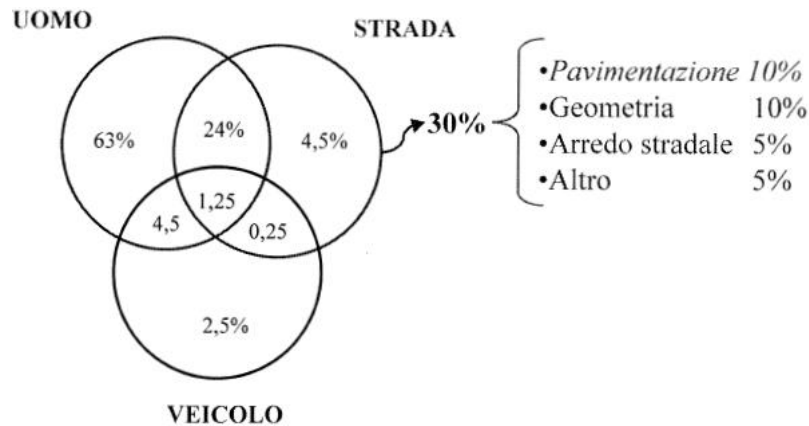


Fig. 2.22 - Ripartizione delle aliquote di incidenti per fattore d'origine [03]

Le caratteristiche superficiali della pavimentazione stradale, dunque, giocano un ruolo fondamentale nel determinare adeguati standard di sicurezza per gli utenti. L'aderenza al contatto pneumatico-pavimentazione, infatti, è strettamente correlata alla tessitura superficiale e, allo stesso tempo, è il fattore determinante nel garantire condizioni di marcia ottimali ed il controllo del veicolo, soprattutto in condizioni di emergenza (superficie bagnata). Se l'aderenza è il fattore primario nel determinare le condizioni di sicurezza non è possibile non considerare altre variabili quali la qualità della visibilità, il ristagno d'acqua sulla superficie, anch'esse in parte correlate alle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento (cfr. Par.2.4).

La classificazione dei fattori legati alla sicurezza stradale ha come finalità l'individuazione e delle cause di incidentalità e delle possibili soluzioni tecniche da adottare per colmare ciascuna deficienza individuata. Quando una pavimentazione stradale viene valutata in termini di sicurezza, è necessario il monitoraggio di una serie di fattori:

1. aderenza e tessitura superficiale;
2. regolarità della pavimentazione (International Roughness Index - IRI);
3. condizioni superficiali della pavimentazione in termini di buche, fessure, ormaie;
4. condizioni climatiche ed ambientali;
5. geometria del tracciato;
6. condizioni di visibilità.

Molti di questi fattori sono stati già analizzati e descritti in relazione alle diverse classi di tessitura; in questo paragrafo si intende fornire un quadro esaustivo dei principali studi rinvenuti in bibliografia in merito all'influenza delle caratteristiche superficiali del piano di

rotolamento sull'incidentalità veicolare. Le caratteristiche superficiali qui analizzate sono stimate attraverso l'utilizzo di diverse apparecchiature di rilievo che verranno più approfonditamente descritte, insieme agli indicatori di tessitura correlati, al Capitolo 4 della presente tesi. Numerosi studi di letteratura hanno analizzato il rapporto fra l'incidentalità e le caratteristiche superficiali del piano di via. La ricerca condotta da Roe [51] prende in esame tre diverse tipologie di strade (autostrade, extraurbane principali e secondarie). La profondità di tessitura espressa in termini di SMTD (Sensor Measured Texture Depth) è misurata sia sui siti di maggiore incidentalità che sulle sezioni stradali in corrispondenza delle quali il rischio di incidentalità è pressoché nullo. Lo studio mostra come il numero dei siti di incidentalità aumenti del 50% circa per valori di macrotessitura SMTD inferiori a 0.4. In Gothie [52] la relazione ricavata fra tasso di incidentalità (10^8 veicoli/Km/anno) in condizioni bagnate e macrotessitura (HS, misurata con metodo dell'altezza in sabbia) mostra una variabilità minima dell'incidentalità per valori di HS superiori a 0.5mm (Fig. 2.23). Lo stesso tasso aumenta del 50% circa per valori di macrotessitura inferiori. I dati sperimentali sono stati acquisiti su 215 Km di strade francesi con un traffico giornaliero medio di 10.000 veicoli a valle di un monitoraggio effettuato per un periodo di 4.5 anni.

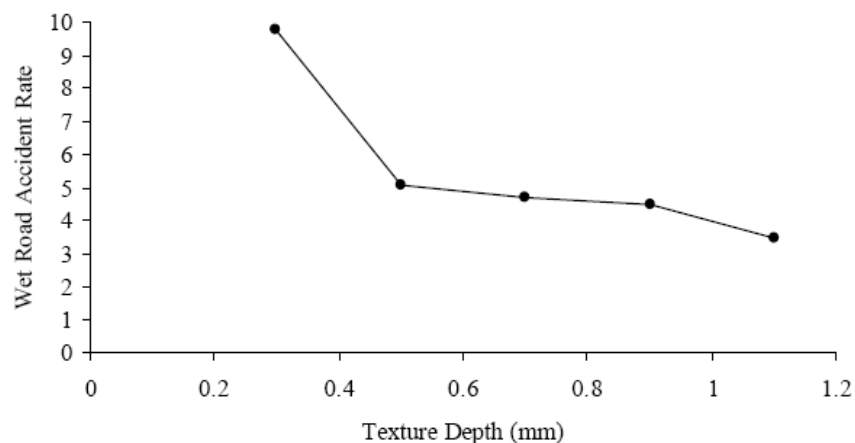


Fig. 2.23 - Tasso di incidentalità in condizioni bagnate al variare della profondità di tessitura [52]

Il tasso di incidentalità (crash rate/5 anni) in condizioni di superficie asciutta e bagnata decresce all'aumentare del coefficiente di aderenza (misurato con apparecchio SCRIM) [53] (Fig. 2.24). Lo studio, condotto su dati acquisiti su più di 1750 km di strade urbane a due corsie in Spagna, ha inoltre dimostrato che un incremento del coefficiente SCRIM da un valore medio inferiore a 50 fino ad un valore massimo di 60 determina una riduzione del rischio di incidentalità su strada bagnata del 70% circa.

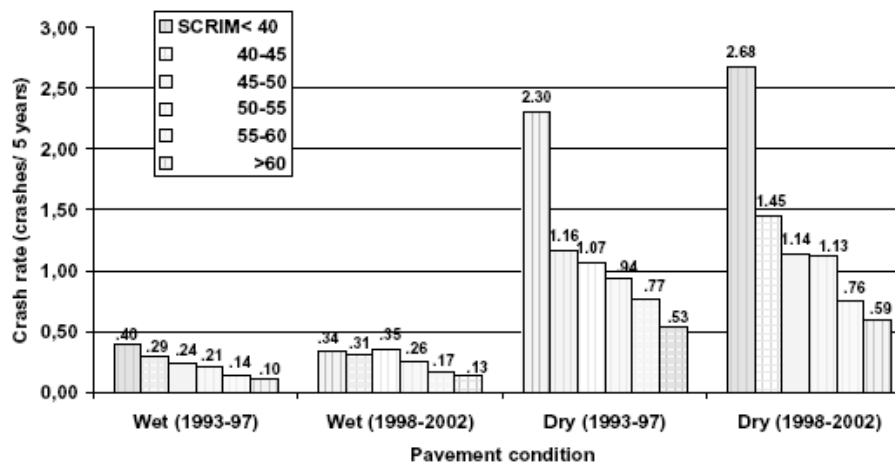


Fig. 2.23 - Tasso di incidentalità su 5 anni per diverse condizioni della superficie del piano di rotolamento [53]

Crainey [54] mostra come il numero di incidenti (stimato su 10 milioni di veicoli) subisca un incremento pari al 50% circa per valori di macrotelessitura (misurata con il metodo dell'altezza in sabbia) inferiori a 1.8 mm (Fig. 2.24). La legge di potenza interpolante ricavata ($r^2=0.74$) ha la seguente espressione analitica:

$$(8)$$

in cui il termine x rappresenta la macrotelessitura misurata (SPTD).

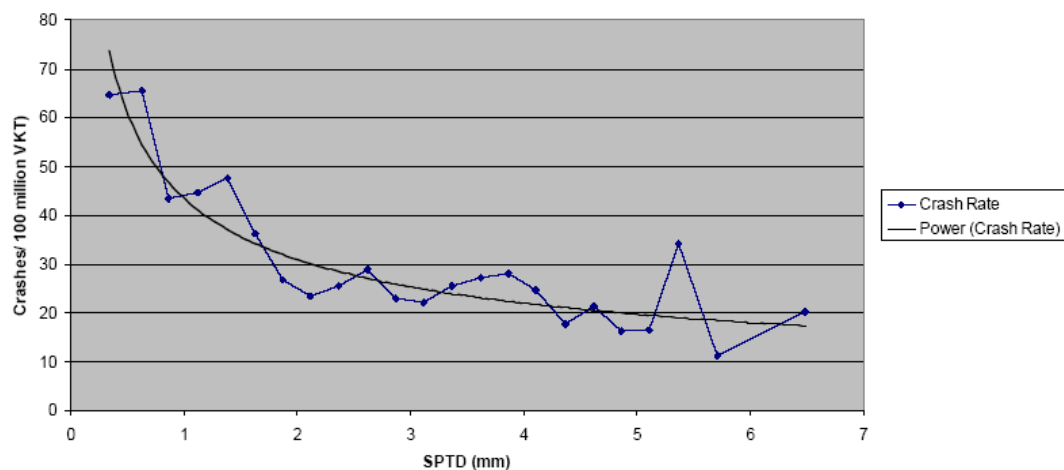


Fig. 2.24 - Numero di incidenti per 100 milioni di veicoli al variare della macrotelessitura superficiale [54]

Relazioni analoghe sono state individuate a valle dello studio condotto da Pulugurtha [55]. Il grafico di Fig. 2.25 mostra una diminuzione del logaritmo del numero di incidenti (asse y) all'aumentare della macrotelessitura espressa in termini di ETD (Estimated Texture Depth)(asse x); tale relazione è stata ricavata su dati sperimentali reperiti su siti autostradali.

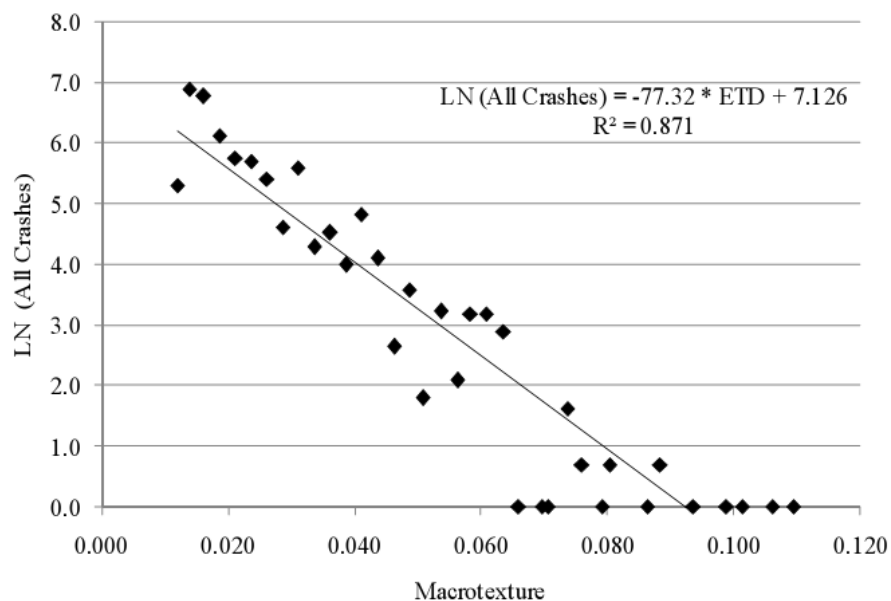


Fig. 2.25 - Numero di incidenti al variare della macrotestitura superficiale [55]

Il rischio medio di incidentalità diminuisce all'aumentare dell'aderenza (misurata con apparecchio SCRIM) [56]. In particolare, nello studio in questione, il tasso medio di incidentalità è stato determinato su più di 100.000 incidenti registrati in un intervallo temporale abbastanza ampio (dal 1994 al 2000) nel Regno Unito (Fig. 2.26).

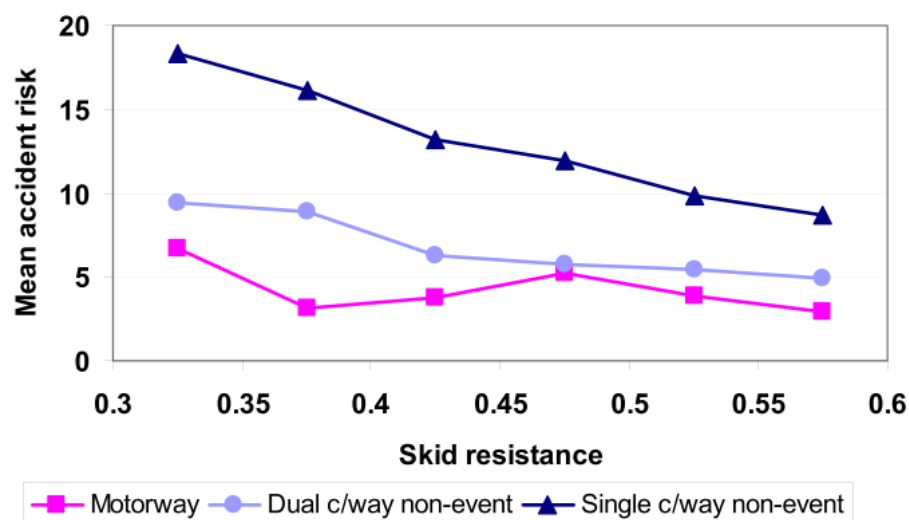


Fig. 2.26 - Tasso di incidentalità medio in funzione dell'aderenza superficiale per diverse tipologie di strade [56]

Studi analoghi sulla rete autostradale della Nuova Zelanda [57] mostrano andamenti del tutto coerenti con i precedenti (Fig.2.27).

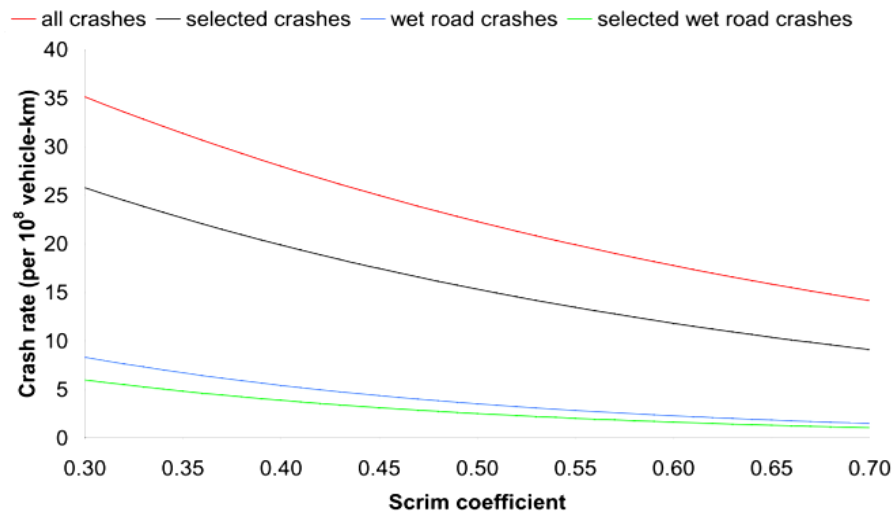


Fig. 2.27 - Tasso di incidentalità in funzione dell'aderenza superficiale [57]

In [56] viene, inoltre, investigato l'effetto combinato dell'aderenza e della profondità di macrotestitura, espressa in termini di SMTD, sul tasso di incidentalità. Un aumento della profondità di tessitura da 0.3 a 1.5 mm riduce l'incidentalità del 50% circa (Fig.2.28).

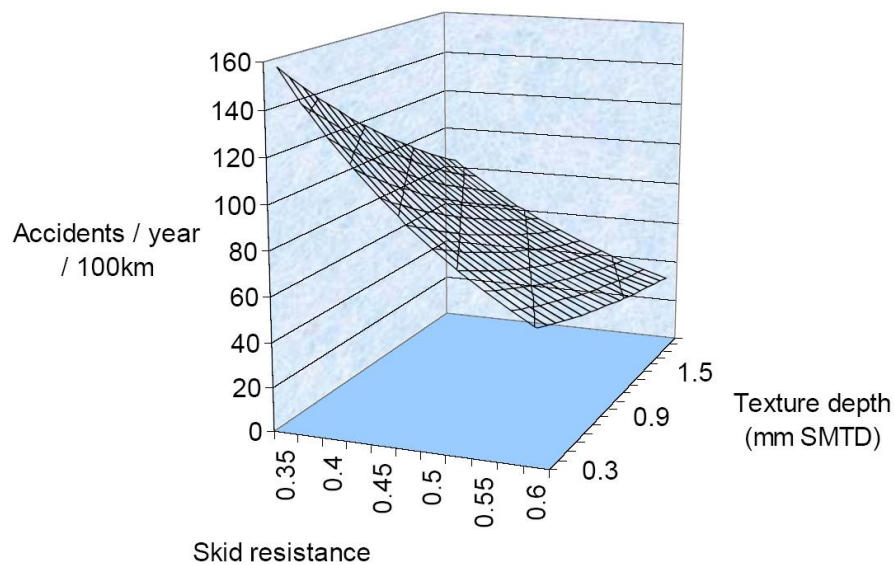


Fig. 2.28 - Tasso di incidentalità in funzione dell'aderenza superficiale e della profondità di tessitura [56]

Il tasso di incidentalità determinato su autostrade danesi [58] diminuisce all'aumentare dell'aderenza misurata con apparecchiatura Stradograf e quantificata in termini di Friction Number (FN) (Fig.2.29).

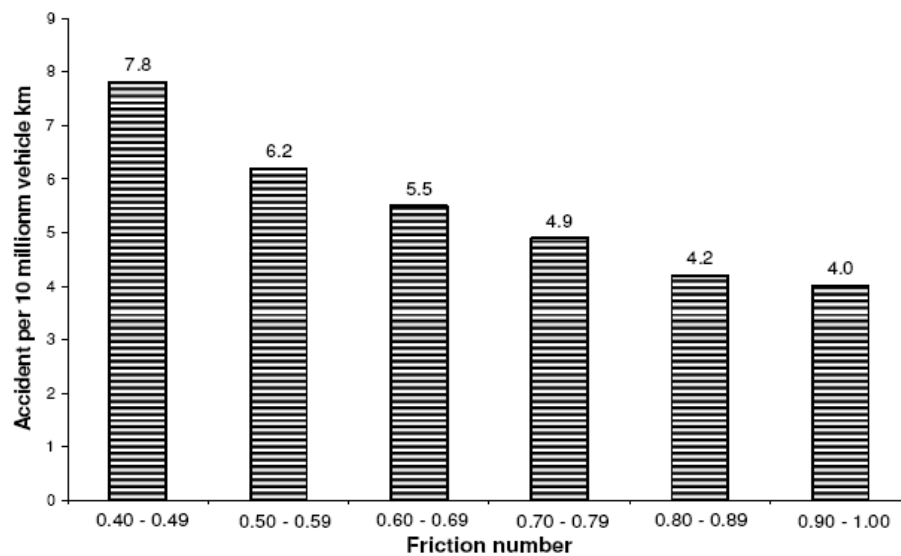


Fig. 2.29 - Tasso di incidentalità per 10 milioni di veicoli/Km in funzione dell'aderenza superficiale [58]

Nello studio condotto da Caliendo [59] si evince che l'aderenza tra pneumatico e strada ha scarsa influenza sul tasso di incidentalità per valori di CAT (Coefficiente di Aderenza Trasversale) maggiori di 0.75. Per valori inferiori il tasso aumenta al diminuire del CAT. In particolare sono stati ricavati incrementi medi dell'ordine del 40% per decrementi medi del valore del CAT di 0.10 (Fig. 2.30).

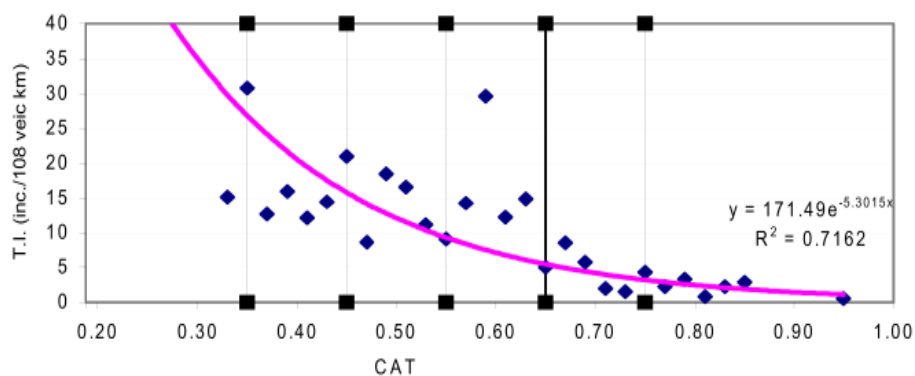


Fig. 2.30 - Tasso di incidentalità per 10⁸ milioni di veicoli/Km in funzione dell'aderenza superficiale [59]

In Fig. 2.31 viene riportata la variabilità del tasso di incidentalità in funzione della profondità di tessitura (TEX). Dal grafico si evince la scarsa influenza sul tasso di valori di TEX maggiori di 1.2 mm; viceversa, nel passare da una macrotessitura di 1.2 mm a una di 0.8 mm, nonché da 0.8 mm a 0.4 mm, il tasso rispettivamente raddoppia [59].

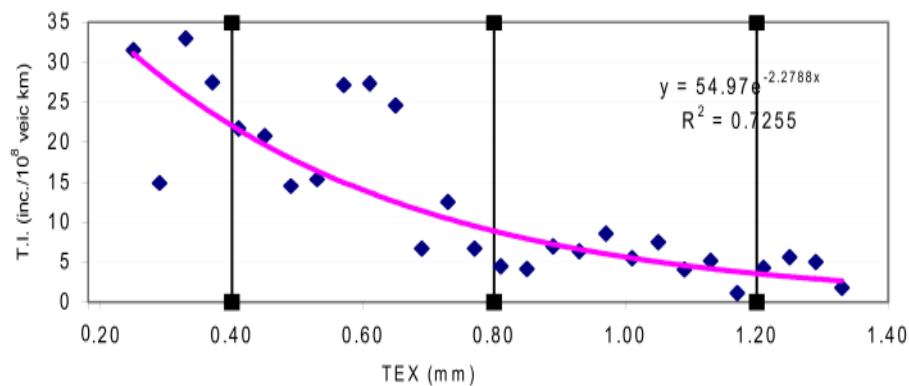


Fig. 2.31 - Tasso di incidentalità per 10^8 milioni di veicoli/Km in funzione della tessitura superficiale [59]

La percentuale di incidenti stradali su pavimentazioni con profondità di tessitura (misurata con il metodo dell'altezza in sabbia) minore di 1 mm è decisamente più alta (circa il 50%) di quella registrata su pavimentazioni con valori di macrotessitura inferiori [57] (Fig.2.32).

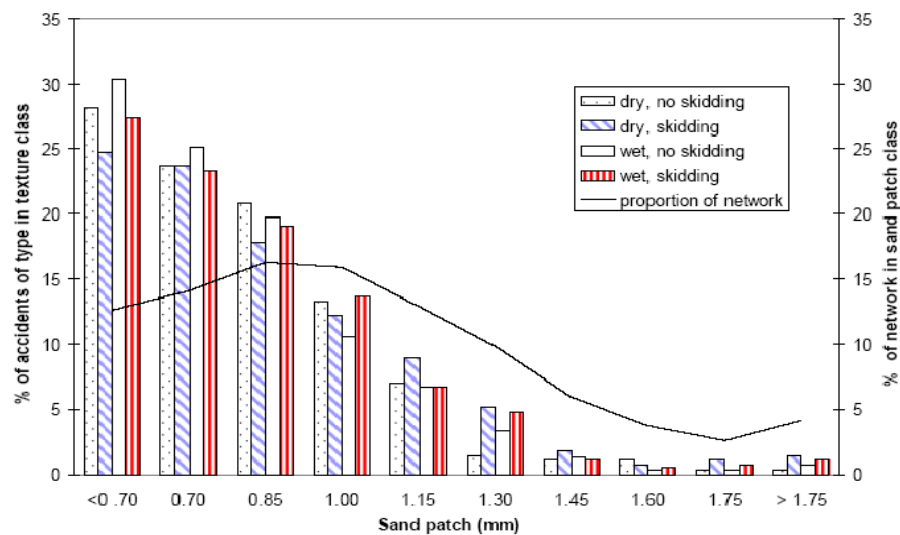


Fig. 2.32 - Percentuale di incidenti in funzione della tessitura superficiale [57]

Dall'analisi fin qui condotta, dunque, risulta evidente come le caratteristiche superficiali del piano di via siano ormai riconosciute dalla letteratura scientifica, a livello mondiale, elementi imprescindibili nella valutazione delle performance delle pavimentazioni stradali, in termini di sicurezza di marcia per gli utenti. Pertanto, una corretta valutazione della sicurezza dell'infrastruttura non può prescindere dall'indagine delle condizioni di tessitura (in particolar modo micro e macro) caratteristiche della superficie, sede del contatto con il pneumatico del veicolo in movimento. La completa caratterizzazione delle superfici a contatto, in tal senso,

consente una più approfondita definizione della fenomenologia derivante dall'interazione dinamica veicolo-strada.

2.3.7.1 Sicurezza e geometria del tracciato: l'aderenza in curva

L'aderenza richiesta dal veicolo in moto sulla superficie stradale è fortemente influenzata dall'andamento plano-altimetrico del piano viabile. La planimetria del tracciato è definita da due elementi principali: rettili e curve. L'entità dell'aderenza richiesta è direttamente proporzionale alla complessità del tracciato; cambiamenti di direzione, soprattutto improvvisi e ad alte velocità, necessitano di condizioni della superficie tali da garantire la stabilità del veicolo e la giusta manovra del pneumatico evitando l'insorgere di bruschi effetti di slittamento favoriti dalle azioni tangenziali proprie della marcia in curva. Un veicolo che effettua una traiettoria curvilinea subisce simultaneamente uno spostamento ed una rotazione. Le condizioni di stabilità sono fortemente influenzate dalle caratteristiche di aderenza tra ciascun pneumatico e la pavimentazione, generalmente ipotizzate costanti per tutte le quattro le ruote. E' ben noto, infatti, che la maggior parte degli incidenti stradali si verifica in corrispondenza delle curva planimetriche del tracciato; allo stesso tempo è stato ripetutamente sottolineato come l'aderenza offerta al contatto pneumatico-pavimentazione risulti essere un parametro fondamentale nel garantire adeguati livelli di sicurezza per gli utenti della strada, soprattutto nelle zone di maggior rischio come, appunto, le curve circolari. Il tasso di incidentalità in curva diminuisce all'aumentare del raggio di curvatura (Fig. 2.33). La maggior parte degli incidenti si verifica per raggi di curvatura compresi fra 200 e 400m, per poi raggiungere un livello minimo per raggi dell'ordine di 600m [60].

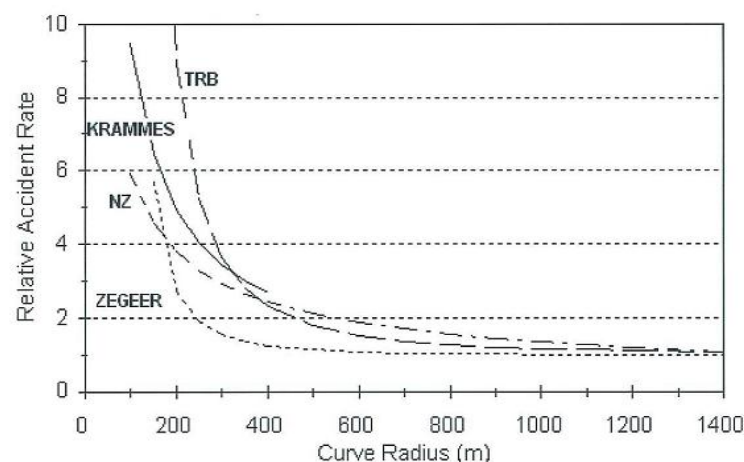


Fig. 2.33 - Tasso di incidentalità vs raggi di curvatura

E' altrettanto acclarato il fatto che l'incidentalità diminuisce notevolmente al crescere dell'aderenza offerta dal piano di rotolamento.

Le due relazioni descritte (diminuzione dell'incidentalità all'aumentare del raggio e del livello di aderenza) vengono contemporaneamente illustrate nel grafico di Fig.2.34 in cui il tasso di incidentalità per anno su 100Km di strada viene messo in relazione proprio con i parametri di cui sopra. Dall'analisi è possibile evincere come ci siano effettivi incrementi di aderenza, con conseguenti effetti positivi sulla sicurezza di marcia, per raggi di curvatura maggiori di 500m. E' evidente, inoltre, come per raggi di curvatura anche molto piccoli (100 m) una efficace risoluzione per il ripristino delle condizioni di sicurezza minime per gli utenti possa consistere nell'intervenire sulla qualità della pavimentazione stradale, in termini di micro e macro tessitura superficiali [56].

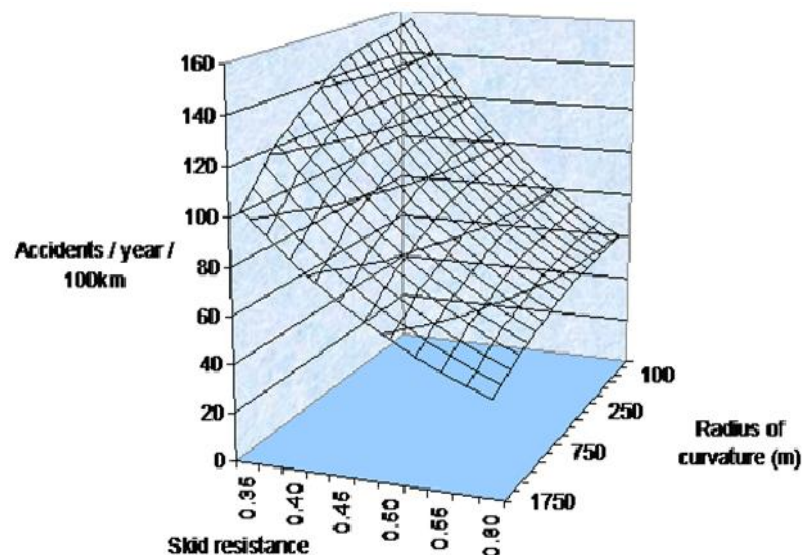


Fig. 2.34 - Tasso di incidentalità al variare dell'aderenza e del raggio di curvatura

In particolare, per distinti raggi di curvatura, è possibile individuare una frontiera rappresentativa della velocità massima da poter tenere, in corrispondenza di una determinata condizione di aderenza, al di là della quale il veicolo si discosterà dalla traiettoria ideale tanto da poter ipotizzare un evento incidentale (Fig. 2.35, Fig. 2.36) [61].

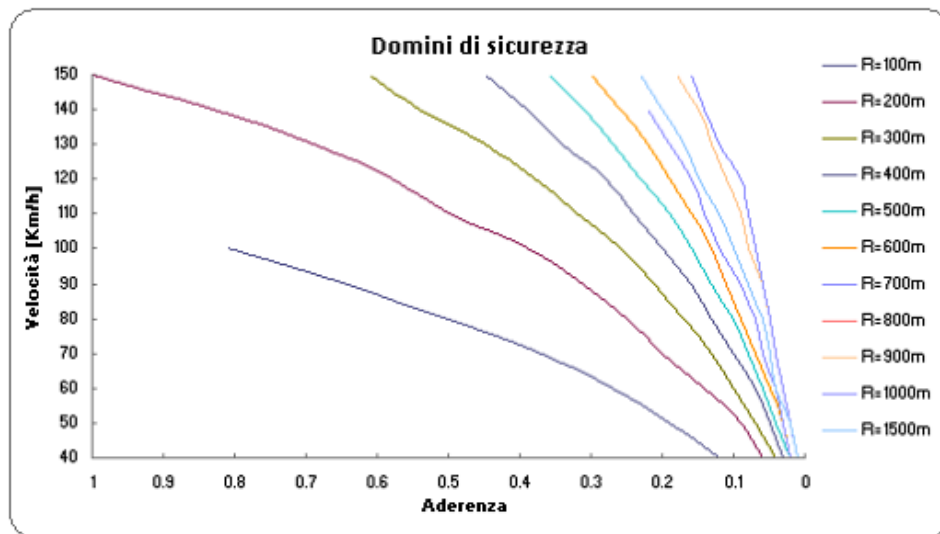


Fig. 2.35 - Domini di sicurezza individuati [61]

I rischi cui si va incontro nel momento in cui si vengono a configurare situazioni per cui la velocità di percorrenza della curva è tale da poter determinare l'instabilità del veicolo, sono legati principalmente alla perdita della traiettoria impostata e all'incapacità di arrestare il veicolo negli spazi di frenatura corretti qualora non sussistano condizioni ottimali di aderenza.

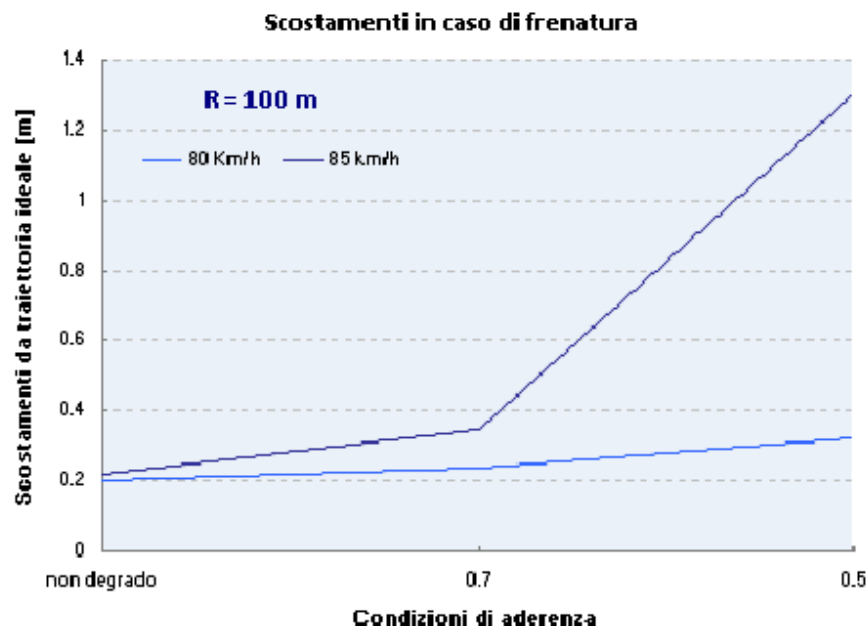


Fig. 2.36 - Scostamenti in curva per frenatura [61]

L'incremento dell'incidentalità in curva è legato anche alla problematica del decadimento nel tempo delle condizioni superficiali del piano di rotolamento, nella misura in cui la percorrenza

in curva richiede un maggiore impegno di aderenza, maggiori diventano le sollecitazioni trasmesse alla superficie stradale e, di conseguenza, più rapido è il degrado in tali zone [03].

In Fig. 2.37 viene rappresentato il passaggio da una sezione trasversale della piattaforma stradale in rettilineo ad una in curva, mentre la Fig. 2.38 mostra le forze agenti su un veicolo che si muove lungo una traiettoria curvilinea. L'aderenza che si sviluppa al contatto superficie-pneumatico è direttamente proporzionale al quadrato della velocità: se la velocità aumenta la forza richiesta per mantenere il veicolo in moto sulla traiettoria curvilinea può superare la forza di contatto [62]. E' questo il caso in cui il veicolo inizia a slittare lungo una direzione tangente all'allineamento (Farber et al.[63], 1974; Page and Butas, 1986 [64]).

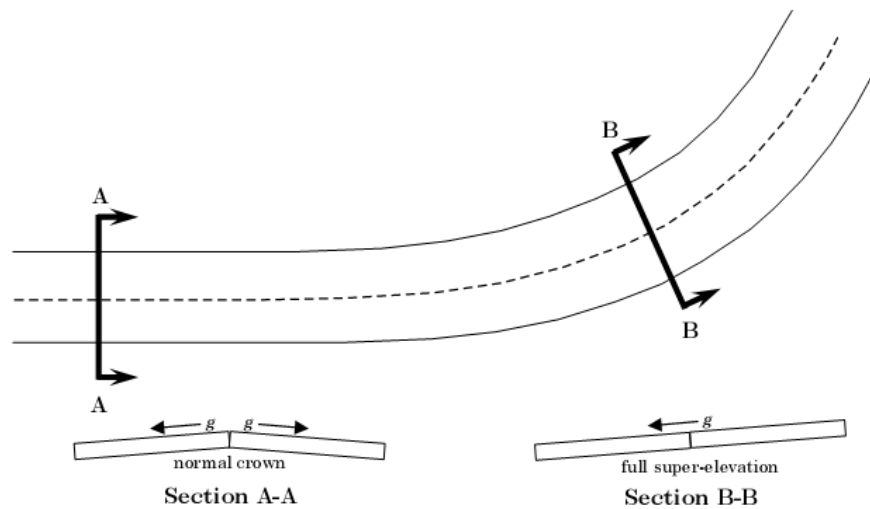


Fig. 2.37 - Transizione di un veicolo da una traiettoria rettilinea ad una curvilinea

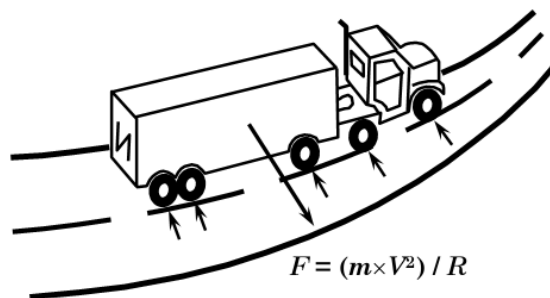


Fig. 2.38 - Schematizzazione delle forze agenti su un veicolo che si muove lungo una traiettoria curvilinea

La relazione fra aderenza in curva, velocità, raggio di curvatura e pendenza del tracciato viene definita dall'equazione seguente, secondo l'AASHTO Green Book (AASHTO, 2001 [65]):

in cui

F_s è l'aderenza richiesta, e è la sopraelevazione in curva, V è la velocità veicolare e R il raggio di curvatura. F_s è funzione, inoltre, delle condizioni ambientali e climatiche, delle caratteristiche del pneumatico e del comportamento dell'utente durante le manovre.

Nella realtà operativa delle strade in esercizio, i veicoli si muovono con una distribuzione delle velocità altamente variabile e variegata. In particolar modo, per i veicoli pesanti, sussiste il rischio concreto del ribaltamento in curva dovuto alla sopraelevazione, anche a velocità basse, ragion per cui si impone di individuare un corretto ed efficace bilanciamento tra pendenza e aderenza in senso trasversale. La relazione di equilibrio allo sbandamento si può anche scrivere nella seguente forma,

in cui il contributo combinato della sopraelevazione e dell'aderenza trasversale (stabilizzanti) variano in funzione della curvatura attraverso la costante di velocità. Nell'equazione precedente il primo membro rappresenta la forza instabilizzante (forza centrifuga), causa potenziale dello svio del veicolo lungo il raggio della curva, mentre nel secondo membro sono raggruppate le forze stabilizzanti dovute alla pendenza della carreggiata (q) e all'aderenza trasversale (ft). Tuttavia, in molti casi tale schematizzazione rischia di sottostimare la reale vulnerabilità dell'equilibrio dinamico in curva: il peso, infatti, rappresenta una grandezza intrinseca ed invariante del corpo in movimento, non così per le forze di aderenza che risultano affette da possibili improvvisi decadimenti, per via di numerosi fattori come verrà in seguito meglio chiarito (*cfr. Cap.5*).

Il controllo del veicolo all'interno degli elementi curvilinei di tracciato dipende fortemente dalla percezione della curvatura e del rischio da parte dell'utente. La semplificazione del moto veicolare all'interno delle curve circolari riconduce alle leggi della fisica meccanica elementari, composte dai due contributi di accelerazione centrifuga ed accelerazione tangenziale (*cfr. Fig.2.39*).

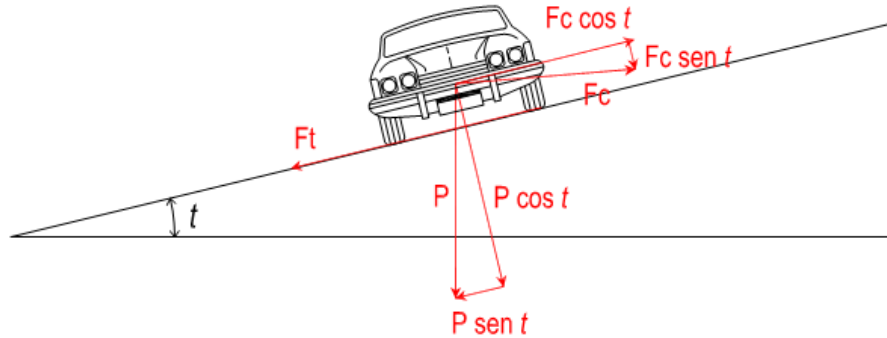


Fig. 2.39 - Forze di equilibrio agenti su un veicolo in curva

In campo stradale, lo schema tradizionalmente adottato nell'analisi dell'equilibrio allo sbandamento dei veicoli in curva consiste nell'ipotizzare il veicolo isolato ad una sua sezione piana, soggetta all'azione di forze diverse. Le forze di massa (forza centrifuga e forza-peso) sono applicate al baricentro del veicolo, mentre forze di contatto (aderenza) sono applicate alle tracce delle sezioni di appoggio delle ruote. Il problema dell'equilibrio e della sicurezza della circolazione, dunque, viene espresso dal seguente postulato: occorre assicurare che la somma vettoriale delle componenti (delle forze di massa), parallele alla piattaforma stradale, risulti in ogni momento inferiore, od al limite uguale, all'aderenza offerta dal contatto tra pneumatici e pavimentazione.

La forza trasversale provoca sul veicolo schematizzato come elemento bidimensionale (Fig.2.39) due effetti principali [66]:

- trasmette al terreno attraverso i pneumatici forze trasversali proporzionali ai rispettivi pesi sui due assi. Queste forze determinano per ciascuno dei due assi una deviazione dall'originaria direzione di moto secondo un angolo detto angolo di deriva; ciò accade nella cosiddetta fase stabile del fenomeno fino allo slittamento laterale dell'asse stesso nella fase instabile;
- altera la distribuzione del peso fra le ruote di destra e di sinistra provocando un sovraccarico di quelle esterne alla curva rispetto a quelle interne. La conseguenza potrebbe essere, appunto, il ribaltamento del veicolo.

Le osservazioni sperimentali derivanti dal monitoraggio di alcune curve circolari esistenti (sia in presenza che in assenza di curve di transizione) mostrano che, in corrispondenza di curve con geometrie particolarmente sfavorevoli, dovute a raggi ridotti, il margine tra l'aderenza impegnata e l'aderenza disponibile risulta essere molto ridotto a tal punto che la perturbazione esterna può potenzialmente comportare la perdita di controllo del veicolo, anche considerando una minima compensazione da parte dell'aderenza longitudinale. Gli studi condotti da Bonneson [67], fondati su evidenze sperimentali fornite da Chowdhury, Fitzpatrick ed altri [68], mostrano che:

- gli utenti più veloci sono tipicamente maggiormente disposti ad accettare un impegno di aderenza trasversale in eccesso rispetto al limite di comfort generalmente convenuto;
- detti utenti tendono eventualmente ad adeguare la propria velocità all'istante dell'ingresso in curva ma non prima;
- a maggiori riduzioni di velocità corrispondono maggiori aliquote di aderenza impegnata in senso trasversale.

In definitiva, l'analisi di sicurezza degli elementi curvilinei consiste nella verifica della congruenza tra i requisiti di aderenza offerta e quelli di aderenza impegnata. Per cui il raggiungimento degli standard di sicurezza prefissati dipende da quanto le condizioni dell'infrastruttura in esercizio si avvicinano alle condizioni limite di aderenza originariamente previste per ciascuno degli elementi geometrici.

E' evidente che la richiesta di aderenza in curva, più alta che in rettilineo, non sempre corrisponde con l'aderenza effettivamente offerta dalla pavimentazione, per cui, all'aumentare della velocità subentrano condizioni di rischio per i veicoli specialmente per avverse condizioni ambientali e meteorologiche (presenza di acqua, neve o ghiaccio sulla superficie). Una schematizzazione di tale fenomeno è riportata in *Fig.2.40* in cui S_{lim} rappresenta la soglia di velocità oltre la quale si passa alla fase di instabilità per il veicolo in moto [69].

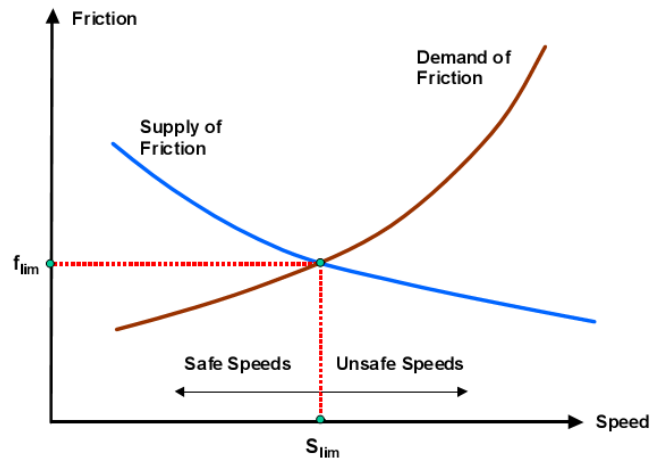


Fig.2.40 - Relazione fra aderenza richiesta e aderenza offerta in una curva planimetrica del tracciato [69]

Le Fig.2.41, invece, mostrano rispettivamente la configurazione aderenza richiesta-offerta con l'influenza della variabile "tempo" e gli effetti positivi che potrebbero derivare da un miglioramento delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento [69].

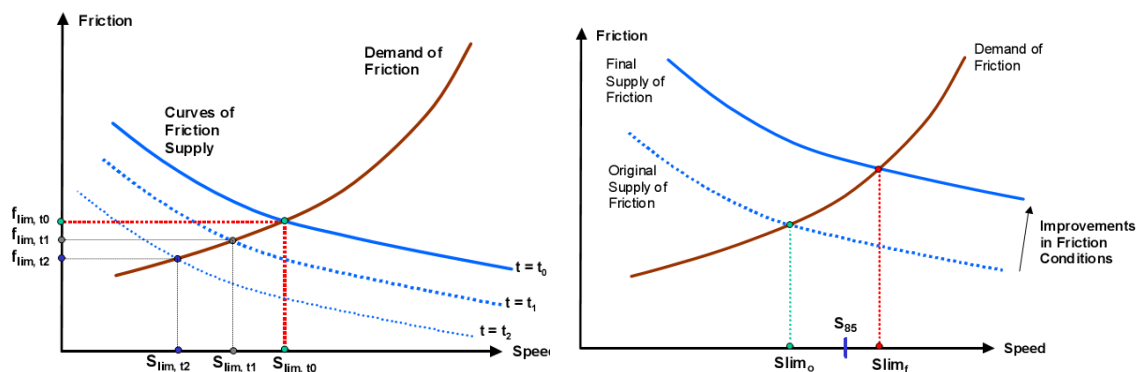


Fig.2.41- Relazione fra aderenza richiesta e aderenza offerta in una curva planimetrica del tracciato nel tempo [69]

2.3.8 Le superfici a contatto

2.3.8.1 Il pneumatico: caratteristiche principali e comportamento visco-elastico della gomma.

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 [70]. Il pneumatico, tramite le caratteristiche elastiche e di aderenza, sviluppa forze di reazione tangenziali sia

longitudinalmente che trasversalmente ed assolve contemporaneamente alle seguenti funzioni principali:

- soportare il carico verticalmente, su di un'area d'impronta sufficientemente grande ad assicurare un'adequata deformabilità;
- assorbire le irregolarità del manto superficiale con stabilità dimensionale, trasmettendo con precisione le forze motrici/frenanti e sterzanti, con buona resa chilometrica, minima resistenza al rotolamento e silenziosità.

Durante la marcia del veicolo, durante il rotolamento, il pneumatico, posto a contatto con il suolo (trattato o naturale), ha il compito di scambiarsi le forze e assorbirne le irregolarità. Gli attributi principali richiesti al pneumatico sono i seguenti:

- grip (aderenza al suolo trattato e non, viscoso o naturale);
- confort (meccanico e acustico);
- resistenza al rotolamento (elasticità e consumi).

Il dispositivo pneumatico che costituisce la cerchiatura deformabile ed elastica delle ruote dei veicoli, è ottenuto dalla copertura e dalla camera d'aria in pressione. La copertura del pneumatico è una struttura alquanto complessa e comprende [70], [71] (*Fig. 2.33*):

- *mescola di gomma*: mescola di polimeri, rinforzanti e zolfo;
- *carcassa*: struttura di tela (diagonale o radiale) molto resistente annegata nella gomma che costituisce il corpo del pneumatico;
- *talloni*: all'estremità del pneumatico, collegata ai fianchi del pneumatico, destinati ad inserirsi all'interno del cerchio, determinano l'area di contatto con il cerchio stesso ed hanno un'anima in acciaio detta cerchietto. 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.
- *battistrada*: parte in mescola di gomma (dove eventualmente viene praticata una scolpitura) destinata al contatto con il suolo e allo scambio delle forze in particolare nella parte di contatto detta orma o impronta e collegata ai fianchi del pneumatico. In esso sono ricavate particolari scolpiture aventi il compito di ottimizzare determinate caratteristiche (aderenza longitudinale e trasversale, silenziosità, prestazioni alle alte velocità, ecc.).



Fig. 2.33 - Nomenclatura delle parti principali di un pneumatico [61]

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. 2.34) 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° . I pneumatici a struttura convenzionale presentano una maggiore resistenza ai fianchi, maggiore rigidità a flessione, minore aderenza, maggiori pressioni sul terreno con minore pressione di gonfiaggio. Il tipo radiale (Fig. 2.35) è invece caratterizzato dal fatto che alcune tele si estendono fra i due talloni con orditura radiale; su questa prima orditura ne 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° . La struttura radiale presenta una minore resistenza ai fianchi, maggiore flessibilità pur con maggiori pressioni interne, maggiore aderenza a motivo della più uniforme distribuzione delle pressioni sul suolo [11], [70], [71].

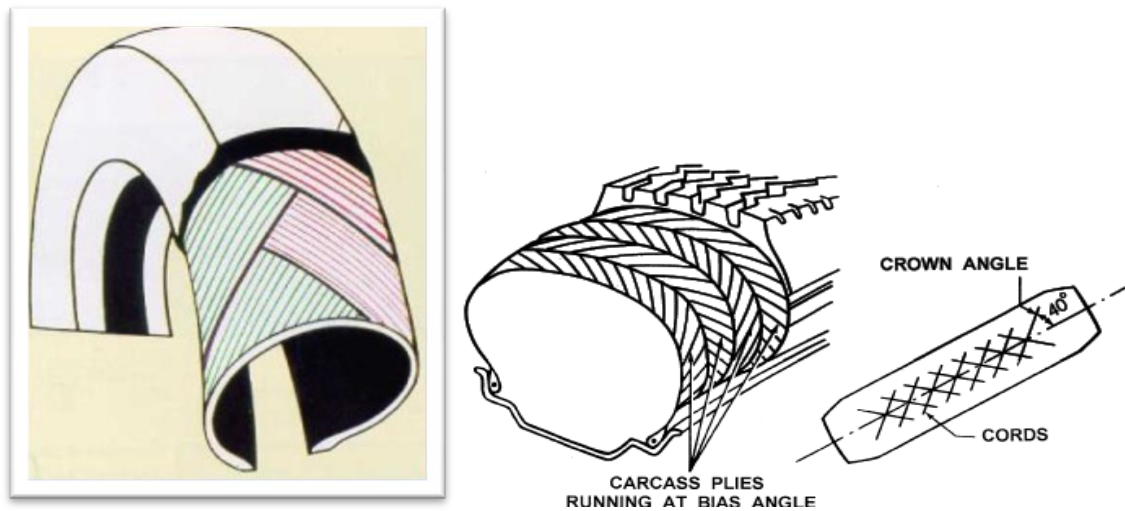


Fig. 2.34 - Schema di un pneumatico di tipo "convenzionale" [61]

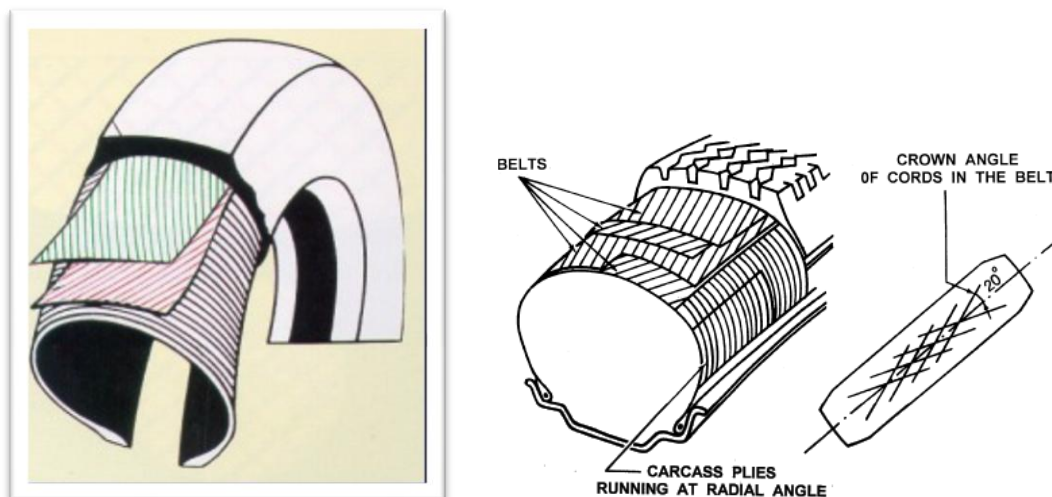


Fig. 2.35 - Schema di un pneumatico di tipo "radiale" [71]

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. 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 sovrangonfiato 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 sovrangonfiato è soggetto, per lo stesso motivo, ad un consumo più veloce della zona centrale del battistrada). Per realizzare le mescole di gomma usate nella produzione dei pneumatici vengono impiegate più di 200 materie prime; in maniera esemplificata è possibile individuarne tre componenti principali [40]:

- polimeri (elastomeri);
- rinforzanti;
- zolfo.

I composti di gomma utilizzati per i pneumatici sono elastomeri rinforzati e vulcanizzati. Una delle caratteristiche essenziali degli elastomeri è la capacità di subire deformazioni di entità elevata sotto carico. Il processo di vulcanizzazione e rinforzo della gomma ne determina le proprietà di viscoelasticità. La vulcanizzazione consiste nell'aggiunta di zolfo alle catene polimeriche in maniera tale da creare dei veri e propri "ponti" molecolari (legami incrociati); i polimeri, inoltre, vengono caricati di additivi rinforzanti (nero fumo e silice) che migliorano le prestazioni dei pneumatici in termini di resistenza all'usura, all'abrasione o alle lacerazioni, rendendoli allo stesso tempo più rigidi. Resistenza all'usura e rigidità sono ottimali per una percentuale di rinforzo del volume dal 20% al 25% e per dimensioni degli additivi rinforzanti tra i 50 e i 200 nm [72].

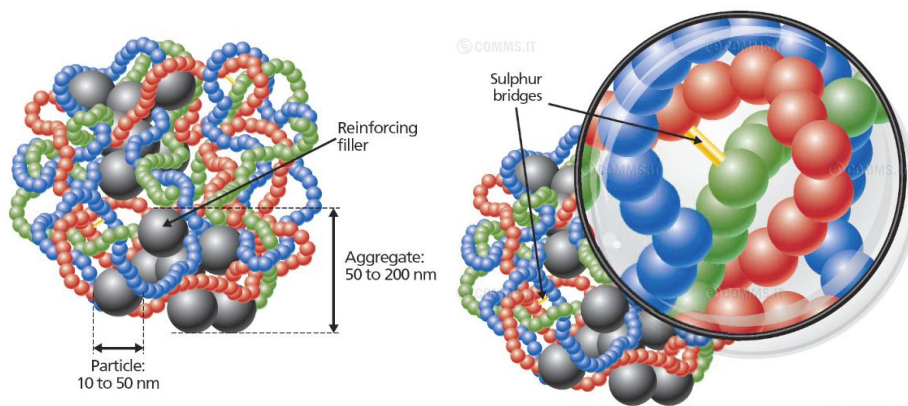


Fig. 2.36 - Processo di vulcanizzazione della gomma [62]

Le proprietà viscoelastiche determinano due conseguenze fondamentali nel comportamento del pneumatico: la differenza di fase nel diagramma tensione-deformazione (isteresi) (Fig.2.37) ed il fenomeno della dissipazione energetica. La vulcanizzazione fa' sì che il polimero possa

essere assimilato ad una rete di molle con comportamento non perfettamente elastico a causa dell'esistenza di punti di diversa natura, dovuti alla presenza dello zolfo, che determinano l'innescarsi di fenomeni attritivi. Tali fenomeni causano una dissipazione parziale di energia.

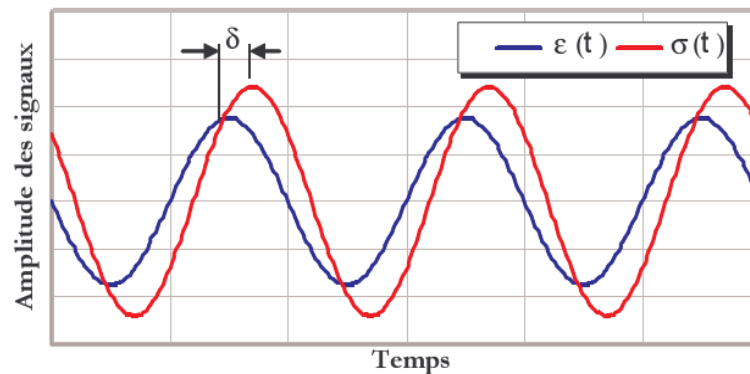


Fig. 2.37 - Comportamento di un materiale viscoelastico soggetto ad una sollecitazione ciclica [41]

In definitiva, gli elastomeri della gomma hanno la peculiarità di presentare simultaneamente due comportamenti diversi: il comportamento elastico del solido ed il comportamento viscoso che si traduce in un ritardo nella risposta alla sollecitazione e in una perdita di energia ad ogni ciclo di deformazione.

Gli elastomeri rinforzati e vulcanizzati possono essere fisicamente caratterizzati tramite due parametri: il modulo complesso e la durezza. Le proprietà della gomma, poi, cambiano in base alla temperatura ed alla frequenza di sollecitazione cui il pneumatico è sottoposto. Esiste una relazione fra gli effetti dovuti all'aumento di temperatura e la diminuzione della frequenza di sollecitazione in base alla legge di William Lendel Ferry.

Al di sotto di una certa temperatura, definita temperatura di transizione vetrosa, il modulo di rigidità della gomma cresce bruscamente; la medesima cosa accade al di sopra di un certo valore di frequenza [41], [39] (Fig.2.38).

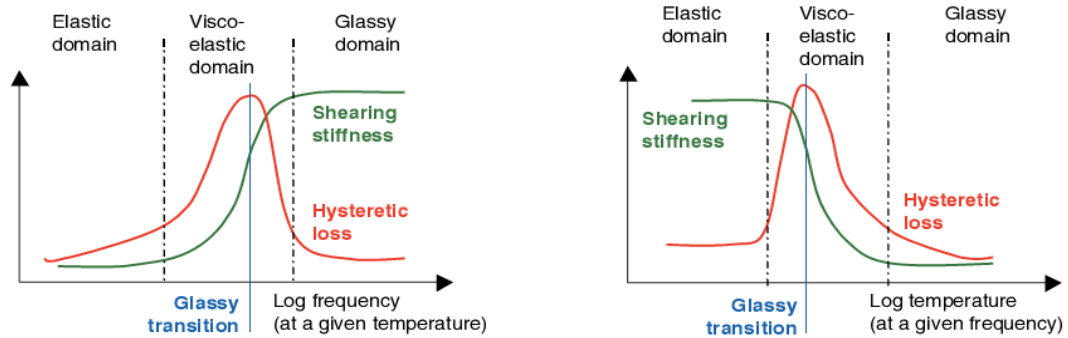


Fig. 2.38 - Variabilità del modulo di rigidezza della gomma [39]

Infatti, alle basse temperature o, analogamente, ad elevate frequenze di sollecitazione, il materiale tende ad assumere un comportamento vetroso perché le lunghe catene polimeriche si muovono più difficilmente. Viceversa, alle alte temperature, o alle basse frequenze, le molecole hanno una mobilità più elevata.

La forza che si manifesta come perdita di energia meccanica, dovuta alla deformazione del pneumatico nella zona di contatto, è nota come *resistenza al rotolamento*. In assenza di attrito, se il suolo e la ruota fossero perfettamente indeformabili, non ci sarebbe resistenza al rotolamento. Essa dipende da molti fattori come la struttura del pneumatico (radiale o convenzionale), da fattori legati all'aerodinamica e alle condizioni della superficie, ma causa principale della resistenza al rotolamento dei pneumatici è la proprietà visco-elastica dei composti di gomma utilizzati che, quando si deformano, dissipano energia sotto forma di calore [44]. In Fig.2.39 vengono rappresentate le diverse aliquote dei fenomeni che contribuiscono all'insorgere della resistenza al rotolamento al contatto pneumatico-pavimentazione.



What	Tyre surface and air		Tread			Sidewall and bead area	
How	Aerodynamic drag of the rotating tyre	Slippage on road surface	Repeated deformation leading to energy dissipation				
			Bending	Compression	Shearing	Bending	Shearing
Contribution to rolling resistance	< 15 %		60 - 70 %			20 - 30 %	

Fig. 2.39 - La resistenza al rotolamento: fenomeni generati [44]

I pneumatici a struttura radiale presentano valori di resistenza al rotolamento minori del 20% circa rispetto a quelli caratteristici degli pneumatici a tele incrociate, oltre che una velocità critica più elevata. La resistenza al rotolamento è la forza applicata nel centro della ruota per equilibrare le pressioni di contatto del pneumatico fino ad iniziare il rotolamento, quindi, può intendersi come l'energia consumata da un pneumatico su una certa distanza.

La resistenza al rotolamento aumenta di poco all'aumentare della velocità, ma al raggiungimento di una soglia di velocità critica aumenta notevolmente per effetto delle vibrazioni generate. Oltre questa velocità il pneumatico cessa di funzionare regolarmente, si surriscalda, si deforma e in breve distrugge la sua copertura. Altre sollecitazioni dovute al terreno, agli ostacoli, ad effetti aerodinamici, possono comportare l'insorgere di ulteriori fenomeni vibratorii [70], [71].

2.3.8.2 Il pneumatico: area di contatto e distribuzione delle pressioni locali

La superficie di contatto reale fra pneumatico e pavimentazione è dell'ordine di qualche decina di centimetri quadrati. Le forze che il pneumatico scambia con il suolo non sono applicate in un punto ma sono la risultante di azioni distribuite su tutta l'area di contatto, in virtù della deformabilità del pneumatico stesso.

La distribuzione delle pressioni sull'area di contatto non è uniforme; si osserva sperimentalmente che essa dipende dal verso di rotazione, presentando valori maggiori di pressione nella zona anteriore dell'impronta. L'effetto è che la risultante di tali pressioni non passa per il centro di rotazione della ruota ma è spostata nel senso della direzione di marcia, generando un momento resistente che si oppone al rotolamento [41].

Per questioni di semplificazione di trattazione è possibile analizzare il problema del contatto facendo le seguenti ipotesi:

- area di contatto pneumatico-pavimentazione stradale di forma circolare;
- forza verticale agente sulla ruota uniformemente distribuita all'interno dell'area di contatto;
- pressione di contatto di entità pari alla pressione di gonfiaggio del pneumatico: il valore di tale tensione è posto pari alla pressione di gonfiaggio delle ruote, che può raggiungere nei casi più severi anche 7-8 daN/cm, assumendo che la rigidità della

carcassa del pneumatico sia influente ai fini della distribuzione delle pressioni di contatto.

In base a tali ipotesi, dunque, l'area di contatto può essere immediatamente definita come il rapporto fra il carico applicato (F_z) e la pressione di gonfiaggio (P_p) del pneumatico. L'effetto della pressione di gonfiaggio sulla geometria del contatto è chiaramente osservabile in *Fig.2.40*, in cui viene effettuato un confronto diretto fra due diversi livelli di gonfiaggio del pneumatico.

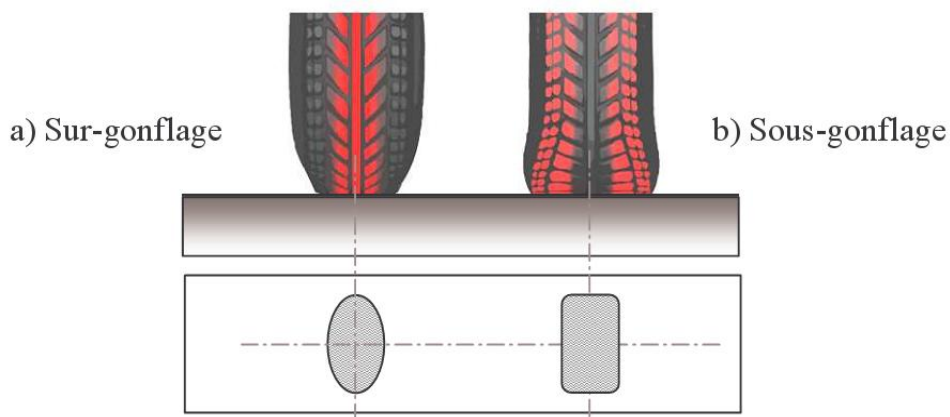


Fig. 2.40 - Effetto della pressione di gonfiaggio sull'area di contatto pneumatico-pavimentazione [41]

Nel caso di sovragonfiaggio si verifica uno scorrimento maggiore sul piano viabile perché la superficie di contatto è minore; viceversa, una situazione di sottogonfiaggio del pneumatico determina una flessione non trascurabile della carcassa ed una concentrazione del carico sui fianchi della gomma. In queste condizioni il rivestimento del pneumatico genera un surriscaldamento ed un aumento delle resistenze al rotolamento.

Semplificando il problema, anche attraverso lo studio condotto da Huang [73], si può affermare che l'ampiezza di tale area dipende dalla pressione di contatto che è più grande della pressione di gonfiaggio per pneumatici a bassa pressione (per l'equilibrio alle forze verticali la pressione di contatto è pari alla somma della pressione del pneumatico e della pressione cui sono soggette le pareti della carcassa), mentre il rapporto è inverso per pneumatici ad alta pressione, essendo in questo caso le pareti del pneumatico in tensione (*Fig.2.41*).

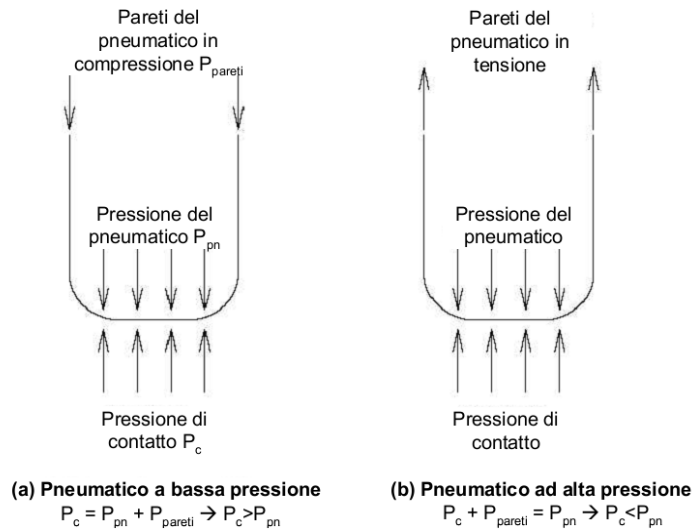


Fig. 2.41 - Relazioni fra la pressione di contatto e quella di gonfiaggio [70]

La distribuzione reale degli sforzi sulla superficie di contatto pneumatico-pavimentazione è effettivamente lontana dal modello di carico uniformemente distribuito su un'area circolare. Nella realtà, infatti, il sistema di forze scambiato tra pneumatico e pavimentazione è molto complesso potendosi individuare numerose e importanti differenze rispetto alla schematizzazione precedentemente descritta. In primo luogo l'area di impronta non è circolare ma assume una forma pseudo-ellittica per i pneumatici convenzionali o pseudo-rettangolare per i pneumatici di tipo radiale. Per questa ragione, nel calcolo dell'area di impronta reale interviene anche la rigidità della carcassa responsabile di una ridistribuzione delle pressioni stesse per effetto della quale l'area è di solito minore di quella stimata con l'approccio precedentemente esposto. Inoltre, a causa della presenza delle scolpiture del battistrada in corrispondenza delle quali avviene il contatto, l'area di impronta è in realtà riconducibile ad un insieme di areole discrete: a parità di carico verticale, le tensioni verticali esercitate in corrispondenza delle scolpiture sono maggiori di quelle medie sulla superficie totale. La distribuzione delle tensioni verticali assume valori maggiori in corrispondenza delle pareti/bordi del pneumatico mentre, in corrispondenza della zona centrale dell'area di contatto, è nettamente inferiore. Anche la forma della distribuzione risulta fortemente dipendente dalla pressione di gonfiaggio in relazione al carico verticale trasmesso dalla ruota; in particolare, a parità di carico verticale, una diminuzione della pressione di gonfiaggio esaspera l'effetto di bordo incrementando le tensioni verticali in corrispondenza delle pareti,

mentre un aumento della pressione di gonfiaggio riduce l'effetto di bordo incrementando le pressioni nella zona centrale dell'area di impronta [11], [70], [71].

Infine, anche la distribuzione delle tensioni tangenziali (longitudinali ed ortogonali) non risulta uniforme; essa dipende principalmente dalle condizioni di moto del pneumatico. Quando il pneumatico è fermo, in corrispondenza dell'area di contatto tenderebbe a dilatarsi nella direzione radiale in virtù dell'effetto Poisson. L'impedimento di tale dilatazione, dovuto alla reazione della superficie della strada, fa' sì che esso risulti sottoposto ad un campo di tensioni tangenziali dirette radicalmente dal bordo esterno verso il centro. Quando il pneumatico è in movimento a questo campo si sovrappone quello indotto dagli scorrimenti che si manifestano all'interfaccia pneumatico-pavimentazione che mobilitano la forza di aderenza longitudinale; in curva, si aggiunge un ulteriore campo di tensioni dirette in senso ortogonale al piano di rotolamento per effetto degli scorrimenti che si accompagnano alla deriva del pneumatico e che mobilitano la forza di aderenza trasversale [41].

Negli anni '80 del secolo scorso, Marshek [74] intraprese una serie di studi per valutare la pressione effettiva di contatto: la distribuzione delle pressioni fu ottenuta attraverso l'interposizione di una pellicola sensibile alla pressione tra pneumatico e superficie stradale. I risultati dello studio mostrarono l'effettivo legame fra pressione di gonfiaggio e area di contatto: un aumento del 50% della pressione di contatto si traduce in una diminuzione variabile dall'8 al 20% dell'area di contatto. Di contro, un aumento del 50% del carico determina un aumento dell'area di contatto di entità pari al 30% circa.

Successivamente Ikeda [75], analizzando il comportamento di 5 tipi di pneumatici con diverse pressioni di gonfiaggio (3 livelli), ricavò un'espressione analitica per il calcolo della pressione di contatto in funzione della forza verticale agente sulla ruota e della pressione di gonfiaggio.

Più di recente, De Beer [76] ha fornito uno studio sulla distribuzione tridimensionale del contatto pneumatico-pavimentazione, pur limitato a livelli di velocità molto bassi e a condizioni di guida che non prendono in esame i problemi di frenatura o di sterzata.

Dopo aver analizzato le caratteristiche principali del pneumatico, relative alle diverse tipologie nonché alle molteplici condizioni di utilizzo, e aver descritto l'influenza di tali caratteristiche sulla generazione della superficie di contatto, si procederà, nel prossimo paragrafo, alla puntualizzazione di alcuni aspetti relativi alla superficie su cui il contatto stesso si esplica, ossia

la pavimentazione stradale e alla variabilità delle condizioni di aderenza offerta al veicolo in moto.

2.3.8.3 La tessitura del piano di rotolamento

Come già ampiamente esposto nel Capitolo 2 della presente tesi, l'aderenza dipende da tantissimi fattori legati alle condizioni geometriche e fisiche del piano viabile, alle caratteristiche dei pneumatici, alle caratteristiche dei veicoli e alle condizioni operative (cfr. *Tabella 2.3*) [03].

SUPERFICIE STRADALE		
TESSITURA	GEOMETRIA	MATERIALI
Micro tessitura Macro tessitura Mega tessitura Irregolarità longitudinali Irregolarità trasversali (ormaie)	Pendenza longitudinale Pendenza trasversale Sovrapendenza dei cigli	Inerti Legante

Tabella 2.3 – Fattori stradali da cui dipende l'aderenza

Per quanto concerne le caratteristiche dell'infrastruttura stradale, l'aderenza dipende fondamentalmente da: tessitura della superficie viabile, qualità dei materiali impiegati nella realizzazione dei manti di usura e capacità drenante delle pavimentazioni in relazione alla loro geometria. L'aderenza è principalmente connessa ai campi della micro e macrotessitura.

In particolare, la microtessitura viene identificata come uno dei fattori dominanti nel determinare il verificarsi del contatto in aderenza del pneumatico, sia in condizioni di superficie completamente asciutta, sia in presenza d'acqua, per valori di velocità piuttosto ridotti (< 50 km/h), poiché in tal caso risulta prevalente la componente di adesione molecolare caratteristica del contatto [77].

Il ruolo principale esercitato da questa caratteristica di tessitura sulle prestazioni di aderenza consiste nel penetrare la gomma del battistrada, producendo localmente pressioni di contatto molto elevate ed una vera e propria forza di attrito radente. In presenza di superfici di contatto bagnate è responsabile della rottura del film d'acqua che si interpone fra pneumatico e pavimentazione (cfr. *Par 2.3.6*).

La macrotessitura è la causa principale delle deformazioni per isteresi della gomma dei pneumatici e del conseguente sviluppo di forze orizzontali di reazione che si oppongono allo slittamento delle ruote. Il battistrada del pneumatico, in corrispondenza degli effettivi punti di

contatto con il manto stradale, viene leggermente deformato dalle macro asperità superficiali, per entità dell'ordine di 0.2-0.4 mm [78]. La macrotestitura è considerata ottimale, dal punto di vista della resistenza allo slittamento, se la sua altezza è nell'intervallo 0.7-1.2 mm e la distanza media tra le punte delle particelle di conglomerato variano tra 6.5 e 12 mm [79].

In sintesi, la macrotestitura identifica la rugosità della pavimentazione che determina le condizioni di drenaggio superficiale, la deformazione del battistrada, l'aderenza alle alte velocità [78]. A velocità elevate, infatti, poiché diventa sempre più difficile penetrare il film d'acqua nel tempo disponibile, l'aderenza dipende largamente dalla componente di deformazione e le asperità devono essere sufficientemente grandi ed angolose da deformare il pneumatico anche in presenza di uno strato d'acqua. Recenti studi hanno dimostrato inequivocabilmente come i valori della macrotestitura influenzano l'aderenza, non solo alle alte velocità ma anche per velocità relativamente basse [80].

La macrotestitura è importante anche perché, determinando i percorsi di drenaggio, permette un rapido allontanamento delle acque superficiali dal contatto pneumatico-superficie stradale. Fra gli spazi intergranulari in superficie si formano dei micro canali che hanno una duplice funzione: di serbatoio e di drenaggio per l'acqua piovana. La macrotestitura è strettamente correlata a parametri geometrici quali altezza, spessore, angolarità e densità delle macro-asperità della pavimentazione [03].

In definitiva, mentre la macrotestitura determina gli aspetti quantitativi del contatto gomma-piano di rotolamento, la microtestitura ne determina la qualità.

2.3.9 Altri fattori da cui dipende l'aderenza: aggregati, bitume, caratteristiche geometriche del tracciato.

Le prestazioni di un manto superficiale sono fortemente dipendenti anche dalla qualità e dalla tipologia degli inerti impiegati nel confezionamento del conglomerato bituminoso utilizzato nella stesa. Infatti, in tutte le miscele gli aggregati lapidei rappresentano una percentuale in volume, sul totale della miscela, variabile tra il 70 % per i manti drenanti e l' 85 % per i tappeti tradizionali chiusi [03].

Per rispondere in maniera appropriata alla richiesta di aderenza gli aggregati utilizzati nel mix di conglomerato devono possedere una buona resistenza alla levigazione, una eccellente durezza, una morfologia che presenti spigoli vivi ed una adeguata rugosità di superficie. E'

necessaria, inoltre, una buona affinità con il legante bituminoso al fine di assicurare una durabilità ed una resistenza maggiore soprattutto in presenza di acqua sulla superficie della pavimentazione. Le caratteristiche degli aggregati dipendono essenzialmente dalla natura della roccia madre (mineralogia, caratteristiche fisiche e meccaniche), e dalle condizioni di estrazione e lavorazione (proprietà di carattere geometrico). Gli aggregati di natura calcarea, ad esempio, sono maggiormente soggetti a processi rapidi di levigazione rispetto ad altri quali il basalto, le micro dioriti, la quarzite, più resistenti e, di conseguenza, più adatti per la realizzazione dei manti di usura. Gli aggregati di natura artificiale, che provengono dalla trasformazione termica dei minerali, vengono ampiamente impiegati nella produzione dei conglomerati perché mostrano proprietà importanti. Un esempio in tal senso è rappresentato dalla bauxite calcinata che possiede una eccellente durezza e resistenza alla levigazione. Numerosi studi [81], [82], [83] mostrano come la microtessitura sia fortemente determinata dalla resistenza alla levigazione e dalla natura petrografica dell'aggregato. Gli aggregati che affiorano in superficie sono soggetti, durante tutta la vita utile della pavimentazione ad azioni di diversa natura ed intensità di tipo meccanico e fisico-chimico [84]. Tra le azioni di tipo meccanico si annoverano quelle lente, continue di usura e quelle dinamiche di frammentazione (*Fig. 2.42*). Il processo di usura, con il coinvolgimento di diverse componenti, acqua, detriti abrasivi e l'azione dei pneumatici, può interessare la macrotessitura e, in questo caso, si parlerà propriamente di usura o la microtessitura degli inerti (in questo caso si parlerà di levigatura dell'inerte).

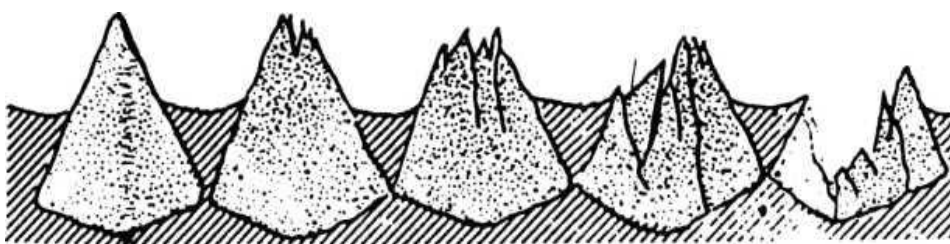


Fig. 2.42 - Processo di frammentazione degli aggregati

La frammentazione comporta la rottura delle asperità dell'inerte per effetto delle forti sollecitazioni dinamiche, verticali e tangenziali, dei pneumatici. Questo processo, se da un lato, produce un effetto positivo sull'aderenza, per la creazione di nuove superfici, dall'altro contribuisce alla progressiva riduzione della macrotessitura superficiale [85]. Il fenomeno della levigatura degli aggregati si traduce in uno smussamento delle asperità micrometriche di entità

variabile a seconda della natura petrografica dell'inerte stesso. Esistono diverse modalità di valutazione della resistenza alla levigazione dell'inerte pur fondate sul medesimo principio di levigazione accelerata in presenza di abrasivo e di misura del coefficiente di attrito sulla superficie soggetta all'abrasione. Tra le cause di degrado di tipo fisico chimico si citano gli effetti di ossidazione ed alterazione degli inerti per la presenza dei sali antigelo o di acidi che si formano al contatto con l'acqua per effetto degli inquinanti presenti nell'atmosfera. Le conseguenze delle azioni sopra citate sono la levigatura degli inerti con perdita della micro tessitura e la modifica della macro tessitura della superficie [03].

Tali effetti possono presentarsi contemporaneamente nelle stesse sezioni, con grave pericolo per la circolazione nelle condizioni di superficie bagnata. Per limitare il rischio, sarà necessario dedicare grande attenzione alla scelta degli inerti, non solo di quelli di pezzatura più grossa che si trovano direttamente a contatto con i pneumatici, ma anche di quelli fini, che solo parzialmente sono esposti alle loro azioni. La ricerca di standard elevati ha portato all'individuazione di valori di riferimento per un inerte ideale [86] riportati in *Tabella 2.4*.

PROPRIETA' DELL'INERTE	VALORI DI RIFERIMENTO
Durezza Mohs della frazione più dura	8 – 9 H
Durezza Mohs della frazione più tenera	6 – 7 H
Differenza tra i valori di durezza	2 – 3 H
Percentuale della frazione più dura	
Aggregati naturali	50 – 70 (%)
Aggregati artificiali	20 – 40
Dimensione dei granuli o dei cristalli duri	150 – 300 μ
Forma dei granuli duri	angolo ≤ 90
Dimensione ottima dei pori	125 μ
Dimensione dell'aggregato grosso	3 – 13 (mm)
Forma dell'aggregato grosso	forma conica con angolo ≤ 90
Coefficiente Los Angeles	$\leq 20\%$
Coefficiente di levigabilità accelerata	≥ 75

Tabella 2.4 – Valori di riferimento di alcune proprietà degli inerti che dovrebbero garantire elevati valori di aderenza e buona resistenza all'usura [03]

Per quanto riguarda il legame fra aderenza offerta e caratteristiche del legante, mentre in letteratura sono reperibili molti studi e risultati di lavori sperimentali sulle prestazioni del

bitume in relazione alle proprietà strutturali delle miscele, non si conosce molto su come la qualità e percentuale del legante influisca sui valori di aderenza dei manti stradali. Senza altro una percentuale di legante superiore a quella ottima, determinata con il metodo tradizionale Marshall o con quelli volumetrici più evoluti, può provocare refluenti del legante in superficie con conseguente diminuzione della superficie occupata dagli inerti nella zona di contatto tra il pneumatico e la pavimentazione. Questo causa una evidente riduzione dei valori di aderenza. Inoltre l'impiego di bitume di cattiva qualità o "flussato"² e di materiali di riciclo, può essere una concausa dell'aumento della "scivolosità" della superficie stradale in presenza di acqua. Un altro aspetto che merita un'attenta valutazione è il processo di eliminazione del legante dagli aggregati esposti in superficie per effetto dell'azione dei pneumatici. Questo fenomeno, che avviene nel primo periodo di esercizio della pavimentazione, determina un incremento dell'aderenza, variabile in funzione dello spessore della pellicola di bitume che avvolge l'inerte in superficie e dell'adesività del legante [03]. In merito alle caratteristiche geometriche del tracciato, gli aspetti da affrontare connessi all'aderenza sono fondamentalmente due:

- geometria stradale in relazione alla dinamica del moto dei veicoli;
- geometria stradale in relazione alla capacità di drenaggio delle superfici stradali.

L'analisi del comportamento dinamico dei veicoli stradali, con l'ausilio di schematizzazioni anche molto sofisticate (bi e tri-dimensionali), nei tratti con traiettorie curvilinee, evidenzia delle distribuzioni dei carichi verticali, da parte dei veicoli, disuniformi e dipendenti dalla configurazione geometrica della via. Ciò può comportare condizioni di aderenza meno favorevoli per le manovre dei veicoli. Inoltre, nei raccordi di transizione planimetrici e nei raccordi verticali, le variazioni di accelerazione centrifuga radiale e verticale, se non contenute, possono contribuire all'innescare di moti anomali che in talune circostanze possono compromettere la stabilità dei veicoli. Il rispetto delle indicazioni contenute nel DM 5.11.2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", garantisce condizioni di sicurezza per le velocità di progetto previste lungo lo sviluppo della strada [03]. L'altro aspetto riguarda la possibile presenza di acqua sulla superficie stradale per carenze nella geometria o per la presenza di difetti ed irregolarità sulla superficie delle pavimentazioni. In caso di precipitazione piovosa l'acqua si accumula sulla superficie stradale ed inizia a defluire,

² Miscela di bitume e di un diluente di origine petrolifera o vegetale poco volatile (ad esempio distillati pesanti con punto di ebollizione superiore ai 350°C).

seguendo la linea di massima pendenza, verso le zone di accumulo laterali, limite interno dell'arginello, cunetta ecc. Le portate defluenti attraverso la sezione terminale della pavimentazione seguono l'andamento riportato in Fig. 2.43.

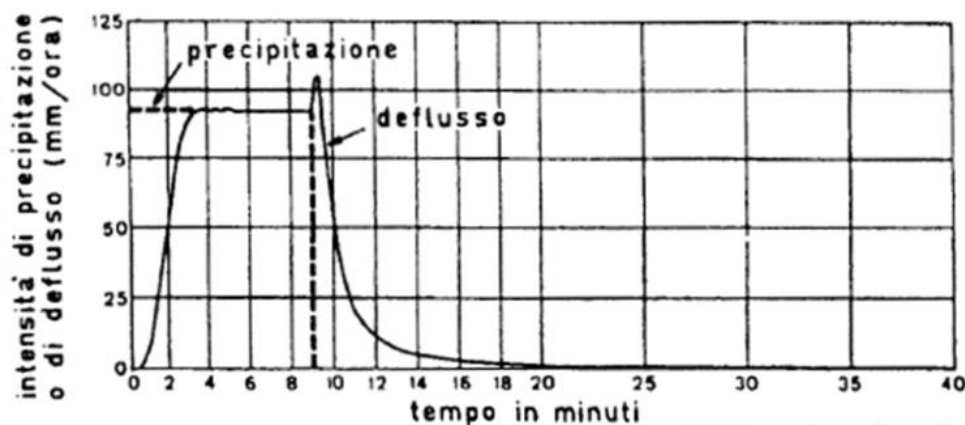


Fig. 2.43 - Portata defluente in una sezione di una superficie sperimentale piana, impermeabile e inclinata dello 0.5%

Si osserva, al termine della pioggia, un iniziale incremento della portata dovuto probabilmente alla diminuzione della resistenza all'avanzamento dell'acqua per la cessazione del disturbo provocato dalla caduta delle gocce d'acqua. Successivamente la portata diminuisce fino al completo asciugamento della strada. Su una superficie impermeabile lo spessore del velo idrico sarà funzione della lunghezza del percorso dell'acqua. Lo studio teorico del movimento dell'acqua sulla superficie stradale si presenta molto complesso, per la particolare condizione della superficie stradale, con presenza della macrotestitura e delle irregolarità. In letteratura esistono diversi modelli di deflusso delle acque meteoriche che simulano la presenza del velo idrico sulla pavimentazione stradale e le modalità con cui esso stesso viene allontanato dalla superficie. Si citano, a tal proposito, il modello di Ross e Rusmann [84], il modello di Gallaway [47] e quello di Domenichini e Remedì [87].

2.4 SPLASH & SPRAY E VISIBILITÀ

Fra i fenomeni derivanti dall'interazione pneumatico – piano di via rientra il cosiddetto Splash and Spray. Il termine è comunemente utilizzato per descrivere gli effetti di disturbo alla visibilità che si manifestano a causa della presenza di turbolenze di tipo aerodinamico dovute al moto dei veicoli su pavimentazioni stradali in cui è presente un velo idrico [05]. Esso è la principale causa della diminuzione della visibilità degli utenti poiché il rotolamento dei pneumatici sulla superficie stradale interessata dall'evento meteorico determina il

sollevamento dell'acqua di pioggia dalle zone di accumulo della pavimentazione e, contemporaneamente, la sua nebulizzazione e dispersione nell'aria. Il primo fenomeno è noto con il nome di *Splash*: il pneumatico in movimento determina la formazione di grandi gocce d'acqua e ne provoca la successiva espulsione dall'area di contatto. Le dimensioni delle gocce sono dell'ordine di 1 mm e si muovono su traiettorie di tipo parabolico. La freccia della parabola è esigua alle basse velocità per cui il fenomeno dello splash non determina conseguenze gravose per la sicurezza degli utenti e per la visibilità; viceversa, per valori di velocità elevati la parabola diventa più ampia fino a che l'acqua non viene completamente espulsa lateralmente determinando forti problematiche di visibilità soprattutto per i veicoli in fase di sorpasso. La formazione di gocce d'acqua di diametro inferiore (generalmente 0.5 mm circa) e la loro nebulizzazione durante il moto del pneumatico sulla superficie stradale determina il cosiddetto fenomeno dello *Spray*. Le gocce, in tal caso, vengono espulse dal battistrada e si muovono verticalmente verso l'alto determinando una vera e propria nube in sospensione. Si ha, dunque, una forte diminuzione della retrovisibilità per il veicolo che genera il fenomeno e di visibilità anteriore per il veicolo che segue [88], [89]. L'acqua che viene nebulizzata è sia quella espulsa posteriormente dal battistrada che quella rimasta adesa sul pneumatico e che si separa a causa delle turbolenze dovute alla velocità del veicolo. In Fig 2.44 è riportata una rappresentazione schematica del fenomeno.

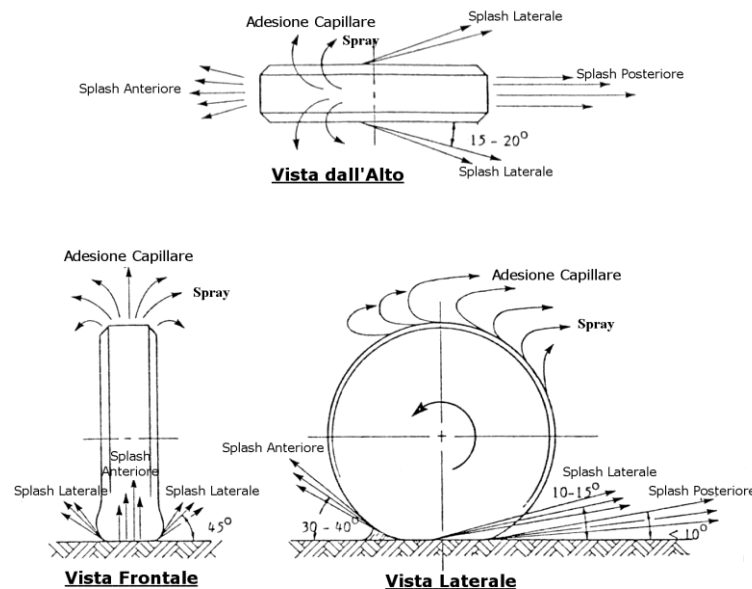


Fig. 2.44 - Schematizzazione dell'origine dello Splash & Spray [05]

La riduzione della visibilità è simile a quella dovuta alla nebbia, e in taluni casi risulta essere ancora più consistente perché le goccioline d'acqua sollevate e spruzzate dagli pneumatici hanno dimensioni e densità maggiori. Alcuni studi hanno dimostrato come il range di visibilità, a causa del fenomeno, si riduca addirittura a meno di 5m. In Fig. 2.45 è riportato il legame tra la velocità veicolare e i domini di formazione, in termini di dimensioni delle particelle d'acqua, dei fenomeni di splash e spray.

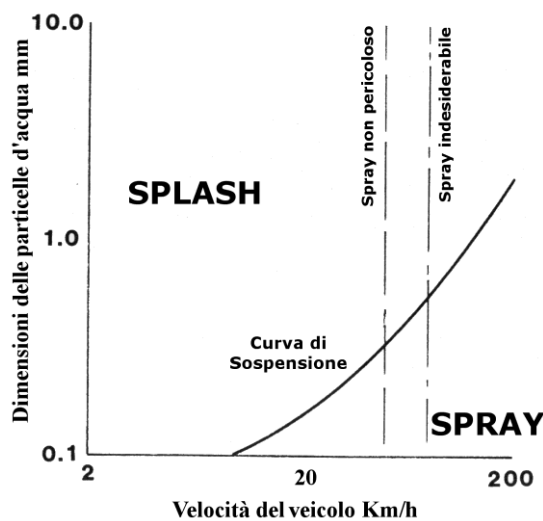


Fig. 2.45 - Effetti della velocità di avanzamento sulle particelle d'acqua [05]

I parametri che maggiormente influenzano il fenomeno sono i seguenti:

- Spessore del velo idrico;
- caratteristiche superficiali della pavimentazione;
- turbolenza e velocità delle masse d'aria.

Anche in questo caso, dunque, è evidente il ruolo di primaria importanza assunto dalle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento. La presenza di un film d'acqua sul piano di via, infatti, unitamente ad una pronunciata macrotestitura e ad una idonea pendenza trasversale della sezione stradale, consente la formazione di ridotti spessori d'acqua minimizzando, conseguentemente, il fenomeno. Tale dipendenza è evidente se si effettua un confronto fra pavimentazioni con valori di macrotestitura profondamente diversi (Fig.2.46).

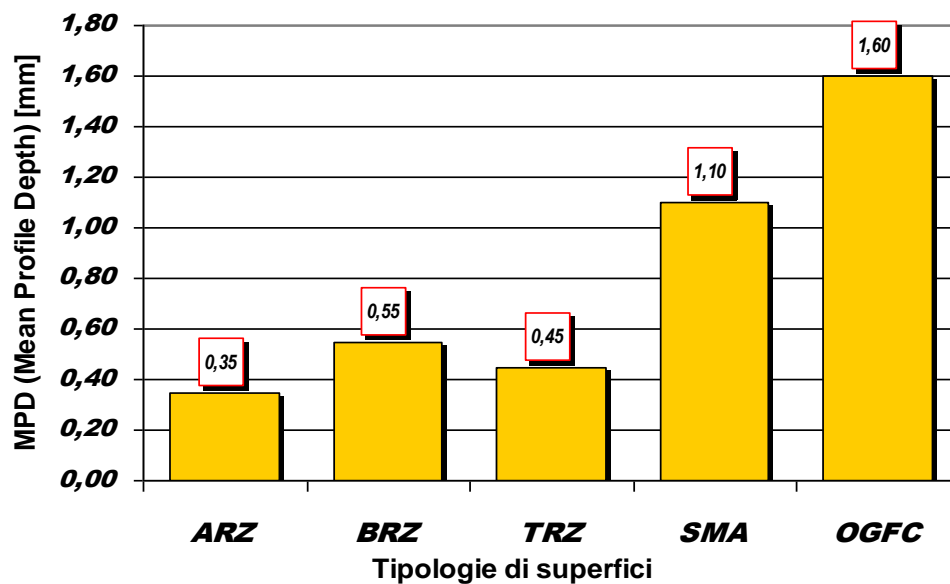


Fig. 2.46- Variazione della macrotestitura (MPD) per tre tipologie di manto d'usura [05]

In particolare, vengono confrontate tre pavimentazioni con valori di macrotestitura bassi (tipicamente usure chiuse individuate con le diciture ARZ, BRZ, TRZ), uno Splitt Mastix Asphalt (SMA) ed un'usura drenante (OGFC, Open Graded Friction Course) caratterizzata da valori di MPD (Mean Profile Depth) maggiori di 1.5 (Fig 2.46).

Per le tre tipologie di pavimentazioni esaminate e per formazioni "pilotate" di film d'acqua sul piano stradale è possibile osservare una notevole attenuazione del fenomeno al passaggio dalle pavimentazioni a tessitura superficiale chiusa (ARZ, BRZ, TRZ), verso SMA e pavimentazione di tipo OGFC (Figg. 2.47 a, b, c).



Fig.2.47 (a) - Splash&Spray per pavimentazione Superpave [05]

Fig.2.47 (b) - *Splash&Spray per pavimentazione SMA [05]*Fig.2.47 (c) - *Splash&Spray per pavimentazione OGFC [05]*

Stime di letteratura mostrano che l'usura drenante consente una riduzione della nebulizzazione del 90% rispetto ad un conglomerato bituminoso tradizionale [90].

Una delle problematiche più importanti legata a tale fenomenologia è l'interazione fra veicoli pesanti che generano lo splash, ed il conseguente spray, e veicoli leggeri. Una ricerca condotta dalla FHWA³ ha messo in evidenza l'importanza della turbolenza delle masse d'aria nella generazione del fenomeno. In particolare, in tale ricerca, emerge che lo Splash & Spray è influenzato, oltre che dal flusso d'aria dovuto al vento, anche dalle turbolenze generate dallo stesso veicolo legate alla sua conformazione ed alla velocità di marcia: per il veicolo "generante", a velocità inferiori agli 80 Km/h è possibile diminuire il fenomeno riducendo la velocità; per valori di velocità superiori il fenomeno risulta ingovernabile [91], [92].

Lo studio [92] mostra, inoltre, che all'aumentare della velocità del veicolo pesante la densità della nube di Spray generata aumenta approssimativamente di tre volte. Il disturbo, poi, è legato alle dimensioni geometriche delle corsie: è massimo per corsie larghe 3 m mentre viene

³ Federal Highway Administration

ridotto del 50% per corsie superiori a 3,5 m. In Fig. 2.48 sono indicate, per un veicolo pesante, le zone dove maggiormente nascono le turbolenze che generano la nube Spray.

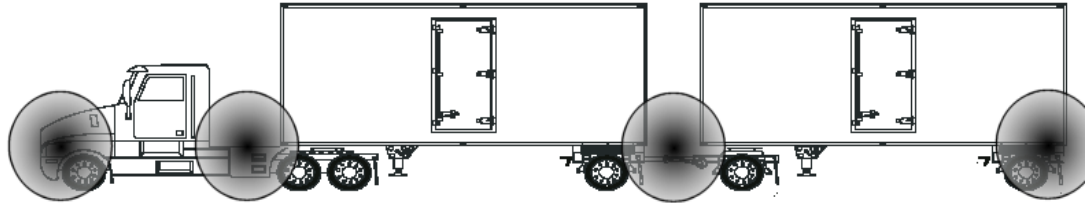


Fig.2.48 - Aree critiche per la formazione dello Spray (effetti aerodinamici indotti).

2.5 IL RUMORE DI ROTOLAMENTO

L'obiettivo della riduzione dell'inquinamento acustico è uno dei parametri di riferimento nell'identificazione delle performance delle infrastrutture stradali (cfr Cap.1). In tal senso, la politica portata avanti dalla Commissione Europea negli ultimi anni è stata fortemente indirizzata alla riduzione del rumore veicolare anche attraverso specifiche direttive recepite dagli Stati Membri in cui il livello di abbattimento dell'inquinamento acustico è stato fissato in 10 dB. Nonostante la volontà, a più livelli palesata, l'incremento del numero di veicoli circolanti ha fatto sì che ben il 40% della popolazione sia esposta a valori di emissione del rumore superiore a 55 dB(A) nel periodo diurno ed il 30% nel periodo notturno (rapporto OMS "Night Noise Guidelines, 2009) [93], [94]. Da un'indagine dell'Eurobarometro condotta nel 2009 è emerso che il rumore ambientale, ed in particolare quello stradale, è la fonte più diffusa di disturbo alla popolazione ed è individuato come uno dei maggiori problemi di carattere ambientale. La Direttiva 2002/49/CE, inoltre, ha indicato nella riduzione del rumore alla sorgente la soluzione da adottare per attenuare il fenomeno. E' evidente, quindi, la necessità di contemplare tale problematica in tutte le fasi di gestione, progetto e manutenzione delle infrastrutture stradali [95], [96].

Il rumore prodotto dai veicoli in moto deriva da sorgenti emissive diverse ed in particolare possono essere individuate tre componenti principali [97]:

- **power unit noise:** emissioni sonore prodotte dalle sorgenti che compongono l'unità di potenza del veicolo (motore, scarico, ventole di raffreddamento, sistemi di trasmissione);
- **wind turbulence noise:** rumore prodotto dalle sorgenti di natura aerodinamica a causa dei vortici di turbolenza che interessano il veicolo durante il moto;

- **tyre-road noise (rumore di rotolamento):** componente generata dall'interazione del pneumatico con la superficie stradale. Tale componente verrà di seguito più dettagliatamente descritta poiché uno dei fattori che determinano la generazione di questa aliquota di rumore è, appunto, la superficie del piano di rotolamento.

Il rumore emesso da un pneumatico che rotola sulla superficie stradale è prodotto principalmente da due sorgenti:

- la tessitura della superficie stradale;
- la scultura del pneumatico.

Queste due sorgenti generano, poi, fenomeni vibratori nella struttura del pneumatico, nell'aria contenuta all'interno del pneumatico e nell'aria intrappolata negli elementi della scultura. Le stesse vibrazioni si propagano in due modi:

- facendo vibrare l'aria circostante e, quindi, producendo rumore;
- facendo vibrare le strutture del veicolo che, a loro volta, trasmettono le vibrazioni all'aria. In tal caso vengono inficiate anche le situazioni di comfort per l'utente a causa di sollecitazioni fisicamente percepite.

Una volta emesso, il rumore si propaga sia all'interno che all'esterno del veicolo dando così origine alla problematica dell'inquinamento acustico legata al moto dei veicoli su strada. Lungo la strada, infatti, il livello sonoro emesso dal passaggio veicolare è elevato; nel caso di autostrade con più corsie per senso di marcia può raggiungere anche livelli di 80 dB. All'interno dell'automobile il livello sonoro accettabile è compreso fra i 70 e i 75 dB e dipende dal tipo di veicolo, di pneumatici e di superficie stradale. I meccanismi di generazione del rumore prodotto dal pneumatico in rotolamento sono stati studiati per lungo tempo, fin dai primi anni Settanta [98].

La generazione del rumore di rotolamento è un fenomeno molto complesso ed il puntuale riconoscimento di tutte le componenti di emissione sonora che contribuiscono alla nascita dell'evento sonoro è alquanto problematica. Ancor più difficoltosa è l'individuazione dei percorsi e delle modalità con cui la trasmissione del rumore si trasferisce dalla sorgente di emissione, l'area di contatto tra pneumatico e piano stradale, all'abitacolo del veicolo. Una schematizzazione di tali meccanismi è riportata in *Fig. 2.49*.

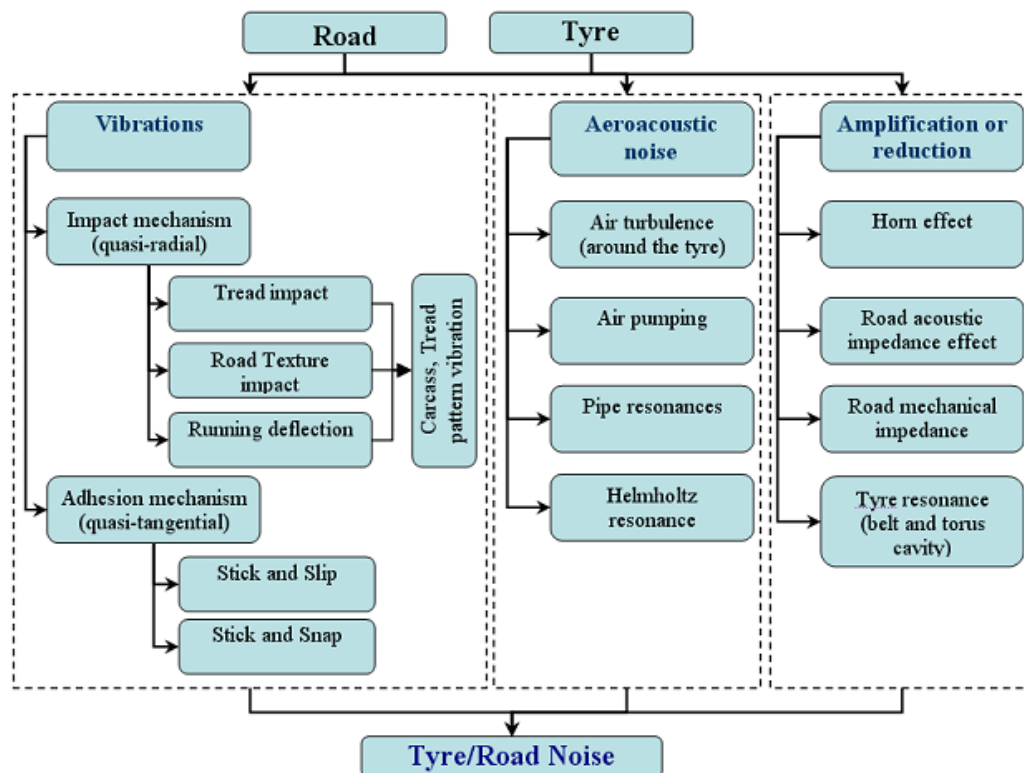


Fig. 2.49 - Meccanismi di generazione del rumore di rotolamento

Tutti gli esperti nel campo concordano nell'individuare quattro cause generative principali del rumore di rotolamento (Fig. 2.50). In Fig. 2.50 è possibile individuare, in termini quantitativi, una stima dell'aliquota di ciascuna delle principali sorgenti emissive alle quali è attribuito il rumore di rotolamento percepito all'esterno del veicolo [20].

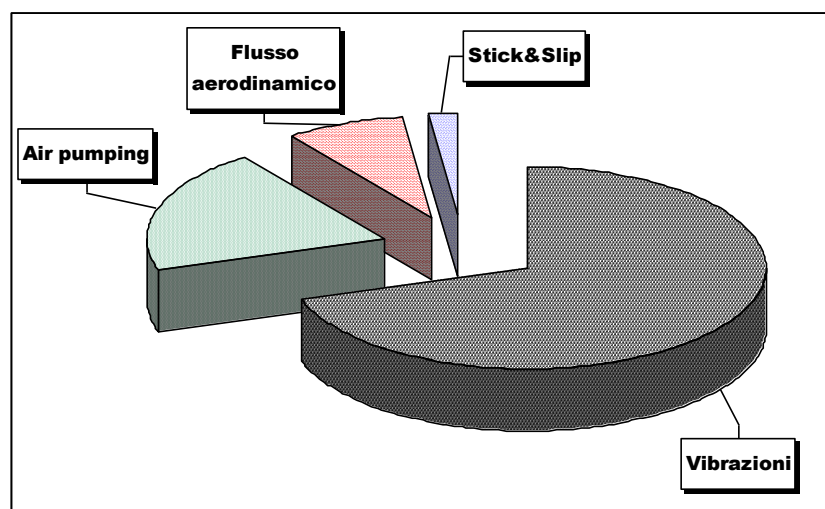


Fig. 2.50 - Aliquote delle principali sorgenti di rumore percepito all'esterno del veicolo

I due più importanti fenomeni che si manifestano in prossimità e nell'interfaccia di contatto tra pneumatico e pavimentazione sono l'air pumping e le vibrazioni. Solo una piccola percentuale del rumore emesso è riconducibile allo "stick and slip" ed al flusso aerodinamico del veicolo. Per le componenti di "maggior peso", vibrazioni ed air pumping, è possibile individuare nel valore di 1000Hz la frequenza caratteristica di emissione discriminante di una componente rispetto all'altra nella composizione del rumore di rotolamento. Inoltre la prevalenza di una componente rispetto all'altra è legata a determinati valori di velocità (Fig. 2.51).

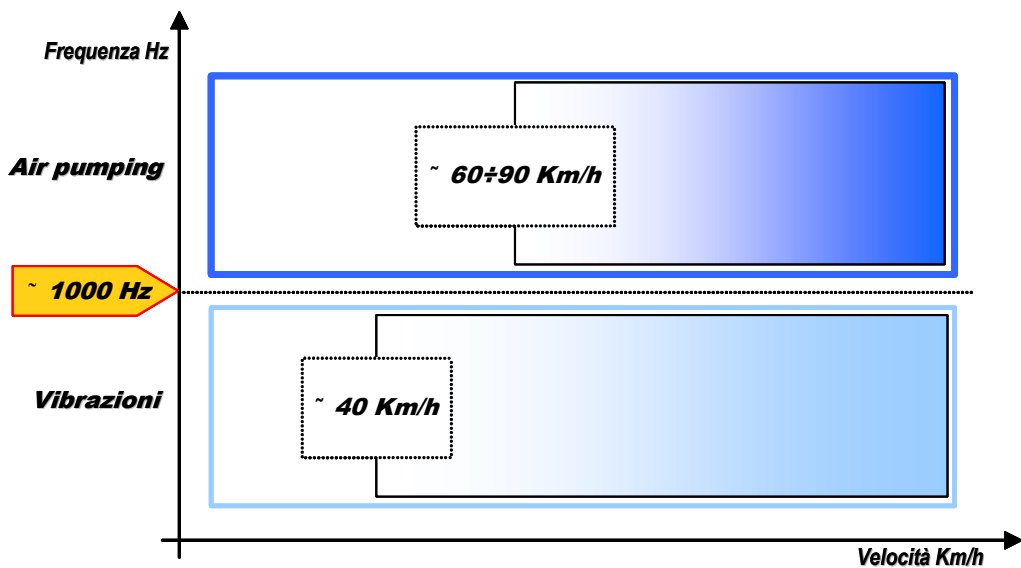


Fig 2.51 - Variazione della tipologia di rumore al variare della velocità e della frequenza di emissione.

2.5.1 Vibrazioni

L'aliquota di rumore di rotolamento attribuibile a fenomeni vibratorii radiali è, secondo alcune stime [99], pari al 60+80%; essa è analizzabile con riferimento al comportamento dinamico dei sistemi vibranti [100], determinato dalla relazione in frequenza tra eccitatrice (essenzialmente la pavimentazione) ed eccitato (pneumatico). Parametri regolatori sono, dunque, fra l'altro, le caratteristiche di rugosità e regolarità del piano di via, complessivamente individuanti anche il livello di funzionalità della sovrastruttura. La modellazione fisica del fenomeno prevede il confronto tra due profili con andamento armonico: uno rappresentativo della pavimentazione stradale di lunghezza d'onda λ ed ampiezza h ; l'altro rappresentativo della superficie del pneumatico a contatto con il piano viabile, di estensione totale a , ed avente lunghezza d'onda λ_{pn} ed ampiezza d (Fig. 2.52) [05].

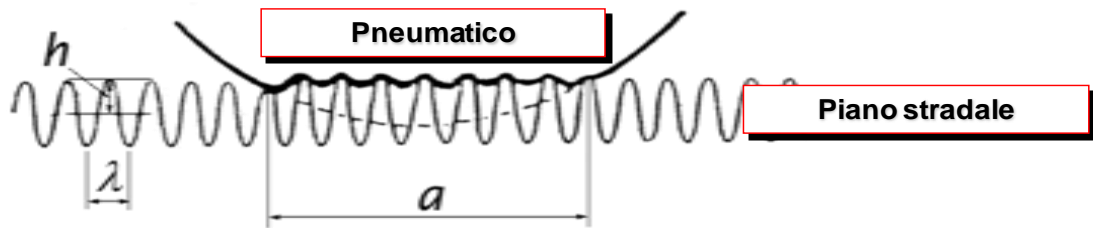


Fig. 2.52 - Profilo della superficie stradale e superficie del pneumatico

Le probabili configurazioni del contatto tra piano viabile e pneumatico sono dipendenti dalla relazione d'ordine che interviene tra la lunghezza d'onda λ della pavimentazione e l'estensione dell'area d'impronta a , nonché dalla capacità del pneumatico di adattarsi, deformandosi, alla morfologia della tessitura stradale. L'esaltazione del fenomeno vibratorio e la conseguente emissione sonora che ne deriva, avvengono per una configurazione tale per cui il profilo del pneumatico tende a deformarsi adattandosi perfettamente, o quasi, al profilo del piano di via. Si uguagliano quindi la lunghezza d'onda della pavimentazione e l'impronta del pneumatico ($\lambda \cong a$) ed ovviamente le rispettive ampiezze ($d \cong h$); in questo caso il fenomeno vibratorio tende al suo livello massimo (Fig. 2.53).

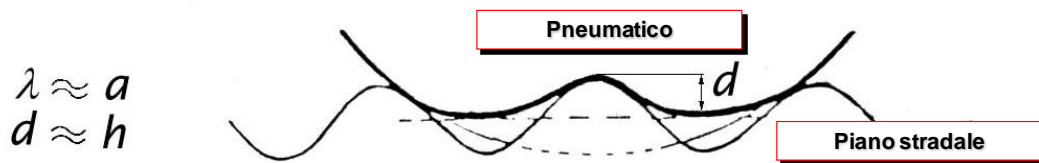


Fig. 2.53 - Configurazione che determina l'esaltazione del fenomeno vibratorio

La pavimentazione, per via della propria tessitura, gioca il ruolo di forzante del fenomeno vibratorio. La gamma delle vibrazioni che si generano sul pneumatico per effetto della interazione con la superficie stradale può considerarsi così composta [97], [101]:

- **vibrazioni radiali (meccanismo di impatto):** quando il pneumatico si muove sulla superficie di rotolamento, l'interazione che nasce fra il battistrada e la tessitura superficiale può essere letta come centinaia o addirittura migliaia di colpi di martelletto, che si verificano ogni secondo, ognuno dei quali genera del rumore (Fig. 2.54);
- **sidewall vibrations (meccanismo di impatto):** sono le vibrazioni generate dalla deformazione del fianco del pneumatico (Fig. 2.54);

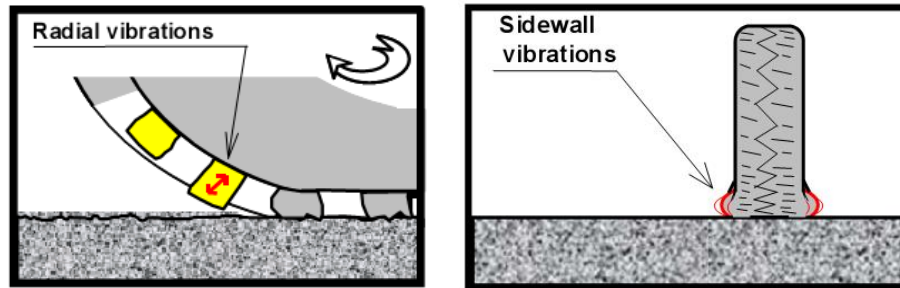


Fig 2.54 - Generazione del rumore per meccanismi di impatto

- **stick-snap (meccanismo di adesione):** tali vibrazioni sono dovute al fenomeno di “aggappamento-infissione” delle sculture del pneumatico alle asperità del piano viabile. L’esempio riconducibile a tale fenomeno è quello di una ventosa che aderisce su una superficie liscia attraverso forze di adesione e grazie alla creazione di una depressione (vuoto). Il rumore legato alla vibrazione generata è assimilabile alla spinta dell’aria all’esterno della ventosa stessa (Fig. 2.55);
- **stick-slip (meccanismo di adesione):** vibrazioni legate al processo di “aggappamento-scorrimento” delle sculture del pneumatico sulle asperità del piano viabile. Ogni singolo blocchetto di gomma è soggetto, durante il moto di rotolamento, a fenomeni di adesione (stick) e slittamento (slip) migliaia di volte al secondo così da generare rumori ad alta frequenza (Fig. 2.55).

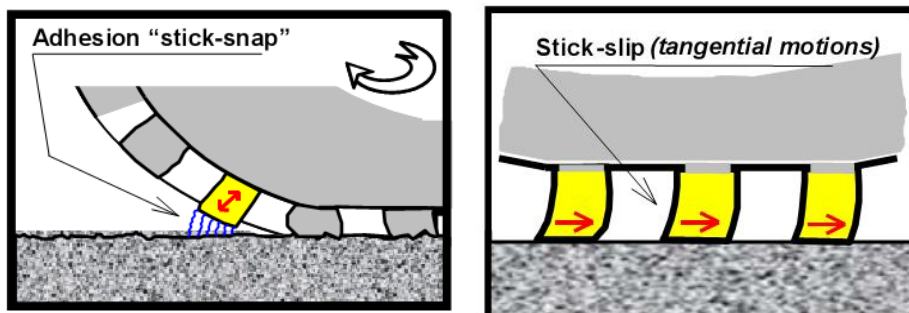


Fig 2.55- Generazione del rumore per meccanismo di adesione

2.5.2 Aerodinamica ed effetti di amplificazione.

I meccanismi di generazione del rumore legati all’aerodinamica sono principalmente dovuti al fenomeno dell’air-pumping. Le emissioni sonore riconducibili all’air pumping corrispondono ad onde a media ed alta frequenza (>1000Hz c.a.) e costituiscono, orientativamente, il 10-30% del complessivo rumore di rotolamento.

I fenomeni di air pumping sono caratterizzati principalmente dalla laminazione violenta dell'aria in pressione contenuta nei volumi delimitati dalle scanalature del battistrada e della superficie stradale. Tra il battistrada di un pneumatico e la tessitura superficiale della pavimentazione si interpongono dei vuoti d'aria e durante il moto si verificano simultaneamente fenomeni di pompaggio, sovrappressione ed espulsione del fluido contenuto nelle cavità della superficie stradale (*Fig. 2.56*).

Quando il pneumatico è in movimento rototraslatorio sulla superficie, l'aria viene inizialmente compressa e intrappolata al di sotto della gomma. Pochi istanti dopo, quando l'area di contatto muta a causa dello spostamento continuo durante il moto, la stessa aria precedentemente compressa si trova sottoposta ad una depressionione e viene, quindi, in parte rilasciata ed in parte energicamente risucchiata al di sotto del pneumatico stesso. Tutto ciò avviene centinaia o migliaia di volte al secondo. Questo processo è simile al suono emesso dal battito delle mani in cui si verifica una rapida espulsione dell'aria all'esterno. Anche il suono emesso da un fischio è un altro esempio in cui l'aria viene forzata attraverso una piccola cavità molto rapidamente [97], [101].

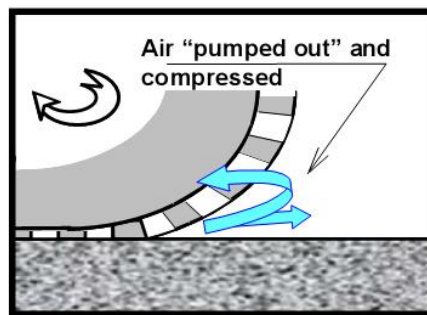


Fig. 2.56 - Generazione del rumore per meccanismo di air-pumping

Uno dei meccanismi di amplificazione dell'emissione sonora dovuta al contatto pneumatico-pavimentazione è il cosiddetto "effetto corno" (o megafono). E' un fenomeno di amplificazione ascrivibile alla configurazione a diedro del complesso "superficie stradale-pneumatico": all'interno del cuneo di aria che si forma fra gomma e superficie si verificano riflessi sonori multipli, proprio come quelli che si verificano all'interno di un corno musicale o di un megafono.

Il risultato è un ampliamento significativo dell'emissione sonora in direzione longitudinale, accompagnato dalla distorsione di alcune frequenze (*Fig.2.57*) [97].

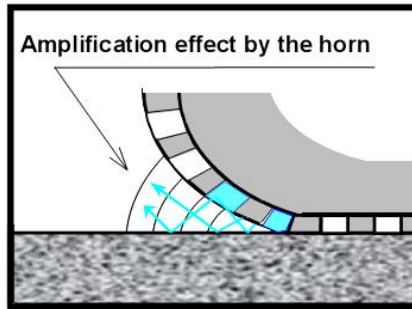


Fig. 2.57 - Amplificazione del rumore per effetto corno

L'effetto di risonanza di Helmholtz che si verifica all'interfaccia pneumatico-pavimentazione è un altro fenomeno di amplificazione del rumore di rotolamento prodotto. E' un fenomeno che si innesca alle alte frequenze (>1500 Hz circa), a seguito della dissipazione energetica delle onde acustiche per il passaggio del fluido attraverso la sezione ridotta rappresentata dal diedro formato dal pneumatico in contatto con la superficie stradale. L'effetto di amplificazione è simile a quello che si ottiene insufflando dell'aria all'interno di un collo di bottiglia (Fig.2.58) [97].

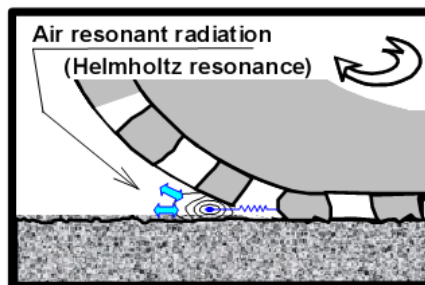


Fig. 2.58 - Amplificazione del rumore dovuta al fenomeno di risonanza di Helmholtz

Il fenomeno di risonanza è legato anche all'effetto "canna d'organo". Quando l'aria viene insufflata all'interno di una canna d'organo, il suono sarà amplificato in funzione della lunghezza della canna stessa e del numero di aperture in essa presenti. Su un pneumatico, una simile geometria a canna d'organo può essere individuata nelle scanalature e nelle lamelle del battistrada che creano dei veri e propri canali di raccolta dell'aria. Il rumore generato altrove viene amplificato attraverso queste "corsie preferenziali" in cui il suono si incanala durante il movimento (Fig.2.59 a) [97].

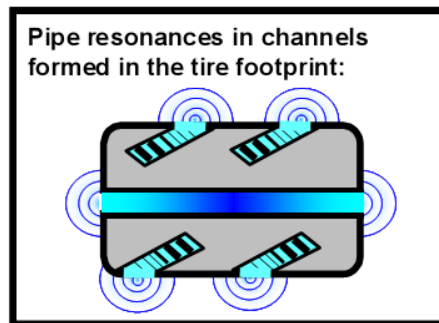


Fig. 2.59 a - Amplificazione del rumore dovuta all'effetto "canna d'organo"

Infine, esistono effetti di risonanza dovuti alla presenza di cavità nei pneumatici tubolari. In questo caso lo stesso pneumatico opererà da cassa di risonanza delle emissioni sonore (Fig.2.59 b).

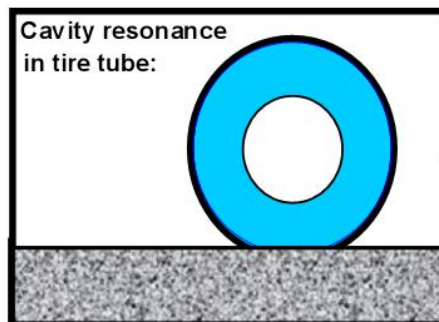


Fig. 2.59 b - Amplificazione del rumore dovuta alle cavità dei pneumatici tubolari

In definitiva, il rumore di rotolamento nel suo complesso, non è omnidirezionale; sul piano orizzontale presenta la massima radiazione sonora frontalmente, mentre sul piano verticale la direzione è determinata dall'effetto corno e dalla conformazione della vettura. La massima radiazione sonora si trova, in genere, all'interno di un angolo di 40° da terra [101]. Lungo la direzione perpendicolare al moto lo spettro presenta un numero maggiore di picchi dovuti essenzialmente ai fenomeni vibratorii del battistrada.

Lo spettro del rumore di rotolamento è compreso nell'intervallo 315 Hz e 4000 Hz; in tale range esso risulta essere dominante rispetto alle altre fonti di rumore della vettura in moto. L'emissione anteriore rispetto al verso del moto è maggiore di 1-3 dB rispetto a quella posteriore nell'intervallo 315-1000 Hz, il contrario accade per l'intervallo 1250-4000 Hz. Per avere una visione d'insieme di tutti gli effetti generatori del rumore di rotolamento, associati ai rispettivi parametri di influenza e all'intervallo di frequenza in cui essi si esplicano, viene fornito un quadro d'unione in *Tabella 2.5* [101].

Fenomeno fisico	Parametri di influenza	Intervallo di frequenza (Hz)
Vibrazione globale normale alla superficie dello pneumatico	Struttura dello pneumatico, lunghezze d'onda medio-lunghe della tessitura	<1000
Vibrazioni locali del battistrada	Proprietà meccaniche del battistrada. Radiazione dovuta all'influenza dell'impedenza acustica locale.	400-4000
Vibrazioni strutturali in campo vicino	Bassa efficienza di radiazione	>400
Propagazione dell'aria messa in risonanza	Configurazione della scolpitura, principalmente longitudinale	
Stick-slip/accoppiamento delle vibrazioni tangenziali e radiali	Forze di attrito e tangenziali	>1000 Hz
Adesione stick-snap	Microtessitura della superficie	>1000 Hz
Vibrazione laterale: accoppiamento dei modi interni acustico-meccanici	Modi acustici interni. Accoppiamento strutturale della vibrazione del battistrada con le pareti laterali	>200

Tabella 2.5 Quadro d'unione degli effetti generatori del rumore di rotolamento e relativi intervalli di frequenza

2.5.3 Il ruolo della tessitura nel fenomeno di generazione e propagazione del rumore di rotolamento: alcune considerazioni.

La tessitura superficiale della pavimentazione stradale riveste un ruolo di primaria importanza nei processi che determinano l'emissione del rumore da rotolamento; tale correlazione è stata fortemente evidenziata già nel paragrafo precedente in cui sono state esplicate le interazioni fra pneumatico e superficie stradale. In questo paragrafo verranno messi in luce aspetti più particolari del fenomeno in riferimento alle specifiche classi di tessitura effettivamente coinvolte. La tessitura influisce sulle due cause principali del rumore da rotolamento in due modi diversi. Il fenomeno dell'air-pumping viene governato principalmente dalla microtessitura e da parte della macrotessitura (in range di lunghezze d'onda variabili da 0.5 mm a 10 mm). Valori elevati di tessitura in questi range consentono di limitare il fenomeno. Grazie alle micro cavità presenti l'aria intorno al pneumatico, mandata in sovrappressione ed in

depressione in maniera continua durante il moto, ha modo di incanalarsi più liberamente. Per questo motivo, nelle pavimentazioni drenanti, in cui la percentuale di vuoti interconnessi è elevata, la rumorosità dovuta ai fenomeni di air-pumping è limitata. Il rumore da vibrazioni è determinato principalmente dalle lunghezze d'onda comprese fra 10 mm e 0.5 mm (parte terminale della macrotestitura e megatessitura) poiché maggiore è la deformazione del pneumatico maggiore saranno i fenomeni vibratorii che si innescano. La deformazione dello pneumatico, infatti, è maggiore quando la lunghezza d'onda della tessitura è dello stesso ordine di grandezza dell'area di impronta del battistrada. E' evidente, dunque, che un'elevata macrotestitura determina una generazione importante di vibrazioni e di conseguente rumore di rotolamento [98], [101] (Fig. 2.60).

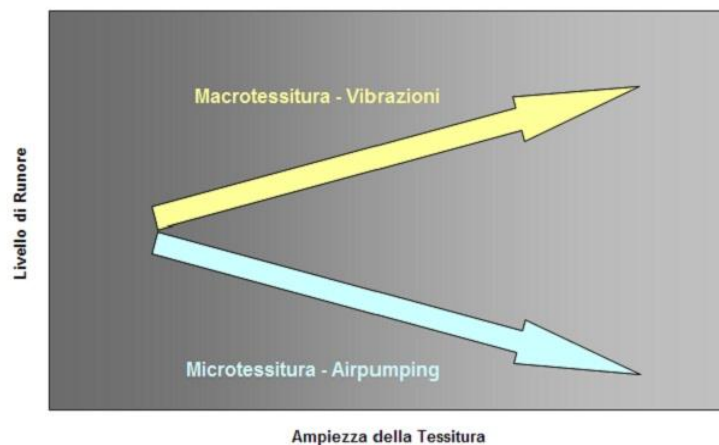


Fig. 2.60 - Livello di rumore in funzione dell'ampiezza di tessitura della superficie [101]

Poiché il fenomeno delle vibrazioni è quello che contribuisce con un'aliquota maggiore al rumore di rotolamento, è possibile concludere che la macrotestitura è sicuramente la classe di tessitura che ha un peso maggiore nella generazione del fenomeno.

Numerosi studi identificano nella lunghezza d'onda di 10 mm la soglia di separazione fra i due fenomeni. L'analisi spettrale, inoltre, evidenzia che esistono due domini distinti caratterizzati da correlazioni fra frequenze acustiche e lunghezze d'onda, uno in cui la correlazione è negativa, l'altra in cui la correlazione è positiva. Nel primo caso, per lunghezze d'onda fra 0.5 e 10 mm, un incremento delle ampiezze produce una riduzione del rumore alle alte frequenze (>1000 Hz); viceversa per lunghezze d'onda tra 10 e 500 mm un incremento delle ampiezze di tessitura produce un aumento del rumore alle basse frequenze [97].

Tutto ciò è conferma del fatto che la "gestione" delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento è di fondamentale importanza nell'ottica del perseguimento degli obiettivi

prestazionali richiesti alle infrastrutture viarie. Tale importanza viene riconosciuta anche a livello normativo [02].

Al fine di ridurre le emissioni da rumore di rotolamento, è opportuno, dunque, tener conto di alcuni fattori che possono essere governati già in fase di progetto e mix design delle miscele; in particolare, per ciò che concerne gli aggregati, per ottenere manti di usura a bassa emissione sonora, il diametro massimo non dovrebbe superare gli 8 mm.

La tessitura della pavimentazione deve essere negativa, ossia caratterizzata prevalentemente da valli. Una pavimentazione con tessitura negativa permette di contenere le deformazioni del pneumatico e, allo stesso tempo, migliora il drenaggio delle acque superficiali nonché la più facile espulsione dell'aria intrappolata fra pneumatico e piano di rotolamento (*Fig.2.61*) [101].

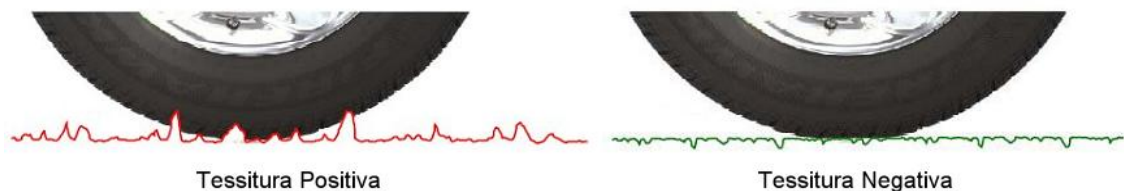


Fig. 2.61 - Esempi di tessitura positiva e negativa e interazione con il pneumatico

Esempi di tessiture negative sono i tappeti drenanti o i gap-graded con una percentuale di vuoti intercomunicanti elevata (>18%). In questo modo vengono attenuati sia i fenomeni vibratorii che quelli emissivi legati al meccanismo di air-pumping (*Fig.2.62*).

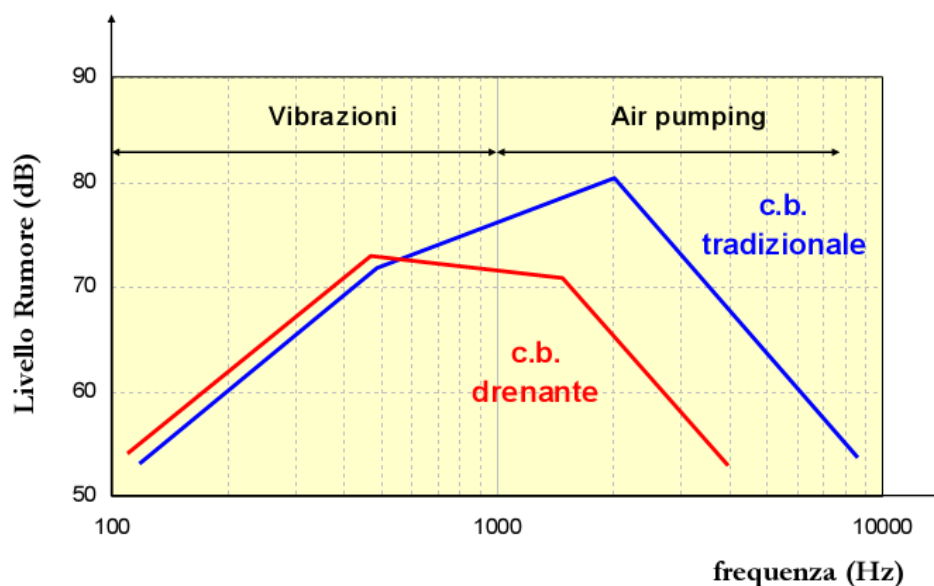


Fig. 2.62 - Emissioni sonore per pavimentazioni in conglomerato bituminoso tradizionale e drenante [101]

Se si considerano due profili stradali speculari, uno con tessitura positiva e uno con tessitura negativa, pur ottenendo il medesimo spettro di tessitura si otterranno prestazioni acustiche diverse (Fig. 2.62). E' evidente, quindi, l'importanza della forma della tessitura nel controllo delle prestazioni acustiche di una pavimentazione [97].

La megatessitura, soprattutto nel range di lunghezze d'onda 50-100mm, ha effetti negativi sul rumore da rotolamento. Un incremento della megatessitura, con effetti dannosi per l'emissione di rumore da rotolamento, potrebbe essere determinato, ad esempio, dalla mancanza di aggregati in superficie, o da aggregati disposti in superficie con orientamento non omogeneo (Fig. 2.63).

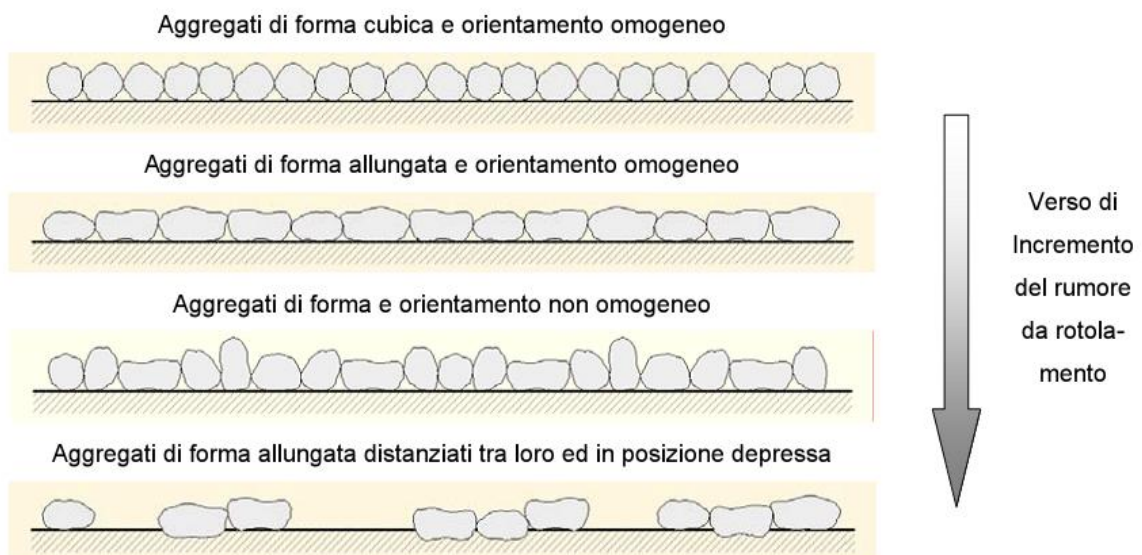


Fig. 2.63 - Tipologia e orientamento degli aggregati e incremento del rumore di rotolamento [101]

Tra le soluzioni per la realizzazione di pavimentazioni stradali a bassa emissione sonora è doveroso annoverare le usure con argilla espansa (materiale impiegato anche nelle stese sperimentali oggetto del presente lavoro di ricerca). L'utilizzo dell'argilla espansa nel mix design di conglomerati bituminosi consente di ottenere strati di usura chiusi con caratteristiche migliori sia per ciò che riguarda l'aderenza, sia in termini di capacità di fonoassorbimento rispetto alle miscele realizzate con il 100% di aggregati naturali. L'incremento delle caratteristiche di fonoassorbimento deriva dalla presenza, all'interno delle singole particelle di argilla, di una diffusa microporosità che influisce sull'assorbimento dell'energia sonora prodotta dal veicolo in movimento. Risultati sperimentali mostrano che nei conglomerati chiusi

l'impiego del 10-15% in peso di argilla di pezzatura 5-10 mm in sostituzione dell'inerte naturali determina un abbattimento dell'emissione sonora di circa 3.5 dB(A).

La caratteristica più importante di una pavimentazione stradale è la capacità di assorbire l'energia sonora generata dal moto; tale capacità viene quantificata attraverso il coefficiente acustico, definito come il rapporto fra energia sonora assorbita dalla superficie e energia incidente. L'assorbimento acustico ha un ruolo determinante nei fenomeni di effetto corno, di riflessione multipla e di propagazione. Per questa ragione è necessario ottimizzare i parametri fisici che influenzano il coefficiente di assorbimento acustico, individuati da Bereinger e Hamet nei seguenti fattori:

- resistenza al passaggio dell'aria nei pori R_s ;
- porosità comunicante n^* ;
- fattore di forma (tortuosità) K ;
- spessore dello strato s .

La resistenza specifica R_s al passaggio dell'aria nei pori della pavimentazione è pari alla diminuzione di pressione dell'aria (per unità di lunghezza) relazionata alla velocità di transito. Al crescere di tale resistenza lo spettro del coefficiente di assorbimento tende ad appiattirsi e dipende sempre meno dalla frequenza (Fig 2.64).

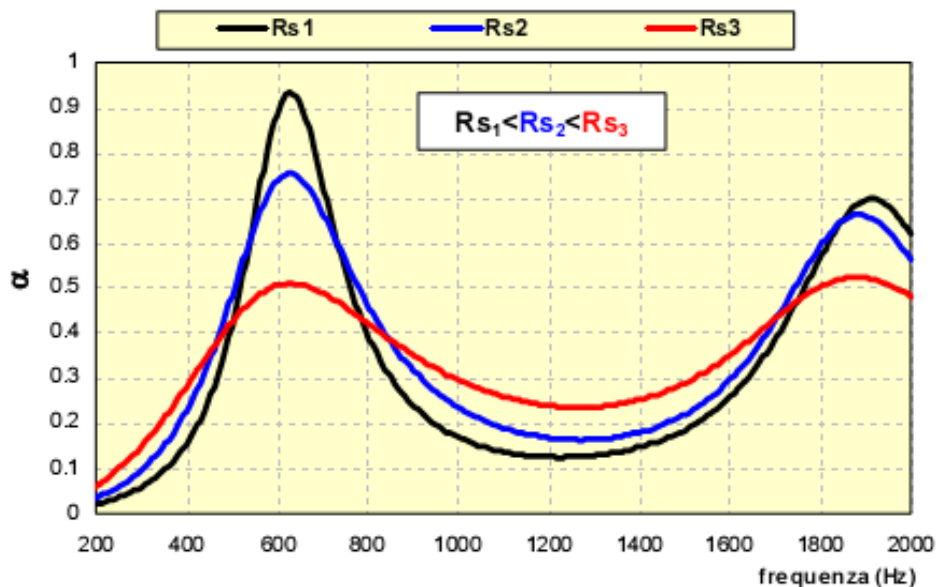


Fig. 2.64 - Variabilità dello spettro del coefficiente di assorbimento acustico al variare della resistenza [101]

La porosità n^* è il rapporto tra i pori comunicanti e il volume totale⁴. Al crescere nella porosità n^* cresce il coefficiente di assorbimento ed in particolare cresce per alcune frequenze caratteristiche (Fig.2.65).

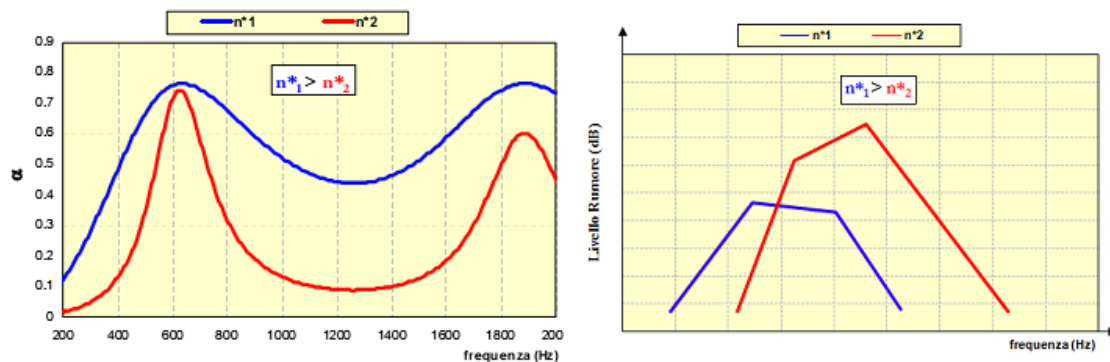


Fig. 2.65 - Variabilità dello spettro del coefficiente di assorbimento acustico al variare della porosità [101]

Il fattore di forma k degli interstizi è un parametro adimensionale che tiene conto della loro tortuosità e della variazione di sezione. Vale 1 per pori aventi traiettoria rettilinea ed ortogonale alla superficie, nel campo delle pavimentazioni flessibili può assumere valori compresi tra 2÷9. Tra il fattore di forma ed i valori di picco del coefficiente esiste una proporzionalità inversa: all'aumentare del fattore di forma lo spettro si sposta verso le basse frequenze conservando inalterati i valori di picco (Fig. 2.66) .

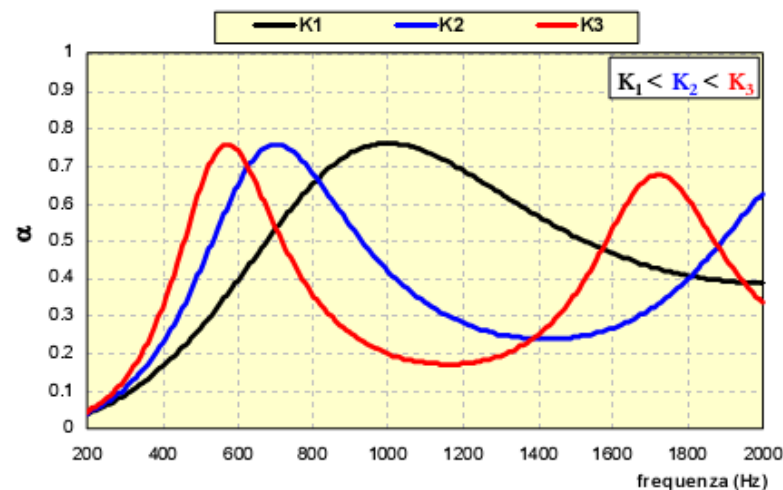


Fig. 2.66 - Variabilità del coefficiente di assorbimento acustico al variare del fattore di forma degli aggregati [101]

⁴ La porosità "classica" è invece il rapporto tra i pori totali ed il volume totale della miscela

Al crescere dello spessore s lo spettro subisce un aumento del numero di picchi tendendo asintoticamente ad un livellamento su un valore caratteristico (condizione di *superspessore*) (Fig 2.67).

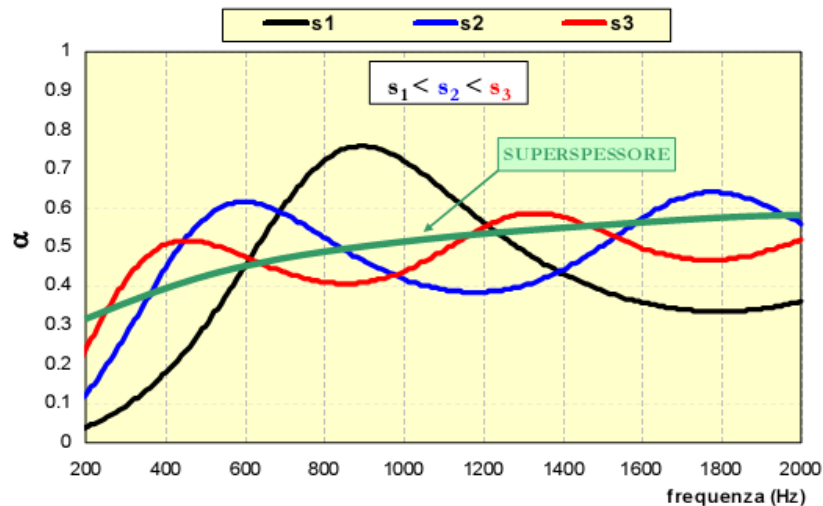


Fig. 2.67 - Variabilità dello spettro del coeff. di assorbimento acustico al variare dello spessore dello strato [101]

2.6 COSTI DELLO SPOSTAMENTO ED INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Un problema complesso come quello della manutenzione dei sistemi di trasporto nella sua interezza non può prescindere non solo dallo studio delle caratteristiche proprie del veicolo ma anche, in egual misura, dalle caratteristiche superficiali della sede che contribuiscono in modo sensibile al degrado delle componenti del veicolo stesso. Disponendo, dunque, dei dati relativi alle performance superficiali della sede stradale e alla loro evoluzione temporale, si potrebbe programmare, oltre alla manutenzione dell'infrastruttura, anche quella veicolare tenendo conto di tali imprescindibili elementi.

In tal modo sarebbe possibile gestire e monitorare, con un livello di dettaglio più adeguato, i costi di esercizio e di manutenzione legati allo spostamento [102]. I costi associati allo spostamento di un veicolo per il trasporto di persone/merci su gomma possono essere classificati in due macrofamiglie:

- costi operativi associati al veicolo: consumo di carburante, usura dei pneumatici, costi di manutenzione del parco veicolare;
- costi associati allo spostamento: ritardi e aumenti dei tempi di percorrenza, danni alle merci trasportate dai veicoli commerciali, discomfort per conducenti e passeggeri.

2.6.1 Consumo di carburante ed inquinamento atmosferico

I costi di viaggio legati al consumo di carburante vengono influenzati dalla tecnologia propria del veicolo, dalla velocità di marcia, dalle condizioni ambientali, dalle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura stradale ma anche dalle condizioni superficiali della pavimentazione. Le irregolarità del piano viabile in direzione longitudinale alle traiettorie dei veicoli, infatti, incrementano in maniera considerevole la resistenza al rotolamento. Un incremento della resistenza al rotolamento si traduce, allo stesso tempo, in un aumento del consumo di carburante, con conseguenti ripercussioni sia sull'inquinamento dell'aria che sul costo dello spostamento. E' evidente, quindi, la stretta correlazione esistente fra il livello di tessitura della pavimentazione stradale e gli indicatori di performance legati all'ecocompatibilità ed al costo del trasporto su gomma. Dati di letteratura, confermano, a tal proposito, l'influenza diretta dell'aumento della resistenza al rotolamento sulle emissioni in atmosfera di CO₂ ed altre sostanze pericolose come NO_x, CO, HC, particolato, etc. Il consumo energetico legato alla resistenza al rotolamento del veicolo è quantificabile nel 15% circa dell'energia totale consumata dal veicolo. Altri fattori che determinano, con aliquote diverse, il consumo di energia associato al trasporto veicolare su gomma riguardano l'attrito interno al motore e l'inerzia stessa del veicolo e delle masse rotanti, nonché la resistenza aerodinamica e l'attrito alla trasmissione (cfr. Fig. 2.68) [103].

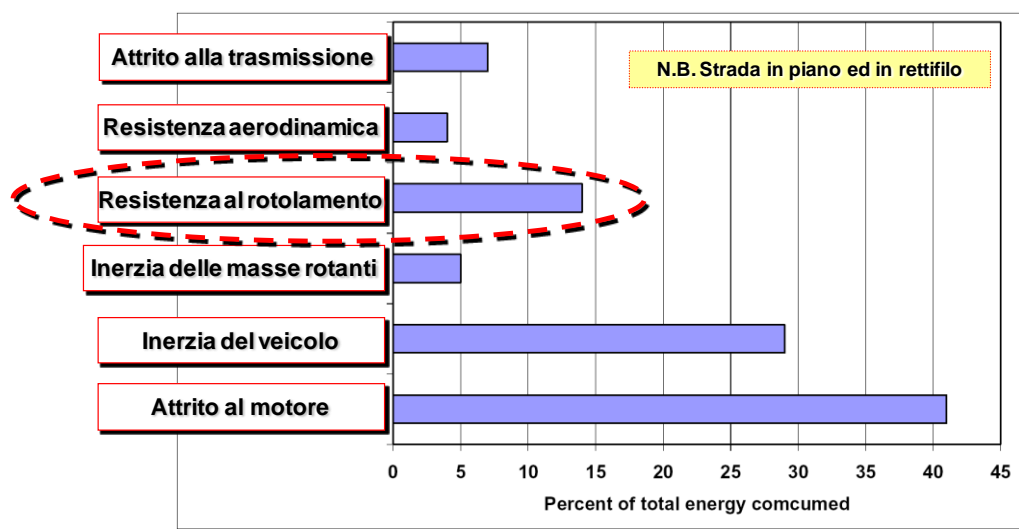


Fig. 2.68 - Aliquote del consumo energetico associato al trasporto veicolare

L'effetto della tessitura superficiale sul consumo di carburante è stato oggetto di numerosi studi di letteratura. Una stima dell'influenza della variazione di resistenza al rotolamento sul

consumo di carburante per i veicoli è stata determinata in base ai risultati sperimentali del “New European Driving Cycle” [104], come mostrato in Fig.2.69: un aumento del 10% della resistenza al rotolamento determina un incremento parallelo del consumo di energia da parte del veicolo del 2.5% [103].

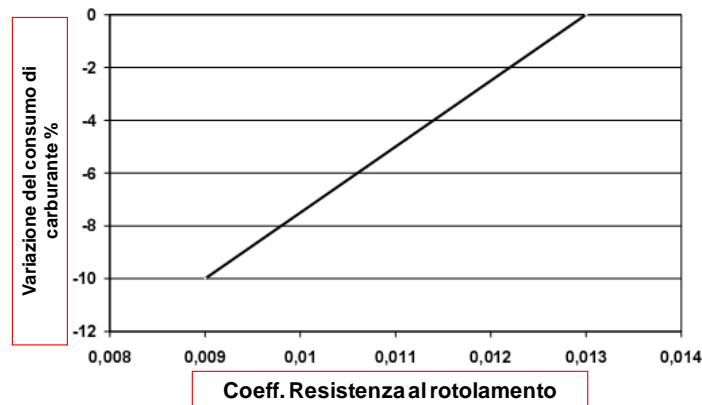


Fig. 2.69 - Variazione del consumo di carburante al variare del coefficiente di resistenza al rotolamento

Studi analoghi [95] evidenziano che per alte velocità (90Km/h) un aumento dell’International Roughness Index (IRI)⁵ di un fattore pari a 10 ha una ripercussione sulla resistenza al rotolamento che si traduce in un aumento della stessa del 48%. Lo stesso tasso di incremento della profondità media di tessitura determina un aumento della resistenza al rotolamento del 72%. Ciò si traduce in un ulteriore incremento del consumo di carburante del 5% e del 7% rispettivamente. In relazione al valore assunto dal coefficiente di resistenza al rotolamento, correlato a sua volta alla profondità della tessitura, è possibile valutare, in definitiva, l’incremento del consumo di carburante in ml/Km (Fig.2.70) [106].

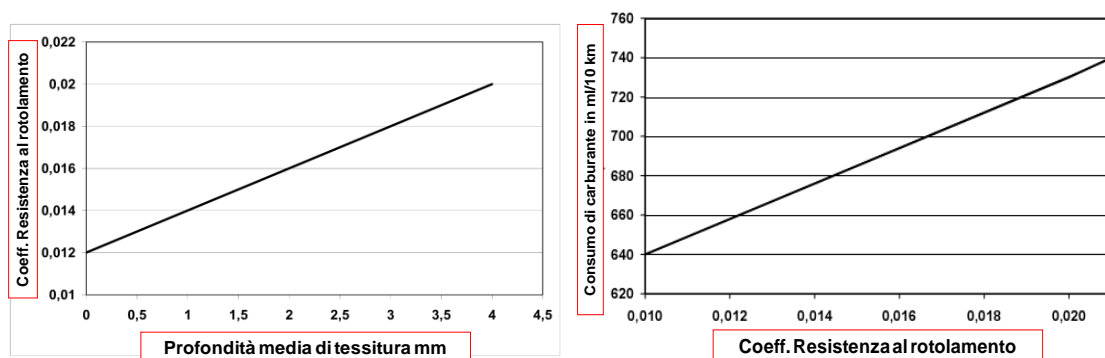


Fig. 2.70 - Variazione della resistenza al rotolamento al variare della profondità di tessitura (s_x) e variazione del consumo di carburante al variare del coefficiente di resistenza al rotolamento (d_x)

⁵ Indicatore dell’irregolarità superficiale della pavimentazione stradale.

All'interno delle classi di tessitura, sia le onde corte delle irregolarità che la macrotessitura sembrano avere influenza sul consumo di carburante pur con effetti diversi; in particolare, variazioni nell'irregolarità superficiale possono determinare aumenti del consumo di carburante anche dell'ordine del 10%. Nel grafico di Fig.2.71, infatti, è evidente la differenza di pendenza delle due rette di correlazione [105].

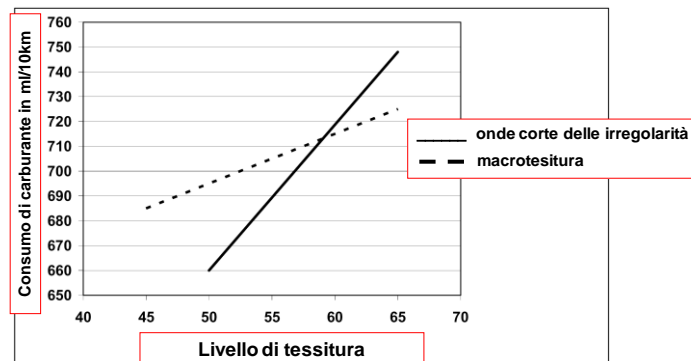


Fig 2.71 Variazione del consumo di carburante al variare del livello di tessitura

Lo stesso studio condotto da Sandberg [95], mostra che il fattore determinante e discriminante nella valutazione del consumo energetico del veicolo risulta essere la velocità: alle basse velocità sembra che la macrotessitura non abbia effetti sul consumo di carburante, viceversa alle alte velocità di marcia le classi di tessitura che influenzano il consumo energetico del veicolo comprendono, oltre alla macrotessitura, anche e soprattutto le irregolarità superficiali e la megatessitura.

Una ricerca condotta nel 2010 [107] mostra, inoltre, che un aumento dell'IRI di 2m/Km si traduce in un incremento del 2% nel consumo di carburante. Studi successivi dei medesimi autori [108] mostrano come l'effetto della tessitura superficiale della pavimentazione sul consumo di carburante sia statisticamente significativo per velocità dell'ordine dei 50 Km/h e per ogni tipologia di veicolo, mentre risulti non significativa a velocità più alte. Un aumento della profondità di tessitura di un fattore pari a 6 determina un incremento del consumo di carburante dell'1.6% per i mezzi articolati e dello 0.2% per i veicoli leggeri.

Nel grafico di Fig.2.72 vengono riportati i risultati numerici di tale sperimentazione; il consumo di carburante in funzione della macrotessitura superficiale, espressa in termini di MPD (Mean Texture Depth), è stato determinato per diverse classi di veicoli.

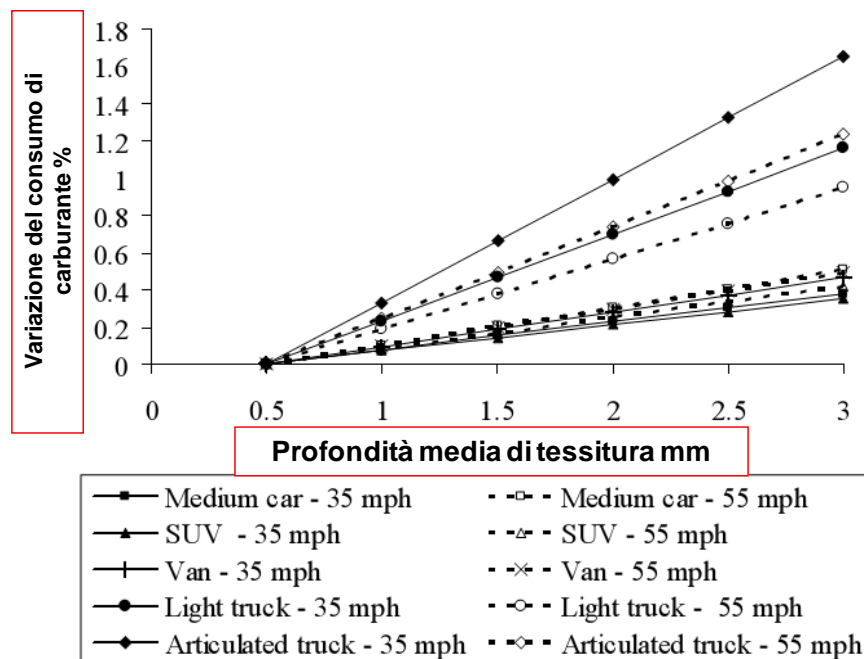


Fig. 2.72 - Variazione del consumo di carburante al variare della profondità media di tessitura per diverse tipologie di veicoli [107]

2.6.2 Usura dei pneumatici

Il processo di usura dei pneumatici, largamente influenzato dalle diverse componenti della tessitura del piano di rotolamento, risulta estremamente complesso anche perché connesso a specifiche condizioni di esercizio del pneumatico stesso (pressione di gonfiaggio, carichi etc.).

Una sua qualitativa disaggregazione porta a distinguere due distinti meccanismi:

1. usura della carcassa;
2. usura del battistrada.

L'usura della carcassa è dovuta ad un processo di fatica che ne peggiora le performance e, nel tempo, determina la separazione del battistrada dalla carcassa stessa. Conseguenza ultima del fenomeno è il completo non utilizzo del pneumatico.

La vita utile della carcassa è strettamente legata alla presenza sul piano stradale della megatessitura e delle irregolarità che, unitamente alle condizioni di carico, alla qualità delle sospensioni del veicolo ed alla pressione di gonfiaggio governano l'innescio di sovraccarichi dinamici di affaticamento. L'equazione generale che governa il problema dell'usura del pneumatico è la seguente:

$$R_w = A \cdot E_f \quad (9)$$

in cui R_w rappresenta il coefficiente di usura delle scolpiture in termini di perdita di battistrada per unità di superficie per l'intera circonferenza; A è l'Abrasività (perdita di battistrada per unità di superficie, per unità di lavoro di attrito/aderenza, sotto specifiche condizioni al contorno) ed E_f è dato dal rapporto tra il lavoro di attrito e l'aderenza, per unità di superficie e per l'intera circonferenza del pneumatico [109].

Il meccanismo d'usura delle scolpiture del battistrada è principalmente costituito da tre distinti processi:

- abrasione;
- affaticamento;
- deformazione.

Tali processi si verificano durante l'attività di scorrimento del pneumatico sul piano stradale e sono fortemente influenzati dalle componenti micro e macro della tessitura superficiale, nonché dalla temperatura, dalla qualità delle mescole e dalla presenza di contaminanti sul piano di rotolamento.

Diversi sono i contributi in letteratura che propongono possibili leggi correlative tra usura delle scolpiture e caratteristiche di micro e macro tessitura.

La relazione proposta da Lowne's mostra come il contributo prevalente al processo di usura venga dato dalla microtessitura, misurata indirettamente come coefficiente d'attrito; la macrotessitura, valutata in termini di MTD, invece, influenza in maniera nettamente inferiore tale processo [109]:

$$W = -9.2 + 90 \cdot S_{50} + 18 \cdot \text{MTD} \quad (10)$$

Nella (10) W rappresenta l'usura delle scolpiture, S_{50} è coefficiente d'attrito a 50Km/h valutato con SCRIM (Misura indiretta della microtessitura), mentre MTD rappresenta il valore della profondità media di tessitura valutata con prova dell'altezza in sabbia (Misura diretta della macrotessitura).

2.6.3 Costi di manutenzione del veicolo

I costi di manutenzione di un veicolo possono farsi dipendere, in linea generale, dalle caratteristiche costruttive, dalla sede, dal tipo di servizio effettuato, dallo stile di guida dell'autista e dalle caratteristiche degli oggetti trasportati (viaggiatori o merci). Tra le caratteristiche funzionali della sede, anche in relazione ai costi di manutenzione del veicolo,

uno dei parametri di maggior interesse è costituito dalla regolarità di una strada. A causa dei fenomeni vibratorii che può innescare, la regolarità ha una diretta influenza sull'usura delle parti meccaniche del veicolo, sul comfort di viaggio e sulla sicurezza. Per tale motivo la regolarità è un parametro molto importante sia per la diagnosi del deterioramento delle strade sia per una corretta progettazione della manutenzione della strada e dei veicoli circolanti [110]. Modelli matematici proposti in letteratura forniscono relazioni di tipo empirico tra i costi di manutenzione del veicolo, il livello di regolarità superficiale della strada (IRI) e l'età del veicolo, in prima approssimazione esprimibile in funzione dei chilometri percorsi. Il costo di manutenzione viene generalmente espresso mediante la somma di due contributi: il degrado dei componenti e le ore di lavorazione per manutenzione. Il modello Brazil, ad esempio, utilizzato nell'HDM-III fornisce una stima del degrado dei componenti in funzione della regolarità della strada; le ore di manutenzione vengono fatte dipendere oltre che dalla regolarità superficiale, anche dal degrado dei componenti del veicolo; in genere il costo derivante dal degrado dei componenti viene espresso come una frazione del prezzo di sostituzione del veicolo e per questo viene indicato come costo standardizzato. In Fig.2.73 è illustrato quanto previsto dal modello contenuto nell'HDM per la valutazione dei costi per la manutenzione delle parti meccaniche per diverse classi veicolari [111].

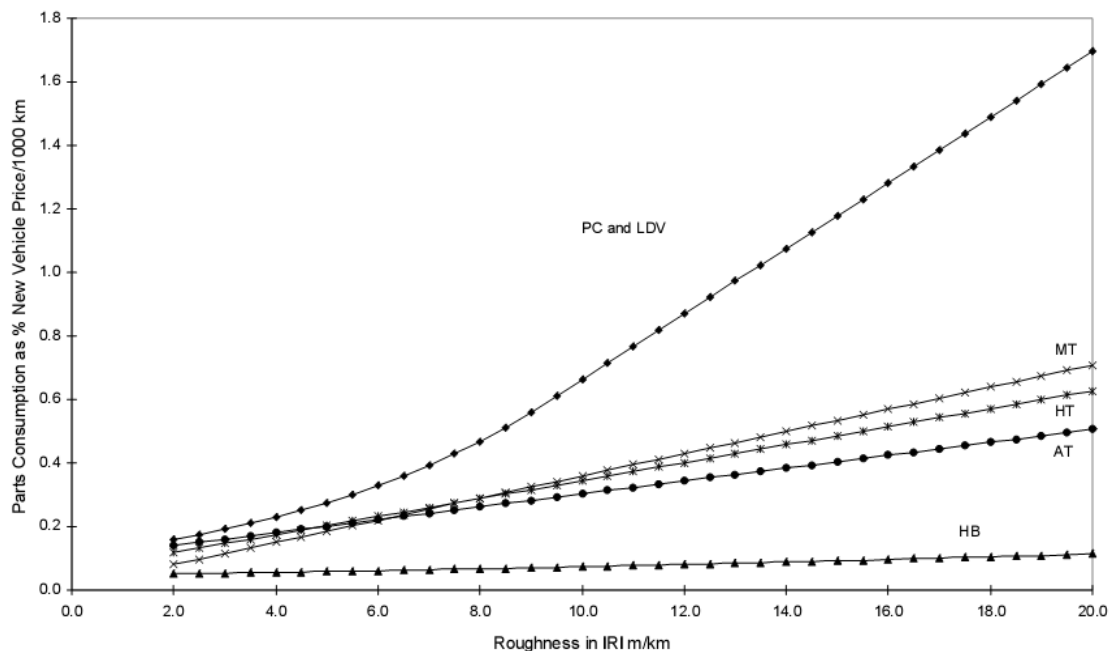


Fig. 2.73 - Costi di manutenzione del veicolo al variare della rugosità superficiale per diverse tipologie di veicoli [110]

Nel grafico di *Fig.2.73* si evidenzia, in particolare, che le autovetture (PC) sono molto sensibili alla regolarità (IRI), particolarmente per valori superiori a 6 m/km, mentre i veicoli pesanti sono relativamente poco sensibili alle irregolarità superficiali. La sensitività dei costi per i veicoli leggeri alla variazione di IRI è stata studiata da numerosi ricercatori [101]. Da questi studi è emerso, ad esempio, che un incremento della irregolarità (IRI) da 2 a 10 m/km incrementa il consumo delle parti meccaniche di un fattore 4.1 per i veicoli leggeri e di solo 1.5 per i bus [110].

2.6.4 Discomfort di marcia, aumento dei tempi di viaggio e danni alle merci.

Da quanto è emerso nell'analisi effettuata nei precedenti paragrafi, è evidente che le irregolarità del piano viabile rappresentano l'insieme delle distorsioni della superficie stradale che rendono la marcia dei veicoli poco confortevole. Esse, infatti, imprimono al veicolo delle accelerazioni, orizzontali e verticali, che influenzano il comfort e la sicurezza della circolazione, aumentano le resistenze al moto, inducono movimenti anomali al veicolo a scapito della tenuta di strada e della capacità del guidatore di condurre il mezzo in situazioni di sicurezza. Anche se non sempre percepite dall'utente, le irregolarità generano incrementi di carico ed azioni dinamiche favorendo, soprattutto nel caso di transito di veicoli pesanti, il consumo strutturale della pavimentazione. In tal modo il processo di degrado rischia di autoalimentarsi traendo energia proprio dall'azione del traffico.

Il comfort di guida dell'utente della strada è un problema complesso che riguarda tre elementi principali che interagiscono fra loro: il pneumatico, la superficie stradale ed il veicolo [102].

Le forze scambiate fra veicolo e suolo attraverso il pneumatico determinano le accelerazioni subite dagli occupanti del veicolo; allo stesso tempo, anche le asperità superficiali su cui il pneumatico rotola costituiscono sorgenti di sollecitazione per l'utente della strada. Come già visto per il rumore da rotolamento, le vibrazioni prodotte dall'interazione veicolo-pavimentazione hanno effetti anche sul comfort di marcia. In particolare i parametri fondamentali del moto vibratorio sono:

- la frequenza delle accelerazioni;
- l'ampiezza delle accelerazioni;
- la parte del corpo sottoposta alle vibrazioni;
- la direzione delle sollecitazioni.

Le caratteristiche della superficie di rotolamento influenzano in maniera considerevole insieme al comfort anche la velocità di marcia ed il “grado” di sicurezza che l’utente riesce a percepire durante la guida. Una irregolarità pronunciata e/o una non adeguata aderenza offerta dal piano di rotolamento, soprattutto in condizioni di superficie bagnata, producono l’effetto di abbassare la velocità degli utenti, che recepiscono immediatamente condizioni di pericolo, con conseguenti incrementi dei tempi di viaggio.

Numerosi studi sperimentali hanno dimostrato, nel tempo, la correlazione fra danni subiti dalle merci trasportate e vibrazioni verticali trasmesse al veicolo a causa di irregolarità del piano viabile e condizioni non ottimali della pavimentazione stradale. In particolare, possono essere identificate le seguenti cause del danno alle merci trasportate dovute alla sollecitazione applicata al carico durante il trasporto:

- cattivo maneggiamento durante le fasi di carico/scarico;
- stoccaggio del materiale protettivo;
- vibrazioni orizzontali (start e stop, ecc);
- vibrazioni verticali dovute alle irregolarità del piano di rotolamento [110].

2.7 BIBLIOGRAFIA SPECIFICA CAPITOLO 2

- [01] Boscaino G., Praticò F.G. - *La tessitura superficiale delle pavimentazioni stradali – Parte I*, Progetto di ricerca di rilevante interesse Nazionale -1998, Palermo - Ottobre 1999.
- [02] ISO 13473-1 – *Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Determination of Mean Profile Depth* – Settembre 1997.
- [03] AIPCR, Associazione mondiale della strada, Comitato tecnico C1 - *Caratteristiche Superficiali - Aderenza dei manti bituminosi* - XXIV Convegno Nazionale Stradale, 2005.
- [04] Noyce David A., Hussain P.E., Bahia U., Yambó Josué M., Guisk K. - *Incorporating road safety into pavement management: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements* - Midwest Regional University Transportation Center Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory, 29 Aprile 2005.
- [05] Vaiana R. - *Caratteristiche superficiali dei rivestimenti in conglomerato bituminoso ed il fenomeno dello sheet flow* - Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie, Università degli Studi di Palermo, Febbraio 2004.
- [06] AIPCR, Associazione mondiale della strada, Comitato tecnico D2b. - *Attenuazione del rumore stradale - Interventi di mitigazione sonora alla sorgente* - XXVI Convegno Nazionale Stradale, Roma 27 - 30 Ottobre 2010.
- [07] AIPCR Technical Committee on Surface Characteristics (C1) - *International PIARC Experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements* - AIPCR, 1995.
- [08] Boscaino G. - *Rumore e vibrazioni da traffico. L'influenza delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni. Cap I "Rumore di rotolamento"* - Quaderno AIPCR, Verona, 18/21 Maggio 1998.
- [09] Henry, J. J. *Evaluation of Pavement Friction Characteristics*. NCHRP Synthesis 291, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. ,2000.
- [10] Crisman B., Marchionna A., Roberti R. - *Fattori stradali da cui dipende l'aderenza*- XXIV Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Caratteristiche Superficiali 2000-2003, Saint Vincent-Aosta, Giugno 2002.
- [11] Canale S., Leonardi S., Nicosia F. - *Analisi critica del fenomeno dell'aderenza in campo stradale e ferroviario* - Università degli studi di Catania , Istituto Strade Ferrovie Aeroporti , Catania, 1996.

- [12] Minnella A.I. – *Analisi della tessitura del piano viabile* – Tesi di Dottorato , Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Palermo, Dicembre 2001.
- [13] Mohammad Alauddin Ahammed - *Safe, Quiet and Durable Pavement Surfaces* - University of Waterloo, Electronic Theses and Dissertations , 2009.
- [14] DO Minh-Tan - *Relationship between microtexture and skid resistance* - Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Aprile - Maggio - Giugno 2005.
- [15] Domenichini L., La Torre F. *Interazione veicolo-strada* - Capitolo 7, tratto da « Ricostruzione della dinamica degli incidenti stradali - L'ambito giuridico, la strada, il conducente e il veicolo », a cura di Vangi D., Rivano V., 2008.
- [16] Progetto Leopoldo - *Sicurezza e compatibilità ambientale nella viabilità ordinaria - Predisposizione delle linee guida per la progettazione ed il controllo delle pavimentazioni stradali per la viabilità ordinaria - Stato dell'arte*, Rapporto 1.0 , 2007.
- [17] Baglio, A. e Madia, M. *Indagine numerica sul fenomeno dell'attrito per materiali elastomerici mediante simulazione dinamica agli elementi finiti*. Tesi di laurea, Politecnico di Milano (A. A. 2001-2002).
- [18] Nicolosi V. - *Slides di Meccanica della locomozione* - Corso di Progetto di Strade, Ferrovie ed Aeroporti, Università degli studi di Roma Tor Vergata.
- [19] Gruppo di Ricerca in Didattica della Fisica - *Breve storia delle ricerche e delle teorie sull'attrito* - Progetto PRIN F21: Percorsi di formazione in Fisica per il 21° secolo, Università di Pavia, 2004
- [20] Besson U., Borghi L., De Ambrosis A., Mascheretti P. - *How to teach friction: Experiments and models* - A. Volta Department of Physics, University of Pavia - Agosto 2007.
- [21] Amontons G. - *De la résistance causée dans les machines* - Mémoires de l'Académie Royale A, 19/12/1699, ripubblicato in Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1732, pp.206-227, 1699
- [22] Desaguliers J.T. *Some Experiments concerning the Cohesion of Lead* - Philosophical Transactions of Royal Society, 33, 345-347, 1724.
- [23] Vince S. *The Motion of Bodies affected by Friction* - Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 165-189, 1785.
- [24] Euler L. - *Histoire de l'Académie Royale à Berlin* - IV, 313, 1750.

- [25] Coulomb C.A. - *Théories des Machines Simples, en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages* - Mémoire de Mathématique et de Physique de l'Académie Royale, X, Paris, p. 161-342. (1785) Nuova edizione: Paris, Bachelier, 1821
- [26] Persson Bo N.J. - *Sliding Friction. Physical principles and applications* - Berlin, Springer-Verlag, 1998.
- [27] Holm R. Gerbers H. - *Electric Contact* - Stockholm, Sweden, 1946.
- [28] Bowden F.P. & Tabor D. - *The Friction and Lubrication of Solids* - Part I. Clarendon Press, Oxford, UK, 1950, reprinted with corrections in 1954.
- [29] Bowden, F.P. and Tabor, D. *The area of contact between stationary and between moving surfaces*, Proc. R. Soc. Lond. A169 391-413, 1939.
- [30] Muser M.H., Wenning L. & Robbins M.O - *Simple Microscopic Theory of Amontons's Laws for Static Friction* - Physical Review Letters, 86 (7), pp. 1295-1298, 2001.
- [31] Peters R.D. - *Friction at mesoscale* - Contemporary Physics - p.475-490, 2004.
- [32] Morin A. - *Nouvelles expériences sur le frottement faites à Metz en 1833* - Paris, 1835.
- [33] Morin A.- *Expériences sur le tirage des voitures; Second Mémoire sur le tirage des voitures; Supplément à un précédent Mémoire sur le tirage des voitures; Note sur la résistance au roulement des corps les uns sur les autres, et sur la réaction élastique des corps qui se compriment réciproquement* - Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1838, VII, 835-837; 1840, X, 101-104; 1841, XII, 211-218, XIII, 1022-1023.
- [34] Dupuit A.J.E.J. *Résumé du Mémoire sur le tirage des voitures et sur le frottement de seconde espèce; Second supplément au Mémoire sur le tirage des voitures et sur le frottement de seconde espèce; Réponse au Mémoire de M. Morin le tirage des voitures. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1839, IX, 698-700; 1840, X, 194196; 1841, XII, 482-486.*
- [35] Reynolds O. *On Rolling-Friction* - Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 166, 155-174 1876.
- [36] Reynolds O. *On the Theory of Lubrication and its Applications to Mr. Beauchamp Tower's Experiments* - Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1886.
- [37] Hertz H. *Über die Berührung fester elastische Körper* - Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, 92, pp. 156-171, 1882. English translation in: Jones & Schott (eds) *Miscellaneous Papers by H. Hertz*, MacMillan, London, 1896.

- [38] Vangi D., Rivano V. - *Le forze agenti sul veicolo* - Capitolo 2, tratto da « Ricostruzione della dinamica degli incidenti stradali - L'ambito giuridico, la strada, il conducente e il veicolo », 2, 2008.
- [39] Joel Foucard - *Role of tires in the skid resistance phenomenon* - Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Aprile - Maggio - Giugno 2005.
- [40]. Alessandro Reali - *Influenza dei tamponi di fine corsa sul moto di rollio di una vettura errare Challenge* - Tesi di Laurea, Università degli Studi di Perugia, Facoltà di Ingegneria, 2003-2004.
- [41] Hamlat S. - *Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles* - Thèse De Doctorat, École Doctorale Mécanique, Thermique et génie civil, Marzo 2007.
- [42] Fuller, K. N. G., and D. Tabor. *The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids* - Proc. R. Soc. London, Ser. A, 345327-342, 1975.
- [43] Société de Technologie Michelin - *Le pneu l'adhérence*, Gennaio 2001.
- [44] Albano P. - *Il Pneumatico* - Integrazione al corso di "Tecnologia della gomma", Politecnico di Torino, Marzo 2009.
- [45] Moore D.F. - *A theory of viscous hydroplaning* - International Journal of Mechanical Science - Vol 9 pp. 797-810, 1967.
- [46] Taylor C. M. , Dowson D., Godet M. - *Vehicle Tribology*- Proceedings of the 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology Held at the Institute of Tribology, Leeds University, Leeds Uk, 1991.
- [47] Gallaway B.M. et al. - *Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning* - Report n° FHWA-RD-79-31, Washington DC, 1979.
- [48] Agrawal S.K., Meyer W.E., Henry J.J. - *Measurement of hydroplaning potential* - Final Report n° FHWA-PA-72-6, Pennsylvania Department of Transportation Institute, 1977.
- [49] Horne W.B., Yager T.J., Ivey D.L. - *Recent studies to investigate effects of tire footprint aspect ratio on dynamic hydroplaning speed* - ASTM STP 929, Philadelphia, 1986.
- [50] Gengenbahr W. - *Experimental Investigation of tire on wet pavements* - Automobiltechnische Zeitschrift, vol.70, 1968.
- [51] Roe P., Webster D. & West G., *The relation between the surface texture of roads and accidents*, research report 296, Transport Road Research Laboratory, Crowthorne, 1991.
- [52] Gothie M. - *Influence de l'adhérence sur la sécurité routière* - Bulletin de liaison des

laboratories des ponts et chaussées, no.185, pp 27-32, 1993.

[53] Mayora, P. and Pina J. - *Effects of Pavement friction improvement on crash rates on Spanish two lane rural roads* - Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2008.

[54] Cairney P. *Macrottexture and crash risk – Some recent findings from Australia and their implications* - 22nd ARRB Conference - Research into Practice, Canberra, Australia, 2006

[55] Pulugurtha S. S., Kusam P. R., and Patel K. - *Relationship between Pavement Macrottexture and Crash Incidences on North Carolina Roads* - Final Report 2007-12. North Carolina Department of Transportation. Raleigh, NC., 2008.

[56] Viner, H., Sinhal R., and Parry, T. - *Review of uk skid resistance policy* - Paper prepared for 5th International Symposium on pavement surface characteristics road and airports, Toronto, Ontario, Canada, 2004.

[57] Davies, R., P. Cenek, and R. J. Henderson. *The effect of skid resistance and texture on crash risk* - International Conference for surface friction for roads and runways, Christchurch, New Zealand, May 2005.

[58] Wallman, C.G. and H. Astrom. - *Friction Measurement Methods and the Correlation Between Road Friction and Traffic Safety* - Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI Meddelande 911A, Linköping, Sweden, 2001.

[59] Caliendo C., Parisi A., Villani P.- *Analisi dell'incidentalità sulle strade a carreggiate separate in relazione alle caratteristiche dell'infrastruttura e dell'intensità di pioggia* - XIII Convegno Nazionale S.I.I.V. – Padova – 30/31 Ottobre 2003.

[60] Brodie C. - *Risk ranking of curves on New Zealand State Highways for skid resistance monitoring and treatment* - International Conference for surface friction for roads and runways, Christchurch, New Zealand, May 2005

[61] D'Amico F. - *La programmazione degli interventi manutentori: l'analisi del degrado del piano stradale per la sicurezza d'esercizio* - Tesi di Dottorato n° 21, Collana delle tesi di Dottorato di Ricerca In Scienze dell'Ingegneria Civile, Università degli Studi Roma Tre, Febbraio 2009.

[62] Hall J.W., Smith K.L., Titus-Glover L., Wambold J.C., Yager T.J., Rado Z. - *Guide for Pavement Friction* - Final Report for NCHRP Project 01-43, February 2009.

- [63] Farber, E., M.S. Janoff, S. Cristinzio, J.G. Blubaugh, W. Reisener, and W. Dunning. - *Determining Pavement Skid-Resistance Requirements at Intersections and Braking Sites* - NCHRP Report No. 154, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C
- [64] Page, B.G. and L.F. Butas - *Evaluation of Friction Requirements for California State Highways in Terms of Highway Geometrics* - Report No. FHWA/CA/TL 86/01, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C., 1986.
- [65] AASHTO - *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book)*, - pp. 259-269. (2001),
- [66] Manganaro A. - *Definizione di una metodologia sperimentale per la valutazione della percezione del rischio e del comportamento di guida degli utenti stradali negli elementi curvilinei dei tracciati stradali in condizioni operative differenziate* - Università degli Studi di Trieste, Anno Accademico 2007/2008.
- [67] Bonneson J.A., *A kinematic approach to horizontal curve transition design* - Proceedings of the 79th Annual Meeting Transportation Research Board, Transportation Research Board, November 7, Washington D.C., 1999.
- [68] Fitzpatrick K., Shamburger B., Fambro D., *Design speed, operating speed, and posted speed survey*, Transportation Research Record no. 1523, Transportation Research Board, 1996.
- [69] Echaveguren, T., Bustos, M., de Solminihac, H., - *A Method To Evaluate Side Friction In Horizontal Curves, Using Supply-Demand Concepts* - 6th International Conference on Managing Pavements, 2004.
- [70] www.stradelandia.it/ - *Sicurezza attiva in campo stradale*.
- [71] La Franca L. - *Corso di tecnica dei trasporti - Appunti di meccanica della locomozione* - Università di Palermo, 2007-2007.
- [72] www.enciclopediadelautomobile.it
- [73] Huang Y.H. - *Pavement Analysis and design* - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [74] Marshek K. M., Saraf C. L., Chen H. H., Connell R. B., Hudson W. R. - *Experimental investigation of truck tire inflation pressure on pavement-tire contact area and pressure distribution* - The University of Texas at Austin, Agosto 1985.

- [75] Himeno K., Ikeda T. - *Distribution of tire contact pressure of vehicles and its influence on pavement distress* - Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Volume I, Seattle, Agosto 1997.
- [76] De Beer M., Fisher C., Kannemeyer L. - Tyre-pavement interface contact stress on flexible pavement-quo vadis? - 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), Settembre 2004.
- [77] Diringer, K. T. and Barros. R. T. - *Predicting the skid resistance of Bituminous pavements through accelerated laboratory testing of aggregates* - Symposium: Surface Characteristics of Roadways, ASTM, Philadelphia, pp. 61–76, 1990.
- [78] Crisman B., Marchionna A., Roberti R. - *Fattori stradali da cui dipende l'aderenza* - XXIV Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Caratteristiche Superficiali 2000-2003, Saint Vincent-Aosta, Giugno 2002.
- [79] Babkov, V. Highway Engineering. MIR Publishers, Moscow, 1985.
- [80] Roe P.G., Parry A.R., Viner H.E. - *High and Low speed Skidding Resistance: The influence of texture depth* - TRL Report 367.
- [81] Dahir, S. A - *Review of Aggregate Selection Criteria for Improved Wear Resistance and Skid Resistance of Bituminous Surfaces* - Journal of Testing and Evaluation, Vol. 7, 1979, pp. 245-253.
- [82] Forster S. - *Pavement Microtexture and Its Relation to Skid Resistance* - Transportation Research Record 1215, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 151-164, 1989.
- [83] Kamel N., and Musgrove G. R. - *Design and Performance of Bituminous Mixes in Ontario* - RTAC Forum, Vol. 5, Issue 3, 1981, pp. 53-64.
- [84] Tourenq C., Fourmaintraux D. - *Propriétés des granulats et glissance routière* - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - n. 51 – Mars/Avril - 1971.
- [85] Dupont P., Tourenq C. - *Incidence des granulats sur l'adhérence des chaussées bitumineuses* - Revue Générale des Routes et des Aéroports - N. 758 - Janvier - 1998.
- [86] Dahir S.H. - *A Review of Aggregate Selection Criteria for Improved Wear Resistance and Skid Resistance of Bituminous Surfaces* – Journal of Testing and Evaluation – JTEVA – Vol. 7 – No. 5, pp. 245-253, Sept. 1979
- [87] Domenichini L., Remedios G.- *Il rischio di aquaplaning in zone di transizione stradali* - Atti del XXII Convegno Nazionale Stradale AIPCR - Perugia - 1994.

- [88] Sherard, T.D. - *Suppression of Vehicle Splash and Spray*. - Society of Automotive Engineers Paper No. 730718, 1973.
- [89] Kirsch, J.W. - *Informal Comments on the Road Spray Problem* - System, Science, and Software, Document No. SSR-IR-72-1352. La Jolla, CC, 1972.
- [90] F. G. Pratico', A. Moro, - *Sulla relazione tra porosità e permeabilità per conglomerati bituminosi porosi: Modellazione e sperimentazione* - XXV Convegno Nazionale Stradale, Associazione mondiale della strada, AIPCR, Napoli, 4-7 Ottobre 2006.
- [91] Pilkington G.B. II - *Splash and Spray* - Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 528-541, 1990.
- [92] Resendez Y.A., Sandberg U., Rasmussen R.O. Garber R. - *Characterizing the splash and spray potential of pavements* - US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2007.
- [93] OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) - *Night Noise guidelines for Europe* - Geneva, 2009
- [94] Dondi G., Simone A. - *Soluzioni tecniche innovative per la mitigazione del rumore e delle vibrazioni da traffico stradale* - Atti della Conferenza Nazionale sulla Politica Energetica in Italia, Università di Bologna, 18-19 aprile 2005.
- [95] AIPCR, Associazione Mondiale della strada Comitato Tecnico C4.2 Interazione Strada/Veicolo- *Interazione veicolo-strada: guida alla valutazione e pianificazione degli interventi di risanamento acustico* - XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli 4 - 7 Ottobre 2006.
- [96] Praticò F.G., Bellucci P., Celauro C. - *Rumore da traffico: elementi per la valutazione e pianificazione del risanamento acustico* - XVII Convegno Nazionale SIIV 2008, Enna 2008
- [97] Rasmussen R.O., Bernhard Robert J., Sandberg U., Mun Eric P. - *The Little Book of Quieter Pavements* - U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration - The Transtec Group, Luglio 2007.
- [98] Fabrizi A. - *Analisi computazionale dell'aeroacustica di un pneumatico in rotolamento* - Tesi di dottorato, Università Degli Studi Di Roma "Tor Vergata", Facoltà di Ingegneria, Dottorato di ricerca in Ingegneria dell'energia e ambiente, XXI CICLO - A.A. 2009/2010.
- [99] Legeay V., *Macrotexture and low frequency tyre/road noise correlation*, In Introc, 1990.

- [100] Sandberg U.- *A hypothesis concerning the influence of pavement stiffness on external tire/road noise* - National road and research institute, 1980
- [101] AIPCR, Associazione mondiale della strada, COMITATO TECNICO D2b - Pavimentazioni flessibili e semi-rigide - *Attenuazione del rumore stradale. Interventi di mitigazione sonora alla sorgente* - XXVI Convegno nazionale stradale, Roma 27 - 30 Ottobre 2010.
- [102] AIPCR, Associazione mondiale della strada, COMITATO TECNICO C4.2 - "Interazione strada/veicolo" - *Monitoraggio delle caratteristiche e delle azioni del traffico veicolare per il progetto e la manutenzione delle pavimentazioni stradali* - XXV Convegno nazionale stradale – Ottobre 2006.
- [103] Bendtsen H.- *Rolling resistance, fuel consumption: a literature review* - Danish Road Institute Technical note 23, 2004
- [104] Sandberg U., Jerzy E. A., - *Noise emission, Friction and Rolling Resistance of car Tires* – Summary of an experimental study. Paper from NOISECON 2000, Newport Beach, California, December 2000.
- [105] Sandberg U. - *Road Macro- and Megatexture Influence on Fuel Consumption* -Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031, W. E. Mayer and J. Reichert, Eds., American Society for testing and Materials, Philadelphia, pp. 460-479, 1990.
- [106] Descornet, G. - *Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance. Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies* - ASTM STP 1031, American Society for testing and Materials, Philadelphia, pp. 401-415, 1990.
- [107] Zaabar I. , Chatti K. - *Calibration of HDM4 models for estimating the effect of pavement roughness on fuel consumption for US conditions* - Transportation Research Board Annual Meeting Washington, DC, 2010
- [108] Zaabar I. , Chatti K. - *A field investigation of the effect of pavement type on fuel consumption* - 1st Congress of the Transportation and Development Institute of ASCE; Chicago, IL; 13 March 2011 through 16 March 2011.
- [109] Vaiana R. - *La caratterizzazione delle performance del piano di rotolamento nelle pavimentazioni stradali* - Master di II Livello - "Road Quality Management " Enna 26-29 Marzo 2008.

[110] Chatti K. - *Effect of Pavement Conditions on Rolling Resistance and Fuel Consumption* - Pavement Life Cycle Assessment Workshop University of California, Davis, California May 5-7, 2010.

[111] Bennet C.R. – *Revision to HDM – 4 Parts Consumption Model Parameters* - Highway and Traffic consultants LTD, Giugno 1998.