

CAPITOLO 12

LE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

1. INTRODUZIONE

La pavimentazione stradale è una struttura che deve garantire nel tempo una superficie carrabile regolare, confortevole e sicura per tutti i veicoli. Recentemente sono state previste anche delle valutazioni di altre funzioni della pavimentazione legate all'ambiente come la generazione del rumore di rotolamento e delle vibrazioni indotte dal traffico e all'inquinamento atmosferico oltre al costo del trasporto. Per ottimizzare tali funzioni la pavimentazione deve presentare una superficie con determinate qualità e possedere anche una capacità strutturale adatta a resistere ai forti carichi ripetuti del traffico stradale e dell'ambiente.

La figura 12.1 sintetizza efficacemente come dall'interazione tra il pneumatico di un veicolo e la superficie stradale, le cui condizioni possono modificarsi nel tempo, nascono tutta una serie di fenomeni fisici che possono incidere sulla sicurezza, sul comfort, sull'ambiente e sul costo. In particolare, per quanto riguarda la sicurezza, le condizioni della superficie influisce sull'aderenza, sulle vibrazioni e il rumore indotti all'interno del veicolo, sull'abbagliamento dei guidatori, eccetera]. Per quanto attiene invece all'ambiente e ai costi di trasporto, risultano dipendere dal modo in cui è stata realizzata la superficie stradale, i rumori e le vibrazioni esterni al veicolo (problema dell'inquinamento vibratorio e acustico), le emissioni gassose in atmosfera, il consumo di carburante (costo anche ambientale), il costo dei pneumatici.

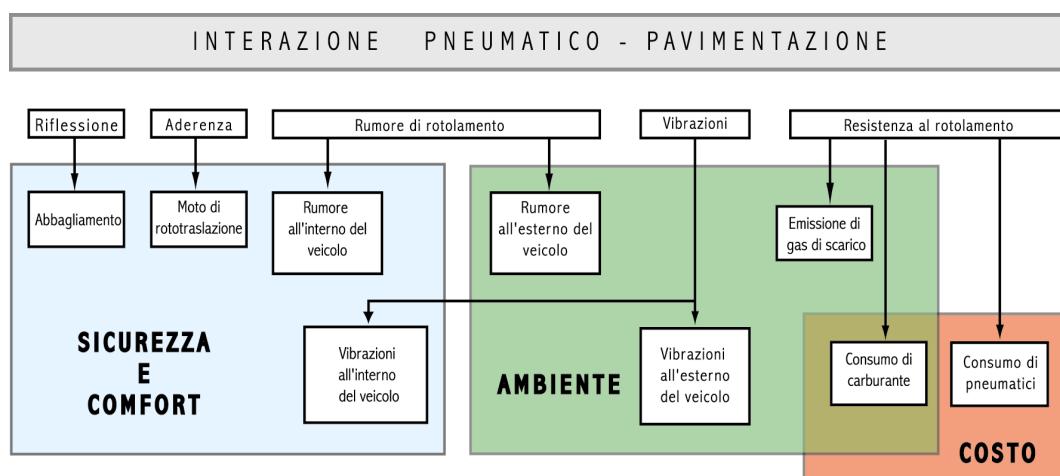


Figura 12.1. Influenza delle condizioni superficiali del piano viabile .

La caratteristica peculiare delle superfici stradali che, unitamente ad altri fattori, governa il complesso fenomeno fisico dell'interazione pneumatico pavimentazione è la tessitura. La norma ISO 13473-1 definisce tessitura di una pavimentazione la deviazione della superficie reale da un piano di riferimento.

Benché allo stato attuale delle ricerche non risulti sempre immediato stabilire quanto e come la superficie influenzi ciascuno dei citati fattori, pur tuttavia, specie per ciò che riguarda le caratteristiche di aderenza e quelle vibro-acustiche, è possibile asserire che il controllo delle variabili di tessitura contribuisca efficacemente a governare tali obiettivi prioritari.

L'analisi dei parametri di tessitura, inoltre, contribuisce in forma determinante a identificare, durante i tipici processi decisionali propri delle attività di manutenzione programmata, le tipologie di intervento più appropriate al fine di risolvere i problemi e le insufficienze messe in luce da tali parametri.

La norma C.N.R. B.U. n°125/88 individua tra le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni la regolarità, la rugosità e la rumorosità e introduce il concetto di portanza come caratteristica strutturale. Nella tabella sono riassunte, anche le principali degradazioni cui vanno soggette le pavimentazioni stradali, suddivise per tipo di funzione che vanno a modificare

Sebbene la nostra attenzione cada principalmente sulle prime ed in particolar modo su quelle inerenti l'aderenza, tuttavia va osservato che una mancanza di regolarità superficiale è spesso legata a carenze strutturali della sovrastruttura.

Una scarsa portanza degli strati della pavimentazione o del sottofondo può infatti produrre ondulazioni longitudinali o trasversali e/o rotture dello strato superficiale che generano pericolo, sia perché riducono il comfort di guida e quindi inducono affaticamento nel conducente e conseguente alterazione dei suoi riflessi, sia perché producono effetti dinamici che possono ridurre il peso aderente.

La presenza sul piano viabile di diffuse ondulazioni, di ormaie e di irregolarità localizzate è causa di situazioni pericolose per la guida del veicolo non solo per le improvvise accelerazioni verticali cui questo è soggetto, nonostante l'attenuazione dovuta al sistema sospensioni-pneumatici, ma anche in virtù degli eventuali ristagni d'acqua, in grado di causare brusche diminuzioni dell'aderenza impegnabile e di provocare, così, l'innescarsi di insidiosi episodi di aquaplaning, con le tragiche conseguenze a cui questo pericoloso fenomeno può spesso portare.

CARATTERISTICHE DELLE PAVIMENTAZIONI	PRINCIPALI DEGRADAZIONI
A - Caratteristiche superficiali	C - Degradazioni superficiali
<p>1. REGOLARITÀ = rispetto della quota dei piani di progetto</p> <p>2. RUGOSITÀ = attitudine a fornire in ogni condizione (atmosferica e di guida) adeguata aderenza al contatto pneumatico-strada</p> <p>3. RUMOROSITÀ = tipo di rumore generato dal passaggio del veicolo (prescindendo da quello del motore) - rumore da rotolamento</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Ondulazioni longitudinali -Ondulazioni trasversali -Deformazioni trasversali (ormaie) -Depressioni localizzate (buche) -Avvallamenti -Alterazione delle pendenze trasversali causanti lame di acque, ristagni -Fessurazioni e buche <p>-Diminuzione delle asperità (micro e/o macrorugosità) che contribuiscono al formarsi della aderenza.</p> <p>-Variazione del tipo ed intensità del rumore (si considera degradazione solo se il tipo di rumore ha una funzione o una limitazione specifica) (*)</p>
B - Caratteristiche strutturali	D - Degradazioni strutturali
<p>PORTANZA = attitudine a sopportare i carichi stradali e la loro ripartizione nel tempo.</p> <p>La portanza è collegata:</p> <ul style="list-style-type: none"> -alla deformabilità visco-plasto-elastica dei diversi strati; -alla sequenza delle rigidezze del corpo della struttura ai modi di accoppiamento tra strato e strato 	<p>Negli strati non legati:</p> <ul style="list-style-type: none"> -perdita di elementi lapidei e/o compattezza -palsticizzazione -formazione di fino sotto traffico <p>Negli strati legati:</p> <ul style="list-style-type: none"> -accumulo di deformazioni non elastiche -fessurazione a diversi stadi -risalita di materiali fini o di legante <p>Nella struttura:</p> <ul style="list-style-type: none"> -alterazione della rigidezza dei singoli strati e delle forze di accoppiamento tra i singoli strati con conseguente rottura per fatica ed alterazione anche per le caratteristiche superficiali.
<p>Nota:</p> <p>(*) La degradazione della caratteristica di rumorosità può essere di due tipi:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Nel caso di strade extraurbane o in zone non tutelate, il forte rumore da rotolamento può essere richiesto dal progetto (ad esempio per attirare l'attenzione dei guidatori su di un pericolo o una segnaletica); in questo caso è degradazione la perdita di rumorosità. 2. In ambienti tutelati dove le pavimentazioni non devono essere rumorose è degradazione l'aumento del rumore di rotolamento. <p>Le caratteristiche superficiali devono in questi casi essere adeguate in modo da contenere il rumore di rotolamento senza influenzare l'aderenza del manto.</p>	

Tabella 12.1 – Caratteristiche delle pavimentazioni e principali degradazioni.
(CNR - B.U. n°125 / 88)

2. DEFINIZIONE DELLA TESSITURA DELLE PAVIMENTAZIONI

Esistono numerose definizioni per la tessitura superficiale del piano viabile, tra di esse quella con maggior credito è quella riportata nella Norma ISO 13473-1 e nella bozza di Norma ISO 13473-2, nonché nei diversi rapporti AIPCR TC1 Internazionale (cfr. rapporto Montreal 1995), dove si definisce la tessitura di una pavimentazione come la deviazione della superficie reale da un ideale piano di riferimento.

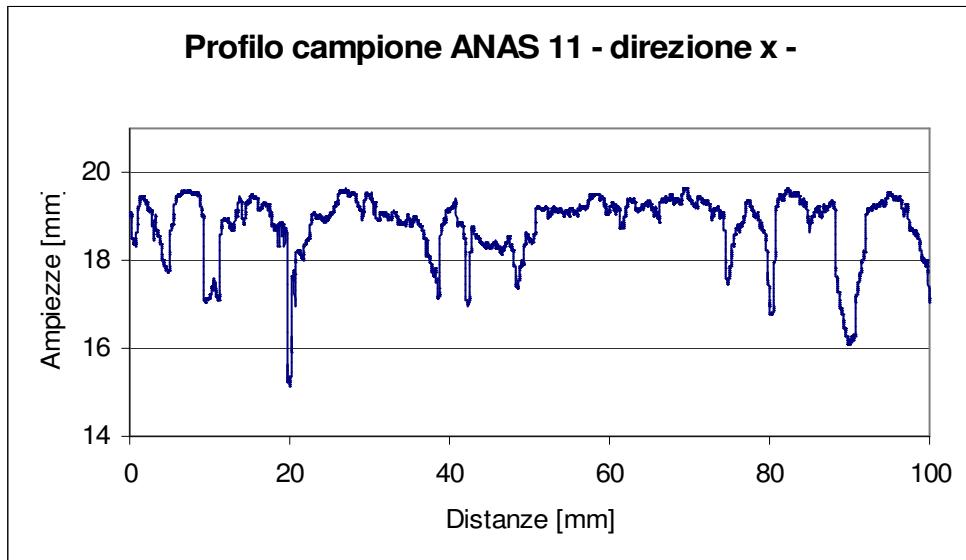


Figura 12.2 Profilo lungo la direzione x di una superficie stradale

Immaginando di sezionare la pavimentazione con un piano verticale, si può pensare al profilo (Fig. 12.2) così ottenuto come fosse costituito da tante onde sinusoidali sovrapposte, vedi figura 12.3, ciascuna di diversa lunghezza d'onda λ e ampiezza h ; in tal modo risulta più agevole evidenziare gli effetti legati alle singole classi di tessitura.

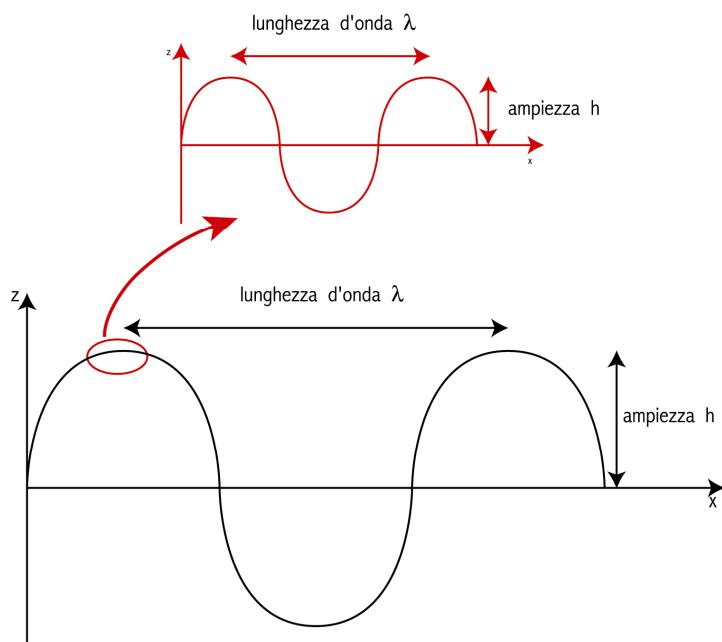


Figura 12.3 Rappresentazione delle classi di tessitura attraverso diverse curve sinusoidali

Rappresentando le varie classi di tessitura attraverso un grafico avente in ascissa le lunghezze d'onda e in ordinata le ampiezze h dall'ideale piano di riferimento si ha dunque la seguente figura 12.4 (PIARC). In ordine di grandezza si ha micro, macro e mega tessitura, irregolarità a onda corta, media e lunga.

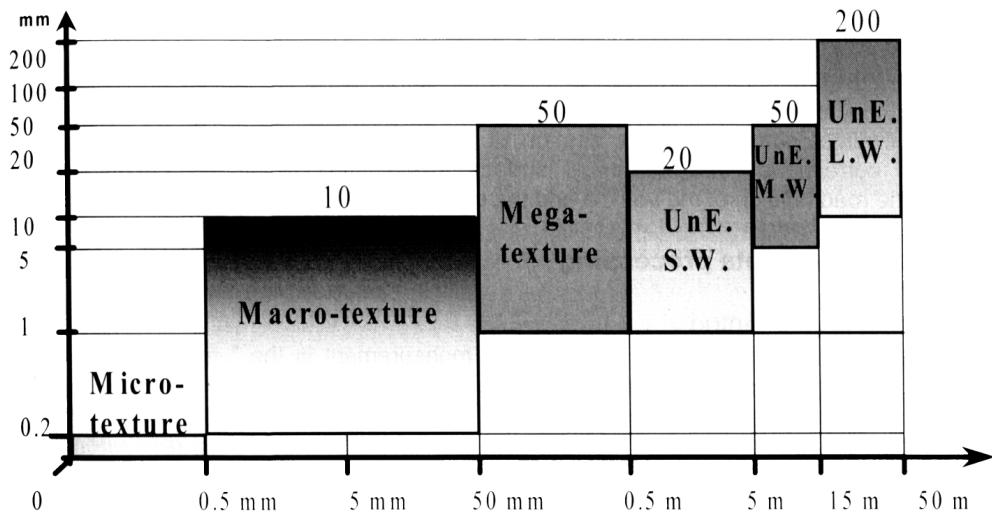


Figura 12.4 Rappresentazione dei vari livelli di tessitura (PIARC).

E' opinione ormai consolidata tra gli studiosi del settore (ad esempio AIPCR 1987) che la microtessitura e la macrotessitura influiscano prevalentemente sull'aderenza sviluppata all'interfaccia pneumatico-superficie stradale e sul rumore mentre le lunghezze d'onda caratteristiche delle irregolarità condizionino principalmente l'interazione dinamica veicolo-pavimentazione e quindi, nella fattispecie, il comfort di marcia e i sovraccarichi dinamici trasmessi alla sovrastruttura; questi ultimi sono inoltre i principali responsabili delle vibrazioni generate dal traffico veicolare negli edifici.

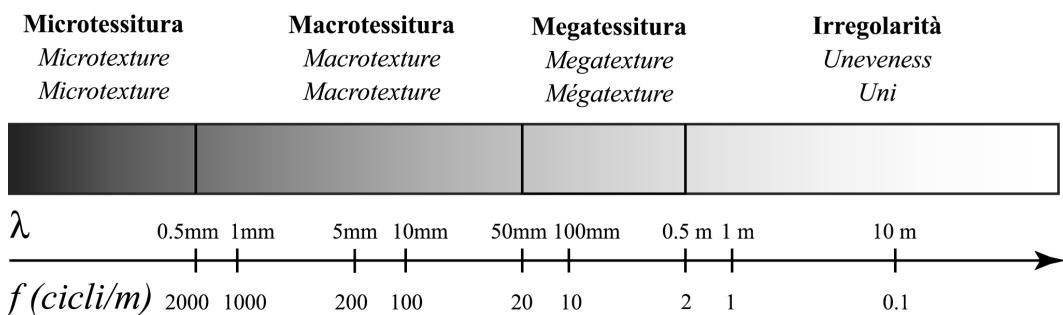


Figura 12.5 Classi di tessitura in funzione della lunghezza d'onda e della frequenza spaziale.

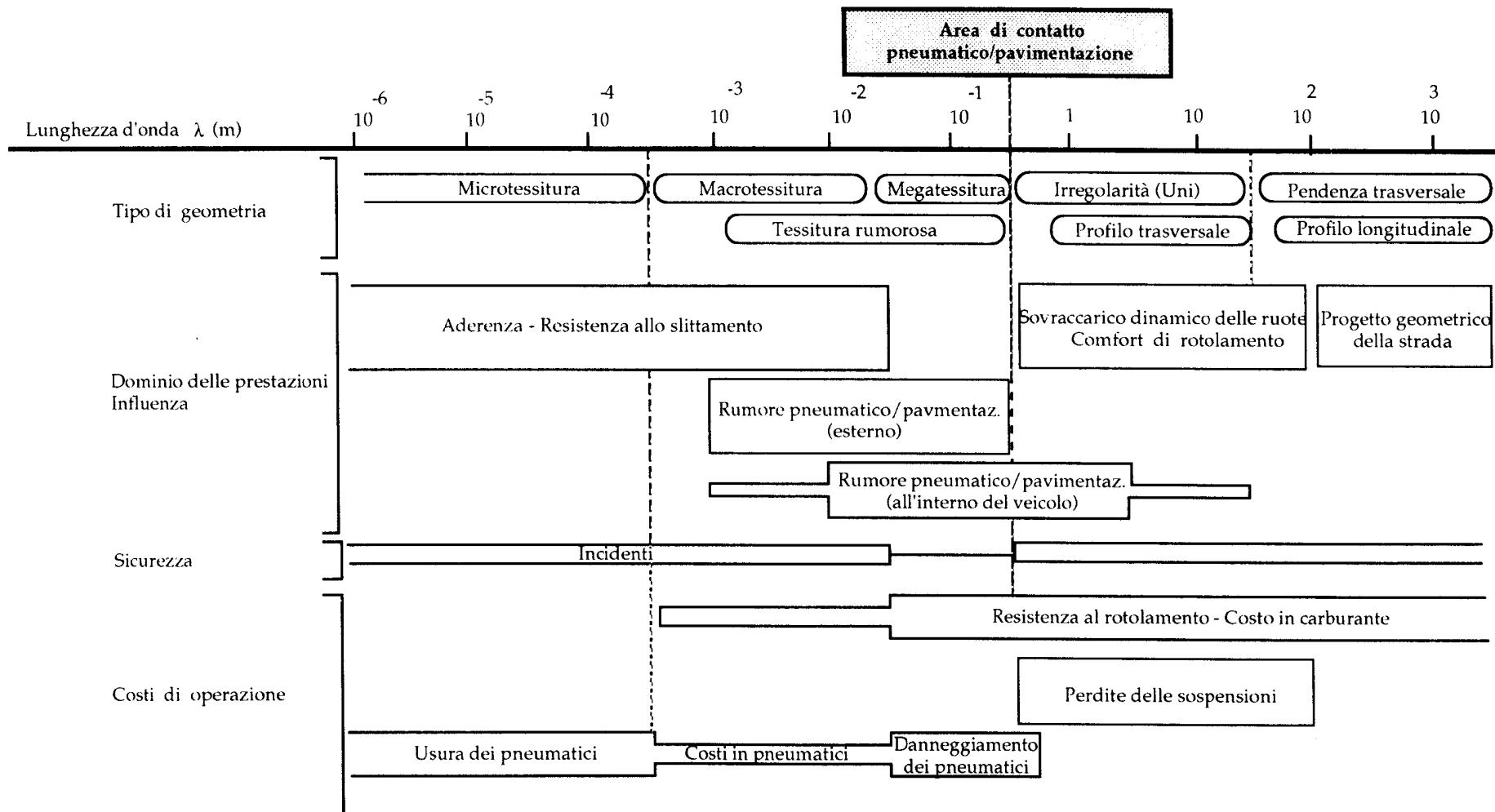


Figura 12.6 Spettro delle lunghezze d'onda delle superfici stradali e rispettive caratteristiche

Come evidenziato anche nella tabella 8.6 e come già spiegato in precedenza, le classi di tessitura che maggiormente influenzano l'aderenza sono la microtessitura, la macrotessitura (fig. 12.7) e in minor misura la megatessitura. Queste verranno quindi analizzate con maggior dettaglio già dai successivi paragrafi.

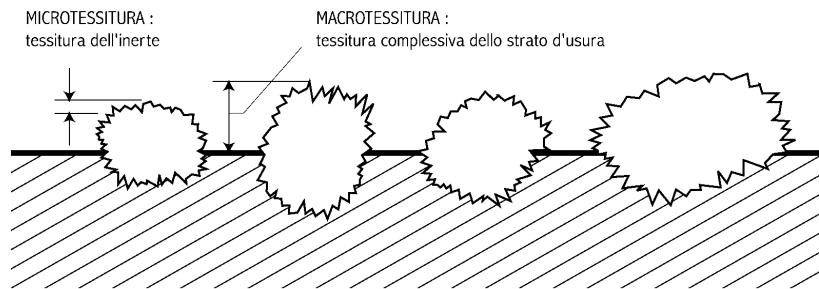


Figura 12.7 *Micro e macro tessitura delle pavimentazioni stradali.*

3. MICROTESSITURA

La microtessitura, a cui corrispondono lunghezze d'onda comprese tra $1 \mu\text{m}$ e 0.5 mm con ampiezze verticali che vanno da $1 \mu\text{m}$ fino a 0.2 mm , è legata alla scabrezza superficiale degli inerti sporgenti in superficie, quindi alla natura petrografica degli stessi, agli spigoli di tali inerti e, per alcune miscele come il calcestruzzo e il conglomerato bituminoso, anche alla rugosità della malta e del legante. Le sue dimensioni, perciò, partono da un ordine di grandezza pari a quello dei cristalli degli aggregati di impiego comune.

Il ruolo principale esercitato da questa caratteristica di tessitura sulle prestazioni di aderenza (specie alle basse velocità di marcia, come si vedrà meglio in seguito) emerge nitidamente in condizioni di pavimentazione bagnata e consiste nel penetrare la gomma del pneumatico producendo una pressione locale di contatto molto elevata, in modo da assicurare, così, la rottura del velo idrico che si interpone tra pneumatico e strada fino ad eliminare completamente l'acqua, ottenendo un contatto asciutto. La microtessitura è dunque una proprietà intrinseca del piano viabile ed è difficilmente compensabile dalle proprietà del battistrada.

In prima istanza è possibile asserire che mentre la macrotessitura determina gli aspetti quantitativi del contatto tra gomma e inerti, la microtessitura influenza soprattutto sulla qualità dello stesso.

4. MACROTESSITURA

La macrotessitura, cui corrispondono lunghezze d'onda comprese tra 0.5 e 50 mm con ampiezze verticali tra 0.2 e 10 mm , attiene soprattutto alle asperità intergranulari, quindi dipende essenzialmente dalla composizione della miscela e dalle condizioni di posa in opera; la persistenza nel tempo di questa classe di tessitura è legata alla natura mineralogica e alla struttura cristallina della roccia di provenienza degli inerti.

Essa si rivela una caratteristica indispensabile per la sicurezza alle alte velocità e su manto bagnato; consente, infatti, il drenaggio delle acque superficiali ottimizzando il contatto pneumatico-pavimentazione.

Fra le asperità della macrotessitura si forma, infatti, una rete di micro canali, più o meno comunicanti, avente una duplice funzione: da un lato fungere da serbatoio per l'acqua piovana e quindi ridurre lo spessore di velo idrico sulla superficie stradale, dall'altro fornire una possibile via di drenaggio sia per il deflusso superficiale libero che per quello forzato, intendendo con il primo termine lo scorrere naturale dell'acqua sulla superficie stradale in caso di pioggia, con il secondo l'espulsione a pressione dell'acqua posta sotto l'area di contatto fra battistrada e piano viabile.

Un buon drenaggio determina una riduzione di spruzzi e nubi d'acqua (splash and spray) intorno ai pneumatici e il miglioramento delle qualità ottiche dei manti, riducendo il fenomeno della riflessione.

A questa caratteristica di tessitura sono associati anche altri fenomeni, quali il rumore di rotolamento a bassa frequenza e le resistenze al rotolamento, quindi, il consumo energetico.

Nella figura 8.8 è riportata la schematizzazione delle quattro principali forme in cui si può presentare la finitura di una pavimentazione e la terminologia adottata dalla normativa CNR per descriverla.

Le superfici stradali devono possedere sia una macrorugosità (o macrotessitura) sufficientemente *grossa* che una microrugosità (microtessitura) *aspra-ruvida* per garantire un adeguato livello d'aderenza ai veicoli per ogni velocità.

Mentre una buona microrugosità è comunque sempre necessaria, tuttavia da sola non è sufficiente ad assicurare un grado di sicurezza accettabile per un traffico di tipo veloce. Per questo motivo è indispensabile provvedere a un adeguata macrotessitura in relazione agli elevati valori di velocità che si registrano su alcune tipologie di strade.

SUPERFICIE		MACRO RUGOSITÀ	MICRO RUGOSITÀ
A		grossa	aspra-ruvida
B		grossa	levigata
C		fina	aspra-ruvida
D		fina	levigata
		0 1 2 3 4 5cm	

Figura 12.8 *Classificazione della micro e macro tessitura*

5. MEGATESSITURA

La megatessitura, cui afferiscono dimensioni caratteristiche nel piano dello stesso ordine di grandezza dell'area di contatto pneumatico-pavimentazione (range da 50 a 500 mm orizzontalmente, da 1 a 50 mm verticalmente), rappresenta il dominio intermedio fra la macrotessitura e le irregolarità superficiali. Si tratta di una caratteristica legata principalmente all'eterogeneità (dimensionale, di resistenza all'abrasione ecc.) degli aggregati, ma altrettanto dipendente dalle modalità di posa in opera della miscela. La megatessitura può essere infatti generata dalle stesse tecniche di posa: si possono talvolta osservare, sulla superficie stradale realizzata in conglomerato cementizio, delle piccole ondulazioni trasversali o altri tipi di ondulazioni dovute verosimilmente alle vibrazioni della macchina di posa, all'azione della barra lischiatrice o ad altri fattori e circostanze particolari. E' noto come questa caratteristica della tessitura influenzi notevolmente i fenomeni correlati alle deformazioni della struttura del pneumatico, allo smaltimento delle acque superficiali, al rumore di rotolamento e alle vibrazioni.

6. IRREGOLARITÀ

Per questa classe è più lecito parlare di irregolarità macroscopiche piuttosto che di difetti della tessitura superficiale, essendo descritta da lunghezze d'onda che possono andare dal mezzo metro fino anche ai 50 m. Per tale ragione ha una influenza minore, rispetto le precedenti classi di tessitura, sul fenomeno vero e proprio dell'aderenza; nondimeno è necessario tenerne conto per comprendere come la sua presenza determini quei pericolosi spostamenti verticali che spesso si trasformano in dannose sollecitazioni per la marcia in sicurezza dei veicoli.

Irregolarità di questa grandezza (o *uneveness*), possono infatti portare ad effetti dinamici e a moti parassiti (ad es. amplificazione del moto di rollio o di beccheggio) in grado di diminuire il peso aderente e, in casi estremi, causare la perdita di contatto tra pneumatico e superficie stradale. Poiché, però, tali effetti sono principalmente regolati e "gestiti" dalle sospensioni del veicolo vengono spesso trascurati nei fenomeni di generazione dell'aderenza. Ricordando che la frequenza si ottiene dal rapporto tra la velocità del veicolo e la lunghezza d'onda teorica del profilo stradale conviene esaminare anche i livelli di frequenza ai quali è soggetto il veicolo.

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

Gli intervalli di frequenza da prendere in considerazione sono: da 0.3 a 3 Hz sulla scocca dell'autoveicolo, da 3 a 6 Hz sull'insieme ruota-pavimentazione, valori maggiori di 6 Hz sui pneumatici. Questo approccio, reso possibile dagli studi recenti - che, grazie all'utilizzazione di metodi di misura profilometrici moderni, hanno messo in evidenza il ruolo della mega-tessitura, fino ad allora ignorato – permette di risolvere gli apparenti conflitti tra certe questioni in merito di aderenza ed altre relative invece alla qualità del rotolamento (rumore, vibrazioni, resistenza al rotolamento) che sembravano dover imporre delle specificazioni contraddittorie in materia di macrotessitura.

7. ADERENZA DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Come è noto, il complesso delle azioni e reazioni che si sviluppano tra le ruote di un veicolo in movimento e la superficie stradale, garantiscono il suo avanzamento, la sua stabilità in curva, adeguati spazi di frenatura e il controllo in situazioni impreviste e difficili. La modellazione fisica di tale fenomeno risulta ostica in relazione alle caratteristiche marcatamente non elastiche dei corpi a contatto. Una schematizzazione semplice, ma alquanto efficace, delle condizioni di istantaneo equilibrio della ruota in movimento porta a riconoscere l'esistenza di:

- forze ortogonali al piano di contatto, dette normali, cui si ascrive l'equilibrio verticale del veicolo;
- forze giacenti sul piano di contatto, dette tangenziali, aventi una componente ortogonale ed una parallela alla direzione del moto.

Queste ultime, nel loro complesso, rappresentano le forze di aderenza; ad esse si riconosce la capacità di produrre successivi istantanei regimi di equilibrio fra pneumatico e pavimentazione il cui effetto è la "macroscopica" rototraslazione del primo sull'altra, e quindi consentire l'accelerazione o la decelerazione del veicolo in assenza di slittamenti.

L'entità delle azioni tangenziali non è indipendente da quelle normali, anzi è ormai consolidata l'evidenza che la massima forza tangenziale (F) agente sul pneumatico e parallela al piano viabile sia proporzionale alla forza normale (F_w) attraverso un coefficiente, detto coefficiente di aderenza totale (μ).

$$F = \mu \cdot F_w$$

Siccome il veicolo può essere soggetto a forze che impegnano l'aderenza sia in senso longitudinale (accelerazione e frenatura) che trasversale (percorrenza di una traiettoria curvilinea) al moto del veicolo, usualmente si tende a suddividere il coefficiente di aderenza in due componenti, una longitudinale (μ_L) e una trasversale (μ_T) il cui valore massimo è legato all'aderenza totale dalla seguente espressione:

$$\mu = \sqrt{\mu_L + \mu_T}$$

Per garantire in tutte le condizioni di guida un'adeguata sicurezza sarà necessario assicurare valori dell'aderenza sempre superiori (OFFERTA) a quelli richiesti dall'utente nell'attività di guida (DOMANDA). E' necessario ricordare che l'offerta di aderenza a parità di altre condizioni diminuisce sensibilmente con la velocità su superfici bagnate.

7.1 FATTORI STRADALI DA CUI DIPENDE L'ADERENZA

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. In particolare il fenomeno dell'aderenza è governato dai seguenti fattori :

- modalità di movimento relativo tra ruota e pavimentazione;
- adesione molecolare tra gomma e inerti;
- isteresi della gomma del pneumatico;
- presenza di sostanze contaminanti.
- Capacità di drenaggio del manto stradale

Il primo fattore è connesso con le prestazioni del veicolo, il secondo e terzo fattore sono correlati principalmente alle caratteristiche superficiali della pavimentazione, il quarto fattore dipende sia dalle caratteristiche della pavimentazione sia dalle condizioni del pneumatico, sia dalle condizioni ambientali. L'ultimo fattore è in relazione alla geometria della piattaforma stradale. Di seguito si analizzeranno i fattori connessi esclusivamente con le caratteristiche del piano viabile e quindi con le tipologie di pavimentazioni stradali.

7.1.1 Aderenza dovuta all'adesione molecolare

Nel passaggio del pneumatico sulla superficie della pavimentazione si forma, al contatto, una sorta di legame temporaneo tra le molecole della gomma e quelle della superficie su cui le ruote circolano (fig. 8.9). Nascono, di conseguenza, delle forze ritardatrici (F_a), proporzionali alle superfici di contatto, che trattengono la ruota nel movimento di rotolamento.

Affinché la componente di adesione possa esplicarsi occorre che vi sia un contatto diretto (asciutto) tra le due superfici. Nel caso in cui ci sia una sostanza contaminante (olio, acqua, neve, ghiaccio) sulla pavimentazione, il contatto potrebbe venire a mancare se le micro asperità degli inerti in superficie non fossero in grado di perforare la pellicola. E' quindi necessario, affinché il meccanismo di adesione molecolare possa esplicarsi, che, nei punti in cui le due superfici sono a contatto, nel caso di pavimentazione bagnata, si debba eliminare lo strato d'acqua e si debbano stabilire aree di contatto asciutte.

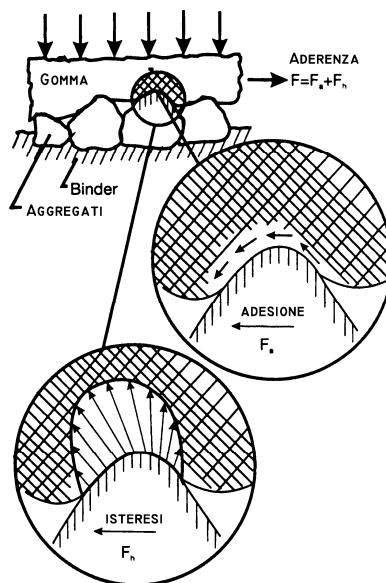


Figura 12.9 Adesione e isteresi della gomma a contatto con la superficie stradale.

7.1.2 Aderenza dovuta all'isteresi della gomma

Tale componente è dovuta al fatto che la gomma, passando sopra un'asperità del manto stradale, crea, in virtù delle sue proprietà di isteresi, una distribuzione asimmetrica di pressioni, la cui componente orizzontale si oppone allo slittamento (F_h) (figura 8.10).

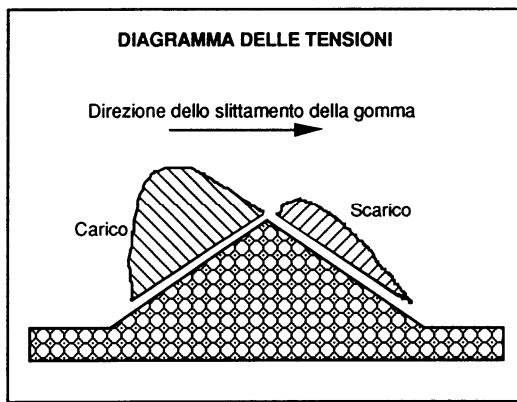


Figura 12.10 Distribuzione delle tensioni nelle zone di carico-scarico.

Le deformazioni elasto-viscose del pneumatico, nel superamento delle asperità della superficie rotabile (macro tessitura), si traducono in assorbimento di energia sotto forma di un lavoro di deformazione che non viene totalmente restituito, ma in parte trasformato in calore, costituendo in questo modo delle perdite per isteresi. In figura 8.11 si vede come, per una medesima deformazione, le tensioni sono sempre maggiori nella fase di carico piuttosto che in quella di scarico.

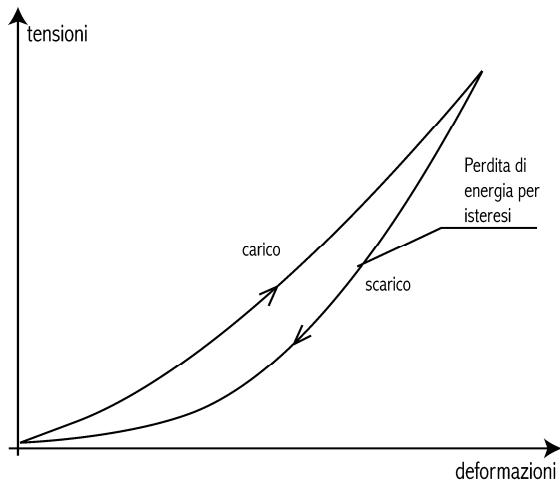


Figura 12.11 Perdite per isteresi della gomma: ciclo di carico e scarico.

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

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

A velocità più elevate diviene sempre più difficile penetrare il film d'acqua nel tempo disponibile; l'aderenza dipende largamente dalla componente di deformazione e le

asperità presenti devono essere sufficientemente grandi ed angolose da deformare il pneumatico anche in presenza di uno strato d'acqua.

Alle basse velocità, quindi, la micro-rugosità della superficie di una pavimentazione è il fattore principale nel determinare i valori di aderenza impegnabile; alle alte velocità la dimensione e la forma delle asperità visibili, ovvero la macro-rugosità, diventano fattori egualmente importanti se non i principali. In figura 8.12 è rappresentata l'aderenza totale, somma delle due componenti, con il suo tipico andamento decrescente al crescere della velocità.

In conclusione, in presenza di superfici bagnate, la componente di adesione riduce notevolmente la sua influenza, mentre la componente di isteresi è praticamente indipendente dallo stato della pavimentazione.

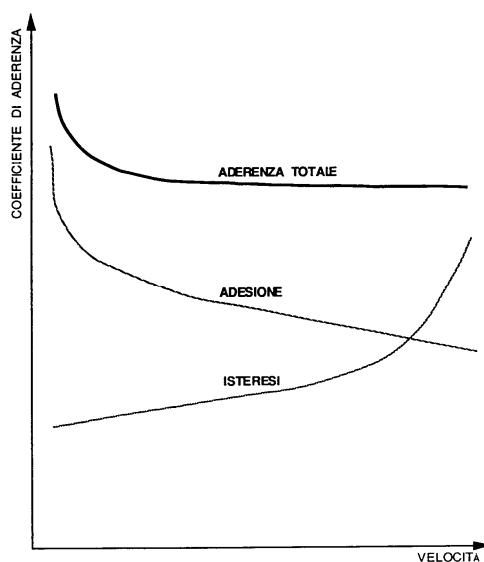


Figura 12.12 Aderenza tra inerti e gomma, in funzione della velocità (FAA – 1971).

7.1.3. Presenza di acqua e capacità di drenaggio dei manti superficiali

La presenza di acqua sulla superficie stradale è pericolosa per la riduzione dell'offerta di aderenza e per la diminuzione divisibilità che tale presenza comporta. Secondo studi sperimentali condotti da alcuni ricercatori americani un velo idrico di spessore 0.025 mm può ridurre il coefficiente di aderenza addirittura del 75% rispetto alle condizioni asciutte.

Lo spessore del velo idrico è quindi uno dei problemi principali che influenzano la sicurezza sulle strade. Da uno studio effettuato in Francia sugli incidenti avvenuti su strade e autostrade e sul comportamento degli automobilisti in caso di pioggia si sono potute trarre le seguenti indicazioni:

- il rischio di incidente su strada bagnata è il doppio di quello su strada asciutta;
- le velocità medie tenute dagli automobilisti si abbassano;

- gli incidenti che coinvolgono pedoni e veicoli a due ruote diminuiscono, verosimilmente a causa della diminuzione della presenza di queste due categorie di utilizzatori in caso di pioggia;
- la percentuale di incidenti con veicoli pesanti aumenta sensibilmente.

Numerosi, infatti, sono i fattori che intervengono ed influenzano il comportamento dell'utente in caso di pioggia, fra questi possiamo citare: la diminuzione della visibilità, la minore percezione della segnaletica orizzontale, l'aumento dello stress e ovviamente la diminuzione delle proprietà di aderenza del piano viabile. E' possibile schematizzare l'influenza dell'acqua interposta fra pneumatico e pavimentazione distinguendo, secondo la teoria di Gough e Moore, nell'area di contatto tre zone (figura 8.13):

- a) *Zona di penetrazione*: in questa zona i pneumatici devono rompere lo strato d'acqua e ridurre il suo spessore. La maggior parte dell'acqua è allontanata attraverso il battistrada. La pendenza longitudinale e trasversale (o il drenaggio della pavimentazione nel caso di utilizzazione dei conglomerati bituminosi aperti), ne favoriscono l'evacuazione.
- b) *Zona di transizione*: è la zona di rottura dello strato d'acqua rimanente, dovuta alla macro-tessitura e anche alla micro-tessitura dello strato superficiale. Resta ancora una frazione d'acqua da eliminare, ma il pneumatico inizia a prendere contatto con le asperità del rivestimento.
- c) *Zona di contatto*: in quest'ultima zona c'è un contatto asciutto tra pneumatico e strada. L'aderenza nasce quindi quasi completamente in questa zona.

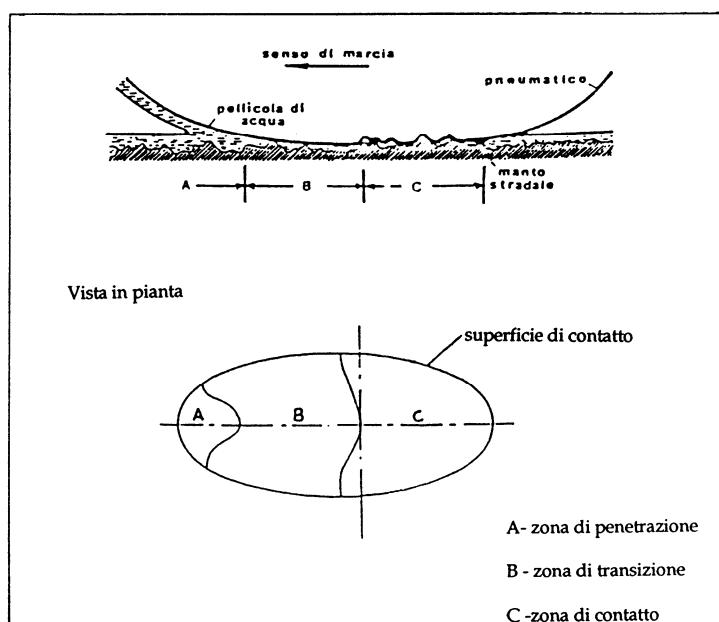


Figura 12.13 Rappresentazione della teoria delle tre zone (Gough e Moore)

Seguendo questa schematizzazione si può ritenere che l'aderenza sia funzione dell'estensione relativa delle tre zone. In particolare sarà direttamente correlata con la dimensione della zona di contatto. Qualora il velo idrico presente sulla superficie di contatto non venga allontanato, o perforato dalle asperità degli inerti, le pressioni idrodinamiche di natura viscosa e dinamica che si vengono a generare nel fluido possono arrivare a valori tali da eguagliare la pressione di contatto tra il pneumatico e la

pavimentazione generando il fenomeno che va sotto il nome di aquaplaning (Fig. 8.14). A seconda dello spessore del velo idrico presente sulla superficie si possono innescare fenomeni fisici diversi. Per uno spessore d'acqua superiore a 1 mm il contatto è detto bagnato; per uno spessore minore di 0,1 mm umido. Nel primo caso, per un dato spessore idrico, quando la velocità supera un valore critico, si ha la perdita totale di aderenza per aquaplaning dinamico. Nel caso di contatto umido, 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.

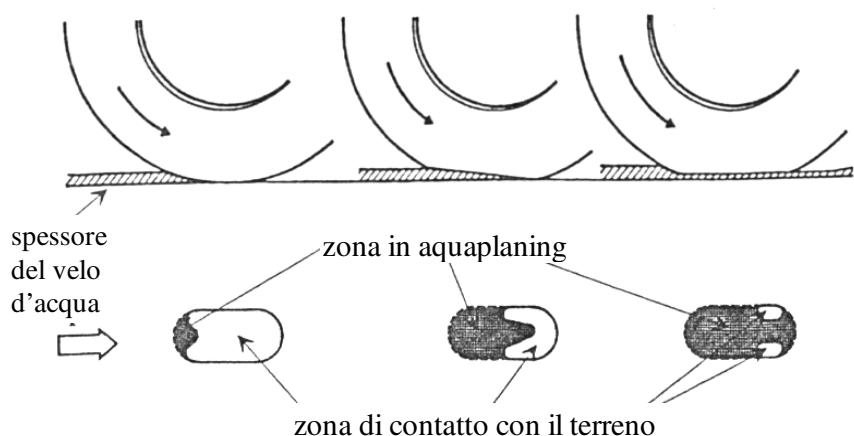


Figura 12.14 Zone di contatto e zone di aquaplaning nel caso di pavimentazione bagnata

Numerosi studi sperimentali hanno evidenziato la consistente riduzione del coefficiente di aderenza all'aumentare della velocità su superfici bagnate fino all'annullamento, quando la velocità raggiunge un valore limite. Nella figura 8.15 è indicata la variabilità del coefficiente di aderenza longitudinale f_a in funzione della velocità di percorrenza e dello spessore del velo idrico per due tipologie di pneumatici.

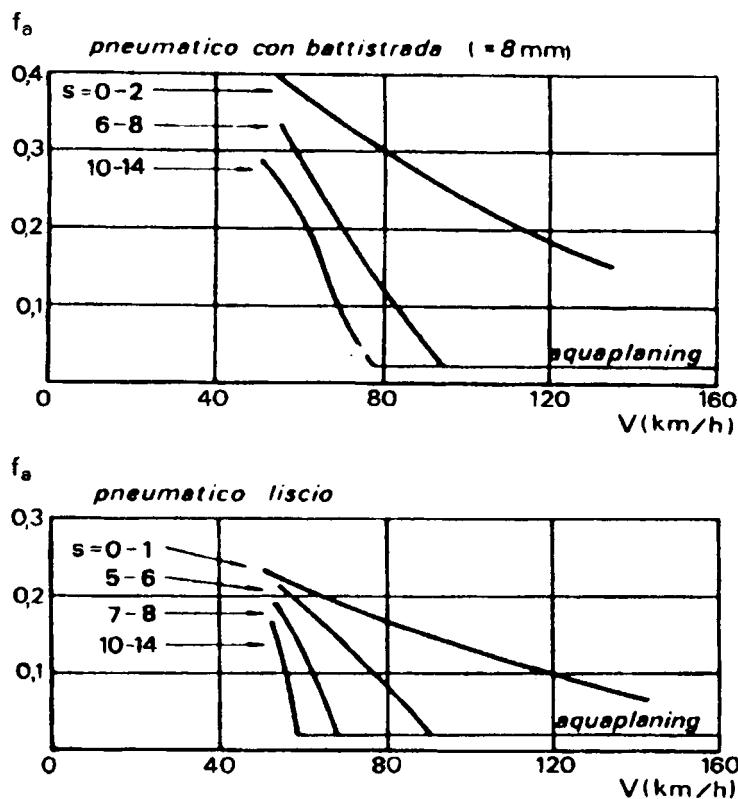


Figura 12.15 - Coefficiente di aderenza f_a in funzione della velocità e dello spessore del velo idrico

In corrispondenza di una velocità limite inferiore prossima agli 80 km/h, per pneumatici con battistrada di circa 8 mm e per veli spessi 10-14 mm, nasce il fenomeno che, complessivamente, va sotto il nome di aquaplaning; tale velocità limite scende al di sotto dei 60 km/h nel caso di pneumatico liscio.

Secondo studi sperimentali condotti da alcuni ricercatori americani, un velo idrico di spessore 0.025 mm può ridurre il coefficiente di aderenza addirittura del 75% rispetto alle condizioni asciutte.

8. INDICATORI DELLA TESSITURA E METODI DI MISURA

Nei precedenti paragrafi è stato evidenziato come la tessitura di una superficie stradale, con la scomposizione in classi, in relazione alla lunghezza d'onda, incida su diversi aspetti funzionali della pavimentazione: aderenza, rumore comfort.

Tantissimi sono i metodi per valutare la tessitura. A ciascuno di essi è associato un parametro del dominio di tessitura oggetto dell'indagine. La tabella 8.2 fornisce l'elenco degli indicatori più diffusi in campo delle pavimentazioni stradali in relazione all'obiettivo da affrontare.

Accertato che per valutare lo stato della pavimentazione, con riferimento ad un dato aspetto prestazionale, è possibile indirettamente controllare alcune caratteristiche superficiali, si chiede quali siano le attrezzature più adatte per il rilievo. Di seguito verranno descritti brevemente alcuni dei metodi più diffusi per identificare le classi di micro e macro tessitura.

Parametri di tessitura ed obiettivi								
Obiettivi Primari ⇒	ADERENZA		RUMORE DI ROTOLAMENTO			COMFORT VIBRATORIO		
Dominio della tessitura di prevalente pertinenza ⇒	micro	macro	micro	macro	Mega-irr	macro	mega	irregolarità
Indicatore (intrinseco od estrinseco) ⇒	BPN CAT ...	HS CAT Drenabilità ...	a_0	a_0 HS PSD ...	PSD	H (APL) PSD PSI	H (APL) PSD RCI PSI IRI MAS	H (APL) PSD RCI PSI IRI MAS

Tabella 12.2. – Parametri di tessitura in relazione agli obiettivi.

8.1 MISURE DI MACROTESSITURA

La macrotessitura, così come l’irregolarità superficiale in genere, viene valutata con diversi criteri: quelli *volumetrici*, quelli *statistici* e quelli detti *frequenziali*.

Le misure classiche di macrotessitura utilizzano due noti metodi volumetrici: il metodo della altezza in sabbia *HS* (CNR B.U. N.94/83) e quello della misura del tempo di deflusso.

8.1.1 Metodo dell’altezza in sabbia (HS)

Consiste nel porre sopra la superficie stradale un determinato volume (50 cm^3) di sabbia fine monogranulare, in grado di riempire tutte le irregolarità della superficie in esame (Figura 8.16). Successivamente si provvede a stendere la sabbia formando un cerchio, in modo tale che risulti facile determinare l’area ricoperta dalla sabbia. La profondità media della tessitura si ottiene dal rapporto:

$$HS = \frac{\text{volume sabbia}}{\text{area ricoperta}}$$

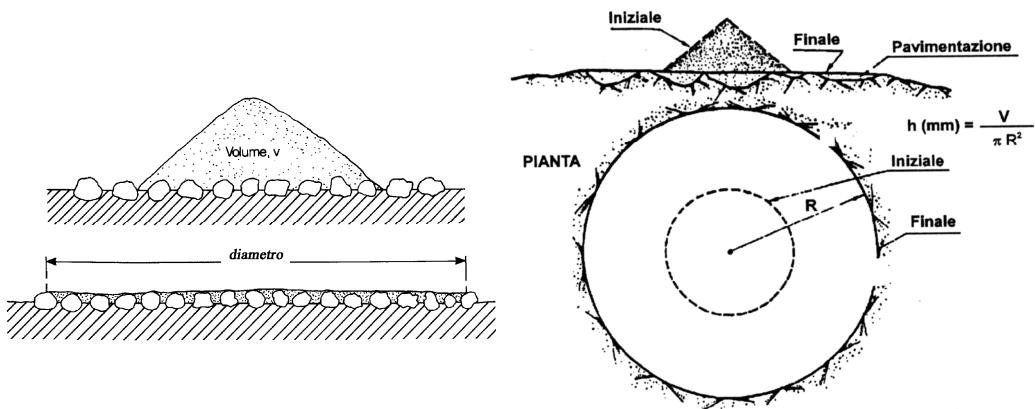


Figura 12.16 Misura della macrotessitura con il metodo dell'altezza di sabbia.

Questa misura della profondità media della tessitura, standardizzata a livello internazionale dalla norma ASTM E-965 e a livello nazionale dalla norma CNR 94/83, è nota anche come *MTD* (*Mean Texture Depth*) ottenuta attraverso il *SPM* (*Sand Patch Method*), fornisce in maniera semplice indicazioni sulla macrorugosità, vedi tabella 2.3.

Altezza media in sabbia (mm)	Macrorugosità superficiale
$HS \leq 0.20$	molto fina
$0.20 < HS \leq 0.40$	fina
$0.40 < HS \leq 0.80$	media
$0.80 < HS \leq 1.20$	grossa
$1.20 < HS$	molto grossa

Tabella 12.3 – Classificazione della macrorugosità in base ai valori di *HS* (C.N.R. B.U. n°94/83).

8.1.2 Misura del tempo di deflusso

Attraverso strumenti noti come drenometri o permeometri (fig. 8.17), si può legare la capacità drenante di una pavimentazione stradale con la sua macrotessitura attraverso il rilievo dei tempi di deflusso di una quantità d'acqua nota sotto una piastra di determinate dimensioni (l'area della piastra simula l'impronta del pneumatico).

Il confronto tra le misure dei tempi di deflusso e la misura geometrica della macrotessitura ha mostrato una buona correlazione con i valori di tessitura basati sulle misure ottenute con il precedente valore dell'altezza media in sabbia *HS* (*Mean Texture Depth, MTD*).

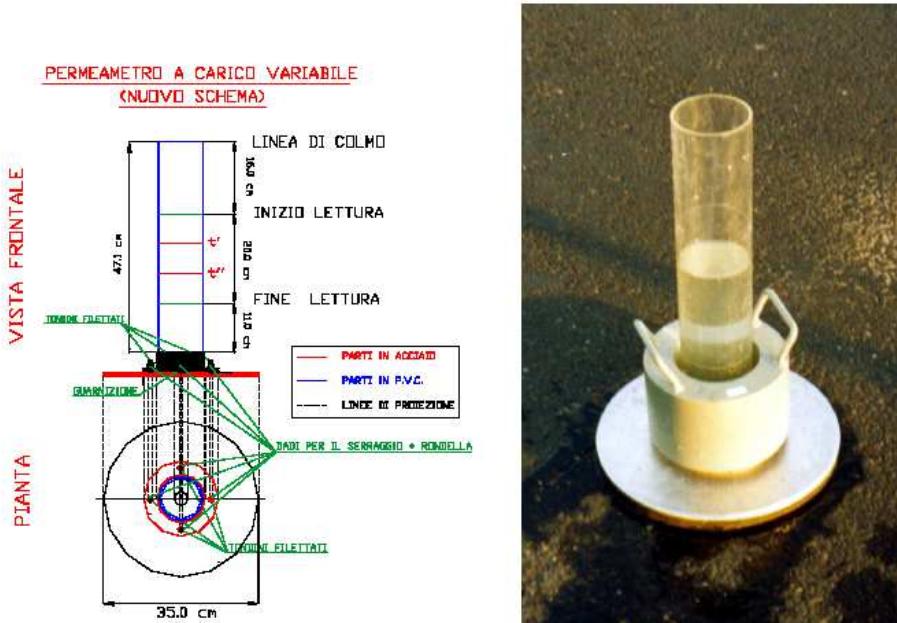


Figura 12.17 Permeametro a carico variabile.

8.1.3 Indicatori statistici

Preliminarmente si riportano alcune definizioni utili, inerenti le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni, proposte dalle norme ISO 13473.

Profondità di tessitura (Texture Depth, TD): viene determinata per ogni punto della superficie stradale considerandone lo scostamento da un piano di riferimento preso tangente all'asperità più alta. Si definisce inoltre le *profondità media della tessitura (Mean Texture Depth, MTD)* come la media aritmetica delle singole profondità.

Profilo (Profile): sezione della tessitura tramite un piano verticale, analogamente a quanto visto per la tessitura si determinano la *profondità di profilo (Profile Depth, PD)* e la *profondità media di profilo (Mean Profile Depth, MPD)*, calcolata come:

$$MPD = \frac{PL_1 + PL_2}{2} - LM$$

con:

LM = livello medio calcolato dal profilo;

PL_1 (PL_2) = peak level 1 (2): differenza tra livello massimo e medio nella prima (seconda) metà.

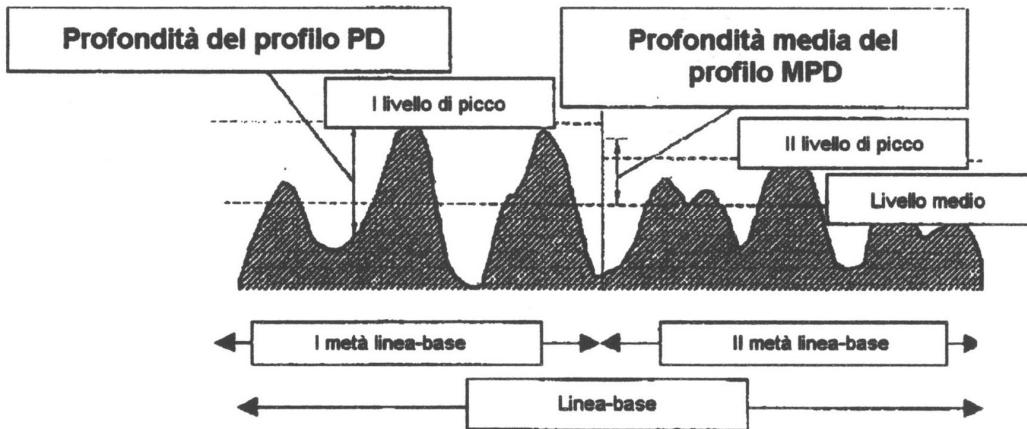


Figura 12.18 Rappresentazione degli indicatori di tessitura

I criteri statistici, si basano sul rilievo del profilo longitudinale e/o trasversale della pavimentazione, tramite profilometri 2D e 3D. Si può osservare come negli ultimi anni, grazie ai progressi significativi compiuti, sia nella tecnologia laser, sia nella potenza di calcolo dei computer portatili, si siano affermati metodi di misura in continuo della macro tessitura non solo di tipo statico ma anche alle normali velocità imposte dal traffico.

I profili che così vengono ottenuti si prestano a tecniche di approccio fisico matematico: da un dato di partenza quale generalmente quello del profilo $z(x)$ si può definire la profondità *PD* (*Profile Depth*) in un certo intervallo ΔL come:

$$PD_{\Delta L}(x) = z_{max, \Delta L} - z(x)$$

(differenza fra il livello di picco nell'intervallo ΔL ed il profilo stesso) e successivamente effettuare elaborazioni statistiche in grado di fornire i valori di *MPD*.

Con il termine *MPD_{ΔL}* (Mean Profile Depth) ci si riferisce, invece, alla media della profondità del profilo:

$$MPD_{\Delta L} = z_{max, \Delta L} - z_{med, \Delta L}$$

valutata attraverso la differenza fra il valore di picco ed il valore medio nell'intervallo ΔL .

Il parametro *MPD* può essere adoperato per una stima di *MTD* (la misura dell'altezza in sabbia vista precedentemente) ed in tal caso è denominato *ETD* (*Estimated Texture Depth*). Una legge di correlazione proposta in ambito ISO è la seguente:

$$ETD \text{ (mm)} = 0.2 + 0.8 MPD \text{ (mm)}$$

Un tipo di analisi molto impiegata nello studio delle vibrazioni meccaniche e acustiche che inizia ad essere proficuamente utilizzata anche nelle ricerche stradali è l'*analisi frequenzial*. Questa tecnica, basata sullo sviluppo delle trasformate di Fourier, ha trovato un valido campo applicativo nello studio e nella correlazione tra macrotessitura e rumore prodotto dal rotolamento dei pneumatici sulle superfici stradali.

Dai profili stradali, misurati con fissati valori di lunghezza e passo di campionamento, è possibile determinare, attraverso l'analisi armonica generalizzata, la rappresentazione della tessitura nel dominio delle frequenze spaziali, vale a dire una scomposizione in

onde sinusoidali.

Infatti, la tessitura, rilevata attraverso le apparecchiature profilometriche, può essere ricondotta ad un fenomeno aleatorio di tipo ondulatorio ed è quindi possibile rappresentarla nel dominio della frequenza spaziale passando attraverso la funzione *PSD (Power Spectral Density)*. In tal modo è possibile quantificare il contenuto in termini di densità spettrale di potenza delle ampiezze della forma d'onda “tessitura” relativamente ad un intervallo di frequenza spaziale.

8.2 MISURE DI MICROTESSITURA

In ambito stradale, come si è visto, con il termine “microtessitura” si indica le microasperità degli inerti e della matrice in cui sono immersi, nel caso di pavimentazioni tradizionali, e le microasperità degli elementi modulari nel caso di pavimentazioni discontinue. Benché il ruolo della microtessitura sia noto sul piano teorico, tuttavia non esiste un metodo universalmente impiegato per definirla; la difficoltà è, in parte, dovuta alle sue dimensioni così ridotte. Attualmente si possono citare almeno tre diversi metodi per caratterizzarla: misure soggettive, misure indirette e misure di profili.

8.2.1 Misure soggettive

L’aspetto rugoso degli inerti (o aggregati) lapidei, così come del legante o della malta che li circonda, viene valutato attraverso un esame tattile oppure visivo. Quest’ultimo può essere effettuato ad occhio nudo o con l’ausilio di un microscopio sia su dei campioni che su delle fotografie, in modo da ottenere una caratterizzazione della superficie in esame. E’ questa una metodologia poco utilizzata, in quanto non solo necessita di un gran numero di campioni o di fotografie con tempi d’analisi piuttosto lunghi, ma soprattutto risente fortemente della valutazione soggettiva dell’operatore.

8.2.2 Misure indirette

In maniera indiretta, la microtessitura viene stimata attraverso delle prove meccaniche come quella, ad esempio, della resistenza di attrito radente mediante pendolo mobile o BPN (*British Pendulum Number*). Invece di misurare direttamente la microtessitura si misura, una proprietà ad essa legata, quale la resistenza d’attrito. Alcuni autori hanno dimostrato che la macrotessitura influenza la misura con il BPN (fig. 8.19).

8.2.3 Misure di profili

E’ oggi possibile ottenere il rilievo dei profili della superficie degli inerti con l’ausilio di microscopi più o meno potenti, di sensori a contatto (punte micrometriche) oppure di sensori senza contatto (laser), al fine di ricavarne opportuni parametri geometrici. Nella maggior parte dei casi, tali parametri vengono associati, mediante correlazioni, a misure di aderenza. Interessante, a questo riguardo, lo studio condotto da alcuni ricercatori italiani, attraverso l’impiego di un particolare rugosimetro laser, sugli inerti impiegati nei lavori di manutenzione delle pavimentazioni della società autostrade. Gli autori sono riusciti ad ottenere il rilievo bidimensionale e

tridimensionale su scala micrometrica della superficie di tali inerti, come mostrato nella successiva figura 2.12.

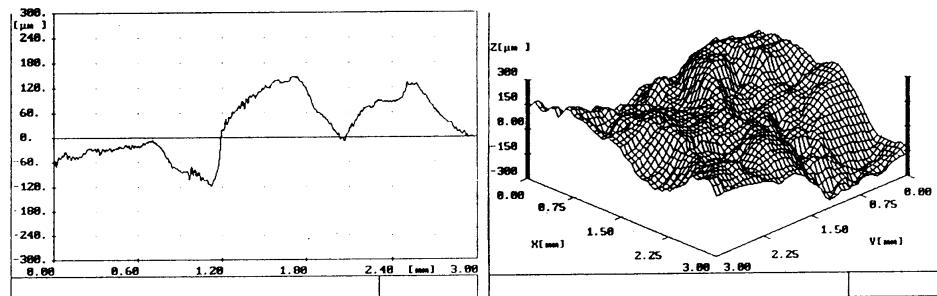


Figura 12.19 – Profili 2D e 3D, ottenuti con il rugosimetro laser.

8.3 METODI DI MISURA DELL'ADERENZA

Come si vedrà, esistono diversi modelli per spiegare il fenomeno dell'aderenza e, di conseguenza, metodi differenti per misurarla. Per ogni metodo, inoltre, possono essere utilizzati diversi strumenti e tecniche di misura. In ogni caso, è indiscutibile come l'aderenza, sia una proprietà delle pavimentazioni strettamente legata alla micro e macro tessitura della superficie stradale. Valutando tali grandezze è quindi possibile ottenere una misura indiretta dell'aderenza. Più spesso si procede, invece, ad una valutazione diretta di questa proprietà attraverso la misura di appropriati indicatori.

Le diverse apparecchiature per misurare l'aderenza possono venire classificate secondo tre modalità di prova:

1. *Metodo con ruota bloccata*: fornisce un indice *SN* (aderenza longitudinale, Skid Number) in funzione della velocità di prova.
2. *Metodo con forza trasversale*: fornisce un coefficiente *SFC* (Side Force Coefficient) o *CAT* (Coefficiente di Aderenza Trasversale) in funzione dell'angolo di deriva e della velocità di prova.
3. *Metodo con scorrimento della ruota* (ruota parzialmente frenata): fornisce un indice *BSN* (aderenza longitudinale, Brake Slip Number) in funzione della percentuale di scorrimento (variabile o fisso) e della velocità di prova.

Ciascun metodo di misura possiede i suoi pregi, in virtù del fatto che ogni apparecchiatura fornisce un valore adatto a un particolare tipo di scenario: gli strumenti a ruota bloccata simulano la frenata d'emergenza senza l'ausilio di sistemi d'antibloccaggio, i metodi a forza trasversale la capacità di tenuta in curva, i sistemi a scorrimento fisso e variabile riproducono, infine, la frenatura mediante l'ausilio di ABS. Anche se non trovano spazio in questa classificazione, vi sono altri metodi, detti di laboratorio, con i quali è ancora possibile effettuare misure d'aderenza: il DFT (Dynamic Friction Tester), il noto BPT (British Pendulum Tester), eccetera.

Con l'impiego di una qualsiasi di queste procedure, con caratteristiche standard della ruota di prova e delle modalità operative, si ottiene un indice convenzionale che può essere correlato con l'aderenza della pavimentazione. Un tale indice sarà funzione, inoltre, delle caratteristiche superficiali della pavimentazione (macro e micro tessitura).

Vengono qui di seguito descritti alcuni di questi metodi che vengono maggiormente utilizzati in Italia.

8.3.1 Strumenti a forza trasversale

Si tratta di apparecchi per la determinazione del coefficiente di aderenza trasversale *CAT* (oppure *CFT*: Coefficient de Frottement Transversal; *SFC*: Side Force Coefficient; f_y , μ_y , etc.) caratterizzati da una ruota rotolante orientabile con un angolo di deriva obbligato, mentre un dinamometro registra la forza F_s normale al piano della ruota.

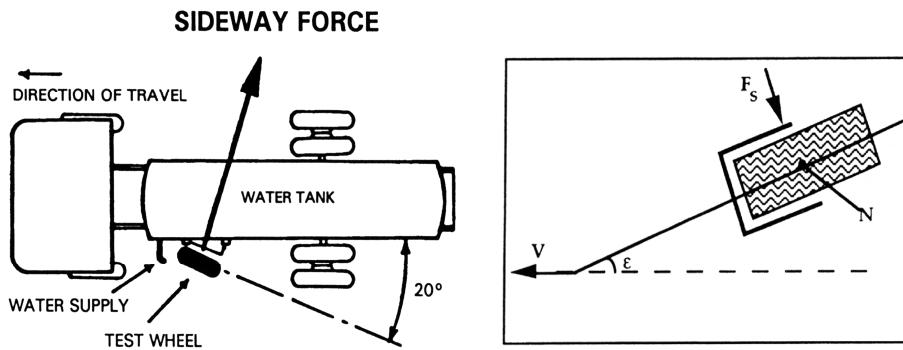


Figura. 12.20 – Schema di funzionamento dello SCRIM.

Questo strumento fa parte di una apparecchiatura denominata SCRIM (Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine) o una sua variante nota come SUMMS (Survey Machine for Macrotexture and Skid) che consente la rilevazione sistematica delle caratteristiche di aderenza trasversale di un manto stradale in presenza d'acqua.

Il valore di *SFC* viene ricavato misurando, con una cella di pressione, la forza agente perpendicolarmente al piano medio di una ruota di misura dotata di pneumatico liscio standard, mentre tale ruota rotola sulla superficie stradale preventivamente irrorata con una quantità d'acqua prefissata (fig. 8.20).

Il rapporto, espresso in percentuale, tra il valore di tale forza ed il valore del carico verticale agente sulla ruota stessa rappresenta la misura di *SFC*. La traccia del piano medio della ruota di misura viene mantenuta inclinata, rispetto all'asse longitudinale del veicolo sul quale tale ruota è montata, di un angolo costante; in tali condizioni il rotolamento del pneumatico è assicurato dalla presenza di una forza agente perpendicolarmente al piano medio della ruota, che produce un angolo di deriva pari all'angolo suddetto.

Si ha in questo modo il Coefficiente di Aderenza Trasversale:

$$CAT = F_s / N$$

e analogamente il Side Force Coefficient:

$$SFC (V, \varepsilon) = 100 \cdot (F_s / N)$$

8.3.2 British Portable Tester (Apparecchio portatile a pendolo)

Il BPT, noto anche come Skid Tester, è l'apparecchio più comune e utilizzato in Italia dove è conosciuto come “apparecchio portatile a pendolo per la misura dell'attrito radente”.

Esso consiste in un pendolo (fig. 8.21) dotato all'estremità di un pattino di gomma che striscia sulla superficie della pavimentazione in precedenza inumidita. La differenza in altezza del centro di gravità dell'estremità strisciante, tra la posizione iniziale di inizio prova e quella più alta raggiunta dopo il rilascio, è utilizzata per calcolare la perdita di energia dovuta a fenomeni di attrito.

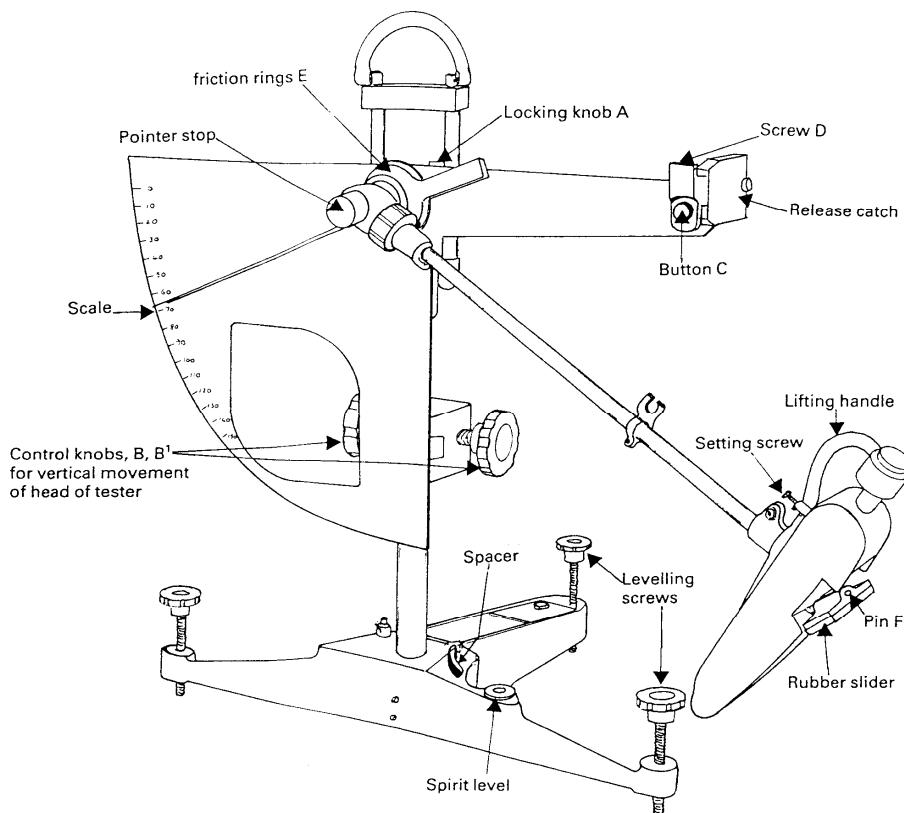


Figura 12.21 – Schema di funzionamento del British Portable Tester (BPT).

Quando il pendolo raggiunge la superficie di contatto, la sua energia potenziale si è trasformata nella massima energia cinetica; questa si riduce in virtù dell'attrito che il pattino incontra e, una volta lasciata la superficie, viene nuovamente convertita in energia potenziale.

La differenza di altezza tra la posizione iniziale e quella finale indica perciò la quantità di energia cinetica spesa per l'attrito radente e fornisce, quindi, un buon indicatore della resistenza d'attrito che una superficie è in grado di esercitare ai fini dell'aderenza.

L'apparecchio simula, per quanto possibile, lo slittamento fra la ruota di un veicolo e la strada. Le condizioni della prova, che devono essere attentamente controllate, sono state scelte in modo tale che i valori letti su di una scala tarata presente nello strumento corrispondano a valori di attrito radente di un pneumatico dotato di battistrada che slitti ad una velocità di 50 km/h.

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

La descrizione dell'apparecchiatura ideata dal TRRL (Transport and Road Research Laboratory) e le modalità della prova sono riportate nel Bollettino Ufficiale del CNR (Norme tecniche A: XIX N. 105). I valori misurati, espressi in unità BPN (British Portable Tester Number), rappresentano, inoltre, una misura indiretta della microtessitura.

I principali vantaggi, di questo strumento sono la sua maneggevolezza e semplicità nell'uso. Si è già detto di come è particolarmente utile nelle ricerche di laboratorio per lo studio di nuove superfici resistenti allo scivolamento e di come è di interesse per il tecnico stradale al fine di valutare l'aderenza nei punti di potenziale rischio di incidenti, tuttavia, questo strumento presenta il grosso limite di rilevare l'aderenza in un'unica situazione operativa (pneumatico in fase di slittamento alla velocità di 50 km/h). Per di più, i valori di aderenza che si possono ricavare non tengono conto di tutti gli altri elementi che entrano in gioco nella dinamica di un veicolo.

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

8.4. MODELLI INTERPRETATIVI DEL FENOMENO DELL'ADERENZA.

Per avere un'indicazione dell'aderenza alle varie velocità si dovrebbero fare diverse misure a diversa velocità.

Infatti una misura di aderenza ad una specifica velocità non è in grado di caratterizzare la pavimentazione.

La figura 2.15 mostra due situazioni in cui si ha lo stesso valore di aderenza a 60 km/h, ma un comportamento piuttosto diverso alle altre velocità.

Questo esempio dimostra che non basta specificare un unico parametro, come per esempio il coefficiente di aderenza a 60 km/h, per descrivere in modo completo il fenomeno dell'aderenza di una pavimentazione. Per definire la curva di aderenza è necessario almeno due parametri, usualmente uno legato all'aderenza vera e propria e l'altro legato alla tessitura (macro) della pavimentazione.

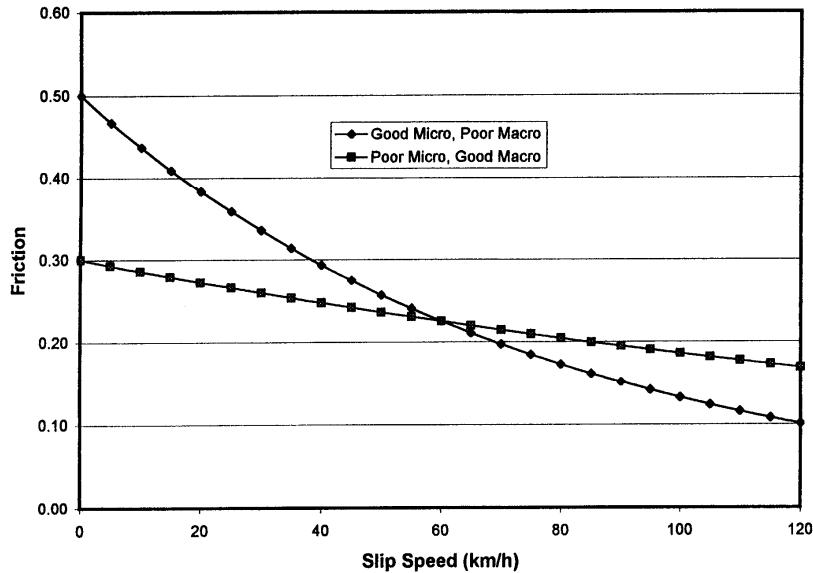


Figura 12.22 – Andamento dell’aderenza in funzione della velocità per due diverse superfici.

Un modello, per la valutazione dell’aderenza, che consente di utilizzare solo queste due misure è quello semiempirico proposto da Leu e Henry.

Il coefficiente di aderenza longitudinale CAL o SN (Skid Number) è legato alla velocità V del veicolo per mezzo della relazione esponenziale:

$$SN_V = SN_0 \cdot e^{-\frac{PNG}{100}V}$$

dove:

SN_V : è il coefficiente di aderenza longitudinale alla velocità V ;

SN_0 : è l’intercetta di SN per $V = 0$;

PNG : è il gradiente normalizzato percentile $PNG = -100 \frac{1}{SN} \cdot \left(\frac{dSN}{dV} \right)$;

V : velocità del veicolo.

Il primo parametro di questo modello, SN_0 , è legato alla microtessitura della pavimentazione. Infatti si ottiene dal valore del coefficiente di aderenza quando la velocità del veicolo tende a zero; ed in condizioni di bassa velocità o di velocità nulla prevalgono, come si è visto, nella definizione dei valori di aderenza, le caratteristiche di microtessitura della pavimentazione. Il secondo parametro, PNG , risulta legato invece alla macrotessitura e sostanzialmente invariante con la velocità. Un buon indicatore della microrugosità è considerato da sempre l’apparecchio portatile a pendolo BPN , che ne fornisce una misura indiretta. Si è così giunti, con un buon grado di correlazione, alla formula che esprime SN_0 in funzione del valore di attrito radente misurato con il BPN :

$$SN_0 = 1.32 \cdot BPN - 34.9$$

nonché alla correlazione tra le misure di macrotessitura, MTD , ottenuta con altezze in sabbia, e il parametro PNG , come visualizzato anche nella figura 2.16 seguente:

$$PNG = 0.45 \cdot MTD^{-0.47}$$

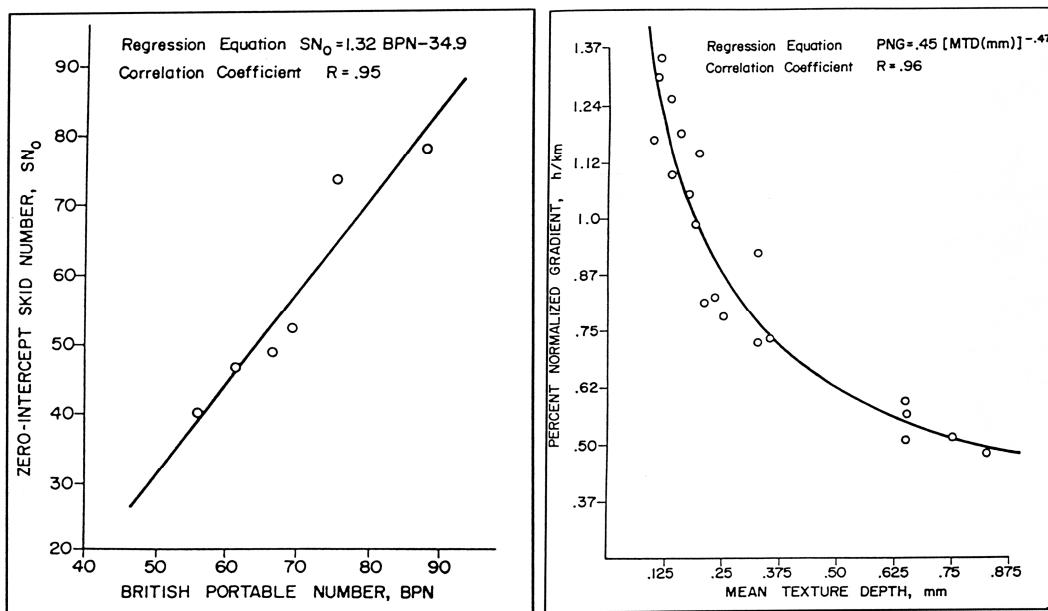


Figura 12.23 Curve di correlazione tra parametri di micro e macrotessitura e loro misure: rispettivamente SN_0 con BPN e PNG con MTD.

Secondo gli autori, la separazione degli effetti dovuti alla micro e macrotessitura tramite l'impiego di due diversi parametri atti ad esprimere rappresenta il punto di forza di tale modello. Inoltre, la forma esponenziale dell'equazione rappresenta una relazione tra aderenza e velocità con la quale si sono ottenuti ottimi riscontri sperimentali, come anche confermato dalla bontà dei precedenti indici di correlazione.

Il modello finale proposto dagli autori, di facile impiego per gli ingegneri stradali, risulta così essere:

$$CAL = \frac{1}{100} (-34.9 + 1.32 BPN) \cdot e^{-0.0045 V \cdot MTD^{-0.47}}$$

8.4 MISURA DELL' IRREGOLARITA'

Nella formulazione dell'indicatore dell'efficienza di una pavimentazione PSI, come si vedrà nel prossimo capitolo, il parametro SV (variazione della pendenza longitudinale), ricavato direttamente dal rilievo del profilo longitudinale della superficie stradale, ha il peso maggiore nella correlazione statistica. Inserendo anche le grandezze del degrado il coefficiente di correlazione aumenta soltanto del 5 %. Pertanto appare giustificato valutare lo stato di efficienza di una pavimentazione con sole misure di regolarità, soprattutto in quei casi dove la mancanza di dati relativi al degrado, come nelle pavimentazioni modulari, rende impossibile l'utilizzo dell'indicatore PSI.

La tecnica più comune per rilevare la regolarità superficiale di una pavimentazione, o meglio la sua irregolarità, consiste nel rilevare il profilo longitudinale lungo uno o più

allineamenti. I profili vengono fatti di norma coincidere con le traiettorie di rotolamento dei pneumatici dei veicoli ovvero lungo le cosiddette “wheel path”.

Il rilievo dei profili longitudinali viene generalmente effettuato con apparecchiature denominate “profilometri”. Essi si possono classificare in due tipologie: con dispositivo a contatto o di tipo ottico (laser). Il primo metodo consiste nel rilevare il movimento di un dispositivo che fisicamente segue il profilo della pavimentazione, mentre i metodi ottici si basano sulla riflessione di un segnale emesso da un dispositivo in genere montato su un veicolo in movimento. Le apparecchiature appartenenti alla prima categoria sono usualmente di maggiore precisione. La Banca Mondiale classifica queste apparecchiature in base alla loro precisione in Classi (Classe I e Classe II). Due apparecchiature molto diffuse di classe I sono : Il Rolling Distick e il ARRB Walking Profiler).

La valutazione quantitativa dell’irregolarità può essere fatta mediante indici standardizzati ad esempio IRI (International Roughness Index) elaborato dalla Banca Mondiale, e la classificazione ISO 8608 basata sullo spettro di potenza.