

## CAPITOLO 6

# DECADIMENTO DELLE PERFORMANCE SUPERFICIALI: FATTORI DI INCERTEZZA E DI CONTROLLO

### 6.1 PREMESSE

L'impostazione dell'indagine sperimentale condotta e la successiva elaborazione dati hanno reso necessaria una chiara ed univoca identificazione di tutti quei fattori, definiti "fattori di controllo" che, per il caso in esame, hanno generalmente maggiore influenza sulle performance superficiali delle pavimentazioni monitorate. Tale identificazione è basata su un'accurata analisi di letteratura nell'intento di fornire un supporto teorico-bibliografico per una migliore comprensione dei risultati sperimentali ottenuti.

Per fattore di controllo si intende uno specifico aspetto o fenomeno che determina una risposta prestazionale dell'infrastruttura più o meno adeguata agli standard di riferimento e operando sul quale è possibile migliorare le qualità intrinseche delle pavimentazioni stradali in termini di micro e macrotessitura. L'analisi mirata dei fattori di controllo, tuttavia, non è finalizzata esclusivamente alla gestione della risposta prestazionale della superficie stradale ma consente di comprendere nel dettaglio alcuni aspetti specifici relativi all'interazione veicolo-pavimentazione.

Accanto alla definizione dei fattori di controllo si procederà in questo capitolo alla identificazione di tutte le variabili in gioco che possono rappresentare, invece, potenziali fattori di incertezza dell'indagine sperimentale stessa.

Tali fattori, che riguardano molteplici aspetti della sperimentazione, dagli errori di misura alle problematiche connesse alla gestione di alcune condizioni al contorno, risultano di fondamentale importanza nell'approccio metodologico adottato. Un quadro esaustivo dell'indagine oggetto del presente lavoro di ricerca, infatti, non può non contemplare la valutazione di tutti i fattori di controllo/incertezza che consentono di interpretare correttamente i risultati numerici, di comprendere le eventuali discordanze con i dati attesi, nonché di prospettare nuovi interessanti sviluppi della ricerca futuri.

I fattori di controllo/incertezza nella valutazione del processo di decadimento nel tempo delle performance superficiali, che per comodità di trattazione vengono qui classificati in quattro macrofamiglie (cfr. *Tabella 6.1*), possono riguardare due elementi fondamentali che entrano in gioco nel rilievo delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento:

1. le qualità delle caratteristiche delle superfici del piano di rotolamento;
2. i protocolli di prova e le modalità di acquisizione dati.

	FATTORI INTRINSECI	FATTORI ESTRINSECI	FATTORI OPERATIVI	FATTORI METODOLOGICI
QUALITÀ SUPERFICIE	<u>Aggregati lapidei</u> Percentuale e tipologia di <u>legante</u> nella miscela di conglomerato bituminoso	<u>Variabilità longitudinale:</u> geometria del tracciato Entità <u>traffico veicolare</u> <u>Decadimento</u> (condizioni ambientali/tempo)	Caratteristiche dei <u>veicoli</u> e configurazione del <u>carico</u> <u>Variabilità trasversale:</u> identificazione delle wheel track	_____
MISURE	<u>Errori di misura</u>	<u>Condizioni di prova</u>	<u>Condizioni di prova</u>	Algoritmi di <u>elaborazione dati</u>

*Tabella 6.1 - Principali fattori di controllo/incertezza*

## 6.2 GLI AGGREGATI LAPIDEI

La capacità di un aggregato di resistere all'azione di levigazione dovuta al traffico veicolare è un requisito fondamentale nella scelta della tipologia di inerte da utilizzare per il confezionamento dei conglomerati bituminosi (Bloem, 1971 [01]; Whitehurst e Goodwin, 1955 [02]; Nichols et al, 1957 [03]; Gray e Renninger, 1965 [04]; Balmer e Colley, 1966 [05]; Csathy et al, 1968 [06]; Moore, 1969 [07]). La quasi totalità delle performance superficiali delle pavimentazioni, infatti, dipende fortemente dalla tipologia e dalla qualità dell'aggregato lapideo come già introdotto al Capitolo 2 della presente tesi. In questo paragrafo si procederà ad una descrizione più dettagliata e approfondita dei fenomeni di usura che interessano gli aggregati con particolare riferimento alla natura petrografica, alle caratteristiche chimico-fisiche nonché alle proprietà meccaniche dell'inerte, ricorrendo all'analisi di letteratura dei principali studi in merito. Per comprendere ed analizzare i fattori principali che intervengono nel fenomeno di usura superficiale del piano di rotolamento è necessario analizzare le proprietà degli aggregati lapidei che principalmente governano l'evoluzione temporale dell'aderenza e della tessitura. Ricerche condotte da Dahir and Henry (1978) [08], Kandhal and

Parker (1998) [09], e Folliard and Smith (2003) [10], mostrano come le proprietà degli aggregati che maggiormente influenzano le performance superficiali delle pavimentazioni stradali e ne determinano l'evoluzione temporale sono le seguenti:

- durezza;
- composizione mineralogica e struttura cristallina;
- forma;
- microtessitura superficiali;
- spigolosità;
- resistenza all'abrasione;
- resistenza alla levigatura;
- qualità.

La durezza viene quantificata usualmente con la scala Mohs con valori (H) variabili tra 0 e 10. Talvolta si utilizza la scala Vickers con valori della durezza espressi in unità di pressione. Durezza e composizione mineralogica governano il comportamento dell'aggregato rispetto a fenomeni di usura: gli inerti che garantiscono livelli più elevati di aderenza nel tempo sono tipicamente composti da cristalli caratterizzati da forti legami molecolari annegati in una matrice di minerali più teneri (inerti poliminerali)(Henry, 2000) [11]. La differenza nella dimensione dei grani e nella durezza garantisce una rigenerazione continua della superficie esposta all'abrasione del pneumatico, grazie alla progressiva separazione dei grani più duri dalla matrice tenera (Fig.6.1) [12].

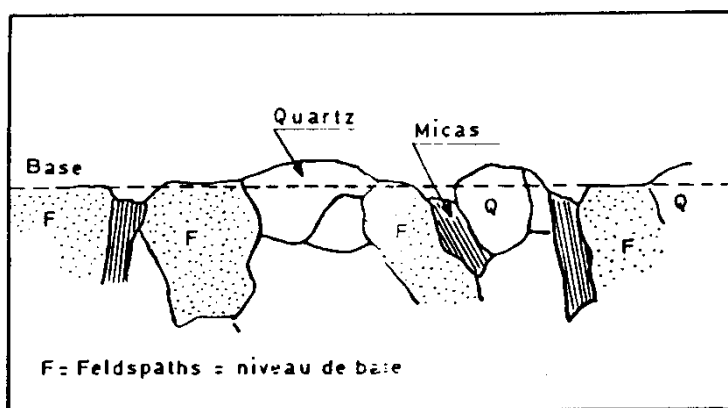


Fig. 6.1 - Schematizzazione di una superficie di un inerte poliminerale (granito) [12]

Gli aggregati lapidei costituiti esclusivamente da minerali duri, in genere, evidenziano un'usura uniforme di entità direttamente proporzionale alla durezza del minerale mentre subiscono

fortemente i fenomeni di lucidatura e levigazione dovuti all'azione del traffico (Davis, 2001) [13]. In uno studio di alcuni ricercatori francesi [14] viene proposta una correlazione tra il valore di CLA ed un parametro che esprime il contrasto di durezza dei minerali presenti in un inerte Cd (contraste de durezza):

$$CLA = 35,74 + 0,075 \times Cd$$

dove Cd vale

$$Cd = \sum p_i \times |dv_i - dv_b|$$

con  $|dv_i - dv_b|$  viene indicata la differenza in valore assoluto della durezza di ogni minerale "i" presente rispetto alla durezza del minerale "b" (minerale di base) presente in percentuale maggiore (Fig. 6.1);  $p_i$  è il rapporto tra il peso di ciascun minerale e il peso totale dell'inerte.

L'espressione precedente ottenuta dall'esame di una serie di rocce metamorfiche, sedimentarie ed eruttive, risulta statisticamente significativa con un buon indice di correlazione ( $R^2=0.90$ ) [12]. Anche la spigolosità, la morfologia e la tessitura degli inerti utilizzati nel conglomerato bituminoso determinano le caratteristiche di micro e macro tessitura superficiale della pavimentazione posta in opera. La microtessitura di un aggregato proveniente da una roccia madre è determinata sia dalla natura che dalla dimensione dei minerali o dei grani, nonché dalla loro orientazione. La superficie dell'inerte esposta all'azione del traffico subisce nel tempo una diminuzione della microtessitura originaria (Fig.6.2) secondo un processo di levigatura e nuova formazione di superfici.

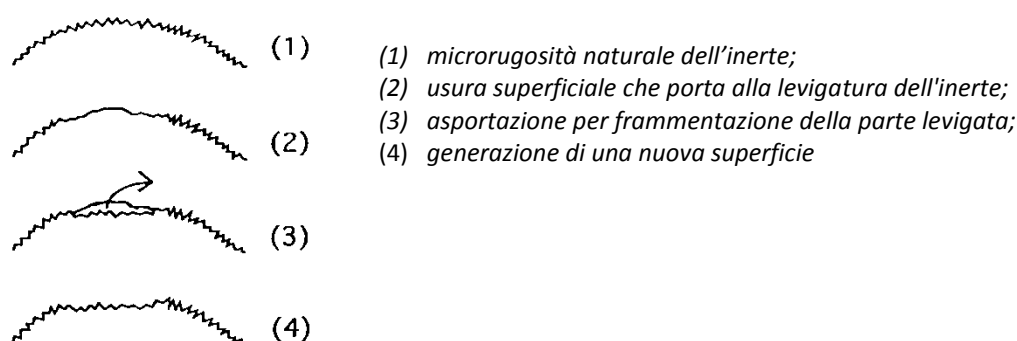


Fig. 6.2 - Evoluzione dello stato della superficie stradale per effetto delle azioni di usura e frammentazione [12]

Gli aggregati resistenti alla levigazione possiedono la caratteristica di mantenere livelli di microtessitura abbastanza stabili nel tempo anche sotto gli effetti ripetuti dei carichi dinamici;

tale proprietà è fortemente influenzata dalla composizione mineralogica e dalla struttura cristallina dell'aggregato stesso.

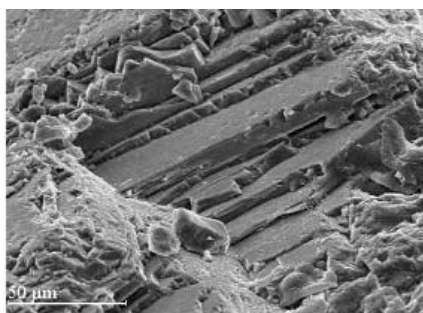
Numerose sono le prove di laboratorio atte a simulare tale processo; molti ricercatori, tuttavia, ritengono che i comuni test di abrasione, come la prova Los Angeles, così come altri test atti a valutare il comportamento chimico-fisico degli aggregati (ad esempio prove di gelo e disgelo) non siano sufficienti per dare una risposta esaustiva ed affidabile al fine di fornire previsioni sull'evoluzione dell'aderenza superficiale. Allo stesso tempo, molte delle strumentazioni impiegate per la simulazione del processo di levigazione non riescono a riprodurre in maniera adeguata la cinematica del pneumatico in moto sulla superficie stradale.

Gli aggregati fini che presentano superfici angolose e irregolari garantiscono livelli di microtessitura più elevati mentre aggregati delle stesse dimensioni ma di forma allungata o arrotondata determinano, in generale, livelli di tessitura inferiori. Per gli aggregati grossi, invece, caratteristiche spiccate di spigolosità determinano un migliore ingranamento degli inerti con profondità di tessitura maggiori. Inoltre gli aggregati di forma allungata tendono ad orientarsi orizzontalmente determinando, in tal modo, minori livelli di macrotessitura. L'anisotropia, presente in alcune configurazioni rocciose metamorfiche (gneiss, scisti ecc), può determinare il manifestarsi di una direzione preferenziale di rottura della struttura cristallina secondo piani paralleli spesso molto ravvicinati. A tale riguardo gli studi di Hosking [15], [16] mostrano che per garantire elevati valori di aderenza e una buona resistenza all'usura, i granuli dovrebbero presentare un'angolarità minore di 90° e dimensione media compresa nell'intervallo tra 150  $\mu$  e 300  $\mu$ .

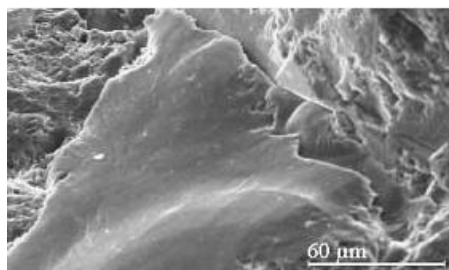
La resistenza all'abrasione è un indicatore della capacità di un aggregato di fronteggiare i fenomeni di degrado di tipo meccanico. Durante le operazioni di confezionamento delle miscele, di stesa e di compattazione, la frammentazione degli aggregati può alterare in maniera significativa la distribuzione granulometrica di progetto aumentando il contenuto di fini e determinando, così, variazioni importanti dal punto di vista granulometrico.

Gli aggregati che costituiscono il conglomerato bituminoso subiscono un processo di frantumazione a causa delle azioni dinamiche del traffico, insieme a fenomeni di levigatura e lucidatura che si verificano in maniera differenziata (McDaniel e Coree, 2003 [17]; Kowalski, 2007 [18]). Sotto traffico la frammentazione per opera delle azioni tangenziali dei veicoli determina perdita di macrotessitura e diminuzione della porosità iniziale della miscela.

Poiché le tipologie di roccia impiegate come aggregati lapidei nella realizzazione delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso possiedono adeguata durezza (in termini di resistenza alla frammentazione), le fratture, in genere, si muovono attraverso le superfici dei minerali. Ciascun minerale possiede il proprio modo di fratturarsi che dipende sostanzialmente dalla disposizione della maglia cristallina. Alcuni minerali si fratturano secondo allineamenti preferenziali mostrando nuove superfici (*Fig.6.3a*), mentre altri mostrano superfici di rottura concoidali ed estremamente levigate (*Fig.6.3b*) [19].



*Fig. 6.3a – Minerale con fratture lungo allineamenti preferenziali [19]*



*Fig. 6.3b – Minerale con superfici di rottura concoidali e levigate [19]*

La qualità dell'aggregato, infine, è riferita alla capacità di resistere a fenomeni di degrado dovuti, ad esempio, a fattori climatici e/o ambientali (cicli di gelo/disgelo, caldo freddo) che possono determinare ulteriori fratture e frammentazioni delle superfici lapidee.

Numerose sono le prove standardizzate utili alla caratterizzazione degli inerti impiegati nelle miscele di conglomerato bituminoso; un quadro sinottico dei test maggiormente utilizzati a livello internazionale è riportato in *Tabella 6.2* [20].

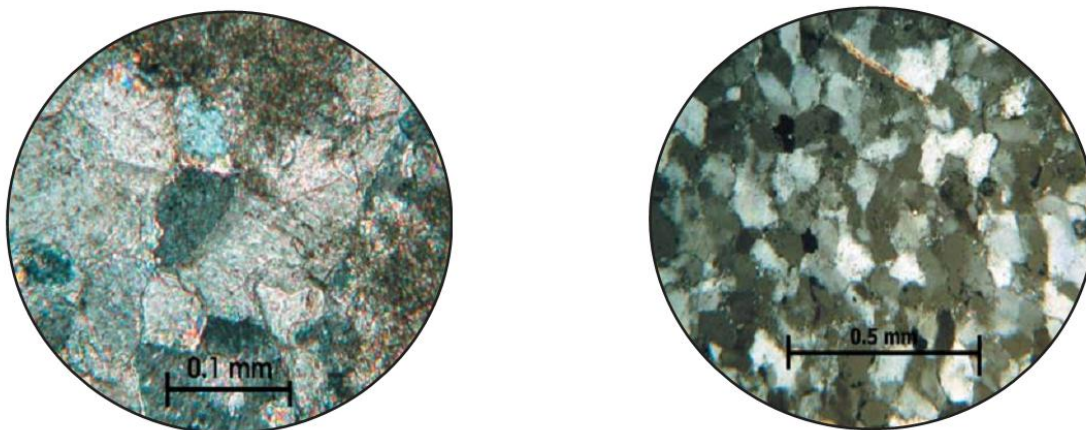
Caratteristica	Protocollo di prova	Range ottimali
Durezza	Mohs - Prove di rigatura	Materiali duri: >6 Materiali teneri: da 3 a 5
Composizione Mineralogica	ASTM C294 [21]	
	ASTM C295 [22]	
Spigolosità, forma	ASTM C1252 [23]	>=45
	ASTM D5821 [24]	>=45
Resistenza all'usura/abrasione	ASTM C131 [25]	<= 17-20
	ASTM C535 [26]	
	ASTM D 6928 [27]	<= 35 - 45
Resistenza alla levigatura	ASTM D3042 [28]	>= 50-70
	ASTM E303 [29] & D3319 [30]	<= 50-70
	ASTM D3042 [31]	<=30 -35
Soundness	ASTM C88 [32]	<= 10-20

Tabella 6.2 Principali caratteristiche degli aggregati lapidei e relativi protocolli di prova

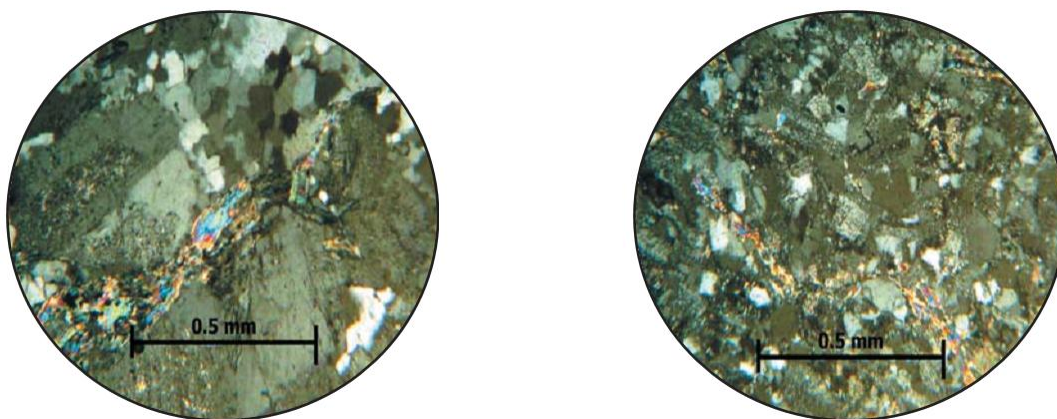
### 6.2.1 L'analisi petrografica e la composizione mineralogica: alcune considerazioni sulle diverse tipologie di aggregati

Una roccia viene tipicamente definita come un aggregato naturale di minerali, cristallini e/o amorfi, particelle e solidi di vario tipo. Diverse sono le tipologie di roccia presenti in natura a seconda della modalità di formazione, della composizione mineralogica e dell'orientamento dei granuli. Alcune rocce sono costituite da un'unica tipologia minerale (in termine anglosassone "single-mineral"); è il caso del calcare (*Fig. 6.3*) o delle rocce di quarzite (*Fig. 6.3*). Le rocce composte da minerali di diversa natura sono ad esempio i graniti, le dioriti, le anfiboliti, ecc. Da una roccia all'altra o all'interno della stessa famiglia di rocce o di depositi minerali la dimensione dei granuli può variare in maniera considerevole, assumendo proporzioni maggiori (*Fig. 6.4*) o minori (*Fig. 6.4*), od essendo perfino eteromorfa. Anche l'orientamento dei solidi cristallini può essere casuale senza struttura ben definita o preferenziale (*Fig. 6.5*) [19].

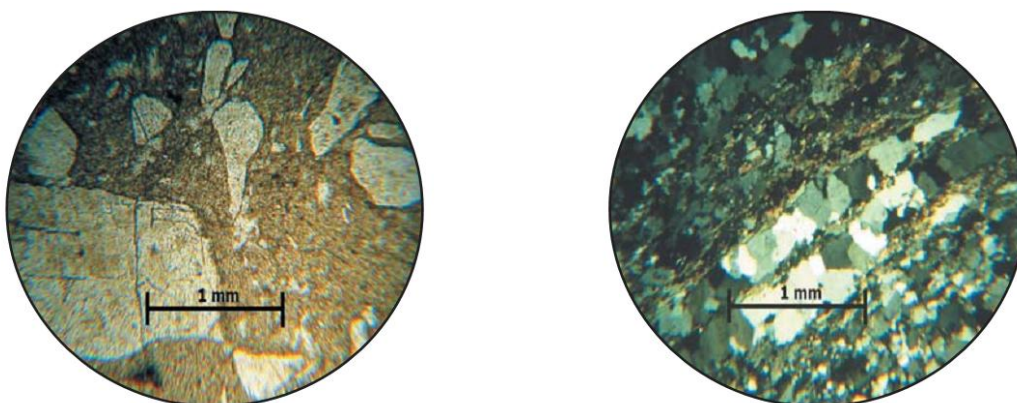




*Fig. 6.3 - Rocce costituite da un'unica tipologia minerale (sx: calcare, dx:quarzite)*



*Fig. 6.4 - Rocce costituite da più minerali*



*Fig. 6.5 – Variabilità della dimensione dei granuli e dell'orientazione*

Caratterizzare dal punto di vista petrografico un inerte significa individuare l'origine della roccia da cui esso proviene, stabilirne la struttura e tessitura individuando forme, dimensioni e



distribuzione dei granuli e dei cristalli consolidati, nonché determinare la composizione qualitativa e quantitativa dei minerali presenti. L'esame petrografico è uno strumento prezioso per comprendere il processo di levigatura e per fornire informazioni idonee, di tipo quantitativo sulla qualità dell'aggregato (Do et al, 2002 [33]; Shupe 1960 [34]).

Le rocce ignee e metamorfiche, ad esempio, sono meno suscettibili alla levigatura rispetto alle rocce sedimentarie (West et al., 2001 [35]).

Il calcare, tra i più comuni aggregati lapidei utilizzati nella costruzione di strade, è il più suscettibile alla levigazione e offre, generalmente, bassi livelli di micro rugosità superficiale (Csathy et al., 1968 [06]). Per alcuni tipi di aggregati carbonati (ad esempio la dolomite), la suscettibilità alla levigatura diminuisce all'aumentare del contenuto di argilla (West et al., 2001 [35]), mentre aumenta all'aumentare del contenuto di calcite e dolomite (Liang e Chyi, 2000 [36]).

La resistenza alla levigatura del calcare, inoltre, diminuisce in maniera inversamente proporzionale alla sua purezza (Shupe e Lounsbury, 1958 [37]); un contenuto di particelle silicee del 25% fa registrare un incremento considerevole dell'aderenza offerta (Bloem, 1971 [38]). Gruppi di minerali come basalto, granito e quarzite possiedono una buona resistenza alla levigatura, dovuta essenzialmente alla presenza di feldspati e grani di quarzo frantumato e quarzite che conservano più a lungo la microrugosità superficiale dei granuli. Il basalto garantisce un'elevata resistenza grazie ad una composizione chimica di tipo poliminerale. La Fig. 6.6 mostra quattro diverse tipologie di aggregato minerale; per ciascuna di esse si verificano modalità diverse di comportamento sotto le azioni di usura dovute al traffico veicolare. La prima tipologia di inerte, caratterizzato da un'elevata durezza, spigoloso, composto da un solo minerale è maggiormente resistente al processo di levigatura, ma, nel tempo, la progressiva usura determina una modifica sostanziale della morfologia fino a smussare completamente gli angoli dell'inerte e renderlo di forma arrotondata.

Il secondo tipo di aggregato ha un comportamento simile al primo tranne per il fatto che i cristalli minerali non sono ben cementati insieme. La massa minerale più tenera si logora in fretta, esponendo i grani duri e fornendo una superficie continuamente rigenerata. Prima della lucidatura delle asperità dei grani più duri, la matrice tenera viene usurata a tal punto da non poter più trattenere le particelle maggiormente resistenti, permettendo loro di fuoriuscire dalla matrice e di esporsi in superficie. (Abdul-Malak et al., 1990 [39]; Skerritt, 1993 [40]). Gli aggregati costituiti da minerali spigolosi, di dimensioni consistenti e di durezza elevata,

uniformemente distribuiti in una matrice minerale più tenera, offrono livelli di aderenza sicuramente elevata.

La terza e quarta tipologia di inerte si comportano in maniera pressoché analoga; entrambe sono costituite da minerali più duri e minerali più teneri. Questi ultimi, nel caso dell'inerte di tipo quattro, sono rappresentati dai vuoti presenti nella struttura cristallina. Entrambe le tipologie di aggregato, durante il processo di erosione, subiscono la rottura dei grani più teneri a favore dell'emersione di quelli più resistenti (Luce, 2006 [41], [42]).

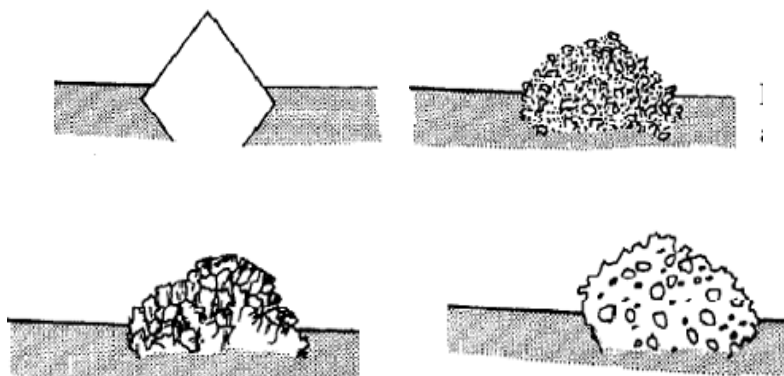


Fig. 6.6 – Struttura microcristallina di diverse tipologie di aggregati [43]

### 6.2.2 La provenienza degli aggregati lapidei: inerti naturali e artificiali.

In merito alla provenienza gli inerti tipicamente utilizzati nelle costruzioni stradali possono essere classificati in due importanti macrofamiglie: aggregati naturali e aggregati artificiali.

Si definiscono naturali gli aggregati provenienti dalla frantumazione di rocce massive o materiali granulari presenti in natura. Quelli artificiali, invece, possono essere ottenuti in una duplice maniera, ossia attraverso processi chimici appositamente ideati o derivati, come sottoprodotti, da processi di produzione di altri materiali. L'impiego di prodotti alternativi è, ad oggi, una delle soluzioni principali alla problematica della crescente difficoltà di reperire in natura prodotti di alta qualità. Gli aggregati artificiali che mostrano le migliori prestazioni meccaniche e fisiche e resistenze maggiori ai fenomeni di usura sono l'argilla espansa, la bauxite calcinata, le scorie d'altoforno e/o di acciaieria, la cromite, i prodotti ceramici, ecc. In Fig. 6.7 è riportato il confronto fra le prestazioni di inerti artificiali e comuni inerti naturali, in termini di aderenza misurata con l'apparecchio a pendolo portatile. Tra gli inerti artificiali spiccano i valori della bauxite calcinata; per contro si può osservare le scadenti prestazioni dei calcari [12].

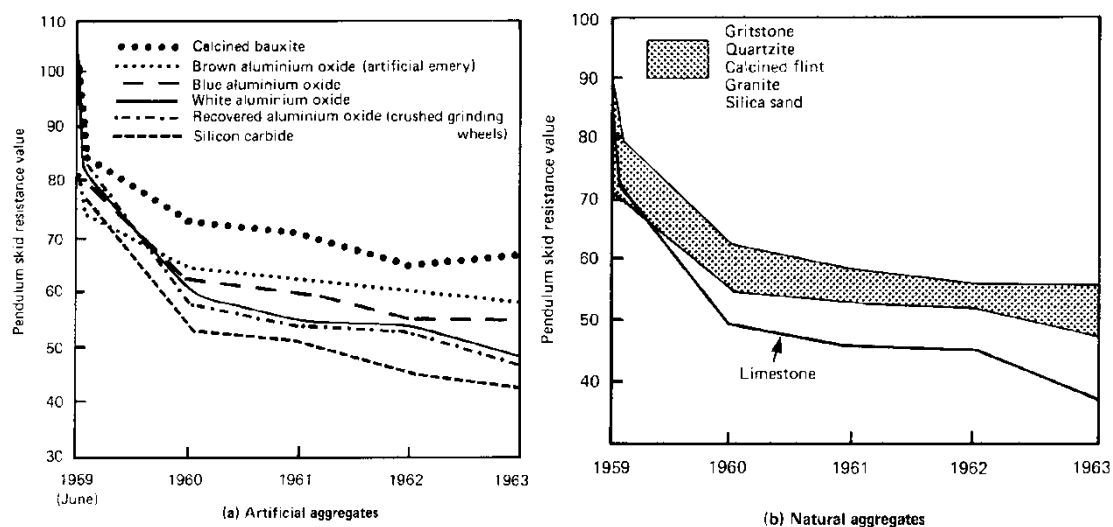


Fig. 6.7 – Confronto delle prestazioni di aggregati artificiali (sx) e naturali (dx)

Conferme di questi risultati arrivano anche da studi condotti da Neville sugli aggregati artificiali [44]; le ottime qualità della bauxite calcinata sono dovute alla sua particolare struttura: cristalli di corindone ( $H=9$ ) immersi in una matrice vetrosa ( $H=6$ ) con presenza di cristalli di mullite ( $H=7$ ).

L'argilla espansa è un aggregato artificiale ricavato dalla cottura in forni rotanti a circa  $1200^{\circ}\text{C}$  di argille particolari. Pur se pochi risultano essere gli studi di letteratura sull'impiego di tale materiale nella produzione dei conglomerati bituminosi per strati di usura (Roberts et al, 1996 [45]; Wasilewska e Gardziejczyk, 2005 [46], Kowalski, 2007 [47]), la tecnica stradale da alcuni anni promuove l'impiego di questa tipologia di materiale al fine di aumentare le prestazioni superficiali delle pavimentazioni in termini di aderenza e di garantire livelli di micro e macrotestitura della pavimentazione il più possibile adeguati nel tempo, limitando il processo di decadimento ad opera del traffico veicolare. L'utilizzo dell'argilla, infatti, grazie alle sue proprietà meccaniche e di micro rugosità superficiale permette di mantenere costante e a valori elevati l'aderenza offerta dalla pavimentazione stradale in condizioni di esercizio, rispondendo con una maggiore resistenza all'usura dovuta ai carichi dinamici dei veicoli.

In fase di riscaldamento l'argilla cruda incontrando temperature sempre maggiori subisce, come conseguenza allo sviluppo di anidride carbonica e di acqua, un aumento di volume. In seguito al processo di raffreddamento il materiale risulta di forma tondeggiante, con una superficie particolarmente ruvida, con una scorza esterna clinkerizzata ed una struttura interna fatta di microalveoli distribuiti in maniera omogenea all'interno del granulo.

Una ricerca interessante in merito all'impiego dell'argilla espansa nei conglomerati bituminosi è stata condotta da Losa (Losa, 2008, [48]). In questo lavoro vengono messe a confronto tre diverse miscele, una realizzata con il 100% di inerte basaltico, la seconda fatta di sola argilla espansa (5/10mm) e la terza costituita dal 15% in peso di argilla e con aggregati di diverso tipo come schematizzato in *Tabella 6.3*.

	Basalt	Gravel	Sand	Structural Expanded Clay 5–10	Mineral Filler
Proportions by volume (%)	13.2	13.2	37.3	29.6	6.7
Proportions by weight (%)	15.6	16.6	44.8	15.0	8.0

*Tabella 6.3 - Composizione della miscela con argilla espansa oggetto della ricerca [48]*

I test di levigabilità accelerata, condotti secondo quanto prescritto dalla norma UNI EN 1097-8 [49] mostrano un incremento del 20% circa dei valori di PSV (Polished Stone Value) della miscela con argilla rispetto alle miscele tradizionali (*Tabella 6.4*). Tale incremento viene attribuito alla struttura microporosa dell'argilla che, subendo il processo di levigazione, presenta una superficie continuamente rigenerata con elevata micro rugosità.

Mix	PSV (%)	Increase Compared to Traditional Asphalt Concrete (%)
Traditional asphalt concrete with basaltic aggregate	41	
Asphalt concrete with expanded clay only	69	68.3
Research mix	49	19.5

*Tabella 6.3 - Risultati del test di levigabilità sulle miscele oggetto di studio nella ricerca [48]*

L'analisi degli spettri di tessitura superficiale (post elaborazione del segnale profilo da rilievo profilometrico laser) evidenzia come una miscela con argilla espansa presenti un aumento delle ampiezze di tessitura alle basse lunghezze d'onda (microtessitura) ed una diminuzione delle ampiezze di tessitura alle alte lunghezze d'onda (macrotessitura) (*cfr. Fig.6.8*).

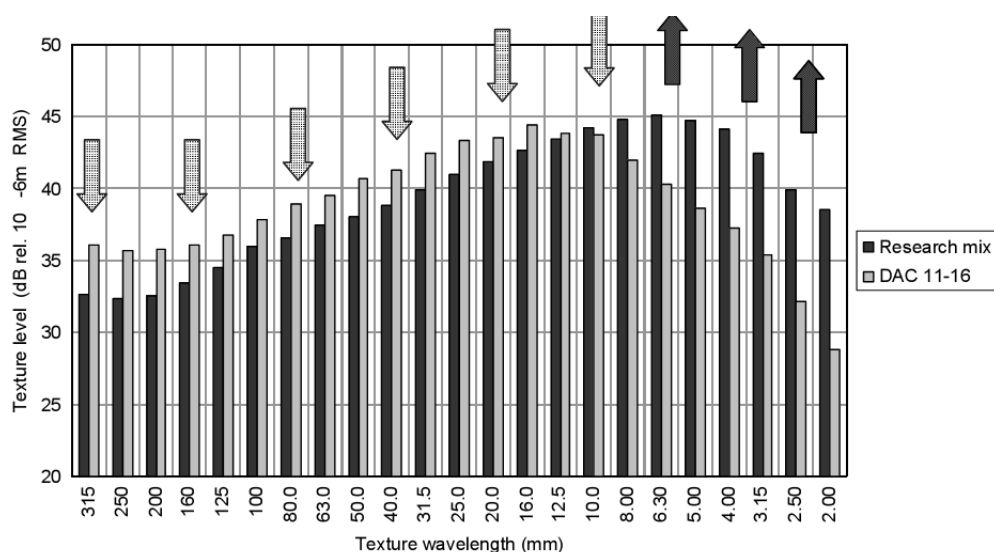


Fig. 6.8 – Confronto fra i livelli di tessitura della miscela con e senza argilla espansa [48]

Anche i rilievi dell'aderenza con Skiddometer BV11 a 20Km/h mostrano livelli di aderenza ottimali (valori di FN60 circa due volte superiori rispetto agli standard stabiliti dalle norme tecniche) per la miscela costituita dal 15% in peso da argilla espansa (cfr. Fig.6.9). Tale spiccata proprietà dipende dalla micro rugosità superficiale dell'aggregato artificiale utilizzato all'interno della matrice bituminosa.

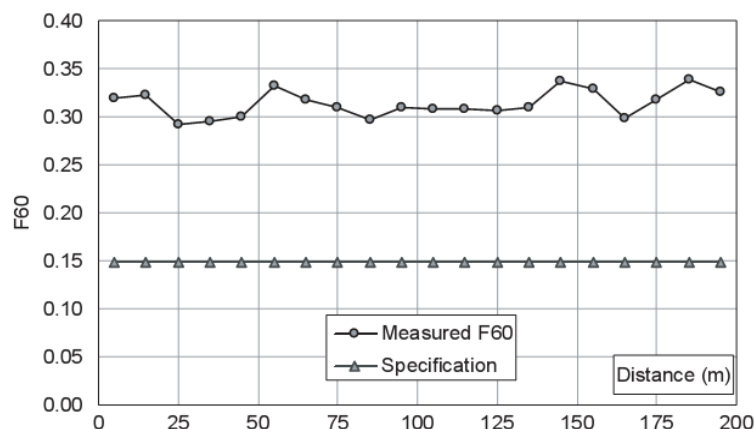


Fig. 6.8 – Effetti dell'argilla espansa sull'aderenza

### 6.3 IL LEGANTE BITUMINOSO

Alcuni studi di letteratura [50], [51], mostrano come la combinazione dei due fattori compositivi principali del conglomerato bituminoso (aggregati e legante) abbia una influenza notevole sul fenomeno evolutivo che interessa la microtessitura, e conseguentemente

l'aderenza, delle superfici stradali. Tale effetto è ancora più significativo nei primi mesi di vita utile delle pavimentazioni, nella cosiddetta fase di "early life skid resistance", ed in condizioni di superficie bagnata.

La microtessitura degli aggregati, infatti, diviene fattore determinante nel garantire adeguati livelli di aderenza al contatto pneumatico-pavimentazione a partire dal momento in cui la superficie stessa dell'aggregato è "esposta" all'azione del traffico, avendo preventivamente subito un processo di spogliamento, ossia di perdita del film di bitume superficiale. Osservazioni sperimentali sulle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni, in termini di aderenza, mostrano che inizialmente anche la quantità e la tipologia di bitume che ricopre il singolo aggregato giocano un ruolo determinante nell'evoluzione delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento. La presenza di acqua sulla superficie, inoltre, accelera il fenomeno di spogliamento, anticipandolo nel tempo. Aggregati scarsamente ricoperti dalla pellicola di bitume, soggetti a fenomeni di isteresi al contatto con la gomma del pneumatico, subiscono preventivamente il processo di spogliamento.

L'utilizzo di aggregati con valori di PSV elevati può, dunque, non essere sufficiente al fine di garantire adeguati livelli di aderenza, soprattutto nei primi mesi di vita della pavimentazione. Al contrario, l'impiego di aggregati con valori di PSV più bassi, che si spogliano più facilmente, contribuisce al miglioramento dell'aderenza superficiale iniziale, offrendo subito una micro tessitura più evidente perché più facilmente scoperta del film bituminoso.

Anche la tipologia di legante impiegata determina fenomeni evolutivi sostanzialmente diversi da miscela a miscela. Studi di letteratura, a tal proposito, mostrano come per miscele di usura realizzate con bitumi modificati, a 4 anni dalla posa in opera, la completa esposizione degli aggregati in superficie non sia ancora avvenuta. Il bitume modificato con l'aggiunta di polimeri, infatti, possiede marcate proprietà elastiche e coesive che determinano una maggiore difficoltà nell'innescarsi del processo di spogliamento, anche perché il film di legante che ricopre l'inerte ha uno spessore maggiore e i legami adesivi legante/aggregato risultano più forti. Il progetto SKIDGRIP [50], [51], finalizzato allo studio dell'evoluzione della early life skid resistance, mostra risultati interessanti registrati in situ, relativamente ad una usura di tipo SMA (split mastix asphalt): si osserva, infatti, nelle fasi iniziali del monitoraggio un vero e proprio "crollo" dei valori di aderenza misurati, seguito poi da un consistente nuovo incremento smorzato nel tempo dalla progressiva usura ad opera del traffico veicolare. Il



processo determina, infine, una stabilizzazione dei valori di aderenza che tendono asintoticamente ad un valore limite finale.

In particolare, le osservazioni in situ mostrano che la pellicola di bitume che ricopre gli aggregati diventa in un primo momento ancora più liscia e levigata così da giustificare la diminuzione iniziale dell'aderenza. Solo successivamente con il fenomeno di spogliamento si registra quel fenomeno comunemente noto come incremento dell'aderenza dovuto all'incremento della percentuale di superficie dell'inerte lapideo esposta. Se la quantità di bitume è elevata anche questa seconda fase viene parzialmente smorzata e posticipata nel tempo. Se, poi, la percentuale dei vuoti è esigua e la miscela è ricca di bitume il fenomeno che sopraggiunge è quello dello spargimento del bitume sulla superficie esposta nonché dell'occlusione dei vuoti presenti, con un'ulteriore diminuzione dell'aderenza offerta.

Tali risultati sperimentali di situ vengono confermati da indagini di laboratorio effettuate dai medesimi autori su provini di SMA confezionati ad hoc, per i quali è stata monitorata l'evoluzione dell'aderenza superficiale (espressa in termini di BPN) (cfr. Fig. 6.10). Ad intervalli di tempo prefissati, dopo successivi step di prova di levigabilità accelerata (tramite metodo PSV) in condizioni bagnate è stata, inoltre, determinata la percentuale di superficie lapidea esposta. La presenza del bitume sulla superficie dell'aggregato nelle prime fasi di vita utile della pavimentazione (ossia in corrispondenza dei primi minuti della prova) fa sì che l'aderenza non sia direttamente ed esclusivamente legata al PSV degli aggregati ma anche e soprattutto alla percentuale di bitume perso che, a sua volta, risulta strettamente correlata ai valori di PSV degli aggregati lapidei.

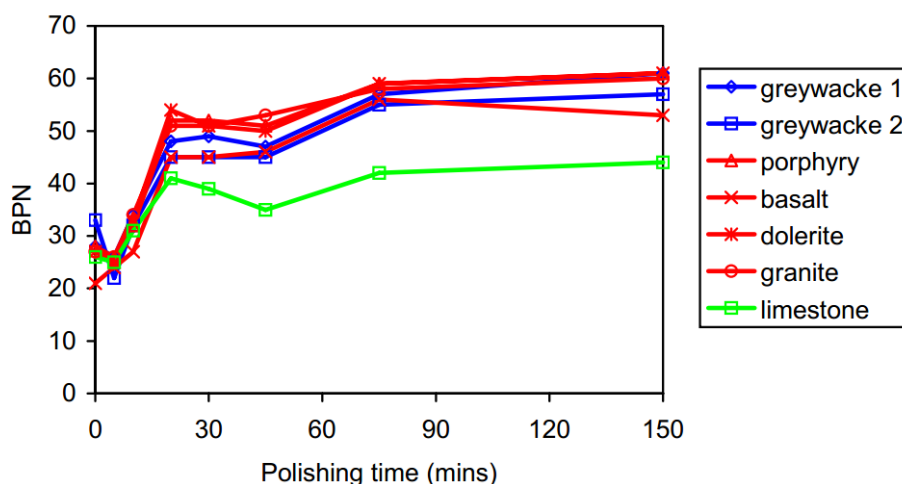


Fig. 6.10 – Variazione del BPN nel tempo in funzione della tipologia di aggregato

Dal confronto fra provini realizzati con un bitume normale (200pen) e provini confezionati con l'impiego di bitume modificato (100 pen polymer modified binder) si evince quanto segue (Fig.6.11):

- per i provini con bitume modificato anche dopo 11 ore di levigatura non si registrano incrementi di aderenza (espressa in termini di BPN);
- per i medesimi provini di cui sopra non si osservano incrementi di superficie lapidea esposta;
- l'unico aggregato che mostra un incremento di BPN iniziale è quello con un valore di PSV più basso rispetto agli altri.

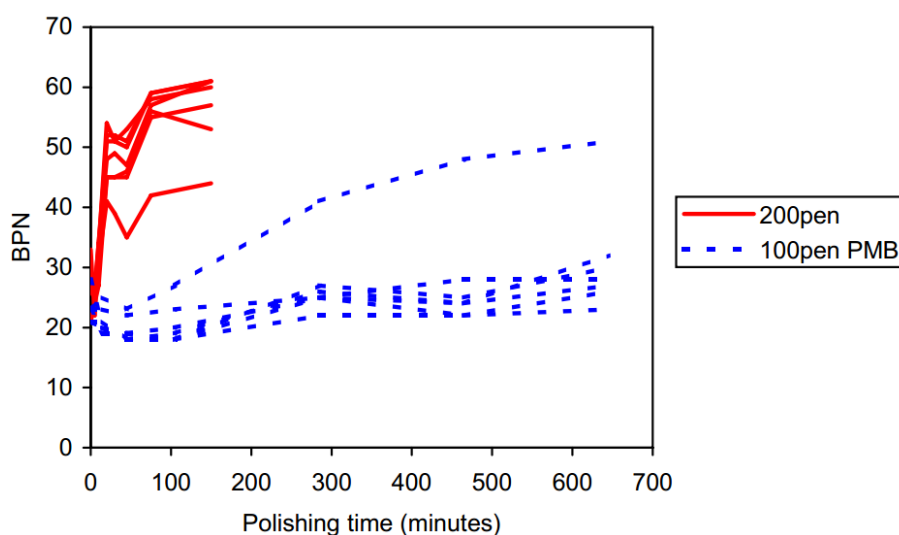


Fig.6.11- Differenza nel fenomeno evolutivo del BPN per tipologia di legante

Questo esperimento di laboratorio mostra come l'impiego nelle miscele di conglomerato bituminoso di aggregati con PSV elevato non sia sufficiente a garantire adeguati valori di aderenza iniziale, soprattutto nel caso in cui ricorre all'impiego di leganti additivati o modificati.

Uno studio analogo [53] mostra alcune considerazioni di rilievo anche in merito alla profondità di tessitura nelle fasi iniziali della vita utile della pavimentazione. La ricerca in questione, finalizzata anche al monitoraggio delle differenze in termini di micro e macrotessitura legate alla dimensione massima degli aggregati per tre miscele di SMA, mostra per la tessitura superficiale trend simili a quelli osservati in precedenza per l'evoluzione temporale dell'aderenza espressa in termini di BPN (Fig.6.12).

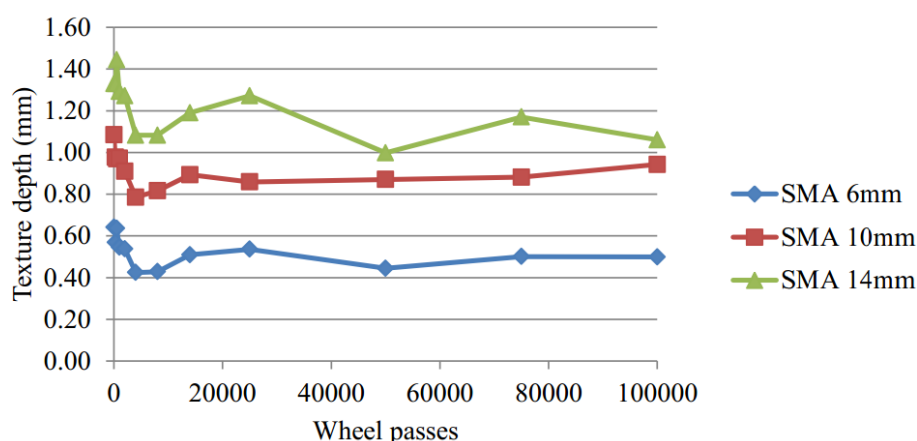


Fig.6.12- Variazione della tessitura superficiale in funzione della dimensione massima dell'aggregato lapideo

Uno zoom delle prime fasi della prova (da 0 a 14000 passaggi della Road Test Machine, RTM, impiegata per il test di levigabilità) consente di trarre le seguenti considerazioni:

- durante le prime centinaia di passaggi della ruota della RTM si registrano lievi variazioni di profondità di tessitura, probabilmente legate a fenomeni di migrazione del bitume;
- il fenomeno di migrazione del legante bituminoso determina intorno ai 4000 passaggi una riduzione più consistente della profondità di tessitura;
- la rimozione successiva del bitume precedentemente “migrato” fa sì che si registri un nuovo incremento di macrotessitura.

Quest'ultimo fenomeno di incremento della macrotessitura potrebbe registrarsi persino in corrispondenza di un numero molto elevato di passaggi (*cfr. Fig.6.12*), ad indicare un importante fenomeno di lucidatura e frammentazione degli inerti che determina perdite di porzioni di materiale lapideo dovute al distacco dell'inerte dalla matrice bituminosa.

#### 6.4 VARIABILITÀ IN SENSO LONGITUDINALE: GEOMETRIA DEL TRACCIATO

Le caratteristiche superficiali di una pavimentazione stradale vengono influenzate anche dalla posizione longitudinale in cui è eseguita la misura. La variazione della tessitura (micro e macro) nel senso longitudinale è dovuta, oltre che allo specifico manto stradale messo in opera, anche alla geometria del tracciato, nella misura in cui, ad esempio, la percorrenza di una curva o l'approssimarsi ad un incrocio richiedono un maggiore impegno di aderenza, maggiori diventano le sollecitazioni trasmesse dal veicolo alla superficie stradale e, di conseguenza, più

rapido è il degrado in tali zone. E' evidente, dunque, la necessità di una corretta omogeneizzazione e aggregazione dei dati monitorati su sezioni stradali a diversa geometria, in quanto sussistono differenze nelle condizioni di aderenza lungo un tracciato fra elementi con raggi di curvatura diversi. L'individuazione delle tratte omogenee, ovverossia dei segmenti del tronco stradale in cui il livello di aderenza e/o di tessitura si può considerare costante, risulta, dunque, propedeutico ad una corretta interpretazione dei risultati sperimentali ottenuti e ad una adeguata valutazione del fenomeno evolutivo che interessa le performance superficiali del piano di rotolamento [12]. Le manovre di frenatura o cambio di direzione effettuate da un veicolo in moto sulla superficie stradale (legate, ad esempio, alla percorrenza di un elemento curvilineo del tracciato) determinano l'insorgere di sforzi di natura tangenziale sulla superficie di contatto pneumatico-pavimentazione. In particolare, tali sforzi tangenziali sono responsabili di fenomeni di decadimento più rapidi delle performance superficiali del piano di via e possono addirittura innescare fenomeni di "strappo" degli aggregati lapidei dalla matrice di conglomerato bituminoso, con evidenti effetti sulla aderenza disponibile al contatto. Uno dei fattori che determina l'insorgere degli sforzi tangenziali al contatto pneumatico-pavimentazione è la variabilità nella distribuzione del carico veicolare dovuta al fatto che la traccia geometrica della ruota passa da una condizione di moto in rettilineo ad una variazione della direzione in curva. In particolare, infatti, la forza centrifuga dovuta alla percorrenza di una curva determina il trasferimento del carico dalle ruote interne verso quelle più esterne alla curva del 10-20 % (Fig. 6.13), secondo misurazioni francesi [53] e fino al 60 %-80% secondo gli studi belgi [54] e australiani.

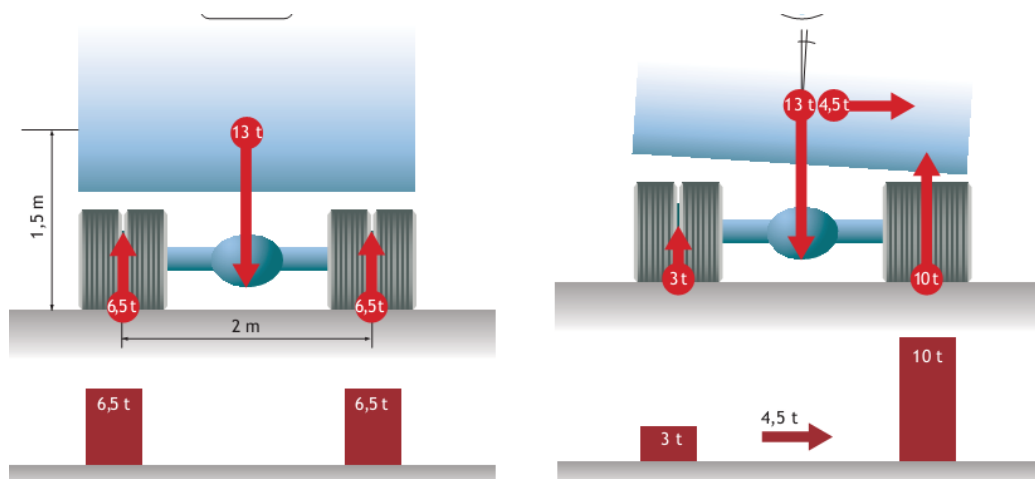


Fig. Fig.6.13- Ripartizione del carico veicolare nel caso di moto in rettilineo (sx) o in curva (dx)

L'entità di tale trasferimento dipende dal carico statico applicato, dall'aderenza superficiale, dall'altezza del baricentro del veicolo, misurata rispetto al piano di rotolamento, e dall'interasse fra le ruote del veicolo. Valutare gli effetti delle azioni tangenziali che così insorgono significa comprendere le differenze di fenomenologia connesse all'evoluzione delle caratteristiche superficiali in rettilineo e in curva. Minori sono i raggi di curvatura maggiori sono gli sforzi di natura tangenziale che insorgono al contatto pneumatico-pavimentazione.

Uno studio francese condotto da Hamlat (2007) [55] mostra risultati interessanti in merito all'evoluzione della tessitura superficiale di provini di laboratorio soggetti a carichi di natura dinamica generanti sforzi tangenziali di contatto. La ricerca in questione, dunque, fornisce indicazioni utili alla comprensione di tutti i meccanismi che si verificano alla scala della micro e della macro tessitura per condizioni di sollecitazione esterna indotta su provini di conglomerato bituminoso nell'intento di simulare gli effetti di un carico veicolare che percorre una traiettoria curvilinea. A tale scopo il contatto pneumatico-pavimentazione è stato ricreato in laboratorio attraverso l'utilizzo di un dispositivo messo a punto dal Laboratoire Central des Ponts et Chaussée (LCPC) nel 2000, denominato T2R (Tribomètre pour Revêtement Routier). Tale strumento simula l'azione dovuta al carico esercitato da una ruota sulla superficie stradale tramite un pattino con morfologia della superficie assimilabile ad una spirale logaritmica. Le proprietà geometriche della spirale logaritmica consentono di generare sulla zona di contatto uno sforzo di taglio identico in ciascun punto dell'area di contatto stessa. L'angolo che si forma tra la verticale e la linea di carico che collega il centro di rotazione e il punto di contatto con il provino si mantiene costante a  $45^\circ$ . L'applicazione di una forza sinusoidale attraverso il pattino logaritmico si traduce localmente in uno sforzo di taglio indotto e in uno scorrimento sulla zona di contatto. Lo sforzo di taglio così indotto dipende dalle proprietà reologiche dei due materiali in contatto e dalla tessitura della superficie.

In particolare, un primo interessante risultato riguarda alcune osservazioni sperimentali sull'evoluzione delle condizioni di aderenza superficiali per un provino soggetto ad un carico ciclico alla frequenza di 1Hz tramite l'azione del pattino. I dati ottenuti mostrano la variabilità dell'aderenza e della velocità di scorrimento del pattino al variare del rapporto fra l'ampiezza e il valore medio del carico applicato (*cfr. Fig.6.14*)

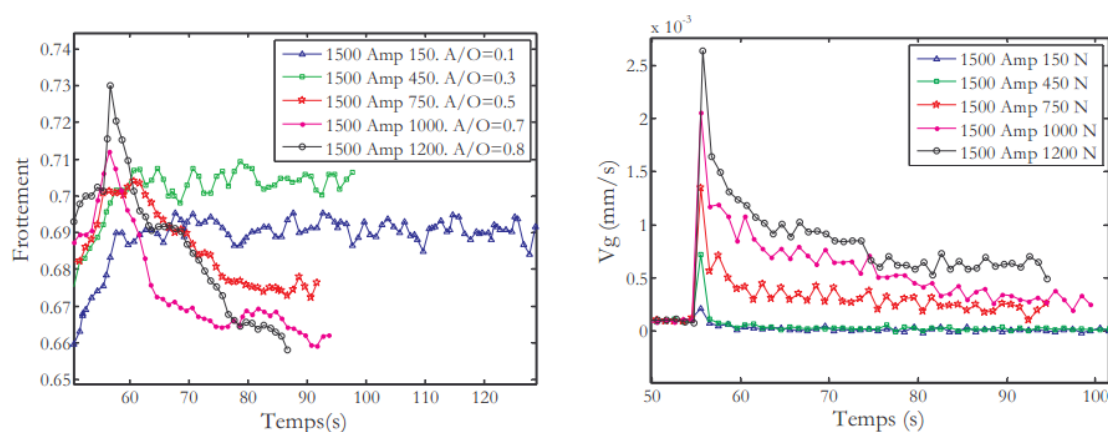


Fig.6.15- Influenza del rapporto ampiezza/valore medio del carico sull'evoluzione delle condizioni di aderenza [55]

Dai grafici di Fig.6.15 si osserva che la condizione per cui il livello di aderenza si mantiene il più possibile elevato nel tempo e, parallelamente, la velocità di scorrimento registrata è più bassa, è quella per cui il rapporto fra ampiezza e valore del carico verticale è pari a 0.3. Aumenti di carico determinano repentini abbattimenti del coefficiente di aderenza misurato.

La ricerca, inoltre, mostra come l'evoluzione della tessitura dovuta ad azioni di natura tangenziale sia caratterizzata da due fasi distinte: in un primo momento si verifica lo spogliamento degli inerti e una simultanea migrazione del legante nei vuoti del conglomerato. Gli aggregati, parallelamente, subiscono movimenti di traslazione e rotazione con un riarrangiamento superficiale degli stessi. Esaminando un provino soggetto ad una sollecitazione ciclica di 1500+500N ad una frequenza di 1HZ si osserva un vero e proprio cambiamento della morfologia della superficie (cfr Fig.6.16)

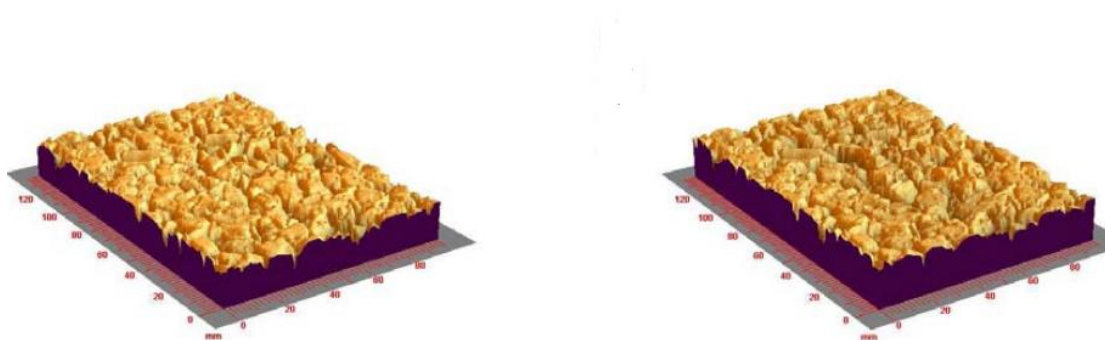


Fig.6.16 – Evoluzione della tessitura superficiale per l'azione di sforzi tangenziali



Dopo 6000 cicli di carico, la superficie di contatto si riduce dell' 8.5%. Una rappresentazione degli istogrammi delle altezze dei picchi superficiali tramite curva di Abbot conferma questa evoluzione delle ampiezze di tessitura e la formazione di nuovi picchi.

Prolungando i cicli di carico, si passa alla seconda fase dell'evoluzione che vede un vero e proprio distacco degli aggregati dalla superficie con perdita di massa che varia in funzione della granulometria e della tipologia di legante utilizzato nella miscela. Per comprendere cosa accade ad un inerte isolato a causa dell'insorgere di sforzi tangenziali è utile osservare la schematizzazione del fenomeno in Fig. 6.17:

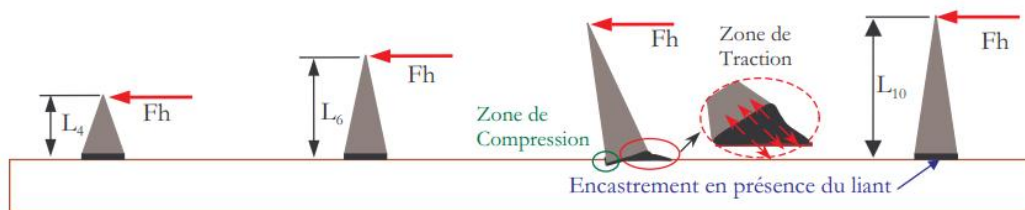


Fig. 3.15- Représentation d'un granulat isolé par une poutre console encastrée

Fig.6.17 – Azione di uno sforzo di taglio su singolo aggregato lapideo

In particolare, da tale rappresentazione, si evince che l'azione di una forza tangenziale  $F_h$  alla sommità di un aggregato determina un momento alla base dell'inerte che è proporzionale alla distanza fra il punto di incastro dello stesso e la sua sommità. Tale momento causa l'insorgere di una forza di trazione lungo la superficie di incastro. Osservando il conglomerato nel suo complesso, invece, poiché gli aggregati si trovano in un'unica matrice e possiedono dimensioni diverse, la cinematica che interessa il singolo inerte lapideo è dunque fortemente condizionata dal posizionamento dello stesso all'interno della matrice e rispetto agli altri aggregati. Il momento flettente che si genera a causa dello sforzo tangenziale viene in parte contrastato localmente dagli aggregati che fungono da ostacolo allo strappo; il momento di incastro che si oppone alla rotazione dell'aggregato dipende dal livello di compattazione dello strato superficiale. L'effetto della porosità della miscela sul fenomeno è schematizzato in Fig.6.18.

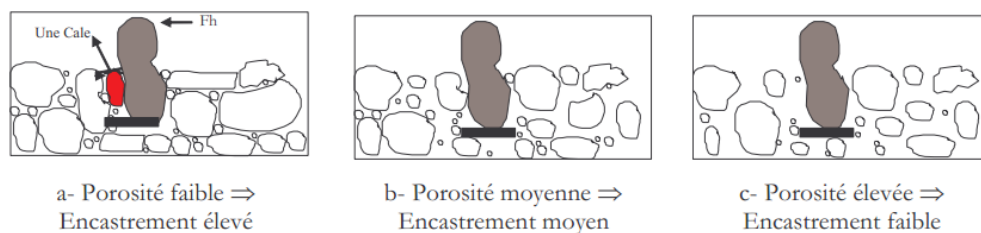


Fig.6.18 – Effetto della porosità della miscela sulla resistenza dell'aggregato agli sforzi tangenziali

La perdita di massa del conglomerato, identificata nello studio in questione [55] come l'indicatore della resistenza agli sforzi tangenziali, risulta essere fortemente influenzata dalla tessitura superficiale della pavimentazione espressa in termini di  $R_q$  (Root Mean Square Roughness, mm) secondo una legge di tipo esponenziale (cfr. Fig. 6.19)

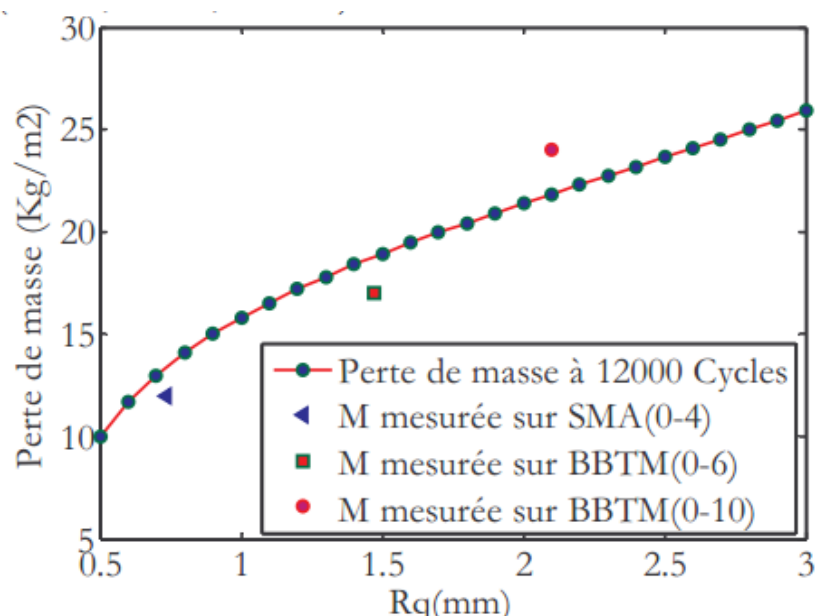


Fig. 6.19 – Perdita di massa in funzione della tessitura superficiale espressa in termini di  $R_q$

Lo studio mostra, inoltre, come la resistenza agli sforzi tangenziali sia inversamente proporzionale alla dimensione massima dell'aggregato lapideo e dipenda fortemente dalla tipologia di legante utilizzato.

Da quanto finora esposto, dunque, risulta evidente come l'insorgere degli sforzi tangenziali dovuti alla percorrenza di una traiettoria curvilinea possano determinare l'insorgere di fenomeni evolutivi delle performance superficiali alquanto complessi fino a determinare dei veri e propri fenomeni di distacco degli aggregati dalla matrice del conglomerato. Tutto ciò è indicativo di quanto il fenomeno di decadimento della tessitura superficiale possa essere molto più veloce e importante per i tronchi stradali in curva rispetto alle sezioni monitorate in rettilineo. L'analisi di letteratura conferma, in definitiva, l'identificazione della geometria del tracciato come elemento di variabilità nel processo evolutivo delle performance del piano di rotolamento di una infrastruttura viaria.

## 6.5 ENTITÀ DEL TRAFFICO VEICOLARE

Come già descritto in precedenza, le sollecitazioni trasmesse dal traffico veicolare alla pavimentazione stradale sono responsabili del progressivo fenomeno di disgregamento e lucidatura degli inerti, e determinano, quindi, una diminuzione costante del livello di tessitura e di aderenza, fino al raggiungimento di un valore terminale.

La caratterizzazione del traffico, in particolare la valutazione dell'effetto combinato dovuto al flusso di veicoli diversi in termini di tipologia, carichi, e configurazioni degli assi e dei pneumatici, è di fondamentale importanza in qualsiasi tipo di valutazione analitica relativa alle condizioni superficiali del piano di rotolamento. In teoria, il passaggio di ogni pneumatico su una pavimentazione provoca un danno, pur se di minima entità. Il danno cumulato dato dal passaggio di un certo numero di veicoli in un'unità temporale determina l'effettivo stato evolutivo della pavimentazione stradale. La modellazione dell'effetto derivante da ogni carico è senza dubbio un'operazione difficile, per cui diviene necessario ricorrere a parametri rappresentativi del traffico veicolare sia in termini di intensità che di spettro. Nasce, dunque, l'esigenza di individuare un criterio per omogeneizzare opportunamente il "danno" provocato in termini di diminuzione del livello di aderenza dalla varie categorie di veicoli.

Poiché non sono stati ancora pienamente compresi i fenomeni responsabili della diminuzione di aderenza ad opera del traffico, non esiste un unico criterio che fornisca un fattore di equivalenza tra veicoli diversi.

Il metodo maggiormente utilizzato per aggregare gli effetti di un flusso di traffico non omogeneo consiste nell'applicazione del concetto di assi equivalenti standard (ESA).

Alcuni studiosi [56], [57], suppongono che il danno dovuto all'azione veicolare sulla pavimentazione sia proporzionale al numero di pneumatici ed all'estensione dell'area di impronta per cui pervengono ad un fattore di equivalenza veicolo pesante/autoveicolo pari a 8.5 – 10. Altri invece [58], [59] suppongono che il danno sia proporzionale anche alle pressioni (normali e/o tangenziali) esercitate dai pneumatici per cui ricavano un fattore di equivalenza veicolo pesante/autoveicolo pari a 40. Si può facilmente verificare che, adottando quest'ultimo valore del fattore di equivalenza e considerando le comuni percentuali di mezzi pesanti per strade a forte traffico (20 – 30 %), nella valutazione del danno totale si commette un errore trascurabile nel considerare il solo traffico cumulato di veicoli commerciali [12].

Anche la variabilità del flusso diventa parametro fondamentale nello studio evolutivo delle pavimentazioni. Studi di letteratura mostrano, infatti, come il flusso dei veicoli pesanti varia nel tempo e nello spazio in maniera differenziata rispetto a quello dei veicoli leggeri. (Hallenbeck et al 1997, [59]). Queste fluttuazioni, inoltre, possono essere diverse da tipologia a tipologia di veicolo così come le caratteristiche specifiche di un veicolo pesante, in particolare il peso, possono cambiare da periodo a periodo pur all'interno della stessa classificazione veicolare. La variazione temporale del traffico avviene a scale temporali diverse, in particolare si riconoscono tre livelli di variabilità: ore del giorno, giorni della settimana e mesi dell'anno.

Anche le variazioni direzionali necessitano di osservazioni poiché molte strade vengono spesso interessate da differenze anche consistenti nell'aliquota di traffico pesante nelle due diverse direzioni di marcia. Il tragitto giornaliero dei mezzi pesanti, infatti, spesso vede spostamenti a pieno carico al mattino in una direzione e spostamenti a vuoto di ritorno alla sera; ciò accade soprattutto per le aree vicine alle cave, ai cantieri, agli impianti di produzione.

Da quanto detto finora, diventa essenziale effettuare stime attuali e previsioni sul futuro volume e tipologia di traffico che interesserà la pavimentazione durante la sua vita utile in maniera quanto più precisa e puntuale, al fine di poter opportunamente scegliere un'adeguata tipologia di intervento che ottimizzi le risorse economiche disponibili.

Le caratteristiche del traffico veicolare che maggiormente influenzano la richiesta di aderenza includono le seguenti macrofamiglie di dati [60]:

- Volume annuale di traffico e monitoraggio delle caratteristiche e delle azioni del traffico veicolare;
- Fattori di distribuzione per corsia;
- Fattori di distribuzione per direzione;
- Classi di distribuzione dei veicoli;
- Fattori di crescita del traffico;
- Velocità media e operativa.

## **6.6 CONDIZIONI AMBIENTALI E FATTORE TEMPO.**

I fattori ambientali nonché i fattori legati all'esposizione temporale al traffico veicolare risultano fondamentali nello studio dell'evoluzione delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento. La dipendenza da tali parametri è stata ampiamente descritta al Capitolo 5,

anche attraverso un approfondimento bibliografico sui principali modelli analitici di decadimento e di previsione.

## 6.7 CARATTERISTICHE DEI VEICOLI

I dati che riguardano la configurazione del carico che maggiormente influenzano l'evoluzione temporale delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento sono identificabili nei seguenti parametri [60]:

- Fattori di distribuzione degli assi di carico
- Configurazioni base degli assi e delle ruote
- Caratteristiche del pneumatico
- Pressione di gonfiaggio del pneumatico
- Fattore di distribuzione trasversale

La schematizzazione dei carichi trasmessi dai veicoli alle pavimentazioni stradali deve necessariamente essere oggetto di modellizzazione per determinare il danno indotto all'infrastruttura. I carichi applicati alla sovrastruttura sono, infatti, molto diversi per entità e modo di applicazione. Gli assi di un veicolo possono essere distinti tra assi singoli, tandem, tridem, ecc., ciascuno dei quali costituito da ruote singole o gemellate. Gli attuali strumenti di calcolo consentono di conoscere lo stato tensionale e di deformazione prodotto in qualsiasi punto della pavimentazione, ottenendo così una configurazione del carico molto più realistica rispetto a quella empirica ottenuta dall'ipotesi di asse singolo equivalente (80 kN). In genere, il carico trasmesso da una ruota viene rappresentato attraverso una distribuzione di tipo cilindrico, ipotizzando un'area di carico circolare ed una tensione verticale costante pari alla pressione di gonfiaggio delle ruote (nei casi più severi anche 7-8 daN/cm). L'ipotesi è che la rigidità della carcassa del pneumatico sia influente ai fini della distribuzione delle pressioni di contatto. Nel caso di ruota gemellata è frequente ricondurre il calcolo sempre e comunque ad un'unica area di contatto circolare di tipo fittizio ricavata dividendo il carico verticale totale sull'insieme delle ruote gemellate, per la stessa pressione di gonfiaggio. Occorre inoltre osservare che di solito, erroneamente, non viene ipotizzata alcuna componente di tipo tangenziale. In realtà l'azione esercitata da un pneumatico in moto sulla superficie stradale è assai più complessa rispetto a tale schematizzazione del fenomeno [60].

La configurazione degli assi di carico è elemento essenziale nella valutazione del processo di “livellamento” della tessitura superficiale delle pavimentazioni stradali, nonché della durabilità del manto stradale soggetto ad azioni veicolari tanto più gravose quanto maggiori sono i carichi e il numero di assi cumulati che, nel tempo, transitano sulla superficie stradale. Il degrado delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento è direttamente proporzionale all’entità del carico dinamico che agisce sulla pavimentazione e che ne determina, in larga misura, gli effetti di usura nel tempo. Tuttavia, le performance della superficie di rotolamento vengono influenzate oltre che dall’entità del carico da diverse caratteristiche proprie del veicolo come, ad esempio, la distanza assiale fra le ruote e/o il tipo di pneumatico. Quando la distanza fra due assi in un gruppo di assi tandem o tridem è elevata, ogni asse tende a comportarsi come un asse isolato determinando carichi maggiori sulla pavimentazione [55], [61]. Allo stesso tempo, pneumatici con un’elevata pressione di gonfiaggio concentrano il peso su un’area minore imponendo, così, sollecitazioni maggiori alla pavimentazione. L’usura è accelerata anche qualora ci siano sbilanciamenti dovuti a differenze di pressioni di gonfiaggio fra i pneumatici dello stesso veicolo. Le azioni descritte si traducono in fattori determinanti nell’insorgere del fenomeno evolutivo della micro e macro-tessitura superficiale della pavimentazione: carichi maggiori, infatti, determinano azioni di levigatura degli inerti più importanti e quindi decadimenti più rapidi dell’aderenza offerta al contatto pneumatico-pavimentazione; allo stesso tempo carichi maggiori, soprattutto negli elementi curvilinei di un tracciato determinano l’insorgere di azioni tangenziali sugli inerti che possono subire, nelle condizioni più gravose, un vero e proprio distacco dalla matrice del conglomerato, con evidenti effetti sulla macro-tessitura.

Anche gli effetti dovuti alla pressione di gonfiaggio del pneumatico non possono essere ritenuti trascurabili nello studio dell’evoluzione temporale delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento. In particolare, un recente studio [62] mostra come la variazione della pressione del pneumatico da un minimo di 0.7 MPa ad un valore massimo di 1.4 MPa determina differenze sostanziali nel processo evolutivo dell’aderenza misurata attraverso British Pendulum Tester ed espressa in termini di BPN (*cfr. Fig.6.20*). Le prove sperimentali sono state condotte attraverso l’applicazione di un carico ciclico imposto tramite Loaded Wheel Tester di frequenza pari a 42 cicli al minuto e temperatura di prova di 21°C su provini di HMA (Hot Mix Asphalt) di laboratorio.



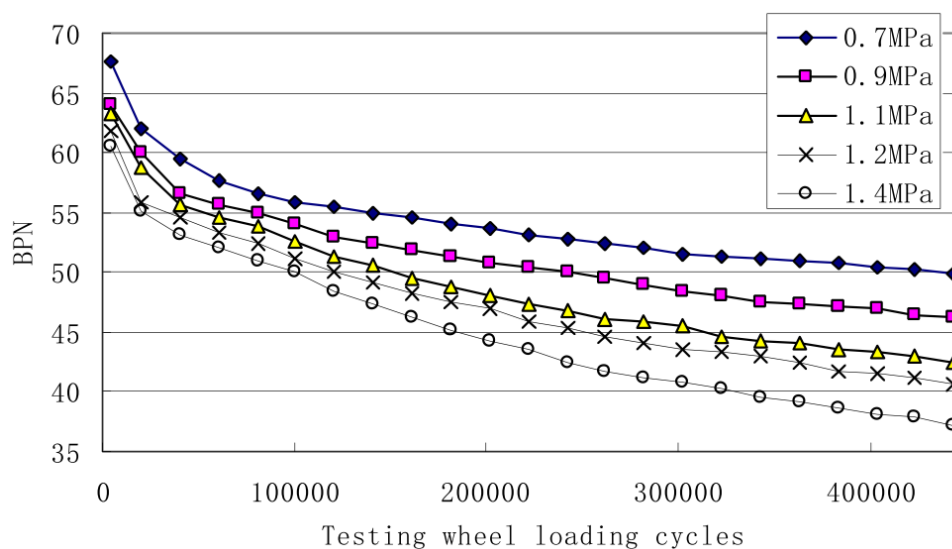


Fig. 6.20 – Variazione del BPN nel tempo per diverse pressioni di gonfiaggio del pneumatico di prova [62]

Dall'analisi del grafico rappresentato in Fig.6.20 è facile evincere come la variabilità del carico verticale influenzi non solo l'entità iniziale della microtessitura misurata ma anche e soprattutto l'entità del processo evolutivo. Per pressioni elevate il  $\Delta BPN$  (valore terminale - valore iniziale) raggiunge valori dell'ordine del 50%. Gli autori forniscono anche l'espressione analitica caratteristica del processo evolutivo:

in cui  $\sigma$  rappresenta la pressione del pneumatico,  $n$  il numero di carichi applicati al provino,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$  le costanti di regressione da determinare sperimentalmente in funzione delle caratteristiche della pavimentazione in esame [62].

Studi di letteratura sulla distribuzione trasversale dei carichi imputabili ai veicoli merci identificano nel modulo di corsia il riferimento principale per la determinazione della porzione di pavimentazione maggiormente battuta dai pneumatici in termini di ampiezza. Indagini condotte da ricercatori olandesi evidenziano che la ripartizione trasversale sia associabile ad una gaussiana di deviazione standard  $\sigma$  [12]. Accanto alla valutazione della variabilità dell'evoluzione delle caratteristiche superficiali della superficie stradale determinata dal tipo di carico agente sulla pavimentazione, dunque, diventa fondamentale analizzare il fenomeno della variabilità delle condizioni di aderenza in senso trasversale lungo una sezione della corsia di marcia legato essenzialmente alla scelta delle traiettorie da parte dei conducenti e legato implicitamente alle condizioni geometriche del tracciato.

## 6.8 VARIABILITÀ IN SENSO TRASVERSALE: INDIVIDUAZIONE DEI PERCORSI DELLE WHEEL TRACK.

La posizione trasversale in cui viene effettuata la misura influenza il livello di aderenza in relazione alla distribuzione trasversale dei veicoli. Si è infatti osservato che il minimo si attinge nella striscia più sollecitata dal passaggio dei mezzi (wheel-path) in corrispondenza della quale vengono di solito eseguite le misure di aderenza. Diverse esperienze hanno evidenziato che l'entità della variazione trasversale può essere elevata fino a raggiungere  $\pm 4$  SN, in particolare una deviazione di soli 125 mm della ruota di misura dall'asse della wheel path può indurre cambiamenti nell'ordine dei  $\pm 2$  SN, altri studi condotti in Italia su conglomerati drenanti hanno mostrato oscillazioni pari anche a 30 BPN, mentre altre esperienze hanno rilevato un intervallo di variazione pari al 2.8 % rispetto al valore centrale [12]. Uno studio americano [63], infine, mostra una variabilità trasversale nella misura dell'aderenza che raggiunge l'ordine di più del 60%. (cfr. Fig.6.21).

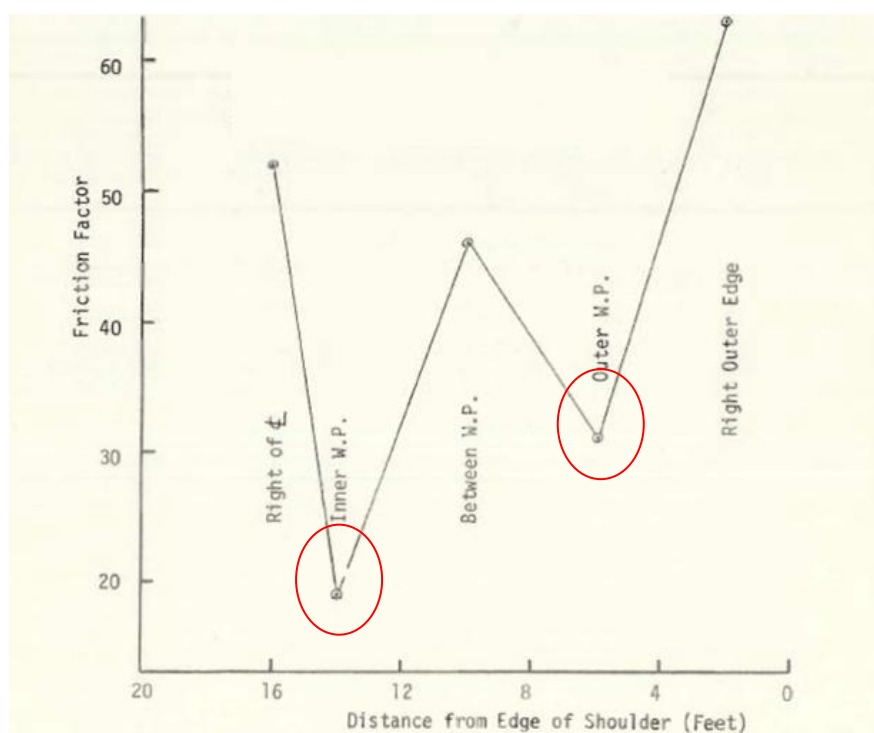


Fig.6.21 – Variabilità trasversale dell'aderenza [63]

Nel grafico di Fig. 6.21 valori segnalati in rosso rappresentano i punti di misura dell'aderenza in corrispondenza delle wheel track.

Appare pertanto evidente che se non vengono considerati nell'elaborazione delle misure tutti i fattori precedentemente illustrati, diventa estremamente complesso estrapolare l'andamento dell'aderenza dovuto esclusivamente alle azioni del traffico.

L'identificazione corretta delle wheel track, ossia delle traiettorie più battute dai pneumatici in moto sulla superficie stradale, risulta, dunque, determinante ai fini della validità del monitoraggio delle caratteristiche della pavimentazione. Fondamentali in tal senso è la corretta identificazione delle traiettorie scelte dai conducenti dei veicoli, della reale percezione del tracciato da parte degli utenti e delle velocità di marcia, soprattutto in curva.

Il comportamento dell'utente e la scelta delle velocità di percorrenza di un tronco stradale o di una curva in particolare vengono influenzati da molteplici variabili quali la percezione corretta degli spazi, l'esperienza di guida, la presenza di altri veicoli, le caratteristiche geometriche delle curve, la larghezza della piattaforma.

Studi di letteratura in merito [64] analizzano le traiettorie veicolari di ben 634 veicoli su strade extraurbane secondarie, nel caso in cui tra rettilineo e curva non è interposta una curva di transizione. I modelli di comportamento in curva del conducente sono stati definiti sulla base del tipo di manovra di sterzata eseguito. In linea generale si è osservato che in rettilineo ed in curva, ad una certa distanza dal punto di contatto tra i due elementi, le traiettorie si mantengono quasi parallele al tracciato stradale; in prossimità del punto di contatto tra rettilineo e curva circolare, invece, le traiettorie si discostano sensibilmente dal tracciato e sono notevolmente disperse in direzione trasversale. Ciò comporta, specialmente nel tratto a cavallo tra rettilineo e curva, un'elevata interferenza tra veicoli procedenti nei due sensi di marcia. Si sono individuati 3 tipi fondamentali di traiettoria per ciascuna delle seguenti manovre, con chiaro significato dei simboli  $sx$ ,  $dx$ ,  $i$  e  $u$ :

- inserimento in una curva a sinistra (manovra del tipo  $sxi$ );
- inserimento in una curva a destra (manovra del tipo  $dxi$ );
- uscita da una curva a destra (manovra del tipo  $dxu$ );
- uscita da una curva a sinistra (manovra del tipo  $sxu$ );

In totale si sono rilevati 12 tipi di comportamento del guidatore, ma il 92% delle traiettorie ricade in sole 8 classi (due per ciascun tipo di manovra,  $sxi$ ,  $sxu$ ,  $dxi$ ,  $dxu$ ). Nella fase di inserimento in curva a sinistra sono stati identificati 3 tipi fondamentali di traiettoria:

- Tipo  $sxi$  1: il veicolo si mantiene approssimativamente parallelo all'asse corsia.
- Tipo  $sxi$  2: la traiettoria all'inizio è parallela al rettilineo; da un certo punto in poi si verifica un

avvicinamento progressivo al centro della carreggiata; nella parte finale la traiettoria diventa parallela al tracciato della curva circolare (Fig. 6.22).

- Tipo *sxi 3*: il guidatore prima ruota il volante verso destra per avvicinarsi al ciglio destro e successivamente verso sinistra per portarsi verso l'asse della carreggiata, descrivendo un flesso (Fig. 6.23).

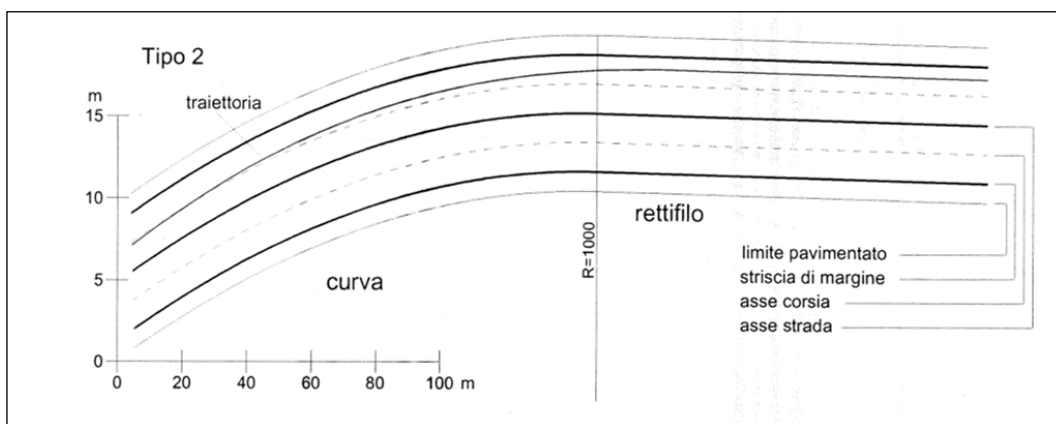


Fig. 6.22 – Inserimento in curva a sinistra – Traiettoria tipo *sxi 2*

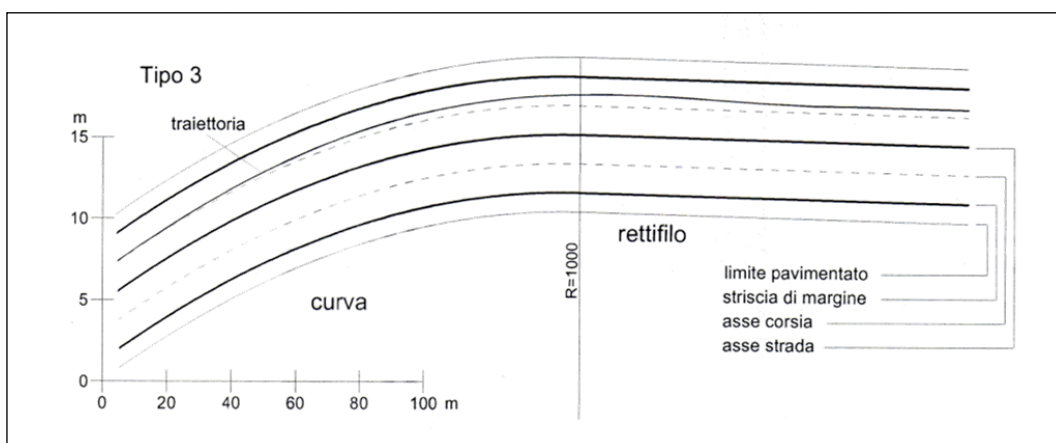


Fig. 6.23 – Inserimento in curva a sinistra – Traiettoria tipo *sxi 3*

Nella fase di uscita da una curva a destra si sono individuati 3 tipi fondamentali di manovra:

- Tipo *dxu 1*: in questo gruppo si sono inclusi tutti i veicoli che percorrono una traiettoria pressoché parallela all'asse corsia.
- Tipo *dxu 2*: la categoria comprende i veicoli che in uscita dalla curva si spostano progressivamente verso l'asse della carreggiata (Fig. 6.24).
- Tipo *dxu 3*: nel terzo gruppo sono inclusi i guidatori che all'uscita dalla curva in una prima fase ruotano il volante verso sinistra e si avvicinano alla striscia continua di separazione dei

sensi di marcia, in una seconda fase ruotano il volante verso destra e poi ancora verso sinistra, descrivendo un flesso (Fig. 6.25).

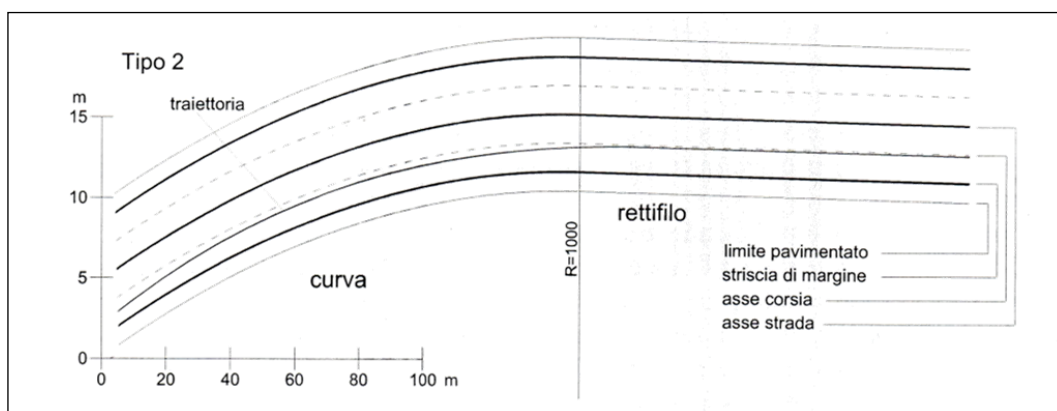


Fig. 6.24 – Uscita da una curva a destra – Traiettorie tipo dxu 2

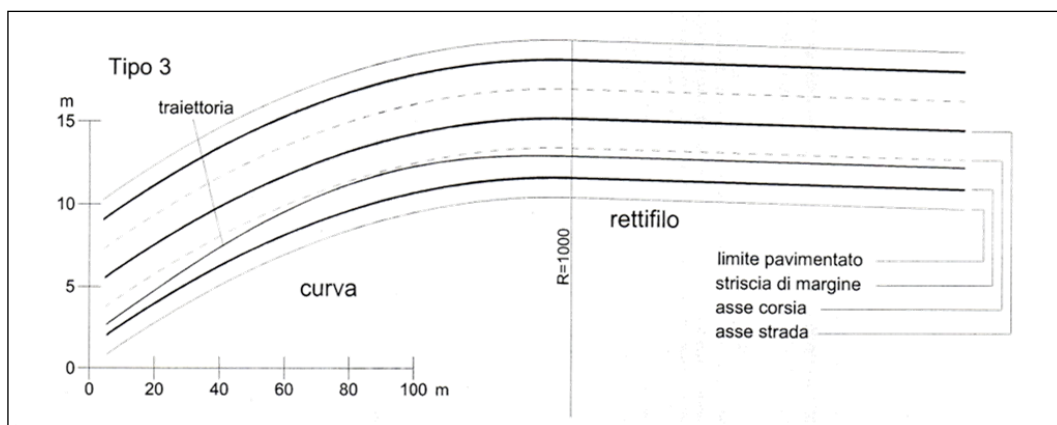


Fig. 6.25 – Uscita da una curva a destra – Traiettorie tipo dxu 3.

Con un criterio analogo a quello impiegato per i casi dell'inserimento in una curva a sinistra e dell'uscita da una curva a destra, è stato possibile classificare le traiettorie descritte dai veicoli nelle fasi dell'inserimento in una curva a destra e dell'uscita da una curva a sinistra.

Sono stati individuati così i seguenti modelli di comportamento:

- inserimento in una curva a destra: *dx1 1*, *dx1 2*, *dx1 3*;
- uscita da una curva a sinistra: *sxu 1*, *sxu 2*, *sxu 3*.

Tali tipi di traiettoria sono speculari rispetto ai tipi descritti in precedenza.

La distribuzione in frequenza dei vari tipi di traiettoria è la seguente (Fig. 6.26):

- la traiettoria tipo 1 (*sxi 1*, *dx1 1*, *sxu 1*, *dxu 1*) viene seguita solo dal 7% dei guidatori;
- la traiettoria tipo 2 (*sxi 2*, *dx1 2*, *sxu 2*, *dxu 2*) viene impostata dal 52% dei conducenti;



- la traiettoria tipo 3 ( $s_{xi} 3, d_{xi} 3, s_{xu} 3, d_{xu} 3$ ) viene descritta dal 40% dei guidatori.

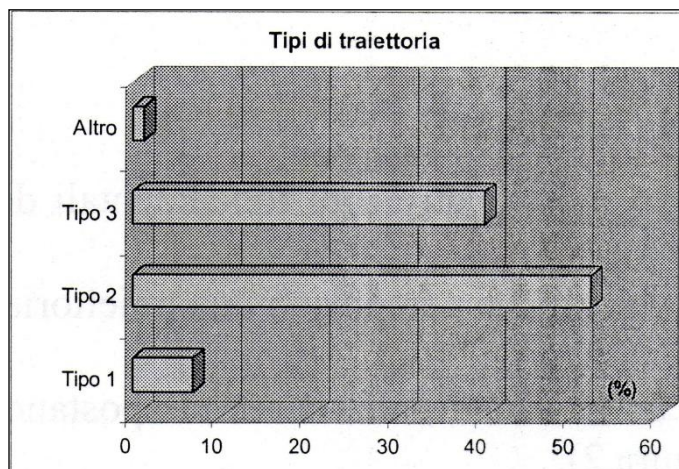


Fig. 6.26 – Distribuzione in frequenza dei tipi di traiettoria.

Si può pertanto affermare che quasi tutti i guidatori nel passaggio da rettilineo a curva impostano una traiettoria avente caratteristiche geometriche diverse da quelle dell'asse stradale. In Fig. 6.27 è riportata la distribuzione dei tipi di manovra per classi di velocità.

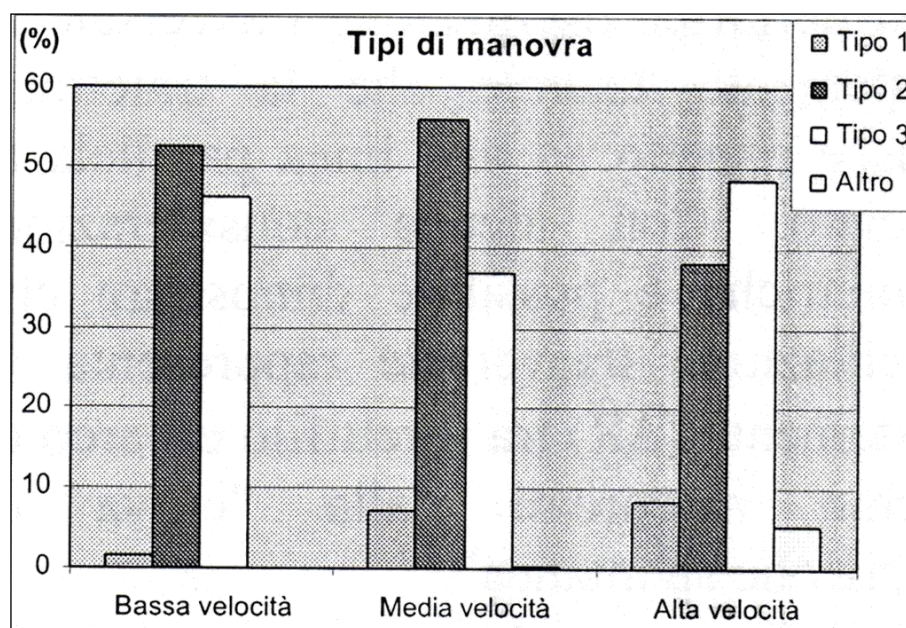


Fig. 6.27 – Distribuzione dei tipi di manovra per classi di velocità

Dall'esame delle traiettorie veicolari ottenute dai rilievi sperimentali è emerso che all'interno delle traiettorie di tipo 2 di tipo 3, seguite dal 92% degli utenti, è sempre possibile individuare un tratto in cui la curvatura varia in modo graduale; tale porzione è stata denominata "curva di



transizione spontanea”, in quanto rappresenta la curva di transizione che il guidatore istintivamente percorre quando la curva circolare è direttamente collegata al rettilifo.

Da quanto finora esposto, dunque, risulta evidente come la corretta identificazione delle wheel track per l’esecuzione delle misure di tessitura su una pavimentazione fondamentale sia necessaria ad una adeguata valutazione dell’evoluzione nel tempo delle performance superficiali del piano di rotolamento. E’ sulle wheel track reali percorse dagli utenti che si concentra il massimo danno indotto dal veicolo alla pavimentazione e soltanto il monitoraggio delle soglie di aderenza effettuato in corrispondenza di tali zone può garantire la corretta programmazione degli eventuali interventi di manutenzione sulle pavimentazioni stradali in esercizio.

## **6.9 GLI ERRORI DI MISURA E I FATTORI DI INCERTEZZA NELLA POST ELABORAZIONE DATI.**

Tra i fattori di incertezza non possono non rientrare gli errori di misura che, in qualunque procedura sperimentale, se non opportunamente controllati e limitati, inficiano fortemente i risultati numerici attesi. Fattori di incertezza sono inoltre insiti nelle procedure di elaborazione dei dati di “altezze” di superficie ricavati attraverso il lettore ottico del profilometro laser. Considerazioni in merito a tali fattori verranno in questo paragrafo in dettaglio esaminate.

Le informazioni ed i dati raccolti nelle campagne di misura sono stati impiegati nella ricerca sia per analisi di tipo globale in riferimento alle misurazioni riguardanti le sezioni omogenee di ciascun sottotrunko sperimentale, sia per studi individuali riferiti a specifici punti della sede viaria. Sia nell’uno, che nell’altro caso, i dati rilevati includeranno necessariamente degli errori, che sorgono da effetti casuali e sistematici. Compito dell’operatore è, dunque, quello di assumere procedure che possano minimizzare qualunque fonte di errore, massimizzando la stabilità nel tempo delle misurazioni. Questo, normalmente, si traduce nell’adozione dello stesso equipaggiamento e di procedure di acquisizione dati ben strutturate e rese standard per ciascuna campagna di monitoraggio condotta. Si distinguono generalmente, tre diverse tipologie di imprecisioni, qui di seguito illustrate:

1. *Repeatability error (errore di ripetibilità)*: quando più misurazioni vengono ripetute con un stesso strumento, quale che sia, è difficile ottenere perfetta corrispondenza tra i vari risultati, visto che il processo misurativo, per sua natura, include effetti casuali che

variano da misurazione a misurazione. L'errore di ripetibilità non è sempre di facile quantificazione, perché gli strumenti presentano diversi fattori di imprecisione che influenzano la misura. Quando si misurano grandezze riferite alle caratteristiche di micro-geometria della superficie stradale il livello di precisione viene fortemente determinato da tre elementi principali:

- la strumentazione utilizzata;
- le ubicazioni casuali dei punti specifici lungo la wheel track dove le misure vengono condotte;
- la posizione trasversale della wheel track seguita.

Generalmente gli errori di ripetibilità, che sono fondamentalmente di natura casuale, possono essere controllati ripetendo il processo di misurazione e mediandone i relativi risultati. L'esperienza mostra come la suddetta tipologia di errore sia, in generale, inversamente proporzionale alla radice quadrata della lunghezza totale coperta, laddove la lunghezza totale dipende dal numero di misurazioni della ripetizione.

2. *Calibration error (errore di calibrazione)*: quello di calibrazione è un errore sistematico diverso da misurazione a misurazione e da strumento a strumento. Per ridurre l'entità di questa tipologia di errore è possibile procedere alla ricalibratura dello strumento, sempre che tale operazione compensi l'imprecisione.
3. *Reproducibility error (errore di riproducibilità)*: tali errori derivano dal fatto che la misura di quantità complesse, come la micro geometria del piano viabile, effettuata con due metodi o due strumentazioni possano avere come risultato valori numerici discordanti. Il problema è che due metodi e quindi due strumenti diversi, ammettono differenze che sono ben più complesse dei semplici fattori di scala; mentre errori di ripetibilità possono essere ridotti e gli errori di calibratura possono essere controllati da validi processi di calibrazione, gli errori di riproducibilità assumono valori spesso consistenti e non controllabili.

### **6.9.1 Gli errori di misura e i fattori di incertezza: misure profilometriche laser**

I fattori di incertezza legati alle procedure di post elaborazione dati riguardano principalmente la ricostruzione dei profili caratteristici dei punti di monitoraggio individuati in precedenza sulle wheel track. Uno dei problemi più comuni della post elaborazione dati riguarda la

possibilità che per alcuni valori della coordinata  $x$  non vengano registrati dal dispositivo laser valori corrispondenti di  $z$ . Si è in presenza di “perdita del segnale-profilo” più comunemente nota come dropout: il raggio riflesso dalla pavimentazione non giunge al piano del captatore oppure, pur pervenendo al piano foto-sensibile, il trasduttore non è in grado di “decodificarlo” univocamente [65]. Numerosi sono i casi di dropout che possono verificarsi nel rilievo di una superficie stradale. I principali vengono schematizzati in Fig.6.28.

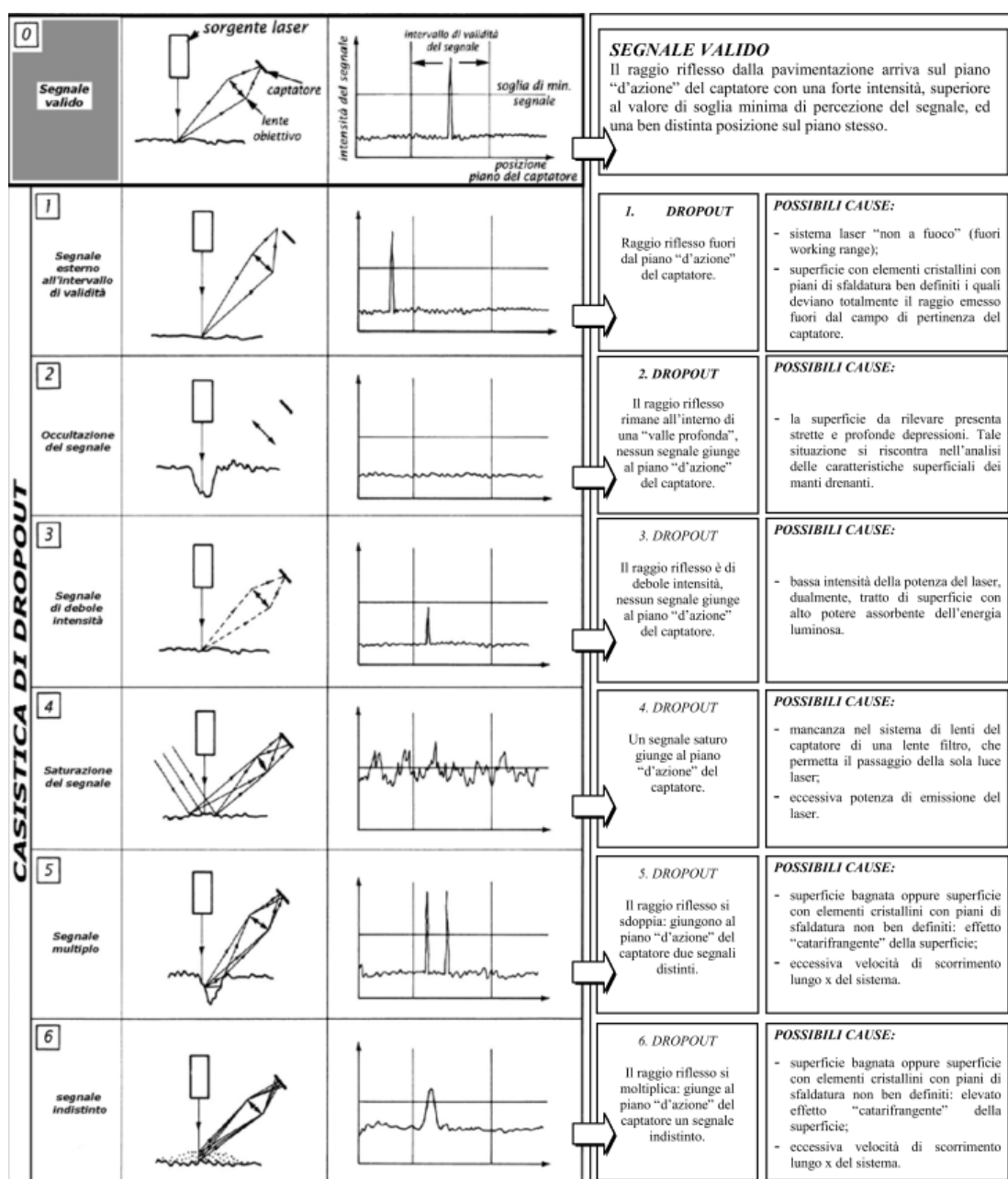


Fig. 6.28 – Classifica della casistica dei problemi di dropout

La continuità del profilo, dunque, deve essere correttamente ristabilita assegnando dei valori di altezza a quei punti del profilo per i quali si è riscontrata un'anomalia. Le metodologie più utilizzate per il ripristino della continuità del profilo sono l'interpolazione lineare e l'impiego di valori minimi (Fig.6.29) [3].

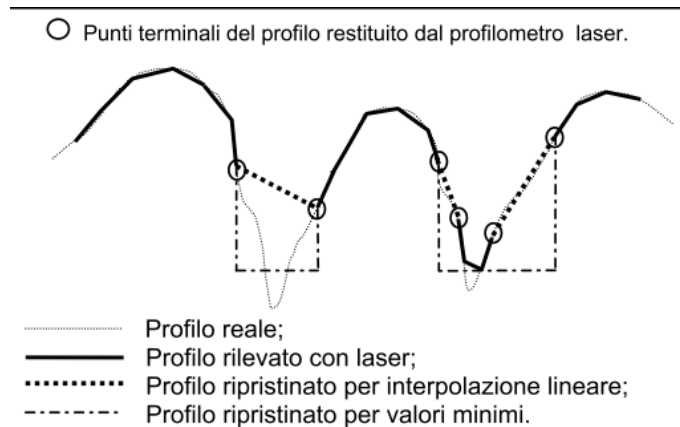


Fig.6.29

La Norma ISO 13473-1 [66] prevede che l'aliquota di letture non valide non superi il 20%. Anche un incremento del 10% necessita di una accurata interpretazione dei dati. L'analisi dati, dunque, non può prescindere dall'adottare tali accorgimenti nelle fasi di post elaborazione al fine di quantificare correttamente il dato "tessitura" registrato.

#### 6.9.2 Gli errori di misura e i fattori di incertezza: misure di attrito radente con apparecchio a pendolo (Skid Tester).

Anche le condizioni di prova costituiscono elemento di variabilità nello studio del processo evolutivo delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento. Il monitoraggio delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento prevede l'impiego di numerose strumentazioni e protocolli di prova standardizzati a livello nazionale e/o internazionale (cfr. Capitolo 4). Il rilievo della tessitura superficiale, ed in particolare del fenomeno aderenza ad essa correlata, prevede l'impiego di dispositivi caratterizzati non solo da differenze sostanziali in termini di modalità operative, ma anche relativamente alle condizioni di esecuzione della prova ed interpretazione dei risultati ottenuti.

Le incertezze associate alle misure di aderenza non si limitano alle difficoltà di armonizzazione dei protocolli di prova esistenti ma riguardano anche i singoli strumenti di misura con le

relative procedure di utilizzo e le metodiche di rilievo. Ogni apparecchiatura, infatti, fornisce risultati più o meno affidabili in funzione delle condizioni di prova e dell'influenza che tali condizioni esercitano sui parametri propri del metodo.

Con particolare riferimento allo skid tester, strumentazione impiegata nella fase sperimentale del presente progetto di ricerca, infatti, va evidenziata la ormai nota influenza di fattori esterni quali, ad esempio, la temperatura per la quale si applicano fattori di correzione a posteriori, sui valori misurati. Uno studio del 1995 [67], condotto esclusivamente in laboratorio su campioni di pavimentazioni di strade in esercizio, per un più accurato controllo delle condizioni al contorno, ha fornito interessanti considerazioni in merito all'analisi di due fenomeni distinti:

- influenza delle modalità d'uso dell'apparecchiatura sui valori misurati di BPN (British Pendulum Number);
- influenza della temperatura registrata fra le due superfici a contatto (gomma del pattino del pendolo e piano di rotolamento).

Fra i parametri relativi all'uso dello strumento, la sperimentazione ha rilevato che quelli che maggiormente determinano variazioni del BPN registrato sono i seguenti:

- *Lunghezza di contatto*: secondo quanto previsto dalla normativa di riferimento, la superficie di contatto fra il pattino del pendolo e la pavimentazione deve assumere valori compresi fra 123.8mm e 127 mm (con scarto massimo di 3.2mm). Maggiori lunghezze comportano valori più elevati di BPN. I risultati sperimentali mostrano come differenze nella lunghezza di contatto dell'ordine dei 3.5 mm (rispetto al valore massimo di 127mm) comportano diminuzioni del BPN del 3,5%. Tale percentuale raggiunge il 5,7% per una lunghezza di contatto di 122mm (valore fuori norma ma possibile nel caso di errori di misura dovute ad imprecisioni dell'operatore).
- *Usura dello slider*: l'usura del pattino di gomma, dovuta alle abrasioni per strisciamento su superfici rugose non deve superare i 3.2mm sulla faccia orizzontale e 1.6mm su quella verticale. I risultati mostrano che il grado di usura dello slider influenzano i valori misurati di BPN solo in fase iniziale (da 0 a 50 oscillazioni del pendolo). Uno slider molto usurato non determina variazioni significative nelle misure.
- *Diverso utilizzo dello strumento (ripetibilità della prova)*: si verificano, per qualsiasi tipologia di pavimentazione e anche sul medesimo punto di misura, decrementi del BPN dopo ogni successiva oscillazione del pendolo. Tale fenomeno di decadimento è

imputabile unicamente allo slider poiché, pur cambiando pattino, il fenomeno si ripropone in egual misura. Si evince, quindi, una sorta di adattamento del pattino alla pavimentazione con l'aumento del numero di oscillazioni. L'entità dell'influenza dell'operatore nelle misure è mostrata in Fig. x: i cerchi in rosso mostrano i valori registrati alla 34° oscillazione dopo una pausa di un'ora nel rilievo. Gli aumenti dei valori rispetto a quelli registrati prima dell'interruzione sono considerevoli ma riguardano soltanto i primi punti acquisiti per poi riprendere un aumento analogo al precedente.

- *Spessore del velo idrico*: l'effetto della lubrificazione varia al variare della macrorugosità superficiale della pavimentazione (espressa in termini di altezza in sabbia HS). In particolare, per piccoli spessori (fino a 2 mm) il film d'acqua determina riduzioni fino a 3 punti di BPN rispetto alle condizioni di superficie asciutta (spessore pari a 0). Viceversa per spessori superiori la presenza di acqua in quantità elevate sulla superficie determina resistenze maggiori all'oscillazione del pattino (BPN più elevati).
- *Temperatura*: la temperatura influenza le misure di attrito radente condizionando non solo la meccanica della strumentazione ma anche le caratteristiche del contatto fra pattino e pavimentazione. In particolare, la ricerca in questione mostra come l'aumento della temperatura della pavimentazione così come di quella dello slider determinano un decremento importante dei valori di BPN registrati. La legge di decadimento è stata ottenuta attraverso regressioni cubiche. L'influenza dell'interazione fra le variabili di temperatura della pavimentazione e dello slider è risultata determinante: si registrano, infatti, variazioni anche dell'ordine dei 15 punti BPN (cfr. Fig.6.30)

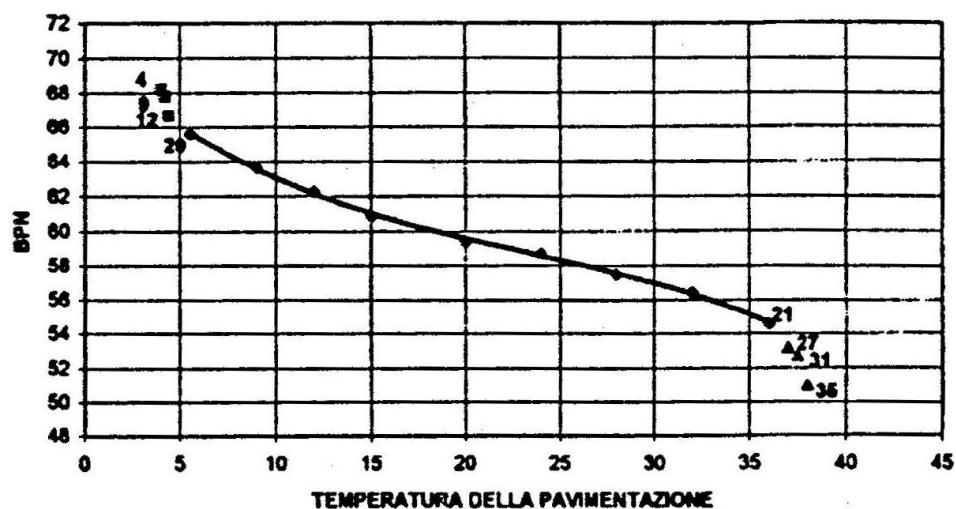


Fig. 6.30 – Variabilità del BPN in funzione della temperatura della pavimentazione e dello slider

In Fig. 6.30 la linea continua rappresenta la variazione di BPN al variare della temperatura della superficie con lo slider a temperatura ambiente, mentre i punti rappresentano i valori di BPN alle diverse temperature dello slider in corrispondenza della temperatura della pavimentazione (leggibile sull'asse delle ascisse). La temperatura, quindi, produce variazioni di BPN in laboratorio superiori di quelle indicate nelle tabelle di normativa in cui l'intervallo di correzione delle temperature si limita alle 7 unità BPN.

In definitiva, è evidente come la variabilità delle condizioni al contorno della prova possa inficiare, in alcuni casi anche in maniera significativa, la validità dei dati registrati. Anche le procedure di acquisizione dati in situ sono caratterizzate da fattori di incertezza di cui tener conto anche al fine di individuare opportuni accorgimenti pratici nelle fasi di acquisizione delle misure sperimentali.

## 6.10 BIBLIOGRAFIA SPECIFICA CAPITOLO 6

- [01] Bloem, D.L. - *Skid-Resistance: The Role of Aggregates and Other Factors* - National Sand and Gravel Association Circular 109, Silver Spring, MD, 1971.
- [02] Whitehurst, E.A. and Goodwin, W.A. *Pavement Slipperiness in Tennessee*. Proceedings Highway Research Board, Vol. 34, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. , 1955.
- [03] Nichols, F.P., Jr., Dillard, J.H., and Orwood, R.L. - *Skid Resistant Pavement in Virginia* - Virginia Council of Highway Investigation and Research. Reprint No. 18, 1957.
- [04] Gray, J.E. and Renninger, F.A. - *The Skid Resistant Properties of Carbonate Aggregates* - Highway Research Record 120, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. , 1965.
- [05] Balmer, G.G. - *Pavement Texture: Its Significance and Development* - Transportation Research Record 666. Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1978
- [06] Csathy, T.I., Burnett, W.C., and Armstrong, M.D. - *State-of-the-Art of Skid Resistance Research* - Highway Research Board Special Report 95, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1968.
- [07] Moore, D.F. - *Recommendations for an International Minimum Skid-Resistance Standard for Pavements* - Highway Research Board Special Report 101, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1969.
- [08] 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.
- [09] Kandhal, P.S. and F. Parker Jr. - *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements* - NCHRP Report 405, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C., 1998.
- [10] Folliard, K.J. and K.D. Smith. - *Aggregate Tests for Portland Cement Concrete Pavements: Review and Recommendations* - September edition (No. 281) of NCHRP Research Results Digest, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C, 2003
- [11] Henry, J.J. - *Evaluation of Pavement Friction Characteristics* - NCHRP Synthesis 291, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C., 2000.



- [12] AIPCR, Associazione mondiale della strada, Comitato tecnico C1 - *Caratteristiche Superficiali - Aderenza dei manti bituminosi* - XXIV Convegno Nazionale Stradale, 2005
- [13] Davis, R.M. - *Comparison of Surface Characteristics of Hot-Mix Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road* - Thesis submitted to the faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 2001.
- [14] ] Tourenq C., Fourmaintraux D. - *Propriétés des granulats et glissance routière* - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - n. 51 – Mars/Avril - 1971.
- [15] Szatkowski, W. S .& Hosking J. R. - *The effect of traffic and aggregate on the skid resistance of bituminous surfacing* - Transport and Road Research Laboratory Department of the Environment, TRRL Report LR504, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1972.
- [16] *Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects* - D10 Report on different parameters influencing skid resistance, rolling resistance and noise emissions, 2009
- [17] McDaniel, R.S. and B.J. Coree. - *Identification of Laboratory Techniques to Optimize SuperPave HMA Surface Friction Characteristics* - Phase I Final Report, SQDH 2003-6, HL 19, Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways (ISQDH), Purdue University, 2003
- [18] Kowalski, K.J. - *Influence of Mixture Composition on the Noise and Frictional Characteristics of Flexible Pavements* - Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN. 2007.
- [19] Minh-Tan DO - *Relationship between microtexture and skid resistance* - Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Aprile - Maggio - Giugno 2005
- [20] 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
- [21] ASTM C294 - 05 Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates
- [22] ASTM C295 / C295M - 11 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete
- [23] ASTM C1252 - 06 Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)
- [24] ASTM D5821 - 01(2006) Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate

- [25] ASTM C131 - 06 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- [26] ASTM C535 - 09 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- [27] ASTM D6928 - 10 Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus
- [28] ASTM D3042 - 09 Standard Test Method for Insoluble Residue in Carbonate Aggregates
- [29] ASTM E303 - 93(2008) Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester
- [30] ASTM D3319 - 11 Standard Practice for Accelerated Polishing of Aggregates Using the British Wheel
- [31] ASTM D3042 - 09 Standard Test Method for Insoluble Residue in Carbonate Aggregates
- [32] ASTM C88 - 05 Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate
- [33] Do, M.T. and Marsac, P. - *Assessment of the Polishing of the Aggregate Microtexture by Means of Geometric Parameters* - Presented at 81st Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C. , 2002.
- [34] Shupe, J.W. - *Pavement Slipperiness* - Section 20 of the Highway Engineering Handbook by K.B. Woods, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, 1960.
- [35] West, N.W. and Ross, T.F. - *Polishing of the Road Surfaces in New South Wales* - Proceedings of the Australian Road Research Board, Vol. 1, 1962.
- [36] Liang, R.Y. and Chyi L.L. - *Polishing and Friction Characteristics of Aggregates Produced in Ohio* - FHWA Report FHWA/OH-2000/001, Federal Highway Administration, Columbus, OH, 2000.
- [37] Shupe, J.W. and Lounsbury, R.W. - *Polishing Characteristics of Mineral Aggregates* - Proceedings First International Skid Prevention Conference, University of Virginia, Charlottesville, VA, 1958.
- [38] Bloem, D.L. - *Skid-Resistance: The Role of Aggregates and Other Factors* - National Sand and Gravel Association Circular 109, Silver Spring, MD, 1971.
- [39] Abdul-Malak, M.A.U., Meyer, A.H., and Fowler, D.W. - *Research Program for Predicting the Frictional Characteristics of Seal-Coat Pavement Surface* - Transportation Research Record 1217, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1990.

- [40] Skerritt, W.H. - *Aggregate Type and Traffic Volume as Controlling Factors in Bituminous Pavement Friction* - Transportation Research Record 1418, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1993.
- [41] Luce, A.D. - *Analysis of Aggregate Imaging System (AIMS) Measurements and Their Relationship to Asphalt Pavement Skid Resistance* - M.S.C.E Thesis, Texas A&M University, College Station, TX. 2006.
- [42] E. Masad, A. Rezaei, A. Chowdhury, and Pat Harris - *Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics* - FHWA/TX-09/0-5627-1 August 2009
- [43] 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
- [44] Neville G. - *A study of the mechanism of polishing of road stones by traffic* – TRRL Laboratory Report 621 - Department of Environment – Crowthorne – 1974.
- [45] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., and Kennedy, T.W. - *HMA Materials, Mixture Design, and Construction* - Second Edition, NAPA, Research and Education Foundation, 1996.
- [46] Wasilewska, M. and Gardziejczyk, W. - *Polishing Resistance of Road Aggregates Applied in Wearing Course* - Proceedings of the 3rd International Conference of Modern Technologies in Highway Engineering, Poznan, Poland, September 8-9, 2005.
- [47] Kowalski, K.J. - *Influence of Mixture Composition on the Noise and Frictional Characteristics of Flexible Pavements* - Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2007
- [48] Losa M. - *Mechanical And Performance-related Properties Of Asphalt Mixes Containing Expanded Clay Aggregate*- TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, Vol. TRR/2051, pp 52, tot. pag 10, 2008
- [49] UNI EN 1097-8:2009 Titolo : Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Parte 8: Determinazione del valore di levigabilità
- [50] Woodward D.- *The Effect of Aggregate Type and Size on the Performance of Thin Surfacing Materials* - 2008
- [51] Woodward. W.D.H., Woodside. A.R. and Jellie.J.H. - *Predicting The Early Life Skid Resistance Of Asphalt Surfacing* - University of Ulster, Northern Ireland, 2003
- [52] Shaun Friel, David Woodward and Alan Woodside - *Laboratory prediction of thin surfacing early life asphalt surfacing properties* - University of Ulster, Jordanstown, Northern Ireland

- [53] *Carrefours giratoires en béton: la solution pour la gestion des conflits, la fluidité du trafic et la sécurité des usagers* - Routes n. 107, 2009
- [54] *Carrefours giratoires: Des solutions durables en béton de ciment* - CIMbéton T56
- [55] Hamlat S. - *Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles* - Thèse De Doctorat, École Doctorale Mécanique, Thermique et génie civil, Marzo 2007.
- [56] P. Colonna. - *Studio delle traiettorie veicolari in corrispondenza di corsie di decelerazione, a partire da misurazioni di rugosità* - Convegno SIIV "La Sicurezza Stradale", Pisa 1997.
- [57] G. Camomilla, A. Marchionna, - *Procedura per il controllo delle caratteristiche superficiali e la programmazione della manutenzione* - Rivista Autostrade, Luglio Settembre 1992.
- [58] A. Marchionna, G. Paoloni - *Decadimento dell'aderenza sulle pavimentazioni autostradali* - Rivista Autostrade, Gennaio Marzo 1994
- [59] Hallenbeck, Mark E Smith B. - *Vehicle volume distribution* - FHWA – PL 97-025, 1997
- [60] 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.
- [61] Ronald Hirshhorn– *The Estimation Of Road Wear And Capital Costs* - TP 14481 E. Prepared for Transport Canada. By. March 31, 15 Mar 2010
- [62] Yang Xu HongXing Guan, QiSen Zhang ChongLu Zhang, Yang Xu - *A Prediction Method For Skid Resistance Performance* - International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010
- [63] Match L. M., Erickson L.F. – *An Inventory of the skid resistance of Idaho Highways* – Idhao Research Project 59, Aprile 1972
- [64] Progetto IASPIS "Interazione Ambiente Sicurezza nel Progetto delle Infrastrutture Stradali - Progetto di Ricerca Cofinanziamento MURST 1998, Febbraio 2001
- [65] Vaiana R. – *La tecnologia laser nella caratterizzazione della micro e macro tessitura superficiale dei rivestimenti stradali* – Strade e Autostrade, Settembre/Ottobre 2002
- [66] ISO 13473-1 – *Characterization of pavement texture by use of surface profiles* – Determination of Mean Profile Depth – Settembre 1997.
- [67] Bocci M., Cerni G., Virgili A. - *Il rilievo dell'aderenza con lo skid tester: influenza delle condizioni di prova* - SIIV Studi e Ricerche, Ottobre 1995.