

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI

ISPETTORATO GENERALE PER LA CIRCOLAZIONE E LA
SICUREZZA STRADALE

DEFINIZIONE DEI PRINCIPALI TEMI DI RICERCA PER IL
MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA DELLE
INFRASTRUTTURE NEL BREVE, MEDIO E LUNGO
PERIODO

SCHEDA 5

**INFLUENZA SULLA SICUREZZA DELLA
MANUTENZIONE DELLA PIATTAFORMA
STRADALE**

Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti
Università degli Studi di Messina - Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate

Napoli, 9 ottobre 2000

INDICE

1	MOTIVAZIONI E RISULTATI DELLA RICERCA	3
1.1	Motivazioni del tema di ricerca	3
1.2	Stato dell'arte relativo alla tematica da trattare	6
1.2.1	Interazione veicolo - pavimentazione	7
1.2.2	Smaltimento delle acque meteoriche	13
1.2.3	Misurazioni.....	17
1.3	Sviluppi futuri della ricerca	19
1.4	Risultati attesi	21
2	CONTENUTI E MODALITÀ DI REALIZZAZIONE	22
2.1	Oggetto della ricerca	22
2.2	Modalità di esecuzione.....	25
2.3	Tempi, Risorse e Costi.....	27
2.4	Modalità di archiviazione dei dati e dei risultati conseguiti	32
3	QUALIFICAZIONE E MODALITÀ DI AGGIUDICAZIONE.....	33
3.1	Competenze necessarie.....	33
3.2	Criteri di aggiudicazione e di collaudo	33
4	BIBLIOGRAFIA.....	35

1 MOTIVAZIONI E RISULTATI DELLA RICERCA

1.1 MOTIVAZIONI DEL TEMA DI RICERCA

La gestione delle infrastrutture stradali è un processo che racchiude in sé diverse fasi tra loro correlate, quali la programmazione e politica di bilancio, la pianificazione, la progettazione, la costruzione, il monitoraggio, la manutenzione ed, infine, la ricerca¹. Ognuna di queste attività richiede continue scelte decisionali spesso in conflitto tra loro e, comunque, strettamente legate alle risorse disponibili. Tali problematiche, quando non vengono risolte aggravano il disagio degli utenti e, con questo, anche i costi che deve sopportare la collettività.

Il principale ostacolo ad una corretta gestione del patrimonio viario, resta sempre la concezione che la strada sia un bene quasi eternamente durevole, alla stregua di una qualunque opera edilizia, e che, pertanto, il decadimento delle sue caratteristiche funzionali venga avvertito solo quando si innescano reali pericoli per la circolazione.

E' utile in questa fase richiamare le definizioni di manutenzione contenute nel Bollettino C.N.R. 125/88 e nelle norme UNI 10147. Se con il termine manutenzione si intende "quel complesso di operazioni ed attività tese a conservare le caratteristiche funzionali e strutturali della strada", gli ulteriori approfondimenti di questo termine possono essere così distinti: la manutenzione ordinaria è quella fase per cui, "conservando e ripristinando il bene si conferiscono quelle caratteristiche previste all'atto della sua realizzazione nell'ambito della vita utile". Quella straordinaria, invece, comprende "interventi...che, pur finalizzati al ripristino della funzionalità del patrimonio stradale, presentino modifiche alle opere tali da comportare un miglioramento qualitativo e/o quantitativo delle opere costituenti il patrimonio stesso e richiedano, quindi, un nuovo progetto, anche se parziale".

Secondo la già citata UNI 10147, gli interventi di manutenzione sono scissi in correttivi e preventivi. I primi sono eseguiti dopo avere rilevato un danno e servono a riportare le condizioni della strada ad uno stato in cui possa svolgere le funzioni richieste. Quella preventiva, invece, viene fatta ad intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti ed è finalizzata alla riduzione della probabilità di guasto dell'infrastruttura.

Le pavimentazioni influiscono in modo primario sulla sicurezza di marcia e sul comfort dell'utente, in quanto l'interazione con il veicolo si esplica principalmente

attraverso la regolarità e l'aderenza degli strati superficiali, oltre che con la capacità strutturale.

Purtroppo le caratteristiche iniziali conferite alla pavimentazione durante la costruzione, decadono più o meno rapidamente nel tempo, soprattutto a causa dei passaggi dei veicoli, per cui il controllo di questo processo, che a ragione potrebbe essere definito dinamico, risulta estremamente complesso ed oneroso. I requisiti racchiusi all'interno del B.U. C.N.R. n° 125/88 riguardante il "dove, come e quando intervenire" implica una serie di procedure di ordine sperimentale ed analitico abbastanza complesse da gestire.

La definizione delle curve di decadimento degli indicatori di stato, ha rappresentato fino a qualche anno fa una delle principali difficoltà per la gestione degli interventi di manutenzione, in quanto diventavano indispensabili le misurazioni sul campo, da effettuarsi, per di più, con una certa regolarità.

Negli ultimi anni, la branca della ricerca che fa capo alle metodologie di controllo delle caratteristiche della pavimentazione, ha subito un rapido sviluppo, causando purtroppo anche una certa dispersione dei metodi di rappresentazione delle grandezze in esame e delle unità di misura ed una difficile correlazione con le esperienze degli anni precedenti.

E' nata, pertanto, l'esigenza di ordinare in modo più razionale il settore, predisponendo, innanzitutto, gli strumenti di misura in modo tale da avere output perfettamente compatibili, anche con letture eseguite in tempi e con condizioni al contorno tra loro differenti. Lo sforzo di standardizzare le principali grandezze di riferimento è cominciato già da qualche anno ad opera delle grandi associazioni dell'ingegneria stradale, quali l'AIPCR, in modo tale da perseguire i seguenti obiettivi:

- Rendere utilizzabili le vaste esperienze degli anni passati, effettuate anche senza l'ausilio degli attuali strumenti;
- uniformare le indagini svolte in località ed in tempi differenti, per potere confrontare eventuali diversificazioni delle soluzioni progettuali o manutentive e valutarne, pertanto, l'efficacia senza la necessità di vaste campagne di misurazioni;
- ridurre il numero di variabili al minimo, in modo da investigare i parametri ritenuti assolutamente indispensabili con la minima spesa e la massima rappresentatività della situazione della pavimentazione.

Un'altra grande esigenza dell'ingegneria stradale, avvertita in modo maggiore solo da poco tempo, riguarda la pianificazione dei programmi di manutenzione quando le risorse a disposizione di chi gestisce il patrimonio viario non sono sufficienti a

risolvere la totalità degli interventi in modo ottimale. Ci si rende conto che le problematiche si complicano a dismisura e, pertanto, l'approccio alla ricerca deve essere attentamente pianificato e progettato, anche per non incidere in modo abnorme sull'onerosità dello studio.

Dato che lo scopo principale rimane quello di garantire alti livelli di sicurezza della percorrenza in funzione delle caratteristiche della pavimentazione, sembra opportuno formulare alcune considerazioni preliminari:

- E' importante assicurare non solo un'adeguata aderenza (e quindi microtessitura e macrotessitura) ma anche un idoneo livello di regolarità del piano viabile. Inoltre, l'irregolarità trasversale che si manifesta attraverso le ormaie può provocare un sensibile aumento dello spessore del velo idrico e, quindi, ridurre il livello di aderenza per effetto dell'idrosostentamento dinamico (aquaplaning).
- Dato che la massima velocità di percorrenza è funzione diretta del livello di comfort che il conducente avverte durante la percorrenza, l'irregolarità può avere, paradossalmente, anche una ricaduta positiva.
- Gli effetti cromatici e sonori che possono essere prodotti adoperando idonei materiali o intervenendo opportunamente sulla superficie viabile possono fornire un valido ausilio al guidatore nel riconoscimento dell'ambiente stradale e dei suoi diversi componenti.

Diversi studi² sul rapporto tra l'incidentalità e le caratteristiche superficiali in ambito urbano ed extraurbano hanno evidenziato che bassi livelli di aderenza e di regolarità longitudinale (soprattutto nel campo delle onde corte) possono favorire gli incidenti quando le decelerazioni in frenatura o le accelerazioni laterali sono anormalmente elevate.

In base a tali premesse, l'efficacia degli interventi di mitigazione dell'incidentalità basati sul ripristino delle caratteristiche superficiali è estremamente difficile da valutare. A meno che un intervento non sia mirato a sanare una particolare tipologia di incidente in cui il degrado delle caratteristiche superficiali riveste un ruolo di primo piano, il beneficio ottenuto è estremamente ridotto e talvolta inesistente. Molto spesso infatti il rifacimento dello strato superficiale rappresenta un semplice palliativo mentre sarebbe necessario intraprendere interventi ben più radicali come la riprogettazione plano-altimetrica del sito in esame.

A tal riguardo, alcune ricerche hanno evidenziato come, dopo la stesa di nuovi manti di usura, i tassi di incidentalità mostrino un sensibile aumento dovuto essenzialmente all'aumento delle velocità conseguente al ripristino della rugosità. Un caso emblematico è rappresentato dalle recenti ri-pavimentazioni effettuate nella città di Parigi dove, sostituendo la pavimentazione in pavé con una flessibile, si è

osservata una crescita del numero di incidenti.

Un corretto ed efficace modo di intervenire sembra, allora, quello di operare localmente e per piccoli tratti per evitare che si manifesti, durante la guida, la capacità di "adattamento" del guidatore e che questo sia portato a reagire alle mutate condizioni di percorrenza riducendo il proprio margine soggettivo di sicurezza.

Anche la scelta del particolare intervento di manutenzione deve essere necessariamente oculata. Le esperienze francesi hanno mostrato che i conglomerati drenanti, pur rappresentando la soluzione tecnologicamente migliore, sono caratterizzati da un bilancio in termini di mitigazione degli incidenti molto spesso negativo: l'elevata regolarità e silenziosità delle superfici, la riduzione del fenomeno dello spraying ed il conseguente aumento di visibilità anche in condizioni meteorologiche avverse hanno indotto i guidatori a modificare sensibilmente la loro condotta di guida verso profili più aggressivi, aumentando quindi il rischio di incidente. Da questo punto di vista, i rivestimenti sottili (micro-tappeti, trattamenti superficiali) ad elevata aderenza sembrano fornire maggiori garanzie.

Da quanto finora esposto si evince che tale ricerca non deve essere finalizzata soltanto ad una gestione dell'infrastruttura viaria che tenga sotto controllo determinate caratteristiche fisiche della pavimentazione nel rispetto delle somme disponibili. Ma piuttosto deve relazionare tali attività alla massimizzazione della sicurezza degli utenti. Ciò significa contestualizzare la strada in esame per mezzo di un approfondito e dettagliato catasto stradale ed indagare le manovre, ordinarie e non, con diversi scenari attuabili con gli interventi manutentori. Non più, quindi, misure e monitoraggi dei materiali fini a se stessi, ma tesi ad accertare la funzionalità della pavimentazione nei riguardi di chi la percorre.

1.2 STATO DELL'ARTE RELATIVO ALLA TEMATICA DA TRATTARE

Come già accennato nel precedente paragrafo, sebbene gli aspetti manutentivi si studino da parecchi decenni, tuttavia solo ultimamente sono statati studiati alla luce di nuovi strumenti di misura e di tecniche analitiche nuove, utilizzabili solo con la potenza degli attuali elaboratori di calcolo. Nel seguito verranno differenziate per argomento i principali filoni di ricerca, in modo da rendere più ordinato lo stato dell'arte di questo settore.

1.2.1 Interazione veicolo - pavimentazione

Risalgono al 1982 le conclusioni dei primi studi di W. O. Schiehlen (1982)³ il quale si è posto l'obiettivo di indagare in modo esaustivo un campo finora trascurato dalla tradizionale ingegneria stradale e cioè l'interazione dinamica tra pavimentazione e veicoli ad alta velocità. Se questa può essere ritenuta una ricerca di settore molto limitata, indirizzata su un'aliquota certamente minoritaria del parco veicolare, tuttavia, ha assunto grande attualità dato l'incremento delle prestazioni raggiunto dai veicoli in questi ultimi anni. L'autore ha corredato, inoltre, la sua ricerca con dati inerenti le ripercussioni sul conducente, sempre utilissime per fissare valori di soglia degli indicatori di stato della pavimentazione.

J. Marcondes, J. Burgess, R. Harichandran e M.B. Snyder (1991)⁴ hanno proposto nuove equazioni per la spiegazione del fenomeno in funzione delle diverse tipologie di sovrastrutture, dell'età e dell'IRI. I risultati ottenuti sono interessanti, in quanto, molto realisticamente, il calcolo della densità spettrale di potenza (PSD) in funzione della frequenza spaziale fornisce valori finiti quando l'ascissa tende a zero; ciò a differenza delle formulazioni proposte dalle norme ISO in cui al tendere a zero della frequenza spaziale si hanno valori infiniti del PSD. Queste espressioni sono state testate su svariate tipologie di pavimentazioni, per le quali il valore dell'IRI è stato correlato a quello del PSD. Tale ricerca non brilla per particolare originalità ma ha il pregio di avere proposto una formulazione per il PSD probabilmente più corretta rispetto a quella generalmente accettata della norma ISO. I risultati teorici sono stati applicati su pavimentazioni esistenti ed, anzi, tale sperimentazione ha permesso di dedurre le principali correlazioni che hanno distinto tale studio. La ricerca si è prefissa un immediato utilizzo in campo pratico anche perché riesce a legare l'analisi spettrale alle misure di IRI, facilmente calcolabili coi moderni strumenti di misura dei profili stradali.

A. Ranzo, P. Rondinone e A. Scalamandrè (1993)⁵ hanno finalizzato la ricerca alla mitigazione degli impatti delle vibrazioni nell'ambiente urbano, anche se i risultati finali possono essere facilmente spendibili per monitorare gli aspetti della percorrenza veicolare legati maggiormente alla sicurezza. I passi principali dello studio possono essere così riassunti:

- rappresentazione delle irregolarità della strada per mezzo di un processo stocastico;
- modellazione reologica del veicolo;
- determinazione dello spettro di potenza delle forze applicate al terreno tramite la pavimentazione stradale;
- rappresentazione del modello matematico del terreno al fine di ricostruire la

funzione di trasferimento rappresentante lo spostamento della superficie del terreno ad una distanza fissata dalla forza applicata;

- determinazione dello spettro di potenza degli spostamenti e dell'accelerazione della superficie del terreno;

L'applicazione, valutando l'azione di disturbo su edifici adiacenti al nastro stradale, potrebbe contenere parecchie aleatorietà non considerate dagli autori ed insite, oltre che nel terreno, nelle caratteristiche strutturali degli edifici. Il lavoro rappresenta probabilmente un rapporto finale nel senso che i progressi determinabili compromettono la speditezza della procedura, per cui una maggiore precisione in alcuni dettagli richiederebbe, con grande difficoltà, nuove informazioni.

A. Marchionna e G. Paoloni (1994)⁶ hanno, invece, messo in opera una procedura per la determinazione di leggi di decadimento delle caratteristiche superficiali. In sostanza, è stato evidenziato che la determinazione analitica di queste leggi è particolarmente difficile nella pratica, in quanto le correlazioni sono spesso affette da errori anche non aleatori. Questi possono essere ricondotti a tre grandi categorie: 1) fattori che possono essere individuati fissando le condizioni operative, quali gonfiaggio del pneumatico, ecc.; 2) fattori per i quali non si possono determinare forti vincoli senza perdere i vantaggi operativi della procedura, quali condizioni meteo, ecc.; 3) fattori che non possono essere controllati, quali la posizione rispetto alla linea d'asse, ecc. Per tenere conto di queste incertezze sono state utilizzate tecniche fuzzy per la quantificazione delle variabili di interesse.

Questa ricerca riveste particolare valore in quanto, pur con le limitazioni dichiarate dagli autori, sono state ricavate con una certa attendibilità le curve di decadimento del coefficiente di aderenza trasversale SFC misurabile con il SUMMS, peraltro, utilizzato di regola dalle società che gestiscono le principali reti stradali. Una volta approntate le curve di decadimento, è possibile organizzare veri e propri piani di manutenzione programmata, fermo restando che le espressioni analitiche dovranno essere applicate soltanto ai tronchi di strada su cui sono state effettuate le misure; infatti è molto difficile che le espressioni riguardanti i parametri riassuntivi delle caratteristiche superficiali siano valide in due tronchi non perfettamente omogenei. Tale studio ha rappresentato solo un primo passo verso l'accertamento più profondo delle mutazioni dell'infrastruttura viaria nel tempo, ma ha il pregio di avere interpretato correttamente le disposizioni contenute nel B.U. CNR 125/88.

R. N. Iyengar e O. R. Jaiswal (1995)⁷ hanno studiato le irregolarità della rotaia, derivante da errori di manifattura, perdita di portanza del sottofondo, invecchiamento dei materiali, ecc. Anche se la ricerca ha riguardato problematiche tipicamente ferroviarie, la metodologia può essere facilmente estesa alle

problematiche stradali. La scelta classica di utilizzare un processo stocastico stazionario gaussiano, ha consentito una particolare facilità nel ricavare i momenti e le funzioni di densità di probabilità. Sono stati studiati i picchi delle variabili maggiormente rappresentative per la percorrenza e sono state calcolate le funzioni di densità di probabilità di tali picchi. L'innovazione di questa ricerca consiste nell'aver individuato, attraverso il monitoraggio della varianza delle irregolarità, una spia dello stato di mantenimento del piano di rotolamento. Questa grandezza, se opportunamente seguita nel tempo, indica la decadenza dei coefficienti di sicurezza della percorrenza e, conseguentemente, può essere utile anche per l'attuazione degli interventi di manutenzione in funzione del rischio. L'interesse è, pertanto, soprattutto pratico, anche se il rigore scientifico con cui è stata svolta la trattazione ne fanno uno strumento adatto all'approfondimento teorico.

M. Agostinacchio e R. Bernetti (1995)⁸ hanno quantificato nel processo d'interazione tra veicolo e pavimentazione le sollecitazioni dinamiche aggiuntive rispetto a quelle statiche, la cui entità è risultata appartenente ad un range compreso tra il 4% ed il 40%. Tale sovraccarico aumenta in modo esponenziale al peggiorare delle caratteristiche della strada. Gli intervalli di frequenza interessati sono compresi tra 0.1 Hz e 100 Hz, cioè tra lunghezze d'onda delle irregolarità che vanno da 0.25 m ad un massimo di 225 m, con una $V = 80$ km/h. La schematizzazione del veicolo, per quanto molto complessa, non introduce ulteriori affinamenti in merito al processo stocastico, al controllo delle ipotesi (gaussianità, stazionarietà, ecc.) o alla forma della funzione di densità. Gli sviluppi futuri individuati da tale ricerca tendono all'approfondimento del comportamento a fatica delle pavimentazioni stradali sotto l'effetto di singoli carichi ciclici di intensità variabile nel tempo e nella pianificazione degli interventi di manutenzione finalizzati all'interpretazione del danno causato dal sovraccarico stradale.

Chiu Liu e Robert Herman (1996)⁹ hanno organizzato una procedura per la classificazione funzionale delle pavimentazioni che si accosta alla tradizionale metodologia dell'assegnazione del PSI ma ne migliora alcuni aspetti di ordine pratico, soprattutto legati al problema della forte soggettività dell'analista. L'articolo ha tentato un riordino della materia in modo da potere rileggere le passate esperienze sulla determinazione degli ammaloramenti delle pavimentazioni rigide e flessibili in base alle nuove possibilità offerte, in primo luogo, dai moderni strumenti di misura. Pur non rappresentando una grande novità nella ricerca di settore, tuttavia la metodologia presentata è stata ampiamente testata su applicazioni pratiche e, pertanto, appare pienamente sfruttabile nella attività concreta. Probabilmente non avrà un grande valore nel lungo termine in quanto sarà superata

quando verranno messi in opera strumenti di misura sempre più sofisticati.

Anche M. Bocci e A. Graziani (1997)¹⁰ hanno corredato lo studio classico delle irregolarità con l'utilizzo di opportuni filtri allo scopo di rimuovere determinati effetti indesiderati, quali pendenza longitudinale della strada o tessiture non influenti a causa della deformazione del pneumatico. Anche in questo caso, l'obiettivo della ricerca è quello di condurre analisi sulla sicurezza della percorrenza basate su indici riassuntivi e di agevole computazione.

Ancora si citano Chiu Liu e Robert Herman (1998)¹¹ in quanto hanno analizzato l'interazione esistente tra profilo della strada, la dinamica del veicolo e le impressioni dell'utente che percorre l'infrastruttura viaria. Utilizzando le tradizionali metodologie proprie dell'analisi spettrale, gli autori sono giunti all'identificazione di alcuni parametri che potrebbero essere utili agli obiettivi proposti. Il più indicato risulta il jerk, che opportunamente correlato con il PSI della pavimentazione, consente di dettagliare la legge psico-fisica di Fechner. La presente teoria è stata testata con diverse tipologie di profili provenienti sia da pavimentazioni in conglomerato cementizio che bituminose. I risultati, se confermati da più sperimentatori, potrebbero avere valenza in campo pratico, in quanto si potrebbero valutare con maggiore precisione oggettiva i coefficienti PSI ed inoltre quantificare in un certo qual modo il disagio degli utenti.

Lu Sun e Xuejun Deng (1998)¹², hanno proposto uno studio secondo la trattazione matematica classica dei processi stocastici, dove la forzante deriva da quella proposta dalle norme ISO, mentre il veicolo viene rappresentato mediante un semplice quarter car. Lo scopo dello studio è quello di predire i carichi dinamici dei veicoli che transitano sulla pavimentazione, facendo uso di caratteristiche statistiche quali funzioni di autocorrelazione, livello di attraversamento dei picchi, distribuzione dei picchi, ecc. E' stato confermato che se la velocità del veicolo è costante, i carichi dinamici sono un processo stocastico stazionario, ergodico, gaussiano, a media nulla, il cui PSD è proporzionale a quello della pavimentazione. Anche se questi autori non hanno apportato grandi novità al settore, ma soltanto ulteriori affinamenti, tuttavia il lavoro è stato svolto con grande riordino delle teorie classiche. L'utilità è, probabilmente, di tipo pratico in quanto l'approfondimento analitico non è dei più esasperati.

Allo scopo di armonizzare e confrontare le misure di aderenza e macrotessitura effettuate nei diversi Paesi e con diverse attrezzature, il comitato tecnico sulle caratteristiche superficiali TC1 dell'AIPCR ha condotto nel 1992 una sperimentazione in 54 siti diversi (28 in Belgio e 26 in Spagna), utilizzando 51 diverse procedure di misura adottate in 16 Nazioni. I risultati, pubblicati nel 1995¹³

hanno condotto alla definizione di un indice internazionale di aderenza (International Friction Index, IFI), derivato dal Penn State Model, a cui poter ricondurre tutte le misure di aderenza e macrotessitura effettuate con le diverse apparecchiature utilizzate nell'esperimento.

V.R. Shah e J.J. Henry (1997)¹⁴ e, successivamente M. Gothiè (1998)¹⁵, hanno presentato i risultati dello studio del 1992 dell'AIPCR accennato precedentemente, con lo scopo di perseguire i seguenti obiettivi: 1) stabilire le relazioni esistenti tra misure di aderenza e misure di tessitura, utilizzando vari strumenti su molteplici superfici stradali; 2) armonizzare i risultati forniti da differenti strumenti; 3) quantificare la ripetibilità delle misure; 4) promuovere una nuova scala internazionale per la misura dell'aderenza.

Il contributo allo stato dell'arte di questa ricerca è significativo in quanto ha predisposto un indice unitario per la valutazione dell'aderenza misurata con strumenti differenti e su diverse tipologie di manti stradali. La metodologia utilizzata sembra valida e si è basata su una popolazione molto vasta, sia per quanto riguarda il numero degli strumenti che per le tipologie stradali esaminate. Il lavoro è utile sia per l'aspetto pratico che per la ricerca. Infatti, l'approntamento di un indice unico consentirebbe di determinare in modo più oggettivo la prestazione di determinate soluzioni sia progettuali che manutentive, oltre a permettere la predisposizione di strumenti di misura aventi output maggiormente standardizzati. La validità della ricerca è, pertanto, fortemente legata alla correttezza delle leggi di correlazione stabilite, soprattutto in virtù del decadimento delle prestazioni di aderenza.

Anche G. Bosurgi, S. Cafiso e O. Pellegrino (1998)¹⁶, hanno esaminato l'incremento dinamico che si sviluppa proprio a causa delle irregolarità della pavimentazione. In particolare sono stati studiati i picchi dell'incremento del peso aderente del veicolo, arrivando a formularne una funzione di densità di probabilità. Questo articolo rappresenta un primo passo nello studio più approfondito dei fenomeni che regolano l'interazione tra il veicolo e la pavimentazione. Pur utilizzando schematizzazioni molto semplici, che limitano leggermente l'attendibilità dei risultati finali, si è introdotta l'aleatorietà per la comprensione di questi problemi.

G. Bosurgi e O. Pellegrino (1998)¹⁷ hanno successivamente studiato il problema della sicurezza della percorrenza, correlandola alla programmazione degli interventi di manutenzione. Dato che un requisito fondamentale per potere predisporre qualunque strumento manutentivo è la conoscenza delle leggi di decadimento delle variabili monitorate, queste sono state desunte da quelle relative al coefficiente di aderenza trasversale SFC, in funzione delle caratteristiche superficiali di varie tipologie di manti stradali e, precisamente, un'usura tradizionale, un'usura drenante

ed un macroseal. Pertanto, assumendo aleatorie le variabili di interesse, valutando i parametri relativi all'aderenza, tenendo conto del loro decadimento con il numero di passaggi, ipotizzando la percorrenza della curva a diverse velocità e con differenti soluzioni progettuali del manto di usura è stato possibile pervenire ad una valutazione dell'affidabilità della manovra allo sbandamento. Il lavoro può avere un impatto sulla pratica dell'approntamento degli strumenti manutentivi e lo sviluppo naturale è proprio l'applicazione su strade reali.

Gli Autori hanno continuato¹⁸ lo studio basato sulla programmazione degli interventi di manutenzione in cui le variabili in gioco hanno carattere aleatorio. Oltre al costo, visto come risorsa disponibile da parte dell'Ente gestore, è stato individuato un indicatore dell'affidabilità della manovra in curva in funzione anche della variabilità delle caratteristiche superficiali del manto. La valutazione è scaturita dalla risoluzione di un problema di ottimizzazione a vincoli non lineari.

S. Otto e S. T. Ariaratnam (1999)¹⁹ hanno trattato le procedure per la definizione di sistemi di misure delle prestazioni per quanto riguarda la manutenzione stradale.

Tali teorie, applicate con successo in altre branche dell'ingegneria, non sono state mai applicate in larga scala al settore stradale. Tale ricerca ha indicato le linee guida secondo cui il modello deve contemplare, innanzitutto, una combinazione di misure quantitative e qualitative, deve potere effettuare confronti diretti con altre metodologie e deve potere migliorare la gestione del patrimonio stradale in funzione dei costi. Lo studio in esame è abbastanza moderno in quanto si propone di relazionare gli interventi di manutenzione al budget disponibile.

G. Bosurgi, A. D'Andrea e O. Pellegrino (1999)²⁰ hanno trattato il processo decisionale, legato alla scelta del tipo di intervento, in funzione del livello di ammaloramento raggiunto dalla pavimentazione e della sua ricaduta sulla sicurezza. Lo studio dell'allocazione ottimale è stato affrontato con il metodo GRG (Generalized Reduced Gradient). La procedura è facilmente estendibile a profili reali ricavabili elaborando i dati dedotti dagli strumenti di misura.

Già dalla seconda metà degli anni '90 un gruppo di ricerca facente capo a V. Rouillard, B. Bruscella e M. Sek^{21 22 23} ha cominciato a studiare in modo abbastanza esasperato dal punto di vista analitico l'interazione che si crea tra veicolo e pavimentazione. Innanzitutto, sono state introdotte una lunga serie di variabili aventi il compito di controllare meglio la reologia del veicolo e, quindi, la risposta sulla pavimentazione. Gli autori sono giunti ad alcune conclusioni già dai primi rapporti che sono in alcuni casi discordanti dagli studi classici:

- La forma del PSD delle elevazioni della superficie stradale non dipende dalla rugosità della stessa;

- specialmente in caso di forti irregolarità, si devono analizzare le caratteristiche statistiche dei picchi;
- qualunque transitorio presente nel segnale deve essere isolato e processato a parte;
- il processo non deve essere trattato come stazionario;
- sezioni stradali non omogenee tra loro mostrano differenti caratteristiche di densità di probabilità delle funzioni caratteristiche.

Il merito maggiore consiste nell'aver scandagliato in profondità le procedure analitiche, tramite l'utilizzo di processori di segnali digitali insieme a tecniche di filtraggio nel dominio del tempo per la riproduzione di segnali stazionari e non, ma il lavoro svolto potrebbe non avere le ripercussioni pratiche attese. Infatti, data la grande variabilità del parco veicolare, le caratteristiche reologiche sono difficilmente rappresentabili nella loro complessità, a meno che non si complichino enormemente il modello funzionale. Nelle fasi successive della ricerca, gli stessi autori hanno confermato le risultanze precedenti circa la difficoltà di modellare il profilo stradale per mezzo di processi aleatori stazionari e gaussiani. Dai rapporti degli ultimi mesi del 2000, si evince come risultato significativo la determinazione di nove parametri universali di classificazione. Le applicazioni pratiche possono essere, tradizionalmente, di due tipi: la prima riguarda la caratterizzazione e la classificazione di superfici stradali specifiche a scopo di trasporto e di manutenzione; la seconda riguarda la simulazione di profili stradali per lo studio della dinamica dei veicoli. L'applicazione pratica potrebbe essere utilizzata soltanto per testare le condizioni di regolarità superficiali in siti particolarmente a rischio, anche se rimane, comunque, una campagna molto costosa da organizzare, non solo perché presuppone l'utilizzo di profilometri di ultima generazione ma anche per la successiva trattazione dei dati raccolti che si presenta molto lunga e complessa.

1.2.2 Smaltimento delle acque meteoriche

Per quanto riguarda lo studio delle capacità drenanti delle pavimentazioni, le prime esperienze risalgono agli anni '30, quando Stabilini e Balatroni hanno formulato le prime considerazioni, ipotizzando un moto uniforme su canali. L'attenzione verso queste problematiche si è manifestata, comunque, dopo gli anni '40, quando da un lato si voleva controllare l'efficacia delle formule cosiddette razionali per il calcolo della portata e, dall'altro, emergeva una certa preoccupazione per lo smaltimento delle acque meteoriche dalle piste aeroportuali. Furono compiute delle esperienze molto importanti da Izzard ed Hicks ai quali seguirono lavori di

tipo teorico-sperimentali svolti da Horton, Corner, Brater ed altri. Allo scopo di testare sul campo le risultanze teoriche, sono stati approntati con alcune difficoltà i primi esperimenti in cui si sono misurate soltanto le quantità d'acqua pervenute e defluite dalla superficie, quantificabili con uno strumento di misura delle portate e quelle trattenute sulla superficie durante le fasi transitorie di aumento e di diminuzione del flusso. Si è presentata, invece, complessa la stima dell'altezza del velo idrico, in quanto questo è influenzato dalla pioggia battente.

Dall'esame critico della letteratura fino agli anni '70, comunque, emerge quanto segue:

- Il profilo del velo idrico è di tipo parabolico con convessità verso l'alto e valore massimo dello spessore in corrispondenza dell'estremità a valle;
- il moto è turbolento puro durante la pioggia, mentre si può assimilare a quello di transizione al termine della stessa;
- il tempo di messa a regime per pavimentazioni impermeabili è dell'ordine dei minuti, mentre il fenomeno dell'esaurimento si estende per un tempo più lungo;
- la rugosità diminuisce gli spessori efficaci ma favorisce anche la permanenza dell'acqua sulla superficie stradale;
- sono di difficile adattamento le tradizionali teorie idrauliche, teorizzate e calibrate per i canali e non per manti stradali in cui la scabrezza assume un ruolo nettamente più preponderante.

Successivamente, con l'avvento dei manti drenanti fonoassorbenti, di cui l'esempio più famoso è stato quello della bretella Fiano S. Cesareo, si è reso necessario affinare lo stato dell'arte relativo a tale argomento. Sono state svolte numerosissime teorie ma soprattutto molte prove sul campo che hanno tracciato una nuova frontiera anche in virtù del mantenimento di certe caratteristiche del manto nel tempo.

L'interazione tra il pneumatico e la sovrastruttura è funzione del tipo di manovra, delle caratteristiche superficiali della pavimentazione ma anche delle condizioni ambientali. Il contributo della macrorugosità, come emerge da studi di Gothie (1999)²⁴ e del PIARC (1991)²⁵, diviene più importante alle alte velocità ed in presenza di velo idrico; cioè in condizioni di "rischio elevato" che giustificano per tale grandezza un ruolo certamente non comprimario rispetto alla microrugosità: analizzando l'andamento del tasso di incidentalità in funzione dell'altezza di sabbia in condizioni medie del battistrada e per strada bagnata si è visto che la macrorugosità influenza il tasso quando il valore dell'HS è inferiore a 0.5 mm, mentre il suo contributo è pressoché ininfluenza quando HS è maggiore a 0.8 mm; in corrispondenza dei valori più bassi di macrorugosità si è stimato un tasso di

incidentalità pari a 0.5 incidenti per 10^6 veicoli per km.

È importante aggiungere che le fonti statistiche, sia nazionali che estere, come K.W.Ogden (1996)²⁶, mostrano che circa il 20÷30 % degli incidenti avviene in condizioni di strada bagnata. Se tale dato si mette in relazione con la frequenza delle precipitazioni atmosferiche si ricava che, soprattutto in ambito extraurbano, il tasso di incidentalità sul bagnato risulta da due a tre volte maggiore rispetto a quello riscontrato sull'asciutto.

D'altro canto è anche ampiamente dimostrato che gli interventi di manutenzione superficiale delle pavimentazioni comportano sempre una notevole riduzione dell'incidentalità su strada bagnata. Non altrettanto certi sono i benefici ottenibili nella situazione di manto asciutto.

Tra le cause che determinano un brusco decadimento delle prestazioni della superficie di rotolamento, oltre quelle tradizionalmente studiate, hanno assunto particolare rilievo quelle legate alla temperatura dell'acqua e delle polveri presenti sulla sovrastruttura, così come confermato da molteplici sperimentazioni.

Si sono realizzati modelli tridimensionali per simulare in tempo reale il comportamento di marcia e di frenata di un veicolo tipo in funzione del tracciato e delle condizioni di moto. Sono state eseguite delle analisi comparative delle prestazioni di diverse tipologie di trattamento superficiale del manto che ne hanno riconosciuto il ruolo importante giocato ai fini dell'incremento della sicurezza.

Allo stato attuale sono disponibili una vasta gamma di nuovi manti di usura²⁷ che si affiancano al tradizionale strato di conglomerato bituminoso chiuso quali i conglomerati bituminosi drenanti²⁸, i conglomerati antisdrucchiolo SMA, i tappeti grenu-antiskid sottili (BBM) e molto sottili (BBTM) rinforzati con fibre di vetro, ecc. Ognuna di queste soluzioni comporta vantaggi e svantaggi, ma in ogni caso migliora il coefficiente di aderenza su strade bagnate e sporche e quindi garantisce un maggior livello di sicurezza della pavimentazione.

Pasetto e Zanutto (1997)²⁹ hanno posto l'attenzione al deflusso delle acque meteoriche lungo le curve di transizione, nelle quali la pendenza trasversale della piattaforma risulta essere critica. In caso di precipitazione meteorica in questi elementi si forma la massima altezza di velo idrico, che diminuisce l'aderenza disponibile in prossimità di una curva. È stato trovato che il profilo longitudinale del ciglio esterno più performante ai fini della minimizzazione dell'altezza massima di velo idrico è quello cosinusoidale, anche se si determinano dei punti angolosi tra clotoide e rettifilo.

Sono molti gli studi recenti che hanno riguardato le pavimentazioni drenanti, come quello proposto da Ranieri (1997)³⁰, che ha realizzato dei modelli di deflusso

per filtrazione delle acque meteoriche, per cui è stato possibile legare le caratteristiche fisiche del conglomerato bituminoso drenante con quelle geometriche della sagoma stradale e con l'intensità di pioggia.

Come è stato già accennato, la formazione di veli idrici sulla pavimentazione stradale dipende fortemente anche dall'andamento plano-altimetrico dei tracciati stradali. E' stato proposto da Domenichini e Loprinçipe (1997)³¹ un nuovo criterio di valutazione dell'andamento anzidetto basato sullo studio delle modalità di deflusso dell'acqua meteorica sui piani stradali. Gli autori hanno raggiunto l'obiettivo studiando la distribuzione areale dei veli idrici su una pavimentazione qualsiasi in funzione delle caratteristiche geometriche del tracciato e dell'intensità di pioggia.

Per quanto detto in precedenza, una quantificazione dell'efficacia degli interventi di manutenzione sulle caratteristiche superficiali sembra alquanto ardua. Il compito è reso più difficile in ambito urbano, in quanto vengono riportate per lo più numerose esperienze sull'efficacia degli interventi di ripristino delle caratteristiche superficiali condotte su strade extraurbane e/o autostrade.

Una prima analisi della letteratura³² ha evidenziato una riduzione percentuale di incidenti pari a $10 \div 15\%$. In una più recente e dettagliata esperienza inglese sul legame tra aderenza e tasso di incidentalità su pavimentazione bagnata³³ è stato osservato che la fluttuazione stagionale dell'aderenza presenta un andamento molto simile a quello del tasso di incidentalità per fondo sdruciolevole. Partendo da tale presupposto ed avendo a disposizione le statistiche dei sinistri ed i dati di aderenza per un campione rappresentativo di tronchi stradali inglesi, è stato possibile ricavare una relazione affetta da un elevato grado di correlazione tra il numero di incidenti per strada bagnata espresso come percentuale degli incidenti totali verificatisi in condizione di strada bagnata denominato *Wet-road Skidding Rate (WSR)* ed una grandezza adimensionale rappresentativa dell'aderenza espressa come rapporto tra il valore del coefficiente di aderenza trasversale misurato attraverso lo SCRIM in un dato mese dell'anno, denominato *SC (SCRIM Coefficient)* e lo stesso valore mediato nel periodo estivo (*average mean summer SCRIM Coefficient*). Tale rapporto viene denominato *SRR (Skidding Resistance Ratio)*.

Dall'analisi della serie storica di dati di aderenza adoperati nello stesso studio, è stato ricavato un valore misurato nel periodo estivo dello *SCRIM Coefficient*, mediato su 5 anni di monitoraggio pari a 0.45. È stato quindi possibile, sostituendo tale valore nell'espressione dello *Skidding Resistance Ratio* ed operando le debite sostituzioni, calcolare la riduzione degli incidenti dovuta ad un incremento dell'aderenza trasversale. L'autore, ad esempio, giunge alla conclusione che un

aumento del coefficiente di aderenza trasversale SC (*Scrim Coefficient*) misurato attraverso l'apparecchiatura SCRIM, pari a 0.10 può provocare una riduzione del 13% degli incidentali stradali sul bagnato. Un trend simile sembra confermato anche in un altro studio condotto in Inghilterra su 2000 siti³⁴ dove, dopo un intervento di ripristino delle caratteristiche superficiali si è osservato un calo dell'incidentalità pari al 10%.

Analoghe esperienze sono riportate anche da studi condotti in Francia partendo da dati sull'incidentalità e sull'aderenza misurata sia come Coefficiente di Aderenza Trasversale (CAT), attraverso lo SCRIM, sia come altezza in sabbia (HS), mediante un profilometro laser (Rugolaser)³⁵. In tale lavoro è stato esaminato un campione di circa 1100 Km di strade nella regione Rhône-Alpes per il quale erano disponibili misure relative a grandezze caratteristiche dell'aderenza (CAT, HS) e dettagliati dati di incidentalità da cui sono stati estratti gli incidenti verificatisi in presenza di fondo stradale bagnato, che, come si è visto in precedenza, sono affetti da un maggior grado di correlazione con il livello di aderenza. Dall'esame delle relazioni ricavate tra i tassi di incidentalità su strada bagnata da una parte ed il Coefficiente di aderenza trasversale e la macrotessitura espressa mediante l'altezza in sabbia, dall'altra, si evince un andamento che sembrerebbe indicare che esiste un valore di soglia tanto per il CAT quanto per l'altezza in sabbia al di sotto del quale si osserva un sensibile aumento del numero di incidenti sul bagnato.

1.2.3 Metodi di misurazione

Per quanto riguarda gli aspetti normativi, in Italia, non esiste un quadro legislativo che prescriva il monitoraggio delle caratteristiche superficiali ed in particolare dell'aderenza ai fini della riduzione dell'incidentalità ma le modalità di gestione della manutenzione della rete stradale sia urbana che extra-urbana sono affidate alla sensibilità delle amministrazioni locali (Comuni, Provincie e Regioni) e degli Enti Gestori (Autostrade, ANAS, etc.).

Nell'ambito della norma CNR B.U. 125/88, che non ha, ricordiamo, alcun valore cogente, è stata proposta una classificazione delle caratteristiche superficiali unitamente a criteri e metodologie di gestione della manutenzione della rete stradale. In tale ambito sono stati suggeriti anche valori di soglia per il Coefficiente di Aderenza Trasversale misurato con lo SCRIM e per l'altezza in sabbia operando una preliminare distinzione tra i siti più o meno suscettibili di provocare incidenti per perdita di aderenza.

In ambito internazionale, non esistono molti esempi di politiche tese al

miglioramento dell'aderenza e delle caratteristiche superficiali. In passato, nelle norme estere al pari di quelle Italiane, si è pensato soprattutto ad elaborare, in sede di Capitolato, delle specifiche relative ai materiali utilizzati negli strati superficiali ed in particolare modo agli inerti, ritenuti, non a torto, i principali responsabili di una buona microtestitura della pavimentazione che rappresenta un requisito indispensabile per fornire un soddisfacente livello di aderenza all'interfaccia pneumatico-pavimentazione. Sono così state elaborate diverse prescrizioni che riguardano gli inerti in base alla rispettiva angolarità e spigolosità, e mediante l'esecuzione di prove di resistenza alla frantumazione (Los Angeles), di resistenza al consumo per attrito (Deval) e soprattutto di resistenza all'abrasibilità (Prova di Levigatura Accelerata).

La recente diffusione delle apparecchiature di rilievo dell'aderenza ad elevato rendimento si è, inoltre, tradotta in una ulteriore serie di norme relative alle procedure di misura e di calibrazione di tali dispositivi. Non sempre in tali norme vengono suggerite modalità di esecuzione di un programma di monitoraggio o procedure per il trattamento dei dati acquisiti.

Probabilmente un quadro normativo tra i più completi in merito è quello vigente nel Regno Unito su cui vale la pena di soffermarsi, in quanto sembra l'unico esempio di normativa sull'aderenza mirata alla riduzione del numero di incidenti³⁶.

L'introduzione di tali standards³⁷ è seguita ad una estesa campagna di monitoraggio dell'aderenza intrapresa dal Dipartimento dei Trasporti inglese agli inizi degli anni ottanta. Accanto a tale campagna di rilievo, che ha interessato più di 1000 Km della rete stradale nazionale, è stata condotta anche una approfondita analisi dei dati di incidentalità che ha portato ad una classificazione in categorie di sito (*site categories*) per le quali l'analisi disaggregata dei dati di incidentalità forniva risultati affetti da una minore dispersione. Sono state individuate in tutto 13 categorie: 1) tronchi autostradali (*Motorway*); 2) strade extraurbane senza interruzioni a carreggiate separate (*Nonevent Dual Carriageway*); 3) strade extraurbane senza interruzioni a carreggiata singola (*Nonevent Single Carriageway*); 4) incroci minori tra strade a carreggiate separate (*Minor Junction (dual carriageway)*); 5) incroci minori tra strade a carreggiata singola (*Minor Junction (single carriageway)*); 6) Incroci principali (*Major Junction*); 7) livellette > 50 m, (*Gradient*) in discesa/salita con pendenza compresa tra il 5 ed il 10 %; 8) livellette > 50 m, (*Gradient*) in discesa/salita con pendenza maggiore del 10 %; 9) curve (*Bend*) con raggio ≤ 250 m; 10) tratti di avvicinamento alle rotatorie (*Approach to roundabout*); 11) tratti di avvicinamento a semafori, attraversamenti pedonali, ferroviari o similari (*Approach to traffic signals, pedestrian crossing, railway-level crossings or similar*); 12) curve (*Bend*) con raggio ≤ 100 m;

13) rotatorie (*Roundabout*).

Nelle norme vengono riportate dettagliatamente le procedure di impiego e di calibrazione dello SCRIM, le cui misure su di un dato tronco dovranno essere ripetute secondo cicli della durata di tre anni.

Nelle norme vengono introdotti due importanti concetti: il *livello di attenzione* (*Investigatory Level*) dell'aderenza ed il *fattore di rischio* (*Risk Rating*). Per un data tipologia di sito, il livello di attenzione corrisponde ad un determinato valore dell'aderenza, misurata mediante lo SCRIM, al di sotto del quale risulta indispensabile provvedere ad un'indagine approfondita del sito in oggetto. Il fattore di rischio rappresenta un parametro legato all'incidentalità del sito e permette al tecnico, dopo un'ampia riflessione su tutti i fattori che concorrono all'incidentalità del sito stesso, di abbassare o innalzare il livello di attenzione.

In base agli studi di incidentalità effettuati, sono stati individuati per ogni categoria di sito il livello di attenzione ed il relativo fattore di rischio. Se in un dato sito viene misurato, mediante lo SCRIM, un valore di aderenza al di sotto del livello di attenzione, la tratta in esame viene immediatamente posta sotto osservazione per comprendere se l'esistente livello di aderenza possa presumibilmente influenzare il numero di incidenti. Se l'esito di tale indagine è positivo, la tratta entra nel programma di manutenzione con una priorità dipendente dal relativo fattore di rischio e viene eseguita un'analisi economica per individuare l'intervento ottimale di ripristino dell'aderenza. Se l'esito dell'indagine è negativo, la tratta non entra nel programma di manutenzione e viene riclassificata in termini di fattore di rischio e livello di attenzione.

1.3 SVILUPPI FUTURI DELLA RICERCA

Da parecchio tempo, si è sentita ormai, la necessità di una manutenzione che venga predisposta fin già dalla fase di progettazione, al fine di migliorare la sicurezza degli utenti che percorrono l'infrastruttura viaria.

Il progresso tecnologico delle strumentazioni di diagnosi delle pavimentazioni, unitamente allo sviluppo ed all'affinamento delle procedure analitiche hanno contribuito ad alimentare in modo determinante questo settore della ricerca.

La confusione che inevitabilmente si è creata deve essere completamente dissolta per potere disporre di controlli sui principali indicatori di stato che siano largamente standardizzati. Ciò per potere estendere la validità accertata di una soluzione anche su altri siti senza dovere ripetere tutte le campagne di rilevamento, ma soprattutto per utilizzare le numerosissime esperienze anche di tipo empirico svolte in questi

decenni.

Pertanto, da un lato occorre proseguire il tentativo di standardizzare le principali grandezze utilizzate per la conoscenza delle caratteristiche, iter di già peraltro iniziato e, dall'altro, sarebbe opportuno ridurre drasticamente il numero degli indicatori di stato per minimizzare i costi di indagine.

Piuttosto non sembra che l'approfondimento analitico sia ulteriormente perseguibile con successo, in quanto l'estrema complessità di calcolo, derivante solitamente da una dettagliata rappresentazione del veicolo ed in misura minore della pavimentazione, fornisce dei risultati difficilmente estensibili per i casi generali che sono quelli che interessano a chi gestisce le operazioni di manutenzione.

Occorre puntualizzare che le indagini devono essere eseguite con una certa cadenza temporale. Proprio perchè le prescrizioni del CNR 125/88 possono essere rispettate soltanto se si conoscono gli andamenti delle leggi di decadimento dei parametri considerati. E' ormai accertato che tali leggi, purtroppo, sono fortemente contestualizzate per cui vanno ispezionate senza potere far ricorso ad andamenti di tipo generale.

Quest'ultimo passaggio è forse quello più oneroso dal punto di vista sia economico che pratico, in quanto suppone una costante attenzione operativa dell'ente preposto alla gestione.

Nei prossimi anni si assisterà pertanto, ad una vasta campagna di reperimento dati con strumenti in continuo, quali i profilometri di ultima generazione, con l'ausilio anche di GPS per il georiferimento dei tratti studiati unitamente alle loro caratteristiche ed alla creazione dei data base, comprendenti le grandezze necessarie alla calibrazione delle procedure di manutenzione.

A questo punto è possibile fare ricorso alle procedure per l'allocazione ottimale delle risorse disponibili, per potere allestire un vero e proprio PMS. Con questo termine, secondo la definizione AASHTO, si intende una procedura ben definita che include la quasi totalità delle attività relative alla gestione della pavimentazione, connesse in maniera sistematica e coordinata. Esso consiste di cinque elementi essenziali a supporto delle scelte in vari livelli di gestione:

1. Indagini sulla pavimentazione relative alla condizione ed alla durata della stessa.
2. Database contenente tutte le informazioni relative alla pavimentazione.
3. Schema d'analisi.
4. Criteri decisionali.
5. Procedure di implementazione.

La ricerca dei prossimi anni deve tendere a dettagliare le procedure di ottimizzazione ed, in particolare, quelle multiobiettivo devono essere adeguatamente ispezionate, in

quanto il limite maggiore che ha frenato fino a qualche anno fa lo sviluppo della ricerca e, cioè l'estrema complessità delle elaborazioni matematiche e la difficoltà della convergenza delle soluzioni in un tempo ammissibile, è superato con il progresso degli elaboratori.

1.4 RISULTATI ATTESI

L'obiettivo primario dichiarato è quello di pervenire a correlazioni attendibili tra sicurezza ed operazioni di manutenzione. Tale risultato si raggiunge dopo avere analizzato in modo specifico i dati di incidente delle tratte esaminate ed avere individuato eventuali criticità delle manovre di guida riferite a quel particolare contesto. Successivamente, sarà possibile indirizzare le fasi di programmazione in modo tale da massimizzare l'affidabilità alla percorrenza degli utenti nel rispetto delle somme a disposizione.

Il risultato atteso della ricerca è, quindi, la realizzazione di linee guida per la redazione dei piani di programmazione degli interventi di manutenzione delle sovrastrutture stradali in regime di risorse limitate, mediante opportune campagne di rilevamento, con conseguente formazione di appropriati data base ed elaborazione dei risultati per mezzo procedure che aiutino il gestore nel processo decisionale che deve essere finalizzato alla sicurezza della tratta studiata.

2 CONTENUTI E MODALITÀ DI REALIZZAZIONE

2.1 OGGETTO DELLA RICERCA

Obiettivo della ricerca è la realizzazione di linee guida per la redazione di piani di manutenzione programmata che rendano possibile la gestione ottimale degli interventi in regime di risorse limitate in funzione della sicurezza della percorrenza.

I documenti da produrre, ciascuno costituente il risultato di una delle fasi della ricerca, possono essere così elencati:

1. Rapporto dettagliato sullo stato dell'arte dell'argomento;
2. programma per il coordinamento delle attività che condurranno all'espletamento dell'iter della ricerca;
3. rapporto contenente le modalità di attuazione dei diversi interventi, individuati con analisi numeriche e validazioni sperimentali in relazione alle grandezze assunte dalle caratteristiche funzionali della pavimentazione;
4. rapporto contenente i risultati delle analisi d'incidentalità;
5. rapporto comprendente le espressioni analitiche individuate a valle dell'elaborazione dei dati in possesso;
6. organizzazione di un modello tipo PMS;
7. proposta di integrazione dei risultati ottenuti all'interno delle normative vigenti.

2.1.1 Rapporto sullo stato dell'arte

Il rapporto dettagliato sullo stato dell'arte dovrà contenere almeno:

- dati sugli incidenti in tutti gli elementi geometrici caratteristici (in curva, in prossimità degli incroci e delle immissioni, per difetti di frenatura ed in generale causati da fenomeni di deficit di aderenza e di regolarità, ecc.) con confronti internazionali e analisi sull'evoluzione del fenomeno;
- stato dell'arte sulle tecniche analitiche per la rappresentazione realistica della percorrenza veicolare in presenza di irregolarità, di precaria aderenza o di aquaplaning;
- stato dell'arte sulle procedure decisionali per la scelta dei diversi interventi basati sulle analisi benefici/costi;

- stato dell'arte sulle procedure di realizzazione degli interventi analizzati, con particolare riferimento all'organizzazione del cantiere;
- stato dell'arte sulla preparazione dei PMS (Pavement Management System);
- risultati delle ricerche sulle prestazioni in esercizio degli interventi proposti in Italia ed all'estero;
- politiche di miglioramento della sicurezza di tali tecniche nel mondo.

2.1.2 Programma per il coordinamento delle attività della ricerca

Tali linee guida conterranno almeno:

- definizione dei contenuti minimi del progetto;
- definizione dei criteri di valutazione degli indicatori di stato e delle metodologie per la loro misura;
- localizzazione degli elementi che richiedono maggiore interesse (curve, incroci, immissioni, punti singolari, ecc.);
- definizione dei sistemi di drenaggio e loro ricaduta sul fenomeno dell'aquaplaning;
- criteri per l'organizzazione del cantiere e del traffico durante i lavori;
- definizione di un ventaglio di interventi e principi di scelta in funzione del budget disponibile;
- alcuni progetti campione.

2.1.3 Rapporto sulle funzioni di prestazione

Il rapporto contenente l'efficacia dei diversi interventi, individuata con analisi numeriche e validazioni sperimentali in relazione alle grandezze assunte dalle caratteristiche funzionali della pavimentazione, dovrà tenere conto almeno di:

- presenza o meno di velo idrico;
- tipologia e degrado della pavimentazione;
- leggi di decadimento dei principali indicatori di stato;
- definizione in termini aleatori delle principali grandezze interessate, quali velocità, aderenza, ecc.;
- interazione veicolo-pavimentazione;
- riferimento a tratti omogenei;
- geometria della tratta analizzata;
- variazione dei risultati in funzione dell'intervento proposto.

2.1.4 Raccolta dati ed analisi di incidentalità

Tale rapporto contenente il dettaglio delle analisi d'incidentalità, deve comprendere:

- tipologia di strada e caratteristiche principali (numero di corsie, larghezza corsie e banchine, larghezza margini, curvatura orizzontale e verticale, pendenza longitudinale e trasversale, stato della pavimentazione, stato della segnaletica, illuminazione);
- caratteristiche del traffico (TGM, spettro di traffico, velocità media del flusso disaggregata per tipologia di veicolo, ottantacinquesimo percentile della velocità del flusso);
- caratteristiche dell'incidente riconducibile alle problematiche legate a deficienze manutentive (presenza di cantieri, cause legate a maggiori assunzioni di rischio, caratteristiche superficiali, degrado della portanza e/o geometria stradale, velocità d'impatto, dinamica dell'incidente).

2.1.5 Elaborazione dati

E' un rapporto in cui devono essere individuate, a valle delle fasi precedenti, alcune espressioni analitiche comprendenti, almeno, le seguenti peculiarità:

- relazione che esprima il numero di incidenti in funzione delle caratteristiche geometriche e di traffico dettagliate prima;
- distribuzione delle categorie di incidente per ciascun tipo di strada;
- distribuzione delle velocità, dell'aderenza e dei principali indicatori per ciascun tipo di strada prima e dopo l'intervento di manutenzione;
- correlazioni tra stato della pavimentazione e sicurezza.

2.1.6 Definizione delle funzioni di prestazione

Il rapporto dovrà contenere:

- La definizione delle funzioni di prestazione della sicurezza ai fini dell'organizzazione di un modello tipo PMS che consenta di individuare l'intervento ottimale per un determinato sito, con opportune classi di utenti e di veicoli e che rispetti il limite massimo di un budget disponibile comunque sufficiente. Tale modello deve, naturalmente, offrire una differenziazione delle scelte tipologiche degli interventi al variare delle risorse.

2.1.7 Integrazione normative

Tale documento prevede:

- La proposta di integrazione dei risultati ottenuti all'interno delle normative vigenti;
- la determinazione dei valori di soglia all'interno dei quali individuare l'intervento ottimale e la codifica dei principali tipi di intervento in funzione delle analisi sperimentali e delle analisi benefici/costi.

2.2 MODALITÀ DI ESECUZIONE

La ricerca si articolerà, come già detto, in sette fasi, per ognuna delle quali si riportano di seguito le modalità esecutive ed il prodotto finale:

FASE 1

Modalità esecutive: dovrà essere realizzata in base ad analisi bibliografica nazionale ed internazionale che dovrebbe essere arricchita con visite di studio presso organismi di ricerca in Italia e all'estero che affrontano tali problematiche con le metodologie più avanzate.

Prodotto finale: Rapporto sullo stato dell'arte.

FASE 2

Modalità esecutive: verranno utilizzati i risultati dell'analisi bibliografica, attraverso il lavoro coordinato di un gruppo di esperti che realizzeranno dei progetti campione o delle rigorose simulazioni per verificare l'applicabilità delle soluzioni proposte.

Prodotto finale: programma per la redazione di progetti campione.

FASE 3

Modalità esecutive: tale fase verrà attuata mediante analisi numeriche e prove sperimentali di verifica. Le prime dovranno tenere conto almeno dei seguenti aspetti: definizione aleatoria delle principali grandezze, quali velocità, caratteristiche superficiali, reologia del veicolo, tempo psicotecnico di azione e reazione di determinate classi di utenti, comportamento visco-elasto-plastico dei materiali.

Le verifiche sperimentali si applicheranno su tratti omogenei di pavimentazione e si baseranno sulla percorrenza a diversa velocità con controlli su tutte le variabili interessate al fenomeno; il monitoraggio deve avvenire con strumenti di misura possibilmente in continuo, i cui gli output possono essere facilmente controllati per mezzo di analisi statistiche e probabilistiche. Le prove devono essere ripetute,

variando sia il mezzo transitante, che la classe di utente; inoltre, i controlli devono essere svolti anche dopo l'intervento di manutenzione a cadenze regolari, in modo da tracciare le curve di decadimento delle grandezze ispezionate al variare del tempo.

Prodotto finale: linee guida preliminari per la preparazione delle prove sperimentali.

FASE 4

Modalità esecutive: la fase 4 riguarderà la raccolta dati di incidente per deficit addebitabili a cattive condizioni della pavimentazione. Le reti di riferimento devono comprendere campioni significativi delle diverse tipologie di strada e devono essere rappresentativi della molteplicità delle condizioni al contorno (traffico, requisiti climatici ed ambientali, ecc.) riscontrabili nella rete nazionale.

Prodotto finale: linee guida per la preparazione delle analisi di incidenti.

FASE 5

Modalità operative: si elaboreranno i dati rilevati nella fase 4 sui tratti esistenti inserendo, eventualmente, anche quelli sperimentali ed integrando l'analisi con le conoscenze acquisite in differenti condizioni di strada e di traffico.

Prodotto finale: linee guida per l'elaborazione dei dati recepiti nella fase precedente.

FASE 6

Modalità operative: in questa fase si dovrà procedere adattando e migliorando i modelli esistenti in una prima fase e incorporando nei modelli stessi i risultati delle analisi sperimentali in una fase successiva, in modo da rendere attuabili applicazioni pilota, analisi di sensibilità e validazione.

Prodotto finale: documento con il quale è possibile preventivare e verificare le strategie di manutenzione.

FASE 7

Modalità operative: consisterà in una proposta di revisione e aggiornamento delle norme sulla gestione delle infrastrutture viarie basata sui risultati delle ricerche.

Prodotto finale: rapporto sui vantaggi derivanti dall'utilizzo delle procedure proposte e riassunto di questi con adatti parametri sintetici.

2.3 TEMPI, RISORSE E COSTI

Le fasi prima esposte rappresentano funzioni dei tempi di realizzazione e dei costi. Tali grandezze sono di importanza fondamentale per la riuscita della ricerca in quanto devono garantire alti livelli di prestazione minimizzando le spese, le variabili temporali e sfruttando al meglio le risorse disponibili.

Nel seguito, si farà un'analisi delle fasi principali dello studio, riassumendole alla fine in un quadro di sintesi. Si premette che per l'aliquota delle spese relative alle risorse umane, queste si dettaglieranno nelle seguenti figure, con i relativi costi, comprensivi delle spese generali dell'ente di ricerca:

– Senior (coordinatore)	£/mese	50.000.000
– Junior 1	£/ mese	40.000.000
– Junior 2	£/ mese	30.000.000
– Tecnico laureato	£/ mese	20.000.000
– Tecnico non laureato	£/ mese	10.000.000

Assumendo che un mese lavorativo sia costituito da 20 giorni, ciascuno dei quali comprenda 8 ore, si ha:

– Senior (coordinatore)	£/ora	312.500
– Junior 1	£/ora	250.000
– Junior 2	£/ora	187.500
– Tecnico laureato	£/ora	125.000
– Tecnico non laureato	£/ora	62.500

Si sottolinea, comunque, che la durata complessiva non può essere determinata dalla sommatoria delle ore computate per ciascuna figura professionale, ma si dovrà tenere conto che la detta attività non verrà svolta in modo continuativo.

La ricerca, come detto in precedenza, si dovrebbe sviluppare su più fasi con i tempi e i costi indicati nella seguente tabella:

FASE	1° ANNO												2° ANNO				COSTI (£)	
Bibliografia	■																	60.000.000
Programma ricerca	■																	40.000.000
Funzioni prestazione		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1.137.000.000
Raccolta incidenti		■	■															54.000.000
Elaborazione dati				■	■													55.000.000
Modellazione													■	■				77.000.000
Integrazione norme															■	■	■	50.000.000
TOTALE																	1.473.000.000	

Tuttavia, è possibile individuare, nell'ambito del programma di ricerca complessivo, dei moduli funzionali che consentono di pervenire a risultati applicabili nel breve termine.

A tal riguardo, il primo modulo dovrà essere basato su risultati ed esperienze già maturate in campo nazionale ed internazionale, nonché su controlli e misure acquisibili presso enti gestori di infrastrutture viarie. Sulla scorta di tali esperienze, occorrerà curare la successiva fase di elaborazione al fine di pervenire alla proposta di modelli teorici e pratici che esprimano le correlazioni tra caratteristiche della piattaforma stradale e incidentalità.

Un secondo modulo della ricerca si svilupperà nel lungo termine e si baserà sui risultati di esperienze dirette su un campione significativo estratto dalla rete stradale nazionale. Esso consentirà di approfondire i risultati ottenuti con il primo modulo, nonché di eseguire utili raffronti per affinare la modellazione.

Di seguito verranno dettagliati i moduli suddetti sia in termini di costi che di tempi, indicando anche l'incidenza della singola figura professionale nel periodo indicato rispetto al costo della risorsa umana riferita al mese.

Modulo 1

Esso comprenderà le seguenti fasi:

Fase 1 – Bibliografia

La fase 1 riguarda la ricerca bibliografica e comporta una supervisione iniziale del Senior che servirà a tracciare le linee guida della ricerca bibliografica. Questa verrà materialmente effettuata dal Junior 2 per il quale va, quindi, previsto un lasso temporale netto di circa 2 mesi. Nel caso in cui non venga svolta una campagna di reperimento dati, questi dovranno essere desunti dalla letteratura in questa fase.

Senior (incid.=0.25).....	ore 40 x £/ora 312.500=	£. 12.500.000
<u>Junior 2 (incid.=1.56).....</u>	<u>ore 250 x £/ora 187.500=</u>	<u>£. 46.875.000</u>
TOTALE		£. 59.375.000
Ed arrotondando per eccesso:		£. 60.000.000
DURATA		4 mesi

Fase 2 – Programma coordinamento ricerca

Rappresenta la fase di programmazione della ricerca, in quanto il Senior deve tracciare la metodologia che condurrà poi ai risultati cercati. Si dovranno valutare, innanzitutto, le risultanze dell'analisi bibliografica e pianificare le metodologie e le procedure da utilizzare successivamente. Si prevede, quindi, una rilevanza delle

professionalità di vertice rispetto a quelle minori.

Senior (incid.=0.31).....	ore 50 x £/ora 312.500=	£. 15.625.000
Junior 1 (incid.=0.44).....	ore 70 x £/ora 250.000=	£. 17.500.000
<u>Tecnico non laureato (incid.=0.63)</u>	<u>ore 100 x £/ora 62.500=</u>	<u>£. 6.250.000</u>
TOTALE		£. 39.375.000
Ed arrotondando per eccesso:		£. 40.000.000
DURATA		2 mesi

Fase 4 – Raccolta dati ed analisi di incidente

Beneficia della precisione e dell'approfondimento degli step precedenti, nel senso che la definizione di tronchi omogenei, le variabili di interesse, i rapporti con la Polizia dovranno essere stati fissati precedentemente. L'attività da svolgere è di tipo pratico e, pertanto, lo Junior 2 ricopre ampiamente la giusta competenza, unitamente agli operatori per eventuali approfondimenti dei rilievi sui luoghi.

Tuttavia, l'analisi dei costi, di seguito prevista, può al limite azzerarsi in relazione alla completezza dei dati già disponibili.

Junior 2 (incid.=0.75).....	ore 120 x £/ora 187.500=	£. 22.500.000
Tecnico laureato (incid.=0.94)	ore 150 x £/ora 125.000=	£. 18.750.000
<u>Tecnico non laureato (incid.=1.25)</u>	<u>ore 200 x £/ora 62.500=</u>	<u>£. 12.500.000</u>
TOTALE		£. 53.750.000
Ed arrotondando per eccesso:		£. 54.000.000
DURATA		4 mesi

Fase 5 – Elaborazione dati

Questa fase discende direttamente dalla precedente, in quanto devono essere letti ed elaborati i dati registrati sui luoghi, unitamente all'aiuto fornito da analisi di tipo storico. Si prevede un utilizzo delle figure riconducibili a quelle di alto livello.

Senior (incid.=0.19).....	ore 30 x £/ora 312.500=	£. 9.375.000
Junior 1 (incid.=0.44).....	ore 70 x £/ora 250.000=	£. 17.500.000
<u>Junior 2 (incid.=0.94).....</u>	<u>ore 150 x £/ora 187.500=</u>	<u>£. 28.125.000</u>
TOTALE		£. 55.000.000
DURATA		4 mesi

Fase 6 – Modellazione procedura

Rappresenta la verifica degli studi pilota e la calibrazione dei modelli teorizzati con l'ausilio dei dati sperimentali. Le competenze più attinenti sono quelle di livello più elevato.

rilievi sul campo molto dettagliati e ripetuti temporalmente con un'opportuna frequenza, seguiti da un'attenta elaborazione dei dati. Questi dovranno essere reperiti mediante apparecchiature ad alto rendimento, quali SCRIM, ARAN, FWD o simili.

Senior (incid.=0.44).....	ore 70 x £/ora 312.500=	£. 21.875.000
Junior 1 (incid.=1.88).....	ore 300 x £/ora 250.000=	£. 75.000.000
Junior 2 (incid.=2.50).....	ore 400 x £/ora 187.500=	£. 75.000.000
Tecnico laureato (incid.=2.50)	ore 400 x £/ora 125.000=	£. 50.000.000
Tecnico non laureato (incid.=2.50)ore 400 x £/ora	62.500=	£. 25.000.000
Controlli con apparecchiature ad alto rendimento		
(SCRIM, ARAN, FWD, etc.).....		£. 890.000.000
TOTALE		£. 1.136.875.000
Ed arrotondando per eccesso:		£. 1.137.000.000

DURATA 30 mesi

In considerazione della complessità e dei costi delle apparecchiature ad alto rendimento si è ipotizzato di operare in regime di *service* comprensivo del costo del rilievo, del personale impiegato e della restituzione del dato. In particolare l'importo relativo ai controlli, pari a £. 890.000.000, è scaturito da ipotesi volutamente generali basate sulla durata della sperimentazione, di circa tre anni e sulle dimensioni di un campione del nastro stradale di circa 500 km. Pertanto, dai costi presuntivi di tali apparecchiature in £/km (SCRIM £/km 140.000, ARAN £/km 200.000 e FWD £/km 410.000) e dalle considerazioni prima riportate è stata desunta la somma complessiva di £. 890.000.000.

Fase 7 – Proposte normative

Questa fase condensa i risultati acquisiti in standard o parametri che devono sintetizzare le funzioni indagate negli step precedenti. E' un passo molto importante in quanto potrebbe consentire l'acquisizione dello studio da parte della comunità scientifica.

Senior(incid.=0.19).....	ore 30 x £/ora 312.500=	£. 9.375.000
Junior 1(incid.=0.44).....	ore 70 x £/ora 250.000=	£. 17.500.000
Junior 2(incid.=0.75).....	ore 120 x £/ora 187.500=	£. 22.500.000
TOTALE		£. 49.375.000
Ed arrotondando per eccesso:		£. 50.000.000
DURATA		6 mesi

Di seguito si propone uno schema di successione logica delle attività.

FASE	1° ANNO	3° ANNO	2° ANNO	COSTI (£)
Acquisizione	■			26.000.000
Funzioni prestazione	■	■	■	1.137.000.000
Integrazione norme			■	50.000.000
TOTALE				1.213.000.000

Il costo totale dei due moduli è, pertanto, di £. $(286.000.000 + 1213.000.000) = £. 1.499.000.000$. Tale somma è maggiore rispetto a quella necessaria per svolgere le fasi in un'unica attività di ricerca (£.1.473.000.000), in quanto per trattare efficacemente il modulo 2 occorre preventivare l'acquisizione delle informazioni dal primo modulo.

2.4 MODALITÀ DI ARCHIVIAZIONE DEI DATI E DEI RISULTATI CONSEGUITI

Il rapporto conclusivo di ciascuna delle 7 fasi della ricerca dovrà essere presentato secondo le seguenti modalità:

- rapporto su carta;
- cd-rom con relazioni, fogli di calcolo e data base nei formati commerciali più conosciuti;
- documentazione fotografica e su videocassetta dei rilievi di incidente e delle misure effettuate;

3 QUALIFICAZIONE E MODALITÀ DI AGGIUDICAZIONE

3.1 COMPETENZE NECESSARIE

Le competenze minime richieste sono le seguenti:

- Esperienza tecnico scientifica sui materiali per le sovrastrutture stradali e sui requisiti di accettazione;
- Esperienza nella progettazione, confezionamento e posa in opera delle miscele per le sovrastrutture stradali;
- Conoscenza adeguata delle apparecchiature per il controllo e la misura delle caratteristiche funzionali delle sovrastrutture stradali;
- Conoscenza dei modelli matematici per l'elaborazione statistica dei dati e per la rappresentazione analitica delle correlazioni tra variabili non ingegneristiche;
- Esperienza nelle analisi di incidentalità;
- Esperienza nella rilevazione del traffico;
- Esperienza nella specificazione, implementazione, calibrazione e validazione di modelli multivariati;
- Esperienza nella programmazione.
- Esperienza nella conduzione e partecipazione in ricerche del settore stradale, con particolare riferimento agli aspetti della sicurezza.

3.2 CRITERI DI AGGIUDICAZIONE E DI COLLAUDO

I criteri per l'aggiudicazione dell'incarico saranno i seguenti:

- qualificazione professionale e scientifica del proponente (certificazioni di qualità, risorse disponibili, personale impiegato, curriculum, capacità di ricerca in campi affini, pubblicazioni in campi affini) – sino a 40 punti;
- offerta economica – sino a 20 punti;
- qualità della relazione di offerta – sino a 40 punti.

Si ritiene opportuno che, trattandosi di lavori di ricerca, vengano istituite

commissioni per l'aggiudicazione dell'incarico e per l'attività di collaudo in corso d'opera e finale.

4 BIBLIOGRAFIA

-
- ¹ Festa B., Giannattasio P., Marchionna A., Peroni G., Pignataro P. "Sistemi di gestione della manutenzione". Quaderno AIPCR Manutenzione e rafforzamento delle pavimentazioni: innovazioni, sperimentazioni e tendenze. Comitato Tecnico Pavimentazioni Flessibili 1996-1999. XXIII Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Verona 18-21 maggio
- ² Surface de chaussée, Cap. 18, *Securité Routiere*, CETUR 1999
- ³ Schiehlen W.O. "Dynamics of High-Speed Vehicles", CISM Courses and Lectures N° 274 – International Centre for Mechanical Sciences – Springer Verlag – Vienna 1982
- ⁴ Marcondes J., Burgess J., Harichandran R., Snyder M.B. "Spectral Analysis of Highway Pavement Roughness", Journal of Transportation Engineering, Vol. 117, n° 5 Sep/Oct 1991
- ⁵ Ranzo A., Rondinone P., Scalamantrè A. "Codici stocastici per la valutazione del disturbo vibratorio da traffico stradale e definizione dei sistemi attenuatori", Le Strade, anno XCV, n° 1293, maggio 1993
- ⁶ Marchionna A., Paoloni G. "Decadimento dell'aderenza sulle pavimentazioni stradali", Autostrade n° 1 Gen/Mar 1994
- ⁷ Iyengar R. N., Jaiswal O. R. "Random Field Modeling of Railway Track Irregularities", Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, n° 4 Jul/Aug 1995
- ⁸ Agostinacchio M., Bernetti R. "Definizione del sovraccarico dinamico nell'interazione veicolo-strada", Autostrade 1995
- ⁹ Liu C., Herman R. "New Approach to Roadway Performance Indices", Journal of Transportation Engineering, Vol. 122, n° 5 Sep -Oct 1996
- ¹⁰ Bocci M., Graziani A. "La regolarità delle pavimentazioni stradali. Confronto tra un approccio deterministico (IRI) ed uno probabilistico", Convegno SIIV – La Sicurezza Stradale – Pisa 29-30 Ott. 1997
- ¹¹ C., Herman R. "Road Profiles, Vehicle Dynamics and Human Judgment of Serviceability of Roads: spectral Frequency Domain Analysis", Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, n° 2 Mar-Apr 1998
- ¹² Lun S., Deng X. "Predicting Vertical Dynamic Loads Caused by Vehicle-Pavement Interaction", Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, n° 5 Sep-Oct 1998
- ¹³ PIARC technical committee on surface characteristics – "International PIARC Experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements" – 1995
- ¹⁴ V.R.Shah, J.J. Henry – "The determination of skid resistance-speed behavior and side force coefficients of pavements" –TRR 666

- ¹⁵ Gothiè M. "*International Friction Index (IFI). An Example of Application*", Routes Roads n° 300 1998
- ¹⁶ Bosurgi G., Cafiso S., Pellegrino O. "*Valutazione probabilistica dell'interazione dinamica veicolo-pavimentazione*", XXIII Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Verona 18-21 maggio
- ¹⁷ Bosurgi G., Pellegrino O. "*Analisi di affidabilità per la valutazione delle soglie di intervento nelle operazioni di ripristino della rugosità del manto superficiale*", Convegno SIIV – Milano 22-23 Ottobre 1998
- ¹⁸ Bosurgi G., Pellegrino O. "*Programmazione degli interventi di manutenzione per il ripristino delle caratteristiche superficiali (rugosità). Una procedura per l'allocazione ottimale degli interventi in regime di risorse limitate*", Convegno SIIV – Milano 22-23 Ottobre 1998
- ¹⁹ Otto S., Ariaratnam S.T. "*Guidelines for Developing Performance Measures in Highway Maintenance Operations*", Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, n° 1 Jan/Feb 1999
- ²⁰ Bosurgi G., D'Andrea A., Pellegrino O. "*The Programming of Road Surface Maintenance Operation under Budget Constraints*", XXIst World Road Congress - Kuala Lumpur 3-9 Oct 1999
- ²¹ Rouillard V., Bruscella B., Sek M. "*Analysis and Simulation of Road Surface Profiles*", Journal of Transportation Engineering, Vol. 122, n° 3 May-Jun 1996
- ²² Rouillard V., Bruscella B., Sek M. "*Analysis of Road Surface Profiles*", Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, n° 1 Jan-Feb 1999
- ²³ Rouillard V., Bruscella B., Sek M. "*Classification of Road Profiles*", Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, n° 1 Jan-Feb 2000
- ²⁴ M. Gothié – "*Relation entre caractéristiques de surface et accidents*" – III International Symposium on Pavement Surface Characteristics – Christchurch, New Zeland, 1996 78th Annual Meeting TRB – Washington 1999
- ²⁵ PIARC – "*Surface Characteristics*"- XIX th World Road Congress – Marrakech, 1991
- ²⁶ K.W.Ogden – "*Safer Roads*" - University Press,. Cambrige, 1996
- ²⁷ Celauro B., Santagata E. "*Miscele Bituminose*" Quaderno AIPCR Manutenzione e rafforzamento delle pavimentazioni: innovazioni, sperimentazioni e tendenze. Comitato Tecnico Pavimentazioni Flessibili 1996-1999. XXIII Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Verona 18-21 maggio
- ²⁸ Boscaino G., Praticò F.G. "*Proprietà fonoassorbenti delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso*". Convegno SIIV – Milano 22-23 Ottobre 1998
- ²⁹ Pasetto M., Zanutto G.B. "*Studio del deflusso delle acque meteoriche nelle curve di transizione dei tracciati stradali: applicazione a livellette brevi con ciglio ad andamento altimetrico variabile nello spazio*", Giornata di studio sul tema: "la sicurezza intrinseca delle infrastrutture viarie", Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 20-21 Feb. 1997
- ³⁰ Ranieri V. "*Il deflusso delle acque meteoriche dai piani stradali: un modello per le*

pavimentazioni drenanti”, Giornata di studio sul tema: “la sicurezza intrinseca delle infrastrutture viarie”, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, 20-21 Feb. 1997

³¹ Domenichini L., Loprencipe G. “*Analisi dell’andamento plano-altimetrico dei tracciati in relazione alle caratteristiche di deflusso idrico*”, Convegno SIIV – La Sicurezza Stradale – Pisa 29-30 Ott. 1997

³² AA.VV. *Skidding Accidents*, TRR 623, 1976

³³ J.R. Hosking, *Relationship between skidding resistance and accident frequency: estimates based on seasonal variation*, Research Report 76, Transport and Road Research Laboratory, Dept. of Transport, 1986, Crowthorne

³⁴ L. Mountain, B. Fawaz, C. Wright, D. Jarrett, K. Lupton, *Highway improvements and maintenance: their effects on road accidents*, Traffic Management and Road Safety, Proceedings of Seminar J held at the PTRC European Transport Forum, University of Warwick, England 1994

³⁵ M. Gothié, *Influence de adhérence sur la sécurité routière*, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 185, Mai – Juin 1993, M. Gothié, *Apport à la sécurité routière des caractéristiques de surface des chaussées*, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 224, Janvier – Février 2000

³⁶ T. Gargett, *The introduction of a Skidding-Resistance Policy in Great Britain*, Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031, W. E. Meier and J. Reichert, Eds., Philadelphia 1990

³⁷ *Department Advice Note HA 36/87*, Section 6, additional advice