

**XVI CONVEGNO TECNICO ACI  
Roma, 18-19 febbraio 2005**

**PROGETTAZIONE STRADALE E SICUREZZA DI ESERCIZIO**

**INTERAZIONE PNEUMATICO-PAVIMENTAZIONE**

Prof. Ing. Francesca La Torre  
Università di Firenze – Dipartimento di Ingegneria Civile

**ABSTRACT**

Negli ultimi anni l'approccio alla progettazione, controllo e gestione delle infrastrutture stradali sta subendo una profonda trasformazione con l'introduzione del concetto di "requisiti prestazionali" che una infrastruttura, sia essa di nuova realizzazione o già in esercizio, deve soddisfare.

Uno dei principali requisiti prestazionali che una infrastruttura stradale deve offrire è, evidentemente, la sicurezza della circolazione ed in questo contesto assume una valenza primaria il controllo delle caratteristiche di interazione pneumatico-pavimentazione, con particolare riguardo ai fenomeni di aderenza.

A tutt'oggi manca però il collegamento tra le caratteristiche dei manti stradali in opera ed i requisiti prestazionali a cui si fa riferimento nella progettazione di una infrastruttura stradale ai sensi della normativa vigente.

Se da un lato l'industria automobilistica ha fatto enormi passi avanti per arrivare ad ottimizzare i sistemi "reattivi" per la valutazione delle caratteristiche puntali di interazione pneumatico-pavimentazione e per il successivo controllo del mezzo, la ricerca si sta ora concentrando sullo sviluppo di sistemi "pro-attivi" in grado di valutare preventivamente il comportamento del mezzo in un modello integrato strada-veicolo-pneumatico-ambiente. Questi possono essere impiegati sia in fase di progettazione, per definire i requisiti prestazionali da chiedere ai manti in funzione delle specifiche condizioni in cui saranno impiegati, sia in fase di gestione.

Nella memoria è illustrata l'evoluzione della tecnologia nel campo del monitoraggio, dell'acquisizione e gestione dei dati di interazione pneumatico-pavimentazione nonché sullo sviluppo di progetti di ricerca sinergici strada-pneumatico-veicolo-ambiente che possono portare a colmare il gap tra le caratteristiche dei manti "misurabili" ed i requisiti prestazionali necessari per la progettazione e gestione in sicurezza delle infrastrutture stradali.

**IL CONCETTO DI REQUISITO PRESTAZIONALE**

Il passaggio da prescrizioni di tipo convenzionale (a "ricetta") all'adozione di requisiti di tipo "prestazionale" sta ormai prendendo piede nel mondo nel campo delle pavimentazioni stradali ma ancora stenta ad entrare nei meccanismi di affidamento degli appalti in Italia sebbene l'esigenza di questo tipo di strumenti sia ormai universalmente riconosciuta.

Già nel 2001 l'allora Ministero dei Lavori Pubblici finanziò uno studio prenormativo volto alla messa a punto di un capitolato prestazionale [1] per la realizzazione delle pavimentazioni stradali ma questo non è mai stato adottato formalmente forse anche per la carenza di strumenti che consentissero di legare determinati parametri misurati all'effettivo comportamento dei veicoli su strada.

Nel 2001 il MIUR, riconoscendo l'importanza della materia, ha finanziato un progetto di rilevante interesse nazionale specificatamente rivolto alla definizione di un "capitolato prestazionale dei manti bituminosi superficiali"([2] e [3]). I risultati di questa ricerca consentono di approfondire il legame tra le caratteristiche compositivi delle miscele e la loro idoneità per l'impiego come manti stradali ma non sono ancora una volta affrontati i temi che riguardano il legame tra i requisiti prestazionali che devono soddisfare i manti e le specifiche condizioni in cui avviene il moto.

Diversi gruppi di ricerca sono ancora attivi in questo campo come l'AIPCR (Associazione mondiale della strada) che ha previsto, nel piano di lavoro del Comitato Tecnico C4.2 "Interazione Veicolo-Strada", un gruppo di lavoro specificatamente volto alla messa a punto di un capitolato prestazionale delle caratteristiche superficiali dei manti.

Il passo avanti che si deve ancora compiere, su cui si stanno concentrando gli studi in atto, riguarda la possibilità di definire i "requisiti prestazionali" in funzione delle effettive esigenze di sicurezza e di confort in relazione alle specifiche condizioni locali, come ad esempio la velocità di percorrenza del tratto di strada, la maggiore o minore probabilità di pioggia, l'orografia del tracciato etc.

## **L'ADERENZA PNEUMATICO-PAVIMENTAZIONE**

I fenomeni di interazione pneumatico-pavimentazione coinvolgono diversi aspetti che hanno un forte riflesso sulle "prestazioni" che la pavimentazione è in grado di offrire ed in particolare:

- l'aderenza;
- il rumore;
- le vibrazioni;
- i carichi dinamici indotti nelle strutture.

Tra questi ricopre sicuramente un ruolo di primo piano l'aderenza in quanto è intimamente connessa con la possibilità di circolazione in sicurezza dei veicoli stradali.

Se da un lato è ben nota la definizione di aderenza come "forza tangenziale scambiata al contatto tra pneumatico e pavimentazione" non è altrettanto ben compreso, in fase di progettazione e di gestione delle infrastrutture stradali, come la "aderenza" non sia una proprietà intrinseca delle pavimentazioni ma sia invece una grandezza dipendente da una molteplicità di fattori quali:

- pavimentazione (tessitura superficiale);
- condizioni del manto (asciutto, bagnato);
- velocità del veicolo;
- tipo di battistrada e profondità della scolpitura;
- tipo e pressione dei pneumatici;
- manovra effettuata;
- impostazione della manovra (comportamento del conducente);

- dispositivi di cui l'autoveicolo è equipaggiato (ABS, ESP etc).

I diversi fattori possono avere una influenza sostanziale sulla effettiva forza che può essere scambiata tra pneumatico a pavimentazione, come evidenziato in [4]. In Figura 1 è riportata, a titolo di esempio, la variazione di aderenza longitudinale misurata su una data superficie e con un dato pneumatico al variare di velocità del veicolo e scorrimento al contatto pneumatico-pavimentazione. La parte sinistra del diagramma si riferisce ad una condizione con 1 mm di velo idrico tra il pneumatico e la pavimentazione mentre nella figura di destra il velo idrico sale a 3 mm.

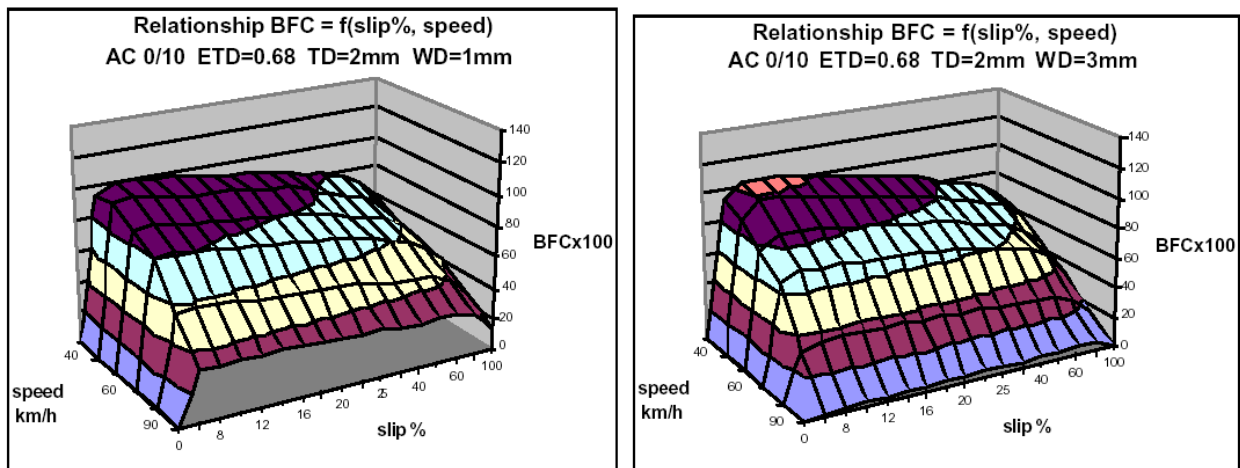


Figura 1: esempio di variazione della aderenza longitudinale con la velocità e lo scorrimento per due diversi spessori di velo idrico.

Appare evidente dalla Figura 1 come non si possa associare alla pavimentazione analizzata un singolo valore di aderenza ma occorre altresì disporre di modelli in grado di valutare come l'aderenza varia al variare dei diversi fattori in gioco, come il modello sviluppato nel progetto VERT ed illustrato in [5].

Questo tipo di modelli richiedono comunque di caratterizzare la pavimentazione mediante un valore di aderenza ed un valore di tessitura rilevato in condizioni "standard" e la reale applicazione di questi modelli passa quindi attraverso la necessità di effettuare campagne di monitoraggio dell'aderenza sui manti stradali in esercizio.

## L'EVOLUZIONE NELLE TECNICHE DI VALUTAZIONE DELL'ADERENZA

Per quanto detto sopra è evidente che non è possibile pensare che una singola misura di aderenza possa essere considerata rappresentativa delle effettive condizioni di aderenza al contatto pneumatico-pavimentazione. Già nel 1995 l'AIPCR [6] aveva evidenziato come risultino necessarie, per una corretta caratterizzazione del manto, almeno due misure:

- un misura di macrotessitura;
- una misura di aderenza in condizioni standard (tipo e scolpitura del pneumatico, velocità, angolo di deriva o scorrimento longitudinale, pressione del pneumatico, spessore del velo idrico etc).

La misura di aderenza “standard” può essere effettuata mediante dispositivi e procedure di prova anche molto diversi fra di loro ed ve ne sono attualmente disponibili diverse decine. Nell’esperimento AIPCR del 1992, a titolo di esempio, furono testate 37 diverse apparecchiature.

Uno dei limiti applicativi che hanno indotto gli Enti gestori di strade a limitare l’esecuzione dei campagne di monitoraggio dell’aderenza a reti autostradali risiede nel fatto che in Italia ci si riferisce usualmente all’apparecchiatura denominata SCRIM in quanto si tratta dell’unica apparecchiatura per la quale esiste uno standard di prova del CNR. L’esecuzione di prove mediante questo tipo di apparecchiature, nate per il monitoraggio di grandi assi viari, può risultare però piuttosto onerosa e di difficile esecuzione sulla rete viaria ordinaria. Sono così nati negli ultimi anni dispositivi meno costosi e più maneggevoli (come, ad esempio, il GRIPTESTER riportato in Figura 2) che possono consentire il monitoraggio dell’aderenza su tutta la rete viaria in esercizio.



Figura 2: il dispositivo per il rilievo dell’aderenza denominato “GRIPTESTER”

Allo stato attuale i capitolati “prestazionali” per la realizzazione delle pavimentazioni stradali indicano la tipologia di prova da eseguire, il dispositivo da utilizzare per le prove e le modalità di prova da seguire nonché il valore minimo da ottenere. Ma quale è il legame tra questo valore e la specifica aderenza richiesta in una data situazione perché il moto avvenga in sicurezza?

## **LE NUOVE TECNOLOGIE PER LA VALUTAZIONE DELLA EFFETTIVA ADERENZA DISPONIBILE IN UNA DATA SITUAZIONE: I METODI “REATTIVI” ED I SISTEMI “PRO-ATTIVI”**

Il problema della definizione della effettiva aderenza disponibile per effettuare una data manovra è stato il punto focale della ricerca nel campo della interazione veicolo-pneumatico-strada nell’ultimo decennio. In questo campo la ricerca si è mossa in due filoni paralleli:

- lo sviluppo di veicoli e pneumatici “intelligenti” in grado di “leggere” le caratteristiche della strada e di reagire di conseguenza;
- lo sviluppo di modelli previsionali in grado di definire “a priori” l’effettiva aderenza che un veicolo avrà a disposizione per effettuare una data manovra che ancora deve iniziare.

Il primo approccio, che già oggi risulta in gran parte applicato sui veicoli in commercio, è basato su un principio che possiamo definire “reattivo” in quanto reagisce nel minor tempo possibile ad una situazione che si è già venuta a creare (ad esempio una carenza di aderenza sotto un pneumatico che richiede al sistema ESP di entrare in funzione per evitare, o meglio ridurre la probabilità che avvenga, lo sbandamento del veicolo).

Il secondo approccio può essere invece definito di tipo “pro-attivo” e si basa sulla valutazione sinergica del contributo di tutte le componenti (veicolo-pneumatico-pavimentazione) per stimare in anticipo come queste andranno ad interagire nella successiva manovra che l’utente si troverà a compiere. Questo può consentire l’invio preventivo di messaggio di avviso a bordo ovvero l’intervento preventivo dei sistemi di controllo elettronico di bordo. È evidente che la pratica applicazione di questo tipo di sistemi richiede:

- la disponibilità di modelli previsionali in grado di stimare in tempo reale l’aderenza che risulterà disponibile per effettuare una data manovra a partire da parametri predefiniti del veicolo, del pneumatico, della pavimentazione e delle condizioni ambientali;
- la effettiva disponibilità dei parametri che servono per alimentare il modello (e quindi, con particolare riguardo alle pavimentazioni, la effettiva disponibilità lungo il tracciato di valori di macrotessitura e di aderenza misurata in condizioni standard).

#### *L’evoluzione nel campo dei sistemi “reattivi”*

Come evidenziato in precedenza in questo campo sono già disponibili tecnologie avanzate di controllo in particolare per quanto riguarda il veicolo. La ricerca negli ultimi anni si è quindi focalizzata sulla possibilità di strumentare anche il pneumatico per passare al cosiddetto “pneumatico intelligente”. Il pneumatico si trova infatti a diretto contatto con la strada e, se opportunamente strumentato, potrebbe consentire di “leggere” direttamente i seguenti parametri:

- Temperatura
- Pressione
- Velocità
- Deformazione
- Spostamenti puntuali ed in continuo
- Carichi verticali applicati
- Forza scambiata longitudinalmente tra pneumatico e pavimentazione
- Forza scambiata trasversalmente tra pneumatico e pavimentazione

Si potrebbero inoltre desumere, mediante un opportuno processamento dei dati rilevati, anche altre utili informazioni sulle effettive condizioni di interazione tra pneumatico e pavimentazione quali:

- Angolo di deriva
- Camber
- Pressione scaricata a terra
- Area di impronta
- Scorrimento
- Momento applicato
- Forze interne al sistema
- Tipo di superficie (macro-classi)

Si tratta in sostanza di posizionare all'interno del pneumatico uno o più sensori che rilevino le diverse grandezze e le comunichino al veicolo che le deve poi processare mediante un algoritmo di analisi della dinamica del veicolo per poi trasmettere le informazioni all'utente o al sistema di controllo, come esemplificato nello schema di Figura 3.

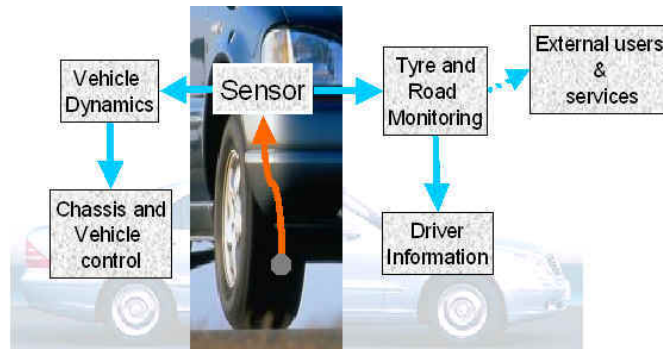


Figura 3: schema di funzionamento di un “pneumatico intelligente”

Le caratteristiche di questo tipo di sensori e la loro integrabilità nei sistemi di controllo dei veicoli sono stati studiati nell'ambito del progetto APOLLO finanziato dalla EU i cui risultati preliminari [7] hanno evidenziato come gli unici sensori già utilizzabili sono quelli per la misurazione automatica della pressione (cosiddetti TPMS) del tipo di quello illustrato in Figura 4. Nel campo invece della sensoristica, della capacità di trasmissione dei dati senza fili, della possibilità di alimentazione del sistema senza batterie e della necessaria definizione di protocolli standardizzati che consentano ai diversi sistemi di interfacciarsi con i sistemi di controllo dei veicoli la ricerca è ancora in pieno sviluppo.

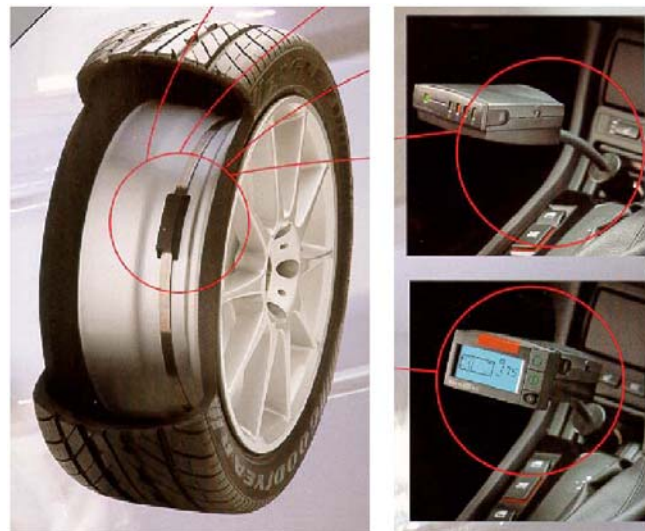


Figura 4: sensori per la rilevazione automatica della pressione dei pneumatici

### *L'evoluzione nel campo dei sistemi “pro-attivi”*

La messa a punto di sistemi previsionali integrati veicolo-pneumatico-strada-ambiente ha subito un forte impulso grazie ad una serie di progetti finanziati dalla EU a partire dal 1997. Il progetto VERT

(*Vehicle-Road-Tyre interaction: full integrated and physical model for handling behaviour prediction in potentially dangerous situations*”), completato nel 2001 [8], ha portato alla messa a punto di un sistema integrato di simulazione del moto in grado di prevedere il comportamento del veicolo che si appresta a compiere una data manovra. Il sistema è strutturato in modo da schematizzare le diverse componenti (veicolo, pneumatico, strada e ambiente) in un unico ambiente di simulazione di tipo “multibody” come schematizzato in Figura 5 ([9]).

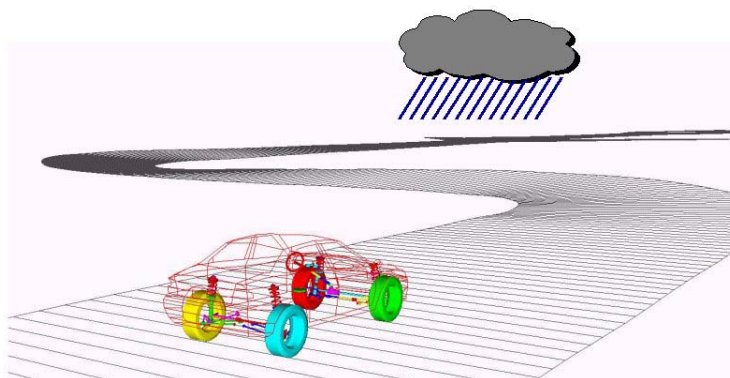


Figura 5: schematizzazione del modello VERT in ambiente multibody.

Per la progettazione e gestione delle infrastrutture stradali questo tipo di sistemi sono estremamente validi ma per l'applicazione nei sistemi di gestione e controllo del veicolo (automatica o tramite un opportuno sistema di informazione all'utente) è necessario che queste simulazioni operino in tempo reale.

Il Progetto VERTEC, finanziato dalla EU per il triennio 2002-2005 ad un consorzio di 11 partners europei coordinati dalla Pirelli Pneumatici ([www.vertec.hut.fi](http://www.vertec.hut.fi)), si è posto come obiettivo la trasformazione del modello sviluppato nell'ambito del progetto VERT in un simulatore in grado di operare in tempo reale integrando al suo interno anche i sistemi di controllo elettronico attualmente disponibili in campo automobilistico. Dallo schema di funzionamento del modello di simulazione illustrato in Figura 6 si può osservare come il sistema sia realizzato integrando sistemi rappresentativi dei diversi componenti (strada, pavimentazione, veicolo, pneumatico, ambiente, sistemi di controllo elettronico) con parametri specifici della manovra da eseguire. Il risultato è la valutazione preventiva della effettiva traiettoria seguita dal veicolo oltre ad una serie di parametri caratterizzanti il moto quali le accelerazioni e gli angoli di deriva a cui è soggetto il veicolo durante la manovra. Questi indicatori consentono di stabilire preventivamente se la manovra può essere effettuata in sicurezza ed eventualmente intervenire sul veicolo o mediante sistemi di avviso al guidatore.

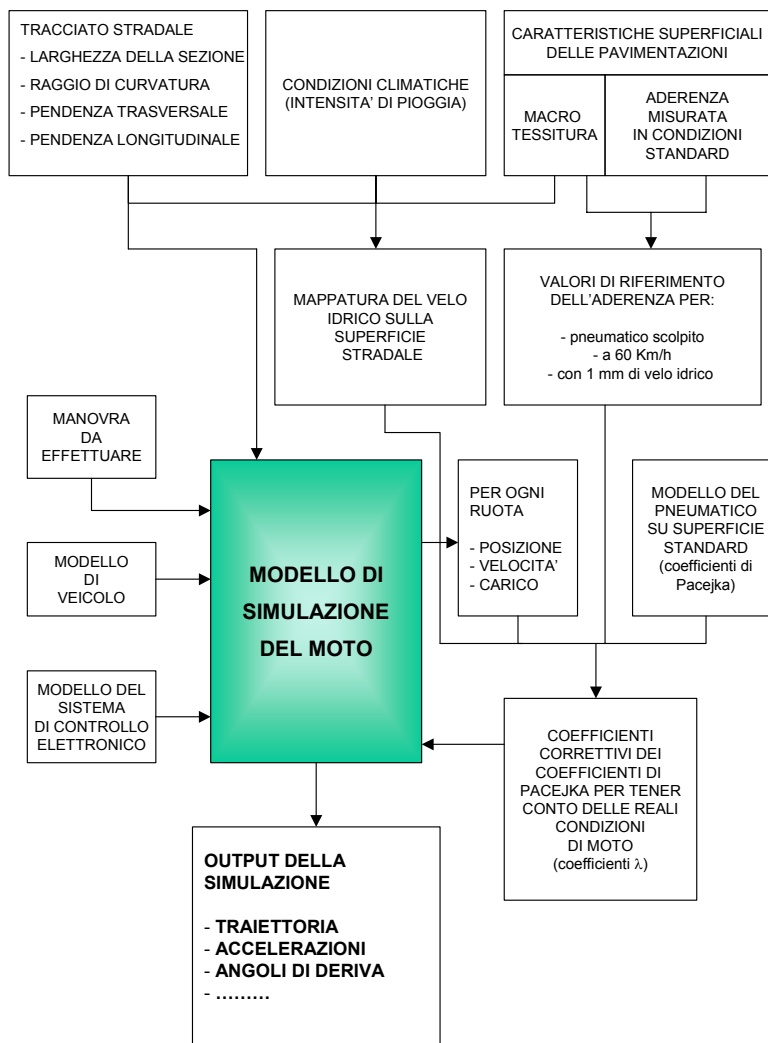


Figura 6: schema di funzionamento del sistema di simulazione del moto in corso di sviluppo nel progetto VERTEC.

## CONCLUSIONI

L'esigenza di passare a sistemi di progettazione e gestione delle infrastrutture di tipo prestazionale ha evidenziato, negli ultimi anni, la necessità di sviluppare strumenti in grado di definire le effettive esigenze di aderenza per l'effettuazione di una data manovra.

Se da un lato l'evoluzione dei sistemi "reattivi" a bordo dei veicoli consente di definire strumenti sempre più sofisticati per consentire al veicolo di reagire in modo opportuno in presenza di una carenza di aderenza il progettista ed il gestore di una infrastruttura hanno esigenza di disporre di sistemi "pro-attivi" in grado di prevedere se una data manovra potrà essere compiuta in sicurezza in relazione alle specifiche caratteristiche plano-altimetriche del tracciato, alle condizioni ambientali ed alla manovra da eseguire.

Sulla base dei risultati preliminari del progetto APOLLO finanziato dalla EU la maggiore potenzialità di sviluppo nei sistemi "reattivi" risiede nello sviluppo dei cosiddetti "pneumatici



intelligenti”. Se questi oggi possono fornire indicazioni solo in termini di pressioni di gonfiaggio la tecnologia allo studio dovrebbe portare nei prossimi anni a mettere a punto sensori in grado di fornire una vasta gamma di dati di interazione pneumatico-pavimentazione misurati o calcolati a posteriori (dalle effettive forze scambiate ad una macro-classificazione della tipologia di manto su cui avviene il moto).

Per quanto riguarda i modelli “pro-attivi” il modello VERT, finanziato dalla EU e completato nel 2001, consente la valutazione del moto di un veicolo che effettua una data manovra su una superficie stradale caratterizzata mediante la sua macrotessitura ed una misura di aderenza rilevata in condizioni standard, mediante l’impiego di un complesso modello che opera in ambiente multibody. Il progetto VERTEC, ancora finanziato dalla EU ed attualmente in corso, consentirà invece di disporre di un strumento agile che opera in tempo reale per simulare il moto dei veicoli e prevedere quindi eventuali situazioni di potenziale pericolo. Questo modello è in grado di tenere conto anche della presenza a bordo dei veicoli di sistemi di controllo elettronico quali ESP ed ABs.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Min. Infrastrutture e Trasporti, 2001 “*Studio a carattere pre-normativo delle Norme tecniche di tipo prestazionale per capitolati speciali d’appalto*” Documento approvato dalla Commissione di studio per le norme relative ai materiali stradali e progettazione, costruzione e manutenzione strade del CNR
- [2] G. Boscaino et al., 2004 “*Catalogo prestazionale dei manti stradali*” – Rapporto Conclusivo PRIN 2001 – Palermo
- [3] Agostinacchio M., Boscaino G., Dondi G. “*A performance catalogue of wearing courses for road pavements*” Atti del Congresso Internazionale SIIV2004 – Firenze 27-29 Ottobre 2004;
- [4] M. Gothiè, T. Parry, P. Roe, 2001 “The relative influence of the parameters affecting road surface friction” Atti del 2<sup>nd</sup> International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction”, Firenze 23 febbraio 2001
- [5] F. La Torre, L. Domenichini, 2001 “*Friction Prediction Models*” Atti del 2<sup>nd</sup> International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction”, Firenze 23 febbraio 2001;
- [6] AIPCR, 1995 “*International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*” Doc. AIPCR 01.04.T-1995
- [7] AA.VV., 2003 “*Intelligent Tyre Systems – State of the Art and Potential Technologies*”, APOLLO EU Funded Project (IST-2001-34372) – Deliverable D7, 22.5.2003
- [8] F. Mancosu, 2001 “*VERT Project: Overview*” Atti del 2<sup>nd</sup> International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction”, Firenze 23 febbraio 2001;
- [9] T. Maulick, F. La Torre, 2001 “*Vehicle Dynamics Simulations Considering Tyre and Road Effects in Wet Conditions*” atti del “Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrzeuge und Verbrennungsmotoren”, Stoccarda, Febbraio 2001