

## IDENTIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI PNEUMATICI MOTOCICLISTICI

V. COSSALTER, A. DORIA

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Padova, Padova*

### SOMMARIO

In questo lavoro si presentano le attrezzature sperimentali e le metodologie di identificazione messe a punto dal gruppo di ricerca sulla dinamica del motociclo dell'Università di Padova nel campo dei pneumatici motociclistici.

Dapprima si descrive la principale attrezzatura sperimentale disponibile presso il gruppo di ricerca: una macchina a disco rotante (diametro 3 m) in grado di condurre prove con angoli di rollio fino a  $\pm 54^\circ$  e di deriva fino a  $\pm 6^\circ$ . Si presentano poi alcuni risultati relativi alle caratteristiche statiche (rigidezze e dimensioni dell'impronta al variare di carico e rollio) e stazionarie (forza laterale e momenti in funzione di deriva e rollio).

La seconda parte del lavoro è focalizzata sull'identificazione della lunghezza di rilassamento e dei modi di vibrare, si presentano alcuni risultati sperimentali.

### ABSTRACT

This paper deals with the testing equipment and identification methods that have been developed by the motorcycle dynamics research group of Padova University in the field of motorcycle tires.

First, the main experimental equipment is described, it is a rotating disc machine (3 m diameter) that makes it possible to carry out tests with the camber angle in the range  $\pm 54^\circ$  and the side-slip angle in the range  $\pm 6^\circ$ . Several results dealing with static properties (tire stiffness and contact patch dimensions versus load and camber) and stationary properties (lateral force and torques versus side-slip and camber angle) are presented.

The second part of the paper focuses on the identification of tire's relaxation length and modes of vibration, some experimental results are presented.

### 1. INTRODUZIONE

Le caratteristiche meccaniche dei pneumatici influenzano il comportamento dinamico dei veicoli a due ruote ancora di più di quanto influenzano il comportamento dei veicoli a quattro o più ruote. Le prestazioni in termini di manovrabilità, stabilità, possibilità di accelerazione e di frenata dipendono fortemente dai pneumatici, che quindi giocano un ruolo molto importante anche dal punto di vista della sicurezza.

Ciò nonostante sono relativamente pochi i dati sperimentali relativi ai pneumatici motociclistici, le attrezzature sperimentali in grado di testarli al le procedure di prova messe a punto per lo specifico settore motociclistico.

I dati sperimentali relativi al comportamento meccanico dei pneumatici sono necessari per la simulazione del veicolo a due ruote con i moderni codici multi-body [1] e per il confronto oggettivo tra le prestazioni dei diversi pneumatici.

A fronte di queste problematiche il gruppo di ricerca sulla dinamica del motociclo dell'Università di Padova ha messo a punto una specifica attrezzatura sperimentale a disco rotante, che consente di testare i pneumatici in presenza di angoli di rollio fino a  $\pm 54^\circ$  e di deriva fino a  $\pm 6^\circ$  ed una serie di procedure e metodologie sperimentali.

Le caratteristiche meccaniche dei pneumatici motociclistici possono essere suddivise in tre insiemi. Caratteristiche statiche, che si possono misurare a pneumatico fermo e che comprendono le rigidità laterali, radiali e le dimensioni dell'impronta. Caratteristiche stazionarie, che si possono rilevare solo con il pneumatico in movimento e che comprendono le forze e momenti di contatto causate dalla presenza degli angoli di deriva e rollio. Caratteristiche dinamiche, che comprendono la lunghezza di rilassamento ed i modi di vibrare, e possono essere identificate tramite specifiche prove dinamiche.

## 2. LA MACCHINA A DISCO ROTANTE

La figura 1 mostra una fotografia della macchina a disco rotante. Il disco ha un diametro di 3 m e ruota intorno ad un asse verticale, sulla sua periferia è ricavata una pista ricoperta di safety walk. Il pneumatico in prova (montato sul suo cerchione e su una forcella) rotola sulla pista ed è mantenuto in posizione da un braccio articolato che consente di impostare gli angoli di rollio e di deriva

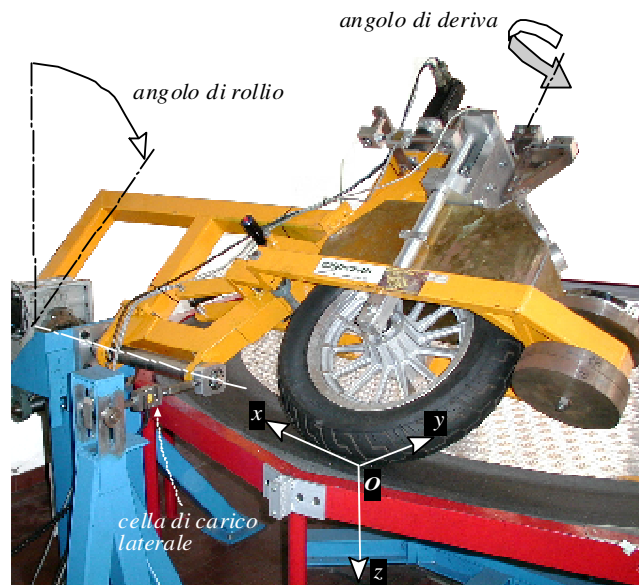


Fig. 1: La macchina a disco rotante

L'angolo di rollio viene impostato ruotando tramite un servo-motore l'insieme costituito da braccio, forcella e ruota intorno ad un asse orizzontale che passa per il centro della sezione del

pneumatico. L'angolo di deriva viene imposto ruotando (tramite un servo-motore) la ruota e la forcella intorno all'asse diametrale del pneumatico, che si trova in direzione verticale quando il rollio è nullo. Opportune relazioni cinematiche consentono di correlare gli angoli di rollio e deriva impostati tramite i servo-motori a quelli realizzati a livello dell'impronta. Il carico verticale viene generato per mezzo di pesi, che sono montati sul braccio tramite un sistema di sospensione, al fine di ridurre le vibrazioni della macchina durante il rotolamento e, quindi, migliorare la qualità delle misure.

Il principale scopo della macchina è la misura della forza laterale e dei momenti di interazione tra pneumatico e strada, perciò essa è equipaggiata con alcune celle di carico. La forza laterale è misurata da una cella di carico che impedisce lo spostamento laterale del braccio. La forcella è collegata al braccio tramite un giunto costituito da due coppie rotoidali con assi ortogonali che si intersecano (coppia sferica guidata). La prima coppia rotoidale permette di impostare l'angolo di deriva ed una cella di carico permette di misurare il momento  $M_z$  intorno al suo asse. La seconda coppia rotoidale, che permetterebbe la rotazione di ruota e forcella nel piano del braccio, è bloccata da una cella di carico che consente di misurare il momento  $M_y$  intorno al suo asse. Un modello matematico consente di identificare i momenti di resistenza al rotolamento e di imbardata a partire dai momenti misurati tramite le celle di carico.

Una delle caratteristiche peculiari della macchina a disco rotante è rappresentata dal fatto che la traiettoria percorsa dalla ruota rispetto al disco è circolare, pertanto una forza dovuta alla curvatura e diretta verso l'esterno del disco si aggiunge alle forze laterali dovute agli angoli di deriva e di rollio. Ovviamente, tale contributo rappresenta un errore sistematico, che deve essere eliminato dalle misure. La correzione delle misure avviene sfruttando le proprietà di simmetria del sistema: le forze laterali dovute a deriva e rollio cambiano direzione se gli angoli di deriva e rollio cambiano verso, mentre la forza dovuta alla curvatura non cambia direzione se se gli angoli di deriva e rollio cambiano verso. Pertanto al misura della forza laterale viene effettuata per coppie di configurazioni aventi gli stessi angoli di deriva e rollio in modulo, ma versi opposti. Le misure relative alla prima serie di prove (rollio e deriva con versi positivi) vengono sottratte a quelle relative alla seconda serie di prove (rollio e deriva con versi negativi). In questo modo i contributi dovuti a rollio e deriva, che sono quelli cercati, si sommano, mentre i contributi dovuti alla curvatura si elidono.

### **3. RISULTATI RELATIVI ALLE PROVE STATICHE**

Le prove statiche consistono nella misura delle rigidità strutturali del pneumatico in senso radiale e laterale e nella misura delle dimensioni dell'impronta, esse vengono condotte sulla macchina a disco fermo.

Le rigidità strutturali hanno una importante influenza sul comportamento del pneumatico in transitorio (lunghezza di rilassamento) e vengono misurate applicando carichi crescenti alla ruota e misurando tramite un comparatore i corrispondenti spostamenti. La figura 2 mostra l'andamento delle due rigidità per un pneumatico posteriore radiale ad alte prestazioni tipo 180-55-R17 al variare della pressione di gonfiaggio. La rigidità laterale è sempre decisamente inferiore di quella radiale e la differenza aumenta all'aumentare della pressione di gonfiaggio. La dipendenza dalla pressione di gonfiaggio è quasi lineare.

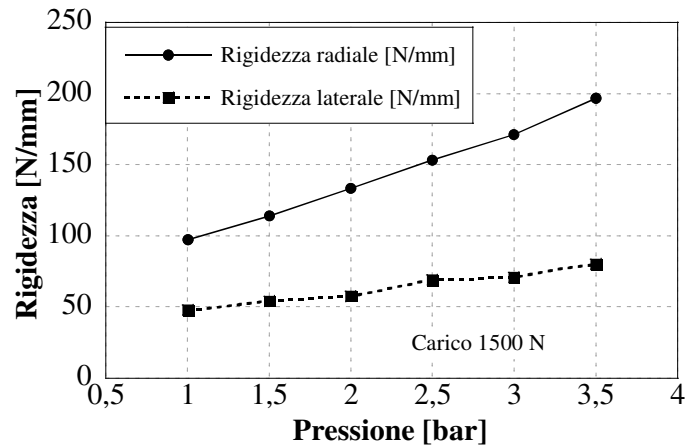


Fig. 2: Rigidezze di un pneumatico posteriore ad alte prestazioni.

Le dimensioni dell'impronta giocano un ruolo importante in particolar modo nella generazione dei momenti tra pneumatico e strada e nella determinazione della lunghezza di rilassamento. Ovviamente, sarebbe interessante misurare le dimensioni dell'impronta durante il movimento del veicolo, ma tale misura è molto difficile. D'altra parte si ritengono sufficientemente rappresentative le misure condotte in condizioni statiche ponendo sotto la ruota dei fogli di carta sensibile alla pressione (tipo Pressurex) o, semplicemente, dei fogli di carta-carbone. La forma dell'impronta al variare dei parametri di esercizio (rollio, carico e pressione) mostra una forma circa ellittica fino a quando l'angolo di rollio non assume valori molto elevati e quindi una porzione dell'area di contatto viene a mancare per effetto del fianco del pneumatico (figura 3).

Le figure 4 e 5 mostrano rispettivamente le lunghezze degli assi maggiore e minore dell'impronta al variare del carico e dell'angolo di rollio per un pneumatico posteriore radiale ad alte prestazioni tipo 180-55-R17 gonfiato a 2 bar.

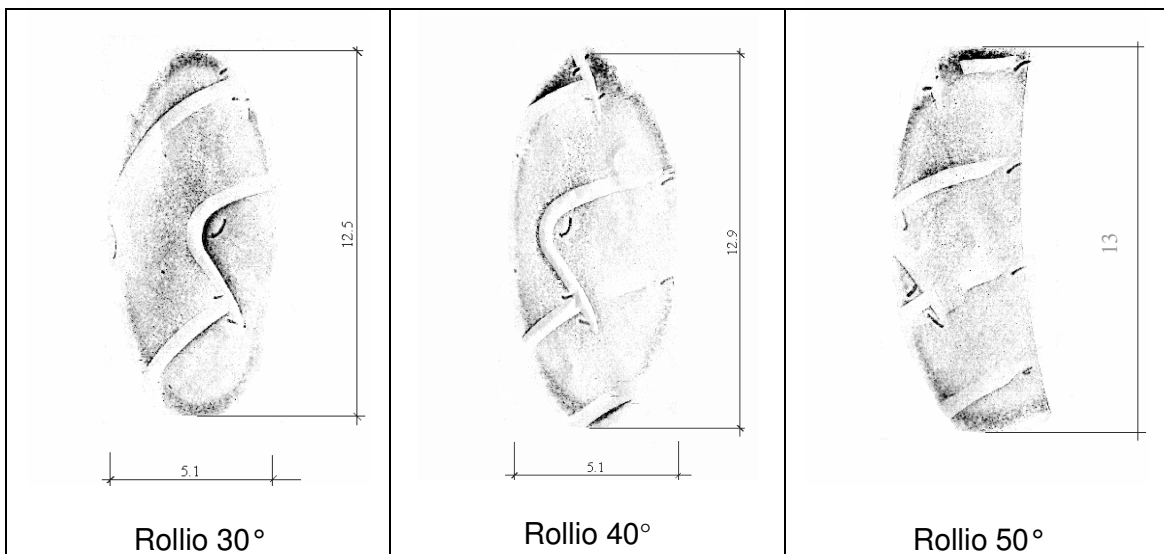


Fig. 3: Impronta di un pneumatico radiale posteriore da scooter 140-70-14 al variare del rollio. Pressione 2.25 bar, carico 1580 N.

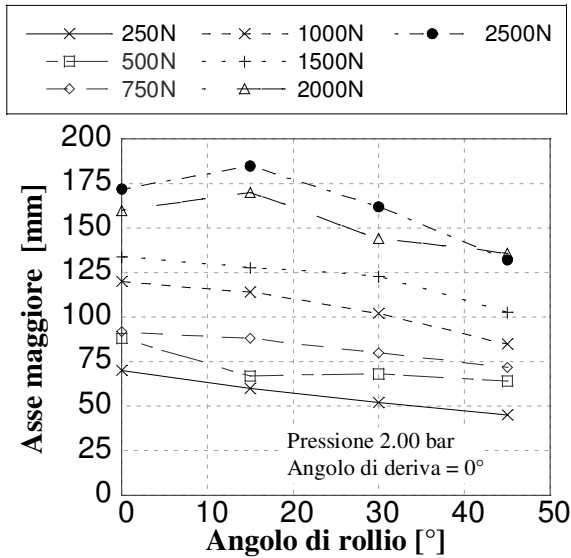


Fig. 4: Lunghezza asse maggiore.

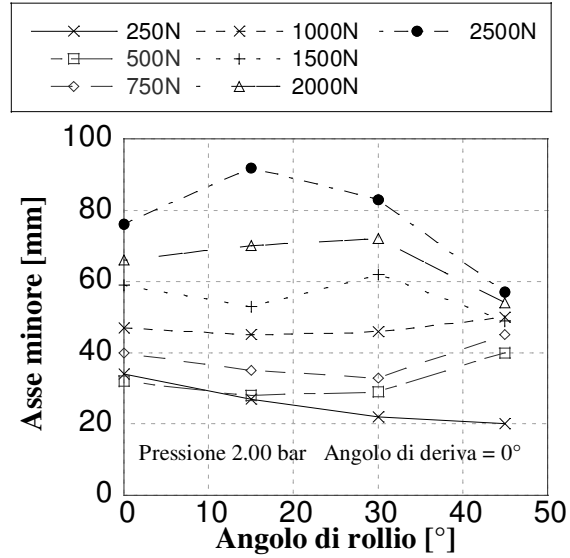


Fig. 5: Lunghezza asse minore.

L'aumento del carico provoca un incremento sia della dimensione longitudinale sia della dimensione laterale dell'impronta. L'effetto dell'angolo di rollio è diverso nelle due direzioni. In direzione longitudinale l'aumento dell'angolo di rollio causa una riduzione dell'asse dell'impronta, se si escludono pochi punti delle curve relative ai carichi maggiori. In direzione laterale con carichi bassi si assiste dapprima ad una diminuzione dell'asse minore dell'impronta all'aumentare del rollio, seguita da un incremento per angoli di rollio molto grandi; con carichi medi la dimensione dell'impronta si mantiene circa costante, con carichi elevati si assiste prima ad un incremento e poi ad una brusca diminuzione dell'asse minore passando da 30° a 45° di rollio. In questo caso l'impronta è molto grande e la brusca riduzione è dovuta al raggiungimento del fianco del pneumatico.

#### 4. RISULTATI RELATIVI ALLE PROVE STAZIONARIE

Le prove in condizioni stazionarie vengono condotte impostando l'angolo di deriva  $e/0$  di rollio e facendo ruotare il sistema a velocità costante. Le figure 6 e 7 mostrano per un pneumatico posteriore radiale ad alte prestazioni tipo 180-55-R17 le forze laterali rapportate al carico verticale (forze normalizzate), che si generano rispettivamente per effetto di un angolo di rollio crescente (e deriva nulla) e per effetto di un angolo di deriva crescente (e rollio nullo). Gli andamenti dei grafici sono abbastanza tipici degli attuali pneumatici motociclistici radiali ad alte prestazioni [2]. Per effetto del solo rollio viene generata un'ingente forza laterale; con rollio intorno a 45° la forza laterale è circa pari al carico verticale. Ciò significa che, quando il veicolo è rollato, una gran parte della forza laterale è generata dalla sola presenza dell'angolo di rollio e sono presenti solo piccoli angoli di deriva (positivi o negativi), che servono a rendere il valore della forza laterale generata dal pneumatico uguale a quella necessaria per l'equilibrio. La forza laterale normalizzata dovuta al rollio è debolmente influenzata dal carico, mentre quella dovuta alla deriva decresce marcatamente all'aumentare del carico.

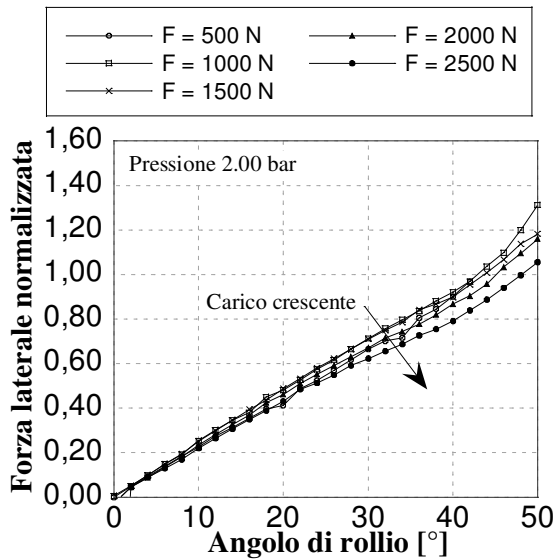


Fig. 6: Forza laterale normalizzata in funzione dell'angolo di rollio e del carico.

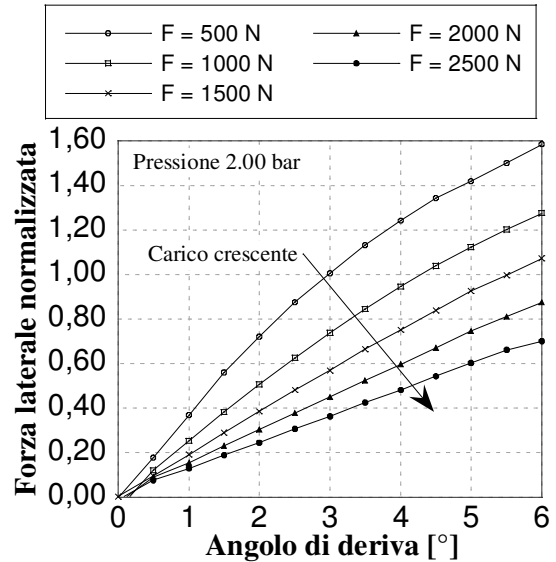


Fig. 7: Forza laterale normalizzata in funzione dell'angolo di deriva e del carico.

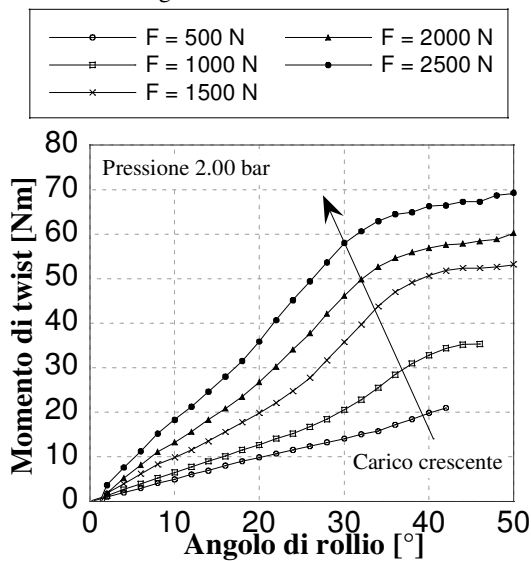


Fig. 8: Momento di twist in funzione dell'angolo di rollio e del carico.

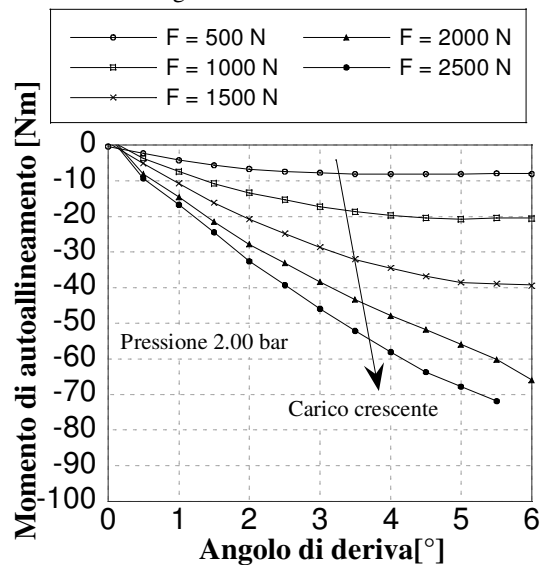


Fig. 9: Momento di auto allineamento in funzione dell'angolo di deriva e del carico.

Nelle figure 8 e 9 sono rappresentate le componenti del momento di imbardata dello stesso pneumatico misurate con pressione di gonfiaggio pari a 2 bar e carichi variabili. Nei pneumatici motociclistici il momento di imbardata, cioè intorno all'asse verticale passante per il centro dell'impronta, contiene di due contributi: il momento di twist ed il momento di auto allineamento [3]. Il momento di twist è presente se l'angolo di rollio non è nullo e nasce perché per effetto del rollio la velocità di rotazione della ruota intorno al proprio asse (spin) possiede una componente secondo l'asse verticale dell'impronta. Questa componente genera degli strisciamenti che producono una distribuzione non uniforme in direzione laterale delle tensioni e, di conseguenza, un momento intorno al centro dell'impronta. Il momento di twist

ha un effetto non allineante, ovvero tende ad aumentare l'angolo tra la ruota e la velocità di avanzamento.

La figura 8 mostra che il momento di twist cresce con l'angolo di rollio fino a raggiungere un valore di saturazione (particolarmente evidente ai carichi più elevati). L'incremento del carico verticale produce un sensibile incremento del momento di twist, ciò è in accordo con l'aumento dell'asse minore dell'impronta, che si rileva all'aumentare del carico (figura 5).

Il momento di auto allineamento ha origine perché la distribuzione delle tensioni tangenziali che nascono per effetto della deriva non è simmetrica in senso longitudinale rispetto al centro dell'impronta e, quindi, produce un momento rispetto a questo punto. Tale momento tende a ridurre la deriva e ad "allineare" il pneumatico. La figura 9 mostra il tipico andamento del momento di auto allineamento al variare dell'angolo di deriva: cresce in modulo con l'angolo di deriva fino ad arrivare ad un valore di saturazione per angoli di deriva elevati. L'incremento del carico causa, come mostra la figura 4, un aumento dell'asse maggiore dell'impronta e quindi del braccio delle forze tangenziali con un conseguente aumento in modulo del momento di auto allineamento.

## 5. RISULTATI RELATIVI ALLE PROVE DINAMICHE

La deformazione del pneumatico a seguito di variazioni degli angoli di deriva e di rollio non ha luogo istantaneamente, ma si manifesta con un certo ritardo temporale al quale, nel pneumatico che rotola, corrisponde un ritardo spaziale detto lunghezza di rilassamento. Di conseguenza anche le forze laterali si manifestano con un certo ritardo rispetto alle variazioni di assetto del pneumatico.

La macchina a disco rotante nella sua attuale configurazione consente di misurare la lunghezza di rilassamento della forza laterale di deriva. Tramite il servomotore si impone al pneumatico una rotazione armonica di piccola ampiezza intorno all'asse di deriva e si misura lo sfasamento  $\phi$  tra il moto armonico imposto e la forza laterale generata, che pure possiede un andamento armonico. Tale sfasamento rappresenta la fase della funzione di trasferimento tra moto imposto e forza misurata. Tramite un modello matematico [4], che tiene conto della deformazione del battistrada e del fenomeno del rilassamento si è ricavata analiticamente la funzione di trasferimento tra forza misurata ( $F_y$ ) e angolo di deriva imposto ( $\lambda$ ):

$$\frac{F_y}{\lambda} = k_\lambda \frac{(1 - 2\pi P_f a/3)}{(\sigma 2\pi P_f + 1)} \quad (1)$$

In tale equazione appaiono la lunghezza di rilassamento  $\sigma$ , la path frequency  $P_f$ , la rigidità di deriva del pneumatico  $k_\lambda$  e la semilunghezza dell'impronta  $a$ . La path frequency è definita come il rapporto tra la frequenza del moto imposto e la velocità di avanzamento  $v$ , quindi, rappresenta il reciproco della lunghezza d'onda della perturbazione imposta. La rigidità di deriva rappresenta la pendenza nell'origine della curva della forza laterale in funzione dell'angolo di deriva.

Uguagliando lo sfasamento misurato tra forza laterale e angolo di deriva alla fase della funzione (1) di riesce ad identificare la lunghezza di rilassamento della forza di deriva. Le figure 10 ed 11 mostrano l'angolo di sfasamento misurato e la lunghezza di rilassamento identificata per un pneumatico posteriore a tele incrociate tipo 150-80-B16. I risultati sono mostrati in funzione della path frequency, in quanto i modelli matematici e la

sperimentazione mostrano che gli sfasamenti si mantengono costanti a parità di path frequency anche se variano la frequenza e la velocità di avanzamento. La lunghezza di rilassamento si mantiene circa costante al variare della path frequency e un incremento del carico verticale causa un incremento della lunghezza di rilassamento, anche questo fenomeno è correlato alla variazione delle dimensioni dell'impronta.

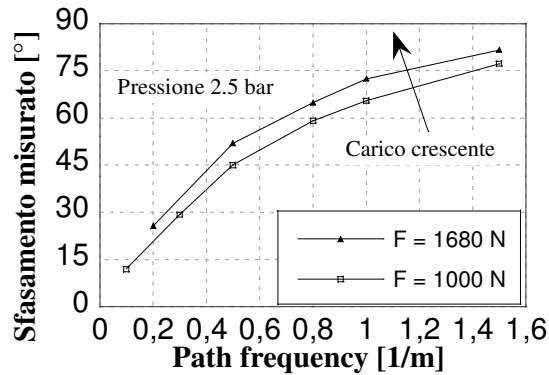


Fig. 10: Sfasamenti misurati in funzione del carico.

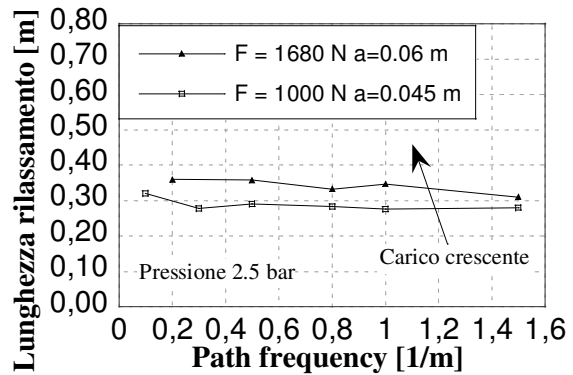


Fig. 11: Lunghezze di rilassamento identificate.

Si è studiata anche la dipendenza degli sfasamenti misurati dall'angolo di deriva medio e dall'angolo di rollio (mantenuti costanti durante le prove). La figura 12 mostra che la presenza di un angolo di deriva medio di 3° riduce sensibilmente lo sfasamento. La figura 13 mostra che lo sfasamento misurato non è molto influenzato dall'angolo di rollio se esso si mantiene nel campo  $\pm 15^\circ$ . Il pneumatico è lo stesso delle figure 10 e 11.

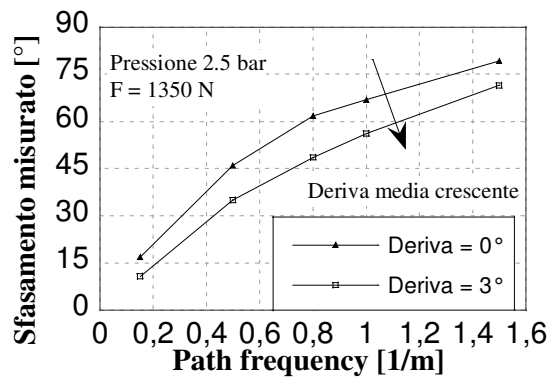


Fig. 12: Sfasamenti misurati in funzione dell'angolo di deriva medio.

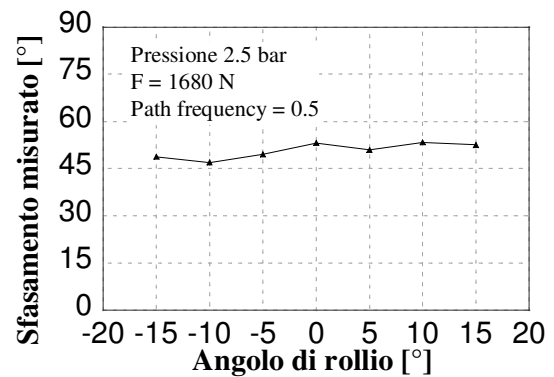


Fig. 13: Sfasamenti misurati in funzione dell'angolo di rollio medio.

## 6. ANALISI MODALE DEI PNEUMATICI

I modi di vibrare del pneumatico che si sviluppano nel piano di simmetria influenzano il comfort, la guidabilità in presenza di ostacoli e la frenatura, mentre i modi di vibrare che si sviluppano fuori del piano di simmetria influenzano il comportamento nei transitori che seguono le variazioni degli angoli di deriva e rollio (lunghezza di rilassamento). E' stata messa a punto una metodologia sperimentale per l'analisi modale dei pneumatici motociclistici basata sull'eccitazione impulsiva, il rilievo delle funzioni di trasferimento (FRF) nelle tre direzioni in 20 punti posti sulla periferia del pneumatico e l'identificazione dei modi tramite un metodo multi-FRF incluso nel pacchetto ICATS dell'Imperial College. I pneumatici sono stati testati sia nella condizione libera, ovvero con il pneumatico sospeso



elasticamente ad una struttura e senza contatto con la strada, sia in presenza di contatto con la superficie stradale e di carico verticale [5].

La figura 14 illustra alcuni risultati sperimentali relativi ad un pneumatico da scooter 140-60-14 testato in condizione libera. I modi a frequenza più bassa sono i modi fuori del piano in cui il battistrada si muove quasi rigidamente rispetto al mozzo per effetto della cedevolezza dei fianchi. Il moto può essere di tipo traslatorio (108 Hz) o rotatorio (136 Hz), questi modi sono chiamati modi ad anello rigido. Seguono i modi fuori del piano con rilevanti deformazioni anche del battistrada.

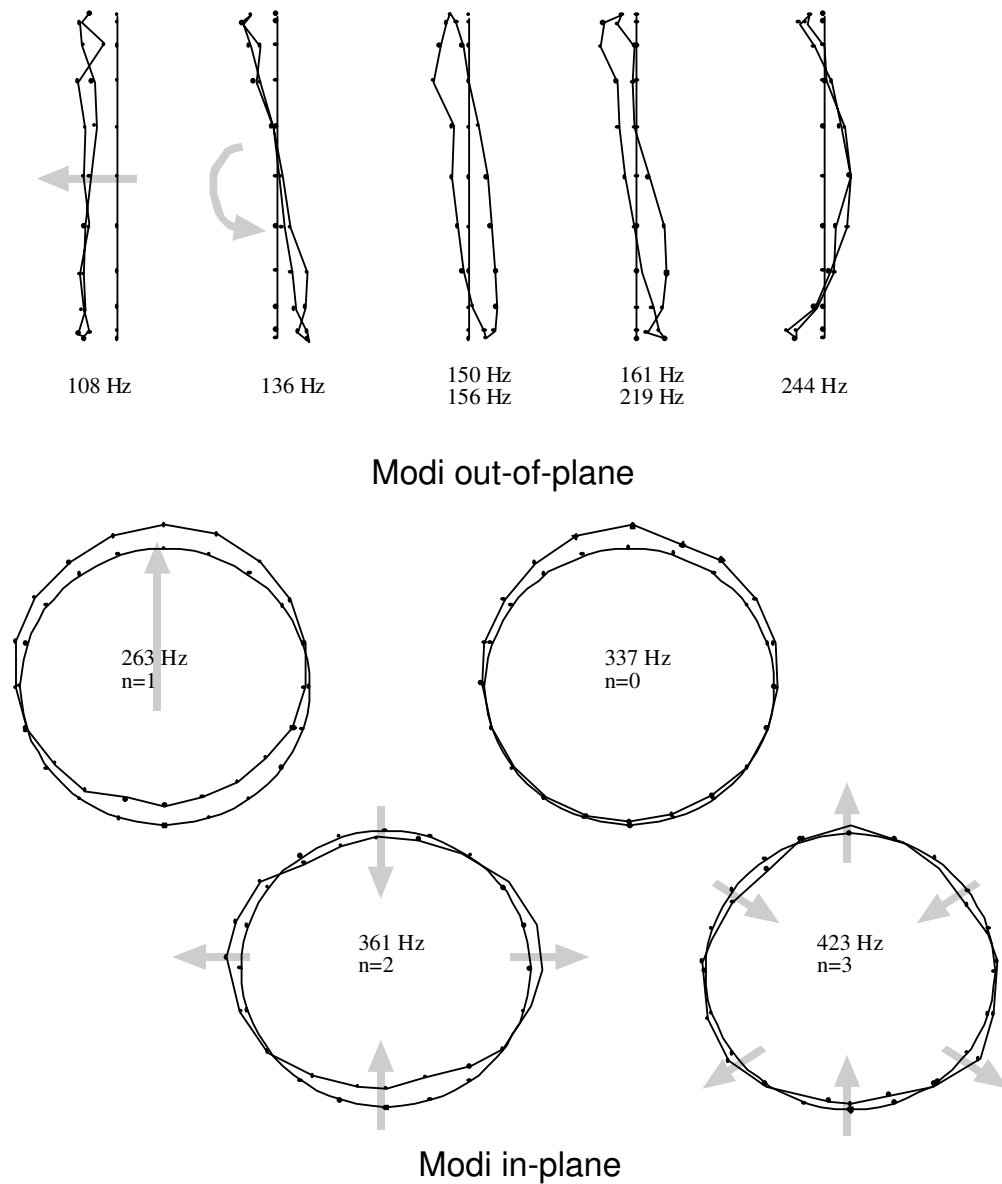


Fig. 14: Modi di vibrare di un pneumatico da scooter.

Il primo modo nel piano è ancora un modo ad anello rigido (263 Hz) in cui il battistrada trasla rigidamente rispetto al mozzo, segue un modo tipo breath (il pneumatico si dilata e si contrae) e poi i modi con un numero crescente di onde in direzione circonferenziale. Questa analisi mostra che i modi più importanti sono quelli ad anello rigido, che possiedono le frequenze naturali più basse e sono più facilmente eccitabili.

## 7. CONCLUSIONI

Le attrezzature sperimentali e le metodologie di misura ed identificazione messe a punto dal gruppo di ricerca sulla dinamica del motociclo dell'Università di Padova consentono di misurare gran parte delle caratteristiche meccaniche dei pneumatici motociclistici fornendo un valido supporto alla simulazione dinamica del veicolo tramite codici multi-body. Sono in corso ulteriori sviluppi, come la messa a punto di una metodologia per la misura delle lunghezze di rilassamento con tecniche di eccitazione a gradino.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Cossalter V., Lot R.: A Motorcycle Multi-body Model for Real Time Simulation Based on the Natural Coordinates Approach, *Vehicle System Dynamics*, vol. 37, n. 6, pp. 423-447 (2002).
- [2] Cossalter V., Doria A., Lot R., Ruffo N., Salvador M.: Dynamic Properties of Motorcycle and Scooter Tires: Measurement and Comparison, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 39, n. 5, pp. 329-352 (2003).
- [3] Cossalter V., *Motorcycle Dynamics, Race Dynamics*, Greendale WI, 2002.
- [4] Berritta R., Cossalter V., Doria A., Ruffo N.: Identification of motorcycle tire properties by means of a testing machine; *2002 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Milwaukee WI, 2002, pp. 116-119.
- [5] Doria A.: Experimental Modal Analysis of Motorcycle Tires; *Identification in Engineering Systems, Third International Conference*, Swansea UK, 2002, pp. 108-117.