

ANALISI SPERIMENTALE DELLA DISTRIBUZIONE DELLE PRESSIONI AL CONTATTO RUOTA-SUOLO PER UN PNEUMATICO DA FUORI STRADA

A. Cirello, G. Marannano, G. Virzi Mariotti

Università di Palermo, Dipartimento di Meccanica, viale delle Scienze, 90128, Palermo, Italy; E-mail: marannano@dima.unipa.it virzi@dima.unipa.it

Sommario

In questo lavoro sono mostrati i risultati di prove sperimentali, condotte con metodo di misurazione esteso, su di un pneumatico per veicolo da fuoristrada 175/82 R16, inserendo carta Prescale al contatto col terreno. L'analisi sperimentale delle pressioni viene condotta, in direzione trasversale, in 5 zone corrispondenti alla mezzera dei singoli tasselli costituenti il battistrada. I risultati vengono analizzati per mezzo di software predisposto allo scopo in modo da risalire agevolmente al valore della pressione. I risultati ottenuti vengono analizzati criticamente e i risultati sono confrontati con quelli ottenuti dalle formule di Rowland e Maclaurin, e con la pressione nominale a terra, concludendo che l'espressione di MMP per veicoli su ruote è da considerare semplicemente un indicatore delle prestazioni, in confronto con altri veicoli, piuttosto che una reale predizione della pressione a terra.

Abstract

This paper shows the results of tests conducted with measurement method extended on a tire for off-road vehicle 175/82 R16, inserting paper Prescale contact with the ground. The experimental analysis of pressure is being conducted, in the transverse direction, in 5 areas corresponding to the centreline of the individual tiles forming the tread. The results are analyzed using software developed in order to easily trace the value of pressure. The results obtained are critically analyzed and the results are compared with those obtained by Rowland and Maclaurin formulas, and the nominal pressure on land, concluded that the expression of MMP for wheeled vehicles should be considered simply an indicator of performance in comparison with other vehicles, rather than a prediction of real pressure on the ground.

Parole chiave: Comportamento del pneumatico, MMP, NGP, Carta Prescale.

1. INTRODUZIONE

Molte ricerche hanno cercato di fornire ai progettisti le formule per la predizione la pressione del veicolo sul terreno, in modo da poter individuare la capacità di un veicolo a tenere la strada in fase di progetto. Rowland [1] misurò la pressione massima media (Mean Maximum Pressure MMP), come la media dei picchi di pressione sotto le ruote e dedusse una semplice formula per la sua predizione, seguendo metodi usati per veicoli militari cingolati. Comunque nello sviluppare un'espressione equivalente per veicoli non militari, Rowland decise di non usare le misure di pressione a terra, ma di stimare invece i valori dedotti dai dati di trazione indotta. Infatti egli prese i risultati da prove di

trazione per veicoli su ruote e, usando i lavori esistenti per veicoli cingolati, dedusse l'MMP che un veicolo cingolato dovrebbe avere in modo da generare la stessa trazione dei veicoli su ruote sotto prova.

Le tensioni nell'area di contatto e nel suolo sono abbastanza prossime alla pressione di gonfiaggio [12] [14] [21] [10]. La tensione media di contatto può spesso essere approssimata dalla pressione di gonfiaggio [20] [16] [13] [7] [19] assumendo che la tensione media nella superficie di contatto sia 1.2 – 1.3 volte la pressione di gonfiaggio a causa della rigidità della carcassa dello pneumatico. Karafiath e Nowatski [17] presentano un'equazione nella quale la pressione media di contatto è calcolata dalla pressione di gonfiaggio e dalle caratteristiche dello pneumatico:

$$p_m = c_i p_i + p_c \quad (1)$$

Dove p_m è la pressione media di contatto, c_i la costante di rigidità dello pneumatico, p_i la pressione di gonfiaggio e p_c la pressione esercitata dalla carcassa del pneumatico quando $p_i=0$. Plackett [20] ha misurato la pressione esercitata dalla carcassa nel campo 0.02 – 0.05 MPa. Vi sono anche diversi lavori in letteratura nei quali la pressione media al contatto è minore della pressione di gonfiaggio; comunque la massima tensione può essere considerevolmente più alta di quella media, qualche volta per un fattore da due a quattro [13]. Per una descrizione della distribuzione delle tensioni nell'area di contatto Sohne [22] propone una distribuzione parabolica nell'area di impronta, mentre Hammel [15] suggerisce una distribuzione trapezoidale.

La misura delle pressioni con differenti carichi è stata spesso ottenuta usando lo stesso pneumatico [12] [13] [14] [21] [23] [24]. Poiché aumentando il carico sulla ruota aumenta la pressione di gonfiaggio raccomandata, si deduce che gli effetti del carico e della pressione di gonfiaggio non possono essere studiati separatamente.

Il metodo sperimentale per la determinazione delle pressioni al contatto ruota suolo è stato adottato [6] [13] specie per terreni soffici e in campo agricolo [18], ma una ricerca in letteratura non ha evidenziato applicazioni di carte sensibili alla pressione. Lo scopo di questo lavoro è di misurare l'attuale pressione a terra per una ruota di autoveicolo e confrontare i valori misurati con le predizioni di Rowland ed altri.

2. PREDIZIONE DELLA PRESSIONE A TERRA PER VEICOLI SU RUOTE.

I metodi per la predizione delle pressione sul terreno sono elencati di seguito:

- La pressione nominale sul terreno (Nominal Ground Pressure NGP), che considera un'area di contatto uguale al prodotto fra la larghezza b e il diametro d della ruota:

$$NGP = \frac{W}{bd} \quad (2)$$

Essendo W il peso su una ruota

- Un metodo migliore per la determinazione dell'NGP è basato sull'area di contatto effettiva:

$$NGP = \frac{W}{2b\sqrt{r^2 - (r - \delta - z)^2}} \quad (3)$$

Nella quale δ lo schiacciamento del pneumatico dovuto al peso, $r = d/2$ il raggio della ruota e z è la penetrazione del pneumatico nel terreno.

- Il metodo di Rowland:

$$MMP = \frac{kW}{2b^{0.85} d^{1.15} \left(\frac{\delta}{h}\right)^{0.5}} \quad (4)$$

Nella quale k è un coefficiente che varia fra 3.65 e 4.6 in dipendenza del numero di assi di trazione ed h è l'altezza della carcassa del pneumatico, misurata dal cerchione sino alla parte esterna del battistrada.

- Il metodo di Maclaurin [2]:

$$MMP = \frac{1.14W}{2b^{0.85}d^{1.15}\left(\frac{\delta}{d}\right)^{0.5}} \quad (5)$$

Che si deduce dalla (4) e da prove condotte su singolo pneumatico. Da notare che nelle formule originali (2) (3) (4) e (5) al posto del peso W compare il peso di tutto il veicolo diviso per la quantità $2m$, essendo m il numero degli assi. Ciò è criticabile perché in tal modo non si tiene conto della distribuzione del peso sugli assi e del fatto che gli schiacciamenti possono essere differenti fra una ruota e l'altra. Hetherington e White evidenziano che la formula proposta da Maclaurin dà una predizione decisamente più bassa di quella di Rowland, e quindi meno utilizzabile per ottenere una predizione attendibile; essi considerano l'espressione di MMP per veicoli su ruote semplicemente come un indicatore delle prestazioni, piuttosto che una reale predizione della pressione a terra. È bene notare che sia Rowland che Maclaurin non intendevano che la (5) e la (4) rappresentassero accuratamente la pressione sul terreno; il loro scopo era quello di predire la maneggevolezza dei veicoli su ruote confrontando con i veicoli cingolati. Ciò implica che se i veicoli su ruote e quelli cingolati presentano lo stesso MMP essi hanno la stessa maneggevolezza. Barton [3] dimostrò che esiste una differenza significativa fra i risultati di Rowland e Maclaurin ottenendo che il suo primo set di calcoli, basato sulla formula di Maclaurin, dovrebbe corrispondere ad una massa del 33% rispetto a quella usata nel suo secondo set di calcoli basato sulla formula di Rowland, tale circostanza è spiegata come effetto della massa dell'armatura del cingolato. Per gli scopi di questo lavoro è sufficiente vedere le quattro espressioni come rappresentazione delle pressioni sul terreno in confronto con i valori misurati.

3. MESSA A PUNTO DELLA TECNICA DI MISURAZIONE

Gli strumenti più comuni per la misurazione della pressione si basano sul principio della rilevazione "ad impatto" o "a contatto", utilizzando il metodo dell'impressione cromatica. Quelli più utilizzati in commercio sono: *Fuji Prescale®* e *Sensorprod Tactilus®*. Nel corso di questa analisi si è scelto di utilizzare la pellicola di misurazione *Fuji Prescale LLLW- ultra super low pressure type* che corrisponde al campo di pressione atteso nelle prove sperimentali (0,2 – 0,6 MPa).

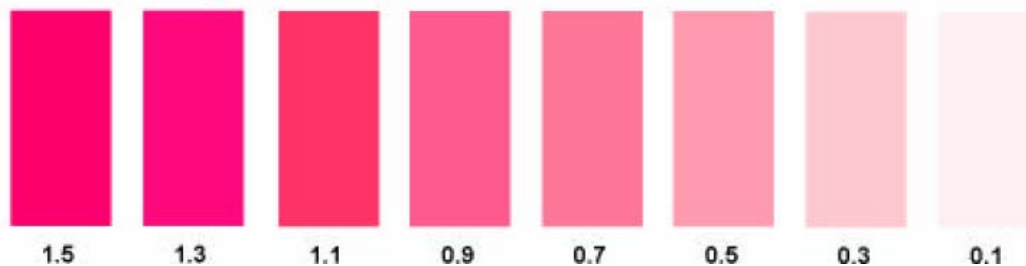


Fig. 1 – Tavola di riferimento della densità del colore magenta con i relativi valori

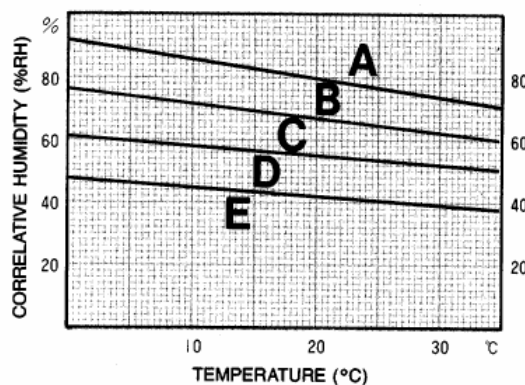


Fig. 2 – Curve relative alle diverse condizioni ambientali (temperatura e umidità) dell'esperimento

Per l'uso stesso della carta si rimanda a quanto illustrato nelle specifiche tecniche; qui ci si limita a indicare che con la pellicola Prescale, l'analisi della pressione è possibile sia in modo esteso che in modo istantaneo (o ad impatto). Con l'applicazione della pressione, la pellicola Prescale varia tra diverse sfumature di magenta la cui intensità (densità) è direttamente proporzionale all'entità della pressione applicata: il colore magenta più scuro corrisponde a pressioni più alte e viceversa. Per gli scopi di questo lavoro è stato necessario mettere a punto un procedimento per l'analisi delle impronte al computer:

1. Si paragona la pellicola Prescale alla tavola del campione magenta. Ad ogni valore di densità del colore magenta (0.1 – 1.5) corrisponde una diversa intensità di pressione applicata; se la densità del colore magenta è intermedio fra due valori in fig. 1 si esegue un'interpolazione lineare.
2. Si valutano le condizioni di temperatura ed umidità dell'esperimento, individuando, nel grafico di fig. 2, la curva corrispondente alle condizioni ambientali della prova.
3. È possibile individuare il valore di pressione in MPa dalle curve di fig. 3. Per esempio, se la temperatura è di 25 °C e il fattore di umidità è del 60% RH si stabilisce la pressione usando la curva B.

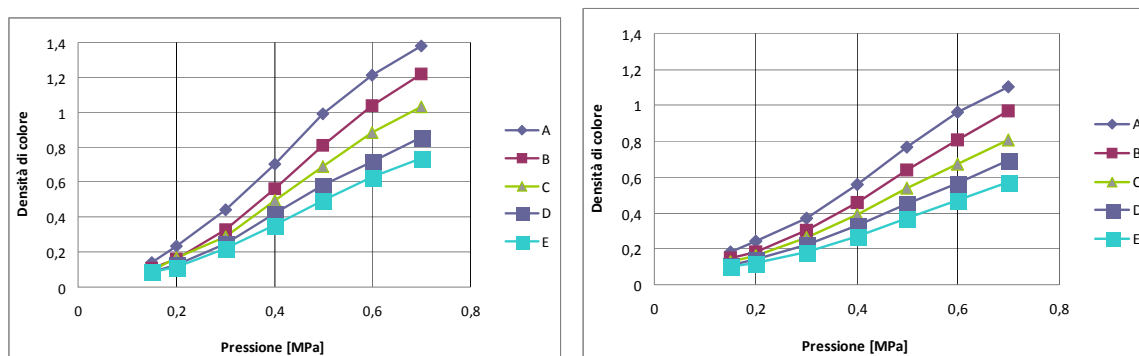


Fig. 3 – Ricostruzione dei grafici delle curve densità-pressione per il metodo di misurazione estesa (a sinistra) e per il metodo di misurazione istantanea (a destra).

3.1 PARAMETRI PELLICOLA PRESCALE LLLW (ULTRA SUPER LOW PRESSURE)

Per ottenere una distribuzione continua della corrispondenza intensità di colore – pressione, si sono interpolate le varie densità del colore magenta della tavola di fig. 1, per mezzo del software ImageProNet©, che effettua una scansione della suddetta tavola, ottenendo, per ogni valore della densità del colore magenta, il corrispondente valore di luminosità del colore. La Tab. 1 fornisce la corrispondenza fra i valori di luminosità del colore di ImageProNet e valori della densità del colore magenta.

Tab. 1 – Corrispondenza fra luminosità e densità

Lum. tav.col.	Densità x
115,97	1,3
125,33	1,1
144,73	0,9
160,2	0,7
178,3	0,5
211,77	0,3
232,93	0,1

I valori in tab. 1 sono stati interpolati ottenendo la seguente espressione della curva interpolante:

$$x = 0,00004 lum^2 - 0,02396lum + 3,50263 \quad (6)$$

avendo indicato con x la densità di colore e con lum la luminosità rilevata dal software.

Dalla caratteristica densità (pressione) della curva A fornita per la pellicola Prescale LLLW (fig. 3 a sinistra), si ottiene la legge inversa pressione-densità. Questa è ottenuta per punti, prendendo coppie di valori pressione-densità dalla curva A sopra indicata. Allo stesso modo si è proceduto per tutte le altre curve in fig. 3. La tab. 2 riporta le curve interpolanti che danno la pressione p in funzione della densità di colore x , a sua volta ottenuta dalla luminosità del colore per mezzo della (6).

Tab. 2 – Espressione analitica delle curve di fig. 3

Curva	MISURAZIONE ESTESA	MISURAZIONE ISTANTANEA
A	$p = 0,260x^3 - 0,573x^2 + 0,764x + 0,052$	$p = 0,6622x^3 - 1,3514x^2 + 1,3702x - 0,0578$
B	$p = 0,373x^3 - 0,790x^2 + 0,932x + 0,062$	$p = 0,7599x^3 - 1,4593x^2 + 1,4526x - 0,0278$
C	$p = 0,540x^3 - 0,984x^2 + 1,065x + 0,054$	$p = 1,299x^3 - 2,0592x^2 + 1,7337x - 0,0369$
D	$p = 0,795x^3 - 1,205x^2 + 1,199x + 0,057$	$p = 1,5238x^3 - 2,2553x^2 + 1,8884x - 0,0279$
E	$p = 1,549x^3 - 2,027x^2 + 1,551x + 0,038$	$p = 3,5474x^3 - 4,3082x^2 + 2,6558x - 0,0695$

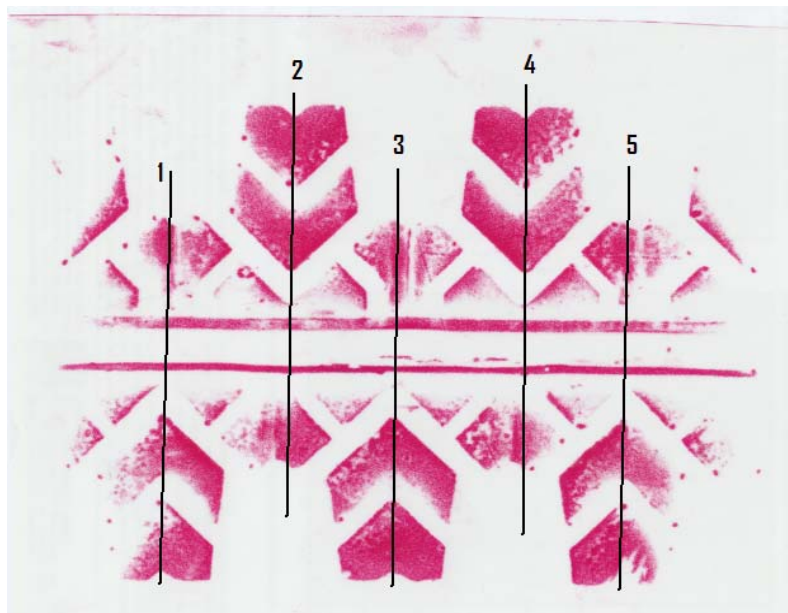


Fig. 4- Esempio d'impronta su carta Prescale e numerazione zone d'analisi

4. ANALISI SPERIMENTALE DELLE PRESSIONI SUL PNEUMATICO

Le prove vengono condotte su un pneumatico per veicolo fuoristrada, che non presenta alcun fenomeno di usura; il pneumatico, anche se costruito da molto tempo, è nuovo di fabbrica, ed ha dimensioni 175/82 R16. Esso viene montato, per mezzo di un'apposita incastellatura, su una macchina di prova Hounsfield. Fra il pneumatico ed il terreno viene inserito un foglio di carta Prescale LLLW per la misurazione delle pressioni. Le prove vengono eseguite facendo aumentare lentamente il carico sino a raggiungere un valore massimo compatibile con le capacità del pneumatico; la forma stessa dell'incastellatura consente di effettuare le prove con camber uguale a zero, tuttavia alla fine delle prove a carico più elevato si notava una leggerissima inclinazione del piano equatoriale della ruota.

La tab. 3 mostra gli estremi delle prove e il tipo di curva utilizzata per il rilievo delle pressioni su carta Prescale. Le pressioni vengono misurate con il metodo di misurazione esteso. L'analisi sperimentale delle pressioni viene condotta per ognuna delle 5 prove effettuate, in direzione trasversale, nelle 5 zone (fig. 5) corrispondenti alla mezzeria dei singoli tasselli costituenti il battistrada del pneumatico. La scansione di ogni singola zona è eseguita per mezzo di ImageProNet, individuando la luminosità corrispondente. Attraverso la corrispondenza (fig. 4) fra luminosità e densità del colore è possibile

ricavare l'andamento della densità per ogni singola zona. Da questa si può poi calcolare il corrispondente andamento della pressione per mezzo di una delle curve (A, B, C, D, E) (fig. 3, tab. 2). Si osserva che nelle zone all'estremità dell'impronta (zona 1 e zona 5) e in quella centrale (zona 3) si hanno un tassello a sinistra dell'asse longitudinale e due a destra. Nelle zone intermedie (zona 2 e zona 4) si hanno viceversa due tasselli a sinistra dell'asse longitudinale e uno a destra.

La tab. 4 e la fig. 5 mostrano i valori di pressione media calcolati per ognuna delle cinque zone e i valori di pressione media sull'area di impronta confrontati con la pressione di gonfiaggio.

Tab. 3 – compendio delle prove eseguite

n. prova	Carico [N]	Pressione di gonfiaggio [MPa]	Temperatura atmosferica [°C]	Umidità relativa [%]	Curva (da fig. 2)
1	4000	0,28	28	70	A
2	5000	0,28	28	70	A
3	6000	0,28	28	70	A
4	6000	0,32	23,8	50,5	C
5	5000	0,32	23,8	50,5	C

Tab. 4 – Valori delle pressioni medie [MPa] in ognuna delle zone per ogni prova

n. prova	ZONE					p_m	p_0
	1	2	3	4	5		
1	0,191	0,244	0,298	0,241	0,166	0,228	0,28
2	0,283	0,344	0,366	0,305	0,299	0,319	0,28
3	0,304	0,347	0,377	0,334	0,325	0,337	0,28
4	0,326	0,357	0,412	0,312	0,27	0,335	0,32
5	0,251	0,433	0,361	0,353	0,26	0,331	0,32

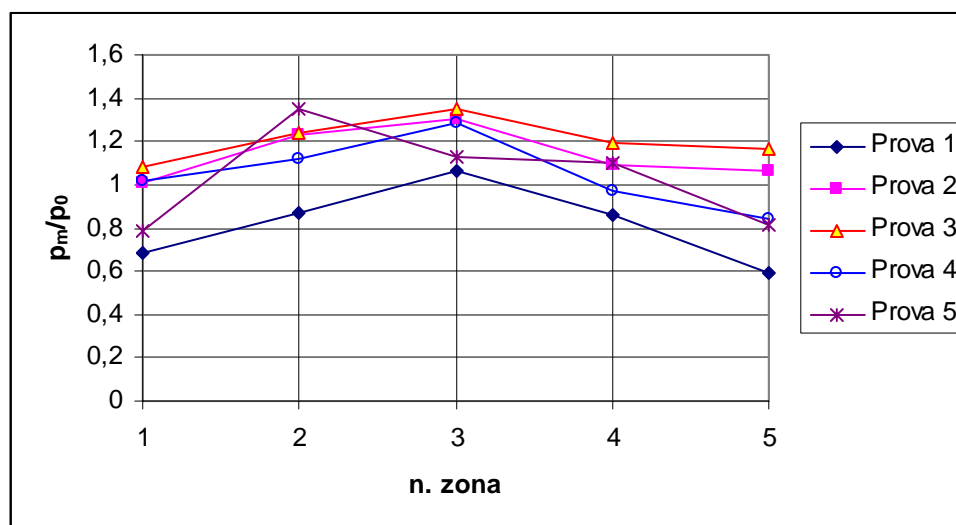


Fig. 5 – Andamento della pressione nell'area di impronta.

Le diverse zone (fig. 4) sono pressochè equidistanti l'una dall'altra.

L'andamento delle pressioni ottenuto dalla prova 5 è un po' diverso dalle altre prove questo potrebbe essere dovuto al non univoco posizionamento del pneumatico nella macchina prova. È comunque da evidenziare il fatto (fig. 5) che la forma della distribuzione delle pressioni è massima al centro (zona 3) e minima ai lati in modo prossimo al modello trapezoidale di Hammel [15] per le prove da 2 a 5, mentre la distribuzione delle pressioni della prova 1 concorda molto bene con il modello parabolico di Sohne [22]. Attribuendo a p_c , valore della pressione dovuto alla rigidità del pneumatico, pari a 0,02 MPa [20], la costante di rigidità del pneumatico c_i che compare nella (1) risulta mediamente pari a 1. Il confronto delle prove analizzate viene condotto con lo scopo di visualizzare il diverso andamento delle pressioni in corrispondenza di ognuna delle zone di analisi dell'impronta del pneumatico a

contatto con il suolo. I confronti sono stati effettuati sia a parità di pressione di gonfiaggio (0.28 MPa) ma diversi carichi applicati, sia con diverse pressioni di gonfiaggio (0.28 e 0.32 MPa) e lo stesso carico applicato (6000 N). Si riportano per brevità solo i grafici relativi alla zona intermedia 3, nelle fig. 6 e 7, potendosi generalizzare il risultato alle altre zone, almeno qualitativamente.

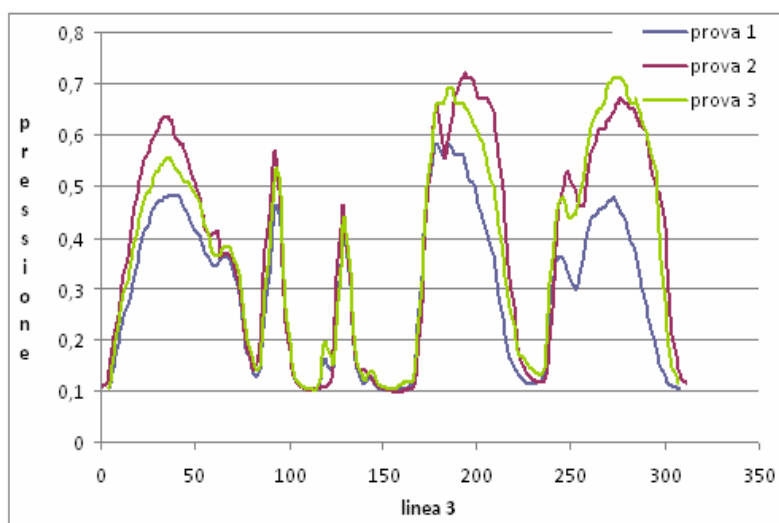


Fig. 6 – Andamento delle pressioni [MPa] nella zona 3 in funzione della posizione trasversale (in ascissa il numero di punti in scansione), con pressione di gonfiaggio del pneumatico costante (0.28 MPa) e carico applicato variabile

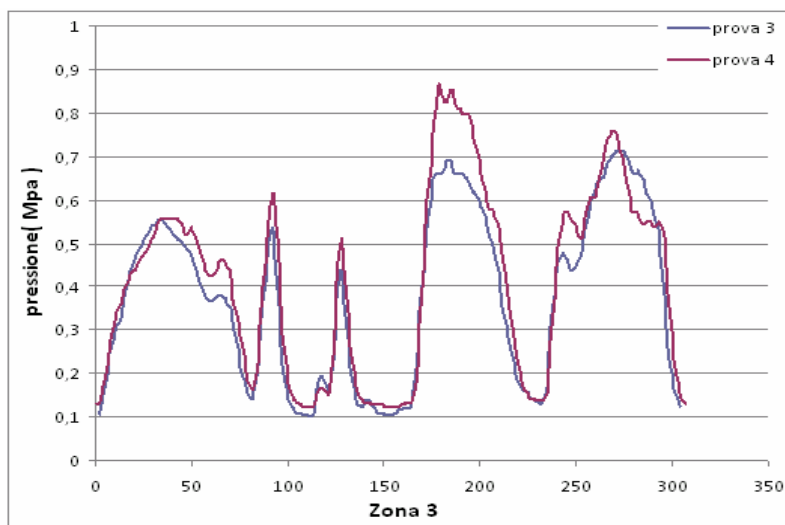


Fig. 7 - Andamento delle pressioni [MPa] nella zona 3 in funzione della posizione trasversale (in ascissa il numero di punti in scansione), con pressione di gonfiaggio del pneumatico variabile (0.28 e 0,32 MPa) e carico applicato costante (6000 N).

Si nota che a parità di pressione di gonfiaggio all'aumento del carico corrisponde un aumento della pressione nelle zone laterali, mentre la pressione nel centro dell'area di impronta, tende a restare costante; a parità di carico l'aumento della pressione di gonfiaggio induce un aumento della pressione di contatto su tutta l'area, indipendentemente dalla posizione. In entrambe le fig. 6 e 7 i circa 310 punti di scansione corrispondono alla larghezza effettiva di contatto, pari a circa 125 mm; essa non coincide con la larghezza totale del battistrada a causa dei talloni. Si notano infine l'alternanza di picchi di pressione e cavità dovuti alla presenza dei talloni. Precisamente le fig. 6 e 7 mostrano cinque picchi di pressione, ognuno dei quali di ampiezza molto maggiore della pressione media calcolata; il campo di pressione nulla fra il secondo e il terzo picco (da sinistra verso destra) corrisponde alla canaletta centrale del pneumatico visibile in fig. 4, così che i picchi di pressione maggiore nella zona a destra

del diagramma corrispondono al tallone in basso in fig. 4 e quindi alla zona esterna dell'area di impronta [7]. Si è notato una situazione analoga in tutte le altre zone, per tutte le prove.

L'applicazione delle formule (3) (4) e (5) richiede la conoscenza dello schiacciamento δ del pneumatico e dell'affondamento z su terreno soffice. Le prove sono state condotte su fondo duro, senza alcuna possibilità di determinare le pressioni nel sottosuolo, l'affondamento può pertanto porsi $z=0$. Lo schiacciamento del pneumatico si sarebbe potuto determinare direttamente, nel corso delle prove, ma la determinazione non sarebbe stata esente dall'influenza dei giochi delle viti di comando e da errori nella distinzione fra moto di avvicinamento del pneumatico al suolo e moto di schiacciamento vero e proprio. Si è pertanto pensato di ricorrere ad una relazione fondamentale del comportamento statico del pneumatico:

$$l = \sqrt{r^2 - (r - \delta)^2} \cong \sqrt{\delta d} \quad (7)$$

Nella quale l è la semilunghezza dell'area di impronta e d è il diametro esterno del pneumatico, pari a 0,6934 m, mentre il battistrada è largo 0,175 m. La tab. 5 mostra i valori della lunghezza $2l$ dell'area di impronta misurata su carta Prescale e il valore di δ ottenuto dalla (7). La quantità h che compare nella formula (5) di Rowland è stata posta pari al prodotto del rapporto d'aspetto (82%) con il battistrada. La tab. 5 mostra i valori calcolati delle quantità MMP di Rowland e Maclaurin e della quantità NGP a confronto della pressione media ottenuta sperimentalmente.

Tab 5 – Confronto dei risultati

n. prova	W [N]	$2l$ [m]	δ [m]	MMP Maclaurin [MPa]	MMP min. Rowland [MPa]	MMP max Rowland [MPa]	NGP (2) [MPa]	p_m [MPa]
1	4000	0,195	0,0138	0,054	0,158	0,199	0,118	0,228
2	5000	0,221	0,0176	0,060	0,175	0,220	0,131	0,319
3	6000	0,245	0,0216	0,065	0,189	0,238	0,142	0,337
4	6000	0,227	0,0186	0,070	0,204	0,257	0,153	0,335
5	5000	0,210	0,0159	0,063	0,183	0,231	0,137	0,332

Il rapporto fra il carico W e lo schiacciamento δ fornisce valori attendibili della costante elastica del pneumatico, variabile con la pressione di gonfiaggio, più volte calcolata in passato eseguendo prove sperimentali allo scopo (circa 285 N/mm² per 0,28 MPa e 320 N/mm² per 0,32 MPa).

5. DISCUSSIONE

I valori misurati per ogni zona mostrano che il modello matematico più conveniente è quello parabolico per basso valore del carico, mentre quello trapezoidale è più conveniente per carichi più alti, anche se non si è ottenuto un modello di distribuzione costante delle pressioni; ciò può dipendere dalla particolare natura del pneumatico (da fuoristrada) e dai talloni presenti, che mostrano di essere soggetti ai più alti valori di pressione nell'area di contatto. Il valore della pressione media può essere messo in relazione con la pressione di gonfiaggio del pneumatico.

I risultati riportati in tab. 5 mostrano che i valori di MMP di Maclaurin e Rowland ed il valore di NGP risultano notevolmente inferiori alla pressione a terra misurata con carta Prescale. La formula di Rowland è stata applicata usando i valori minimo e massimo della costante k , ottenendo che, almeno per il pneumatico in esame, un incremento del valore di k di circa 1,5 volte potrebbe essere utile per la predizione della pressione di contatto a terra. D'accordo con altri autori [3] [4] [6] la formula proposta da Maclaurin dà una predizione decisamente più bassa di quella di Rowland, e quindi meno utilizzabile per ottenere una predizione attendibile. Anche il valore di NGP ottenuto dalla formula (3) dà risultati migliori, che si pongono intermedi fra quelli di Rowland e quelli di Maclaurin.

L'uso della carta Prescale si è rilevato particolarmente utile per ottenere una descrizione abbastanza accurata della distribuzione delle pressioni su terreno duro, ma consente con difficoltà applicazioni

analoghe su terreno soffice. Uno dei maggiori problemi incontrati è l'incertezza se il valore di picco della pressione sia davvero significativo per la predizione della mobilità, come Rowland arguì, o se un valor medio al contatto ruota suolo sia più importante. In ogni caso vi è una certa relazione fra i valori di pressione alla superficie e i valori di MMP predetti da Rowland e Maclaurin. Ciò suggerisce che l'espressione di MMP per veicoli su ruote sia semplicemente un indicatore delle prestazioni, piuttosto che una reale predizione della pressione a terra. Sebbene le formule di MMP non predicano il vero valore della pressione a terra, essi tengono conto effettivamente del ruolo giocato dai principali parametri. Ciò si nota anche nella fig. 8 che presenta un confronto fra i valori predetti rapportati al valore misurato della pressione a terra: i rapporti più bassi corrispondono ad una migliore condizione di maneggevolezza. Il confronto è eseguito su terreno supposto indeformabile; in realtà nessuna delle formule usate tiene conto delle caratteristiche del terreno.

8. CONCLUSIONI

L'uso della carta Prescale ha dato buoni risultati su terreno duro; non è stata eseguita alcuna prova su terreno soffice.

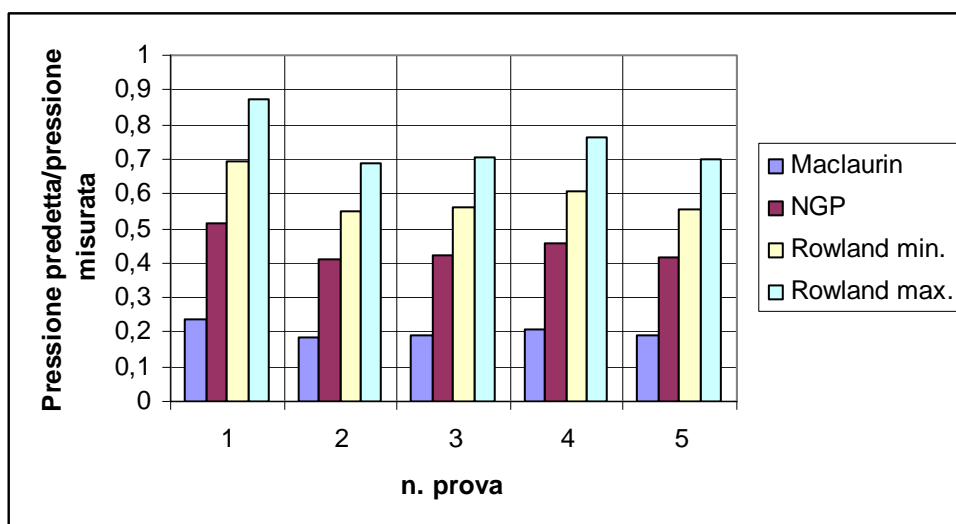


Fig. 8. Confronto fra la pressione a terra misurata con carta Prescale e le predizioni di MMP e NGP per le diverse prove.

La distribuzione delle pressioni nell'area di impronta nella prova 1 segue bene il modello parabolico (gomma piena – impronta piccola), mentre nelle altre segue ben il modello costante (camera d'aria – impronta grande), nonostante la differenza di carico non sia eccessivamente grande. Ciò può dipendere dal particolare tipo di pneumatico, ma consente di dissentire da quanti considerano concluso lo stato delle ricerche sull'andamento della distribuzione delle pressioni a terra su terreno duro.

Per la configurazione studiata vi sono buone relazioni fra i valori misurati della NGP (Nominal Ground Pressure) ed i valori predetti dalle formule di Rowland e Maclaurin. Gli effetti del peso, dimensioni della ruota e schiacciamento del pneumatico sono ben modellati dalla formula MMP, comunque vi è una discrepanza fra i valori di pressione misurati e quelli predetti. La formula di Maclaurin corrisponde ad un veicolo di massa 34% rispetto a quella usata per la formula di Rowland. I valori di pressione a terra sono influenzati dal tipo di terreno; nessuna delle formule reperibili in letteratura tiene conto di questo effetto.

L'espressione di MMP per veicoli su ruote è da considerare semplicemente un indicatore delle prestazioni, in confronto con altre situazioni di carico o con altri veicoli, piuttosto che una reale predizione della pressione a terra. Dal diagramma di fig. 8 si nota che le prove 2, 5 e 3 sono da preferire per la maggiore uniformità del campo di pressione.

REFERENCES

- [1] Rowland D. *Tracked vehicle ground pressure*. Report no. 72031. MVEE (Chertsey), UK. July 1972.
- [2] Maclaurin E. B. *Proposed revisions to MMP based on the results of tractive performance trials with single pneumatic tyres and a modular track system*. DERA/LS4/TR9701222/1.0. DERA (Chertsey), 1997.
- [3] Barton P. C. *The influence of prediction formulae on wheeled AFV design*. In: *Wheels & Tracks Symposium*, RMCS, Shrivenham Wilts, UK, September 1998.
- [4] White, J. N. *The measurement of ground pressure under wheeled vehicles*. MVT project report. Royal Military College of Science (Shrivenham), UK. July 1997.
- [5] Wong J.Y., Garber M., Preston-Thomas J. *Theoretical prediction and experimental substantiation of the ground pressure distribution and tractive performance of tracked vehicles*. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers* 1984; 198D(15): 266.
- [6] Hetherington J. G., White J. N. – *An investigation of pressure under wheeled vehicles* - *Journal of Terramechanics* 39 (2002) 85–93
- [7] Genta G. – *Motor Vehicle Dynamics, Modeling and Simulation* – World Scientific, Singapore, 2003
- [8] Ghorelshi M. H. R. – *Steady state rolling analysis of a radial tire; comparison with experimental results* – *Proc. IMechE*, vol. 220, part D, *J. of Automobile Engineering*, J. Auto 268, 713 – 721
- [9] Gipser M. – *The FTire Tire Model Family* – Esslingen University of Applied Science, Automotive Engineering department, 2006
- [10] Arvidsson, J., Ristic, S., 1996. *Soil stress and compaction effects for four tractor tyres*. *J. Terramechanics*. 33(5), 223–232.
- [11] Arvidsson, J., Andersson, S., 1997. *Determination of soil displacement by measuring the pressure of a column of liquid*. In: *Proceedings of 14th International Conference of ISTRO*, Pulawy, Poland.
- [12] Bailey, A. C., Raper, R. L., Burt, E. C., Johnson, C. E., Way, T. R. 1992. *Soil Stresses under Tires with low Inflation Pressure*. ASAE Meeting Presentation No. 92-1581.
- [13] Burt, E. C., Wood, R. K., Bailey, A. C., 1992. *Some comparisons of average to peak soil–tire contact pressures*. *Trans. ASAE* 35, 401–404.
- [14] Erbach, D. C., Knoll, K. K. 1992. *Inflation Pressure Effect on Soil Compaction*. ASAE Meeting Presentation No. 92-1582.
- [15] Hammel, K., 1994. *Soil stress distribution under lugged tires*. *Soil Till. Res.* 32, 163–181.
- [16] Johnson, C. E., Burt, E. C., 1990. *A method of predicting soil stress state under tires*. *Trans. ASAE* 33, 713–717.
- [17] Karafiath, L. L., Nowatski, E. A., 1978. *Soil Mechanics for Off-road Vehicle Engineering*. *Trans Tech Publications*, Clausthal, Germany, pp.515.
- [18] Keller, T., 2005. *A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters*. *Biosyst. Eng.* 92, 85–96.
- [19] Koolen, A. J., Lerink, P., Kurstjens, D. A. G., Vanden Akker, J. J. H., Arts, W. B. M., 1992. *Prediction of aspects of soil–wheel systems*. *Soil Till. Res.* 24, 381–396.
- [20] Plackett, C. W., 1984. *The ground pressure of some agricultural tyre sat low load with zero sinkage*. *J. Agric. Eng. Res.* 29, 159–166.
- [21] Raper, R. L., Bailey, A. C., Burt, E. C., Way, T. R., Liberati, P., 1995. *Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil–tire interface stresses*. *Trans. ASAE* 38, 685–689.
- [22] Sohne, W., 1958. *Fundamentals of pressure distribution and compaction under tractor tires*. *Agric. Eng.* 39, 276–281290.
- [23] Way, T. R., Kishimoto, T., Burt, E. C., Bailey, A. C., 2000. *Soil tyre interfaces pressures of a low aspect ratio tractor tyre*. In: Horn, R., Vanden Akker, J. J. H., Arvidsson, J.(Eds.), *Subsoil Compaction–Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in GeoEcology*, 32. Catena Verlag, Reiskirchen, pp.82–92.
- [24] Way, T. R., Kishimoto, T., 2003. *Interface pressures of a tractor drive tyre on structured and loose soils*. *Biosyst. Eng.* 87, 375–386.