

ANALISI DELLE VIBRAZIONI SU TRATTORI AGRICOLI IN NORMALI CONDIZIONI DI LAVORO E IN CONDIZIONI PREDEFINITE

VIBRATION ANALYSIS ON AGRICULTURAL TRACTORS IN NORMAL WORKING CONDITIONS AND IN PREDETERMINED CONDITIONS

Alessandro Peretti (1), Francesco Bonomini (2), Anita Pasqua di Bisceglie (3),
Domenico Pessina (4), Davide Giordano (4), Marco Gibin (4), Claudio Colosio (5),
Ninfa Monica Mucci (5), Michele Nuccio (5)

- 1) Scuola di Specializzazione in Medicina del Lavoro, Università di Padova
- 2) Ingegnere, Padova
- 3) Medico del Lavoro, Padova
- 4) Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università di Milano
- 5) Dipartimento di Scienze della Salute, Università di Milano

* Indirizzo dell’autore di riferimento - Corresponding author’s address:

Via Ivrea 1/4, 35142 Padova, Italia
e-mail: alessandro.peretti@unipd.it

RIASSUNTO

Commentata la diffusione dei trattori agricoli in Italia e svolta una rassegna degli effetti delle vibrazioni sui trattoristi, sono riportati i valori delle accelerazioni riscontrati nel nostro Paese, nonché i livelli di esposizione degli operatori. Individuati i parametri che determinano le vibrazioni, sono illustrati gli interventi in grado di contenerle.

Sono inoltre riportati i risultati di una ricerca su tre trattori agricoli: i rilievi delle vibrazioni triassiali sul piano e sul basamento del sedile e le misure del rumore in prossimità di ambedue gli orecchi dell’operatore sono stati eseguiti durante l’aratura, l’erpicatura e la traslazione su strada sterrata e asfaltata, a diverse velocità di avanzamento e a differenti valori di pressione di gonfiaggio degli pneumatici.

ABSTRACT

After the assessment of the agricultural tractors fleet characteristics in Italy and a review of the effects of vibration on tractor drivers, the typical acceleration values and consequent operators’ exposure levels in carrying out agricultural operations are reported. Once having ascertained the parameters that produce the vibrations, the actions more suitable to reduce the risk factors are shown.

The results of a series of comparative tests on three used tractors of different age are then reported: the levels of tri-axial vibrations on the seat cushion and base and of the noise at both operator’s ears were recorded during ploughing, harrowing and driving on farm and paved roads, at different speeds and varying the tyres inflation pressure.

Parole chiave: trattori agricoli, vibrazioni, riduzione delle vibrazioni.

Keywords: agricultural tractors, vibration, vibration reduction.

1. Premessa

Nonostante sia esperienza comune che le vibrazioni trasmesse dalle macchine agricole siano elevate, le conoscenze in merito all'entità di tale fattore di rischio e alla diffusione delle relative patologie sono ancora ben lungi dall'essere esaustive. Ciò va probabilmente addebitato alle caratteristiche del comparto: massiccia presenza di aziende a conduzione familiare o comunque con pochissimi lavoratori dipendenti, attività lavorative notevolmente differenti in funzione delle stagioni e delle colture praticate, impiego discontinuo delle macchine, presenza di mezzi con differenti caratteristiche, livelli di esposizione molto variabili, estesa assenza di sorveglianza sanitaria. Ovviamente questi aspetti si ripercuotono negativamente anche sulla informazione-formazione degli addetti e sulla consapevolezza dei rischi.

Si è quindi proseguito in una ricerca concernente i trattori, ossia le macchine maggiormente impiegate in agricoltura, mirata a valutare i rischi da vibrazioni e a individuare gli interventi in grado di ridurli. Nel nostro Paese la diffusione dei trattori è rilevante poiché essi ammontano a quasi 1,9 milioni di unità (80% a ruote e 20% a cingoli). Il parco macchine è particolarmente obsoleto, perché una frazione considerevole dei trattori in circolazione (circa il 75%) ha oltre 25 anni. D'altra parte il rinnovo di questi mezzi è da sempre particolarmente difficoltoso: negli ultimi anni l'immatricolazione dei trattori è andata via via riducendosi portandosi nel 2014 poco sopra le 18.000 unità [1,2]. Questi aspetti sono particolarmente preoccupanti in termini non solo produttivi ma anche igienistici, considerando che i vecchi trattori presentano rischi maggiori rispetto a quelli dei mezzi attualmente in produzione.

2. Effetti delle vibrazioni sugli operatori

È noto che l'esposizione a vibrazioni trasmesse al corpo intero è uno dei maggiori fattori di rischio di insorgenza di disturbi e patologie a carico del rachide, in particolare del tratto lombosacrale. Se il settore dei trasporti è stato ampiamente indagato sotto questo profilo, non altrettanto è stato fatto per il comparto agricolo che pur presenta una vasta gamma di fattori di stress ergonomico, non ultimo quello delle vibrazioni trasmesse al corpo intero [3]. Sono numerosi infatti gli studi che rilevano una prevalenza statisticamente significativa di disturbi a carico del rachide lombare negli agricoltori e in particolare nei trattoristi rispetto ai controlli [4,5,6,7,8,9]; tuttavia non sono molte le ricerche che riportano i valori delle vibrazioni rilevate sulle macchine operatrici e che permettono di stimare così una correlazione dose-risposta. Tra queste un noto studio di Bovenzi e Betta riporta una relazione significativa tra le ore di guida sui trattori e disturbi quali la sciatica e la lombalgia, sia acuta che cronica; lo studio rileva inoltre un'associazione statisticamente significativa tra l'esposizione cumulativa a vibrazioni e i disturbi al rachide lombare, sia acuti, che insorti nell'ultimo anno e nel corso della vita lavorativa [5]. Tali risultati sono concordi con quelli di altri autori che sottolineano come l'esposizione alle vibrazioni in termini di anni di guida correli meglio con l'insorgenza di disturbi a carico del rachide lombare rispetto ai livelli delle vibrazioni [4,9,10].

Oltre all'esposizione a vibrazioni, la guida dei trattori determina anche sovraccarico posturale a causa della posizione assisa prolungata, delle flessioni in avanti e delle inclinazioni laterali del tronco, nonché delle frequenti rotazioni della colonna per il controllo delle operazioni. A proposito di quest'ultimo aspetto, alcune lavorazioni quali l'aratura sembrano determinare maggior sovraccarico posturale a causa della prolungata permanenza del tronco in rotazione [6,10,11].

La contemporanea presenza di vibrazioni e sovraccarico posturale accresce il

rischio dei disturbi a carico del rachide lombare [4,5,6,9,10,12,13,14]. Il sovraccarico posturale e la conseguente contrazione muscolare e riduzione del flusso ematico rendono il rachide dell'operatore assiso più vulnerabile ai fattori lesivi determinati dalle vibrazioni [15]. È stato stimato che nei trattoristi la combinazione della dose di vibrazioni e del sovraccarico posturale è superiore a quella di molte altre categorie di lavoratori come escavatoristi, carrellisti, conducenti di tram [14]; tale combinazione è in grado di determinare un rischio di disturbi cronici a carico del rachide lombare superiore a tre volte rispetto ai soggetti non esposti [5].

Gli spettri delle vibrazioni rilevati sui sedili dei trattori evidenziano accelerazioni massime tra 2,5 e 4 Hz [5]. Studi biodinamici hanno dimostrato che il rachide lombare di un soggetto seduto sottoposto a vibrazioni presenta una frequenza di risonanza tra 2 e 6 Hz. Le vibrazioni trasmesse dai trattori eccitano quindi il rachide lombare alla sua frequenza di risonanza da cui ne consegue un sovraccarico meccanico determinato dagli spostamenti verticali dei corpi vertebrali adiacenti [5].

La massima forza compressiva misurata risulta essere quella sviluppata sul disco L4-L5 durante le operazioni di guida del trattore, usando sia i pedali che i comandi a mano e controllando periodicamente l'attrezzo collegato posteriormente [16].

Oltre ai disturbi a carico del rachide lombare vengono segnalati anche disturbi a carico del rachide cervicale e della parte destra del corpo (coscia, braccio e spalla). In particolare gli operatori agricoli riportano disturbi alla spalla destra, associati al posizionamento dei comandi nella cabina (alla destra dell'operatore) e al movimento di rotazione (riferito solitamente verso destra) [10]. In letteratura è evidenziato che sedili poco ergonomici [17] e non correttamente regolati [15] potrebbero essere causa dell'insorgenza dei disturbi alla coscia.

Un altro aspetto che può costituire un'aggravante è evidenziato da Solecki [18] secondo il quale le accelerazioni sui trattori agricoli sono caratterizzate da alti valori di picco (fattori di cresta superiori a 10) particolarmente dannosi per il rachide lombare.

3. Origine delle vibrazioni, valori delle accelerazioni, esposizioni degli addetti

Facendo riferimento ai trattori più comuni, ossia quelli dotati di pneumatici, le vibrazioni sono determinate dalla traslazione del mezzo su una superficie non uniforme; esse sono caratterizzate da componenti di bassa frequenza (< 10 Hz) e sono influenzate dalle irregolarità del terreno, dalla velocità di avanzamento e dalla non uniformità dello pneumatico e del cerchio sul quale è montato.

Le vibrazioni sono inoltre prodotte dal motore a combustione interna, dagli ingranaggi della scatola di trasmissione, dai cavi del cambio, dal piantone dello sterzo, dalla pompa idraulica, ecc.; esse sono di frequenza più elevata rispetto alle precedenti e rivestono quindi minore importanza in termini igienistici.

I valori delle accelerazioni rilevati nel nostro Paese da diversi enti e ricercatori su una considerevole quantità di trattori a ruote durante le normali attività lavorative possono fornire un quadro dell'esposizione degli addetti [19]. Elaborando i dati relativi a 195 trattori e 289 rilievi, i valori delle accelerazioni ponderate in frequenza riscontrate sul piano del sedile e determinanti il rischio secondo il D.Lgs. 81/2008 risultano compresi all'interno di un intervallo molto ampio ($0,19$ - $2,29$ m/s^2), con valori percentili 10, 50, 90 pari rispettivamente a $0,40$, $0,70$, $1,20$ m/s^2 . Sulla base di questi valori è stata elaborata la tabella 1 in cui è indicata, rispetto alle fasce di rischio, la distribuzione dei livelli di esposizione A(8) riferiti a differenti ore di impiego giornaliero dei trattori. Considerando che i trattori possono essere utilizzati giornalmente per durate significative (alcuni autori evidenziano durate di impiego superiori a 8 ore/giorno

[20,21]), si può concludere che i rischi associati all'uso di queste macchine sono molto elevati.

Tabella 1 - Percentuale dei livelli di esposizione A(8) che ricadono nelle diverse classi di rischio (valore di azione $0,5 \text{ m/s}^2$, valore limite $1,0 \text{ m/s}^2$) [19].

Durata di impiego giornaliero dei trattori (ore)	A(8)		
	$< 0,5 \text{ m/s}^2$	$0,5-1,0 \text{ m/s}^2$	$> 1,0 \text{ m/s}^2$
8	21	58	21
6	32	56	12
4	53	43	4
2	75	23	2

4. Parametri determinanti le vibrazioni e interventi di riduzione delle stesse

In accordo con l'intervallo molto ampio dei valori delle accelerazioni sopra trattati, diversi autori evidenziano valori vibrazionali molto variabili nella conduzione dei trattori [20,21,22]. Le cause sono molteplici e si riferiscono da un lato alle condizioni di lavoro e dall'altro alle caratteristiche del mezzo.

Per quanto riguarda le condizioni di lavoro, tra operazione svolta, tipo di terreno, velocità di avanzamento (spesso interdipendenti), sembra che il parametro maggiormente influente sia rappresentato dalle irregolarità della superficie [20,22], anche se la velocità svolge un ruolo significativo [20,22,23].

Per quanto attiene alle caratteristiche del mezzo, vanno considerati gli eventuali dispositivi di sospensione presenti, nonché il sedile e gli pneumatici.

I trattori più recenti possono essere, infatti, dotati di sistemi di sospensione riguardanti la cabina e/o uno o entrambi gli assi del mezzo, basati su molle e smorzatori telescopici idraulici oppure su sistemi idraulico-pneumatici. Dai diversi studi non emergono però graduatorie univoche circa la minore o maggiore validità dei diversi dispositivi, date le modeste differenze tra i dati ottenuti nelle stesse condizioni [20,22].

Il sedile può essere dotato di sospensione meccanica (molla - smorzatore telescopico idraulico), oppure nei casi più innovativi di sospensione pneumatica (molla ad aria - smorzatore idraulico). Anche questi ultimi però possono presentare delle criticità poiché, rispetto alla piattaforma della cabina, amplificano le accelerazioni lungo gli assi orizzontali, mentre le amplificano o le attenuano lungo l'asse verticale [20,22,24].

Le caratteristiche degli pneumatici possono influire in misura rilevante nel determinare le vibrazioni [25]. Il loro comportamento dipende però dalla tipologia del terreno: uno pneumatico valido per una superficie può non essere valido per un'altra [23]. La riduzione della pressione di gonfiaggio comporta comunque una significativa diminuzione delle vibrazioni [23].

5. Ricerca sperimentale

5.1 Finalità e oggetto dell'indagine

Al fine di individuare possibili interventi in grado di contenere i rischi, è stata svolta una ricerca mirata alla valutazione dei parametri tecnico-operativi che possono influenzare le vibrazioni. L'indagine ha riguardato tre trattori agricoli di potenza medio-bassa, nettamente differenziati per livello di progresso tecnico soprattutto per quanto

concerne i presidi in grado di migliorare le condizioni al posto di guida. I rilievi sono stati eseguiti a diverse velocità di avanzamento e pressioni di gonfiaggio degli pneumatici, durante quattro comuni operazioni (aratura, erpicatura, trasferimento su strada sterrata, trasferimento su strada asfaltata). Nell'ambito della ricerca è stato rilevato anche il rumore cui è esposto il conducente.

5.2 Materiali e metodi

Le prove sono state effettuate presso l'azienda agraria didattico-sperimentale "Cascina Baciocca" dell'Università di Milano, sita a Cornaredo (Milano). I rilievi sono stati eseguiti su tre trattori a ruote: Fiat 70-90, Same Explorer 110, Deutz Fahr 5110 TTV, rispettivamente immatricolati negli anni 1988, 2010 e 2015. I trattori Same e Deutz Fahr, pur montando motori tecnicamente diversi, sono caratterizzati dalla medesima potenza (81 kW) e pertanto si prestano a essere confrontati tra loro. Il trattore Fiat è contraddistinto invece da una potenza minore (51 kW); considerata l'epoca di produzione, questa caratteristica lo rende comunque paragonabile agli altri due trattori per quanto riguarda la possibilità di accoppiamento degli attrezzi.

Sui trattori Fiat e Same l'unico sistema atto ad attenuare le vibrazioni a carico dell'operatore è la sospensione del sedile, in entrambi i casi di tipo meccanico (molla-smorzatore). Viceversa, il trattore Deutz Fahr, tecnologicamente più avanzato, monta un sedile a sospensione pneumatica; inoltre quest'ultimo trattore è dotato anche di sospensione idraulica dell'asse anteriore (escludibile all'occorrenza), completata con due assorbitori di shock ad azoto.

I trattori Same e Deutz Fahr sono equipaggiati di cabina insonorizzata di tipo ROPS (Roll Over Protective Structure), mentre il trattore Fiat ha un telaio a quattro montanti, sempre di tipo ROPS, completato da un semplice tettuccio in lamiera.

L'aratura è stata effettuata a una profondità media di 30 cm circa, collegando il medesimo aratro bivomere doppio voltaorecchio marca Samadoval all'attacco a tre punti dei sollevatori dei tre trattori. L'erpicatura è stata eseguita a una profondità media di 20 cm con lo stesso erpice Dondi a denti elastici, della larghezza di lavoro di 3,50 m.

Le prove sono state svolte nel mese di febbraio 2015 in un appezzamento della lunghezza di 97 m, con superficie parzialmente inerbita e presenza di stocchi di mais come residuo della coltivazione precedente, a tessitura franco-sabbiosa (60% sabbia, 25% limo, 15% argilla) con significativa presenza di scheletro (sassi) e un'umidità media dello strato lavorato del 16%. L'aratura è stata effettuata in una parte dell'appezzamento non sottoposto a lavorazione dal luglio 2014, mentre l'erpicatura ha interessato un'altra zona già arata nell'ottobre 2014 e con una presenza più abbondante di scheletro.

Le prove di trasferimento dei trattori hanno riguardato una carrareccia sterrata in mediocri condizioni di uniformità della superficie e una strada asfaltata in buono stato di manutenzione. In ambedue le condizioni sono stati considerati solo tratti rettilinei.

I tre mezzi sono stati provati a diverse velocità di avanzamento. Durante l'aratura e l'erpicatura sono state variate le pressioni di gonfiaggio degli pneumatici, considerando sia valori standard che ridotti.

Alla guida dei tre trattori è stato posto sempre lo stesso operatore esperto (altezza 1,80 m, massa 75 kg); sulla base della massa del conducente è stata regolata la rigidezza delle sospensioni dei sedili.

Per ognuna delle quattro condizioni esaminate sono stati eseguiti 3-12 rilievi; la variabilità all'interno di ogni serie di dati è risultata contenuta. La durata di ciascuna prova è variata da 0,5 a 7 minuti, in funzione della velocità di avanzamento del trattore,

dell'operazione svolta, ecc..

Per quanto riguarda la strumentazione, le vibrazioni sono state rilevate tramite due accelerometri triassiali ICP prodotti dalla PCB Piezotronics. Il primo, di sensibilità 10 mV/ms^{-2} inserito in un piatto semirigido di gomma [26], è stato collocato sul piano del sedile e mantenuto in posizione mediante nastro adesivo. Il secondo accelerometro, di sensibilità 1 mV/ms^{-2} , è stato assicurato al basamento del sedile mediante un magnete. Il rumore è stato rilevato mediante due microfoni di diametro $1/2''$ e sensibilità nominale 50 mV/Pa , prodotti dalla BSWA Technology, posti in prossimità di entrambi gli orecchi dell'operatore.

I trasduttori sono stati collegati al dispositivo di misura multicanale Soundbook prodotto dalla Sinus Messtechnik. La calibratura è stata eseguita mediante gli strumenti di riferimento 4294 e 4231 della Bruel Kjaer. In conformità alla norma ISO 2631-1 [27] sono stati impiegati i filtri di ponderazione delle accelerazioni d per gli assi orizzontali e k per l'asse verticale. Per il rumore sono stati usati i filtri di ponderazione A e C.

Al dispositivo di misura sono stati collegati un sensore di velocità radar doppler Delta DRS1000 prodotto dalla GMH Engineering e una webcam, ambedue sincronizzati con le misure di vibrazioni e rumore.

5.3 Risultati e osservazioni

Lavorazioni complete di aratura e erpicatura

Per l'aratura e l'erpicatura sono state considerate le routine complete, comprensive cioè sia delle passate in campo che delle svolte in capezzagna (bordo campo). Durante queste ultime vengono eseguite brevi manovre per allineare il trattore e l'attrezzo alla passata successiva; l'aratro viene sollevato e ruotato di 180° , l'erpice viene invece semplicemente sollevato.

Nella figura 1 (parte in alto) sono riportati mediante istogrammi i valori medi aritmetici delle accelerazioni quadratiche medie (rms) ponderate in frequenza riscontrate sul piano del sedile lungo i tre assi ortogonali; sono inoltre riportati i relativi vettori somma $a_v = [(1,4 a_{w,x})^2 + (1,4 a_{w,y})^2 + (a_{w,z})^2]^{0,5}$ [27].

Il valore determinante il rischio (valore massimo della terna delle accelerazioni rilevate sui tre assi, dopo moltiplicazione delle accelerazioni orizzontali per il coefficiente 1,4) si presenta sugli assi longitudinale, trasversale e verticale, rispettivamente, nel 14, 69 e 17% dei rilievi. A differenza di altri veicoli, sui trattori agricoli le vibrazioni trasversali sono quindi generalmente predominanti, come evidenziato anche da Scarlett et al. [20,22]; esse sono sostanzialmente dovute al terreno sconnesso, al fatto che durante l'aratura tradizionale le ruote sul lato destro e sinistro avanzano alternativamente entro il solco creato nella passata precedente e allo sbilanciamento dei mezzi determinato dalle manovre di inversione in capezzagna.

Sulla base dei valori medi riportati in figura 1, escludendo il caso contraddistinto da vibrazioni minori (trattore Fiat, erpicatura a $3,3 \text{ km/h}$), il valore massimo della terna delle accelerazioni risulta compreso tra $0,59$ e $0,90 \text{ m/s}^2$. Ne consegue che le esposizioni alle vibrazioni (A(8)) risultano pari al valore di azione ($0,5 \text{ m/s}^2$) nel caso di una durata di impiego dei trattori compresa tra $2,5$ e $5,7$ ore giornaliere, mentre risultano pari al valore limite (1 m/s^2) nel caso di una durata compresa tra 10 e 23 ore. Le misurazioni confermano quindi che le vibrazioni costituiscono un rischio per gli operatori.

Secondo la norma ISO 2631-1 [27], le vibrazioni presentano caratteristiche impulsive qualora il fattore di cresta (rapporto tra i valori di picco e rms dell'accelerazione ponderata) sia superiore a 9. Nell'indagine in esame l'impulsività delle vibrazioni è stata riscontrata esclusivamente sul trattore Fiat durante l'erpicatura in fase

Analisi delle vibrazioni su trattori agricoli in normali condizioni di lavoro e in condizioni predefinite
Vibration analysis on agricultural tractors in normal working conditions and in predetermined conditions

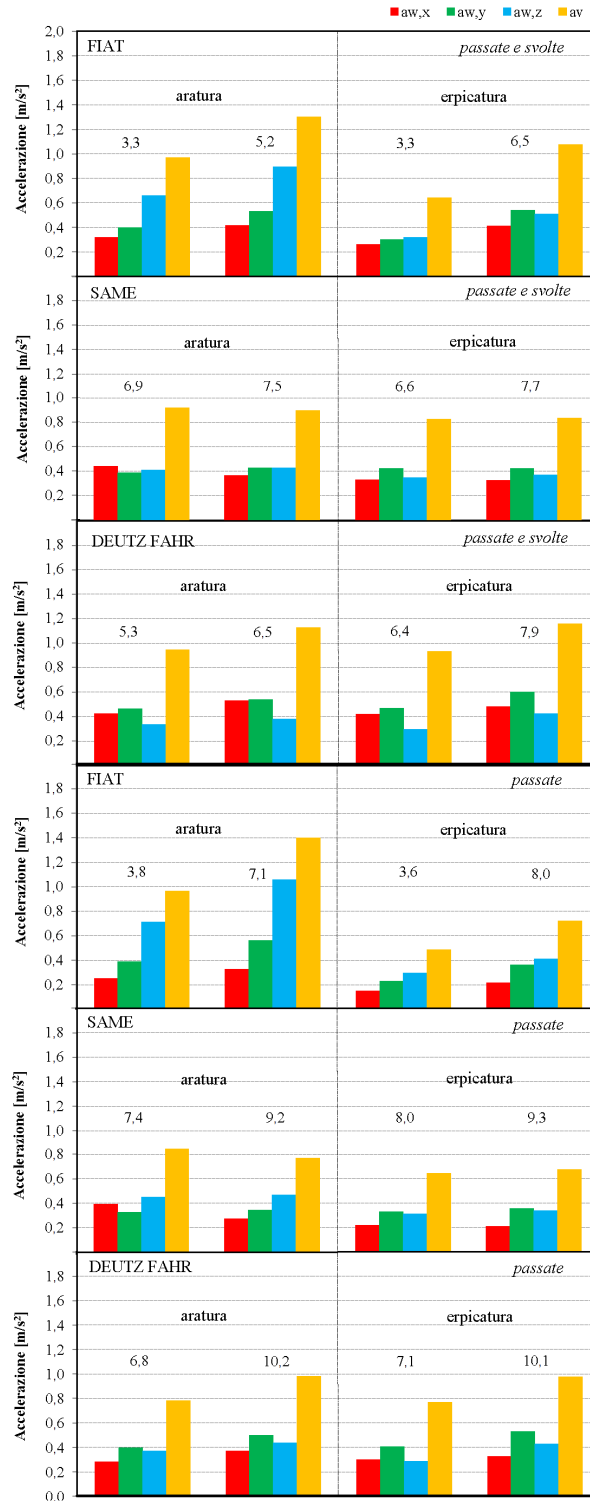


Figura 1 - Valori medi delle accelerazioni rms ponderate in frequenza rilevate sul piano del sedile durante le lavorazioni con normale pressione di gonfiaggio degli pneumatici (anteriori 200 kPa, posteriori 160 kPa). Sopra gli istogrammi è riportata la velocità in km/h (media nel caso delle passate e delle svolte, costante nel caso delle passate) - Mean values of the frequency weighted rms accelerations measured on the seat cushion during the activities, using a regular tyre inflation pressure (foreward 200 kPa, rear 160 kPa). Speed (km/h) is shown above the histograms.

di manovra in capezzagna e ha riguardato gli assi longitudinale (2 casi su 6), trasversale (5 su 6) e verticale (2 su 6). Elevati fattori di cresta sui trattori sono rilevati anche da Solecki [18].

Per quanto riguarda il rumore, i livelli sonori equivalenti rilevati sul trattore Fiat sprovvisto di cabina insonorizzata risultano compresi tra 89,3 e 91,6 dB(A) (orecchio destro) e tra 92,2 e 93,5 dB(A) (orecchio sinistro). L'incremento di $2,3 \pm 0,4$ dB(A) sull'orecchio sinistro è determinato dalla posizione del silenziatore di scarico (posto in questo caso sulla sinistra del posto di guida) e dalla posizione che l'operatore ha assunto durante la lavorazione, con il busto e la testa leggermente ruotati verso destra. Considerando l'orecchio più sollecitato, i livelli di esposizione giornalieri (Lex,8h) risultano pari al valore superiore di azione (85 dB(A)) nel caso di un'esposizione compresa tra 68 e 91 minuti al giorno. Il rischio da rumore è quindi rilevante. I livelli di picco sono inferiori a 117 dB(C).

Sui trattori Same e Deutz Fahr, dotati di cabina insonorizzata, i livelli sonori equivalenti risultano, rispettivamente, di 75,2-79,2 dB(A) e 72,3-79,0 dB(A). Le differenze in corrispondenza dei due orecchi non sono significative.

Passate in campo di aratura ed erpicatura

Per confrontare l'influenza dei diversi parametri tecnico-operativi (velocità di avanzamento, pressione degli pneumatici, adeguatezza dei sedili), dai dati delle accelerazioni relativi alle routine complete sono stati estrapolati quelli riguardanti le sole passate in campo (figura 1, parte in basso), escludendo quindi gli eventi anomali che spesso caratterizzano le svolte in capezzagna.

Considerando la medesima velocità di avanzamento dei tre trattori (7-8 km/h), il vettore somma delle accelerazioni durante l'aratura è nettamente più elevato di quello riscontrato durante l'erpicazione nel caso del trattore Fiat (1,40 contro 0,72 m/s^2), leggermente più elevato nel caso del trattore Same (0,84 contro 0,64 m/s^2), analogo nel caso del trattore Deutz Fahr (0,78 contro 0,77 m/s^2). L'aratura può quindi determinare maggiori sollecitazioni rispetto all'erpicazione.

Nel caso dell'aratura, il mezzo peggiore è il trattore Fiat, quello migliore il trattore Deutz Fahr, come atteso considerando il contenuto tecnologico dei tre trattori. Invece, diversamente da quanto previsto, nel caso dell'erpicazione il mezzo peggiore è il trattore Deutz Fahr, quello migliore il trattore Same. Anche per Scarlett et al. [20,22] le graduatorie dei mezzi ottenute sperimentalmente non sono sempre univoche.

Considerando come velocità di riferimento quella più elevata, nel trattore Fiat riducendosi la velocità dell'aratura al 54% e dell'erpicazione al 45%, il vettore somma si riduce, rispettivamente, al 69 e al 68%.

Nel trattore Same, riducendosi la velocità dell'aratura all'80%, il vettore somma si incrementa al 110%; riducendosi la velocità dell'erpicazione all'86%, il vettore somma si riduce al 95%.

Nel trattore Deutz Fahr, riducendosi la velocità dell'aratura al 67% e dell'erpicazione al 70%, il vettore somma si riduce, rispettivamente, all'80 e al 79%.

Generalmente, quindi, a un decremento della velocità corrisponde una riduzione delle vibrazioni. Ad analoghi risultati sulla pista a risalti definita dalla norma ISO 5008 [28] giungono Scarlett et al. [20,22] e Deboli et al. [23]. Ad analoghe conclusioni pervengono inoltre Cuong et al. [29] su un terreno destinato a risaia.

In precedenza si è sempre fatto riferimento alla normale pressione di gonfiaggio degli pneumatici (200 kPa davanti, 160 kPa dietro). Tutte le prove di aratura ed erpicatura sono state svolte anche a pressioni ridotte: 160 kPa davanti e 120 kPa dietro

nel caso del trattore Fiat, 100 kPa davanti e 80 kPa dietro nel caso dei trattori Same e Deutz Fahr.

Per il trattore Fiat una riduzione della pressione al 75-80% determina durante l'aratura una riduzione del vettore somma al 79% a 3,8 km/h e all'87% a 7,0-7,1 km/h; la stessa riduzione di pressione determina durante l'erplicatura una riduzione al 96% a 3,6-3,8 km/h e un aumento al 113% a 8,0-8,2 km/h.

Per il trattore Same una riduzione della pressione al 50% determina durante l'aratura una riduzione del vettore somma all'84% a 7,4 km/h e sostanzialmente lo stesso valore a 9,2-9,7 km/h; la stessa riduzione di pressione determina durante l'erplicatura sostanzialmente lo stesso valore a 7,6-8,0 km/h e un aumento al 111% a 9,3-9,5 km/h.

Per il trattore Deutz Fahr una riduzione della pressione al 50% determina durante l'aratura una riduzione del vettore somma al 94% a 6,8-7,1 km/h e all'80% a 10,0-10,2 km/h; la stessa riduzione di pressione determina durante l'erplicatura sostanzialmente lo stesso valore a 7,1-8,0 km/h e una riduzione al 66% a 8,8-10,1 km/h.

Si può affermare quindi che durante l'aratura, a una riduzione della pressione di gonfiaggio degli pneumatici si associa un decremento delle vibrazioni. Un analogo decremento delle vibrazioni è evidenziato da Deboli et al. [23] sulla pista a risalti definita dalla ISO 5008 [28] considerando quattro tipi di pneumatici, tre valori di pressione e una velocità, nonché da Cuong et al. [29] su un terreno destinato a risaia esaminando un tipo di pneumatico, cinque valori di pressione e tre velocità.

In precedenza si è sempre fatto riferimento alle vibrazioni sul piano del sedile. Le misure sono state eseguite contemporaneamente anche sul basamento del sedile. Considerando le passate in campo di aratura ed erpicatura alle due velocità e a pressione di gonfiaggio degli pneumatici normale, i rapporti medi tra le accelerazioni rms ponderate in frequenza rilevate sopra e sotto il sedile sono:

- trattore Fiat, $1,19 \pm 0,05$ (asse x), $1,75 \pm 0,17$ (asse y), $1,23 \pm 0,18$ (asse z);
- trattore Same, $1,25 \pm 0,19$ (asse x), $1,35 \pm 0,09$ (asse y), $1,08 \pm 0,22$ (asse z);
- trattore Deutz Fahr, $1,49 \pm 0,15$ (asse x), $1,51 \pm 0,07$ (asse y), $1,11 \pm 0,15$ (asse z).

Dai rapporti relativi agli assi orizzontali emerge quindi che le vibrazioni sul piano del sedile sono sempre significativamente maggiori rispetto a quelle rilevate sul basamento. Di fatto, le sospensioni dei sedili dei tre trattori non operano sugli assi longitudinale e trasversale. L'incremento può essere determinato dalla maggiore distanza del piano del sedile dall'origine delle vibrazioni, rispetto al basamento (con conseguenti maggiori oscillazioni). A questo proposito Gomez-Gil et al. [30] studiano l'altezza del sedile rispetto al terreno: osservano che all'aumentare dell'altezza si elevano nettamente le vibrazioni trasversali, mentre quelle verticali rimangono sostanzialmente costanti. Secondo gli autori solo pochi modelli di sedili sono dotati di sospensioni operative sugli assi orizzontali; viene quindi proposto di diminuire l'entità delle vibrazioni riducendo la pressione degli pneumatici.

Per quanto riguarda l'asse verticale, anche se in alcuni casi (2 su 8 nel caso del trattore Fiat, 4 su 8 nel caso del trattore Same, 2 su 8 nel caso del trattore Deutz Fahr) si assiste ad una riduzione delle vibrazioni, i rapporti medi depongono a favore di una relativa amplificazione determinata dal sedile.

A risultati simili circa l'incremento delle vibrazioni prodotto dai sedili giungono Scarlett et al. [20,22] e Deboli et al. [24].

Trasferimento su strada sterrata

Nella figura 2 sono riportati i valori medi aritmetici delle accelerazioni rms ponderate in frequenza relative al piano del sedile, riscontrate su strada sterrata a

normale pressione di gonfiaggio degli pneumatici; si osservi che i valori sull'asse delle ordinate sono diversi rispetto a quelli della figura 1.

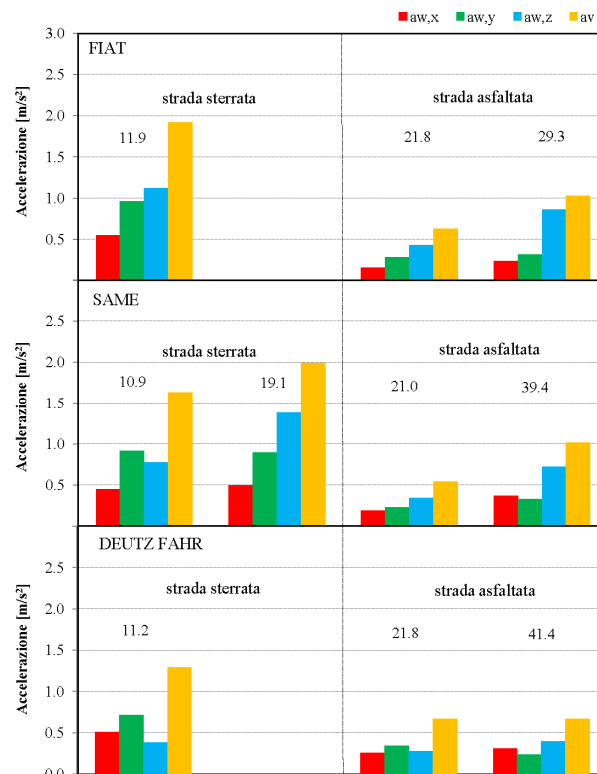


Figura 2 - Valori medi delle accelerazioni rms ponderate in frequenza rilevate sul piano del sedile durante il trasferimento su strada con normale pressione di gonfiaggio degli pneumatici (anteriori 200 kPa, posteriori 160 kPa). Sopra gli istogrammi è riportata la velocità in km/h (costante sia nel caso della strada sterrata che della strada asfaltata) - Mean values of the frequency weighted rms accelerations measured on the seat cushion when driving on the road, using a regular tyre inflation pressure (foreward 200 kPa, rear 160 kPa). Speed (km/h) is shown above the histograms.

Considerando la medesima velocità dei tre trattori (11-12 km/h) e i vettori somma, come atteso il mezzo peggiore è risultato il trattore Fiat, quello migliore il trattore Deutz Fahr. Nel caso del trattore Same, esaminato a due velocità di avanzamento, riducendosi la velocità al 57%, il vettore somma si riduce all'82%.

I rapporti medi tra le accelerazioni rilevate sopra e sotto il sedile a 11-12 km/h sono:
 - trattore Fiat, $2,28 \pm 0,29$ (asse x), $1,63 \pm 0,06$ (asse y), $1,14 \pm 0,18$ (asse z);
 - trattore Same, $1,31 \pm 0,19$ (asse x), $1,37 \pm 0,06$ (asse y), $0,83 \pm 0,06$ (asse z);
 - trattore Deutz Fahr, $2,76 \pm 0,26$ (asse x), $1,35 \pm 0,06$ (asse y), $0,95 \pm 0,10$ (asse z).

Dai rapporti relativi agli assi orizzontali emerge quindi che le vibrazioni sul piano del sedile sono sempre significativamente maggiori rispetto a quelle sul basamento. Sull'asse verticale il sedile dei trattori Same e Deutz Fahr attenua le vibrazioni.

Trasferimento su strada asfaltata

Nella figura 2 sono riportati anche i valori medi riscontrati su strada asfaltata a

normale pressione di gonfiaggio degli pneumatici.

Rispetto alle vibrazioni su strada sterrata, quelle su strada asfaltata sono molto più contenute, come già evidenziato da Scarlett et al. [20,22].

Considerando la medesima velocità dei tre trattori (21-22 km/h) e i vettori somma, diversamente da quanto atteso il mezzo peggiore è il trattore Deutz Fahr, quello migliore il trattore Same.

I tre trattori sono stati esaminati a due velocità di avanzamento. Facendo riferimento, nell'ordine, ai trattori Fiat, Same e Deutz Fahr, riducendosi rispettivamente la velocità al 74, 53, 53%, il vettore somma si riduce rispettivamente al 61, 54, 99%. Da osservare che per Servadio e Belfiore [31] a un decremento di velocità su un percorso asfaltato non corrisponde sempre una riduzione delle vibrazioni.

I rapporti medi tra le accelerazioni rilevate sopra e sotto il sedile a 21-22 km/h sono:

- trattore Fiat, $2,09 \pm 0,23$ (asse x), $1,49 \pm 0,02$ (asse y), $1,12 \pm 0,06$ (asse z);
- trattore Same, $1,73 \pm 0,19$ (asse x), $1,26 \pm 0,07$ (asse y), $1,05 \pm 0,03$ (asse z);
- trattore Deutz Fahr, $2,50 \pm 0,19$ (asse x), $1,36 \pm 0,03$ (asse y), $1,09 \pm 0,19$ (asse z).

Dai rapporti relativi agli assi orizzontali emerge quindi che le vibrazioni sul piano del sedile sono sempre significativamente maggiori rispetto a quelle sul basamento. Sull'asse verticale il sedile amplifica leggermente le vibrazioni.

Sul trattore Deutz Fahr le prove hanno riguardato anche altre due velocità di avanzamento. Nella figura 3 sono riportate le rette di regressione relative alla velocità di avanzamento e all'accelerazione verticale ponderata in frequenza. La relazione tra velocità e accelerazione verticale è netta, sia sul piano del sedile ($R^2 = 0,96$), sia sul basamento ($R^2 = 0,93$). Il sedile amplifica sempre le vibrazioni.

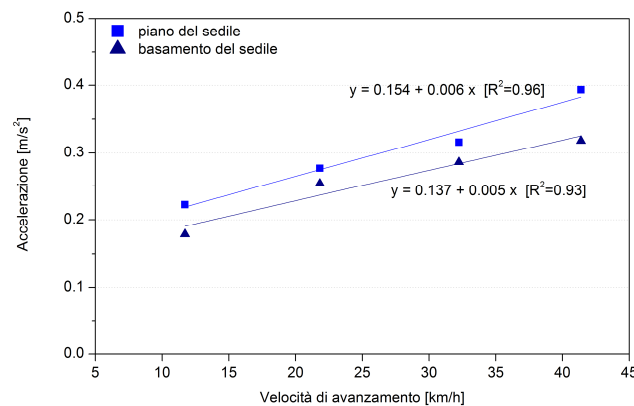


Figura 3 - Rette di regressione relative alle accelerazioni rms ponderate in frequenza verticali rilevate su strada asfaltata e riguardanti il trattore Deutz Fahr con normale pressione di gonfiaggio degli pneumatici (anteriori 200 kPa, posteriori 160 kPa) – Regression lines of the vertical frequency weighted rms accelerations measured on the paved road and related to the Deutz Fahr tractor with normal tyre inflation pressure (foreward 200 kPa, rear 160 kPa).

6. Conclusioni

Dai dati di letteratura emerge che le vibrazioni sui trattori in normali condizioni di lavoro possono costituire un rilevante fattore di rischio per la salute degli operatori. L'entità delle vibrazioni varia molto a seconda delle condizioni di lavoro e delle

caratteristiche del mezzo.

Anche se i risultati della nostra ricerca sperimentale vanno intesi come preliminari (non sono stati ancora sottoposti a elaborazione statistica e a valutazioni circa le caratteristiche in frequenza delle accelerazioni), si può concludere che:

- a) durante le lavorazioni complete di aratura ed erpicatura le esposizioni alle vibrazioni (A(8)) risultano pari al valore di azione ($0,5 \text{ m/s}^2$) per una durata di impiego dei trattori compresa tra 2,5 e 5,7 ore giornaliere: viene quindi confermato che le vibrazioni costituiscono un rischio per gli operatori. Tale rischio è aggravato dall'impulsività delle accelerazioni in corrispondenza delle svolte in capezzagna durante l'erpicazione con il trattore più obsoleto. Le vibrazioni orizzontali sono predominanti;
- b) qualora il trattore sia sprovvisto di cabina insonorizzata, i livelli sonori (92,2-93,5 dB(A)) sono tali da rendere i livelli di esposizione (Lex,8h) pari al valore superiore di azione (85 dB(A)) per una durata di esposizione di 68-91 minuti al giorno: il rumore costituisce quindi un rischio per gli operatori;
- c) facendo riferimento alle sole passate, le vibrazioni durante l'aratura possono essere analoghe o più elevate di quelle durante l'erpicazione;
- d) il trasferimento su strada asfaltata genera vibrazioni molto più basse rispetto al trasferimento su strada sterrata;
- e) sulla base del livello di progresso tecnico dei tre trattori e dell'efficacia dei presidi installati per ridurre le vibrazioni, la graduatoria è quella attesa durante le passate di aratura e il trasferimento su strada sterrata; non è invece quella prevista nel caso dell'erpicazione e del trasferimento su strada asfaltata;
- f) generalmente il decremento della velocità comporta la diminuzione delle vibrazioni;
- g) durante l'aratura, la riduzione della pressione di gonfiaggio degli pneumatici produce la riduzione delle vibrazioni;
- h) le vibrazioni sul piano del sedile sono sempre significativamente maggiori rispetto a quelle sul basamento nel caso degli assi orizzontali. Sull'asse verticale il sedile può amplificare o ridurre le vibrazioni.

Conclusions

Many data from the literature stress the health risk caused by vibrations for drivers of agricultural tractors. Their magnitude is widely variable, depending on the operating conditions and the technical characteristics of the tractor.

Although the results of this experimental research have to be considered as preliminary (the statistics and the frequency spectra have not been studied yet), it can be concluded that:

- a) the entire routines of ploughing and harrowing showed vibration exposures (A(8)) equal to the action value (0.5 m/s^2) for a duration ranging from 2.5 and 5.7 hours/day, so confirming that vibrations are dangerous for tractor drivers. This risk becomes heavier because of the impulsiveness of the acceleration produced in the turning on the headlands with the oldest tractor combined with the harrow. The horizontal vibrations are predominant;
- b) if the tractor is not equipped with a soundproofed cab, the noise levels (92.2-93.5 dB (A)) are such that exposure (Lex,8h) reaches the action value of 85 dB(A) for a working duration of 68 to 91 minutes/day; also the noise is therefore to be considered a risk for the operators;
- c) considering only the straight path of the field, the vibration levels during ploughing may be similar or higher than those measured during harrowing;

- d) driving on a paved road generates vibrations much lower than driving on a farm road;
- e) considering the level of the technical progress of the three tractors examined and the effectiveness of the installed devices devoted to the vibration reduction, the ranking is equal to that expected for ploughing on the field's straight path and driving on the farm road, but not for harrowing and driving on the paved road;
- f) generally, a speed decrease results in a lower level of vibrations;
- g) during ploughing, the tyres inflation pressure reduction leads to lower vibrations level;
- h) considering the horizontal axes, the vibrations on the seat cushion are in all the cases significantly higher than those recorded at the base of the seat suspension. On the vertical axis, the seat suspension can amplify or reduce vibration.

Bibliografia

- [1] Agostini M. (2013), Trattori, immatricolazioni crollate ai minimi storici, *Il sole* 24 ore. 19 gennaio.
- [2] Federazione Nazionale Costruttori Macchine per l'Agricoltura – FederUnacoma (2014), Immatricolazioni macchine agricole.
- [3] SIMLII (2013), Linee guida sulla sorveglianza sanitaria in agricoltura.
- [4] Boshuizen H.C., Bongers P.M., Hulshof C.T.J. (1990), Self-reported back pain in tractor drivers exposed to whole-body vibration, *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 62, 109-115.
- [5] Bovenzi M., Betta A. (1994), Low-back disorders in agricultural tractors drivers exposed to whole-body vibration and postural stress, *Appl. Ergon.* 25 (4), 231-241.
- [6] Toren A., Oberg K., Lembke B., Enlund K., Rask-Andersen A. (2002), Tractor-driving hour and their relation to self-reported low-back and hip symptoms, *Appl. Ergon.*, 33, 139-146.
- [7] Walker-Bone K., Palmer K.T. (2002), Musculoskeletal disorders in farmers and farm workers, *Occup. Med.*, 52 (8), 441-450.
- [8] Solecki L. (2010), Assessment of annual exposure of private farmers to whole body mechanical vibration on selected family farms of plant production profile, *Ann. Agric. Environ. Med.*, 17, 243-250.
- [9] Solecki L. (2011), Low back pain among farmers exposed to whole body vibration: a literature review, *Med. Pr.*, 62 (2), 187-202.
- [10] Morgan L.J., Mansfield N.J. (2014), A survey of expert opinion on the effects of occupational exposures to trunk rotation and whole-body vibration. *Ergonomics*, 57 (4), 563-574.
- [11] Muzammil M., Siddiqui S.S., Hasan F. (2004), Physiological effect of vibrations on tractor drivers under variable ploughing conditions, *J. Occup. Health*, 46, 403-409.
- [12] Morgan L.J., Mansfield N.J. (2009), Muscular fatigue and subjective discomfort when exposed to trunk rotation and whole body vibration, 4th Int. Conf. Whole Body Injuries, Montreal.
- [13] Raffler N., Hermanns I., Rissler J., Ellegast R., Sayn D., Goeres B., Fischer S. (2009), Assessing combined exposures of whole body vibration and awkward posture, 4th Int. Conf. Whole Body Injuries, Montreal.
- [14] Raffler N., Hermanns I., Sayn D., Gores B., Ellegast R., Rissler J. (2010), Assessing combined exposures of whole body vibration and awkward posture – further results from application of a simultaneous field measurement

- methodology, *Ind. Heath*, 48, 638-644.
- [15] Magnusson M.L., Pope M.H. (1998), A review of the biomechanics and epidemiology of working postures, *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 215 (4), 965-976.
- [16] Mehta C.R., Tewari V.K. (2015), Biomechanical model to predict loads on lumbar vertebra of tractor operator. *Int. Journal of Ind. Med.*, 47, 104-116.
- [17] Gyi D.E., Porter J.M. (1999), Interface pressure and the prediction of car seat discomfort. *Applied Ergonom.*, 30, 99-107.
- [18] Solecki L. (2007), Preliminary recognition of whole body vibration risk in private farmers' working environment, *Ann. Agric. Environ. Med.*, 14, 299-304.
- [19] Peretti A., Delvecchio S., Bonomini F., Pasqua di Bisceglie A., Colosio C. (2013), Vibrazioni sui trattori agricoli, *G. Ital. Med. Lav. Erg.* 35 (4), 297-302.
- [20] Scarlett A.J., Price J.S., Semple D.A., Stayner R.M. (2005), Whole body vibration on agricultural vehicles: evaluation of emission and estimated exposure levels, Health & Safety Executive, Research Report 321.
- [21] Solecki L. (2012), Studies of farmers' annual exposure to whole body vibration on selected family farms of mixed production profile, *Ann. Agric. Environ. Med.*, 19 (2), 247-253.
- [22] Scarlett A.J., Price J.S., Stayner R.M. (2007), Whole body vibration: evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors, *J. Terramechanics*, 44, 65-73.
- [23] Deboli R., Calvo A., Preti C., Paletto G. (2008), Whole Body Vibration transmitted to the operator by tractors equipped with radial tires. *Int. Conf. SHWA, Safety Health and Welfare in Agriculture and in Agro-food Systems*, Ragusa.
- [24] Deboli R., Calvo A., Preti C. (2012), Transmissibility of agricultural tractors seats. *Int. Conf. SHWA, Safety Health and Welfare in Agriculture and in Agro-food Systems*, Ragusa, 368-374.
- [25] Servadio P., Marsili A., Belfiore N.P. (2007), Analysis of driving seat vibrations in high forward speed tractors. *Biosystems Eng.*, 97, 171-180.
- [26] ISO 10326-1:1992. Mechanical vibration - Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration - Part 1: Basic requirements.
- [27] ISO 2631-1:1997. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements.
- [28] ISO 5008:2002. Agricultural wheeled tractors and field machinery - Measurement of whole-body vibration of the operator.
- [29] Cuong D.M., Zhu S., Zhu Y. (2013), Effects of tyre inflation pressure and forward speed on vibration of an unsuspended tractor. *J. Terramechanics*, 50, 185-198.
- [30] Gomez-Gil J., Gomez-Gil F.J., Martin-de-Leon R. (2014), The Influence of Tractor-Seat Height above the Ground on Lateral Vibrations. *Sensors*, 14, 19713-19730.
- [31] Servadio P., Belfiore N.P. (2013), Influence of tyres characteristics and travelling speed on ride vibrations of a modern medium powered tractor Part I: Analysis of the driving seat vibration. *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, 15 (4), 119-131.