

INDAGINE PER LA DETERMINAZIONE DEI LIVELLI DI ESPOSIZIONE A VIBRAZIONE MANO-BRACCIO E A CORPO INTERO PER ALCUNE ATTREZZATURE MECCANICHE.

Danilo Monarca, Massimo Cecchini, Andrea Colantoni ⁽¹⁾, Gennaro Vassalini⁽²⁾, Eleonora Ragno⁽³⁾

⁽¹⁾ Università degli Studi della Tuscia – Facoltà di Agraria – Dipartimento Gemini, Viterbo

⁽²⁾ CRA-ING – Monterotondo (RM)

⁽³⁾ Consiglio Nazionale delle Ricerche – Servizio di Prevenzione e Protezione, Roma

1 - PREMESSA

Le vibrazioni sono oscillazioni meccaniche generate da onde di pressione che si trasmettono attraverso corpi solidi; in particolare si dice che un punto vibra quando descrive un movimento oscillante intorno ad una posizione di riferimento.

Da un punto di vista fisico esse possono essere differenziate in funzione della frequenza, della lunghezza d'onda, dell'ampiezza, della velocità e dell'accelerazione. In particolare quest'ultimo parametro risulta il più importante per la valutazione della risposta corporea: l'uomo, infatti, avverte più la variazione di uno stimolo che il suo perdurare. Il corpo umano, inoltre, presenta la massima sensibilità all'interno di un determinato intervallo di frequenza; allontanandosi dagli estremi di questo intervallo la sensibilità via via si riduce.

Le vibrazioni possono essere trasmesse attraverso le macchine o le superfici con cui l'uomo viene a contatto. A seconda delle parti del corpo coinvolte, possono essere distinte in vibrazioni trasmesse al corpo intero o al sistema mano-braccio.

L'esposizione a vibrazioni sull'intero corpo (*Whole Body Vibration*) ed al sistema mano-braccio (*Hand-Arm Vibration*), costituiscono fattori di rischio non trascurabili per i lavoratori operanti nel settore della meccanizzazione agricola, civile e industriale.

La casistica delle malattie professionali comprende una serie di patologie prodotte dalle vibrazioni meccaniche trasmesse alle mani da macchine e attrezzi azionati a mano o trasmesse all'intero corpo dall'utilizzo delle stesse.

Tantissimi sono i lavoratori esposti a questo fattore di rischio, che comporta tecnopatie più diffuse in tutti i Paesi occidentali a tecnologia avanzata.

Nel presente lavoro viene presentata una indagine riguardante la trasmissione delle vibrazioni da attrezzature manuali e macchine per il movimento terra all'operatore. Le condizioni dei rilievi sono state le più possibili ordinarie e rappresentative sia per quanto riguarda le condizioni di utilizzo (numero di giri del motore, tipologia di lavorazione ecc.) che per il tempo di campionamento.

Il Decreto legislativo n. 81 del 9 aprile 2008 definisce al Titolo VIII Agenti fisici, art. 200:

le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio: le vibrazioni meccaniche che, se trasmesse al sistema mano-braccio nell'uomo, comportano un rischio per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare disturbi vascolari, osteoarticolari, neurologici o muscolari [1].

per le vibrazioni trasmesse al corpo intero: le vibrazioni meccaniche che, se trasmesse al corpo intero, comportano rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare lombalgie e traumi del rachide.

La recente normativa, nello specifico l'articolo 201 del Decreto legislativo 81/2008 detta i valori limiti di esposizione e valori di azione. Per le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio detti valori sono [1]:

a) il valore limite di esposizione giornaliero, normalizzato a un periodo di riferimento di 8 ore, è fissato a 5 m/s^2 ; mentre su periodi brevi è pari a 20 m/s^2 ;

b) il valore d'azione giornaliero, normalizzato a un periodo di riferimento di 8 ore, che fa scattare l'azione, è fissato a $2,5 \text{ m/s}^2$.

Per le vibrazioni trasmesse al corpo intero:

a) il valore limite di esposizione giornaliero, normalizzato a un periodo di riferimento di 8 ore, è fissato a $1,0 \text{ m/s}^2$; mentre su periodi brevi è pari a $1,5 \text{ m/s}^2$;

b) il valore d'azione giornaliero, normalizzato a un periodo di riferimento di 8 ore, è fissato a $0,5 \text{ m/s}^2$.

L'indagine effettuata, ha permesso di valutare per ciascuna macchina ed attrezzatura considerata, le emissioni di vibrazioni, valutate secondo le procedure imposte dalle normative tecniche internazionali di riferimento.

2 - MATERIALI E METODI

2.1 - STRUMENTAZIONI

La strumentazione utilizzata (Figura 1) per l'effettuazione dei test è la seguente: sistema di acquisizione ed elaborazione dati Brüel & Kjær 'Pulse', serie n. 2324927; 3 accelerometri miniaturizzati (B&K 4374) montati su di uno specifico adattatore per la mano; accelerometro triassiale da sedile Brüel & Kjær, tipo 4322 serie n. 2261778; calibratore per accelerometri Brüel & Kjær tipo 4294.

Prima di effettuare le misure è stata effettuata la calibratura della strumentazione tramite generatori di vibrazione sinusoidale: nel caso specifico è stato utilizzato un calibratore eccitatore Brüel & Kjær modello 4294 in grado di fornire una accelerazione di picco nota ($10 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$) ad una data frequenza (159,2 Hz). Durante ciascuna serie di misurazioni, il calibratore eccitatore è stato applicato all'accelerometro per verificare la calibrazione dell'intero sistema di misurazione su tutti e tre gli assi (x, y e z) dell'accelerometro.

La metodologia di rilevazione è stata eseguita seguendo le norme UNI EN ISO 5349-1:2004 "Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 1: Requisiti generali" e UNI EN ISO 5349-2:2004 "Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 2: Guida pratica per la misurazione al posto di lavoro", poiché attualmente non esistono norme specifiche per questa tipologia di attrezzatura [2-3].



Figura 1: Catena strumentale utilizzata per le prove

Gli accelerometri sono stati serrati a un supporto di montaggio leggero. Il supporto è stato fissato alle superfici vibranti mediante fascette monouso ben serrate.

I valori ottenuti dalla catena di misura delle vibrazioni sono stati ponderati, utilizzando il filtro di ponderazione richiesto dalla normativa stessa.

Particolare attenzione è stata posta durante le operazioni di fissaggio degli accelerometri sulle impugnature, per rispettare le direzioni imposte dalla normativa.

Le diverse direzioni di misura e le posizioni degli accelerometri sono indicate nella figura successiva, il centro di gravità degli accelerometri deve essere posizionato ad una distanza minima di 20 mm dal contorno definito da una sezione trasversale secondo le direzioni z e y per l'impugnatura posteriore e le direzioni z e x per l'impugnatura anteriore [4].

2.2 - MACCHINE

Le macchine oggetto dell'indagine sono macchine utilizzate nel settore stradale:

- a) caricatore frontale compatto utilizzato per la movimentazione di inerti;
- b) terna gommata con pala caricatrice frontale e escavatore a cucchiaio posteriore;
- c) tagliasfalto a disco;

d) martello demolitore con motocompressore carrellato.

Per le prime due sono state effettuate valutazioni di vibrazioni al corpo intero, mentre per le restanti, come vibrazioni al sistema mano-braccio, in quanto attrezzature di tipo manuale.

2.2 - MISURAZIONI DEL LIVELLO DI ESPOSIZIONE A CORPO INTERO

Il livello di accelerazione che il mezzo trasmette al lavoratore, è stato determinato con specifiche misure svolte nelle reali condizioni operative. Le misure sono state eseguite con uno strumento conforme alla ISO 2631-1 e dotato di accelerometro triassiale.

Per lo svolgimento delle misure, quando il conducente operava seduto, l'accelerometro è stato posizionato fra il sedile e l'operatore impiegando l'apposito disco adattatore in gomma. Il tratto di cavo che collega l'accelerometro allo strumento è stato fissato alla macchina tramite nastro adesivo per evitare interferenze triboelettriche dovute alle oscillazioni.

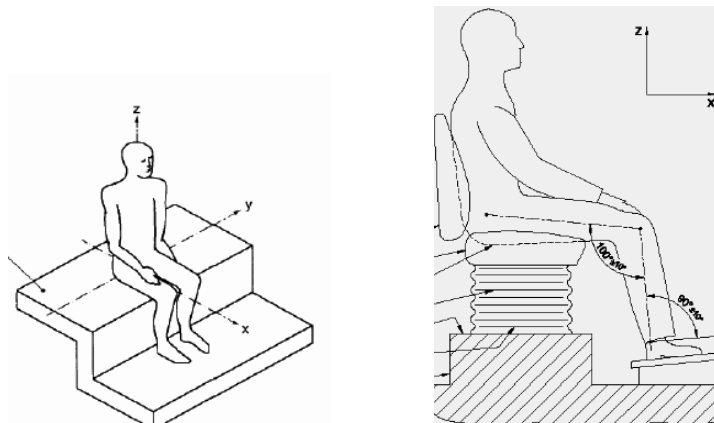


Figura 2: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero [2]

Per il calcolo dell' $A(8)$ per il corpo intero si è considerato l'accelerazione continua equivalente su 8 ore, calcolata come il più alto dei valori quadratici medi delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali ($1,4 \cdot a_{wx}$, $1,4 \cdot a_{wy}$, $1 \cdot a_{wz}$, per un lavoratore seduto o in piedi), conformemente alla norma ISO 2631-1 (1997). Le vibrazioni sono state rilevate posizionando l'accelerometro sul sedile di guida orientando gli assi come segue:

- asse X (dorso - petto);
- asse Y (lato destro - lato sinistro);
- asse Z (bacino - testa).

I valori di a_x , a_y e a_z , sono rilevati simultaneamente, calcolati nella gamma di frequenza compresa tra 1Hz e 80Hz, ponderati secondo il filtro di ponderazione riportato nella norma e composti vettorialmente a_{sum} con la seguente formula:

$$a_{sum} = [(1,4a_x)^2 + (1,4a_y)^2 + a_z^2]^{1/2}$$

I tempi di esposizione degli addetti alle sorgenti di vibrazioni sono stati determinati tramite interviste e tramite misure dirette. Le misure memorizzate dallo strumento sono state trasferite al personal computer per l'analisi.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata con un software specifico fornito a corredo dello strumento e con un foglio di calcolo appositamente strutturato per automatizzare i calcoli ripetitivi.

Nella Figura 2 si evidenziano gli assi di riferimento per i rilevamenti dell'esposizione a vibrazioni per il corpo intero.

2.3 - MISURAZIONI DEL LIVELLO DI ESPOSIZIONE MANO-BRACCIO

Anche per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori a vibrazioni mano-braccio, i rilevamenti sono stati svolti considerando i tre assi ortogonali di riferimento (Figura 3).

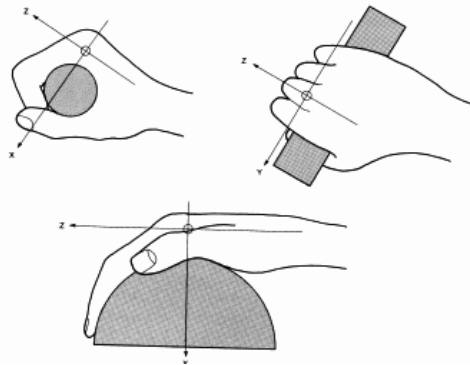


Figura 3: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero [2]

Per la valutazione del rischio si è calcolata l'esposizione giornaliera alle vibrazioni, $A(8)$, mediante la seguente formula:

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

dove:

- T è la durata giornaliera totale dell'esposizione alla vibrazione a_{hv} ;
- T_0 è la durata di riferimento di 8 h (28800 s);
- a_{hv} è il valore totale dell'accelerazione quadratica media ponderata in frequenza (somma quadratica media dei valori a_{hw} sui tre assi, misurati in m/s^2) $a_{hv} = (a_{hw_x}^2 + a_{hw_y}^2 + a_{hw_z}^2)^{1/2}$

Il supporto è stato fissato solidamente all'impugnatura dell'attrezzatura in prova tramite delle fascette in plastica.

I valori di a_x , a_y e a_z , sono rilevati simultaneamente, calcolati nella gamma di frequenza compresa tra 6,3Hz e 1250Hz, ponderati secondo il filtro di ponderazione riportato nella norma.

3 - RISULTATI

3.1 - CARICATORE FRONTALE COMPATTO

Il tempo di campionamento utilizzato per l'acquisizione delle vibrazioni del caricatore frontale compatto è stato di 360 secondi per tre ripetizioni, durante questo periodo l'operatore ha eseguito dei brevi trasferimenti, operazioni di carico della pala, trasferimento con carico, scarico della pala ripetendo più volte queste operazioni che sono rappresentative dell'attività lavorativa giornaliera della macchina in esame.

I risultati delle accelerazioni ponderate in frequenza ottenuti sono i seguenti:

Tabella 1: Valori dell'accelerazioni tri-assiali e dev. standard per il corpo intero

asse X (m/s ²)	asse Y (m/s ²)	asse Z (m/s ²)	a_{sum} (m/s ²)	σ (deviazione standard)
0,290	0,166	0,344	0,581	0,89

Nel grafico sottostante è riportata l'analisi in frequenza delle accelerazioni lineari per i singoli assi

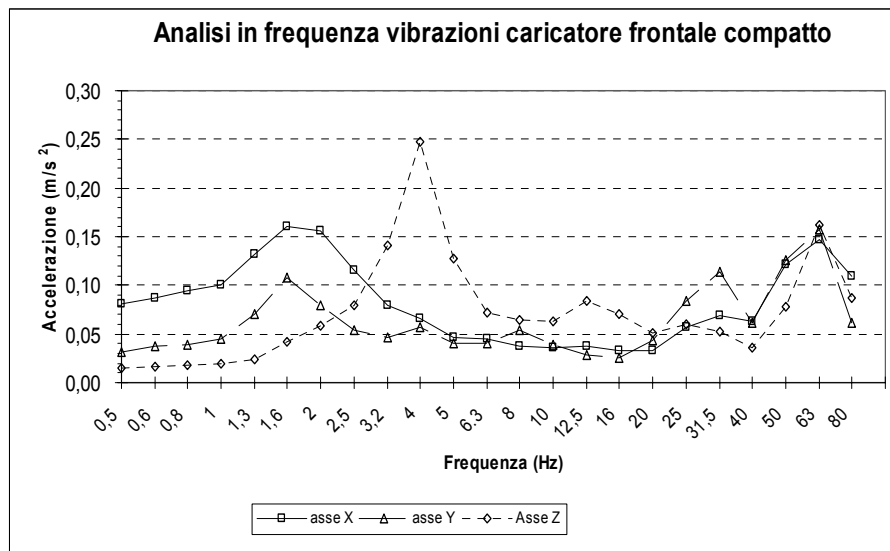


Figura 4: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero

3.2 - FAI 90 TERNA GOMMATA

Per quanto riguarda il campionamento delle vibrazioni relative alla Terna gommata dato la possibile utilizzazione in due modalità distinte sono stati eseguiti due rilievi separati. Per il primo rilievo è stato utilizzato un tempo di campionamento pari a 360 secondi per tre ripetizioni, durante tale periodo l'operatore ha eseguito alcuni trasferimenti senza carico, operazioni di carico della pala frontale, trasferimenti con carico, scarico della pala frontale ripetuti più volte.

Le operazioni eseguite durante l'acquisizione sono quelle per cui la macchina in esame viene principalmente utilizzata e di conseguenza rappresentativa per questo primo tipo di utilizzo dell'attività lavorativa della macchina.

I risultati delle accelerazioni ponderate in frequenza ottenuti sono i seguenti:

Tabella 2: Valori dell'accelerazioni tri-assiali e dev. standard per il corpo intero

asse X (m/s ²)	asse Y (m/s ²)	asse Z (m/s ²)	a _{sum} (m/s ²)	σ (deviazione standard)
0,356	0,289	0,263	0,693	0,83

Nel grafico sottostante è riportata l'analisi in frequenza delle accelerazioni lineari per i singoli assi

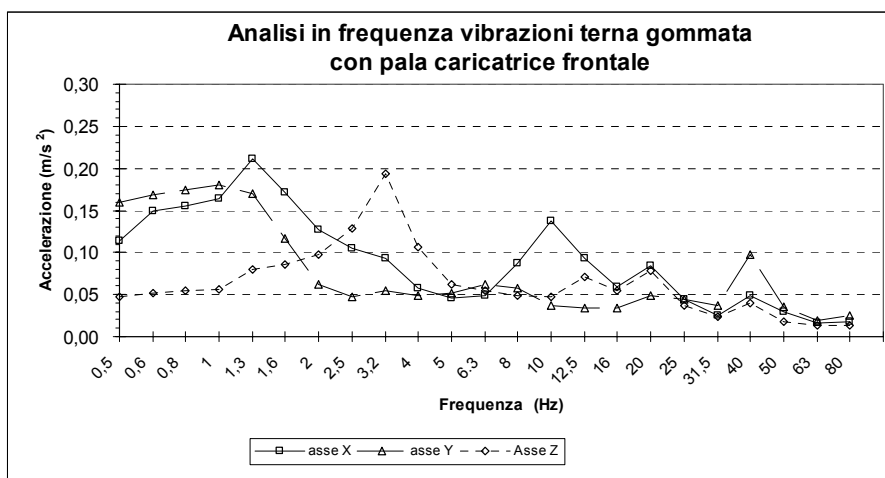


Figura 5: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero

Un secondo rilievo è stato utilizzando la macchina con l'escavatore a cucchiaio posto nella parte posteriore della macchina.

La macchina è stata posizionata nella presunta postazione di lavoro, bloccandola con l'azionamento dei piedi di appoggio nella parte posteriore e con la pala caricatrice frontale nella parte anteriore. Il tempo di acquisizione utilizzato è stato di 300 secondi per 3 ripetizioni visto che comunque il macchinario in lavorazione rimaneva in una posizione fissa. Durante il periodo di campionamento li macchinario eseguiva

le operazioni rappresentative del tipo di utilizzazione ovvero scavo con in cucchiaio, caricamento del cucchiaio, spostamento del cucchiaio scarico, scarico del cucchiaio riposizionamento dello stesso ecc.

Tabella 3: Valori dell'accelerazioni tri-assiali e dev. standard per il corpo intero

asse X (m/s ²)	asse Y (m/s ²)	asse Z (m/s ²)	a _{sum} (m/s ²)	σ (deviazione standard)
0,086	0,112	0,128	0,235	0,84

Nel grafico sottostante è riportata l'analisi in frequenza delle accelerazioni lineari per i singoli assi

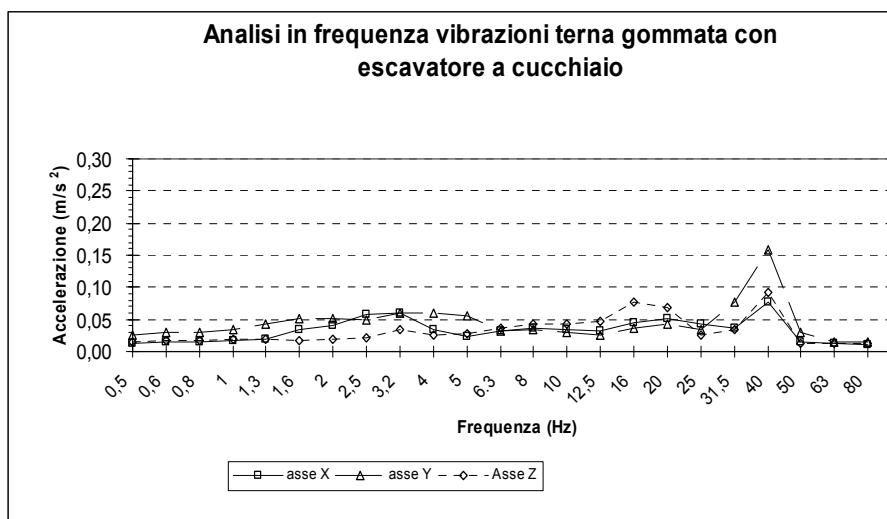


Figura 6: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero

3.3 TAGLIASFALTO

Il campionamento delle vibrazioni relative al Tagliasfalto è stato effettuato con acquisizioni distinte per le due impugnature (destra e sinistra).

I rilievi sono stati eseguiti nelle reali condizioni di utilizzo della macchina ovvero durante il taglio di una superficie di asfalto.

Il tempo di campionamento utilizzato è stato di 180 secondi.

I risultati delle accelerazioni ponderate in frequenza ottenuti sono i seguenti:

Tabella 4: Valori dell'accelerazioni tri-assiali e dev. standard per il mano-braccio

MANO DESTRA				
asse X (m/s ²)	asse Y (m/s ²)	asse Z (m/s ²)	a _{sum} (m/s ²)	σ (d.s.)
5,10	5,26	3,53	8,13	1,10

Tabella 5: Valori dell'accelerazioni tri-assiali e dev. standard per il mano-braccio

MANO SINISTRA				
asse X (m/s ²)	asse Y (m/s ²)	asse Z (m/s ²)	a _{sum} (m/s ²)	σ (d.s.)
4,93	8,77	7,53	12,57	1,07

Nei grafici è riportata l'analisi in frequenza delle accelerazioni lineari per i singoli assi riferiti rispettivamente, alla mano destra e alla mano sinistra.

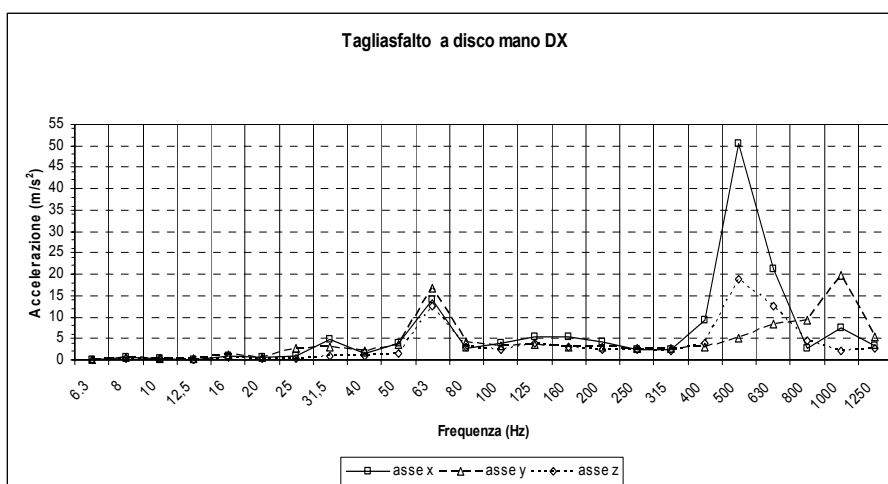


Figura 7: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero

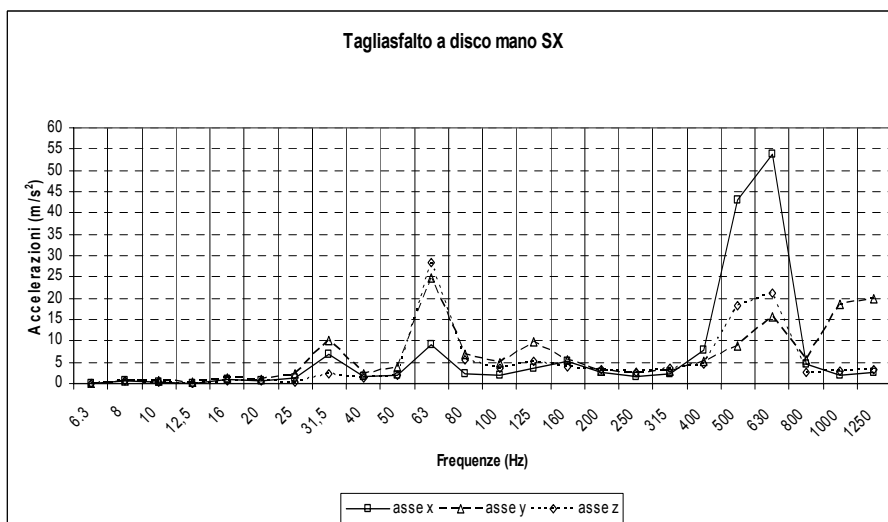


Figura 8: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero

3.4 - MARTELLO PNEUMATICO

Il campionamento delle vibrazioni relative al martello pneumatico è stato effettuato con acquisizioni distinte per le due impugnature (destra e sinistra).

I rilievi sono stati eseguiti durante l'utilizzo su roccia (una delle condizioni di peggior utilizzo).

Il tempo di campionamento utilizzato è stato di circa 180 secondi per tre ripetizioni. I risultati delle accelerazioni ponderate in frequenza ottenuti sono i seguenti:

Tabella 6: Valori dell'accelerazioni tri-assiali e dev. standard per il mano-braccio

MANO DESTRA				
asse X (m/s ²)	asse Y (m/s ²)	asse Z (m/s ²)	a _{sum} (m/s ²)	σ (d.s.)
23,30	3,30	3,74	23,53	1,05

Nel grafico sottostante è riportata l'analisi in frequenza delle accelerazioni lineari per i singoli assi

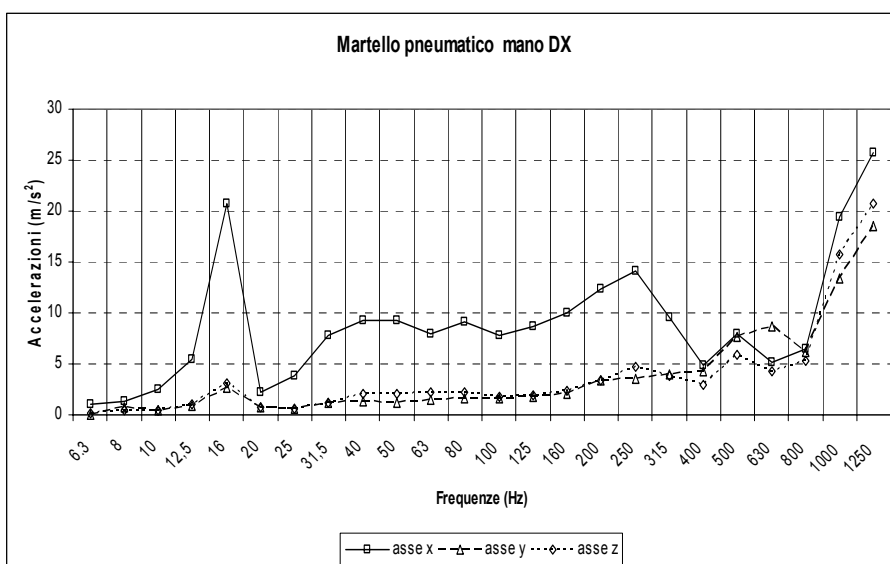


Figura 9: Modalità di rilevamento per le vibrazioni a corpo intero

Tabella 7: Valori dell'accelerazioni tri-assiali e dev. standard per il mano-braccio

MANO SINISTRA				
asse X (m/s ²)	asse Y (m/s ²)	asse Z (m/s ²)	a _{sum} (m/s ²)	σ (d.s.)
23,80	2,47	6,44	24,78	1,20

Nel grafico di pagina seguente è riportata l'analisi in frequenza delle accelerazioni lineari per i singoli assi.

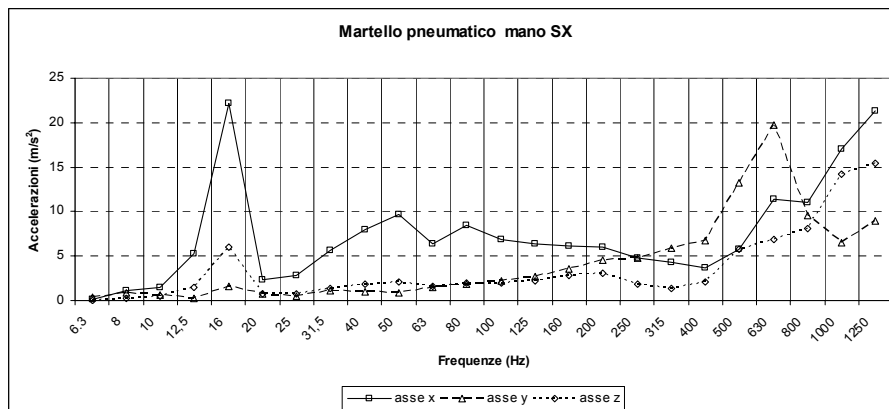


Figura 10: Modalità di rilevamento per le vibrazioni del sistema mano-braccio

4 - CONCLUSIONI

Per poter valutare correttamente il rischio da esposizione a vibrazioni è necessario:

- identificare le fasi lavorative comportanti esposizione a vibrazioni e valutare i tempi di esposizione effettiva a vibrazioni associati a ciascuna fase;
- individuare macchinari ed utensili utilizzati in ciascuna fase.

Tali informazioni possono portare all'effettuazione di stime preliminari del potenziale rischio da vibrazioni associato all'impiego dei differenti macchinari utilizzati, qualora siano disponibili dati attendibili di certificazione o di letteratura.

4.1 VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA VIBRAZIONI AL CORPO.

Al fine di prevenire il rischio di patologie della regione lombare e traumi della colonna vertebrale, nonché di disagi di natura grave è opportuno valutare l'esposizione quotidiana alle vibrazioni trasmesse al corpo intero riferita all'intera giornata lavorativa (8 ore) determinata secondo la seguente formula:

La proposta di direttiva prescrive i seguenti valori di riferimento:

AZIONE $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$, livello a partire del quale devono essere intraprese azioni di riduzione del rischio

LIMITE $A(8) = 0,7 \text{ m/s}^2$, il cui superamento deve essere vietato e prevenuto.

Tabella 8: Determinazione dell' a_{wx} per l'asse maggiormente sollecitato per il corpo intero

Macchina	Asse maggiormente sollecitato	a_{wx}
Caricatore frontale	X	0,406
Terna gommata con pala	X	0,498
Terna gommata con cucchiaio	Y	0,157

Attività considerata fonte di rischio aggravata, ed in quanto tale sottoposta ad obbligo di notifica all'autorità competente.

Il superamento del livello di azione [$A(8) = 0.5 \text{ m/s}^2$], prevede la predisposizione delle seguenti misure di tutela:

- Informazione dei lavoratori che potrebbero essere esposti a tale livello e formazione per l'applicazione di misure di tutela. In particolare la formazione dovrà essere orientata verso i seguenti contenuti:
- metodi corretti di guida al fine di ridurre le vibrazioni: necessità di evitare alte velocità in particolare su strade accidentate
- Posture di guida e corretta regolazione del sedile
- Ulteriori fattori di rischio per disturbi a carico della colonna

4.2 VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA VIBRAZIONI AL SISTEMA MANO-BRACCIO

Il rischio da esposizione a vibrazioni al sistema mano-braccio viene valutato mediante l'accelerazione equivalente ponderata in frequenza riferita ad 8 ore di lavoro, calcolata secondo la formula seguente:

$$A(8) = a_{\text{sum}} \sqrt{\frac{T_e}{8}} \quad (\text{m/s}^2)$$

I livelli di rischio previsti dalla proposta di direttiva UE sono riportati nella tabella seguente.

LIVELLO D'AZIONE $A(8) = 2,5 \text{ m/s}^2$
 VALORE LIMITE $A(8) = 5,0 \text{ m/s}^2$

Tabella 9: Determinazione dei valori limite e di azione per le attrezzature manuali

Attrezzature	Mano maggiormente sollecitata	Valori di azione (min.)	Valori limite (min.)
Tagliasfalto	SX	19	76
Martello pneumatico	SX	5	20

Dalle tabelle, si evince che per il corpo intero non vi è il superamento dei valori di azione, seppur con la terna gommata, con l'utilizzo della pala caricatrice, questi si avvicinano sensibilmente a quelli di azione previsti dal D.Lgs.vo 81/2008.

Nel caso delle attrezzature condotte a mano si ha il superamento dei valori limite che ne preclude l'utilizzo per l'intera giornata lavorativa, al fine di rientrare nei limiti, queste attrezzature non possono essere utilizzate per più di 1 ora e 16 minuti per il taglia asfalto, non più di 20 minuti per il martello pneumatico [6].

Il superamento dei valori di azione si ha con tempi di utilizzo giornalieri di 19 minuti e 5 minuti con il martello pneumatico.

Ciò comporta che sia posta in essere un'adeguata programmazione tecnica e/o di lavoro con le misure destinate a ridurre l'esposizione. Tra tali misure, prioritaria importanza rivestono:

- adeguata turnazione;

- scelta di attrezzature nuove in sostituzione di quelle obsolete, preferendo quelle con livelli di vibrazione più bassi;
- formazione ed informazione relativa non solo alle fonti di rischio ma anche al corretto utilizzo delle attrezzature.

Questo lavoro suggerisce un aspetto non sufficientemente considerato relativo ai livelli di vibrazioni trasmesse, come aspetto principale nella scelta delle macchine ed attrezzature nei vari settori.

5 - BIBLIOGRAFIA

- [1] DECRETO LEGISLATIVO 81/2008 Titolo VIII.
- [2] UNI EN ISO 5349-1:2004 Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 1: Requisiti generali.
- [3] UNI EN ISO 5349-2:2004 Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 2: Guida pratica per la misurazione al posto di lavoro.
- [4] Decreto legislativo n. 81 del 9 aprile 2008 - Titolo VIII Agenti fisici.
- [5] UNI ISO 7505 – Macchine forestali motoseghe a catena portatili . “Misura delle vibrazioni trasmesse alle mani.
- [6] Produzione documentale tecnica sulla problematica delle vibrazioni connessa all’uso delle macchine agricole – ENAMA 2005.

L'apporto degli autori al presente lavoro è da ritenersi paritario.