



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Fisica Tecnica

Scuola di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale
Indirizzo Fisica Tecnica
Ciclo XXI

EMISSIONI DI RUMORE E VIBRAZIONI AMBIENTALI
PRODOTTE DA INFRASTRUTTURE VIARIE

Analisi Sperimentale e Modelli Previsionali

Direttore della Scuola : Prof. Paolo F. Bariani
Coordinatore d'indirizzo: Prof.ssa Luisa Rossetto
Supervisore : Prof. Roberto Zecchin

Dottorando : Emiliano Boniotto

*“Un Uomo lo sa che esiste un disegno
Incontriamoci là, all'alba di un sogno ...”*

A tutti gli Zeri del Mondo

SOMMARIO

1. PREMESSA	5
2. INTRODUZIONE	6
3. LA PROPAGAZIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO VEICOLARE	8
3.1. Propagazione del rumore ed effetti delle condizioni meteo	8
3.2. Modelli teorici analitici	10
3.2. Modelli teorici numerici	13
3.3. Effetto del manto stradale sulla previsione del L_{Aeq}	17
3.4. Considerazioni	20
4. VIBRAZIONI MECCANICHE	21
4.1. Frequenza propria e smorzamento.	22
4.2. Frequenza eccitante e risonanza.	22
4.1. Meccanismo di produzione del danno da vibrazioni	23
4.2. Strumentazione e tecniche per la misura di vibrazioni	25
4.4. La propagazione delle vibrazioni attraverso il terreno e le strutture	25
4.5. Metodologia per l'analisi della sicurezza delle strutture esposte a vibrazioni	27
Stati limite ultimi	28
Stati limite di servizio	28
4.6. Livello di pericolosità delle vibrazioni trasmesse alle strutture edili	29
5. NORMATIVE ITALIANE ED INTERNAZIONALI	31
5.1. Stati limite ultimi	31
5.2. Stati limite di servizio – UNI 9916	31
5.3. DIN 4150-3:1999	35
5.4. ISO 4866:1996	37
5.5. Stati limite di servizio – UNI 9614	39
5.6. Metodiche di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo – UNI 11048	42
5.7. Metodiche di misura delle vibrazioni impulsive	43
5.8. Considerazioni sull'apparato normativo	44
6. VIBRAZIONI INDOTTE DA TRAFFICO SU GOMMA	45

6.1.	Generazione e propagazione delle vibrazioni.	47
6.2.	Propagazione delle onde di vibrazione negli edifici	51
6.3.	Attenuazione dovuta all'accoppiamento suolo fondazioni.	52
6.4.	Amplificazione dovuta alla presenza di risonanze.	52
6.5.	Trasformazione delle vibrazioni in rumore.	53
7.	DANNI PRODOTTI DALLA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI MECCANICHE	54
7.1.	Il degrado dei Beni Culturali causato dalle vibrazioni da traffico.	56
7.2.	Classificazione dei danni negli edifici	57
8.	MODELLI PREVISIONALI DELLE VIBRAZIONI DEI MEZZI DI TRASPORTO	60
8.1.	Premessa	60
8.2.	Studio di impatto da vibrazioni generate dal traffico	61
8.3.	Origine delle vibrazioni dei veicoli su strada: previsione dei carichi e delle risposte	64
8.4.	Origine delle vibrazioni dei veicoli in galleria: previsione dei carichi e delle risposte	68
8.4.1.	Origine delle vibrazioni generate dai treni in superficie: previsione dei carichi e delle risposte	69
8.4.2.	Origine delle vibrazioni generate dai treni in galleria: previsione dei carichi e delle risposte	74
8.5.	Propagazione delle vibrazioni nel terreno	76
8.5.1.	I modi di propagazione	76
8.5.2.	Propagazione nel terreno per sorgenti sotterranee	77
8.5.3.	Risposta degli edifici alle vibrazioni indotte dal traffico stradale.....	80
9.	MISURAZIONE DELLE VIBRAZIONI	86
9.1.	Sistema di rilevamento.	86
9.2.	Trasduttori attivi di accelerazione	87
9.3.	Installazione dei sistemi di monitoraggio	89
10.	SESSIONI SPERIMENTALI	92
10.1.	Risultati – prima sessione	98
11.	ANALISI DEI RISULTATI	202
12.	CONCLUSIONI	208
13.	BIBLIOGRAFIA	209
	Ringraziamenti	211

1. PREMESSA

Negli ultimi anni, il continuo aumento della domanda di trasporto su gomma e su rotaia, legato al processo di sviluppo economico e sociale del nostro Paese, ha portato ad una maggiore attenzione al fenomeno legato alla propagazione delle vibrazioni ambientali, indotte dai mezzi di trasporto, da parte della popolazione residente in prossimità delle infrastrutture sempre più ramificate ed intrecciate nel tessuto urbano.

Il fenomeno legato alla propagazione delle vibrazioni ambientali va assumendo una sempre maggiore attenzione ed importanza in virtù sia dell'aumentato numero di mezzi pesanti in circolazione sulle strade ed alla realizzazione di nuove infrastrutture ferroviarie per il trasporto veloce di merci e passeggeri, sia per la diversa tipologia strutturale delle costruzioni moderne che risultano essere più leggere e più snelle grazie all'uso intelligente dei materiali tecnologicamente innovativi e con migliori caratteristiche di resistenza meccanica.

Si evidenzia quindi che negli ultimi anni, il rumore e le vibrazioni indotte dal traffico veicolare lungo le infrastrutture di trasporto su terra e rotaia sono diventate le principali cause di impatto ambientale di cui occorre tenere opportuna considerazione sia nelle attività di gestione delle stesse strutture di trasporto ma ancor di più in sede di progettazione preliminare di nuove strutture.

Ma mentre per quanto concerne la valutazione previsionale del rumore in letteratura esiste ampia trattazione del rumore indotto dai mezzi in transito, poco o nulla si conosce in merito alle vibrazioni ambientali indotte ai recettori sensibili.

Alla prima difficoltà oggettiva legata alla metodica di indagine sperimentale della componente di vibrazione presente nel terreno, non immediata e di facile approccio, segue poi in fase previsionale la mancanza di modelli matematici sufficientemente validati oltre ad una scarsa conoscenza dei criteri di progettazione delle eventuali opere di mitigazione.

2. INTRODUZIONE

L'obiettivo della presente ricerca svolta nell'ambito del dottorato è di mettere a punto una metodologia di analisi delle vibrazioni indotte, su terreno e manufatti, dalle infrastrutture di trasporto e cercare una correlazione tra i dati misurati in diverse posizioni lato strada e lato recettori al fine di evidenziare il possibile danno provocato da sorgenti di vibrazione alle costruzioni, valutando effetti di carattere diretto, in conseguenza delle azioni dinamiche trasmesse ai manufatti dal campo di vibrazioni propagate nel sottosuolo, ed indiretto, sotto forma di dissesti causati da deformazioni permanenti del terreno.

Dall'analisi della letteratura scritta sull'argomento si evidenziano differenti approcci metodologici e soluzioni tecniche per la mitigazione dei disturbi provocati dalle vibrazioni, ma non vengono mai indicate delle metodologie di misura e calcoli preventivo al fine di prevedere il livello stimato ai recettori a causa della presenza di una infrastruttura.

Con la presente ricerca si cercherà quindi, con l'ausilio dell'analisi di dati reali, di proporre una metodologia di analisi e modellazione, che possa essere di riferimento a quanti si trovano ad affrontare simili problematiche.

Oltre a cause naturali (fenomeni sismici, vento, ecc.), le vibrazioni negli edifici possono essere causate da attività umane, quali le infrastrutture ed i mezzi di trasporto. Nei centri urbani densamente edificati il fenomeno è ancor più avvertibile e raggiunge livelli tali da costituire una fonte di disagio per i soggetti che vi risiedono.

Molti fenomeni vibratorii non rappresentano di per sé una fonte di inquinamento, ma lo possono diventare in relazione ad alcuni fattori, come il livello dell'eccitazione, la frequenza dell'oscillazione e la durata. Ciò è tanto più vero in quelle aree d'Italia dove più è ramificata, e distribuita sul territorio cittadino, la produzione industriale. Sorgono infatti, sempre più di frequente, problemi conseguenti ad un'eccessiva prossimità di impianti produttivi (cave, fonderie, manifatture, stamperie etc.), o di altre fonti di disturbo (ferrovie, strade ad alta densità di traffico, aeroporti, etc.), e le abitazioni.

Se tali situazioni, qualche decennio fa, potevano essere sintomo di ricchezza dell'area, e le abitazioni venivano intenzionalmente edificate nelle immediate vicinanze delle fabbriche, oggi, con la diffusione della ricchezza e con la ricerca del benessere, le stesse situazioni sono fonti di incompatibilità.

Tra le vibrazioni di natura antropica, si è deciso di porre l'attenzione sugli effetti legati al disturbo o al danno causati dalle vibrazioni trasmesse dai veicoli al terreno, e da questi, propagandosi fino a raggiungere gli edifici e le persone, e cioè sui fenomeni vibratorii che creano fastidio alle persone e danno alle costruzioni, soprattutto quelle storiche, ma non solo.

Le vibrazioni ambientali, possono essere causa, oltre che di disturbo per gli occupanti degli edifici, di riduzione della loro efficienza operativa e di malfunzionamento e danneggiamenti delle apparecchiature utilizzate, oltre che di pericolo per la stessa integrità strutturale o architettonica degli edifici nonché per la sicurezza degli abitanti.

Negli ultimi decenni l'intensità del traffico è aumentata su strade, autostrade e linee ferroviarie, col conseguente verificarsi ed intensificarsi del problema delle vibrazioni ambientali.

Per quanto concerne gli effetti sui manufatti, si evidenzia come i livelli di vibrazione in grado di determinare danni agli edifici, in particolare a quelli più sensibili come quelli monumentali o in pessimo stato di conservazione, sono superiori a quelli relativi alla soglia di percezione ed in seguito di disturbo per l'uomo.

Consegue quindi che, se ci si propone in sede di valutazione ambientale di una futura infrastruttura viaria ciò comporta che, qualora si salvaguardi l'impatto sulla popolazione, risulterebbe soddisfatta ogni ulteriore verifica sui manufatti. Differente è il discorso per quanto riguarda strumentazioni sensibili adoperate in particolari settori dell'industria e della ricerca. In questo caso il loro corretto funzionamento potrebbe essere minacciato da livelli di vibrazione nettamente inferiori alla soglia di percezione umana. In base alla tipologia e alle caratteristiche del ricevitore da proteggere, dalle norme vigenti si deducono i limiti di accettabilità, in termini di ampiezze di spostamento, velocità o accelerazione, della vibrazione arrecante il disturbo. Se i valori, osservati o previsti, delle componenti vibratorie sono superiori a tali limiti, occorre predisporre una opportuna tecnica di intervento, al fine di ricondurre la vibrazione a valori accettabili per il ricevitore.

Le principali cause di impatto ambientale nell'esercizio dei sistemi di trasporto terrestre stradali e ferroviari, sia superficiali che sotterranei, sono il rumore e le vibrazioni.

Nello specifico del traffico su gomma, la fonte del disturbo può essere identificata sia nei meccanismi vibrazionali propri del moto dei veicoli e legati alla trasformazione dell'energia meccanica in energia cinetica, sia dagli effetti secondari del rumore generato dal moto e dalla sua interazione con l'ambiente circostante. Tali effetti poi si propagano nell'ambiente attraverso le mutue interazioni gomma/piano di rotolamento e strada/edificio.

I due fenomeni, pur avendo un'origine comune presentano caratteristiche, modalità di propagazione ed effetti indotti sull'ambiente circostante notevolmente differenti. Il rumore è dovuto alla propagazione per via aerea di onde ad una frequenza maggiore di 20Hz. Le vibrazioni sono riconducibili, invece, alla propagazione attraverso mezzi solidi di onde ad ampio contenuto in frequenza e con un quantitativo energetico significativo per quanto riguarda quelle a bassa frequenza. Queste ultime si attenuano con la distanza molto più gradualmente delle precedenti ed hanno, pertanto, maggiore probabilità di raggiungere ricevitori situati lontano dalla linea di trasporto.

<i>Sorgenti di vibrazioni</i>	<i>Gamma di frequenza (Hz)</i>
Traffico su strada e rotaia	da 1 a 80
Esplosioni	da 1 a 300
Battitura di pali	da 1 a 100
Macchine esterne all'edificio	da 1 a 300
Macchine interne all'edificio	da 1 a 1000
Attività umane	
- interessanti indirettamente l'edificio	da 0.1 a 100
- interessanti direttamente l'edificio	da 0.1 a 12
Vento	da 01. a 10

Tabella 1: Gamme di frequenza caratteristiche per diverse sorgenti di vibrazioni (UNI 9916)

3. LA PROPAGAZIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO VEICOLARE

La propagazione del rumore prodotta dal traffico stradale è legata a diversi fenomeni diversi e molto complessi da poter analizzare in maniera univoca.

I principali parametri da cui dipendono questi fenomeni dipendono sia dalle caratteristiche fisiche dell'ambiente nel quale le onde sonore si propagano sia alle diverse condizioni esistenti sulle superfici limite dove viene studiato il problema, generalmente il suolo (es. il manto stradale oppure il terreno naturale in prossimità della carreggiata), gli ostacoli schermanti, le facciate degli edifici esistenti, etc.

Per poter avere una buona conoscenza dell'ambiente in cui si propagano le onde sonore impone di dover considerare nei modelli fisici di previsione tutti i seguenti meccanismi fisici che intervengono a diverso titolo : la divergenza geometrica, l'assorbimento molecolare dell'energia sonora nell'aria, le riflessioni del suolo e sulle facciate di eventuali edifici, le diverse diffrazioni ed, in modo particolare, gli effetti delle condizioni meteorologiche.

Questi ultimi effetti sono considerati, in generale, attraverso le variazioni dei gradienti verticali di temperatura e velocità del vento oltre alla turbolenza atmosferica.

Allo scopo di poter valutare in via previsionale con una certa precisione i livelli sonori ad elevate distanze dalle infrastrutture viarie, ed in funzione della realtà del luogo di indagine, si possono utilizzare diversi modelli teorici con diversa sofisticazione.

I metodi più complessi si basano sui metodi numerici di soluzione delle equazioni fondamentali, mentre i più semplici utilizzano dei metodi analitici nell'ambito della teoria geometrica dei raggi sonori e delle sorgenti immagine.

3.1. Propagazione del rumore ed effetti delle condizioni meteo

Da pochi anni si tende a considerare nei modelli di previsione dei livelli sonori prodotti dal traffico, non più solo degli effetti legati alle diverse tipologie di suolo e dei diversi ostacoli che venivano a fare da schermo nel percorso di propagazione, ma anche le condizioni meteorologiche, le quali giocano un ruolo molto importante e significativo sulla propagazione del rumore soprattutto quando la distanza fra la sorgente sonora ed il possibile ricettore supera una distanza di circa 100m.

L'effetto sulla propagazione legato alle condizioni meteo, aumenta con l'aumentare della distanza sorgente – ricettore e assume tanta più importanza quanto più uno dei due è ad una ridotta distanza dal suolo.

Da letteratura, si possono riscontrare casi in cui le condizioni meteorologiche hanno portato a misurare variazioni di circa 20 dB(A) a 600 m di distanza dalla sorgente. Mentre si evidenzia che per quanto concerne i livelli sonori medi su lunghi periodi di osservazione, mediamente 24 ore, queste variazioni divengono meno significative anche se non perdono di importanza.

L'effetto evidenziato dipende direttamente dalla variazione della velocità delle onde sonore in funzione dell'altezza dal suolo, definita gradiente verticale della velocità del suono ($\delta c / \delta h$). In una atmosfera omogenea, dove la velocità del suono è la stessa in tutto lo spazio, il gradiente è nullo ed i raggi sonori sono rettilinei. Nella realtà diversi effetti atmosferici (vento, soleggiamento e manto nuvoloso) producono un gradiente che induce un fenomeno di rifrazione, ovvero i raggi sonori si curvano verso il suolo (condizione per cui $\delta c / \delta h > 0$) oppure verso il cielo (condizione per cui $\delta c / \delta h < 0$).

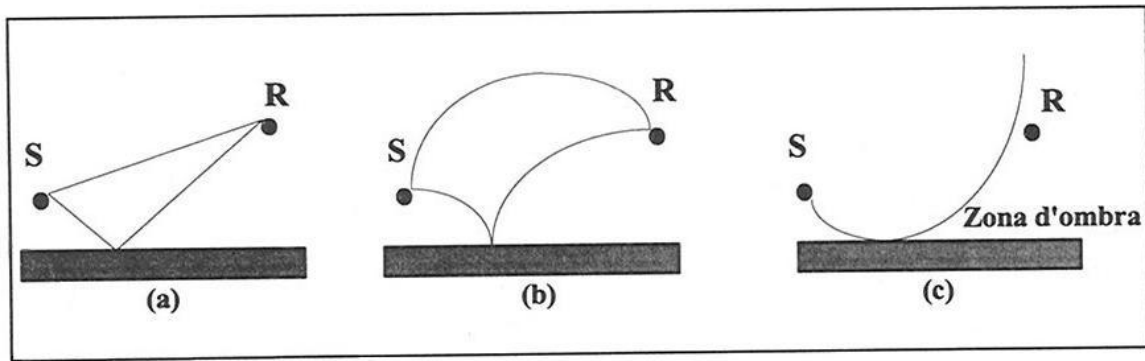


Fig. 1 : Andamento dei raggi sonori per diverse situazioni di gradiente verticale di velocità del suono. (a) : $\delta c/\delta h = 0$, (b) : $\delta c/\delta h > 0$, (c) : $\delta c/\delta h < 0$.

L'attenuazione delle onde sonore in vicinanza del suolo viene pertanto modificata, così come il livello sonoro a grande distanza dalla sorgente.

Altri due tipologie di fattori meteorologici producono degli effetti importanti : i fattori termici ed aerodinamici. Si evidenzia infatti che :

- in presenza di cielo nuvoloso in assenza di vento, si ha una condizione di gradiente verticale nullo $\delta c/\delta h = 0$, si è in una condizione di omogeneità;
- un vento a favore od una inversione termica (es. notte con cielo sereno) corrispondono ad una situazione di gradiente verticale di velocità del suono positivo $\delta c/\delta h > 0$, ovvero siamo in una situazione denominata : *"favorevole alla propagazione"*;
- un vento contrario oppure una giornata molto soleggiata senza vento, corrispondono ad una situazione di gradiente verticale di velocità del suono negativo $\delta c/\delta h < 0$, situazione denominata : *"sfavorevole alla propagazione"*.

Nella realtà dei fatti si evidenzia come, in generale, tali effetti spesso si combinano, sommando o compensando gli effetti prodotti in termini di propagazione delle onde sonore.

Si riscontra, in ogni caso, la rara possibilità di avere condizioni di propagazione in atmosfera omogenee.

Al fine di sintetizzare gli effetti delle variazioni delle condizioni atmosferiche sulla propagazione del rumore ad una certa distanza si riporta la fig.2 che grafica i risultati sperimentali ottenuti utilizzando una sorgente puntiforme che emetteva un rumore a banda larga con potenza massima nelle bande d'ottava centrate a 500 Hz e 1 kHz, posta a 6 m sopra il livello del terreno naturale, e diversi ricettori posti a varie distanza dalla sorgente (a partire da 0 m fino a 640 m) ed a 1,5 m e 6 m di altezza.

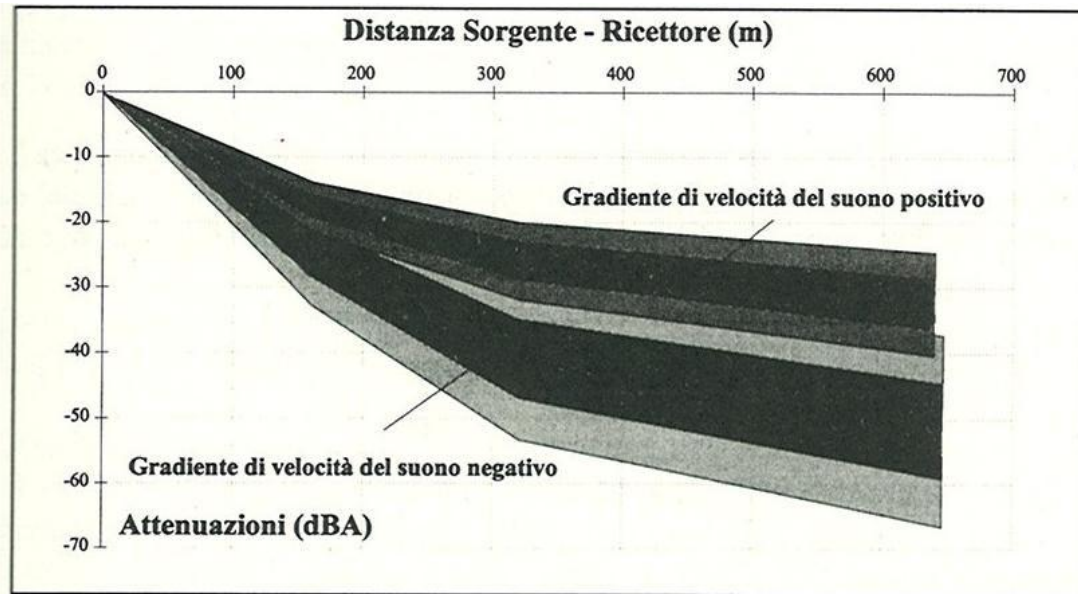


Fig. 2 : Dispersione dei livelli sonori in funzione del gradiente verticale di velocità del suono

3.2. Modelli teorici analitici

Al fine della corretta modellazione previsionale per ogni situazione di propagazione delle onde sonore (omogenea, favorevole o sfavorevole) esistono dei modelli teorici che permettono di calcolare il livello sonoro ad una determinata distanza.

Questi modelli, ampiamente discussi in letteratura, si riducono ai soli che considerano le condizioni omogenee e favorevoli se si sceglie come criterio di utilizzo quello di cautela, ovvero il modello teorico che fornisce i valori più alti.

Quando l'atmosfera è omogenea, intendendo una dipendenza temporale in $\exp(-i\omega t)$, il livello di pressione acustica prodotto da una sorgente puntiforme S è dato dall'espressione approssimata della soluzione dell'equazione di Helmholtz :

$$p = \frac{A_1}{r_1} \exp(ikr_1) + \frac{Q^* A_2}{r_2} \exp(ikr_2)$$

dove A_1 ed A_2 corrispondono alle ampiezze rispettive dell'onda diretta e dell'onda riflessa, k è il numero d'onda ($2\pi f/c$), r_1 ed r_2 sono i percorsi dei raggi sonori diretto e riflesso, rispettivamente, mentre Q è il fattore di riflessione del suolo per le onde sferiche.

$$Q = R_p + (1 - R_p)F(w)$$

dove R_p è il fattore di riflessione per onde piane, funzione dell'impedenza della superficie; il termine $(1 - R_p)F(w)$ tiene conto dei contributi delle così dette "onde di terra" e di "superficie". La funzione $F(w)$, che tiene conto dell'interazione fra i fronti d'onda curvi e la superficie di impedenza infinita, si determina con l'equazione :

$$F(w) = 1 + i\pi^{1/2} w \exp(-w^2) \operatorname{erfc}(-iw)$$

Nell'equazione, w è una variabile complessa denominata "distanza numerica", la cui espressione è diversa in funzione del tipo di reazione della superficie del suolo (locale od estesa), anche se per la maggior parte delle superficie di interesse comune, le ipotesi di reazione locale sono sufficientemente verificate.

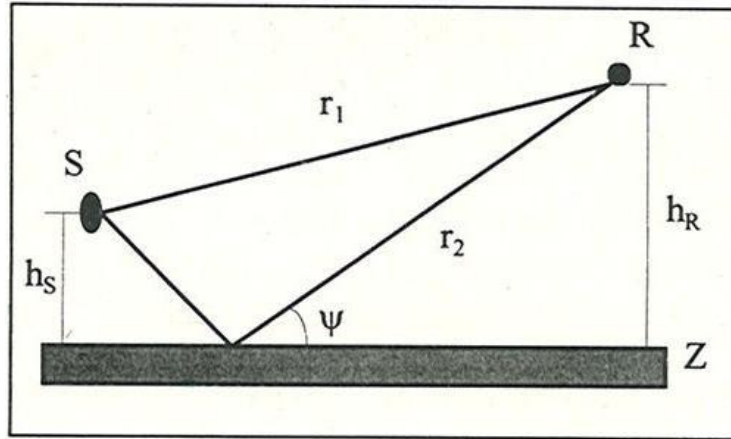


Fig. 3 : Geometria della propagazione delle onde sonore in condizioni omogenee

Per una corretta caratterizzazione del valore complesso Z dell'impedenza delle superfici a reazione locale, si può utilizzare il modello di Delany e Bazley :

$$Z = \left[1 + 0,051 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,75} \right] + i \left[0,077 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,73} \right]$$

In questo modello Z è una funzione della sola resistività al flusso dell'aria, σ . Lo spessore della struttura è considerato come infinito.

Alcuni valori di σ sono i seguenti : da 2 a 3 $\times 10^5$ N/s/m⁻⁴ per una superficie erbosa, 10⁸ N/s/m⁻⁴ manto stradale bituminoso.

Nel caso delle pavimentazioni stradali porose (le così dette "fono assorbenti"), Z viene calcolata mediante un nuovo modello fenomenologico sviluppato in Francia. Tale modello considera gli scambi viscosi e termici interni alla struttura.

È però necessario conoscere, in questo caso, i quattro principali parametri fisici del modello che sono :

- σ , la resistività al flusso d'aria;
- la porosità Ω ;
- la tortuosità q^2 ;
- lo spessore, l .

Per pavimentazioni porose, l'ordine di grandezza dei valori dei parametri citati è : $\sigma = 10^4$ N/s/m⁻⁴, $\Omega = 15$ %, $q^{2n} = 2$ e $l = 0,04$ m. Mentre le superfici a grande porosità, i valori sono : $\sigma = 2 \times 10^3$ N/s/m⁻⁴, $\Omega = 25$ %, $q^{2n} = 3,5$ e $l = 0,04$ m.

I valori di tali parametri si possono ottenere in due diverse maniere, in via diretta mediante procedure di misura (per la resistività al flusso d'aria e per la porosità), sia per quanto riguarda q^2 , mediante una procedura indiretta basata sulla misurazione del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale in un tubo di Kundt o in campo libero.

Si può così ottenere poi il valore della pressione sonora media $\langle p^2 \rangle$ con la seguente formula :

$$\langle p^2 \rangle = \frac{A_1^2}{r_1^2} + |Q|^2 \cdot \frac{A_2^2}{r_2^2} + \frac{2|Q| \cdot A_1 \cdot A_2}{r_1 r_2} \cos[2\pi f(\tau_2 - \tau_1) + \gamma]$$

Dove $(\tau_2 - \tau_1)$ rappresenta la differenza temporale tra il segnale diretto e quello riflesso mentre γ è la fase del vettore del fattore di riflessione per le onde sferiche così definito:

$$[Q = |Q| \cdot \exp(i\gamma)]$$

Nel caso invece di propagazione delle onde sonore in situazione “favorevole”, ovvero in presenza di un gradiente verticale di velocità del suono positivo, si può utilizzare una formulazione matematica simile alla precedente considerando però che i raggi sonori compiano dei percorsi curvi.

Quando il valore del gradiente è importante o quando la distanza fra la sorgente ed il ricettore è abbastanza grande, parecchi raggi sonori possono raggiungere il ricettore R.

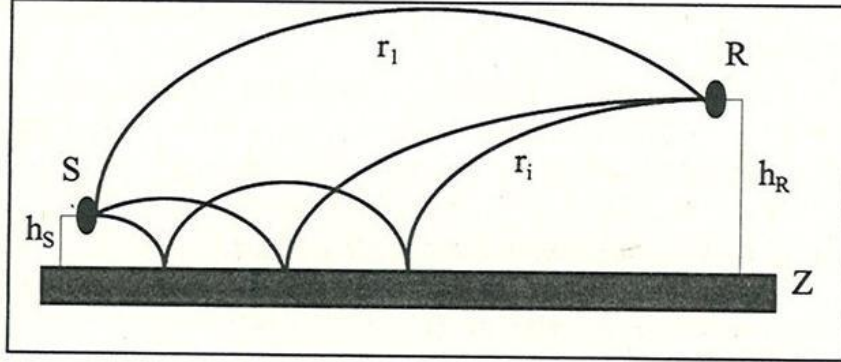


Fig. 4 : Geometria del problema nel caso della propagazione in condizioni “favorevoli”

In questo caso il valore medio della pressione sonora $\langle p^2 \rangle$ viene espresso dalla somma dei contributi dovuti ad ogni percorso :

$$\langle p^2 \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{A_i^2 \cdot |Q_i|^2}{r_i^2} + 2 \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{A_i |Q_i| \cdot A_j |Q_j|}{r_i r_j} \cdot \cos \left\{ 2\pi f(\tau_i - \tau_j) + \text{Arg} \left(\frac{Q_j}{Q_i} \right) \right\}$$

Dove A_i ed A_j includono le attenuazioni dovute all'assorbimento del suono nell'aria; r_i ed τ_i corrispondono rispettivamente alle lunghezze ed ai tempi di percorso dei raggi sonori curvi; N è il numero totale dei percorsi, che include quello diretto; Q_i è il fattore di riflessione per onde sferiche, funzione dell'angolo di riflessione e del numero di riflessioni. Per il percorso diretto si considera $Q_i=1$.

In tutte queste equazioni, gli effetti della turbolenza possono essere introdotti attraverso un indice di fluttuazione della rifrazione $\langle \mu_2 \rangle$ ed una scala di turbolenza L , dove per situazioni “classiche” si ha L circa 1,1 e $\langle \mu_2 \rangle$ che varia fra 2 e $15 \cdot 10^{-6}$.

Nella tabella seguente si riportano i valori delle differenze di livello sonoro tra condizioni omogenee e favorevoli, per diverse condizioni geometriche, tanto per le misurazioni che per le previsioni teoriche. Si è considerato nei calcoli un valore di $\langle \mu_2 \rangle$ pari a $6 \cdot 10^{-6}$.

Distanza Sorgete/Ricettore (m)	Altezza del ricettore (m)	Misurazione (dB(A)) (media $\pm$ scarto tipo)	Previsione teorica (dB(A))
160	6,0	0 ± 1.1	+ 0.1
	1,5	2.5 ± 1.5	- 0.1
320	6,0	-0.3 ± 1.4	- 0.4
	1,5	4.6 ± 1.4	+ 4.2
640	6,0	3.7 ± 2.7	+ 2.5
	1,5	8.5 ± 2.8	+ 8.3

Tabella 1 : Confronto diretto misurazioni // previsioni. Differenze fra condizioni omogenee e favorevoli.

I risultati esposti nella tabella confermano le seguenti osservazioni :

- l'effetto del gradiente positivo corrispondente alle condizioni favorevoli cresce con la distanza e decresce con l'altezza;
- l'ampiezza del campo di variazione cresce ugualmente con la distanza;
- la previsione fornita dai modelli teorici è sufficientemente buona quando si tratta di valori medi.

3.2. Modelli teorici numerici

I modelli teorici numerici permettono di considerare quasi tutti i casi che si incontrano in prossimità delle infrastrutture viarie. Possono considerare nello stesso tempo sia un suolo eterogeneo (presenza di una discontinuità d'impedenza fra il manto stradale ed i vari tipi di terreno naturale in prossimità della strada), presenza di ostacoli schermanti (barriere antirumore di qualsiasi forma) e di varie condizioni meteorologiche (omogenea, favorevole, sfavorevole), variabili con la distanza, con o senza turbolenza atmosferica.

In funzione del caso da considerare, si possono utilizzare modelli di tipologia diversa, a partire da quelli basati sulla teoria degli elementi di frontiera (BEM) o quelli che utilizzano l'equazione parabolica. I due metodi si differenziano in quanto per l'uso del metodo BEM non è possibile integrare le condizioni meteorologiche nel calcolo, mentre l'equazione parabolica, presentando diversi modi di risoluzione, ha una migliore adattabilità alle situazioni maggiormente complesse.

Questi modelli presentano una elevata precisione nel calcolo richiedendo però diverso tempo per l'elaborazione dei dati nei casi più complessi.

A partire dagli anni 1995/1996, è stato sviluppato un modello semplificato di propagazione per condizioni omogenee e favorevoli. Il livello sonoro calcolato con quest'ultimo modello permette di valutare l'impatto di

un progetto stradale o di altre sorgenti sonore tenendo conto delle condizioni meteorologiche realmente osservabili durante un lungo periodo (anche parecchi anni).

Tale livello sonoro viene chiamato “a lungo termine” (L_{LT}). Questo livello L_{LT} , che risulta dalla totalità delle condizioni meteorologiche osservabili in un dato sito, è ottenuto dalla somma dei contributi energetici dei livelli sonori registrati per le condizioni atmosferiche omogenee e favorevoli, ponderati secondo le loro occorrenze relative nel sito considerato.

I livelli sonori osservati in condizioni sfavorevoli sono ricondotti ai livelli in condizioni omogenee.

$$L_{LT} = 10 \lg \left[p \times 10^{\frac{L_F}{10}} + (1 - p) \times 10^{\frac{L_0}{10}} \right]$$

dove il livello L_F è rappresentativo delle condizioni favorevoli osservate durante la frazione “p” del periodo considerato ed il livello L_0 è relativo alle condizioni omogenee osservate nella rimanente frazione (1-p).

La formula sopra esposta permette di prevedere i livelli sonori equivalenti L_{Aeq} (6:00 – 22:00) e L_{Aeq} (22:00 – 6:00) in conformità ai regolamenti vigenti.

I calcoli vengono condotti seguendo le fasi seguenti :

- scomposizione delle sorgenti sonore in sorgenti puntiformi elementari;
- determinazione del livello di potenza acustica di ogni sorgente;
- ricerca dei percorsi di propagazione fra ogni sorgente ed il ricettore (percorsi diretti, riflessi, e/o di diffrazione);
- per ogni percorso di propagazione :
 - calcolo dell'attenuazione per condizioni favorevoli alla propagazione;
 - calcolo dell'attenuazione per condizioni omogenee;
 - calcolo del livello sonoro a lungo termine L_{LT} partendo dai livelli L_F , L_0 e della frazione di occorrenza temporale di condizioni favorevoli “p”;
 - accumulo dei livelli sonori di lungo termine relativi ad ogni percorso, per calcolare il livello sonoro totale al ricettore.

Per una sorgente puntiforme S_i di potenza L_{Awi} , e per ogni banda d'ottava, il livello sonoro equivalente al ricettore R è ottenuto per ogni condizione meteorologica dalle formule :

$$L_{i,f} = L_{Awi} - A_{i,f}$$

$$L_{i,o} = L_{Awi} - A_{i,o}$$

$A_{i,f}$ e $A_{i,o}$, rappresentano la totalità delle attenuazioni lungo il percorso delle onde sonore per le condizioni : favorevoli alla propagazione ($A_{i,f}$) ed omogenee ($A_{i,o}$), rispettivamente.

Tali attenuazioni si esplicitano in quattro termini :

$$A_{i,f} = A_{div} + A_{atm} + A_{suolo,f} + A_{dif,f}$$

$$A_{i,O} = A_{div} + A_{atm} + A_{suolo,O} + A_{dif,O}$$

dove :

- A_{div} è l'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica;
- A_{atm} è l'attenuazione dovuta all'assorbimento dell'aria;
- $A_{suolo,F}$ è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo, in condizioni favorevoli;
- $A_{suolo,O}$ è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo, in condizioni omogenee;
- $A_{dif,F}$ è l'attenuazione di un eventuale schermo, in condizioni favorevoli;
- $A_{dif,O}$ è l'attenuazione di un eventuale schermo, in condizioni omogenee;

Il livello sonoro a lungo termine, per ogni sorgente puntiforme ed ogni banda di frequenza, è quindi calcolato mediante l'equazione :

$$L_{LT} = 10 \times \lg \left[p \times 10^{\frac{L_F}{10}} + (1 - p) \times 10^{\frac{L_0}{10}} \right]$$

Mentre il livello globale in dB(A) è ottenuto dalla somma dei contributi della totalità delle sorgenti puntiformi e dalla somma dei livelli sonori in ogni banda d'ottava.

Le diverse attenuazioni in condizioni favorevoli sono calcolate con la stessa procedura prevista dalla norma IS 9613-2. Tuttavia, per quanto riguarda la diffrazione così come gli effetti dovuti alle variazioni locali della topografia ed alla presenza di strade in trincea oppure in rilevato, il metodo fornisce elementi di calcolo che risultano carenti nella stessa norma ISO.

In condizioni omogenee, le attenuazioni sono calcolate mediante formule desunte dai modelli più complessi in uso all'interno della ricerca scientifica.

L'insieme degli algoritmi proposti nel modello di previsione sono stati verificati con l'aiuto dei modelli teorici sopra esposti.

I risultati forniti da questo nuovo metodo di previsione sono stati già validati con alcune misure in situ anche se i dati in letteratura non sono ancora molti proprio perché la validazione del metodo impone l'impiego di misure a lungo termine.

Si riporta l'esempio elaborato su 4 siti specifici per il confronto i quali permettono delle misure di rumore da traffico in campo aperto, con i ricettori distribuiti fra 30m e 550m di distanza rispetto al ciglio della strada.

I confronti, riferiti a valori di $L_{Aeq,LT}$, sono rappresentati nella figura sottostante :

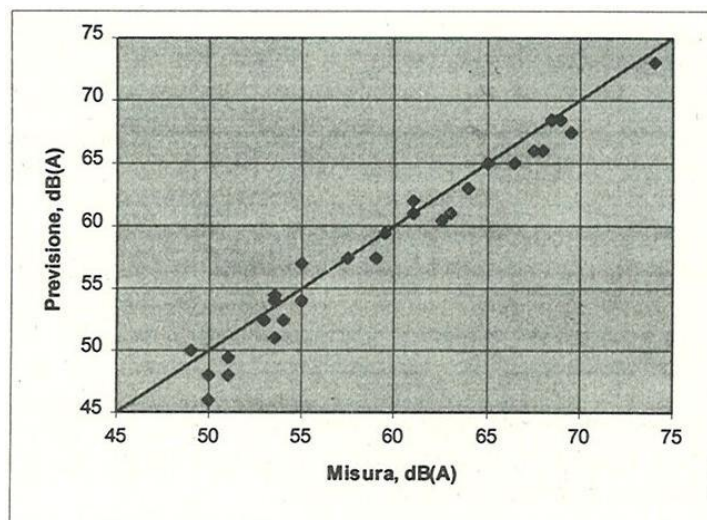


Fig. 5 : Confronto tra i risultati ottenuti con la misurazione e la previsione (n°4 siti in campo aperto)

Nei quattro siti indagati, il valore medio delle differenze tra i valori misurati / previsti è di circa -1,0 dB(A) con uno scarto tipo di 1,2 dB(A). Tali risultati confermano la bontà del metodo di previsione, anche se appare una piccola tendenza alla sottostima dei valori di circa 1,0 dB per il valore $L_{Aeq,LT}$.

Si riportano anche i risultati ottenuti con delle validazioni compiute in siti a maggiore complessità i quali presentano un effetto di diffrazione moderato per ricettori posti a diverse distanze dalla sorgente (da 15m a 300m).

I risultati presentati nella figura sottostante mostrano una leggera tendenza a sovrastimare la previsione del livello di $L_{Aeq,LT}$ di circa 2 dB(A).

Tale effetto è dovuto in gran parte all'ipotesi di ricondurre le condizioni sfavorevoli alla propagazione a condizioni omogenee, anche per i livelli sonori più elevati, ed una sottostima degli effetti del suolo da entrambe le parti della zona a diffrazione nelle equazioni semplificate.

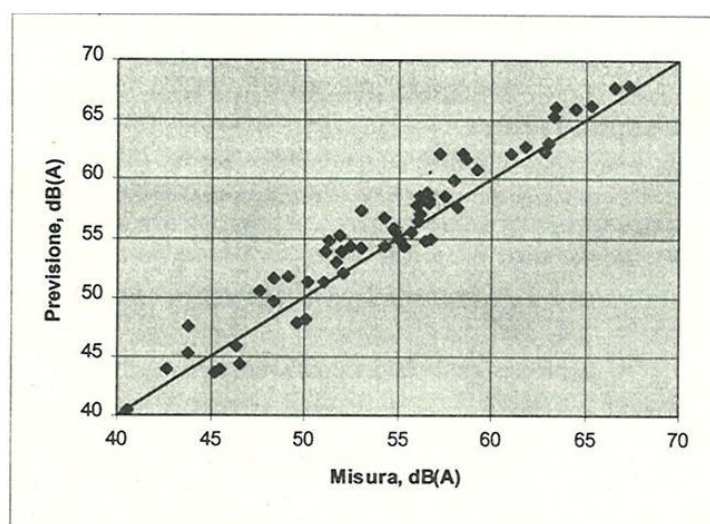


Fig. 6 : Confronto tra i risultati ottenuti con la misurazione e la previsione (n°2 siti con effetti di diffrazione moderati)

3.3. Effetto del manto stradale sulla previsione del L_{Aeq}

Alcune ricerche condotte negli ultimi anni sull'impatto acustico dei diversi manti stradali hanno permesso di classificarli per quanto concerne il rumore provocato dal rotolamento.

Tale classificazione, in termini di livelli sonori massimi L_{Amax} , è stata elaborata per punti di riferimento vicini alla strada, a 7,5 m dall'asse della carreggiata di destra ed a 1,2 m di altezza.

Sulla base di questa classificazione è possibile predire l'effetto dei vari tipi di manto sul livello sonoro equivalente L_{Aeq} in facciata alle abitazioni poste anche a qualche centinaio di metri dall'infrastruttura viaria.

Il principio del metodo consiste nel valutare, in una prima fase, il L_{Aeq} nel punto di riferimento su un periodo di riferimento di un'ora per ogni tipo di veicolo presente nel traffico, ed nel calcolare in una seconda fase il livello L_{Aeq} ai ricettori tenendo conto :

1. dei diversi effetti di propagazione (suolo e condizioni meteorologiche), fra la sorgente principalmente costituita dal rumore di rotolamento ed i ricettori;
2. del numero di veicoli in transito nel periodo da studiare, ad esempio diurno (06:00 – 22:00) oppure notturno (22:00 – 06:00), in conformità ai regolamenti vigenti.

Per la valutazione del L_{Aeq} , si debbono conoscere la velocità media ed il livello sonoro massimo L_{Amax} per ogni tipologia di veicolo.

Misurazioni condotte per un gran numero di veicoli permettono di ottenere un valore di riferimento L_{Amax} mediante una regressione lineare, funzione del $\lg_{10}(V/V_{Rif})$ per ogni terzo d'ottava fra la banda dei 100 Hz e la banda dei 5 KHz.

La velocità di riferimento (V_{Rif}) è diversa secondo i tipi di veicoli (automobile o veicolo pesante) e di strade (autostrada, strada statale, ...).

Dopo l'identificazione dello spettro di frequenza dei L_{Amax} lo spettro dei $L_{Aeq,T}$ è ottenuto con l'equazione :

$$L_{Aeq,T}(V) = L_{Amax}(V) + 10 \times \lg_{10} \left(\frac{\pi \cdot r}{V \cdot T} \right)$$

dove r è la distanza fra la sorgente ed il ricettore, T il periodo di riferimento (1 ora) e V la velocità media del flusso veicolare.

Dopo una prima valutazione del livello equivalente $L_{Aeq,T}$ per la distanza di riferimento (7,5 m) e per tutto lo spettro di frequenza, si calcolano le attenuazioni fra la sorgente ed i ricettori utilizzando i diversi modelli teorici sopra esposti. Per il calcolo, l'altezza della sorgente di rotolamento viene scelta vicino alla pavimentazione (0,03 m).

Gli effetti meteorologici vengono introdotti mediante il valore del gradiente verticale di velocità del suono.

Con questa metodologia è possibile identificare il valore del L_{Aeq} su di un periodo di 1 ora, per ogni tipo di veicolo e per diverse distanze.

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i risultati per diverse famiglie di pavimentazioni stradali.

Il valore del L_{Aeq} (1 ora) per un traffico reale si determina con l'equazione :

$$L_{Aeq}(1\text{ ora}) = 10 \times \lg_{10} \left[N_{auto} \times 10^{0,1 \times L_{Aeq}(1\text{ ora}, 1\text{ auto})} + N_{VP} \times 10^{0,1 \times L_{Aeq}(1\text{ ora}, VP)} \right]$$

dove N_{auto} corrisponde al numero di automobili e N_{VP} al numero di veicoli pesanti durante lo stesso periodo.

Tipo di pavimentazione	L_{Aeq} (1 ora) Automobile	L_{Aeq} (1 ora) Veicolo pesante	Differenza previsione/misura L_{Aeq} (1 ora) Traffico reale
Asfalto drenante 0/10	31,3	38.1	-1.2
BBTM 0/6	33,7	40.3	-0.9
Asfalto drenante 0/14	34,3	42.7	-0.1
BBSG 0/10	35,3	44.1	-0.7
BBUM 0/10	37,0	42.5	+0.9
BBTM 0/10	36,0	42.6	+0.3
BBSG 0/14	38,2	44.8	-0.6

Tab. 2 : Distanza di misura : 30 m. Altezza del ricettore : 5m.

Tipo di pavimentazione	L_{Aeq} (1 ora) Automobile	L_{Aeq} (1 ora) Veicolo pesante	Differenza previsione/misura L_{Aeq} (1 ora) Traffico reale
Asfalto drenante 0/10	28,4	35.2	+0.7
BBSG 0/10	29,7	36.4	-1.0
BBTM 0/10	29,9	37.6	-0.1
Calcestruzzo	32,2	37.1	-2.1

Tab. 3 : Distanza di misura : 60 m. Altezza del ricettore : 5m.

Tipo di pavimentazione	L_{Aeq} (1 ora) Automobile	L_{Aeq} (1 ora) Veicolo pesante	Differenza previsione/misura L_{Aeq} (1 ora) Traffico reale
Asfalto drenante 0/10	22,2	29.2	-2.3
BBSG 0/10	21,1	28.3	-3.2
BBTM 0/10	23,6	31.7	+1.3

Tab. 4 : Distanza di misura : 120 m. Altezza del ricettore : 5m.

BBTM : conglomerato bituminoso in strato sottile;

BBUM : conglomerato bituminoso in strato ultra sottile;

BBSG : conglomerato bituminoso (asfalto).

I risultati presentati nelle tabelle evidenziano una classificazione delle pavimentazioni “a distanza” quasi uguale a quella già osservata in vicinanza alla strada.

I valori indicano che la previsione del livello equivalente $L_{Aeq}(1\text{ ora})$ fino a 120 m è possibile con un’accuratezza accettabile di +/- 1 dB(A) fino a 60 m e +/- 2 dB(A) fino a 120 m.

Ad esempio :

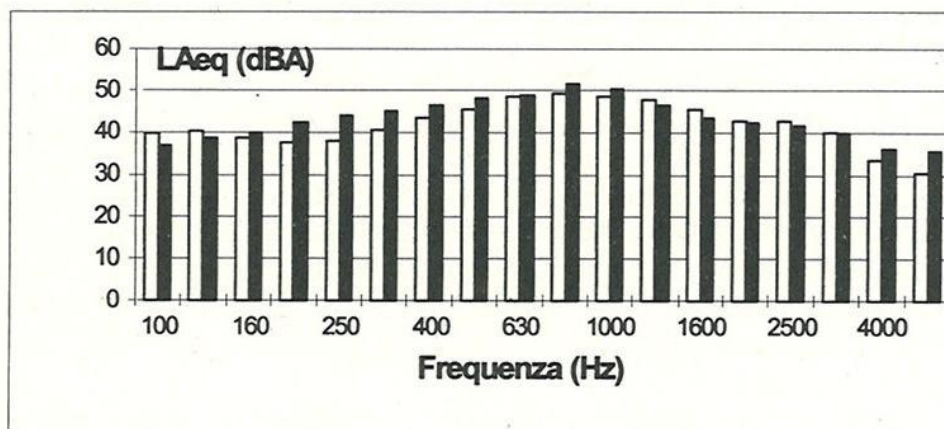


Fig. 7 : L_{Aeq} (1ora) a 120m – Confronto tra valori misurati (colonne vuote) e previsione teorica (colonne piene)

Anche se l'accuratezza presuppone la conoscenza dei valori dei diversi parametri fisici da introdurre nei modelli sono:

- impedenza acustica del manto stradale;
- impedenza acustica del suolo naturale in prossimità della strada;
- altezze dei ricettori;
- distanza esatta tra sorgente ed i ricettori.

Partendo dai valori di riferimento L_{Aeq} (1ora) per ogni tipo di veicolo e di manto stradale, è possibile la stima dei valori di L_{Aeq} per il periodo diurno (06:00/22:00) e notturno (22:00/06:00).

I modelli previsionali comunque prevedono una buona conoscenza del traffico per ogni ora.

I risultati teorici delle simulazioni presenti in letteratura al fine della validazione confermano le conclusioni ottenute con la previsione del L_{Aeq} (1ora) oltre alla validazione con una sperimentazione su tre siti con manti stradali costituiti da due diverse pavimentazioni drenanti e di un conglomerato bituminoso di tipo BBSG.

I valori presenti in letteratura sono presentati nelle tabelle successive anche se i diversi siti di indagine presentando diversi volumi di traffico non possono portare a conclusioni se non al fine del solo confronto tra le difformità tra valori misurati e valori previsti.

Tipo di manto	Misurazione, dB(A)		Previsione, dB(A)		Differenza, dB(A)	
	30 m	100 m	30 m	100 m	30 m	100 m
Asf. Drenante 0/14	68,9	63,4	70,8	63,7	+1.9	+0.3
Asf. Drenante 0/6	65,2	59,5	65,8	59,1	+0.6	-0.4
BBSG 0/10	-	58,1	-	58,9	-	+0.7

Tab. 5 : Confronto tra misurazione e previsione del L_{Aeq} (06:00/22:00)

Tipo di manto	Misurazione, dB(A)		Previsione, dB(A)		Differenza, dB(A)	
	30 m	100 m	30 m	100 m	30 m	100 m
Asf. Drenante 0/14	64,7	59,2	66,7	59,8	+2.0	+0.6
Asf. Drenante 0/6	61,8	56,8	62,0	55,6	+0.2	-1.2
BBSG 0/10	-	53,0	-	52,7	-	-0.3

Tab. 6 : Confronto tra misurazione e previsione del L_{Aeq} (22:00/06:00)

I risultati presentano una notevole accuratezza sia per quanto concerne il $L_{Aeq}(1ora)$ quanto per i $L_{Aeq}(06:00/22:00)$ e $(22:00/06:00)$ in quanto si evidenzia una precisione di ± 3 dB(A).

Si evidenzia la sostanziale importanza che gli eventi atmosferici hanno sulla propagazione delle onde sonore prodotte dal traffico veicolare su diversi manti stradali. Di tutto questo non possono non tenerne conto i modelli di simulazione.

3.4. Considerazioni

Da molti anni il rumore prodotto dal traffico veicolare viene riconosciuto come uno dei fattori di inquinamento tra i più importanti per quanto concerne i potenziali ricettori esposti.

Molto spesso le infrastrutture di nuova realizzazione devono essere messe in opera in stretta prossimità (a qualche centinaio di metri) di insediamenti residenziali. Ciò comporta la necessità di dover essere in grado di predire con buona accuratezza il livello sonoro prodotto da tali infrastrutture.

Oltre a questo, i regolamenti nazionali più recenti a seguito dell'entrata in vigore delle leggi quadro fanno emergere situazioni di potenziale conflitto tra le esigenze diverse della popolazione sempre più esposta all'impatto acustico di infrastrutture viarie, linee ferroviarie.

È necessario quindi disporre di modelli di previsione del rumore prodotto dalle infrastrutture sempre più precisi. Anche se i test di validazione non potranno mai considerarsi conclusi a causa della sempre maggiore complessità dei siti reali presi di volta in volta a campione, si rivela una situazione di sostanziale bontà di previsione a patto di partire da corrette considerazioni di base sulla propagazione sonora e fare corrette considerazioni sui meccanismi di generazione del rumore indotto dal traffico.

4. VIBRAZIONI MECCANICHE

La propagazione delle onde sonore trasmette energia sotto forma di onde di pressione nell'aria: nel caso delle vibrazioni, l'energia meccanica viene trasmessa sotto forma di onde che si propagano attraverso un mezzo solido.

Un corpo vibra quando descrive un movimento oscillatorio attorno ad una posizione di equilibrio statico.

Come per il fenomeno sonoro, le vibrazioni meccaniche si possono caratterizzare attraverso l'ampiezza dell'oscillazione e la frequenza, cioè dal numero di oscillazioni al secondo compiute.

Il diapason costituisce un esempio di mezzo sottoposto ad un'oscillazione basata su di una sola frequenza, ma nella realtà tutti gli oggetti sottoposti a propagazione di energia meccanica di tipo vibratoria manifestano simultaneamente diverse frequenze.

Le vibrazioni rappresentano un caso particolare del vastissimo campo dei fenomeni oscillatori, che vanno dal moto del pendolo ai terremoti.

Negli ultimi anni particolare interesse l'hanno riscosso gli studi sugli effetti nocivi che le vibrazioni meccanica hanno sulle strutture e per quanto concerne il disturbo indotto agli occupanti a diverso titolo degli edifici.

Un esempio delle conseguenze catastrofiche che le vibrazioni indotte dal vento possono causare alle strutture è quello del crollo del ponte Tacoma, avvenuto il 7 Novembre 1940 nello Stato di Washington. La velocità del vento era di soli 72 m/h, ma le continue oscillazioni imposte alla struttura la fecero entrare in una condizioni particolare, la condizione di risonanza, aumentando enormemente l'ampiezza delle oscillazioni.

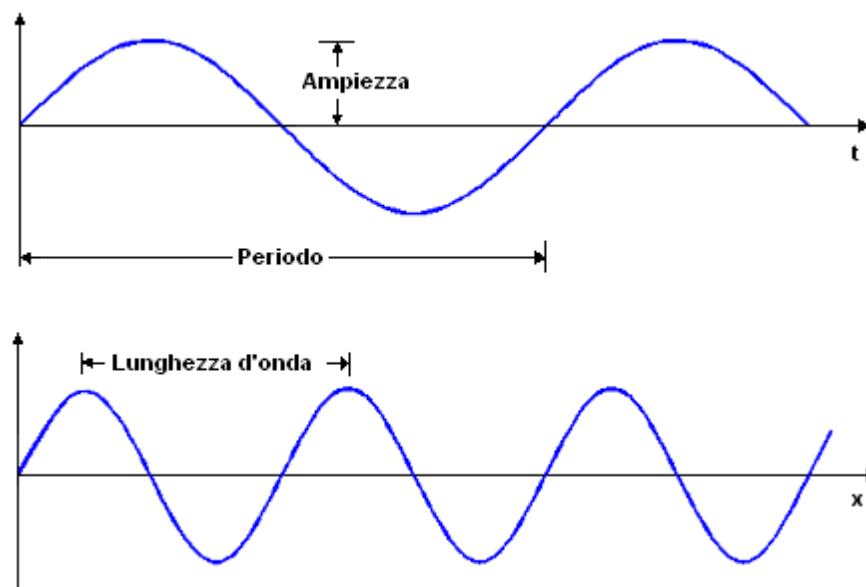


Figura 8: Esempio di onda sinusoidale.

4.1. Frequenza propria e smorzamento.

Anche se apparentemente rigido, ogni sistema meccanico presenta una certa elasticità, ed è quindi deformabile: può perciò essere schematizzato con una massa **M** ed una costante elastica **K**, che viene rappresentata come una molla.

Se spostiamo la massa verso il basso e poi lasciamo libero il sistema, questo si mette in oscillazione con una ampiezza costante ed una frequenza - detta frequenza propria - che è direttamente proporzionale alla costante elastica, ed inversamente proporzionale alla massa.

Tale frequenza è quella alla quale il sistema si porta spontaneamente, in assenza di forze esterne di mantenimento. Essa è specifica per ogni sistema, e quanto più grande è la massa e minore la costante elastica, tanto più bassa sarà la frequenza propria.

La frequenza propria non dipende, in generale, dall'intensità della forza eccitante il sistema, ma solo dalle caratteristiche fisiche del sistema, cioè massa e costante elastica.

Ad esempio una corda di violino emette sempre la stessa nota, sia quando viene sfiorata, sia quando è fortemente pizzicata. Cambia l'ampiezza, ovvero l'entità della deformazione, ma la frequenza propria della corda è sempre la stessa.

L'esperienza evidenzia comunque che le ampiezze dell'oscillazione di oscillazione vanno diminuendo finché il sistema non si ferma: questo perché nei sistemi reali non si può prescindere dallo smorzamento dato dagli attriti interni, e posseduto in misura maggiore o minore da tutti i corpi.

Tornando all'esempio precedente, esso può essere schematizzato con uno schema elettrico equivalente dotato di massa **M**, costante elastica **K** e uno smorzatore **S**, dove quest' ultimo rappresenta la resistenza passiva offerta dal sistema.

La frequenza dell'oscillazione rimane praticamente uguale a quella del sistema libero, cioè senza smorzatore. Mentre l'ampiezza si riduce nel tempo fino ad annullarsi del tutto a causa della presenza dello smorzatore che dissipa l'energia meccanica posseduta dal corpo.

4.2 Frequenza eccitante e risonanza.

Vediamo ora cosa succede quando al sistema viene applicata una forza perturbatrice esterna che varia nel tempo, e quindi dotata di una certa frequenza eccitante, che può esser maggiore, minore, od uguale alla frequenza propria del sistema.

L'oscillazione del sistema ("oscillazione forzata") ha luogo indipendentemente dalla sua frequenza propria, e dipende solo dalla frequenza eccitante.

Queste forze esterne possono essere prodotte da innumerevoli fattori.

Se la frequenza esterna è maggiore di quella propria del sistema, l'ampiezza dell'oscillazione rimane piccola, al contrario, sarà maggiore con frequenze disturbanti minori.

La condizione di **risonanza** si verifica quando la frequenza esterna di eccitazione coincide con la frequenza propria del sistema, e le due agiscono, conseguentemente, in fase. In questo caso, l'ampiezza

dell'oscillazione continua a crescere con tendenza all'infinito, e la struttura viene assoggettata a deformazioni sempre più crescenti che tendono a provocarne il collasso.

Le numerose esperienze in materia di valutazione d'impatto ambientale indotto dai fenomeni di vibrazione hanno permesso di individuare valori limite di soglia e più, in generale, criteri di sicurezza, oltre i quali si possono verificare danni alle strutture o disturbo agli abitanti delle zone limitrofe alla sorgente vibratoria.

I limiti stabiliti dalle normative nazionali ed internazionali sono stati individuati considerando diversi parametri, quali la gamma di frequenze e di ampiezza della vibrazione, la caratteristica temporale del fenomeno (continuo o transitorio), il numero di eventi transitori, il tempo di esposizione, l'influenza del suolo, il tipo e lo stato di conservazione delle strutture da salvaguardare.

Tra i parametri caratteristici dell'onda vibratoria, quello che sperimentalmente viene più utilizzato è la velocità massima che può provocare spostamenti differenziali di fondazioni, sollecitazioni, innesco di frane in zone caratterizzate da fondazioni in equilibrio limite, e, per valori più elevati, fratture negli ammassi rocciosi.

Sulla base di queste considerazioni, le normative vigenti esprimono i livelli massimi di vibrazione in termini di massima componente di velocità delle particelle, o massimo vettore.

L'apparato normativo vigente, a livello nazionale, cerca di fornire gli elementi necessari, a partire dal panorama normativo internazionale, per definire le misurazioni di vibrazioni, anche se per alcuni aspetti esistono ancora delle ampie zone d'ombra, come ad esempio si evidenzia la mancanza della definizione di un metodo per la valutazione dell'influenza del tipo di terreno, o la libera scelta di una parte della catena di misura (modalità di accoppiamento tra trasduttore e superficie di misura).

In questi termini, il più importante ed esauriente riferimento normativo è la norma ISO 4866, che contiene disposizioni e linee guida, adottate come principale riferimento nella maggior parte delle normative nazionali. Appare perciò opportuno fare una panoramica delle più note normative e raccomandazioni in materia di vibrazione, evidenziandone le principali caratteristiche ed innovazioni.

La Commissione Vibrazioni dell'UNI ha prodotto una completa serie di norme nazionali, che, sebbene con qualche punto di scarsa chiarezza, coprono l'intera problematica delle vibrazioni negli edifici: dalla valutazione del disturbo indotto alle persone, alla valutazione del possibile danno strutturale, fino all'implementazione della metodica di misura.

Per completezza verranno riportate anche le principali normative relative al disturbo ed ai livelli di tollerabilità per le attività umane.

4.1. Meccanismo di produzione del danno da vibrazioni

La vibrazione è un'oscillazione di un corpo con ampiezza variabile. All'interno di qualsiasi materiale, ad una oscillazione corrisponde uno sforzo (f), la cui entità è correlata all'ampiezza della deformazione (ϵ) dalla legge costitutiva del materiale.

I materiali utilizzati nelle costruzioni hanno generalmente delle resistenze a trazione molto basse, in particolar modo le malte, i laterizi o i materiali comunemente utilizzati nei rivestimenti.

A questi fa eccezione l'acciaio che generalmente viene utilizzato solo per la parte strutturale e raramente negli edifici ad uso residenziale.

Quando lo sforzo, che insorge all'interno del materiale, supera la soglia di resistenza (a trazione), si innesca la lesione con la manifestazione del danno.

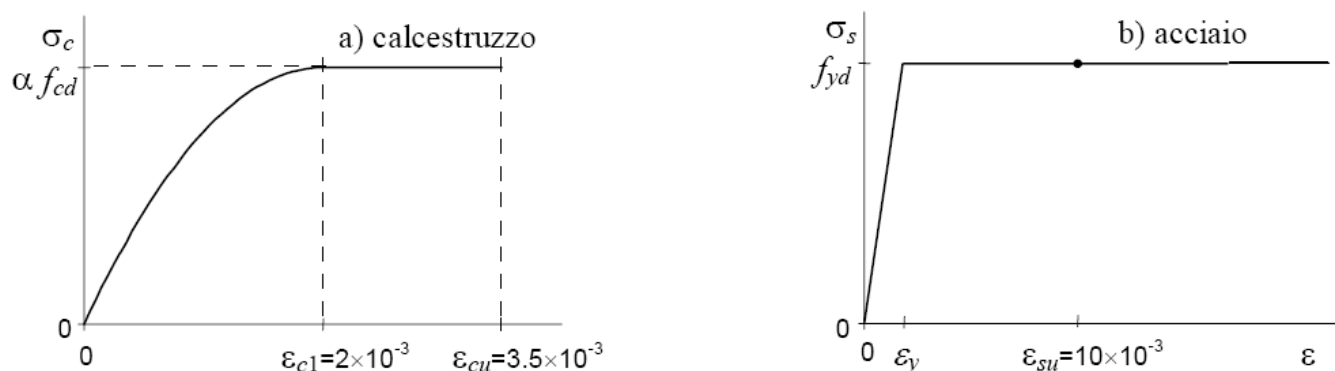


Figura 8 : Legame costitutivo del calcestruzzo e dell'acciaio

Conseguentemente, i primi danni si hanno :

1. nei materiali a minore resistenza (tipicamente quelli di rivestimento) ;
2. nei punti "critici", dove sussistono degli stati di sforzo preesistenti legati a cause diverse dalle vibrazioni : sollecitazioni di tipo statico per dei carichi presenti, per dilatazioni termiche, per ritiro del materiale, etc.

Numerosi fenomeni fisici possono essere responsabili delle vibrazioni che interessano le costruzioni, anche se è possibile classificare le sorgenti di vibrazioni in due gruppi:

- vibrazioni prodotte all'interno delle costruzioni ;
- vibrazioni prodotte all'esterno.

Nel primo gruppo comprendiamo le vibrazioni prodotte dal funzionamento di macchinari che operano all'interno delle costruzioni stesse e dagli impianti tecnologici. Il secondo gruppo comprende, invece, il traffico veicolare, stradale e ferroviario, le attività industriali e le vibrazioni di origine ambientale.

Le vibrazioni del primo gruppo si propagano direttamente nell'ambito delle costruzioni nelle quali sono state prodotte, mentre le seconde si propagano preliminarmente attraverso il terreno, subendo conseguentemente fenomeni di filtraggio, riflessione e rifrazione, e quindi attraverso le fondazioni raggiungono la sovrastruttura. Inoltre le tipologie strutturali esposte a vibrazioni nel corso della loro vita di servizio si possono classificare sulla base della causa che produce le vibrazioni.

Le vibrazioni prodotte dal traffico e dalle attività connesse con la realizzazione di nuove costruzioni interessano i ponti e gli edifici di qualunque tipologia.

4.2. Strumentazione e tecniche per la misura di vibrazioni

Le vibrazioni sono caratterizzabili attraverso la definizione di tre parametri cinematici:

- accelerazione
- spostamento
- velocità

interdipendenti per cui è irrilevante quale di questi viene utilizzato per la misura.

Anche se, per misure a bassa frequenza si consiglia l'utilizzo della misura dello spostamento, mentre per misure in presenza di componenti armoniche a più alta frequenza si preferisce utilizzare la velocità e l'accelerazione.

Ai fini dell'esecuzione dell'analisi in frequenza della risposta strutturale, si utilizza il parametro velocità secondo la normativa UNI 9916, mentre per la valutazione del disturbo provocato agli occupanti degli edifici interessati dalla propagazione di vibrazioni secondo la norma UNI 9614 si preferisce misurare l'accelerazione ponderata in frequenza.

Nelle misure oggetto della presente indagine, secondo la norma UNI 9614, UNI 9916, UNI 11048 e le metodologie di impiego degli accelerometri come descritto nella norma UNI 5348, è stata utilizzata la seguente strumentazione, rispondente alla classe 1 di precisione secondo la norma ISO 8041 :

- fonovibrometro analizzatore Svantek, Svan 958 quadricanale;
- accelerometro triassiale Dytran, mod. 3002;
- l'intera catena strumentale è stata calibrata prima e dopo ogni singola sessione di misura con il calibratore Bruel & Kjaer mod. 4294.

4.4. La propagazione delle vibrazioni attraverso il terreno e le strutture

In prima approssimazione il problema della propagazione delle vibrazioni attraverso il terreno si può affrontare considerando il terreno stesso come un continuo elastico, lineare ed omogeneo.

Per un materiale così fatto, la condizione di equilibrio in campo dinamico di un elemento infinitesimo di volume è espressa da :

$$\sigma_{ij,i} + \rho f_j = \rho u_j \quad (1)$$

dove :

σ_{ij} = *tensore delle tensioni*;

u_i = *vettore spostamento*;

ρ = *densità del materiale*;

f_i = *forza di volume per unità di massa*.

Le incognite del problema sono nove: le sei componenti di σ_{ij} e le tre componenti di u_i . Poiché le equazioni di equilibrio disponibili sono le tre espresse dalle equazioni (1), il problema è iperstatico.

La soluzione può essere ottenuta utilizzando le relazioni che esprimono il legame elastico lineare :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

assieme alle condizioni di congruenza :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

ottenendo quindi :

$$c_{ijkl} u_{k,il} + \rho f_j = \rho u_i \quad (4)$$

relazione che esprime le equazioni del moto in termini di spostamento per il corpo elastico omogeneo. Supponendo invece il materiale anche isotropo, le costanti c_{ijkl} si riducono a due soltanto e le equazioni (4) divengono :

$$(\lambda + \mu) u_{i,ij} + \mu u_{j,ii} + \rho f_i = \rho u_j \quad (5)$$

La formulazione matematica del problema dinamico è completata dalla specificazione delle condizioni al contorno, che sono in questo caso di due tipi :

assegnazione degli spostamenti e delle velocità iniziali su tutto il solido ;

assegnazione in ogni punto della frontiera del solido di una qualsiasi delle otto combinazioni che si ottengono scegliendo un membro da ciascuno dei tre prodotti :

$$\sigma_{nn} u_n, \sigma_{ns} u_s, \sigma_{nt} u_t, \quad (7)$$

in cui n, s, t sono tre direzioni mutuamente perpendicolari, con n la normale alla superficie esterna del solido. In assenza di forze di volume le equazioni del moto si semplificano come segue :

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u + \mu \nabla^2 u = \rho u \quad (8)$$

Applicando il teorema di Helmholtz, in base al quale un campo vettoriale si può esprimere come somma del gradiente di un campo scalare φ e del rotore di un campo vettoriale ψ , ottenendo :

$$\nabla [(\lambda + \mu) \nabla^2 \varphi - \rho \varphi] + \nabla \times [\mu \nabla^2 \psi - \rho \psi] = 0 \quad (10)$$

Si osserva che sia φ che ψ soddisfano l'equazione d'onda, rispettivamente scalare e vettoriale, da ciò si deduce che in un solido elastico possono propagarsi solo due tipi di onde:

- il primo, associato a φ , si propaga con velocità c_p (onde primarie o di compressione) ;
- il secondo, associato a ψ , si propaga con velocità c_s (onde secondarie o di taglio).

Poiché λ e μ sono sempre maggiori di zero, le soluzioni dell'equazione (10) assicurano che la velocità di propagazione delle onde primarie è sempre maggiore di quella delle onde secondarie.

Quindi la soluzione del problema dinamico può essere ottenuta per via analitica solo in pochi casi, anche perché nei casi reali si incontrano solidi non omogenei ed anisotropi, come il terreno e la struttura sottoposta a vibrazioni, caratterizzati da geometrie complesse. Spesso il terreno non si può nemmeno considerare elastico lineare.

Ciò impone l'utilizzo di soluzioni approssimate, ottenute attraverso delle tecniche di discretizzazione del continuo tridimensionale e del tempo.

4.5. Metodologia per l'analisi della sicurezza delle strutture esposte a vibrazioni

Le vibrazioni indotte da carichi dinamici, producono sollecitazioni e deformazioni sulle strutture che possono provocare danni strutturali anche ingenti. L'entità di tali danni dipende dall'interazione del fenomeno vibratorio con il tipo di fondazione, lo stato di conservazione dell'edificio, ma soprattutto diventano fondamentali le caratteristiche della vibrazione che investe la struttura. I danni o le lesioni causate agli edifici, manufatti e strutture possono classificarsi, in funzione della loro entità, in tre categorie:

1. danni "cosmetici": si formano piccole fessure negli intonaci senza interessamento delle murature o degli elementi strutturali. Tali fessure si osservano generalmente in corrispondenza di punti singolari del manufatto quali aperture delle pareti (porte e finestre) o giunzioni fra elementi della costruzione (angoli, spigoli, contatti delle pareti con solai, travi, etc.);
2. fessure più aperte, caduta di pezzi di intonaco, distacchi di mattonelle, rottura di marmi e vetri;
3. danni che interessano la statica della struttura.

Per valutare gli effetti indotti dai fenomeni vibratorii sulle strutture da salvaguardare, sono utilizzate soprattutto le normative nazionali ed internazionali, che vengono ora elencate.

In particolare, le quattro norme che verranno nel seguito analizzate sono:

- **UNI 9614:1990** "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"
- **UNI 9916:2004** "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"
- **DIN 4150-3** "Effects of vibration on structures".

- **ISO 4866:1996** “Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibration and evaluation of their effects on buildings”

La norma UNI 9614:1990 si rivolge specificamente alla definizione dei criteri di valutazione del disturbo alle persone, mentre le altre indicano criteri per la misura e la valutazione delle vibrazioni con riferimento ai possibili danni strutturali (o meno) agli edifici.

La prima osservazione che si evidenzia è che le norme suddette non utilizzano in maniera uniforme e coerente le definizioni delle grandezze fisiche e le scale numeriche utilizzate per la loro valutazione.

Le norme relative al disturbo umano fanno impiego della scala in dB per esprimere il valore del livello di accelerazione ponderata, mentre la norma relativa ai danni strutturali fa riferimento a valori di velocità di vibrazione (espressa in m/s), lasciati in scala lineare e quindi senza far impiego della conversione logaritmica.

Le norme tecniche sull'insorgenza di danni agli edifici evidenziano come le vibrazioni possono condurre le strutture esposte al raggiungimento sia di stati limite di servizio che di stati limite ultimi.

Stati limite ultimi

Le vibrazioni meccaniche che si propagano per via ambientale possono indurre fatica quando i cicli di tensione da esse prodotti sono ripetuti un gran numero di volte, tipicamente nell'intorno del milione di volte. In questo caso nella procedura dell'analisi della sicurezza, si inizia con la decomposizione della storia temporale delle tensioni in cicli elementari valutando il numero e l'ampiezza. Si perviene a delle rappresentazioni sintetiche dell'insieme dei cicli di tensione sotto forma di collettivi delle tensioni.

Si utilizzano i risultati di prove a fatica condotte in laboratorio mediante storie temporali di tensioni sinusoidali ad ampiezza costante espresse dalle curve S – N o di Wohler.

Successivamente si determina il danneggiamento D prodotto dalla storia di tensioni reale, usando un opportuno criterio di danneggiamento cumulativo, come ad esempio quello di Palmgren – Miner, espresso dalla seguente relazione :

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (11)$$

che presenta la caratteristica di non tener conto della effettiva successione dei cicli di tensione. Il responso sulla sicurezza consiste nel controllare che il danno sia inferiore ad un opportuno valore ammissibile, non molto diverso dall'unità.

Stati limite di servizio

Gli stati limite di servizio sono generalmente tre : il danneggiamento di componenti strutturali portanti non pregiudizievole per la sicurezza ma solo per l'estetica detti anche danneggiamenti cosmetici, il disturbo alle attività produttive, ed il disturbo agli occupanti delle costruzioni.

Sono disponibili più metodologie di analisi della sicurezza, tutte essenzialmente basate sul confronto tra parametri sintetici, rappresentativi degli effetti delle vibrazioni, ed opportuni valori di riferimento. Tali metodi si differenziano solo per il parametro utilizzato che risulta essere diverso.

Tra questi quelli maggiormente utilizzati sono : l'ampiezza massima dell'accelerazione o della velocità, ed il valore R.M.S. dell'accelerazione o della velocità.

In questo ultimo caso si esegue, generalmente, anche l'analisi spettrale del segnale rilevato in bande di 1/3 ottava applicando opportune ponderazioni che vanno a considerare la diversa sensibilità spettrale dell'uomo, nel caso di stati limite consistenti nel disturbo agli occupanti delle costruzioni.

4.6. Livello di pericolosità delle vibrazioni trasmesse alle strutture edili

Per definire il livello di pericolosità di una vibrazione, nei confronti di un fabbricato, occorre valutare i seguenti parametri :

- le caratteristiche meccaniche del terreno (composizione e grado di compattazione) ;
- tipologia delle fondazioni (continue, isolate, dirette, su pali) ;
- tipologia e materiali che costituiscono l'edificio ;
- eventuali situazioni critiche dal punto di vista strutturale.

La procedura di misura inizia con l'analisi della classe di appartenenza dell'edificio, in quanto esso sarà più sensibile al rischio di danni per vibrazioni quanto più scadenti sono i parametri significativi elencati sopra.

I valori di riferimento elencati nelle norme DIN 4150 e BS 7385 fanno riferimento al picco nel tempo della singola componente di velocità. Le misurazioni devono essere eseguite sui tre assi in maniera simultanea.

I valori di riferimento riguardano solo l'effetto diretto delle vibrazioni e non gli effetti indiretti quali, ad esempio, i cedimenti provocati dalla compattazione del terreno a seguito di vibrazioni, i quali dovranno essere valutati e considerati a parte.

I valori di riferimento relativi alle vibrazioni di breve durata (cioè tali da escludere problemi di fatica ed amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata) sono riportati nel prospetto seguente sia per quanto riguarda le misurazioni in fondazione sia le componenti orizzontali della velocità ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato.

Per la componente verticale dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la velocità di vibrazione 20 mm/s limitatamente alla prime due classi di edifici indipendentemente dal contenuto in frequenza.

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v in mm/s			
		Fondazioni			Piano alto
		Da 1 Hz fino a 10 Hz	Da 10 Hz fino a 50 Hz	Da 50 Hz fino a 100 Hz ^{*)}	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 ($f=10$ Hz) fino a 40 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 40 ($f=50$ Hz) fino a 50 ($f=100$ Hz)	40
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ($f=10$ Hz) fino a 15 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 15 ($f=50$ Hz) fino a 20 ($f=100$ Hz)	15
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 ($f=10$ Hz) fino a 8 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 8 ($f=50$ Hz) fino a 10 ($f=100$ Hz)	8
*) Per frequenze oltre 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.					

Tabella 7 : Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s (per tutte le frequenze)
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	10
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	2,5

Tabella 8 : Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni

5. NORMATIVE ITALIANE ED INTERNAZIONALI

5.1. Stati limite ultimi

La normativa si occupa della sicurezza a fatica nel DM 9/1/1996 "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche".

Per quanto riguarda le strutture di c.a., c.a.p., c.a.p.p., la procedura prescritta consiste nel controllare che le tensioni in esercizio agenti sulle barre di acciaio o sulle armature di precompressione rientrino nel limite :

$$\sigma_{\min} < \frac{2}{3} \sigma_{\max} \quad (12)$$

e quindi riducendo il valore delle tensioni ammissibili secondo quanto segue :

$$\bar{\sigma}_s = 0,75 \sigma_s \left(1 + 0,5 \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \right) \quad (13)$$

dove σ_s è la tensione limite dell'armatura in esercizio.

Tale procedura prescinde dal conteggio del numero dei cicli e non tiene conto del pericolo della fatica nel calcestruzzo e del legame di aderenza tra acciaio e calcestruzzo.

5.2. Stati limite di servizio – UNI 9916

La norma UNI 9916 si occupa degli stati limite di danneggiamento, indicando il campo di frequenze di interesse per diversi tipi di eccitazione e fornisce gli strumenti per la classificazione degli edifici secondo la resistenza meccanica alle vibrazioni.

In generale, danni strutturali agli edifici nel loro insieme attribuibili ai fenomeni vibratorii sono molto rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause. Perché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali è necessario che esse raggiungano livelli tali da causare prima di tutto fastidio agli occupanti dell'edificio stesso. Sono frequenti, invece, altre forme di danno, di entità

definita "di soglia", le quali non compromettendo la sicurezza strutturale dell'edificio possono ridurre il valore secondo la definizione che ne viene data in normativa :

- danno architettonico (o di soglia) : effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza compromettere la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. Si presenta in molti casi con la formazione o l'accrescimento di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o sulle superfici intonacate o nei giunti di malta delle costruzioni in mattoni.

La norma italiana alla base prende riferimento la norma ISO 4866, concordemente ad essa definisce:

- la durata del fenomeno;
- la tipologia del fenomeno (transitorio o continuo);
- la gamma di frequenze d'interesse;
- le caratteristiche costruttive e lo stato di conservazione della struttura da salvaguardare;
- le caratteristiche delle fondazioni;
- l'interazione con il terreno.

Per quanto riguarda la metodologia di misurazione, la normativa specifica la tipologia di trasduttore da adottare sottolineando però i limiti dei geofoni alle basse frequenze e gli errori derivanti dall'integrazione dei segnali misurati passando da accelerazione a velocità e viceversa.

Per la valutazione del livello di vibrazione, la legge individua due criteri di misurazione:

1. misure alla base di una struttura (per un eventuale confronto con i valori forniti dalla normativa), o calcolo della funzione di trasferimento terreno – edificio;
2. risposta della struttura.

Il primo metodo prevede misure in corrispondenza della fondazione o, in assenza di questa, alla base del muro di sostegno e sul lato dell'edificio prossimo alla sorgente di vibrazione. Il secondo impone la collocazione dei trasduttori sulla fondazione e all'ultimo piano dell'edificio.

In particolare, per strutture con più di quattro piani è consigliabile disporre i trasduttori anche a livelli intermedi, mentre per strutture lunghe più di 10 m, si devono installare i sensori ad intervalli orizzontali di circa 10 m.

La UNI 9916 del 2004, fornisce una guida per la scelta di metodi appropriati di misura e di trattamento dei dati per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

La norma individua la **velocità** come grandezza fisica ottimale da misurare, ottenuta sia mediante l'utilizzo di velocimetri, sia attraverso integrazione di segnali di accelerazione. Le vibrazioni devono essere misurate sia in direzione verticale che nelle due direzioni orizzontali ortogonali alla verticale, queste ultime scelte possibilmente con riferimento agli assi principali dell'edificio.

Le modalità di trattamento dei dati dipendono dalla natura dei segnali da analizzare, di tipo stazionario o non stazionario, periodico o non periodico, dalla loro durata e distribuzione di energia nel dominio della frequenza.

In particolare la normativa UNI 9916 considera due diverse definizioni di velocità:

1) velocità di picco puntuale (p.p.v. - “peak particle velocity”), definita come il valore massimo del modulo del vettore velocità misurato simultaneamente lungo le due componenti orizzontali e la verticale.

2) velocità di picco di una componente puntuale (p.c.p.v. - “peak component particle velocity”), definita come il valore massimo del modulo di una delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente.

Per quanto concerne invece le vibrazioni di breve durata (cioè tali da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata), la normativa UNI 9916 prevede che sia misurata la velocità **p.c.p.v.**.

I valori di riferimento sono quelli riportati nella tabella seguente e riguardano sia le misure in fondazione sia le componenti orizzontali della velocità ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato. Per la componente verticale dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la **p.c.p.v. 20 mm/s** limitatamente alle prime due classi di edifici. Tale valore è indipendente dal contenuto in frequenza della registrazione e può essere inferiore per la terza classe di edifici.

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s			
		Fondazioni			Piano alto
		Da 1 Hz a 10 Hz	Da 10 Hz a 50 Hz	Da 50 Hz a 100 Hz (*)	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, Edifici industriali, Costruzioni simili	20	Varia linearmente da 20 a 40	Varia linearmente da 40 a 50	40
2	Edifici residenziali, Costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 a 15	Varia linearmente da 15 a 20	15
3	Costruzioni non classificate in 1 e 2 ma degne di esser tutelate (es. monumenti)	3	Varia linearmente da 3 a 8	Varia linearmente da 8 a 10	8

Tabella 9 : Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni.

I valori di riferimento relativi alle vibrazioni con carattere continuo (cioè tali da indurre fenomeni di fatica o amplificazioni dovute alla risonanza nella struttura interessata) sono riportati nella tabella 9.

I valori sono indipendenti dal contenuto in frequenza del segnale e riguardano sia le misure in fondazione sia le componenti orizzontali della velocità ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato. Per la componente verticale dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la p.c.p.v. 10 mm/s limitatamente alle prime due classi di edifici e può essere inferiore per la terza classe di edifici.

Classe	Tipo Edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s (per tutte le frequenze)
1	Costruzioni industriali, Edifici industriali e Costruzioni strutturalmente simili	10
2	Edifici residenziali e Costruzioni simili	5
3	Costruzioni non classificati in 1 e 2 ma degne di esser tutelate (es. monumenti)	2.5

Tabella 10: Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni.

Si riportano anche le seguenti tabelle, di tipo *semplificate*, dove viene indicato il corrispondente valore di accelerazione ponderata in dB, in modo da poter confrontare questi dati con quelli precedenti della norma UNI 9614 che si riferisce al disturbo alle persone:

<i>Edificio</i>	V_{pk} (mm/s) <i>Velocità di picco</i>	L_{aw} (dB) <i>Accelerazione ponderata</i>
Edifici industriali	20-40	107.0-113.0
Edifici residenziali	5-15	95.0-104.5
Edifici storici	3-8	90.5-99.1

Tabella 11: Valori limite indicati per le vibrazioni di breve durata.

<i>Edificio</i>	V_{pk} (mm/s) <i>Velocità di picco</i>	L_{aw} (dB) <i>Accelerazione ponderata</i>
Edifici industriali	10	101.0
Edifici residenziali	5	95.0
Edifici storici	2.5	89.0

Tabella 12: Valori limite per le vibrazioni permanenti.

Dall'analisi dei valori limite indicati nell'apparato normativo si evidenzia che in generale si tratta di valori piuttosto elevati.

Anche per gli edifici storici, per i quali si prescrivono i livelli di vibrazione più bassi, la velocità di picco non deve superare i 2.5 mm/s, a cui corrisponde un livello di accelerazione ponderata pari a circa 89 dB.

Tale limite è dunque generalmente più alto di quello derivante dalla soglia del disturbo alle persone, che, sempre per edifici sensibili, è pari alla soglia di percezione (71 dB - UNI 9614).

Per le vibrazioni provocate nelle costruzioni dallo scoppio di mine, dalle attività di macchine di cantiere e dal traffico su strada e ferroviario, la normativa UNI 9916 rimanda, per i valori di riferimento, alla norma Svizzera SN 640312 "Effet des ébranlements sur les constructions" riportati nella tabella successiva [tabella 12]. La grandezza di riferimento è la velocità p.p.v., cioè il picco nel tempo del modulo del vettore velocità.

La norma è applicabile solo alle vibrazioni di frequenza maggiore di 8 Hz.

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Da 8 a 30 Hz	Da 30 a 60 Hz	Da 60 a 150 Hz
A	Costruzioni molto poco sensibili (per es. ponti, gallerie, fondazioni di macchine)	Occasionale Frequente Permanente	Fino a tre volte i Valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i Valori corrispondenti alla classe C
B	Costruzioni poco sensibili (per es. edifici industriali in cemento armato o metallici) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i Valori corrispondenti alla classe C
C	Costruzioni normalmente sensibili (per es. edifici di abitazione in muratura di cemento, cemento armato o mattoni, edifici amministrativi, scuole, ospedali, chiese in pietra naturale o mattoni intonacati) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale	15	20	30
		Frequente	6	8	12
		Permanente	3	4	6
D	Costruzioni particolarmente sensibili (per es. monumenti storici e soggetti a tutela, case con soffitti in gesso, edifici della classe C nuovi o ristrutturati di recente)	Occasionale Frequente Permanente	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà

Tabella 13: Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni transitorie sulle costruzioni.

In conclusione la norma UNI 9916 prende come riferimento le norme DIN 4150-3:1999 e ISO 4866:1996, dalle quali riprende anche le rispettive tabelle dei limiti da applicarsi alle diverse condizioni.

5.3. DIN 4150-3:1999

Le norme tedesche DIN 4150-3 sono tra le più diffuse a livello internazionale e vengono riprese anche nelle nostre norme UNI 9916. Tali normative prendono in considerazione anche il problema della sicurezza contro il danneggiamento strutturale degli edifici e sono, al momento attuale, tra i riferimenti più completi ed esauritivi per l'analisi degli effetti delle vibrazioni meccaniche.

Il parametro descrittore del fenomeno vibratorio utilizzato è la massima velocità assoluta di vibrazione, rilevata indipendentemente in direzione orizzontale o verticale.

Per la valutazione del livello di vibrazione, la norma indicata individua due approcci adatti a due tipologie diverse di vibrazione meccanica:

- a breve;
- a lungo termine.

La normativa tedesca prevede che le misure di vibrazione vengono realizzate con trasduttori posti sulle fondazioni, sui muri esterni dell'edificio e sul piano più alto della struttura.

Nel caso in cui non si riescano a raggiungere le fondazioni, o per la mancanza delle fondazioni stesse, il sensore deve essere posizionato a non più di 0,5 m dal suolo; gli assi dei trasduttori devono essere diretti perpendicolarmente al pavimento ed uno di essi, quello in direzione orizzontale, deve essere parallelo ai muri esterni.

Per pavimenti molto ampi sono necessari più punti di misura, mentre nel caso in cui sia necessario solo un trasduttore sul pavimento, questo deve essere posizionato nel punto più eccitato dalla propagazione delle vibrazioni meccaniche, il quale risulta essere molto spesso il centro del pavimento o in generale del solaio.

I valori di riferimento della velocità massima di vibrazione, in funzione del campo di frequenza e per tipologie strutturali, vengono riassunti nella tabella seguente:

Categoria	Tipo di strutture	Velocità di vibrazione in mm/s *			
		Misura alle fondazioni			Misura al pavimento ultimo piano
		Campi di frequenza (Hz)			Frequenze diverse
		< 10	10-50	50-100**	
1	Edifici utilizzati per scopi commerciali ed edifici industriali e simili	20	20-40	40-50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20	15
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3-8	8-10	8
* Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura.					
** Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna.					

Tabella 14: Valori di riferimento della velocità massima di vibrazione, in funzione del campo di frequenza e per tipologie strutturali.

Il verificarsi del superamento di questi valori indicati non comporta necessariamente un danno alle strutture esposte, ma indica la necessità di eseguire ulteriori indagini per approfondire l'effetto che la propagazione del fenomeno vibratorio ha indotto sulla struttura e la conseguente pericolosità del fenomeno stesso.

La normativa precisa di prestare attenzione a valori di velocità delle particelle superiori a 20 mm/s, adottando i valori limite di soglia corrispondenti a quelli definiti per le strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni meccaniche.

5.4. ISO 4866:1996

La normativa ISO 4866 stabilisce i valori limite di soglia per la valutazione del danno indotto dalla pronazione delle vibrazioni meccaniche in funzione di alcuni parametri, tra i quali:

- la durata del fenomeno vibratorio;
- l'intervallo di frequenza di interesse,
- la tipologia e lo stato di conservazione delle strutture esposte;
- le frequenze naturali e lo smorzamento caratteristico delle strutture;
- la dimensione della struttura;
- l'influenza del suolo;

proponendo una metodologia di misurazione ed un procedimento di analisi e valutazione delle misure. L'intervallo di frequenza di interesse è individuato tra 0,1 Hz e 300 Hz.

Lo standard classifica tutte le tipologie delle strutture potenzialmente esposte in funzione delle categorie, della tipologia di fondazione e della natura del terreno (Allegato A).

Le categorie individuate sono otto per due diversi gruppi di edifici; in particolare, al primo gruppo appartengono strutture in muratura portante, in pietra, tufo o mattoni, costruzioni pesanti con coefficienti di smorzamento molto elevati e strutture elastiche tipiche delle zone sismiche; al secondo appartengono edifici di recente costruzione con scheletro in cemento armato o con elementi prefabbricati in cemento armato o precompresso, sono strutture leggere con coefficienti di smorzamento più bassi.

Le classi delle diverse fondazioni delle costruzioni individuate dalla normativa dipendono dal tipo di comportamento delle stesse al variare della lunghezza d'onda delle vibrazioni meccaniche:

1. CLASSE A: pali legati in calcestruzzo armato, acciaio o legno, platee rigide in cemento armato e muri di sostegno a gravità;
2. CLASSE B: pali non legati in cemento armato o legno e fondazioni continue a trave rovescia;
3. CLASSE C: muri di sostegno leggeri, fondazioni massicce in pietra o strutture prive di fondazioni.

Oltre a ciò esistono le sei categorie che vanno a definire le tipologie di terreno:

1. Tipo a: rocce non fessurate, rocce molto solide leggermente fessurate e sabbie cementate;
2. Tipo b: terreni compattati a stratificazione orizzontale;
3. Tipo c: terreni poco compattati a stratificazione orizzontale;
4. Tipo d: piani inclinati, con superficie di scorrimento potenziale;
5. Tipo e: terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature;
6. Tipo f: materiale di riporto.

Una successiva integrazione alla normativa ha aggiunto come parametro la valutazione dell'interazione tra terreno e fondazione descrivendone i conseguenti effetti.

La combinazione tra le precedenti classificazioni (categorie del tipo di struttura, del tipo di fondazione e della tipologia del terreno) è stata sintetizzata a livello normativo nella seguente tabella, dove sono riportate le classi degli edifici in funzione della resistenza alle vibrazioni:

Classe edificio*	Categoria di struttura							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Classe di fondazione (maiuscolo) e tipo di terreno (minuscolo)							
1	Aa							
2	Ab	Aa	Aa	Aa				
3		Ab,Ba	Ab,Ba	Ab	Aa,AB			
4		Ac,Bc	Bc	Ac	Ac,Ba,Bb			
5		Bc	Ac		Bc	Ba		
6		Af		Ad	Bd	Bb,Ca	Ba	
7			Af	Ae	Be	Bc,Cb	Bb,Ca	
8						Be,Cc	Bc,Cb	
9		Bf				Cd	Bd,Cc	Aa
10			Bf			Ce	Be,Cd	Ab
11				Cf	Cf		Ce	Ba
12						Cf		Bc,Ca
13							Cf	Bd,Cb,Cc
14								Cd,Ce,Cf
* Numero di classe elevato = minore resistenza meccanica alle vibrazioni								

Tabella 15: Classi degli edifici in funzione della resistenza alle vibrazioni.

La normativa evidenzia, inoltre, l'importanza della frequenza naturale degli edifici e perciò propone una metodologia per la loro determinazione che prevede l'utilizzo di eccitatori o equazioni empiriche.

La normativa non stabilisce valori limite di soglia, ma propone una metodologia di misurazione che preveda la scelta del tipo di trasduttore (geofono od accelerometro) ed individua le posizioni dei trasduttori in corrispondenza delle fondazioni e sul suolo al fine di determinare la relativa funzione di trasferimento.

Contemporaneamente, la norma ISO 4866 impone l'esecuzione di misure all'interno della struttura fissando le posizioni dei sensori in corrispondenza del piano più alto per strutture al massimo di 4 piani, e stazioni di misura ad intervalli di 10 m, nel caso di edifici più larghi di 10 m. La posizione dei trasduttori inoltre dovrà essere scelta in funzione del modo proprio di vibrare della struttura che genera deformazioni e sollecitazioni maggiori.

5.5. Stati limite di servizio – UNI 9614

La norma UNI 9614 si occupa dei livelli di tollerabilità nei confronti del disturbo agli occupanti degli edifici definendo i metodi di misurazione della vibrazioni di tipo costante trasmesse agli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. Le vibrazioni vengono espresse mediante il livello L in dB del valore efficace o r.m.s. dell'accelerazione ponderata in m/s^2 :

$$L = 20 \log \left(\frac{a}{a_0} \right) \quad \left(\text{con } a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2 \right)$$

Nel caso specifico del comfort degli occupanti, la norma rimanda ai criteri di tollerabilità contenuti nelle normative ISO 2631/1 e ISO 2631/2, le quali prescrivono un controllo di accettabilità basato sull'accelerazione attraverso l'analisi spettrale per terzi d'ottava con ordinate ponderate in funzione della sensibilità umana.

Le direzioni lungo le quali si propagano le vibrazioni vengono riferite alla postura assunta dal soggetto esposto andando a definire in questo modo gli assi :

- asse z , passante per il coccige e la testa ;
- asse x , passante per la schiena ed il petto ;
- asse y , passante per le due spalle.

La direzione della verticale coincide con l'asse z per un soggetto in piedi o seduto, con l'asse x per un soggetto disteso.

Gli effetti delle vibrazioni di frequenza diversa sono cumulativi per cui si utilizza un metodo di misura basato sulla valutazioni complessiva delle accelerazioni nell'intervallo 1 – 80 Hz. Dato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono diversi a seconda della frequenza delle accelerazioni, si devono impiegare dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo.

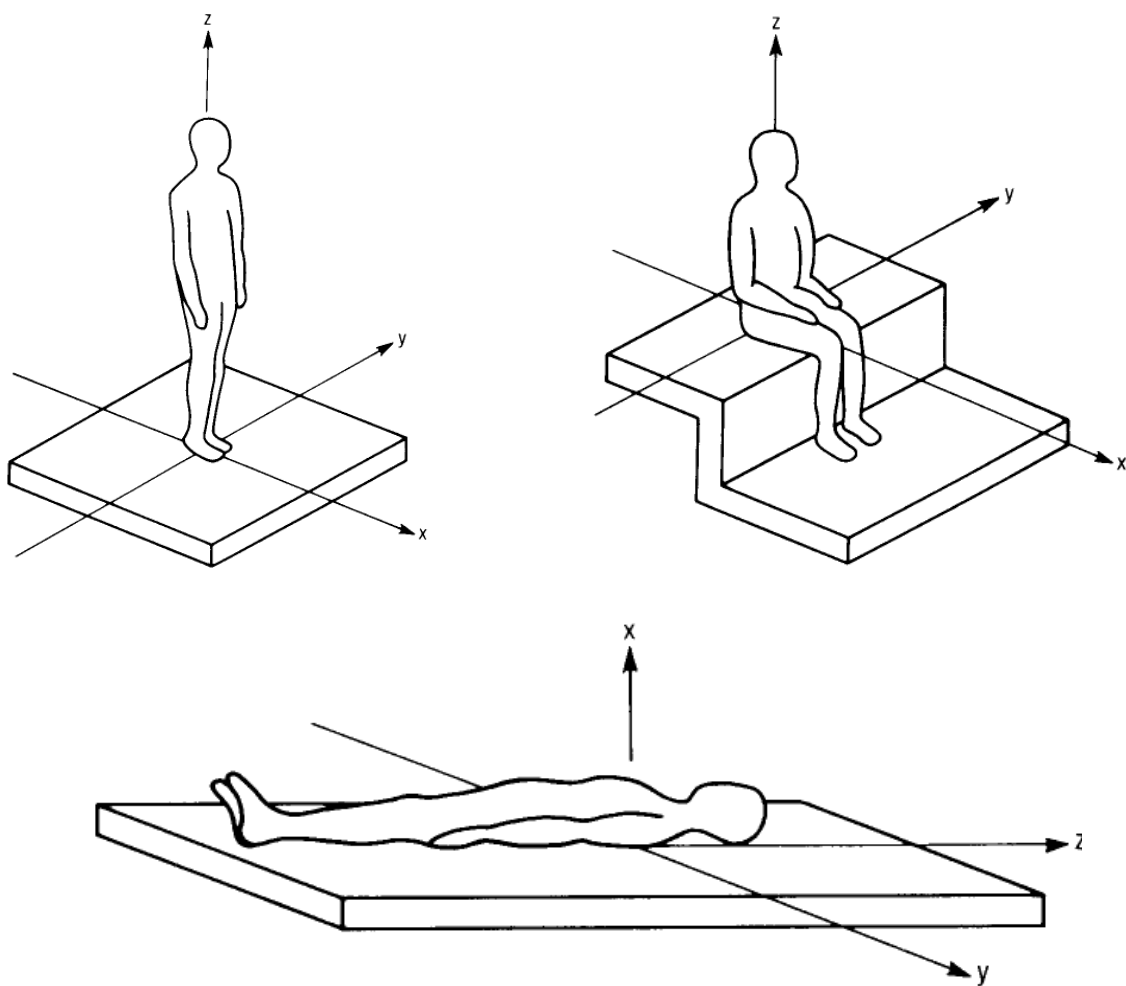
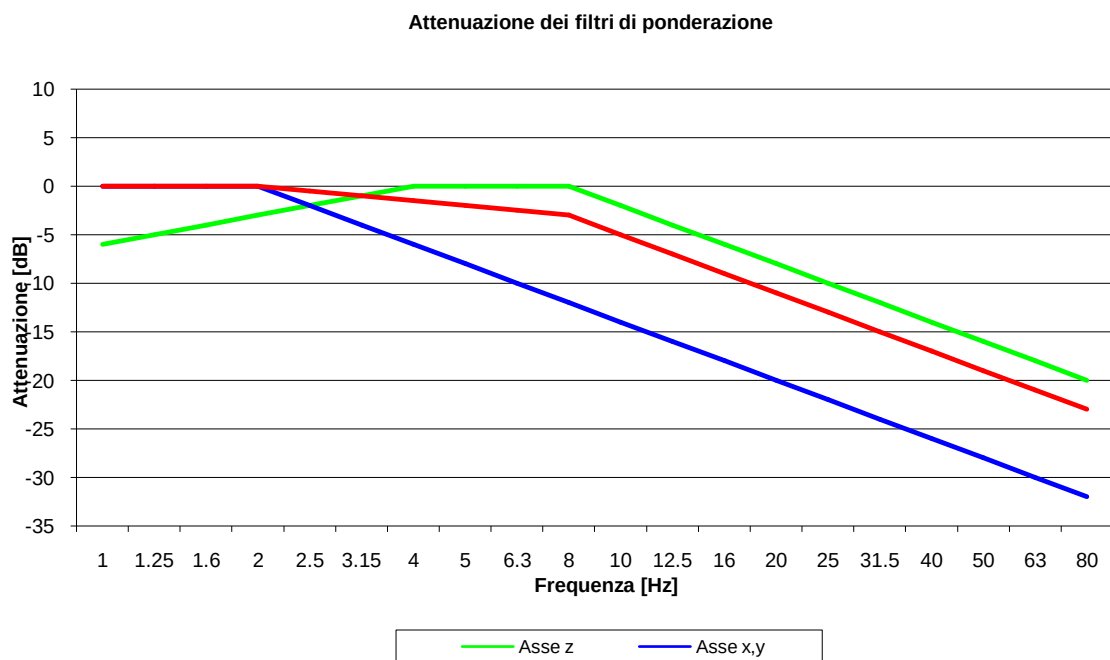


Figura 9 : direzioni delle vibrazioni e posizioni dei rilievi

I locali o gli edifici in cui vengono immesse le vibrazioni vengono classificati a seconda della loro destinazione d'uso in :

- aree critiche ;
- abitazioni ;
- uffici ;
- fabbriche ;

per aree critiche si intendono gli ospedali, i laboratori, i locali in cui si svolgono lavori manuali delicati, etc. anche ai fini della valutazione del disturbo le aree critiche sono considerate tali solo durante lo svolgimento delle operazioni.

La soglia di percezione delle vibrazioni si pone a :

- $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ per l'asse z ;
- $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ per gli assi x,y ;

valori di accelerazione ponderata in frequenza.

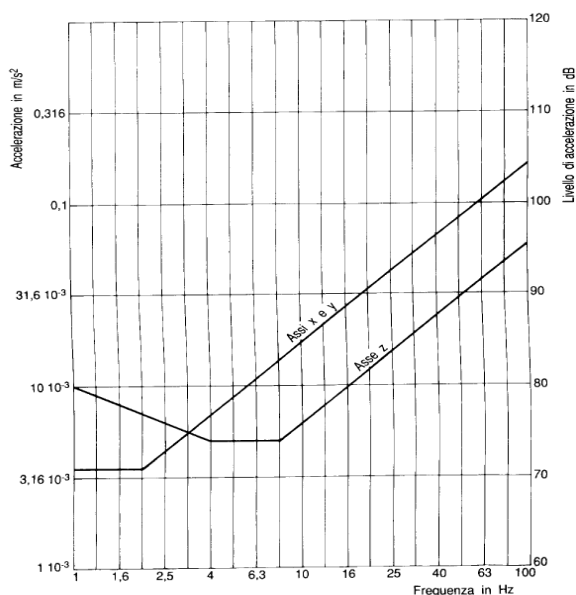


Figura 10 : curve di soglia di percezione delle vibrazioni

Per la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante, i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza o i corrispondenti livelli, eventualmente corretti a seconda dell'intensità del livello di vibrazioni residue, più elevati riscontrati sui tre assi, si possono confrontare con i limiti riportati nelle tabelle seguenti. Nel caso di utilizzo del filtro di ponderazione per posture variabili o non note, si devono assumere come riferimento i valori indicati per gli assi x ed y.

	A [m/s²]	L [dB]
Aree critiche	5,0 10 ⁻³	74
Abitazioni (periodo notturno)	7,0 10 ⁻³	77
Abitazioni (periodo diurno)	10,0 10 ⁻³	80
Uffici	20,0 10 ⁻³	86
Fabbriche	40,0 10 ⁻³	92

Tabella 16 : valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse z

	A [m/s²]	L [dB]
Aree critiche	3,6 10 ⁻³	71
Abitazioni (periodo notturno)	5,0 10 ⁻³	74
Abitazioni (periodo diurno)	7,2 10 ⁻³	77
Uffici	14,4 10 ⁻³	83
Fabbriche	28,8 10 ⁻³	89

Tabella 17 : valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi gli assi x ed y

5.6. Metodiche di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo – UNI 11048

La norma, sperimentale, definisce i metodi di misurazione delle vibrazioni e degli urti trasmessi agli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi, al fine di valutare il disturbo arrecato ai soggetti esposti. L'intervallo di frequenza da esaminare è compreso fra 1 Hz ed 80 Hz, ed essendo la sensazione percettiva dei singoli soggetti esposti alle vibrazioni diversa in funzione del contenuto spettrale dell'accelerazione, il segnale deve essere ponderato in frequenza con un filtro di tipo "combinato" W_m la cui definizione matematica è contenuta nell'appendice A dell'ISO/DIS 2631 – 2 : 2001.

Le caratteristiche del filtro W_m sono intermedie rispetto ai due filtri W_g e W_d definiti dallo stesso ISO/DIS 2631 – 2 : 2001, ed ai due filtri W_k e W_d definiti dalla ISO 2631 – 1 : 1997 ed ai due filtri definiti per gli assi verticale ed orizzontali della ISO 2631 – 2 : 1989.

L'accelerazione ponderata in frequenza deve essere rilevata impiegando la costante di tempo slow, considerando il valore massimo raggiunto nel corso della misurazione MTVV, ovvero il valore massimo del transiente delle vibrazioni, metodo definito dalla ISO 2631 -1 : 1997.

Per la valutazione si considera il valore MTVV più elevato dei tre valori MTVV rilevati simultaneamente sui tre assi, ovvero il valore massimo determinato sull'asse dominante.

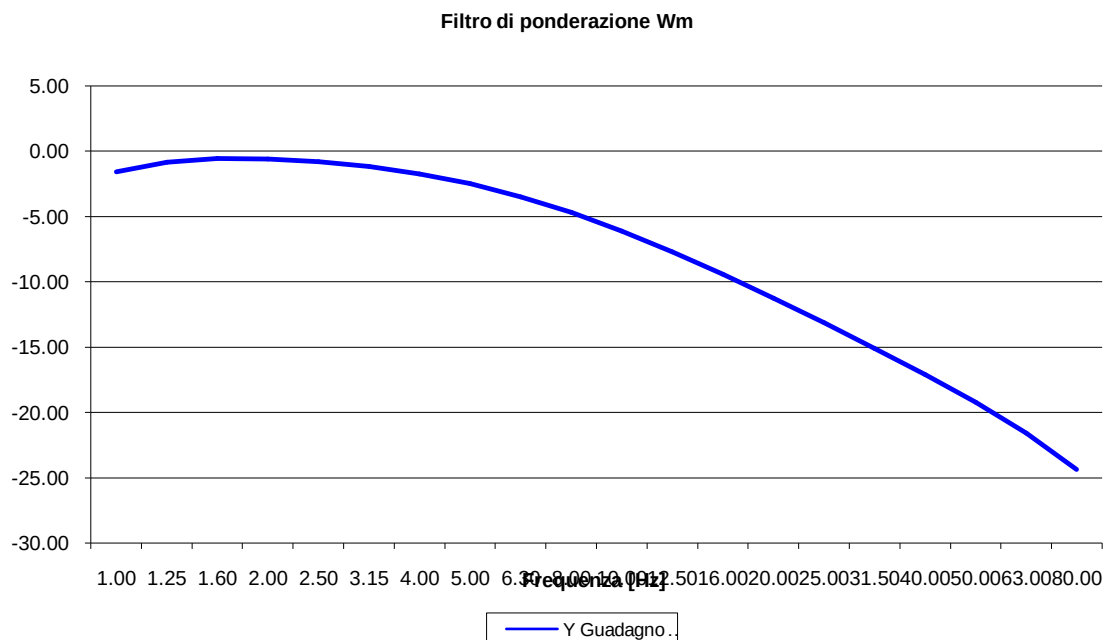


Figura 11 : filtro di ponderazione Wm

5.7. Metodiche di misura delle vibrazioni impulsive

Nel caso di vibrazioni meccaniche di tipo impulsivo si rileva con strumentazione dotata di filtri di ponderazione il valore di picco dell'accelerazione ponderata in frequenza e si moltiplica tale valore per il fattore 0.71 per stimare il corrispondente valore efficace. Il valore efficace così calcolato va confrontato con i limiti sotto riportati qualora il numero degli eventi impulsivi giornalieri sia pari o inferiore a 3.

Nel caso in cui il numero degli eventi impulsivi giornalieri sia superiore a 3, i limiti riportati, relativi alle abitazioni di giorno, agli uffici ed alle fabbriche, vengono diminuiti in base alla quantità di eventi ed alla loro durata, moltiplicandoli per il fattore F.

Nessuna diminuzione è prevista per i limiti relativi alle abitazioni di notte ed alle aree critiche.

Nel caso di impulsi con durata inferiore ad 1s, il fattore F è pari :

$$1.7 \cdot N^{-0.5}$$

dove N = numero di eventi giornalieri.

Nel caso di impulsi di durata maggiore ad 1s, il fattore F è pari :

$$1.7 \cdot N^{-0.5} \cdot t^{-k}$$

dove t = durata evento, e k vale 1.22 per pavimenti in calcestruzzo e 0.32 per pavimenti in legno.

Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello costante o variabile, si adotteranno questi ultimi come valori limite.

<i>Aree o edifici</i>	<i>Asse z</i>	<i>Assi x e y</i>
Aree critiche	5.0	3.6
Abitazioni (per. notturno)	7.0	5.0
Abitazioni (per. diurno)	300	220
Uffici e fabbriche	640	460

Tabella 18 : valori limite delle accelerazioni per le vibrazioni impulsive [mm/s²]

5.8. Considerazioni sull'apparato normativo

Per quanto concerne gli effetti legati al degrado delle strutture degli edifici interessati da fenomeni vibratori si può fare riferimento alla norma UNI 9916, che è in sostanziale accordo con i contenuti di altre norme europee: ISO 4866 e DIN 4150/3.

La normativa definisce come parametro di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici il massimo valore (o valore di picco) delle componenti delle velocità di vibrazione, valutate in fondazione o sul pavimento dell'ultimo piano. La stessa norma fornisce in appendice anche alcuni valori di riferimento.

Da un confronto tra la UNI 9614 e la UNI 9916 si può osservare che la prima stabilisce valori generalmente più restrittivi rispetto alla seconda, per cui si conclude che, in sostanza, il raggiungimento del rispetto dei limiti di soglia per non avere effetti di disturbo alle persone occupanti gli edifici a diverso titolo (UNI 9614) è sicura garanzia anche di non avere effetti dannosi per le strutture edilizie.

6. VIBRAZIONI INDOTTE DA TRAFFICO SU GOMMA

Nel caso dei veicoli su gomma che si trovano ad transitare su infrastrutture viarie, il disturbo che essi possono arrecare ai ricettori potenzialmente esposti è sia acustico che dovuto alla propagazione delle vibrazioni meccaniche ambientali.

Il disturbo, provocato principalmente dalle emissioni di rumore da parte del motore e dall'attrito di rotolamento, sta drasticamente calando grazie agli sforzi dell'industria automobilistica.

Al contrario, il disturbo proveniente dall'interazione delle gomme con la pavimentazione è molto più difficile da controllare, poiché dipende fortemente dalle condizioni di manutenzione del manto stradale. L'obiettivo principale della progettazione delle sospensioni degli autoveicoli, infatti, è quello del comfort del viaggiatore e della tenuta di strada e non quello di minimizzare il disturbo ambientale.

Una schematizzazione del fenomeno fisico è riportata nella figura successiva, nella quale si individuano i seguenti elementi che influenzano il fenomeno:

- 1) il fondo stradale è dotato di asperità (rugosità); le ruote seguono le asperità del fondo stradale e le trasmettono al veicolo attraverso gli ammortizzatori; il veicolo si mette in vibrazione;
- 2) la vettura entra in oscillazione e trasmette una forza dinamica al sottofondo;
- 3) il sottofondo filtra le vibrazioni e le trasmette al terreno, in cui si generano onde elastiche;
- 4) il terreno filtra le vibrazioni e le trasmette alle fondazioni degli edifici;
- 5) le fondazioni mettono in vibrazione gli elementi strutturali e non strutturali degli edifici.

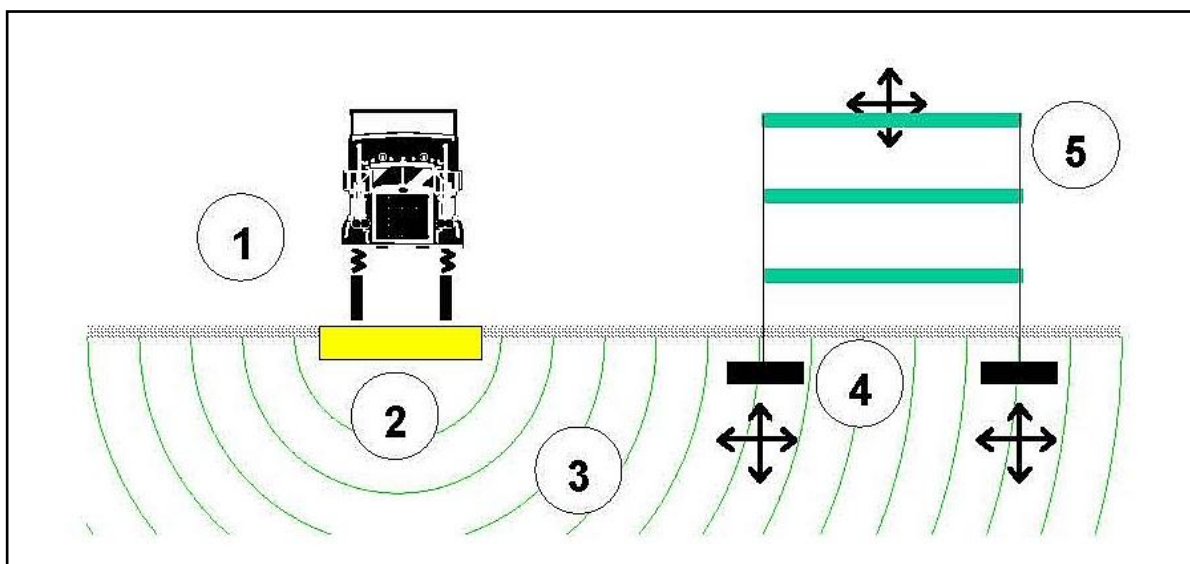


Figura 12: Schematizzazione delle vibrazioni indotte da traffico su gomma.

Dalle misure in sito e dalla modellazione analitica e numerica del fenomeno si riconosce che un ruolo fondamentale è svolto dalla rugosità del fondo stradale, per cui le sue condizioni di manutenzione influenzano l'entità delle vibrazioni trasmesse nel terreno circostante.

Tale evidenza fisica è mostrata nella figura 13, da cui si ricava che, a parità di altre condizioni, la cattiva manutenzione del fondo stradale può comportare un incremento anche di un ordine di grandezza

dell'ampiezza delle vibrazioni trasmesse all'edificio; da questa figura si osserva anche che il livello delle vibrazioni prodotte è maggiore nel caso di terreno deformabile rispetto al caso di terreno rigido.

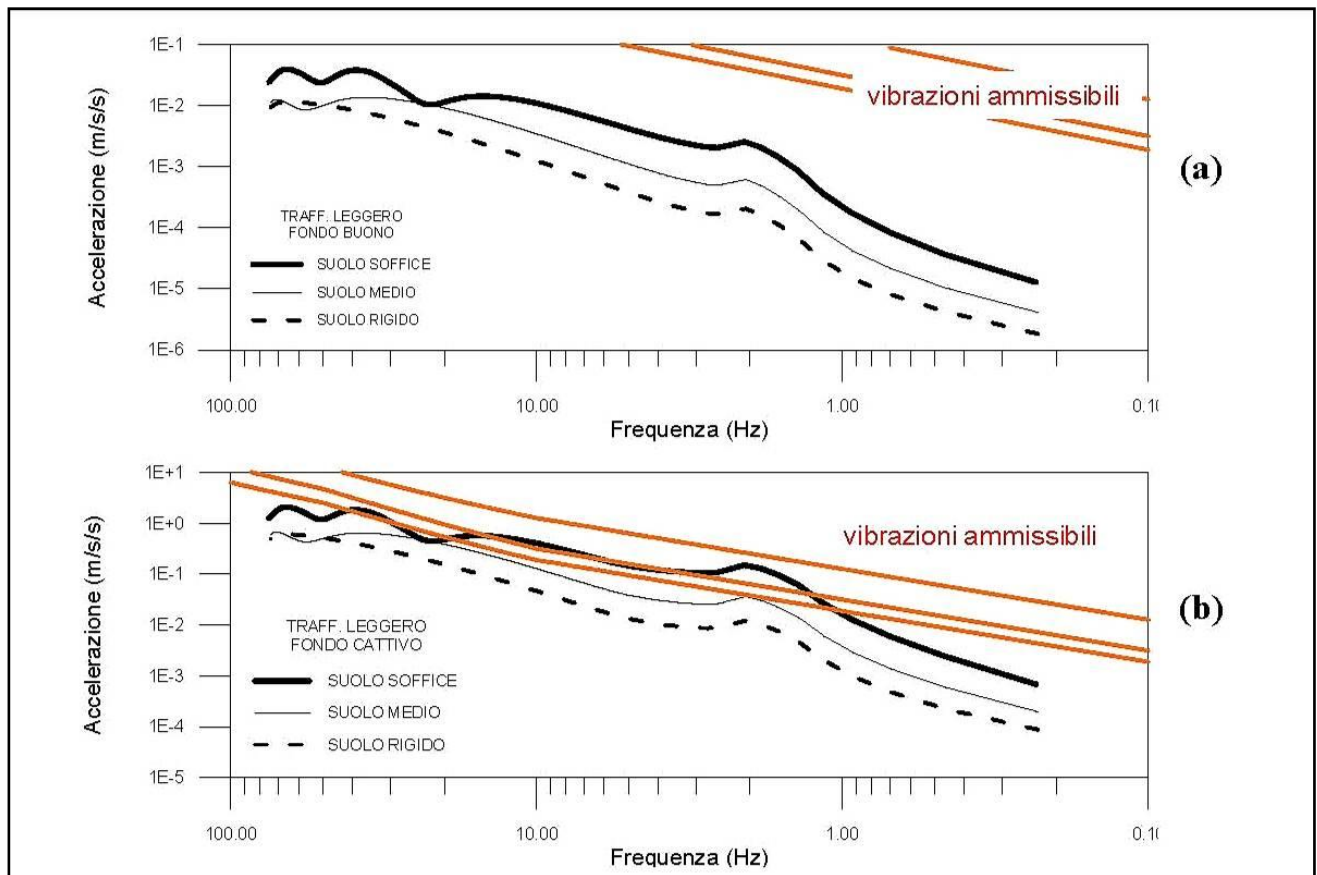


Figura 13: Influenza della rugosità del fondo stradale – (a) fondo buono – (b) fondo scadente.

Altri fattori che influenzano il fenomeno della propagazione delle vibrazioni meccaniche ambientali dovute al traffico veicolare sono:

- le caratteristiche dinamiche delle sospensioni del veicolo;
- la velocità del veicolo (a parità di altri fattori, le vibrazioni crescono all'aumentare della velocità di percorrenza);
- le caratteristiche del sottofondo (è possibile agire modificandone le caratteristiche dinamiche, ad esempio con strati isolanti tra pavimentazione e sottofondo o con sottofondi rigidi);
- la propagazione delle vibrazioni nel terreno (è possibile intervenire, ad esempio con trincee, ma il rimedio è costoso e poco efficace alle basse frequenze);
- le caratteristiche dinamiche degli edifici (è possibile modificare la risposta dell'edificio, ad esempio ricorrendo ad un sistema di isolamento, ma l'intervento è abbastanza costoso e praticamente non conveniente per gli edifici esistenti).

6.1. Generazione e propagazione delle vibrazioni.

Nello studio della propagazione delle vibrazioni nel terreno risulta utile suddividere la regione interessata in tre zone distinte, individuabili come:

1. zona di generazione;
2. zona di propagazione;
3. zona di ricezione.

La zona di generazione del disturbo vibratorio comprenderà il veicolo, la pavimentazione, gli strati di fondazione e una porzione del terreno circostante.

In questa zona la vibrazione nasce e viene trasferita al terreno. Estesa letteratura riporta studi condotti sui meccanismi alla base della generazione e propagazione di vibrazioni a bassa frequenza in terreni soffici, costituiti da depositi di argilla e limo.

Il modello che meglio si presta a giustificare i dati provenienti dai rilevamenti sperimentali e basato sull'interazione tra il carico mobile e il sistema stratificato costituito dalla pavimentazione, dalla sovrastruttura e dagli strati di terreno sottostanti.

Questo modello vede la vibrazione amplificarsi con l'incremento del carico per asse e della velocità dei veicoli, e smorzarsi con l'aumento della capacità di ripartizione dei carichi della sovrastruttura.

La zona di propagazione è costituita dal terreno che trasmette la sollecitazione generata agli edifici vicini. Per terreni che presentano stratificazione prevalentemente orizzontale, la maggior parte dell'energia di vibrazione viene trasmessa attraverso onde di superficie del tipo Rayleigh.

Tali onde vengono attenuate in parte a causa di uno smorzamento geometrico, in parte a causa dell'assorbimento di energia da parte dei materiali che costituiscono il terreno.

La zona di ricezione, nel caso di un edificio nelle vicinanze della strada, è costituito dalle sue fondazioni e dal terreno nelle immediate vicinanze che interagisce con esse.

Le vibrazioni si trasmettono alle fondazioni attraverso l'interazione dinamica con il terreno; in seguito vengono trasferite, e di solito amplificate, attraverso l'intera struttura dell'edificio.

Fattori importanti nell'influenzare questo fenomeno di propagazione sono la rigidità e la massa delle fondazioni oltre che le loro dimensioni rispetto alla lunghezza d'onda delle vibrazioni, in aggiunta alle frequenze proprie dell'edificio.

Considerando dunque un semispazio elastico, costituito da un terreno ideale senza smorzamento, si può notare che:

- ☐ le onde di volume P ed S (primarie e secondarie) decrescono in ampiezza al crescere della distanza dalla sorgente, sia questa di tipo puntuale o lineare;
- ☐ le onde di Rayleigh decadono in ampiezza più lentamente nel caso di sorgente puntuale, mentre si mantengono invariate nel caso di sorgente lineare.

Le onde-R risultano quindi avere un ruolo preponderante nel fenomeno della propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico, considerando che l'infrastruttura stradale può essere in prima approssimazione rappresentata come una sorgente lineare di sollecitazione.

La presenza delle onde-R ha quindi primaria importanza in ogni tentativo di isolamento delle strutture di fondazione.

Può essere fuorviante sottovalutare l'azione delle onde P e S per il fatto che esse si propagano a grande profondità, dove si pensa non possano causare problemi.

Si evidenzia che una caratteristica comune a quasi tutti i terreni è quella di divenire sempre più compatti con l'aumentare della profondità: questa caratteristica può portare ad una forte diffrazione dei fronti d'onda e talvolta anche a forme di riflessione da parte degli strati al di sotto della superficie.

La propagazione dell'energia residua, liberata dalla sorgente di vibrazione, produce onde sismiche, che sono dipendenti solo dalle proprietà fisiche ed elastiche del mezzo. Queste onde si possono distinguere in onde di volume (onde **P** e **S**) e di superficie (onde **R** e **L**).

Le prime si propagano rispettivamente longitudinalmente e trasversalmente alla direzione di avanzamento (figura 14 e 15), le seconde si propagano solamente nel primo strato superficiale in direzione trasversale (onde L) o, nel caso di onde R, lungo la direzione longitudinale alla propagazione anche se le particelle si muovono lungo una traiettoria ellittica (figura 16 e 17).

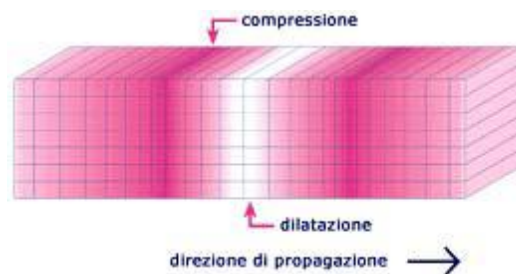


Figura 14: Propagazione delle onde di volume (P)

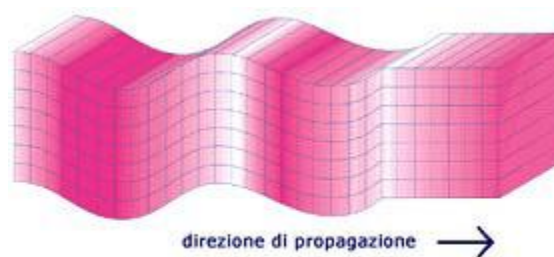


Figura 15: Propagazione delle onde di volume (S)

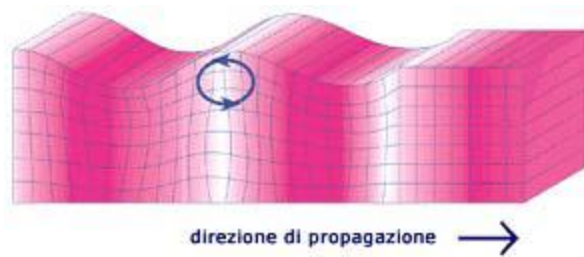


Figura 16: Propagazione dell'onda di superficie di Rayleigh.



Figura 17: Propagazione dell'onda di superficie di Love.

Si distinguono quindi tre tipi principali di onde che trasportano energia vibrazionale:

1. Onde di compressione (**P**)
2. Onde di Taglio (**S**)
3. Onde di superficie:
 - Orizzontali (**R**)
 - Verticali (**L**)

I primi due tipi sono onde di volume ("body-waves"), mentre le onde di superficie, come indica il nome, si propagano sull'interfaccia fra due strati con diverse proprietà meccaniche, principalmente quindi sulla superficie di separazione fra terreno ed aria.

Va anche osservato che le onde (**L**), non vengono facilmente generate dal transito dei veicoli, in quanto richiederebbe l'imposizione di moti orizzontali alla fonte delle vibrazioni.

Nella pratica quindi, si può ritenere che vi sia predominanza delle onde di superficie, in particolare di tipo (**R**) che si propagano lungo interfaccia suolo-aria.

Va inoltre osservato che la velocità di propagazione dei diversi tipi di onde non è sempre la stessa: le onde di compressione, (**P**) sono le più veloci, mentre le onde di taglio e di superficie viaggiano con velocità più basse, in funzione del valore del modulo di Poisson del terreno.

Da analisi sperimentali si è dimostrato che le vibrazioni verticali sono sempre di intensità maggiore rispetto a quelle orizzontali: cinque volte rispetto a quelle trasversali e due volte di quelle longitudinali. Le componenti verticali delle vibrazioni meccaniche risultano amplificate nei solai, specialmente se in legno, mentre le componenti orizzontali possono causare oscillazioni che si risentono soprattutto ai piani alti degli edifici.

Vibrazioni che si trasmettono attraverso:	Frequenza (HZ)
Aria	50÷100 (alta frequenza)
Suolo	4÷20 (bassa frequenza)

Tabella 19: Frequenze vibrazioni attraverso l'aria ed il suolo.

Direzione vibrazioni che si trasmettono attraverso il suolo:	Frequenza (HZ)
Taglio: (verticali)	5 volte > alle trasversali 2 volte > alle longitudinali
Compressione: - trasversali - longitudinali	5 volte < alle verticali 2 volte < alle verticali

Tabella 20: Confronto intensità vibrazioni attraverso il suolo per direzione.

Le conseguenze della propagazione delle vibrazioni meccaniche sugli edifici dipendono dal mezzo di trasmissione, dalla tipologia della struttura e dall'energia prodotta dall'origine della vibrazione. La propagazione della vibrazione avviene attraverso il terreno e dopo aver raggiunto le strutture di fondazione si propaga sull'intera struttura. Nel terreno l'onda di compressione si diffonde sotto forma semisferica in tutte le direzioni come indicato nello schema esposto.

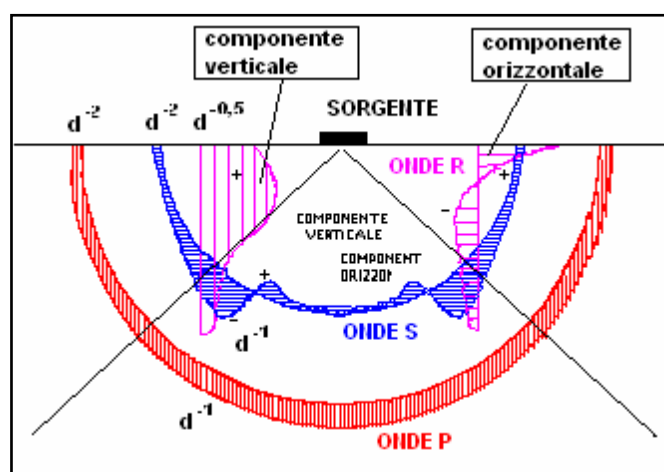


Figura 18: Trasmissione e attenuazione delle onde sismiche all'aumentare della profondità.

In un mezzo isotropo l'energia sviluppata da un impulso verticale si trasmette per il 67% come onda superficiale e per la rimanente quota di energia sotto forma di onde di taglio e di compressione.

Da questo valore teorico si comprende come sia l'onda di superficie quella che va maggiormente ad interessare le fondazioni degli edifici per quanto concerne il trasferimento dell'energia meccanica trasmessa attraverso le vibrazioni ambientali.

6.2. Propagazione delle onde di vibrazione negli edifici

L'energia prodotta dal fenomeno vibratorio all'origine dello stesso, tende ad attenuarsi lungo il percorso in funzione della tipologia del terreno lungo cui si ha la propagazione.

In generale un terreno secco, e con materiali grossolani, ha un'attenuazione maggiore di un terreno composto di materiale umido e/o da elementi fini. Si evidenzia quindi come le falde acquifere a quote elevate tendono ad agevolare la trasmissione dell'energia meccanica dovuta ai fenomeni vibratori.

Una volta raggiunte le fondazioni, la vibrazione meccanica si propaga attraverso le strutture e può dare vita a fenomeni di amplificazione nel caso di strutture snelle o nei casi in cui la frequenza dell'impulso corrisponda a quella propria andando a provocare dei fenomeni di risonanza.

Le onde di sollecitazione legate alla propagazione delle vibrazioni meccaniche, dal punto di vista della loro pericolosità per l'integrità degli edifici che incontrano nel loro percorso, si possono definire utilizzando due parametri:

1. Frequenza;
2. ampiezza.

Sulla base di questi due parametri l'apparato normativo vigente ci indica dei limiti di pericolosità per diversi descrittori fisici del fenomeno : velocità o accelerazione.

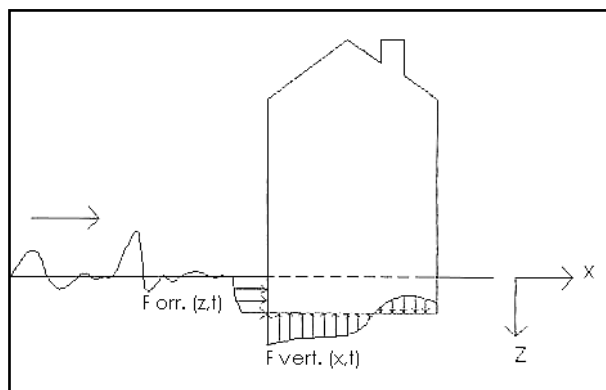


Figura 19: Impatto sulle fondazioni.

La propagazione delle onde all'interno degli edifici dipende dall'interazione suolo-fondazioni e dalla propagazione attraverso le strutture portanti. La scarsa solidarietà tra fondazioni e terreno comporta dei fenomeni dissipativi, differenti per le diverse tipologie di fondazione.

La presenza di solai, la cui struttura manifesta frequenze di risonanza comprese tra $10 \div 30$ Hz, può causare problemi di amplificazione particolari con esagerazione della risposta dinamica alla propagazione dell'energia meccanica.

Per la valutazione degli effetti legati alla propagazione delle vibrazioni meccaniche negli edifici si deve tenere conto dei seguenti fattori:

1. attenuazione dovuta alla perdita di energia vibrazionale dovuta all'accoppiamento terreno - fondazione;
2. amplificazione dovuta alla presenza di eventuali fenomeni di risonanza per la coincidenza delle frequenze di propagazione con le frequenze proprie della struttura dell'edificio;
3. variazione del livello dovuta alla propagazione, in direzione verticale, passando dai piani bassi verso quelli alti;
4. trasformazione delle vibrazioni che si trasmettono attraverso le strutture orizzontali e verticali in rumore a bassa frequenza.

6.3. Attenuazione dovuta all'accoppiamento suolo fondazioni.

In letteratura esistono diversi studi che riportano i valori di attenuazione delle onde vibrazionali in funzione della banda di frequenza e della tipologia di edificio (tabella 13).

Considerando per ciascun tipo di edificio il valore della attenuazione ed applicandolo a ciascuna banda di frequenza della vibrazione meccanica eccitante si ottengono i livelli previsti sulla fondazione.

<i>Tipo edificio</i>	<i>4 Hz</i>	<i>8 Hz</i>	<i>16 Hz</i>	<i>31.5 Hz</i>	<i>63 Hz</i>	<i>125 Hz</i>
In muratura su pali	5	5	6	7	10	13
In muratura su platea	10	10	12	14	13	13
Villino	4	4	4	5	5	4
In muratura a 2-4 piani	4	5	10	12	12	11
Commerciali 1-2 piani	7	7	7	8	8	7

Tabella 21: Valori di attenuazione delle onde vibrazionali in funzione della banda di frequenza e della tipologia di edificio.

6.4. Amplificazione dovuta alla presenza di risonanze.

Si evidenzia la necessità di studiare in via preliminare le frequenze proprie della struttura potenzialmente esposta e poi confrontarli per costatarne la coincidenza o meno con le frequenze delle componenti vibrazionali.

La norma DIN 4150, per le frequenze orizzontali, suggerisce di calcolare le frequenze proprie ai vari piani con la formula:

$$f_0 = 10/n$$

dove n è il numero del piano.

Per le frequenze connesse a vibrazioni verticali, la frequenza fondamentale dipende con proporzionalità diretta dalle condizioni di vincolo e dallo spessore del solaio, mentre con proporzionalità inversa dalla luce libera, dal modulo di elasticità di Young e dalla densità del materiale costituente il solaio.

Oltre alla prima frequenza di risonanza verticale, è da considerare anche la seconda frequenza, la quale si calcola analogamente alla prima, variando opportunamente le condizioni di vincolo.

Aumentando il rapporto tra frequenza di eccitazione e frequenza propria varia il fattore di trasferimento e dunque gli spostamenti dell'edificio sotto l'azione del traffico veicolare aumentano, fino a raggiungere il massimo quando frequenza di eccitazione e frequenza propria coincidono.

I dati sperimentali in materia, hanno evidenziato che l'ampiezza delle vibrazioni può raggiungere il massimo valore alle frequenze di risonanza proprie delle costruzioni da salvaguardare. È quindi fondamentale calcolare ed analizzare gli spettri in frequenza al fine di individuare le frequenze o gli intervalli di frequenza dominanti del fenomeno vibratorio, i quali possono provocare danni alle strutture, ricordando che le frequenze naturali delle strutture variano tra circa 1 Hz, per gli edifici più alti, fino a 10 Hz, per gli edifici più bassi.

In particolare, le componenti strutturali di una costruzione possono essere caratterizzate dai seguenti intervalli di frequenza di risonanza:

- ⇒ 8 ÷ 16 Hz al centro del pavimento; le strutture molto grandi e massicce possono raggiungere una frequenza di risonanza di 4 Hz;
- ⇒ 10 ÷ 25 Hz al centro dei muri leggeri; si raggiungono i 50 Hz per murature massicce.

A tal proposito, tutte le normative vigenti, anche a livello internazionale, stabiliscono dei valori limite di soglia in funzione della frequenza dominante di oscillazione.

6.5. Trasformazione delle vibrazioni in rumore.

Le vibrazioni meccaniche che propagandosi nel terreno raggiungono le fondamenta di una struttura di un edificio possono causare la generazione di un rumore a bassa frequenza che dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche degli ambienti e dal coefficiente di assorbimento delle pareti, anche, ed in particolar modo, dalle caratteristiche della vibrazione in propagazione.

La previsione del rumore a bassa frequenza così generato potrebbe essere eseguito considerando il problema della parete vibrante. Numerose esperienze hanno però messo in evidenza che il livello di pressione sonora può essere valutato utilizzando il livello di accelerazione rilevabile ovvero prevedibile sulle pareti della stanza, sul soffitto e sul pavimento.

7. DANNI PRODOTTI DALLA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI MECCANICHE

Le ragioni principali per cui le vibrazioni possono provocare danni agli edifici sono due:

1. anche se le fonti esterne hanno, in generale, frequenze lontane dagli intervalli di pericolosità tipici per gli edifici, inducono, pur sempre, sollecitazioni di tipo dinamico;
2. le vibrazioni si propagano sotto forma di onde che comprimono e rarefanno, a fasi alterne, il mezzo che attraversano (il terreno, nel caso degli edifici). Le non uniformità delle continue compressioni e rarefazioni conseguenti a:

- differenti distanze degli elementi di fondazione dalla sorgente;
- disomogeneità del mezzo di propagazione (terreno);

possono, pertanto, determinare un addensamento del terreno, con velocità ed ampiezze differenti da zona a zona, in funzione dei parametri caratterizzanti la vibrazione stessa.

Ne conseguono cedimenti differenziati delle fondazioni, con redistribuzione degli sforzi all'interno dell'edificio.

Si evidenzia inoltre come nel caso di terreni molli o di media compattezza (sabbia, ghiaia), forti vibrazioni possono determinare sprofondamenti e dunque cedimenti strutturali del terreno. Ciò vale particolarmente, in caso di vibrazioni frequenti, per sabbie uniformi e per terreni al di sotto della falda freatica.

Poiché gli assestamenti del terreno si riducono allontanandosi dalla sorgente delle vibrazioni, avviene che i cedimenti prodotti in una fondazione vicina alla causa perturbatrice non siano uniformi, ma variabili lungo di essa, e quindi possono produrre inclinazioni e dissesti delle sovrastrutture.

Il secondo effetto, ossia la propagazione delle vibrazioni alle sovrastrutture è in generale meno dannoso, tanto più se è escluso il pericolo di risonanza, poiché ben difficilmente il complesso di onde che investe la costruzione è tale da offenderne la stabilità.

Ciò non toglie che se la costruzione si trova in uno stato di tensione gravoso, che lambisce la soglia della resistenza in alcune parti, per vetustà o per effetto di precedenti stati di coazione, prodotti ad esempio da cedimenti differenziali, possano manifestarsi per l'intervento delle vibrazioni dei segni di dissesto.

In sostanza, quindi, le vibrazioni provocate da sorgenti differenti dalle scosse sismiche, più frequentemente, possono provocare danni, non tanto per effetti "oscillatori", quali sono, per esempio, quelli indotti da un terremoto ("scuotimento orizzontale" delle strutture), quanto, piuttosto, per assestamenti del terreno e conseguente aggravio, localizzato, dello stato di tensione esistente o pregresso.

Il rischio di danni è tanto più elevato quanto meno addensato è il terreno, e quanto più deboli (da un punto di vista strutturale) sono le fondazioni e le sovrastrutture degli edifici.

In generale danni strutturali all'edificio nel suo insieme, attribuibili a fenomeni vibratorii, sono estremamente rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause, come già evidenziato in precedenza. Perché le

vibrazioni possano arrecare danni strutturali è comunque necessario che le vibrazioni raggiungano livelli tali da causare, prima, fastidio e disturbo agli occupanti.

Sono invece frequenti altre forme di danno, di entità definita “di soglia” che, senza compromettere la sicurezza strutturale degli edifici, ne possono determinare una riduzione del valore d'uso. I danni di soglia si presentano sotto forma di fessure nell'intonaco, accrescimenti di fessure già esistenti, danneggiamenti di elementi architettonici: sono indicati come “danni estetici”.

La vibrazione è un'oscillazione, più o meno ampia, di un corpo.

All'interno di un qualsiasi materiale, ad un'oscillazione consegue uno sforzo f , la cui entità è correlata all'ampiezza della deformazione ϵ dalla legge costitutiva del materiale. I materiali utilizzati nelle costruzioni hanno, in generale, resistenze a trazione molto basse, in speciale modo le malte, i laterizi od i materiali utilizzati per i rivestimenti. Fa eccezione l'acciaio, che, però, è di solito utilizzato solo per la parte strutturale, e raramente negli edifici a destinazione residenziale. Nelle figure sotto, sono riportati, a titolo indicativo, i diagrammi tipici dei legami costitutivi per:

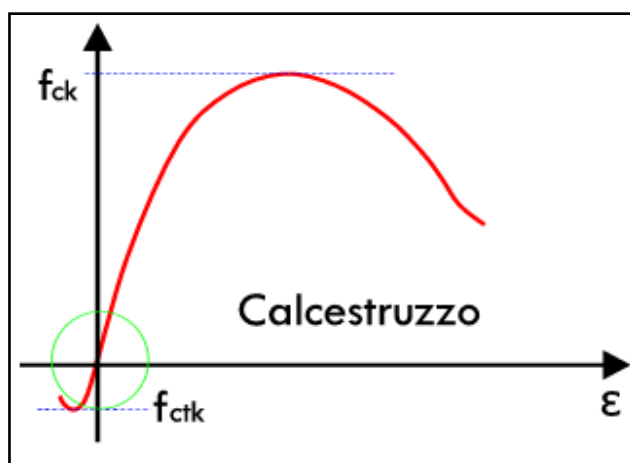


Figura 20: Diagramma costitutivo : Calcestruzzo → Resistenza a Trazione $f_{ctk} <$ Resistenza a compressione f_{ck} .

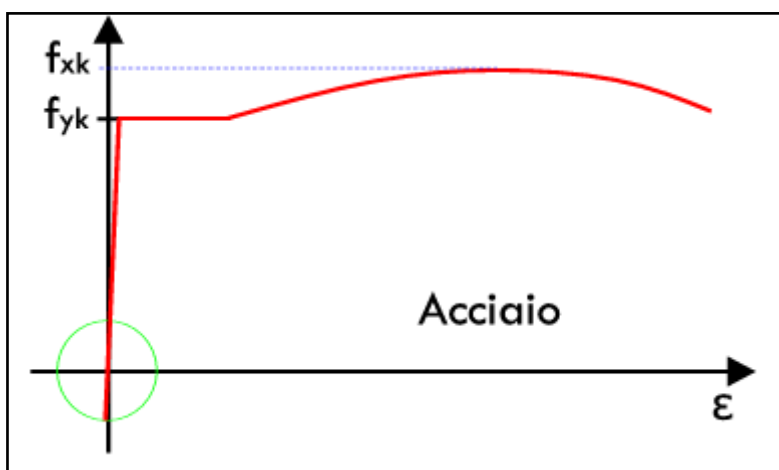


Figura 21: Diagramma costitutivo : Acciaio per armature → comportamento simmetrico a trazione e compressione.

Quando lo sforzo, che insorge all'interno del materiale, supera la soglia di resistenza (a trazione), si innesca la lesione e, quindi, si manifesta il danno.

Nei diagrammi riportati tali eventualità corrispondono, all'estremità delle curve. Ne segue che, evidentemente, i primi danni compaiono:

- nei materiali con minore resistenza (tipicamente, come detto, quelli di rivestimento)
- nei punti "critici", laddove, cioè, ci siano preesistenti stati di sforzo legati a cause diverse dalle vibrazioni (sollecitazioni statiche per i carichi presenti, per dilatazioni termiche, per ritiro del materiale, ...)

In linea di principio il danno (la lesione) può manifestarsi anche per superamento della soglia di resistenza a compressione del materiale. E' però evidente come ciò sia più raro e, dati i notevoli valori di resistenza a compressione dei materiali generalmente utilizzati nelle costruzioni, possa avvenire solo a seguito di vibrazioni e sforzi di eccezionali entità, conseguenti, per esempio, ad un sisma.

7.1. Il degrado dei Beni Culturali causato dalle vibrazioni da traffico.

Il passaggio dei veicoli causa vibrazioni che si trasmettono agli edifici circostanti sia attraverso l'aria sia attraverso il suolo. Tra le vibrazioni che si trasmettono attraverso l'aria vanno distinte quelle ad alta frequenza [50 , 100 Hz], dovute alle vibrazioni dei motori dei grossi mezzi di trasporto, da quelle legate alla velocità dei veicoli stessi.

Le onde di pressione, in entrambi i casi, possono causare negli edifici adiacenti la propagazione di vibrazioni attraverso componenti deformabili, quali porte e finestre, ma certamente non influenzano le parti più rigide degli edifici stessi e, in particolare, la loro struttura portante.

Le vibrazioni che si propagano attraverso il suolo, caratterizzate da frequenze dominanti nell'intervallo [4 - 20 Hz], sono generate dalla variazione delle forze di contatto tra le ruote e la superficie stradale e consistono sia in onde di compressione sia di taglio. Queste, attraverso la pavimentazione, la fondazione stradale e il terreno, giungono agli edifici adiacenti.

Vibrazioni di piccola ampiezza causano fastidio alle persone mentre vibrazioni di entità maggiore possono provocare danni alle strutture. Tra tutte le tipologie di strutture potenzialmente più esposte, quelle più vulnerabili risultano essere i monumenti, ed in generale gli edifici storici, spesso costruiti con materiali di basse caratteristiche meccaniche e con fondazioni non adeguate. In molti casi queste strutture in vicinanza di strade a traffico intenso, hanno mostrato danneggiamenti che potevano essere attribuiti alle vibrazioni indotte da traffico.

Nei centri storici delle città si possono individuare una serie di fattori concomitanti che tendono ad amplificare ulteriormente tale fenomeno:

- le sovrastrutture stradali maggiormente utilizzate nei centri storici sono spesso di tipo lapideo ed il loro impiego è dettato da motivi prevalentemente estetici;

- il non dimensionamento o la mancanza di manutenzione sono spesso causa di elevati livelli di irregolarità;
- nell'ottica di una politica di disincentivazione dell'uso dell'auto privata ai fini della riduzione dell'inquinamento atmosferico, l'incidenza dei veicoli pesanti per trasporto pubblico nella composizione del traffico veicolare, già oggi rilevante, è destinata ad aumentare in futuro.

In funzione di quanto sopra, il rumore e le vibrazioni indotte dal traffico veicolare terrestre assumono sempre di più i connotati di una fra le principali cause di impatto ambientale.

Risulta evidente come la componente legata alla propagazione delle vibrazioni ambientali negli studi di impatto ambientale viene trascurata, e ciò per diversi motivi. Uno dei motivi principali è da ricercare nella notevole complessità dello studio relativo alla generazione e propagazione delle onde di vibrazione (in particolare attraverso il suolo), che per essere affrontato richiede il coinvolgimento di numerose competenze (ingegneria meccanica, stradale, geotecnica, strutturale).

Alla difficoltà oggettiva di saper descrivere la componente vibrazione presente nel territorio prima della realizzazione di un'opera, seguono la difficoltà di non disporre di modelli matematici di previsione convalidati perfettamente e la scarsa conoscenza dei criteri di progettazione delle opere di mitigazione, compresa una seria casistica di risultati ottenuti laddove è stata realizzata l'opera di riduzione delle vibrazioni.

Un altro motivo di preoccupazione e di difficoltà risiede nella consapevolezza che un'errata progettazione di un'opera di mitigazione delle vibrazioni può sortire l'effetto contrario, con aumento anche pericoloso della componente per effetto della risonanza delle strutture investite dall'energia meccanica.

Infine, un'ulteriore difficoltà risiede nel fatto che ancora oggi in Italia non esiste una legge cogente sull'inquinamento da vibrazioni che fissi i limiti della componente sul territorio in recepimento dei dettami tecnici delle norme tecniche.

7.2. Classificazione dei danni negli edifici

I danni possono essere di entità estremamente variabili: da leggere cavillature nei rivestimenti, a fessure passanti attraverso gli elementi portanti.

In funzione delle ampiezze, e del livello di pericolosità, i danni sono classificati in diversi livelli:

- a) danni di soglia**, se coinvolgono solo elementi con funzione architettonica ed estetica. Danni di questo tipo sono: fessure più o meno marcate negli intonaci, nelle piastrelle, fessure in corrispondenza dei giunti di separazione tra un laterizio e l'altro...



Figura 22: Esempio di abitazione con evidenziati alcuni danni di soglia

- b) Danni minori,** Come i precedenti, ma di entità maggiore: distacco di pezzi di intonaco, fessure nei laterizi .



Figura 23: Esempio di residenza con manifestati diversi danni minori.

- c) Danni maggiori,** se coinvolgono e compromettono elementi con funzione strutturale, comunque se compromettono la fruibilità dell'edificio. Danni di questo tipo sono: lesioni (manifestazioni di eccessiva sollecitazione all'interno dell'elemento) nelle travi e/o nei pilastri in c.a., evidenti separazioni tra due porzioni di fabbricato.



Figura 24: Esempio di residenza con manifestati diversi danni maggiori

8. MODELLI PREVISIONALI DELLE VIBRAZIONI DEI MEZZI DI TRASPORTO

8.1. Premessa

Gli studi di impatto ambientale per le nuove infrastrutture lineari di trasporto (DPCM 27/12/88) devono necessariamente considerare la componente vibrazione stante l'aumentato numero di mezzi pesanti in circolazione sulle strade e la realizzazione di nuove linee ferrate per il trasporto veloce delle merci e dei passeggeri.

La componente vibrazione negli studi di impatto ambientale viene sovente trascurata per numerosi motivi quali la complessità della misurazione (lungo tre assi ortogonali), la forte dipendenza dei risultati dal punto di misura, la scarsa conoscenza della emissione da parte delle sorgenti (veicoli pesanti su gomma, treni etc.), la varietà dei modi di propagazione dell'energia meccanica nel terreno che la stessa sorgente può eccitare in relazione anche alla composizione del terreno stesso, la difficoltà di determinare la funzione di accoppiamento mutuo tra edifici e terreno, la grande diversità di risposta alle vibrazioni dei componenti edilizi ed infine la mancanza di leggi che fissino i limiti ammissibili delle vibrazioni sulle strutture edilizie e sull'uomo.

Alla difficoltà oggettiva di poter descrivere la situazione della componente sul territorio prima della realizzazione dell'opera in progetto, si aggiunge ancora la mancanza di modelli di previsione per le vibrazioni e la scarsa conoscenza dei criteri di progettazione delle opere di mitigazione compresa una seria casistica di risultati ottenuti laddove sono state realizzate opere di riduzione delle vibrazioni.

Per le vibrazioni una errata progettazione delle opere di mitigazione può sortire l'effetto contrario con aumento, anche pericoloso, della componente per effetto della risonanza delle strutture investite dall'energia meccanica.

Per quanto riguarda il quadro generale di riferimento per un completo studio del problema occorre tenere presente gli effetti delle vibrazioni di una certa entità:

- Le vibrazioni creano disturbo alle persone che le percepiscono come tremolio che si propaga lungo il corpo;
- Le vibrazioni possono arrecare danno alle strutture edilizie con la formazione di crepe sull'intonaco, sul pavimento o con l'insorgere di danni più gravi;
- Le vibrazioni possono indurre un rumore indesiderato alle basse frequenze all'interno delle abitazioni specialmente in quelle più protette sotto il profilo dell'isolamento acustico verso i rumori provenienti dall'esterno;
- Le vibrazioni possono indurre rumori secondari quali tintinnio di oggetti (bicchieri etc.).

La sorgente di vibrazione può eccitare modi diversi di vibrazione in relazione alla direzione, intensità e frequenza della forza trasmessa al terreno ed in relazione alle caratteristiche meccaniche del mezzo solido.

Per la discontinuità e per la presenza delle stratificazioni del terreno, si possono propagare meglio uno o più modi.

La perturbazione elastica raggiungerà l'edificio attraverso le fondazioni producendo i propri effetti legati alla intensità che variano dal disturbando alle persone che occupano l'edificio al danno delle strutture (muri di tamponamento, divisori, ecc.).

L'effetto sulle strutture e sulle persone dipende dal modo di propagazione ed in particolare dall'intensità della componente verticale ed orizzontale. L'attenuazione dell'onda elastica nel terreno è determinata dalle costanti elastiche e di smorzamento del terreno stesso, dal modo di propagazione e dal tipo di sorgente.

8.2. Studio di impatto da vibrazioni generate dal traffico

L'impostazione di uno studio d'impatto ambientale per le vibrazioni si sviluppa secondo i seguenti passi:

- la definizione dello stato attuale della componente presso i ricettori;
- la previsione della componente in fase di esercizio dell'infrastruttura di trasporto;
- la eventuale definizione delle opere di mitigazione.

Ovviamente i valori delle grandezze misurate o calcolate devono essere confrontati con i valori di riferimento segnalati da specifiche normative. La complessità dello studio è palese se si tiene presente che la generazione e la propagazione delle vibrazioni avviene nel terreno e dipende in larga misura dalla consistenza geologica del sottosuolo, dalla sua stratigrafia, dalle caratteristiche degli edifici e dal tipo di vetture ed armamento utilizzato se si parla di strada ferrata o di tramvia.

Questi aspetti non sono immediatamente palesi e sono complicati ulteriormente dalla vasta tipologia edilizia che si incontra lungo il tracciato dell'infrastruttura e dalle caratteristiche estremamente variabili del sottosuolo ulteriormente modificate localmente dalla fitta rete dei servizi (gas, acqua fognature etc.) che possono avere imposto specifiche e puntuali opere di consolidamento del terreno.

Sovente si rende necessario effettuare un primo sondaggio sperimentale sin dalla fase di studio d'impatto ambientale al fine di acquisire una maggiore conoscenza del sottosuolo e di quantificare alcuni parametri necessari al calcolo di previsione della componente all'interno degli edifici. Si passa poi ad una attenta analisi delle tipologie edilizie presenti lungo il tracciato, alla definizione della emissione della sorgente, alla scelta di un modello di calcolo per la previsione dell'entità del fenomeno vibratorio ed alla definizione dei parametri di riferimento per valutarne gli effetti.

Le due fasi più impegnative nello studio d'impatto sono quelle concernenti il calcolo di previsione della componente con l'infrastruttura in esercizio e la progettazione delle opere di mitigazione se si prevede un superamento degli standard fissati.

Le normative ISO e UNI forniscono dei valori di riferimento della grandezza proposta e questi possono essere distinti principalmente in valori limite di accettabilità per il disturbo fisico alle persone e valori limite di accettabilità per il danno alle strutture.

Tenendo conto delle relazioni algebriche e fisiche che legano lo spostamento, la velocità e l'accelerazione è possibile effettuare l'analisi di una grandezza per poter dedurre lo spettro delle altre.

I valori relativi agli standard di riferimento per la componente vibrazione sono meglio precisati nelle norme ISO 2631/1, ISO 2631/2 ed UNI 9614 per gli effetti del disturbo sulle persone; ISO 4866 ed UNI 9916 per gli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

In uno studio di impatto ambientale, descritto lo stato attuale della componente (stato ante operam) si passa allo studio ed alla previsione dei valori della componente in fase di esercizio dell'infrastruttura di trasporto (stato post operam). Questo è possibile solo se si possiedono strumenti idonei di calcolo (in genere modelli) e si dispone di numerosi parametri fisici (dati iniziali di progetto).

I parametri fisici necessari per impostare un calcolo di previsione della componente sono numerosi; quelli più importanti sono i seguenti:

- Caratteristiche dello spettro di emissione della sorgente (treno, tram, autocarro, camion etc.) in funzione del tipo di tracciato (galleria o rilevato).
- Variazione dello spettro di emissione del mezzo in funzione della velocità.
- Variazione del livello di vibrazione in funzione della distanza del ricettore dalla sorgente.
- Variazione del livello di vibrazione in funzione della tipologia delle fondazioni dell'edificio in esame.
- Propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio.
- Trasformazione della vibrazione strutturale dell'edificio in rumore interno.

Lo studio di previsione delle vibrazioni può essere impostato correttamente se si dispongono dei valori relativi ai parametri sopra descritti tenendo conto che la maggior parte di essi sono di carattere puntuale e dipendono, quindi, dal luogo in cui è prevista l'opera soggetta a studio d'impatto.

- Lo spettro di emissione della sorgente (mezzo su gomma, treno etc.) può essere valutato solo sperimentalmente.
- La variazione dello spettro di emissione della sorgente in funzione della velocità può essere determinata solo sperimentalmente con prove specifiche; in alternativa è possibile elaborare opportunamente i dati ovviamente generali e non specifici, disponibili in letteratura.
- La variazione del livello di vibrazione in funzione della distanza del ricettore dalla sorgente può essere indagata per via sperimentale attraverso prove di trasmissione di sollecitazioni periodiche o impulsive nei terreni circostanti il tracciato della infrastruttura di trasporto. Ancora non è disponibile una vasta casistica sperimentale che consenta di valutare teoricamente l'effetto di questo parametro partendo unicamente dalla caratterizzazione geologica del terreno.
- La variazione del livello in funzione della tipologia delle fondazioni dell'edificio in esame è possibile determinarla o con prove specifiche di risposta a sollecitazioni appositamente impresse al terreno o per via analitica noto il tipo di fondazione, il carico sul terreno e la costituzione del terreno stesso sul quale poggia l'edificio.
- La propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio può essere prevista utilizzando metodologie consolidate in uso in ingegneria sismica per la valutazione numerica del comportamento dinamico degli edifici civili. Sono possibili sperimentazioni specifiche attraverso il rilievo, in diversi punti dell'edificio, delle accelerazioni indotte da sollecitazioni impulsive

artificialmente prodotte o sfruttando quelle del traffico esistente. In realtà, vista la grande varietà delle dimensioni e delle tipologie degli edifici, tali rilevazioni hanno carattere e validità locale e non possono essere generalizzate se non meditando opportunamente i valori ottenuti dalle sperimentazioni.

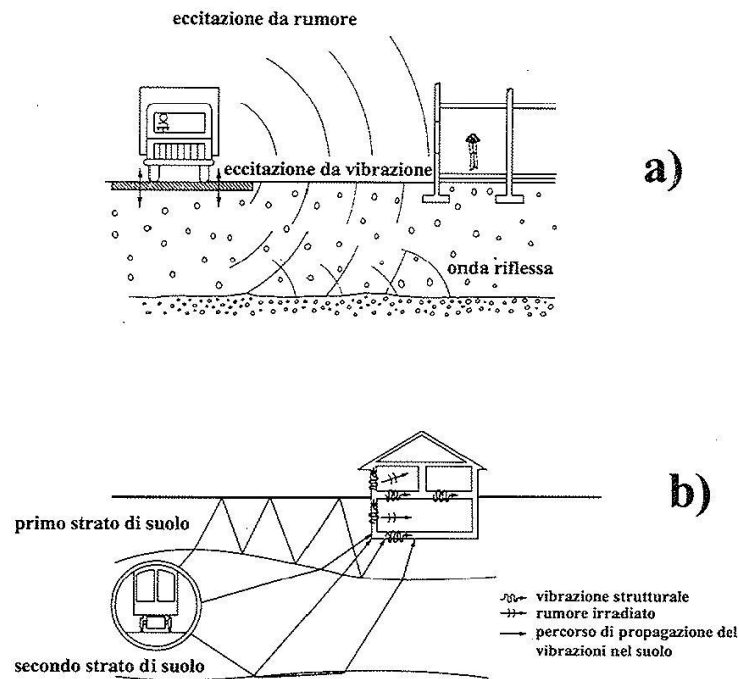


Figura 25: Vibrazioni dell'edificio eccitate dal rumore e dalle vibrazioni che si propagano sul terreno. A) sorgente in superficie, B) sorgente nel sotto suolo

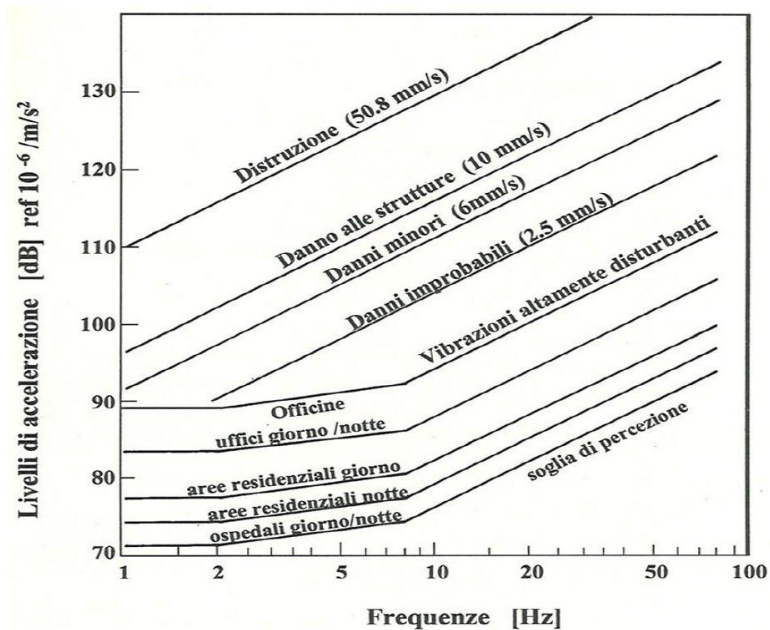


Figura 26: Criterio per la valutazione degli effetti soggettivi delle vibrazioni e per la valutazione del danno fisico alle strutture

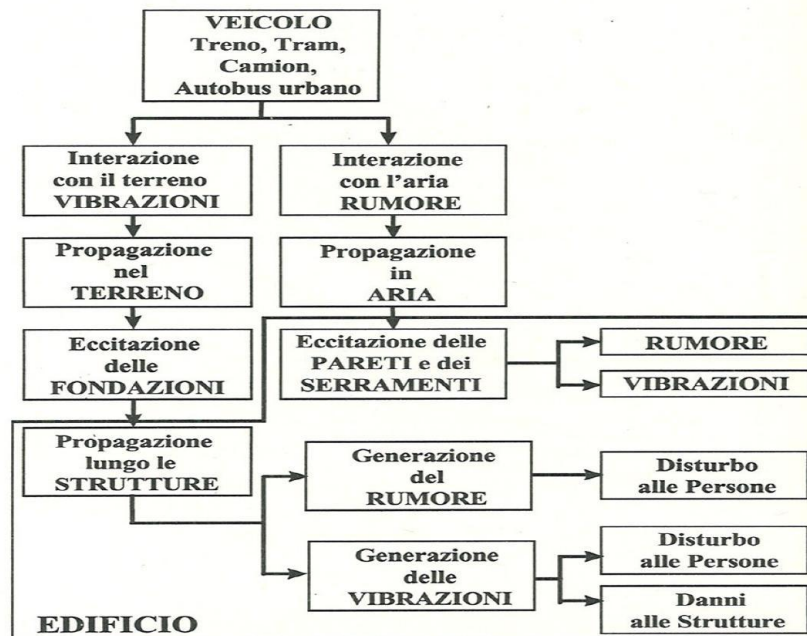


Figura 27: Diagramma di flusso per un modello di previsione delle vibrazioni

Le vibrazioni, in generale, traggono origine da forze variabili nel tempo in intensità e direzione. Tali forze agiscono in specifici punti del suolo (sia in superficie che in galleria) immettendo energia meccanica che si propaga nel terreno e che può essere riflessa da strati più profondi prima di giungere al ricettore.

Ricordando che il fenomeno vibratorio è connesso strettamente con il tipo di accoppiamento meccanico tra mezzo di trasporto e terreno, la relazione di quest'ultimo sulla sorgente impedisce la definizione in assoluto delle caratteristiche del generatore e che possono essere inserite autonomamente in uno schema di calcolo. Per i trasporti la prima classificazione da effettuarsi è relativa al mezzo distinguendo i veicoli su gomma da quelli su ferro.

8.3. Origine delle vibrazioni dei veicoli su strada: previsione dei carichi e delle risposte

In linea di principio un veicolo con carico perfettamente bilanciato, con perfetta equilibratura delle ruote, che avanza su una strada perfettamente levigata, non produce vibrazioni.

Nella realtà il manto stradale è tutt'altro che liscio usurandosi con il tempo; le ruote dei veicoli pesanti sono sbilanciate per effetto dell'usura non uniforme del pneumatico; le forze che il corpo del veicolo comunica alle ruote variano in intensità e direzione.

L'interazione ruota-strada può essere schematizzata con il diagramma di figura 28: il passaggio del veicolo sul dosso produce una forza di tipo impulsivo se il tempo di transito sulla discontinuità è inferiore al periodo di risonanza delle sospensioni.

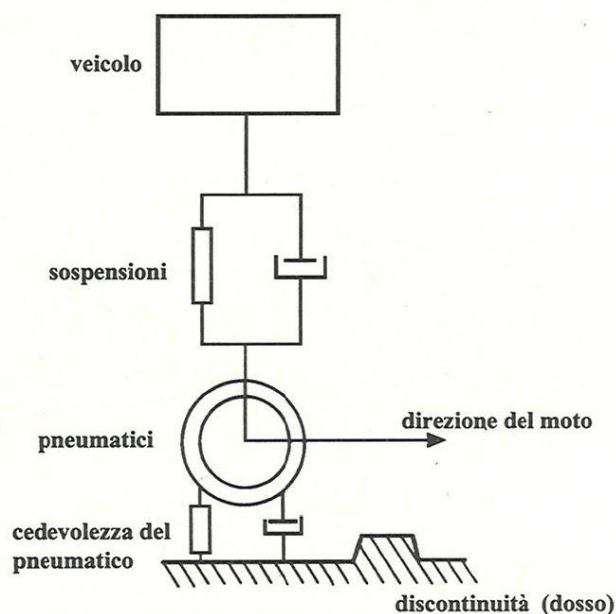


Figura 28: Effetti dinamici di una discontinuità del manto stradale

La ruota, così eccitata, oscillerà per alcuni periodi con frequenza pari a quella della sospensione esercitando sulla strada una serie di impulsi che si estendono per alcuni metri. Tale fenomeno produrrà, con il tempo, ulteriori danneggiamenti del manto stradale che si estenderanno su superfici sempre più vaste.

Tenendo conto del numero degli assi e del carico dinamico esercitato dal veicolo in movimento, l'azione delle forze eccitatrici è legata alla velocità ed al peso statico del veicolo stesso. Interessanti studi sono stati condotti sull'entità delle forze dinamiche esercitate sul terreno da veicoli commerciali di peso superiore alle 32 tonnellate. I carichi sono stati misurati con sensori inglobati entro il manto stradale ed il risultato delle misure hanno consentito di individuare le frequenze proprie di risonanza (tra 10 e 16 Hz) ed il rapporto tra carico dinamico sugli assi e carico statico. Tale rapporto, che mediamente è pari a 1.5, può raggiungere il valore massimo di 3.

L'ampiezza della forza dinamica sulla superficie di contatto può variare da 10 a 20 t, come è evidenziato da diverse esperienze tecniche.

L'accoppiamento tra veicolo e terreno dipende molto dallo strato sotto l'asfalto, per cui il livello di vibrazioni immesso nel terreno è di difficile modellizzazione.

Una prima semplificazione per un modello di previsione è quella di Rudder attraverso la quale si giunge ad una relazione semplificata per il calcolo del livello di accelerazione ad una determinata distanza dalla strada. Questo approccio è valido per un tipo di asfalto privo di buche e con uniforme rugosità superficiale. Per il caso di una pavimentazione fortemente segnata da buche e piccoli rifacimenti Rudder fornisce una relazione del livello di picco dell'accelerazione con i parametri che caratterizzano le dimensioni delle discontinuità.

- **Rugosità di superficie di tipo casuale**

Il livello di accelerazione a 2 m di distanza dal ciglio della strada può essere calcolato con la relazione:

$$L_0 = -4,155 \cdot (\text{PSR}) + 17,2 \cdot \log(V) + 10 \cdot \log(W_G) + 52 \quad \text{dB}_{\text{re}} 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

Dove:

- PSR è un coefficiente legato alla densità spettrale di potenza della rugosità
- V è la velocità in km/h
- WG è il peso lordo del veicolo in tonnellate.

Il valore che si assume per PSR può variare da $\approx 4,5$ per un asfalto nuovo fino a $\approx 2,0$ per un asfalto usurato. In linea di principio valori accettabili di PSR spaziano da 1 a 5 e forniscono variazioni di livello di accelerazione di ± 8 dB rispetto al valore medio di PSR pari a 3.

Il livello di accelerazione impresso al terreno è anche funzione del peso dei veicoli: si calcola che un camion di 20 t a 55 km/h con un fattore PRS=3 produce un livello di accelerazione di 82,8 dB ref. $1 \mu\text{m/s}^2$. Valori misurati di vibrazioni prodotte da un camion carico con due assi su diversi tipi di pavimentazione sono compresi 79 a 91 dB (ref. $1 \mu\text{m/s}^2$).

La formula sopra riportata evidenzia un aumento del livello di accelerazione di 3 dB per ogni raddoppio del peso mentre fornisce un incremento di 5.2 dB per ogni raddoppio della velocità.

La distribuzione in frequenza dell'energia vibratoria può essere ottenuta ricorrendo ad uno spettro medio del livello di accelerazione misurato in situazioni analoghe. Nella figura 29 si riporta, a titolo di esempio, lo spettro equivalente e massimo della componente verticale dell'accelerazione rilevato a 12 m dal ciglio di una strada statale peri urbana a due corsie.

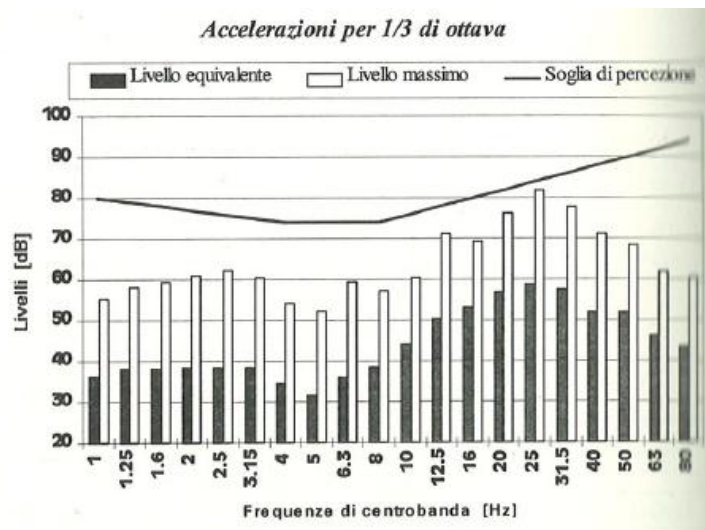


Figura 29: Livello equivalente e livello massimo di accelerazione per bande di 1/3 di ottava rilevato a 12 m dal ciglio strada su terreno compatto. Durata del rilievo 10 minuti con traffico di 290 auto e 13 camion. I livelli globali sono pesati secondo la norma UNI 9614. $L_{A,eq} = 55,3$ dB, $L_{w,max} = 76,0$ dB.

- **Discontinuità di superficie con buche e dossi**

Se la superficie stradale contiene buche o dossi il carico dinamico ed il fattore di impatto possono essere calcolati conoscendo i parametri dei veicoli e la geometria delle discontinuità. I parametri sono:

- Altezza del dosso (h) e lunghezza (l)
- Velocità del veicolo (V), carico statico del pneumatico (W0), cedevolezza del pneumatico (kt) e frequenza propria della sospensione (fn)
- Frequenza naturale del manto d'asfalto (fp) e sua massa (W)

In primo luogo si considera il veicolo come un sistema ad un grado di libertà e se ne calcola la risposta prodotta per spostamento dalla posizione di equilibrio con legge pari a 1/2 ciclo di sinusoidi e di durata pari al tempo necessario per superare la discontinuità. Il massimo valore del carico è dato dalla relazione: $P_0 = kth$ che però dipende dalla durata dell'eccitazione in relazione alla frequenza di risonanza del veicolo. Rudder fornisce le seguenti relazioni per il carico massimo:

$$P_0 = \frac{k_t h}{1 - v} \quad 0 \leq v \leq \frac{1}{3}$$

$$P_0 = \frac{k_t h (\sin[2\pi v / (1 + v)])}{1 - v} \quad \frac{1}{3} \leq v \leq 1$$

$$P_0 = \frac{2k_t h v \cos\left(\frac{\pi}{2v}\right)}{v^2 - 1} \quad v \geq 1$$

Dove: $v = V/V_n$, $V_n = 2l f_n$ è la velocità del veicolo alla quale la durata della eccitazione è pari al periodo naturale del sistema di sospensioni.

In secondo luogo si considera la risposta della pavimentazione, che è un sistema a più gradi di libertà. La forza impulsiva impressa dal veicolo è assunta rettangolare con ampiezza pari a P_0 e durata pari a l/V .

Il massimo livello di accelerazione impresso al manto stradale è dato dalla relazione:

$$L_{p0} = 20 \cdot \log(P_0) - 20 \cdot \log(W) + 20 \cdot \log[|\sin(\pi/(2v))|] + 146 \quad \text{dBre } 1\mu\text{m/s}^2$$

Dove:

- P_0 è il picco dell'impulso
- W è la massa del manto d'asfalto
- v è il rapporto tra la velocità del veicolo e la velocità di propagazione della vibrazione nel manto d'asfalto
- $V = 2l f_p$

La massa del manto d'asfalto è data da:

$$W = 5,5 \gamma_f b L h_f (1 + \mu) / 3$$

Dove:

- γ_f = massa volumica del manto d'asfalto
- b = larghezza della strada
- E_p , h_p , ν_p e E_f , h_f , ν_f sono rispettivamente il modulo di Young, la profondità ed il rapporto di Poisson dello strato di usura e del manto stradale.
- μ = rapporto tra la densità dello strato d'usura e del manto stradale.

Il livello di accelerazione al punto di contatto della ruota sull'asfalto è fornito dalla conoscenza dei parametri coinvolti nella relazione.

Così ad esempio se:

Frequenza naturale delle sospensioni	12	Hz
Cedevolezza dei pneumatici	840 000	N/m
Velocità del veicolo	13.4	m/s
Profondità della cunetta	25	mm
Lunghezza della cunetta nella direzione di marcia	900	mm

si calcola un carico sulla superficie di asfalto il cui valore è pari a $P_0 = 37,700$ N che fornisce un fattore d'impatto pari a 1.6.

Per una pavimentazione costituita da una lastra di cemento sul substrato con caratteristiche pari a quelle sopra elencate si calcola:

- $f_p = 33.2$ Hz
- $W_m = 350000$ N

Sostituendo questi valori nell'equazione sopra esposta si ottiene il livello dell'accelerazione di picco in corrispondenza della discontinuità che risulta pari a

$$L_{p0} = 123 \text{ dB ref. } 1 \mu\text{m/s}^2$$

Il livello corrisponde al valore di accelerazione di $1,6 \text{ m/s}^2$, cioè ad uno spostamento di 0,3 mm a 12 Hz.

8.4. Origine delle vibrazioni dei veicoli in galleria: previsione dei carichi e delle risposte

Complessa e di difficile modellizzazione è la generazione delle vibrazioni per traffico nelle gallerie. Restando inalterato il concetto espresso per la generazione delle forze dinamiche a livello di contatto ruota-asfalto, non deve essere trascurato l'effetto del rumore sul rivestimento della galleria. Un elemento che condiziona

l'accoppiamento del terreno con la sorgente di vibrazione è il carico del terreno sull'intera struttura in c.a. della galleria.

Per il calcolo di previsione delle vibrazioni indotte dal traffico nel sottosuolo si preferisce utilizzare degli spettri di vibrazione reali misurati sul rivestimento di gallerie stradali in esercizio. Nella figura 30 si riporta lo spettro equivalente dell'accelerazione misurato all'interno di una galleria naturale.

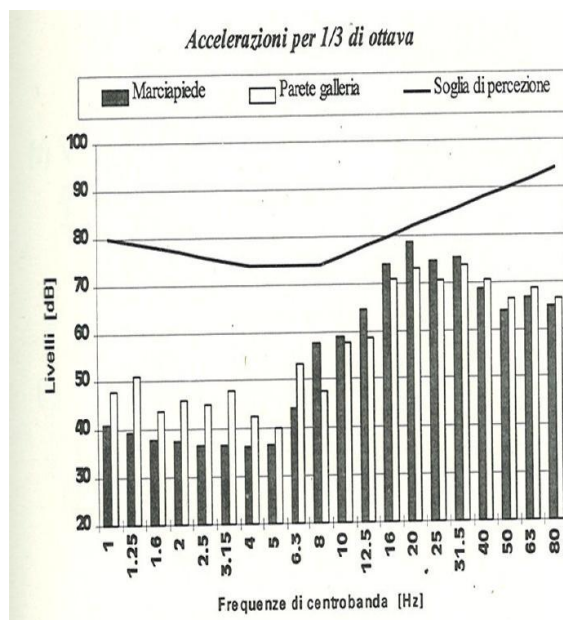


Figura 30: Livello massimo di accelerazione per bande di 1/3 di ottava rilevato sul marciapiede e sulle pareti di una galleria durante il transito di un camion. $L_{w,max} = 74,0$ dB sul marciapiede ed $L_{w,max} = 70,4$ dB sulla parete.

8.4.1. Origine delle vibrazioni generate dai treni in superficie: previsione dei carichi e delle risposte

Per la ferrovia le forze che il transito di un treno esercita sul terreno sono molto diverse da quelle prodotte dal transito di un camion sull'asfalto. L'armamento ferroviario, i binari ecc. costituiscono un diverso sistema di accoppiamento con il suolo per cui lo spettro dell'accelerazione è determinato da numerosi fattori che non si rilevano per il traffico su gomma. Basti pensare all'azione combinata delle forze perpendicolari al terreno e alle forze laterali generate dai vincoli che la rotaia impone alla ruota del treno.

Notevole importanza assumono poi le forze prodotte dal rotolamento della ruota sulla rotaia per effetto delle irregolarità della ruota e della rotaia (marezzatura) come ben evidenziato nella figura 31.

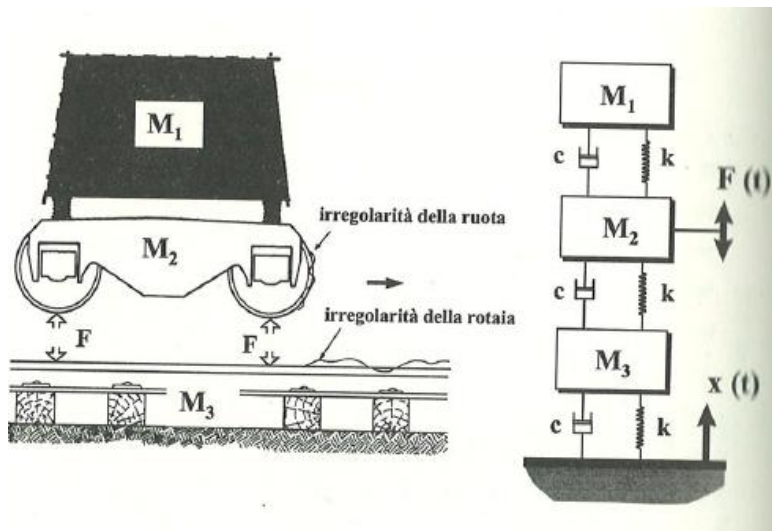


Figura 31: Interazione ruota-rotaia: generazione della sollecitazione e modello equivalente semplificato

Interazione Treno/Armamento

Con riferimento alla figura 31 può essere esemplificato un modello di comportamento del sistema. L'effetto delle forze dinamiche F che da un treno in transito si trasmettono alle rotaie, e da queste al treno attraverso il sistema traversine-ballast, è prevedibile se è nota la funzione di trasferimento delle vibrazioni, meglio rappresentata dall'andamento dell'impedenza in funzione della frequenza (rapporto tra forza impressa e velocità di vibrazione del terreno).

La risposta in velocità della rotaia V_R è proporzionale all'impedenza della ruota e della rotaia ed ad un coefficiente legato alla rugosità superficiale secondo la relazione:

$$V_R \propto \frac{Z_w(\omega)}{Z_w(\omega) + Z_R(\omega)} * (\text{azione combinata ruota e rugosità})$$

dove

- Z_W è l'impedenza della ruota e del sistema sospeso sulla ruota (carrozza con le sue sospensioni elastiche, carrello etc);
- Z_R è l'impedenza della rotaia compreso la traversina e l'eventuale sistema elastico di isolamento sotto la rotaia e sotto la traversina.

Il sistema schematizzato nella figura 31 rappresenta, con parametri concentrati, la massa M_1 la costante elastica k_1 delle sospensioni e lo smorzamento c_1 della carrozza, la massa M_2 , la costante elastica k_2 e lo smorzamento c_2 del sistema costituito dal carrello e la quota parte di rotaia che interagisce dinamicamente con la ruota e che appoggia sulla traversina nonché la massa M_3 , la costante elastica k_3 e lo smorzamento c_3 del sistema di armamento che appoggia sul suolo.

L'equazione che governa il sistema è espressa sotto forma di equazione differenziale matriciale

$$[M]_x + [C]_x + [K]_x = 0$$

dove :

- $[M]$ è la matrice delle masse,
- $[C]$ è la matrice degli smorzamenti
- $[K]$ è la matrice delle rigidezze.

La figura 32 riporta l'andamento delle impedenze Z_W e Z_R del sistema oscillante sopra il carrello e delle rotaie viste dal punto di applicazione della forza F . Negli andamenti delle due impedenze si riconoscono le risonanze dei diversi organi coinvolti nel fenomeno dinamico (sospensioni della carrozza sul carrello da un lato e sistema elastico costituito dall'armamento dall'altro).

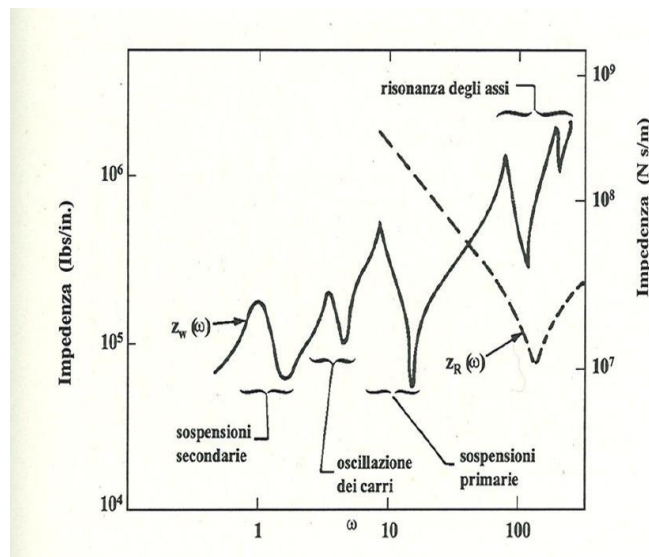


Figura 32: Impedenza meccanica del sistema carrozza ruota Z_W e dell'armamento Z_R

Le risonanze alle frequenze inferiori di 10 Hz sono dovute alle sospensioni secondarie (carrozza/carrello e traversine). Alle frequenze inferiori a 5 Hz Z_W è molto piccola rispetto a Z_R : la rotaia praticamente non risponde alle sollecitazioni della ruota.

Tra 10 e 30 Hz l'impedenza del veicolo è minore dell'impedenza della rotaia per cui si ha un maggior trasferimento di energia del terreno. Il fenomeno è prodotto dalla cedevolezza del sistema di sospensione delle carrozze che hanno un notevole effetto nella gamma di frequenze indicate.

Il massimo trasferimento di energia nella gamma di frequenze tra 50 e 200 Hz è facilmente spiegabile se si considerano le impedenze meccaniche Z_W e Z_R di un sistema massa-molla: l'impedenza della ruota è controllata dalla massa mentre l'impedenza della rotaia è controllata dalla molla, per cui esse hanno segno opposto. Da qui i valori minimi del denominatore della relazione con valori elevati della velocità di vibrazione. Nella figura si individuano le risonanze delle sospensioni secondarie, delle sospensioni primarie, delle oscillazioni delle carrozze e le risonanze degli assi.

L'uso di un modello di previsione di questo tipo è necessario quando si vogliono studiare gli interventi particolari sull'armamento ai fini della riduzione delle vibrazioni trasmesse al terreno. Nel grafico di figura 33

si riportano gli spettri dell'accelerazione rilevati a 3 m di distanza dal rilevato ferroviario durante il transito di un treno ad alta velocità ETR500 e di un treno tradizionale E444R. Sono visibili i massimi di trasmissione dell'energia vibratoria alle frequenze di 8, 25 e 63 Hz per il treno ad alta velocità ed i massimi alle frequenze di 6.3, 12.5 e 25 Hz per il treno più lento.

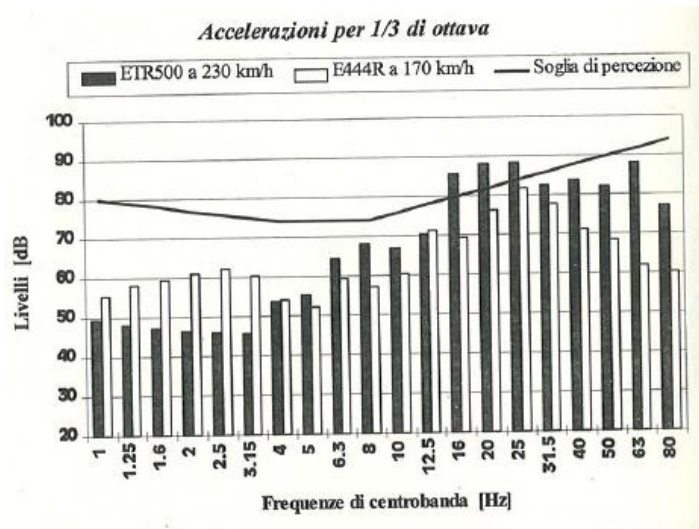


Figura 33: Spettro di emissione di un treno ad alta velocità ETR500 alla velocità di 230 km/h e di un treno E444R alla velocità di 170 km/h. I livelli globali pesati a 3m di distanza dal rilevato ferroviario sono $L_{w,eq} = 85,0$ dB per l'ETR500 ed $L_{w,eq} = 76,0$ dB per il treno E444R.

Le vibrazioni prodotte dal transito di tram in aree urbane

Nell'ambito urbano il tram, sul proprio armamento, si comporta come un treno a velocità ridottissima e che subisce in continuazione accelerazioni e rallentamenti. D'altro canto c'è da segnalare la disomogeneità del terreno sotto l'armamento per lo più occupato dalla rete dei sottoservizi di altri enti (acqua, gas, fognature, cavi elettrici, telefonici etc) che rendono assolutamente vario e imprevedibile il sottosuolo.

Si aggiungono a queste variabili anche il comportamento dinamico della pavimentazione stradale che copre l'armamento tranviario per consentire l'uso promiscuo della sede ad autobus, mezzi pubblici e mezzi privati. Un calcolo di previsione mediante modelli diventa estremamente difficoltoso e troppo puntuale per poter essere esteso a tutta la linea almeno in prossimità dei ricettori sensibili. Non resta che utilizzare i numerosi dati che possono essere rilevati in diverse sezioni stradali urbane ove sono presenti numerose tipologie di armamento e di tracciato e situazioni tipiche imposte dalla strada (presenza di viali, binari in aderenza ai marciapiedi, incroci, scambi).

I dati di misura, raccolti lungo i tre assi di riferimento e, possibilmente, in due punti distinti della sezione viaria uno in prossimità dei binari e l'altro sulle fondazioni dell'edificio più vicino, consentono il calcolo di previsione del livello all'interno delle abitazioni.

Nella figura 34 si riporta il tracciato grafico del livello di accelerazione nella gamma di frequenze da 1 a 80 Hz rilevato sulla strada a 90 cm dal binario e sulle fondazioni di un edificio posto a 980 cm dal binario durante il transito di un tram.

In corrispondenza del solo passaggio del tram indicato nella precedente figura si ricava lo spettro della componente verticale dell'accelerazione nei due punti di misura che si riportano nella figura 35.

Si osserva che il transito del tram manifesta, nella gamma di frequenze da 1 a 80 Hz, un massimo di energia alla frequenza 40 Hz. Utilizzando i livelli per bande di terzi di ottava dell'accelerazione misurata in prossimità della sede tranviaria e quelli rilevati sulle fondazioni dell'edificio si ricava il modulo della funzione di trasferimento delle vibrazioni in un tessuto urbano ad alta concentrazione edilizia.

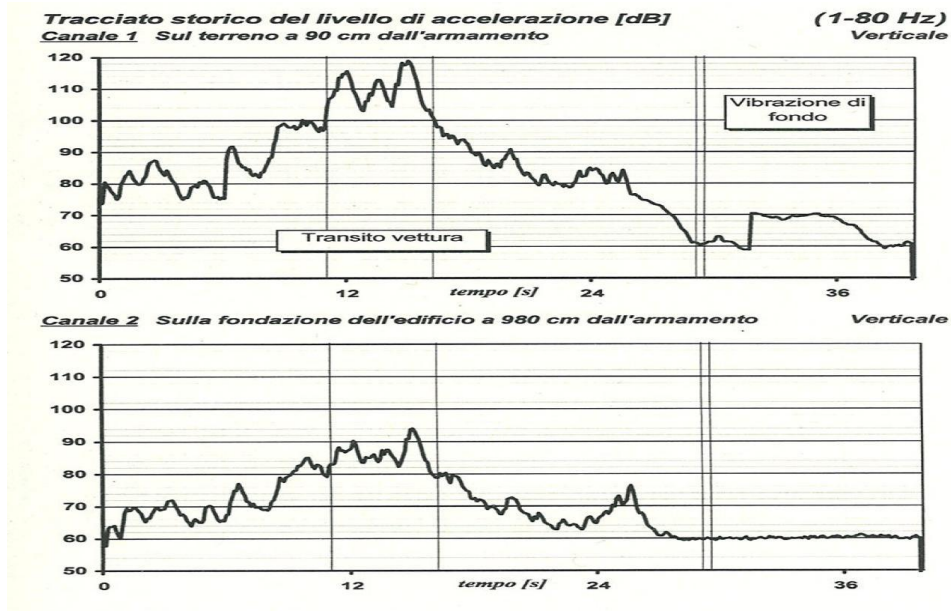


Figura 34: Andamento del livello di accelerazione (componente verticale) durante il passaggio di un tram. Si riporta il confronto tra il livello a 90 cm dal binario e quello sulla fondazione dell'edificio a 980 cm dal binario.

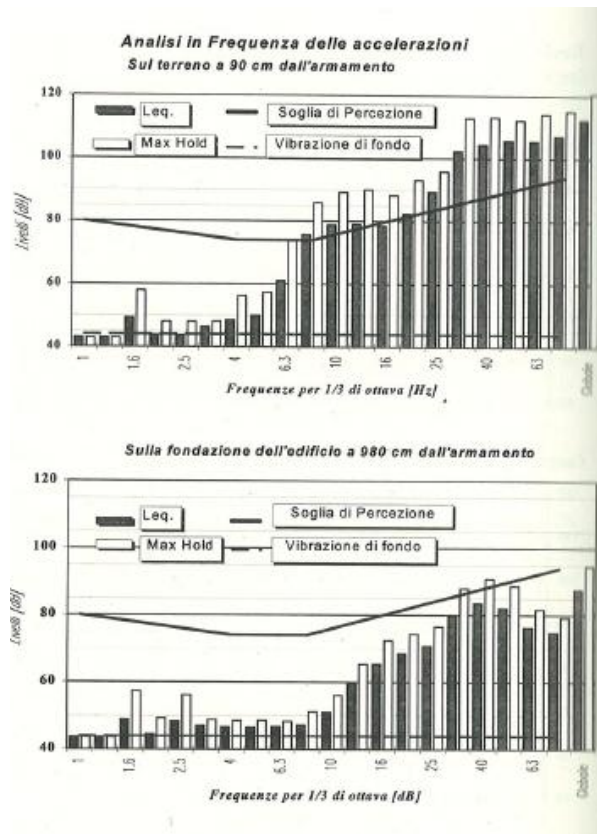


Figura 35: Livelli equivalenti dell'accelerazione per bande di terzi d'ottava rilevati a 90 cm di distanza dal binario $L_{w,eq} = 96,5$ dB e sulla fondazione di un edificio distante circa 980 cm dal binario $L_{w,eq} = 73,7$ dB durante il transito di un tram.

8.4.2. Origine delle vibrazioni generate dai treni in galleria: previsione dei carichi e delle risposte

Il problema della emissione delle vibrazioni dalle gallerie ferroviarie è di primaria importanza specialmente per gli attraversamenti delle città in sotterraneo e per le metropolitane. Si ricorda che in questo caso gli effetti più importanti sono il disturbo della vibrazione dei solai delle abitazioni ed il disturbo da rumore trasmesso per via solida.

Per la impostazione di un calcolo di previsione occorre determinare il livello di vibrazione del rivestimento della galleria e considerare il tipo di struttura da realizzarsi con particolare riferimento agli infilaggi ed ai pali di consolidamento del suolo. Il modello analitico è molto complesso e dipende sempre dalle soluzioni progettate localmente per superare le difficoltà di realizzazione incontrate durante lo scavo.

Studi approfonditi sulle caratteristiche di emissione di vibrazioni dei tunnel per metropolitane sono stati condotti da Ungar e Bender i quali hanno messo a punto un metodo semi-empirico per la previsione del livello di vibrazione basato su numerose misure sperimentali. Gli autori forniscono lo spettro di vibrazione standard ricavato attraverso numerose misure condotte sui rivestimenti delle metropolitane di Parigi, di New York e di Toronto. Lo spettro si riferisce ad una velocità media di transito pari a 56 km/h con rotaie attaccate rigidamente alle traversine.

Viene proposto di correggere lo spettro di emissione con l'aiuto di un secondo grafico per ottenere i livelli ad altre velocità di transito. I livelli riportati nel grafico si applicano a tutte le bande di frequenza dello spettro originario.

Il livello di accelerazione trasmesso alle pareti di un tunnel è funzione del tipo di ancoraggio della rotaia alla traversina. Se si usano supporti resilienti per ridurre la trasmissione delle vibrazioni con cedevolezza K inferiore a 1.4×10^8 N/m² allora occorre apportare allo spettro la seguente correzione Γ :

$$\Gamma = 5 * \text{Log}\left(\frac{K}{1,4 * 10^2}\right) \text{ dB}$$

valida per le basse frequenze e che diventa pari a:

$$\Gamma = 20 * \text{Log}\left(\frac{K}{1,4 * 10^2}\right) \text{ dB}$$

per le frequenze nel campo dell'udibile (utile per la valutazione e per la riduzione del rumore indotto nelle abitazioni per effetto delle vibrazioni).

Noto il livello di vibrazione su tutto il rivestimento della galleria (trattasi di una superficie di contatto con il terreno molto estesa rispetto a quella dell'armamento in rilevato) si considera la sorgente di tipo lineare e si calcola la potenza irradiata.

Nella maggior parte delle situazioni che si rilevano in pratica la sorgente non può essere considerata lineare in quanto la distanza dei ricettori dal rivestimento della galleria può essere paragonabile allo sviluppo dell'arco della galleria stessa. In pratica occorre considerare anche la lunghezza e le superficie dei pali di consolidamento che sono solidali con il rivestimento del tunnel. In certe situazioni urbane non è escluso che l'infilaggio di alcuni pali in senso obliquo possa realizzare delle situazioni di contatto del rivestimento della galleria con le fondazioni dell'edificio realizzando, in questo modo, ponti meccanici che risultano essere facile via di trasmissioni dell'energia vibratoria.

Nella Fig. 35 si riporta lo spettro delle vibrazioni rilevate sul rivestimento di una galleria durante il passaggio del treno ETR500 alla velocità di 230 km/h e si confronta questo con il livello misurato a 3 m sul rilevato ferroviario dello stesso treno alla stessa velocità.

Si osserva che su rilevato i livelli sono più elevati con massimo alla frequenza di 20-25 Hz; in galleria alle basse frequenze i livelli sono più contenuti mentre raggiungono valori più elevati alle alte frequenze (superiori a 50Hz). La rigidità della galleria attenua l'energia alle basse frequenze mentre la esalta alle alte frequenze. Questo fenomeno, segnalato in letteratura nella quale non sono descritte le tipologie dell'armamento e la sezione della galleria, crea apprensione per la trasmissione del rumore per via solida. In pratica i risultati possono essere capovolti per velocità diverse dal treno e per tipologie diverse dell'armamento.

8.5. Propagazione delle vibrazioni nel terreno

Per calcolare l'attenuazione delle vibrazioni in funzione della distanza dalla sorgente è di fondamentale importanza la conoscenza delle caratteristiche fisiche del terreno e dell'accoppiamento tra sorgente e terreno.

La sorgente infatti immette energia meccanica nel suolo la quale si propaga in diversi modi che possono essere eccitati direttamente dalla sorgente oppure trasformati durante il percorso di propagazione dell'energia.

Si ricorda che l'onda elastica, prodotta dall'azione di una forza variabile nel tempo, può essere generata sia sulla superficie di discontinuità solido-aria (macchinari ancorati al terreno, traffico su strada, su ferrovia, rumore che investe la facciata di un edificio ecc.), sia all'interno del terreno (terremoti, metropolitane, attività di scavo delle gallerie, traffico in galleria, rumore in galleria ecc.). In pratica il mezzo solido entro il quale si propaga un'onda elastica non è omogeneo ma presenta delle variazioni continue o brusche delle costanti elastiche (si pensi alla stratificazione del terreno, alla presenza di falde freatiche ecc.), per cui si manifestano fenomeni di attenuazione, di rifrazione e di riflessione dell'onda elastica con possibili trasformazioni del modo di propagazione.

8.5.1. I modi di propagazione

In un mezzo omogeneo solido ed infinito all'interno del quale agisce una sorgente di vibrazioni, la perturbazione elastica prodotta può propagarsi con modo longitudinale e/o con modo trasversale.

- **Modo longitudinale**: (possibile nei solidi, liquidi ed aeriformi) è la propagazione dell'energia meccanica con moto delle particelle nella direzione di propagazione dell'onda. Nella direzione di propagazione sono presenti zone di compressione e di rarefazione; le loro distanze definiscono mezza lunghezza d'onda λ .
- **Modo trasversale**: (possibile solo nei solidi) è la propagazione dell'energia meccanica nella direzione di propagazione con moto delle particelle nella direzione perpendicolare a quella della propagazione dell'onda. Tale modo di propagazione è possibile nei solidi poiché solo essi reagiscono allo sforzo di taglio: caratteristica di tale onde è l'assenza di zone di rarefazione e di compressione (non ci sono, cioè fluttuazioni localizzate della densità del mezzo come nel modo di propagazione longitudinale). Anche in questo caso si definisce una lunghezza d'onda λ .

Sulla superficie di discontinuità solido-fluido di un semispazio solido (es. il terreno) sono possibili due modi di propagazione della perturbazione elastica:

- **Onde di Rayleigh**: sono onde superficiali caratterizzate da un moto delle particelle ellittico con componente verticale ed orizzontale. L'ampiezza del moto decresce esponenzialmente all'aumentare della profondità dalla superficie. Ad una distanza di una lunghezza d'onda dalla superficie l'ampiezza della vibrazione è minore del 10% di quella sulla superficie. Considerando la frequenza di 20 Hz e la velocità trasversale nel terreno pari a 150 m/s, alla profondità di 7.5 m l'ampiezza dell'onda di Rayleigh è già ridotta del 10%.

- **Onde di Love**: sono onde superficiali che si manifestano su uno strato con caratteristiche diverse da quello sottostante.

L'interesse pratico dei modi di propagazione delle onde sopra elencate è evidente nei casi in cui la sorgente di vibrazioni è situata all'esterno di edifici, sia in superficie che in profondità. Ricordando che la propagazione delle onde di vibrazione può avvenire con modo longitudinale o con modo trasversale e che le onde superficiali di Rayleigh si attenuano molto meno delle onde di compressione o di taglio, appare chiara l'importanza di conoscere quale "modo", diverso per sorgente in superficie o in galleria, si propaga nel terreno.

Concentrando l'attenzione sull'attenuazione per dissipazione (non considerando, cioè, quella per divergenza del fascio), il decadimento delle ampiezze con la distanza è dato dalla relazione:

$$A(r) = A_0 e^{-\frac{\omega \zeta}{2c} r}$$

dove:

- $\omega = 2\pi f$ radianti/s
- ζ è il fattore di perdita del terreno
- r è la distanza dalla sorgente
- c è la velocità del particolare modo di propagazione

Le onde di compressione (onde longitudinale) viaggiano a velocità di 2,5 – 4 volte superiori alla velocità delle onde trasversali e di quelle di Rayleigh. Conseguentemente se il fattore di perdita è dell'ordine del 10%, ci si aspetta che, a poche lunghezze d'onda dalla sorgente, le onde longitudinali predominino sulle altre (il fattore di perdita è lo stesso per tutti i modi di propagazione).

Una distanza pari a poche lunghezze d'onda dalla sorgente è rilevante per un'onda longitudinale: se $c = 1500$ m/s, una distanza di tre lunghezze d'onda a 50 Hz corrisponde alla distanza dalla sorgente $r = 90$ m.

8.5.2. Propagazione nel terreno per sorgenti sotterranee

Un'espressione analitica per il calcolo delle vibrazioni ad una certa distanza dalle gallerie può fornire valori errati per la natura non omogenea del suolo e per il fatto che le stratificazioni geologiche sono a volte di dimensioni inferiori o paragonabili ad una lunghezza d'onda del modo che si propaga.

Ungar e Bender propongono il calcolo dell'attenuazione in funzione della distanza dalle pareti del tunnel utilizzando una relazione del tipo:

$$A_T = A_S + A_d + A_i \quad dB$$

dove:

$$A_s = 10 * \text{Log} \left(\frac{R + x}{R} \right)$$

$$A_d = 4,34 \frac{\omega \eta x}{c}$$

$$A_i = 20 * \text{Log} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_c c_c}{\rho_a c_a} \right) \right]$$

con R si indica il raggio della galleria ed x è la distanza dalla galleria.

Le attenuazioni sopra riportate si riferiscono alla divergenza geometrica per sorgente lineare A_s , all'attenuazione prodotta per dissipazione interna A_d ed all'attenuazione dovuta alla variazione delle caratteristiche del terreno che l'onda incontra nel tragitto di propagazione.

Gli autori suppongono che il modo unico di propagazione sia quello per onde longitudinali e, per esso, forniscono i seguenti valori:

Tipo di terreno	Velocità di propagazione per onda longitudinale m/s	Fattore di perdita η	Massa volumica ρ (g/cm ³)
Roccia	3500	0.01	2.65
Sabbia	600	0.10	1.60
Argilla	1500	0.50	1.70

Tabella 22 : Caratteristiche meccaniche dei diversi terreni

La propagazione delle vibrazioni sul terreno è di difficile modellizzazione per le numerose riflessioni, rifrazioni e diffrazioni che l'onda meccanica incontra per effetto della disomogeneità del sottosuolo.

Considerando la tipologia di strada più semplice si osserva che il "modo" di propagazione più frequente è quello di un'onda di superficie di Rayleigh che decade con legge inversa alla radice quadrata della distanza per la sola divergenza geometrica del fascio. Ci sono poi altri meccanismi dissipativi che riducono ulteriormente l'energia meccanica che si propaga.

Rudder considera le due componenti dell'attenuazione: divergenza geometrica e attenuazione del terreno. Il livello di accelerazione alla distanza r dalla sorgente è dato da:

$$L(r) = L_0 + 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{d_0}{r} \right) - 8.69 \alpha (r - d_0) \text{ dB}$$

dove:

- L_0 è il livello di riferimento
- d_0 è la distanza di riferimento per L_0
- r è la distanza dalla sorgente
- α è la costante di attenuazione del terreno

il termine relativo all'attenuazione per dissipazione dell'energia meccanica è ottenuto dalla relazione $e^{-\alpha(r-d_0)}$.

I valori di α forniti da Rudder sono i seguenti:

Tipo di terreno	velocità dell'onda trasversale m/s	α per m
Argilla umida	152	0,025-0,25
Deposito alluvionale di argilla	152	0,019-0,43
Argilla bagnata	152	0,31-0,50
Depositi ad umidità ambientale	259	0,04-0,13
Sabbia asciutta	152-396	0,007-0,07
Sabbia compatta con ghiaia	250	0,015-0,045
Ghiaia e sabbia di deposito	250	0,023-0,053
Sabbia granulosa satura d'acqua	110	0,09-0,3
Sabbia granulosa satura d'acqua ghiacciata	110	0,05-0,17

Tabella 23 : Valori della costante di attenuazione α per diversi tipi di terreno e per la frequenza di 15 Hz

I valori sopra riportati sono stati ottenuti per la frequenza $f=15$ Hz e per $\alpha = \frac{2\pi f \zeta}{c}$ dove ζ è il fattore di perdita del terreno e c è la velocità di propagazione per modo di propagazione trasversale.

L'equazione sopra riportata si riferisce ad una sorgente puntiforme. Nel caso di veicoli in moto sulla strada la distanza r dipende dal tempo. Il livello equivalente energetico si ottiene per integrazione sul tempo di transito. Considerando N veicoli il livello equivalente di accelerazione relativo ad una sorgente lineare è dato da:

$$L_e = L_0 + 10 \cdot \log\left(\frac{d_0}{Vt}\right) - 5 \cdot \log(\alpha d) - 8.69\alpha(d - d_0) + 10 \cdot \log(N) + 2.5 \quad \text{dB}$$

Dove:

- t è il tempo di transito
- V è la velocità dei veicoli (m/s)
- d è la distanza del ricevitore dalla strada (m)

Il valore massimo del livello di accelerazione lo si raggiunge per $r = d$.

Per quanto riguarda il contenuto spettrale della forza eccitatrice, questo risulta inferiore per eccitazioni impulsive prodotte da dossi o buche rispetto a quello prodotto per rugosità del manto stradale. Rudder suggerisce di utilizzare per questo secondo caso valori di α ridotti di 1/3. Con riferimento all'esempio di calcolo per eccitazione impulsiva prodotta dalle buche sull'asfalto, l'equazione relativa alla sorgente puntiforme fornisce il livello di accelerazione ad una determinata distanza. Alla distanza di 10 m, ad esempio, supponendo un livello massimo (di picco) pari a 124 dB ref. $1 \mu\text{m/s}^2$ e considerando $\alpha = 0,15$ m l'equazione fornisce i seguenti valori del livello e della accelerazione a 10 m di distanza:

$$L_{(10m)} = 110 \text{ dB (ref. } 1 \mu\text{m/s}^2)$$

$$a_{(10m)}=0,32 \text{ m/s}^2$$

I contributi all'attenuazione sono pari a 10 dB per la divergenza dell'onda ed a 4 dB per la dissipazione del terreno.

A distanze elevate l'effetto della dissipazione di energia è più consistente. Si calcola che a 30 m dalla discontinuità sull'asfalto l'attenuazione per divergenza dell'onda sia pari a 15 dB; quella per dissipazione sia pari a 13 dB. Per l'esempio di calcolo impostato si ottiene:

$$\begin{aligned} L_{(30m)} &= 81 && \text{dB ref. } 1\mu\text{m/s}^2 \\ \alpha_{(30m)} &= 0,011 && \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

I valori sopra calcolati sono in buon accordo con quelli misurati sul territorio.

8.5.3. Risposta degli edifici alle vibrazioni indotte dal traffico stradale

Le strutture di un edificio sono eccitate a vibrare dall'energia sonora a bassa frequenza che investe le facciate e dall'energia meccanica che si trasmette attraverso le fondazioni.

Eccitazione per via aerea

Per quanto riguarda l'eccitazione per via aerea (rumore) è possibile prevedere con il calcolo il livello sonoro alle basse frequenze che investe la facciata dell'edificio e il conseguente livello sonoro all'interno dell'abitazione.

In questo caso si verifica un'esaltazione del livello di vibrazione alle basse frequenze per effetto della risonanza del volume delle camere. Il livello di pressione sonora produce una forza sulle pareti divisorie di ampiezza non trascurabile. Si evidenzia come un livello di 94 dB (comune nelle strade urbane alla frequenza di 16 Hz) esercita una pressione di 1 N/m^2 . Un primo elemento edilizio soggetto a vibrazioni indotte dal rumore di traffico stradale è il serramento di facciata. Sono stati misurati livelli di accelerazione delle lastre di vetro di 116 dB, ref. $1\mu\text{m/s}^2$ per livelli di pressione sonora sulla facciata pari a 100 dB alla frequenza di 50 Hz.

Un secondo componente edilizio è costituito dal pavimento e dai divisori interni. Tenendo presente che in una stanza di dimensioni normali il modo fondamentale di risonanza per il rumore è di 40 Hz, si osserva un incremento di energia sonora a tale frequenza ed un corrispondente picco di accelerazione del pavimento. È interessante confrontare il livello di vibrazione del pavimento con il livello di rumore all'interno di una stanza generati dal transito di un camion da 32 t. Si osserva, infatti, una trasformazione dello spettro di rumore per il filtraggio meccanico prodotto dal pavimento attraverso la funzione di trasferimento rumore/vibrazione.

Eccitazione per via solida

La trasmissione per via solida delle vibrazioni avviene attraverso le fondazioni. La massa di un edificio che carica il terreno crea una discontinuità nel mezzo di propagazione (suolo → edificio) con conseguente

riflessione dell'energia meccanica. Malgrado questo disadattamento di impedenza meccanica il livello delle vibrazioni delle strutture dell'edificio può subire un'esaltazione, per effetto della risonanza, se confrontato con il valore misurato sul terreno.

In molti casi pratici si è riscontrato un aumento della velocità di vibrazione delle strutture di un fattore compreso tra 0,5 e 5,0 e con frequenze nella gamma tra 25 e 30 Hz. L'esaltazione dell'ampiezza di vibrazione è dovuta all'eccitazione del modo fondamentale di risonanza delle strutture. Le frequenze tipiche fondamentali, che dipendono dalle dimensioni fisiche e dai parametri meccanici degli elementi strutturali, sono:

Elemento strutturale	Frequenze di risonanza
Travi	5 – 50 Hz
Pavimenti e tramezzi	10 – 30 Hz
Finestre	10 – 100 Hz
Soffitti in gesso	10 – 20 Hz

Tabella 24 : Frequenze di risonanza di alcuni elementi di edificio

Questi valori di frequenze trovano riscontro con le frequenze alle quali si concentra la massima energia di vibrazione prodotta dal traffico stradale pesante. Il livello di picco dell'accelerazione di 109 dB ref. $1\mu\text{m/s}^2$ calcolato sul terreno a 10 m dalla sorgente per effetto della discontinuità ipotizzata (assumendo un incremento di 5 dB per risonanza delle strutture) produce un livello di accelerazione pari a 114 dB ref. $1\mu\text{m/s}^2$ che è in grado di causare sensibili danni alle strutture.

Modelli di calcolo di previsione

I modelli di calcolo in senso globale non sono disponibili sotto il profilo commerciale. Il professionista può costruire specifici modelli a seconda delle diverse esigenze e del particolare tipo di infrastruttura di trasporto che sta analizzando. Qui di seguito si riporta un esempio di calcolo dei livelli di vibrazione sulle strutture di un edificio noto lo spettro di eccitazione sul terreno.

In primo luogo per la valutazione degli effetti di propagazione delle vibrazioni negli edifici si deve tenere conto dei seguenti fattori:

- attenuazione dovuta alla perdita di energia vibrazionale dovuta all'accoppiamento terreno-fondazioni;
- amplificazione dovuta alla presenza di eventuali fenomeni di risonanza con le frequenze proprie della struttura dell'edificio;
- variazione del livello dovuta alla propagazione , dal basso verso l'alto, passando dai piani bassi verso quelli alti;
- trasformazione delle vibrazioni di pareti e solaio in rumore.

Accoppiamento suolo fondazioni

Per quanto riguarda il primo fattore, in base agli studi sperimentali effettuati e reperibili in letteratura, è possibile distinguere le diverse situazioni esposte nella tabella in cui sono riportati i valori delle attenuazioni in funzione delle bande di frequenza ed in funzione della tipologia di edificio.

Tipo di edificio	4 Hz	8 Hz	16 Hz	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz
In muratura su pali	5	5	6	7	10	13
In muratura su platea	10	10	12	14	13	13
Villino	(4°)	(4°)	4	5	5	4
In muratura a 2-4 piani	4	5	10	12	12	11
Commerciali 1-2 piani	(7°)	(7°)	7	8	8	7

Considerando per ciascun tipo di edificio il valore della attenuazione ed applicandolo a ciascuna banda di frequenze della eccitazione si ottengono i livelli sulla fondazione.

Amplificazione dovuta alla presenza di risonanze

Il secondo parametro che ha influenza sulla propagazione delle vibrazioni negli edifici dipende invece dalla eventuale coincidenza di uno o più componenti vibratorii con le risonanze della struttura. È evidente che per poter tenere conto di questo fenomeno si devono valutare i valori delle frequenze proprie della struttura. In prima approssimazione e senza entrare nel dettaglio è possibile stimare le frequenze proprie con calcoli semplificati.

Per le frequenze orizzontali la norma DIN 4150 suggerisce di calcolare le frequenze proprie ai vari piani con la formula

$$f_0 = 10/n$$

dove n è il numero del piano.

Per le frequenze connesse a modi verticali si può scrivere per la frequenza fondamentale:

$$f(v1) = k^2 h / (2 \pi L^2) \sqrt{E / (12 \cdot \delta)}$$

dove:

- k è un fattore dipendente dalle condizioni di vincolo
- h è lo spessore del solaio
- L è la luce libera di inflessione
- E è il modulo di Young
- δ è la densità del materiale costituente il solaio

Per quanto riguarda k si possono assumere i seguenti valori:

- solaio appoggiato $k = \pi$
- solaio incastrato $k = 4.73$

Considerando una condizione intermedia si ottiene:

$$k^2 = 16.12$$

Oltre alla prima frequenza di risonanza verticale è da considerare anche la seconda frequenza. Essa si calcola assumendo k^2 pari al valore fornito dalla relazione:

$$k^2 = (4 \cdot 4 \cdot \pi^2 + 7.853^2) / 2 = 50.57$$

A seconda del rapporto tra frequenza di eccitazione f e frequenza propria (f_0) varia il fattore di trasferimento $H(f)$ che dipende anche dallo smorzamento ξ . Questo per strutture in cemento armato sollecitate lontano dal limite elastico può essere assunto pari ad un valore compreso tra 0.04 e 0.07. Nei calcoli di simulazione si può assumere il valore di $\xi=0.05$

Conosciuta la funzione di trasferimento per eseguire correttamente l'analisi strutturale sotto un'eccitazione di tipo casuale si deve determinare la funzione di densità spettrale dell'eccitazione al piede della struttura e quindi risalire alla funzione di densità spettrale della vibrazione dell'edificio stesso.

Da quest'ultima in poi è possibile valutare lo spettro delle accelerazioni nell'edificio.

La funzione densità spettrale può essere posta, in via del tutto approssimata come pari a:

$$S(f) = L(f) / \Delta f$$

dove $L(f)$ è il livello di vibrazione, espresso come valore quadratico medio, in corrispondenza ad una certa banda individuata dal valore centrale f e larghezza di banda Δf .

La propagazione all'interno dell'edificio dà luogo ad una funzione di densità spettrale modificata rispetto a quella del piede; tale funzione $S'(f)$ è calcolabile con la relazione:

$$S'(f) = |H(f)|^2 \cdot S(f)$$

Se successivamente si opera l'operazione inversa rispetto a quella precedentemente eseguita, si può calcolare dalla nuova funzione di densità spettrale la nuova distribuzione dei livelli di vibrazione. In questo caso la relazione è:

$$L(f) = S'(f) \cdot \Delta f$$

Il valore di $|H(f)|^2$ può essere calcolato, in prima approssimazione, considerando la struttura come la sovrapposizione di tre oscillatori indipendenti caratterizzati dalle frequenze $f(0)$, $f(v1)$ e $f(v2)$ e considerando che l'eccitazione d'ingresso è dovuta ad uno spettro di accelerazioni provenienti dalle fondazioni. In tali condizioni si ha:

$$|H(f)|^2 = D1 / D2 + D3 / D4 + D5 / D6$$

dove

$$D1 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot (f/f_0)^2}$$

$$D2 = \sqrt{[1 - (f/f_0)^2]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot (f/f_0)^2}$$

$$D3 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot (f/f_{v1})^2}$$

$$D4 = \sqrt{[1 - (f/f_{v1})^2]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot (f/f_{v1})^2}$$

$$D5 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot (f/f_{v2})^2}$$

$$D6 = \sqrt{[1 - (f/f_{v2})^2]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot (f/f_{v2})^2}$$

A titolo di esempio nella figura 36 sono riportati i valori di $|H(f)|^2$ per il primo piano di una costruzione utilizzando i seguenti dati:

$h = 24 \text{ cm}$

$L = 4 \text{ m}$

$E = 2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

$\delta = 2000 \text{ Kg/m}^3$

$x = 0.05$

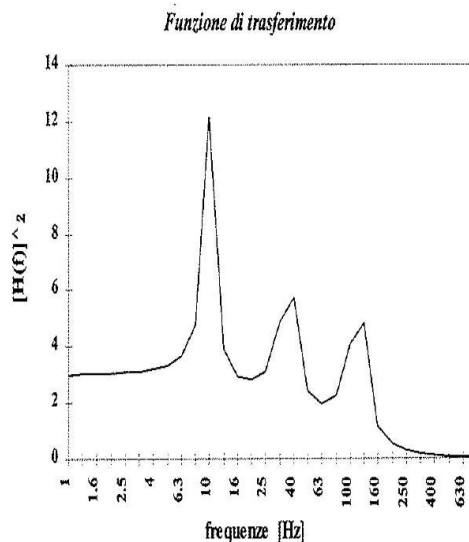


Figura 36 : Funzione di trasferimento per un edificio a due piani, si evidenziano i picchi di risonanza alle frequenze $f_0 = 10 \text{ Hz}$, $f_1 = 36,6 \text{ Hz}$ ed $f_2 = 114,8 \text{ Hz}$

Trasformazione delle vibrazioni in rumore

Le vibrazioni della struttura di un edificio causano un incremento di rumore che dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche degli ambienti e dal coefficiente di assorbimento delle pareti, anche e soprattutto dalle caratteristiche della vibrazione entrante.

Il calcolo del rumore così generato potrebbe essere eseguito considerando il classico problema della parete vibrante. Numerose sperimentazioni hanno però messo in evidenza che il livello di pressione sonora può

essere valutato utilizzando il livello di accelerazione rilevabile ovvero prevedibile sulle pareti della stanza, sul soffitto e sul pavimento. Il calcolo dovrebbe prevedere anche l'efficienza di radiazione dei divisori; in prima approssimazione questa può essere assunta pari ad uno per cui il livello di rumore L_p può essere determinato con la formula approssimata:

$$L_p = L_a - 20 \cdot \log(f) + 17.2 \text{ dB}$$

Dove:

L_a è il livello di accelerazione medio su tutte le pareti che delimitano la stanza

f è la frequenza in esame.

Ovviamente per ottenere un livello equivalente pesato "A" occorre considerare lo spettro dell'accelerazione fino alla frequenza di 1600 Hz ed effettuare la pesatura fonometrica.

9. MISURAZIONE DELLE VIBRAZIONI

Il monitoraggio dei fenomeni vibratorii è da sempre oggetto di studio ed approfondimento alla ricerca di nuove tecnologie più precise allo scopo di misurare i livelli di vibrazione nel modo più affidabile possibile.

La catena di misura usualmente utilizzata per stimare i fenomeni sismici è composta da cinque sistemi:

1. sistema di rilevamento;
2. sistema di acquisizione;
3. sistema di registrazione;
4. sistema di amplificazione/condizionamento del segnale;
5. metodologie di analisi del segnale.

La misura di una grandezza fisica caratterizzante i fenomeni vibratorii prevede l'utilizzo di trasduttori (sistema di rilevamento) dai quali il segnale raggiunge, tramite il sistema di trasmissione, il sistema di acquisizione dove le misure vengono memorizzate dal sistema di registrazione. Ad elevate distanze dalla sorgente vibrante, il segnale da catturare può essere debole, perciò l'operatore può inserire un sistema di amplificazione tra il sistema di rilevamento e di acquisizione per ottimizzare l'acquisizione del segnale.

Le successive analisi ed elaborazioni del segnale permettono di raggiungere una corretta interpretazione dei dati con l'ausilio di avanzati software dedicati.

La scelta ottimale dei sistemi che compongono la catena di misura è influenzata da numerosi parametri quali il numero di canali analogici, la risoluzione del processo di conversione analogico/digitale, la velocità di campionamento, la compatibilità in fase di condizionamento del segnale, i filtri ed i livelli di amplificazione, la qualità dei cavi e le prestazioni dei sensori.

9.1. Sistema di rilevamento.

Un trasduttore è un dispositivo che trasforma grandezze fisiche diverse utilizzando tre operazioni fondamentali successive:

- a) conversione della quantità fisica in una quantità meccanica;
- b) conversione della quantità meccanica in una quantità elettrica;
- c) conversione della quantità elettrica in un'altra quantità elettrica finale (in genere una tensione).

Ad esempio, un trasduttore sismico esegue tutte le conversioni citate senza modificare la storia temporale della grandezza fisica (spostamento, velocità, accelerazione): lo spostamento in ingresso diventa uno spostamento relativo, che è trasformato in una variazione di resistenza e questa ultima è trasformata in una variazione di tensione.

La grandezza caratterizzante il fenomeno fisico di interesse è trasformata in un proporzionale segnale analogico, utilizzando una relazione nota tra le quantità in ingresso ed in uscita (costante di calibrazione),

influenzata, nella realtà pratica del monitoraggio, dall'errore della non linearità caratterizzante le conversioni tra grandezze fisiche e dagli errori delle distorsioni.

I trasduttori possono essere raggruppati in due principali categorie in funzione della tipologia del processo di trasformazione:

- i trasduttori attivi: convertono l'energia meccanica in ingresso in energia elettrica, senza l'ausilio di un'alimentazione esterna (geofoni ed accelerometri);
- i trasduttori passivi: la conversione della grandezza in ingresso avviene modificando i parametri interni del sensore che produce un'informazione "latente", che si manifesta solo se i trasduttori vengono alimentati. Tipico esempio è fornito dai sensori capacitivi che convertono la variazione della grandezza da misurare in una variazione di uno dei suoi parametri caratteristici (geometria del sensore o costante dielettrica).

In generale, gli sperimentatori e le normative in materia di vibrazioni individuano come sensori più adatti al monitoraggio dei fenomeni sismici i trasduttori attivi di velocità e di accelerazione.

9.2. Trasduttori attivi di accelerazione

I principali trasduttori attivi di accelerazione usati per monitorare il fenomeno vibratorio sono i sensori piezoelettrici figura 37, che sfruttano la proprietà di alcuni materiali (naturali o ceramici) di generare cariche elettriche quando vengono sottoposti a sollecitazioni meccaniche.

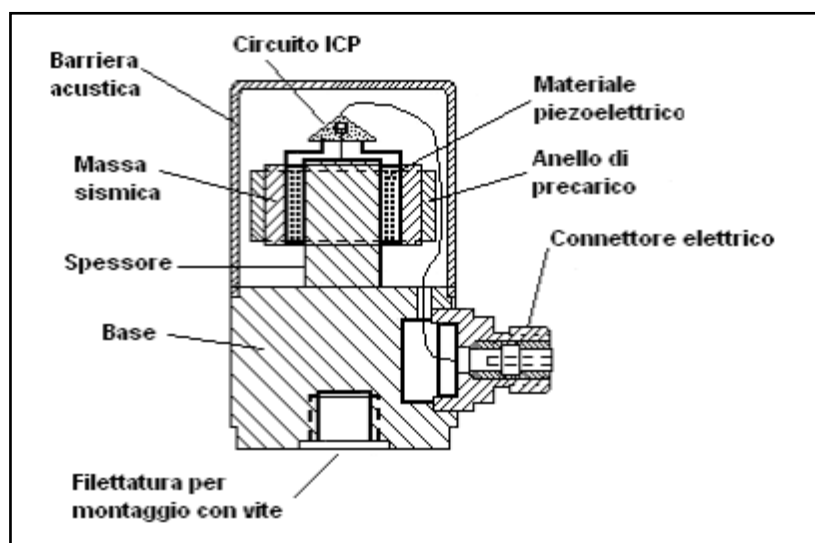


Figura 37: trasduttore piezoelettrico

L'accelerometro piezoelettrico è uno dei migliori trasduttori attualmente disponibili per la misura delle vibrazioni, ed il suo diffuso impiego è giustificato dalle sue numerose proprietà:

- ☐ applicabile in campi di frequenza ampi;
- ☐ buona linearità su un campo dinamico esteso;
- ☐ adatto in diverse condizioni ambientali mantenendo una buona accuratezza;
- ☐ estremamente robusto per la mancanza di parti in movimento;
- ☐ ingombro contenuto.

Dal punto di vista costruttivo, i trasduttori piezoelettrici si differenziano per il tipo di sollecitazione meccanica esercitata sull'elemento trasduttore in sensori a compressione, a taglio ed a flessione, vedi figura 38.

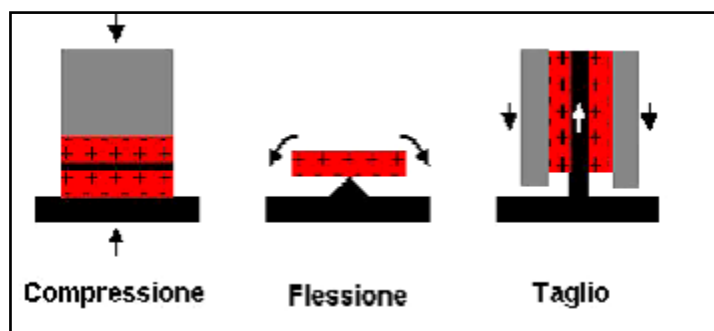


Figura 38: Sollecitazioni dell'elemento trasduttore

Gli accelerometri a compressione sono caratterizzati da un sistema massa sismica elemento piezoelettrico montato su un perno cilindrico centrale collegato alla base e mantenuto in posizione da una vite di precarico posta superiormente. Il perno e la base si comportano come una molla in parallelo all'elemento piezoelettrico: ogni deformazione della base, (flessione o variazioni di temperatura) può sollecitare l'elemento piezoelettrico, introducendo un errore nel segnale in uscita. Negli ultimi anni, la resistenza termica di questo tipo di sensori è stata migliorata utilizzando materiali piezoelettrici quali tormalina e niobato di litio permettendo di eseguire affidabili misure di vibrazione in un range di temperatura tra $-254\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $760\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per comprendere e sfruttare al meglio le potenzialità degli accelerometri è utile conoscere le loro principali caratteristiche:

- **Sensibilità:** rapporto tra l'output elettrico e l'input meccanico rilevato. La sensibilità dei trasduttori attivi (accelerometri piezoelettrici) è espressa in termini di tensione per unità di accelerazione (mV/g);
- **Risoluzione:** la più piccola variazione di input meccanico che genera una variazione percettibile di output elettrico, dipendente dall'elemento trasducente e dall'architettura del sensore;
- **Sensibilità trasversale:** sensibilità ad accelerazioni in direzione ortogonale a quella principale di misura, influenzata da inevitabili imperfezioni di allineamento dell'elemento piezoelettrico, che

portano ad un'inevitabile deviazione dell'asse di massima sensibilità, non più coincidente con l'asse di montaggio dell'accelerometro;

- *Range di ampiezza*: intervallo entro il quale la sensibilità del trasduttore rimane costante ed all'aumentare dell'ampiezza del fenomeno vibratorio aumenta linearmente il segnale in uscita; l'intervallo è limitato inferiormente dal valore del rumore del sistema di misura e superiormente dalle caratteristiche elettriche dell'elemento trasducente, dalle dimensioni e dalla fragilità dello strumento (maggiore è la sensibilità dello strumento, minore è il range di ampiezza);
- *Intervallo di frequenza*: l'intervallo di operatività dello strumento entro il quale il sensore presenta una risposta lineare (dB): il segnale elettrico in uscita rimane costante mantenendo costante l'ampiezza dell'input meccanico; l'intervallo è limitato superiormente dal valore della frequenza naturale del sensore, ed inferiormente dalle caratteristiche elettriche del trasduttore e degli elementi della catena di misura;
- *Sfasamento*: ritardo tra input meccanico ed output elettrico;
- *Peso e dimensioni*: le dimensioni ed il peso del trasduttore sono direttamente correlate alla sensibilità ed al range di frequenza utile dello strumento; infatti, all'aumentare delle dimensioni aumenta la sensibilità e diminuisce il range di frequenza. Ottenere output caratterizzati da alti livelli, prevede la necessità di aumentare le dimensioni ed il peso dello strumento, che possono pregiudicare l'impiego del sensore in determinate circostanze; per questo motivo gli operatori preferiscono utilizzare trasduttori di piccole dimensioni associati a preamplificatori integrati che consentono di trattare livelli di segnale anche molto bassi.

9.3. Installazione dei sistemi di monitoraggio

Le elevate prestazioni di un trasduttore attivo di accelerazione, necessita di un'accurata pianificazione e posizionamento dei trasduttori durante il monitoraggio dei fenomeni vibratori.

A questo scopo, diventa importante la tecnica di montaggio del sensore da adottare, in quanto rappresenta uno dei fattori più importanti e critici per l'accuratezza della misura.

Conseguentemente, per la scelta della metodologia di accoppiamento da utilizzare devono essere accuratamente valutati alcuni parametri quali il luogo, la robustezza, l'ampiezza del campo (di misura), l'accessibilità, la temperatura, l'intervallo di frequenza e la portabilità che possono essere estremamente critiche.

L'adozione di un adeguato accoppiamento tra il trasduttore e la superficie di misura è fondamentale, in quanto un montaggio non corretto può provocare una sensibile riduzione della frequenza di risonanza del trasduttore, che può limitare notevolmente il campo di frequenza utile dello strumento.

La normativa UNI ISO 5348 indica le seguenti condizioni operative nelle quali un trasduttore fornisce risultati affidabili:

- a) l'accoppiamento del sensore alla superficie di misura deve essere tale per cui seguirà il più fedelmente possibile il moto della struttura sotto esame;
- b) dopo l'installazione del trasduttore, il moto della struttura deve cambiare il meno possibile;
- c) l'intervallo di frequenza di operatività del trasduttore non deve essere prossimo alle frequenze di risonanza del sistema montato per non provocare distorsioni nel segnale rilevato;
- d) si devono evitare movimenti del cavo ed errori durante il montaggio che possono causare scostamenti derivanti da disallineamenti dell'asse del trasduttore, flessioni della base, transitori termici e torsioni.

Per soddisfare le condizioni citate e per ottenere misure il più affidabile possibile è necessario assicurarsi che:

- 1. l'accelerometro ed il suo montaggio siano il più possibile rigidi e fissi (le superfici di contatto devono essere il più pulite e piane possibile);
- 2. il montaggio introduca la minima distorsione possibile (per esempio i migliori sono i dispositivi di montaggio asimmetrici e semplici);
- 3. la massa dell'accelerometro e del suo sistema di fissaggio siano piccoli rispetto alla struttura in esame;
- 4. l'accelerometro sia impiegato molto al di sotto la sua frequenza fondamentale di risonanza, se si adotta il montaggio raccomandato dal costruttore, il funzionamento del trasduttore si limiterà a frequenze massime inferiori al 20% della frequenza di risonanza caratterizzante l'accelerometro montato; in questo caso, gli errori che si commetteranno saranno pari a qualche percento della risposta in ampiezza.

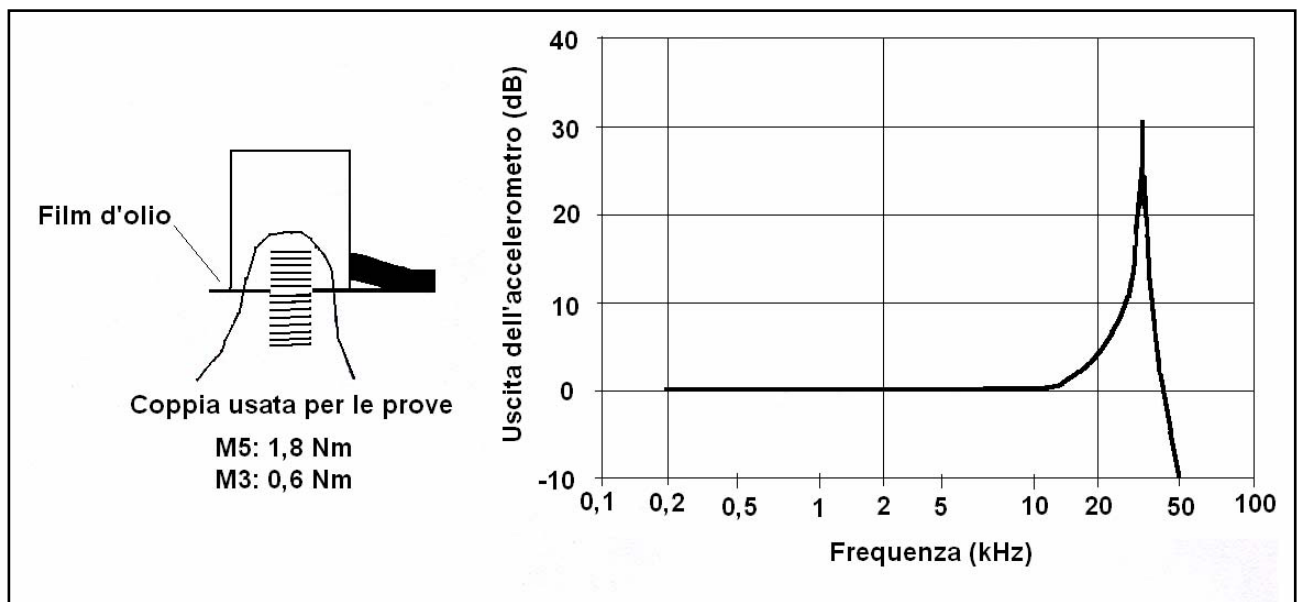


Figura 39: Risposta in frequenza di un accelerometro montato su perno con film di olio (UNI ISO 5348).

10. SESSIONI SPERIMENTALI

Nell'ambito della presente tesi di dottorato si è proceduto a mettere in atto diverse sessioni di misura delle vibrazioni ambientali prodotte da diverse infrastrutture viarie.

Lo scopo principale delle misurazioni era la ricerca di una possibile correlazione sperimentale tra i dati rilevati a bordo struttura viaria ed i valori misurati ad una determinata distanza dall'asse stradale, tipicamente circa 50/60 m.

Tale evidenza sperimentale, al momento attuale, non nota, permetterà di poter prevedere in futuro in via preliminare il diverso impatto dei mezzi di trasporto e dei veicoli civili nei confronti dei diversi ricettori potenzialmente esposti.

Le misure sono state condotte lungo diversi assi stradali principali, diversi per tipologia di flusso di mezzi e numero di corsie al fine di poter avere diverse caratteristiche delle emissioni di vibrazioni.

Si riportano per brevità solo i risultati delle due infrastrutture risultate essere le più interessanti in termini di risultati ottenuti.

La prima infrastruttura è la tangenziale sud di Brescia, in particolar modo i rilievi si sono concentrati nei punti nevralgici dell'infrastruttura ovvero in prossimità degli svincoli autostradali dell'autostrada A4 (Venezia – Milano).

Per il monitoraggio in questione sono state utilizzate n°4 centraline multicanale in grado di acquisire contemporaneamente i livelli di rumore e di vibrazioni meccaniche trasmesse nel terreno.

L'accelerometro utilizzato era del tipo ICP tri assiale montato su un'apposita base metallica in grado di mantenere inalterata la trasmissione di vibrazioni fino al trasduttore al fine di ottenere i risultati più precisi possibili.



Figura 40: Esempio centralina di monitoraggio

This topographic map shows a road intersection with proposed grade changes. The map includes contour lines, spot elevations, and a color-coded area indicating the proposed grade. The color-coded area is labeled 'WBS SYRDL SWALE' in blue. The map also shows existing roadways, including a road labeled '100' and another labeled '100'.





Figura 41: Raccolta fotografica punti di misura

Per la messa in opera dei monitoraggi si è proceduto alla caratterizzazione del territorio, la quale è propedeutica alla valutazione degli impatti derivanti dall'opera in esame.

Tale processo è fondamentale per quanto concerne l'individuazione di ricettori particolarmente sensibili e la caratterizzazione geolitologica dei terreni interessati.

Le classi di sensibilità, a prescindere da considerazioni locali quali ad esempio lo stato di conservazione, la tipologia costruttiva dell'immobile, sono state stilate sulla base della destinazione d'uso dell'immobile, in conformità con la norma UNI 9614 (i limiti indicati da tale norma risultano essere molto più restrittivi di quelli indicati nella Norma ISO 2631-2; pertanto nella presente relazione si farà riferimento ai limiti UNI), e sono definite come in Tabella 25 seguente:

N.	Destinazione D'uso	Classe di Sensibilità
1	Aree critiche	MOLTO ALTA
2	Abitazioni	ALTA
3	Uffici	MEDIA
4	Fabbriche	BASSA

Tabella 25: Classi di Sensibilità

Le aree critiche, indicate nella tabella seguente, includono le aree archeologiche di importanza storico-monumentale, le infrastrutture sanitarie (ospedali, case di cura e riposo), le infrastrutture per l'istruzione nonché le industrie che impiegano macchinari di precisione.

Sulla base delle informazioni analizzate inerenti l'uso del suolo e la componente rumore sono state individuate le seguenti aree ad elevata sensibilità comprese nel tratto in esame (edifici sensibili distanti meno di 200 metri dal tratto autostradale).

N.	Destinazione D'uso	Distanza dall'Autostrada
1	Ospedale	200
2	Casa di Riposo	100

Tabella 26: Aree ad Elevata Sensibilità

Come si osserva le aree ad elevata sensibilità sono in numero estremamente ridotto e nessuna è prossima al tracciato autostradale o delle opere accessorie.

Dal punto di vista geologico, e quindi della potenziale capacità del suolo di propagare le vibrazioni su lunghe distanze, si osserva che gli elementi geologici che caratterizzano il percorso della struttura viaria sotto indagine sono pochi.

Le formazioni di interesse si riducono infatti al termine pleistocenico fluvio-glaciale, nelle sue varianti in granulometria e litologia dettate dai bacini afferenti.

I terreni di interesse per il progetto sono generalmente descrivibili come alluvioni da molto grossolane a ghiaiose, coperte in superficie da uno strato di alterazione argilloso, giallo rossiccio, di modesto spessore. Localmente la copertura argillosa è ferrettizzata o può essere in parte sostituita e ricoperta da limi fluvio-lacustri più recenti in lembi irregolari.

In profondità le ghiaie possono essere cementate in livelli conglomeratici di scarsa continuità laterale e di caratteristiche meccaniche modeste.

Il peso di volume naturale, al di sotto della coltre superficiale e sino alla profondità presumibile delle fondazioni, si attesta quindi attorno a 2 t/m³; in analogia, l'angolo di attrito interno di picco è compreso tra 35° e 40° e il modulo di Young può raggiungere e superare i 1.000 kg/cm².

La velocità di propagazione dell'onda longitudinale nel terreno per ammassi alluvionali omogenei è di 600 m/s.

Il coefficiente di attenuazione del terreno, sulla base delle precedenti relazione, è quindi da considerarsi medio, in assenza sia di forti fenomeni attenuativi che viceversa propagatori.

I flussi di traffico usati per le analisi derivano dallo studio di traffico aggiornato per il progetto definitivo dell'infrastruttura ed i valori sono stati validati durante i sopralluoghi eseguiti per le misurazioni.

Il modello di trasporto ha fornito le stime dei volumi di traffico giornaliero medio suddiviso in traffico leggero e pesante. I dati sono stati disaggregati, tramite i coefficienti riportati in tabella 27, in valori medio diurno (dalle ore 6:00 alle ore 22:00) e notturno (dalle ore 22:00 alle ore 6:00).

Tratti Stradali	Tipologia dei Mezzi	Percentuale del Traffico Giornaliero Medio	
		Diurno	Notturmo
Autostrada	Leggeri	90%	10%
	Pesanti	88%	12%
Viabilità Complementare	Leggeri	89%	11%
	Pesanti	91%	9%

Tabella 27 Percentuale del Traffico Giornaliero Medio Prevista nei Periodi Diurno e Notturmo

Per quanto riguarda le velocità medie di percorrenza, si sono assunte, cautelativamente, le massime velocità compatibili con i limiti imposti dal Codice della Strada. Nei tratti autostradali si è ipotizzata una velocità di 130 km/h per i mezzi leggeri e di 80 km/h per quelli pesanti. Nei tratti di Viabilità Complementare si sono invece supposte velocità di 90 km/h per i mezzi leggeri e 70 km/h per quelli pesanti.

La tabella 28 mostra i tratti considerati con i relativi dati di traffico orario medio e le velocità medie assunte.

Dati di prog.	Tratto	Volumi globali nelle due direzioni				Velocità Medie (km/h)		Totale	
		Diurno		Notturmo		Leg	Pes	Leg	Pes
		Leg. Veic/h	Pes. Veic/h	Leg. Veic/h	Pes. Veic/h				
Viabilità Ordinaria									
2023	Variante di Liscate	2.147	312	187	39	130	80	56.000	8.400
2023	SP 103 - Cassanese: TEM - Pioltello Est	2.392	115	296	10	90	70	64.500	3.000
2023	SP 103 - Cassanese: Pioltello Est - Pioltello Ovest	3.156	234	390	20	90	70	85.100	6.100
2023	SP 14 - Rivoltana: Liscate-Limito	3.371	230	417	20	90	70	90.900	6.000
2023	SP 14 - Rivoltana: Limito-Idroscalo	3.371	230	417	20	90	70	90.900	6.000
2023	SS472 - Ovest Treviglio: Variante alla SS 472 in corrispondenza di Treviglio - collegamento tra il casello di Casirate e la ex SS11	541	180	67	16	90	70	14.600	4.700
2023	SS591 - Variante-Bariano: Variante alla SS 591 nei territori comunali di Bariano e di Morengo	341	27	42	2	90	70	9.200	700
2023	Variante Fara O.: Brebemi-SS11	360	100	44	9	90	70	9.700	2.600
2023	Variante Fara O.: SS11 - Casale	174	50	22	4	90	70	4.700	1.300
2023	Variante Fara O.: Casale-Pianengo	182	19	22	2	90	70	4.900	500
2023	SP 17 - Variante Chiari: Variante alla SP17 nei territori comunali di Chiari e di Cologne	393	15	49	1	90	70	10.600	400
2023	Brebemi - tang urbana BS: Variante alla SS11 dal raccordo autostradale sulla SP1 9 a Brescia	853	138	105	12	90	70	23.000	3.600
2023	SS510	1.854	50	229	4	90	70	50.000	1.300
2023	tang sud BS	2.740	234	339	20	90	70	73.900	6.100

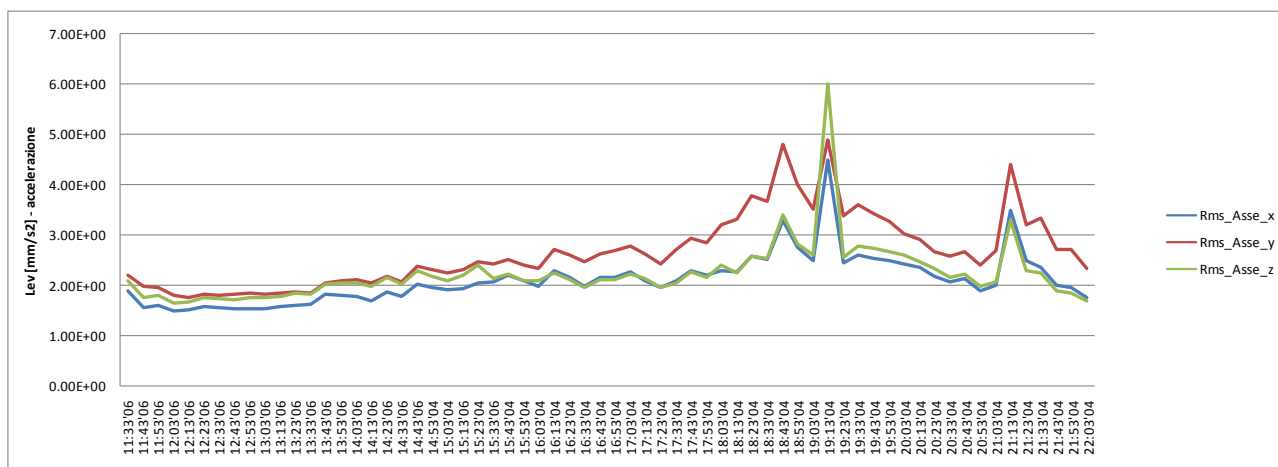
Tabella 28 Dati di Traffico Impiegati nelle Conclusioni

10.1. Risultati – prima sessione

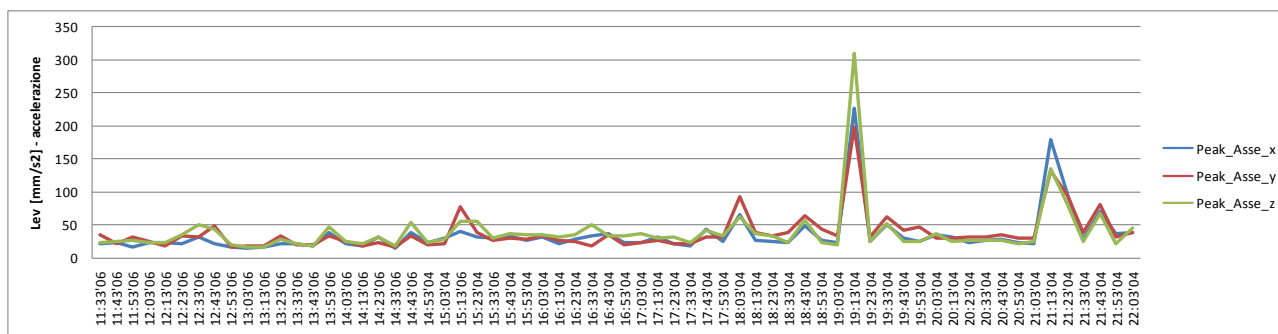
Si riportano per brevità solamente i risultati più significativi ottenuti per l'infrastruttura in oggetto, ottenuti in una settimana di campionamento continua.

Descrizione Punto di Misura	Identificazione fotografica
Posizionamento centralina a bordo infrastruttura	

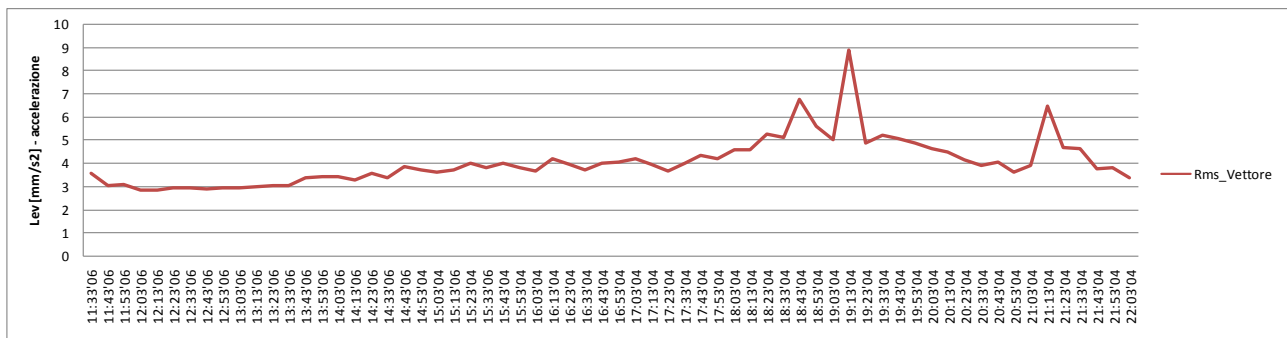
- Primo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: domenica**



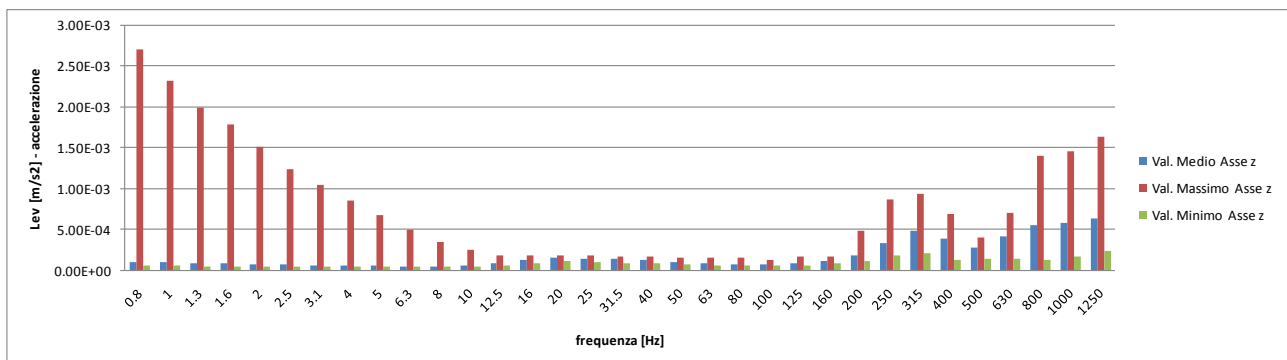
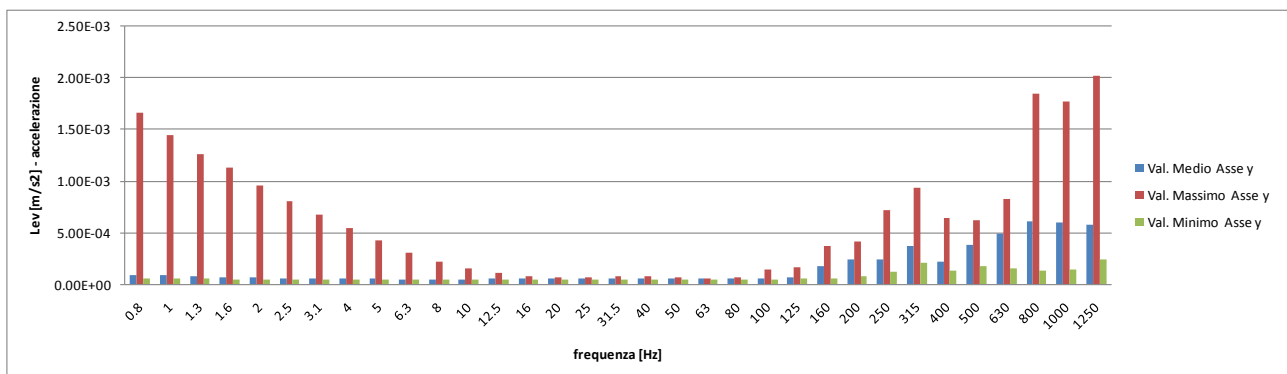
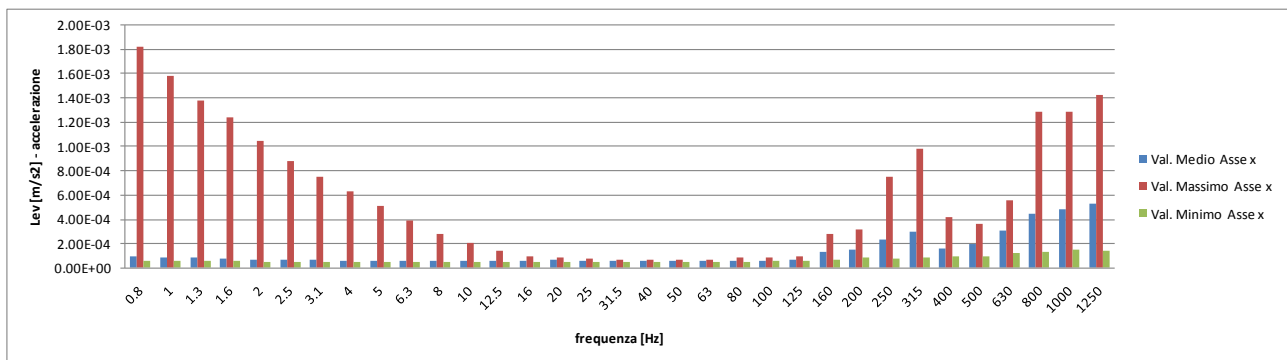
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

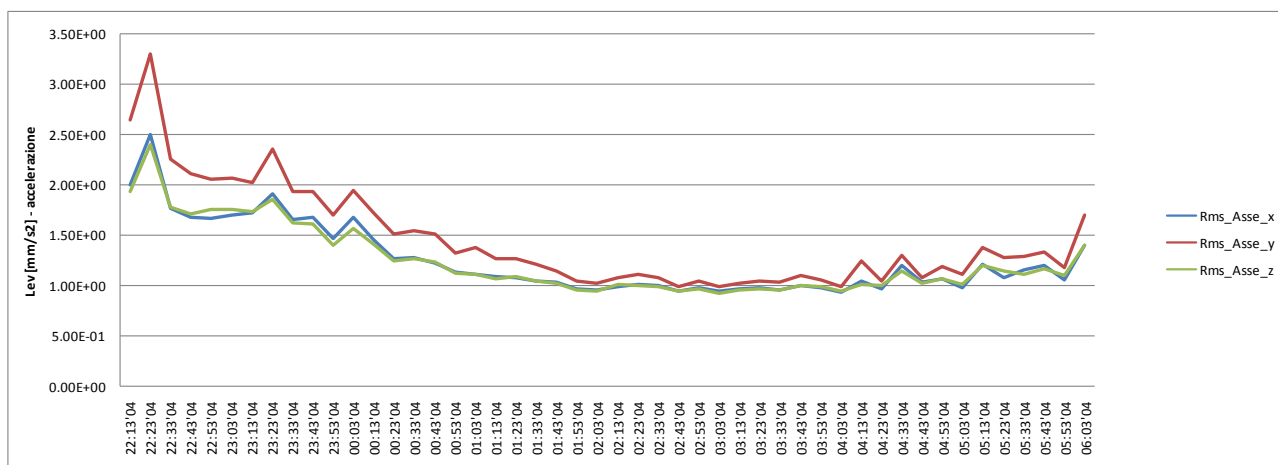


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

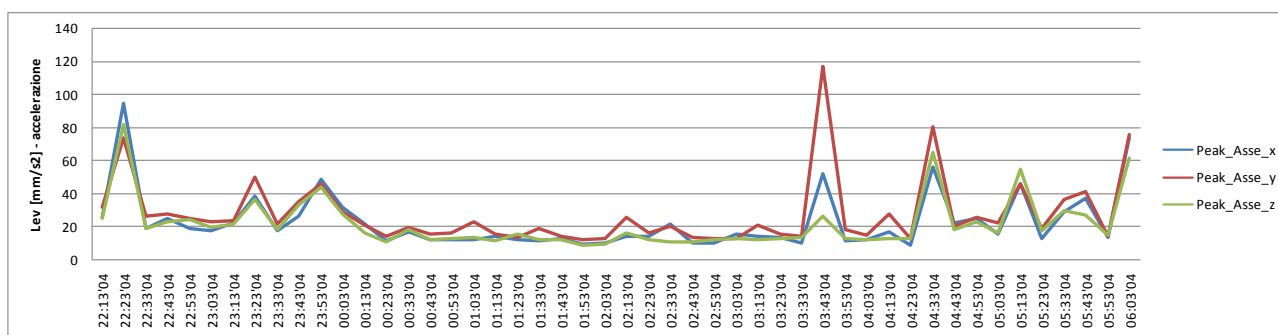


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

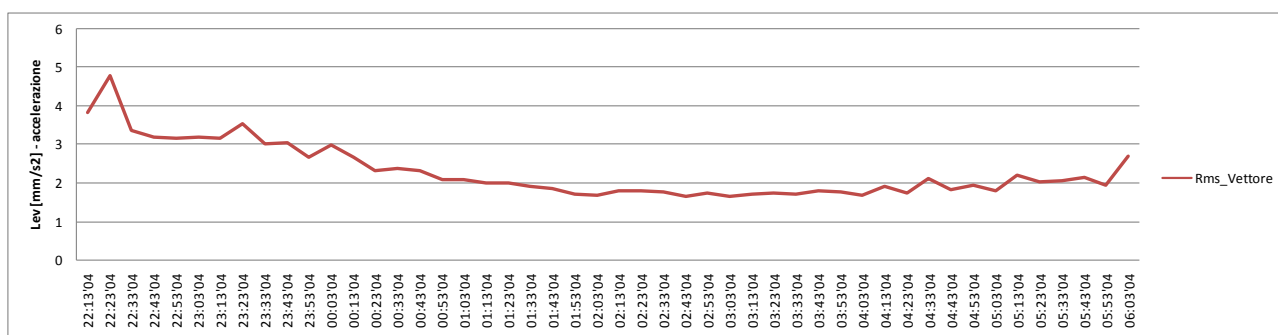
- **Primo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: domenica**



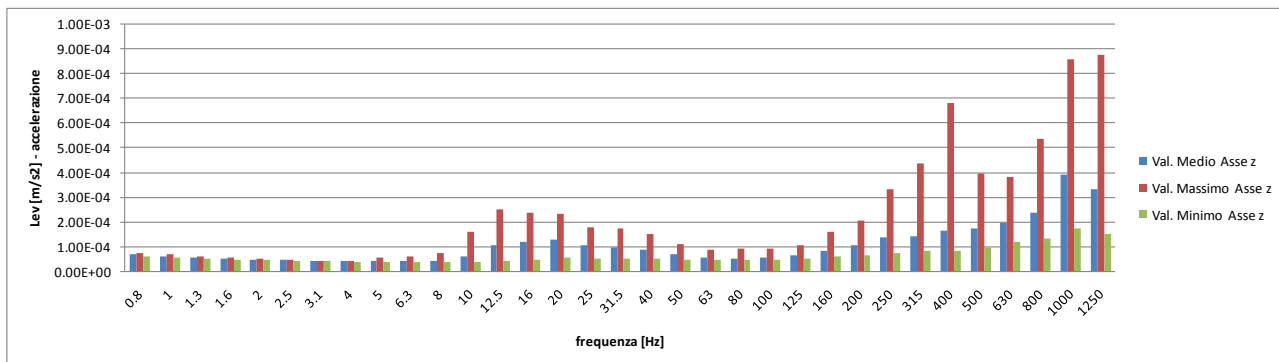
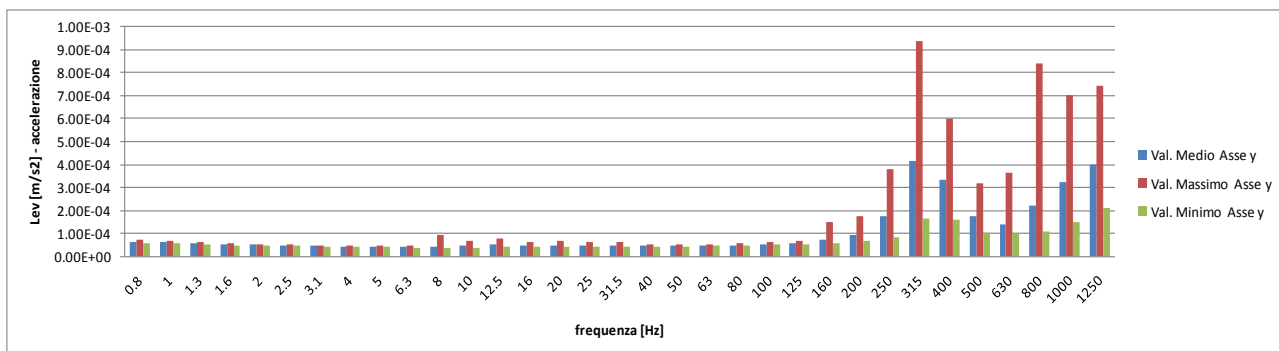
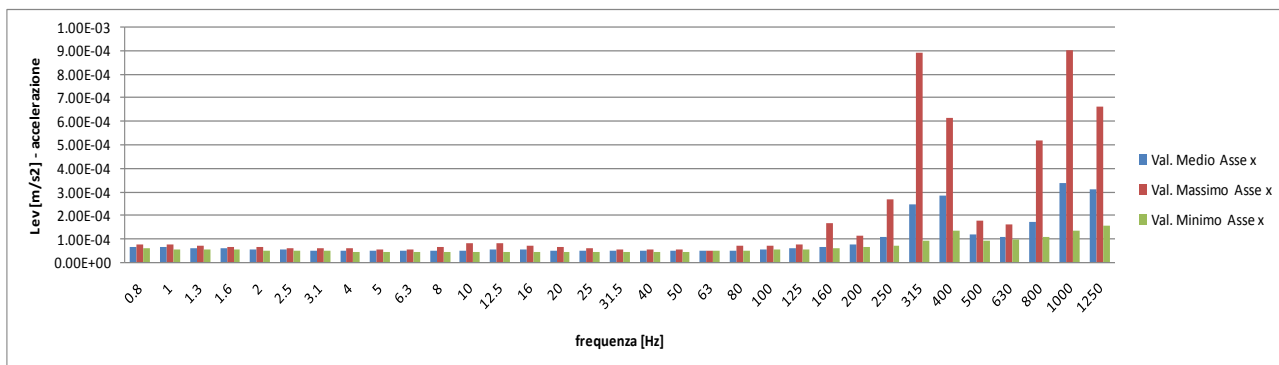
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

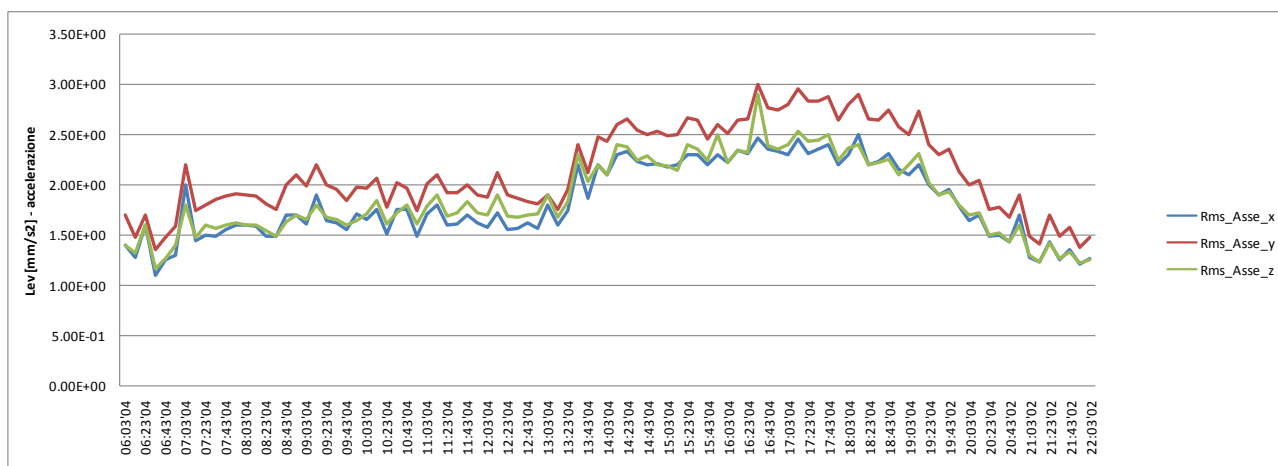


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

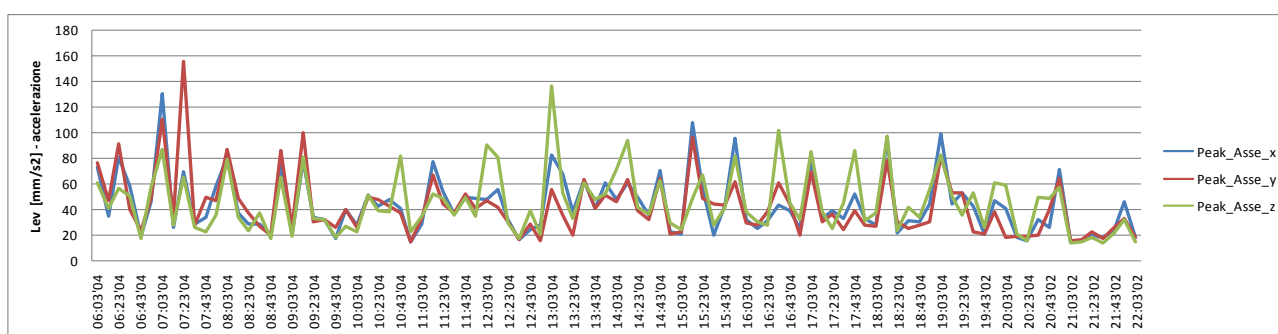


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

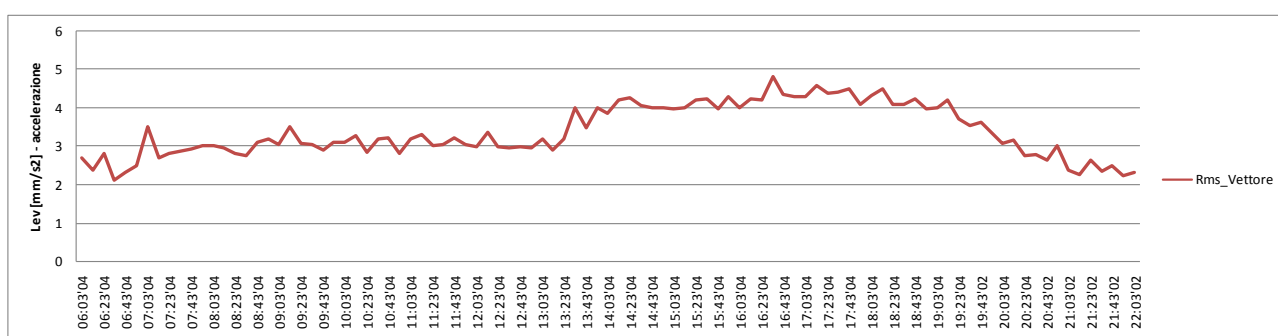
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: lunedì**



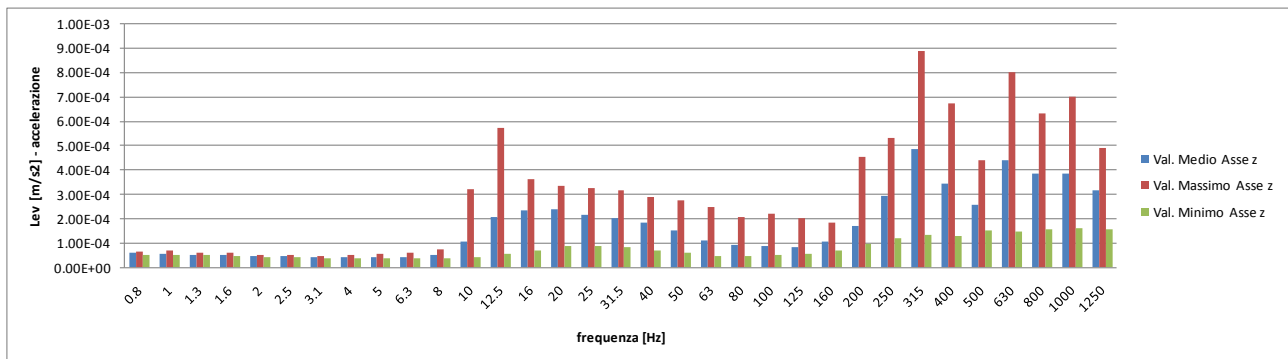
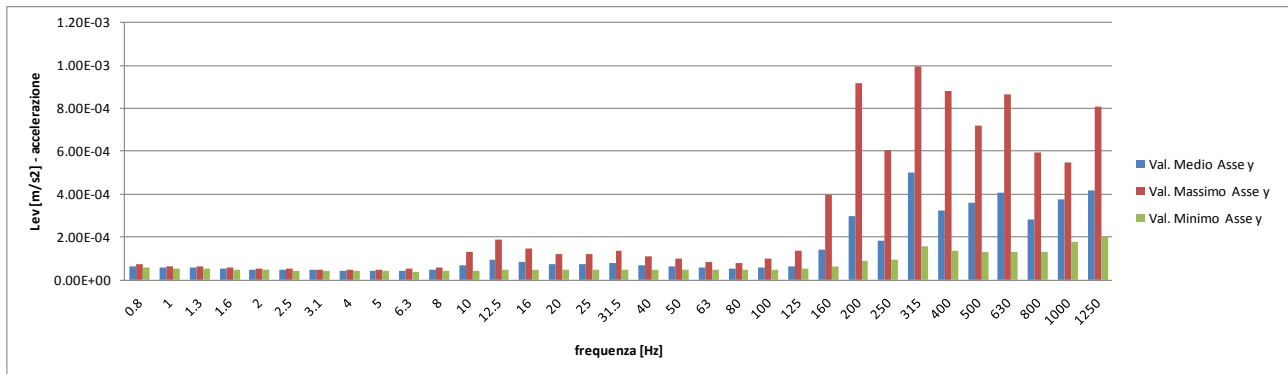
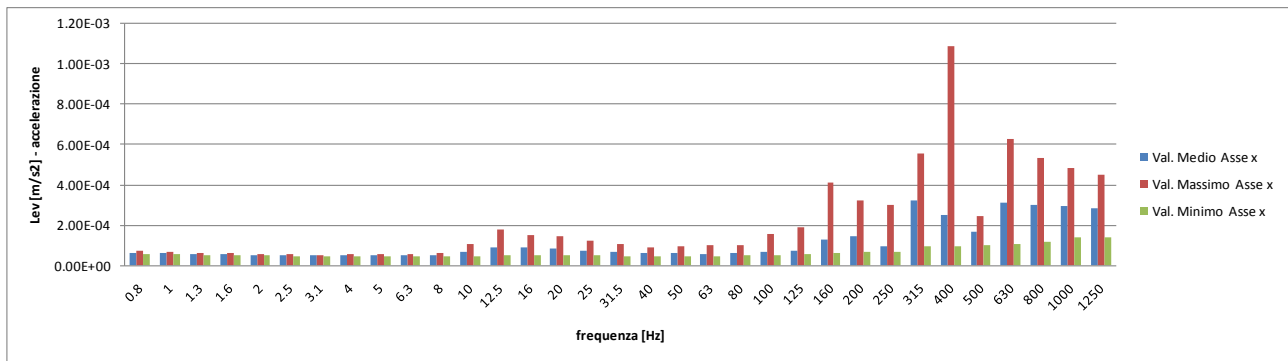
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

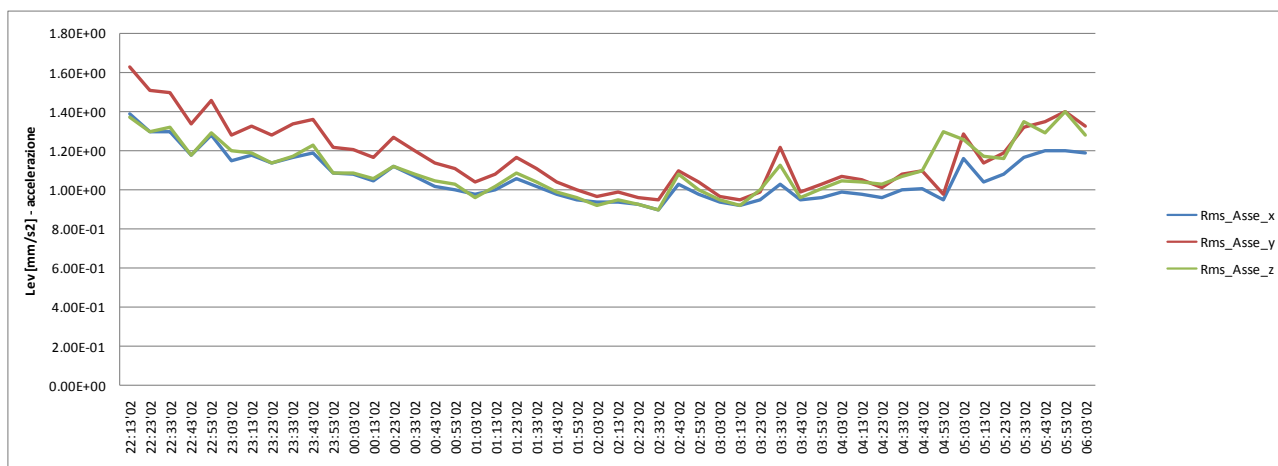


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

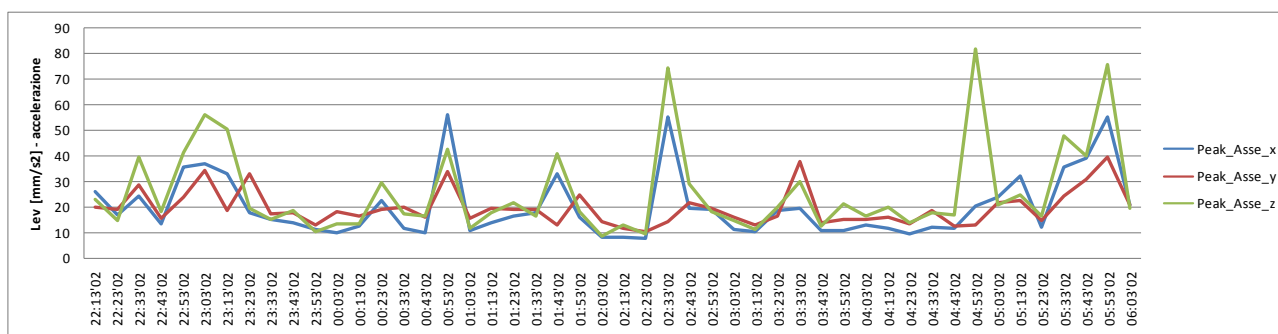


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

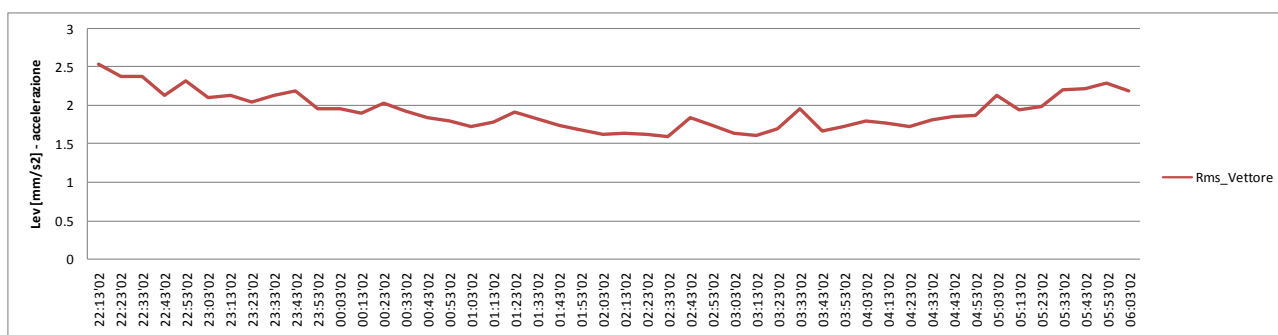
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: lunedì**



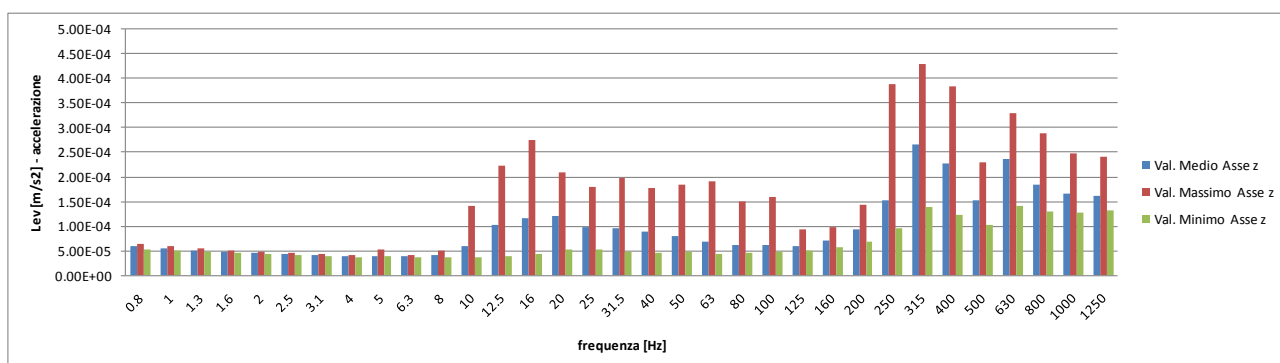
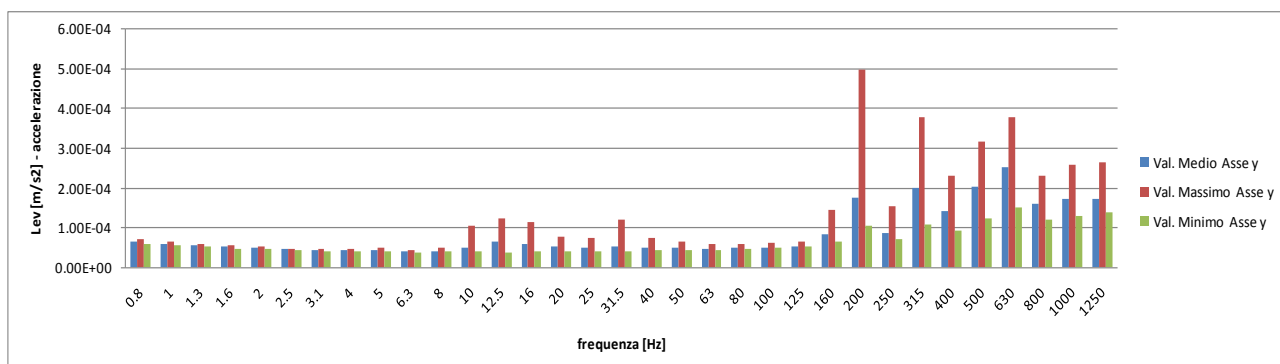
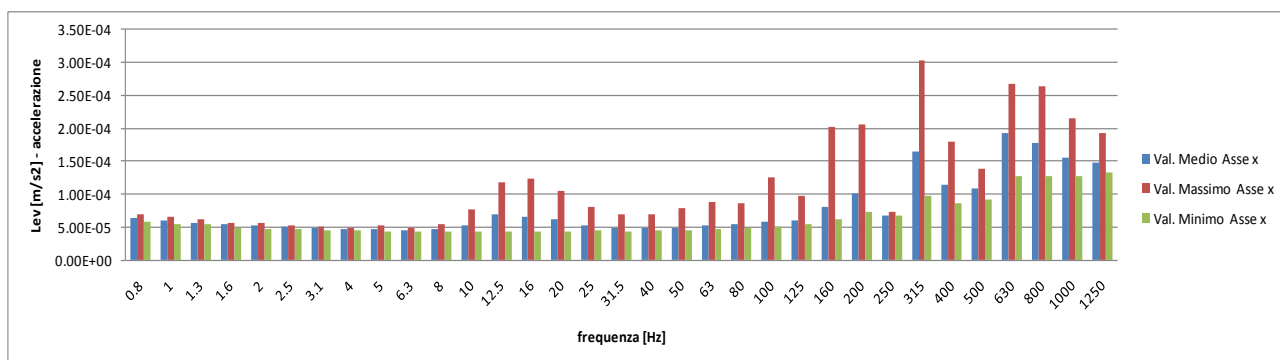
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

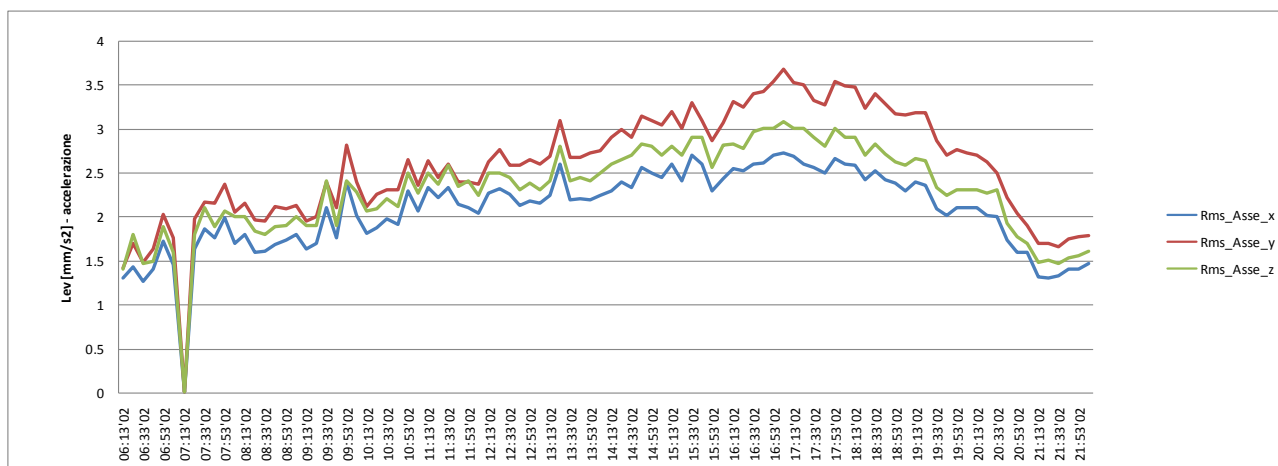


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

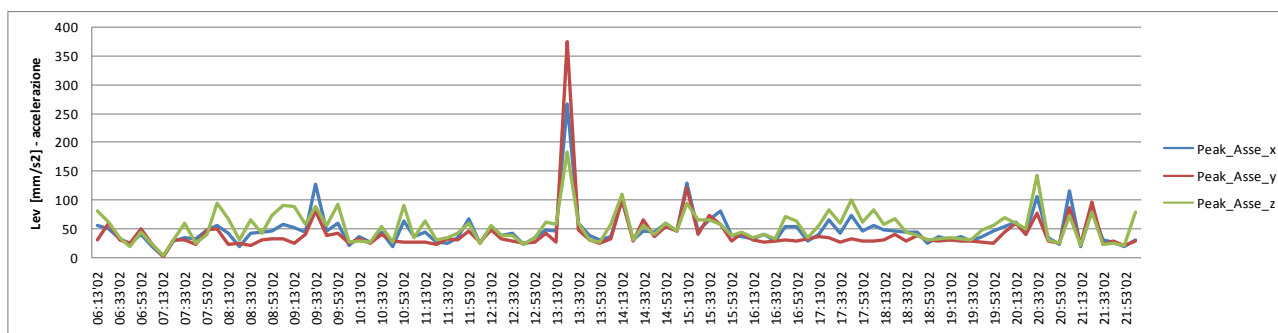


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

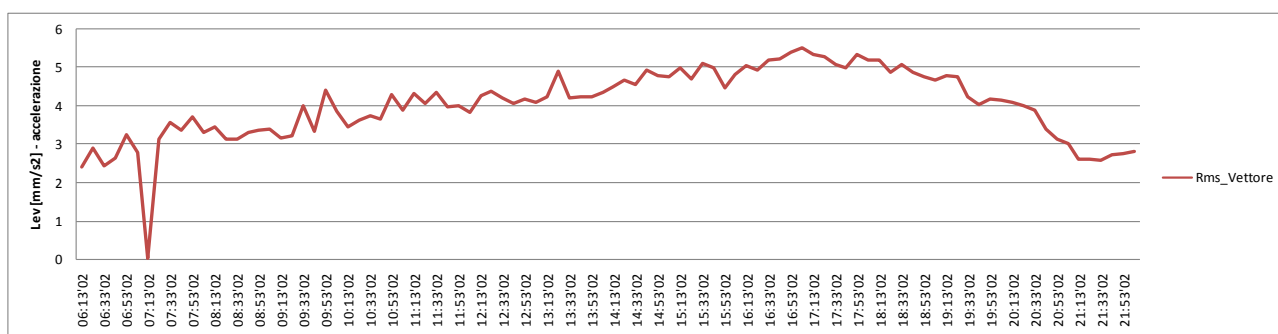
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: martedì**



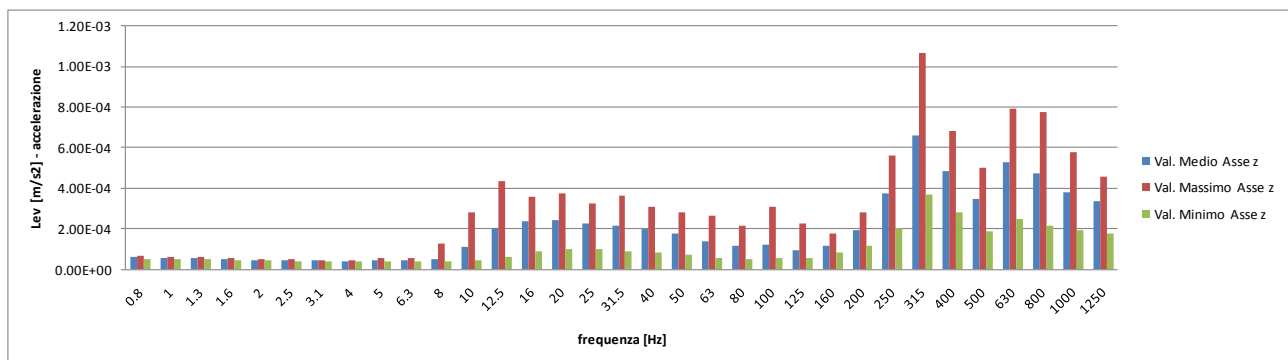
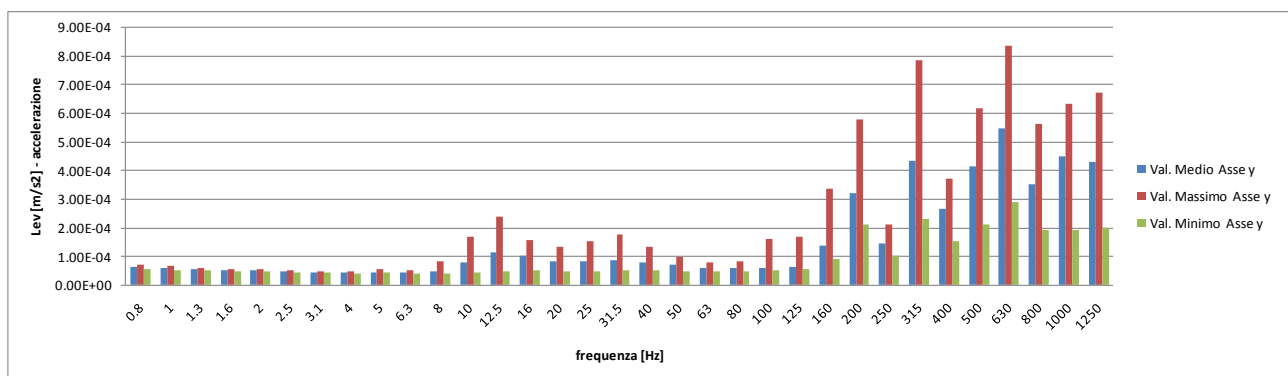
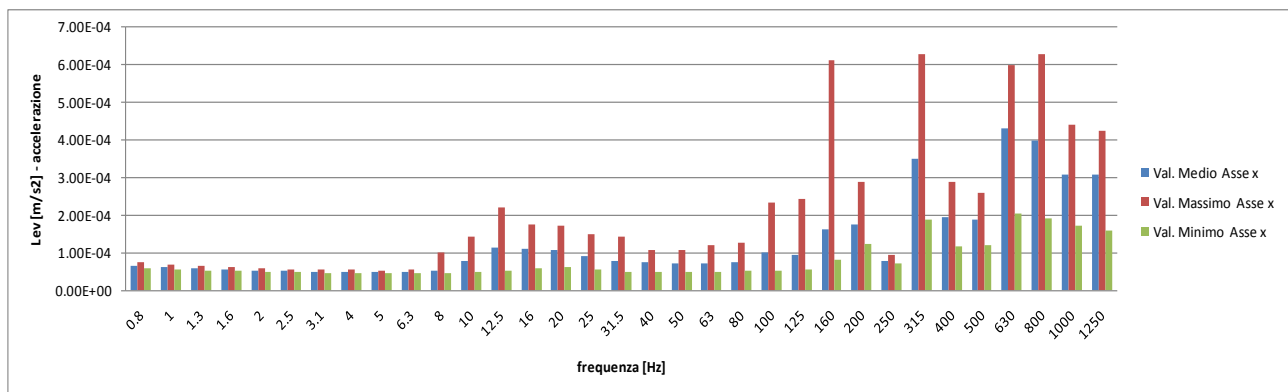
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

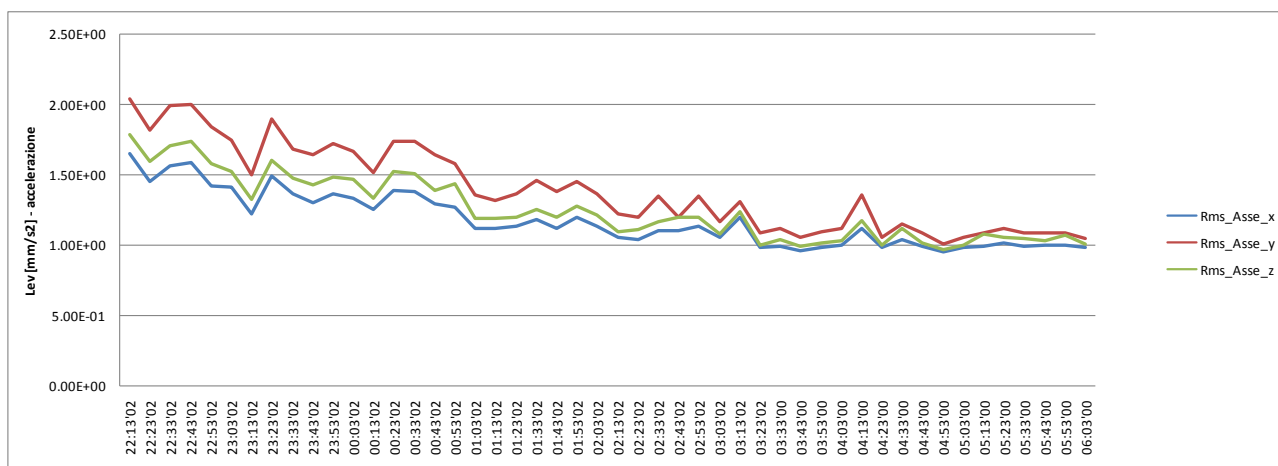


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

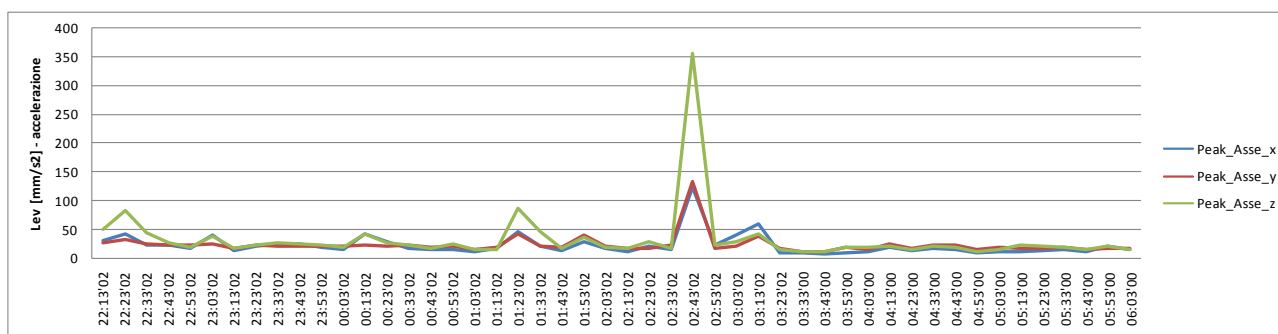


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

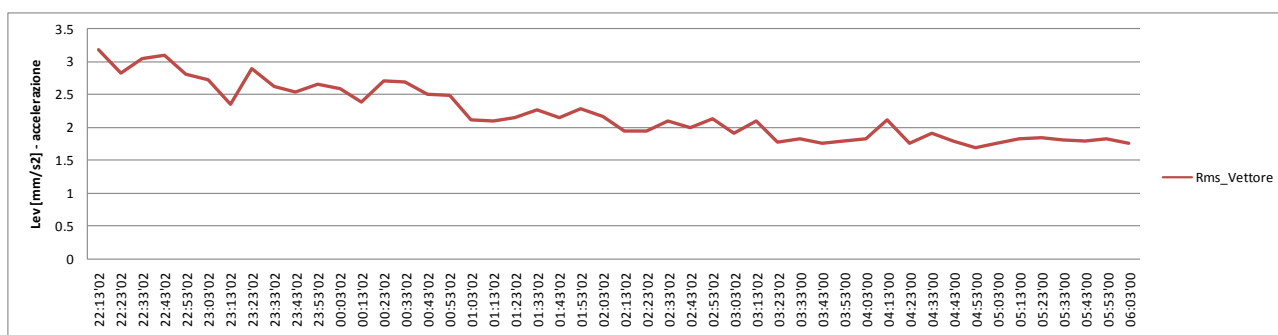
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: martedì**



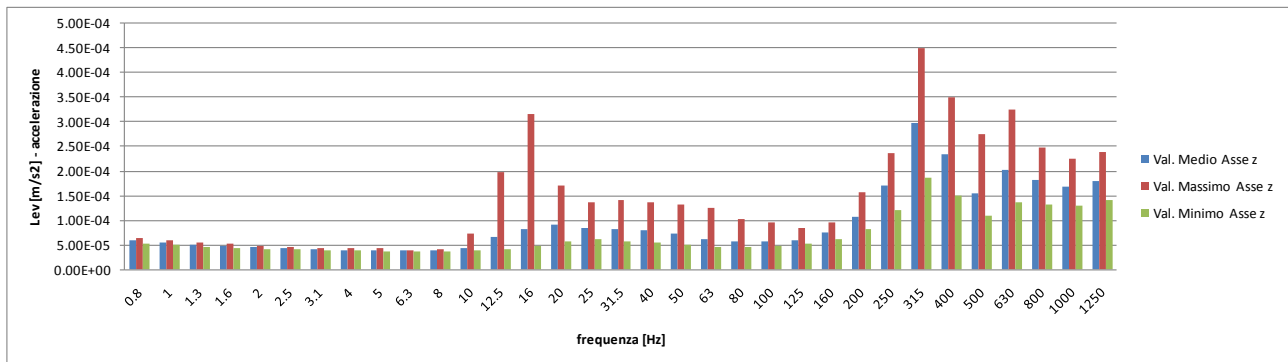
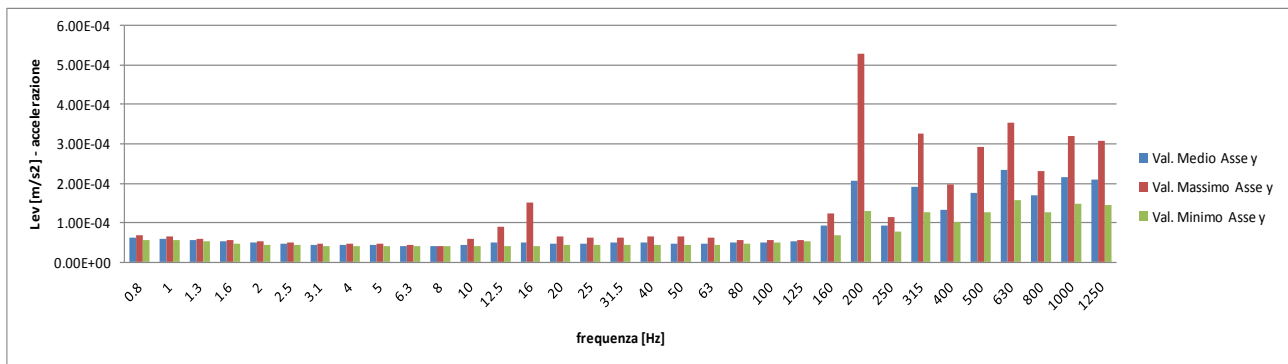
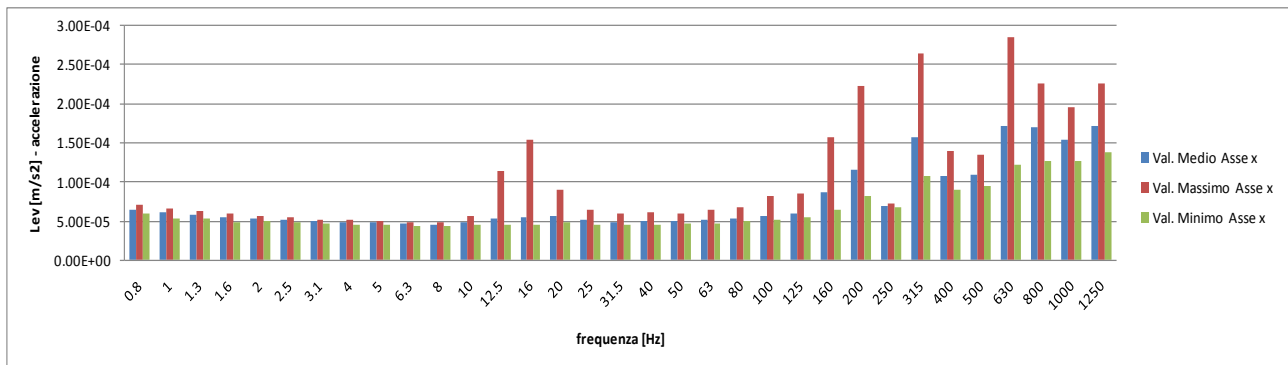
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

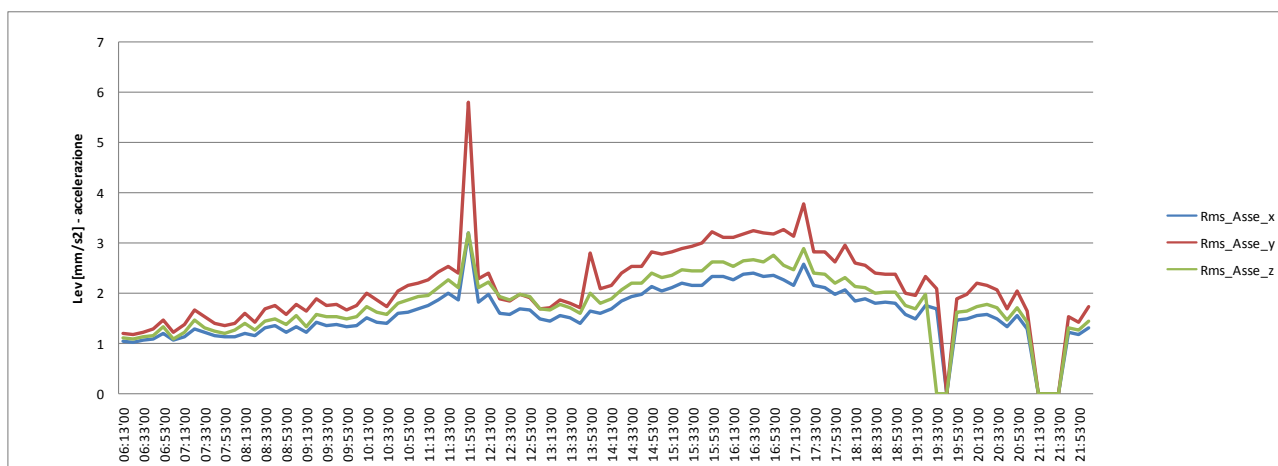


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

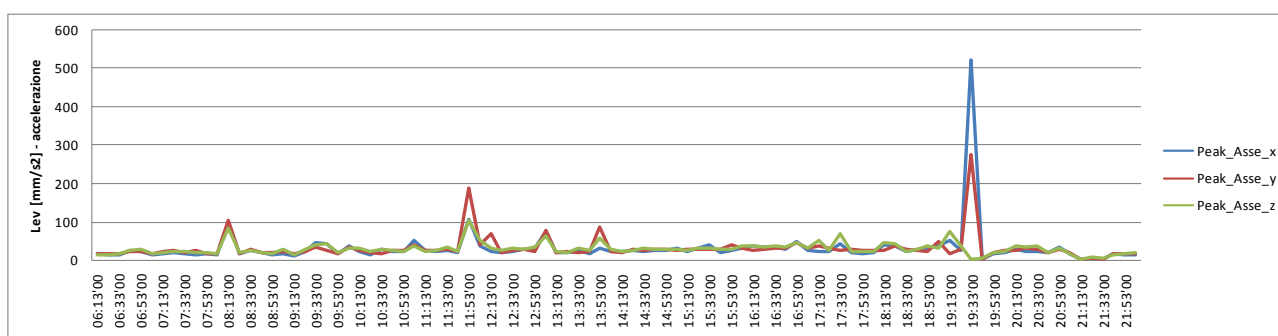


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

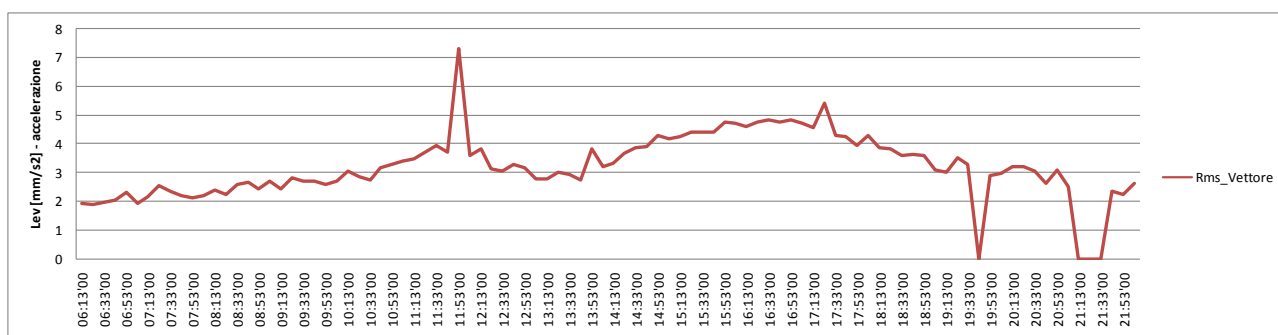
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: mercoledì**



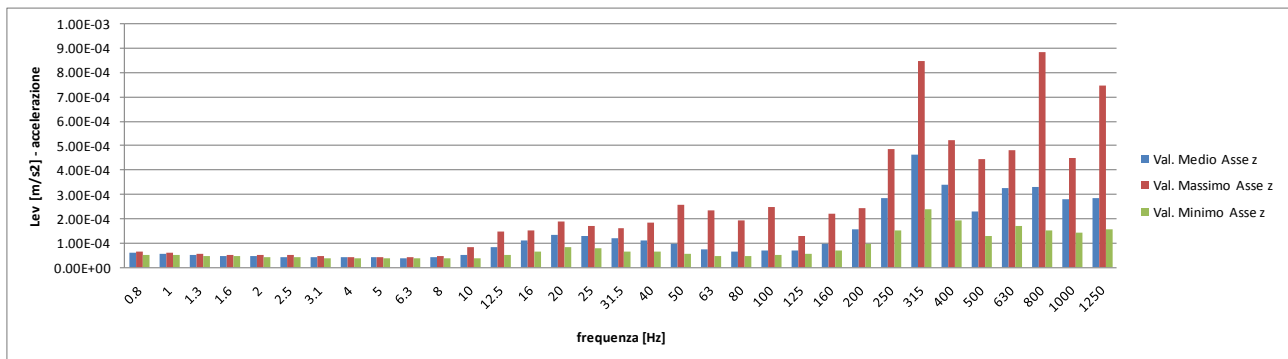
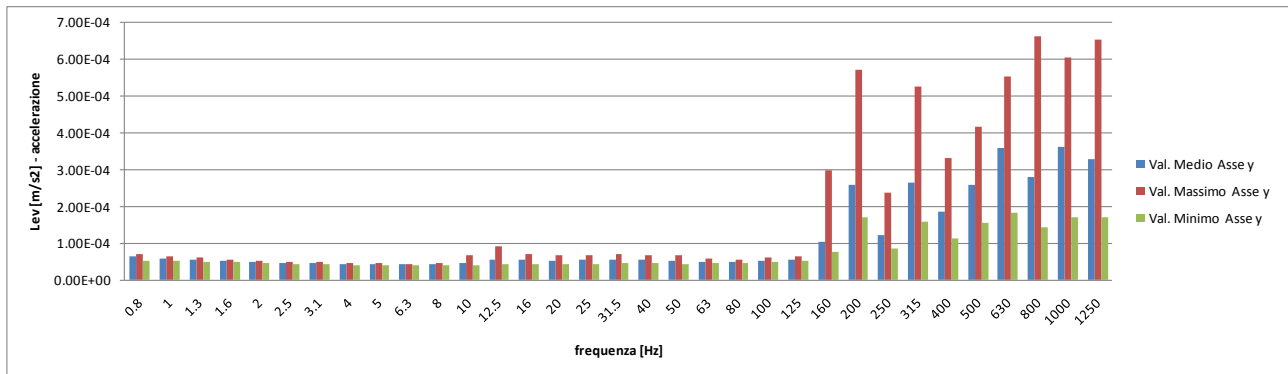
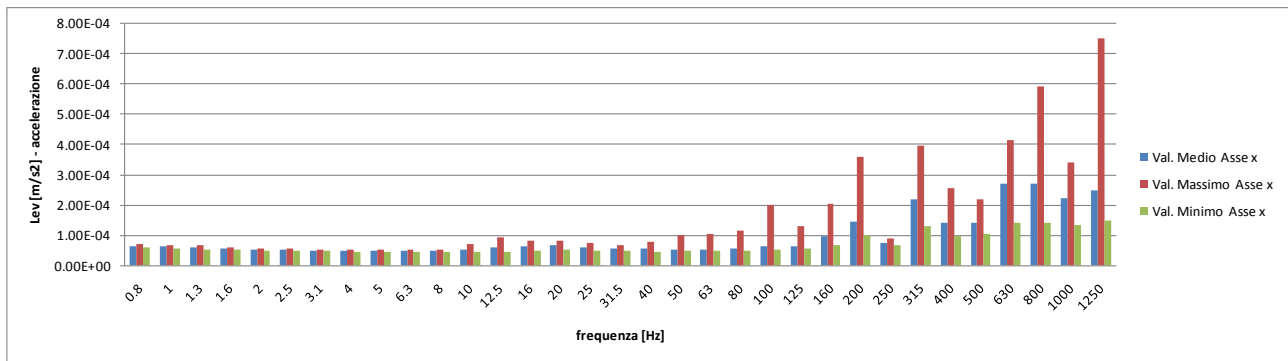
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

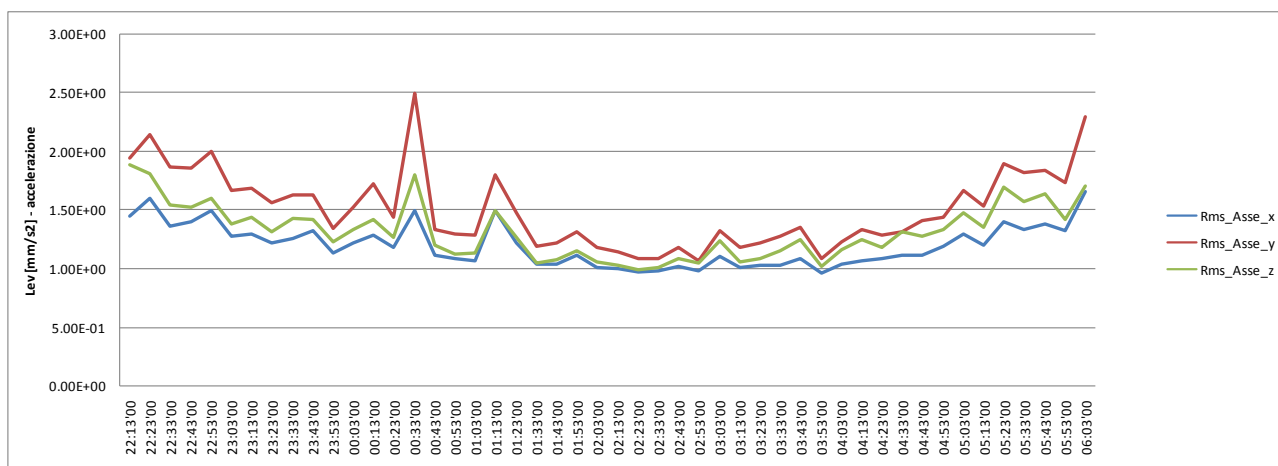


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

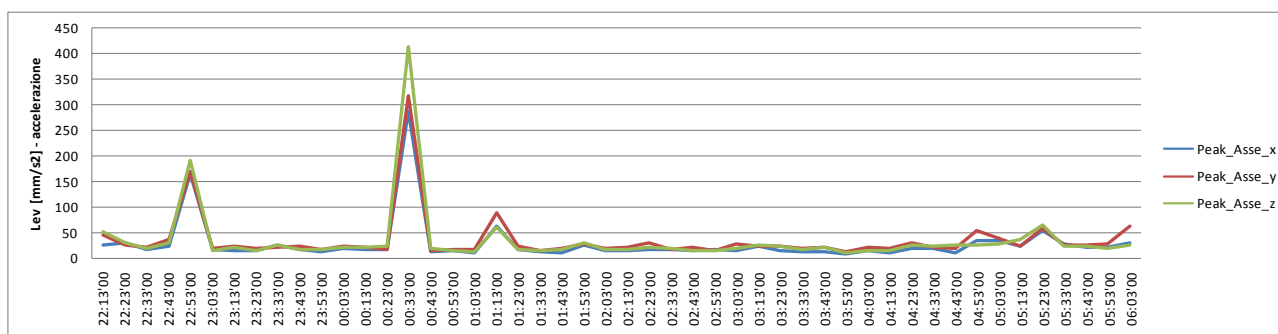


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

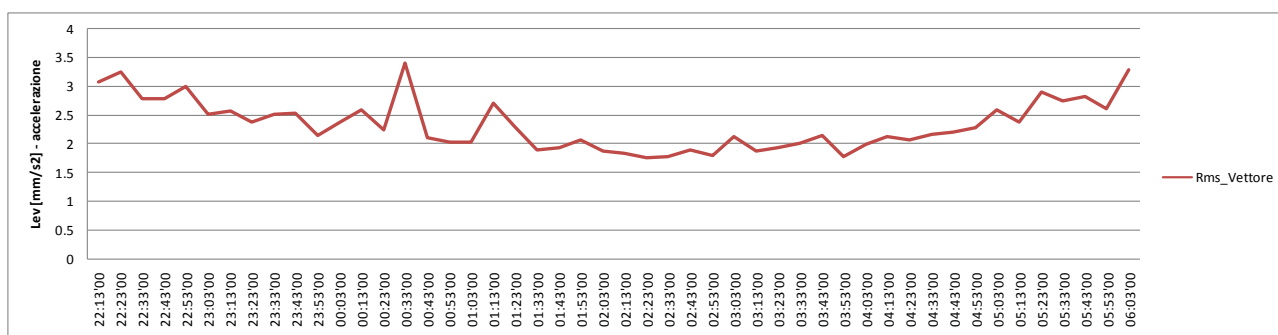
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: mercoledì**



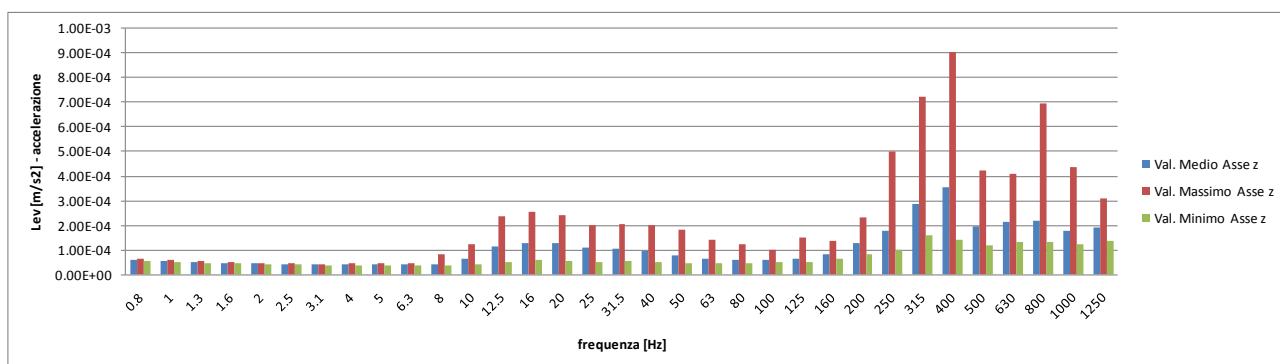
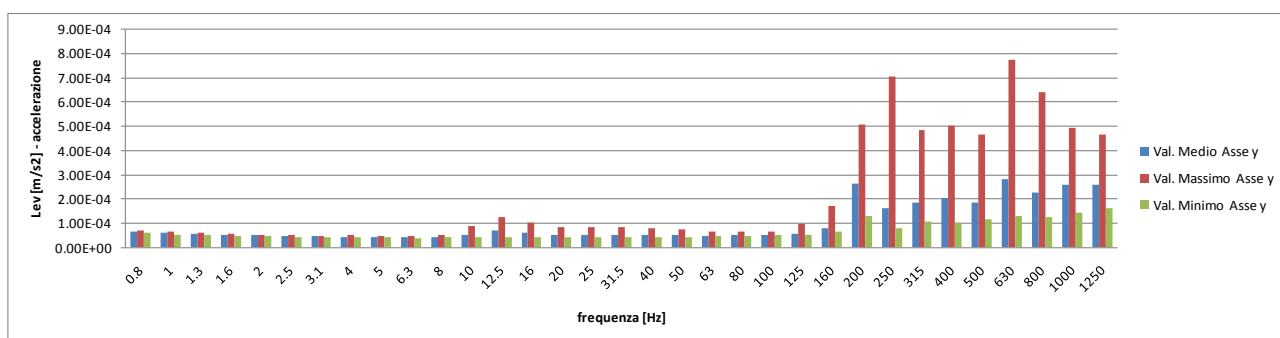
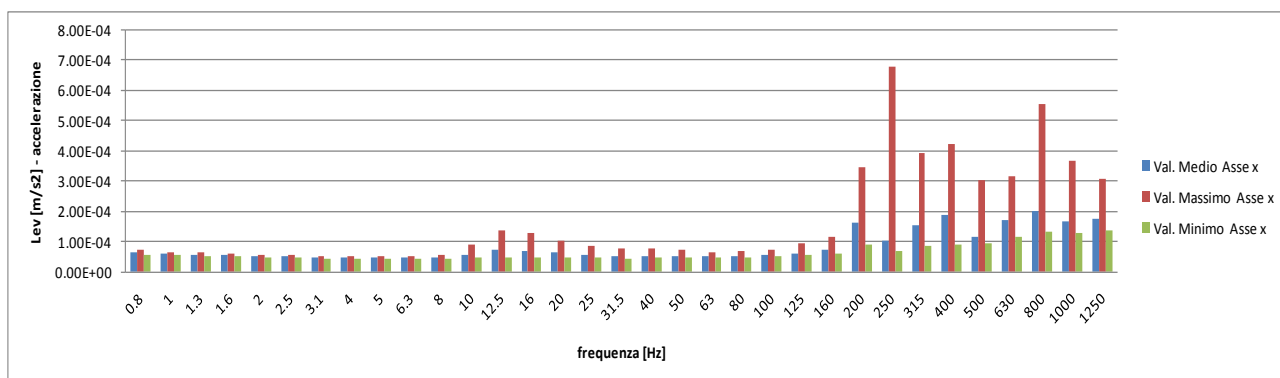
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

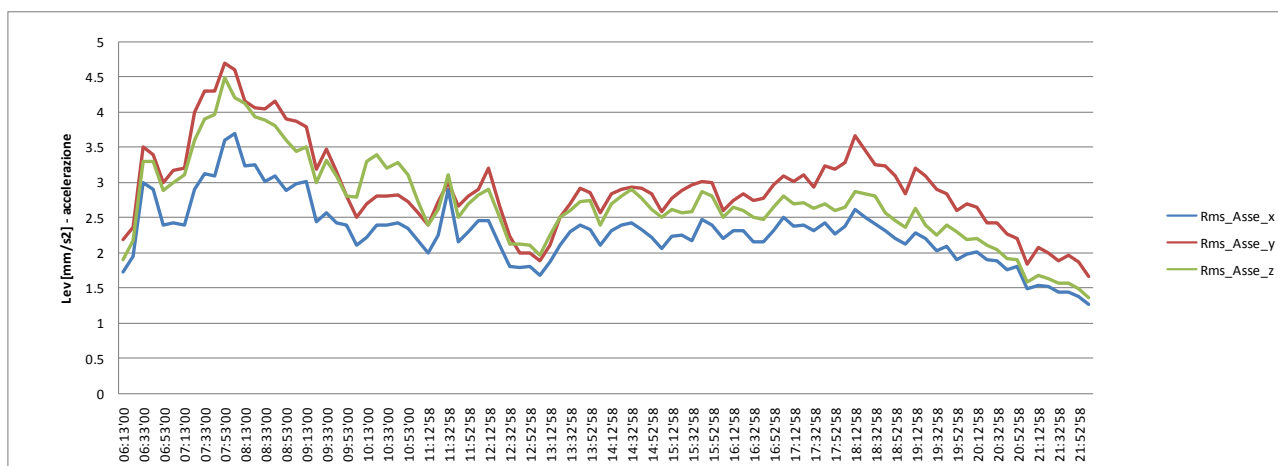


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

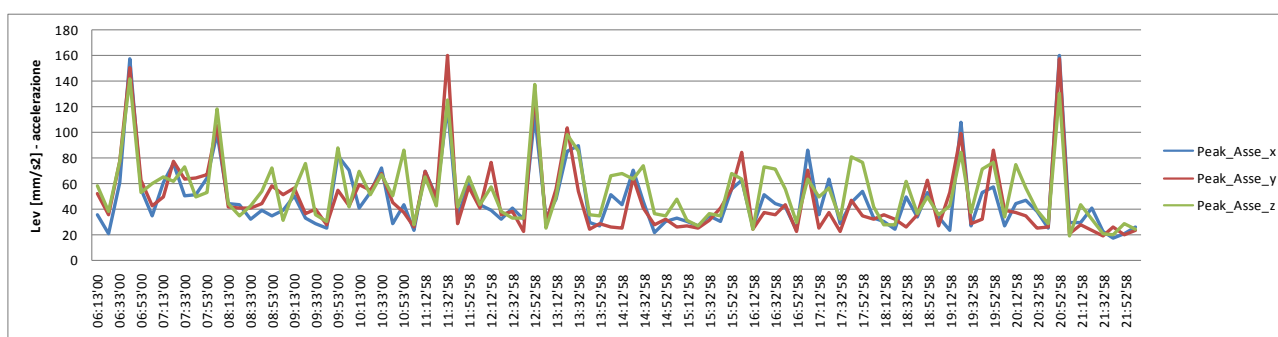


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

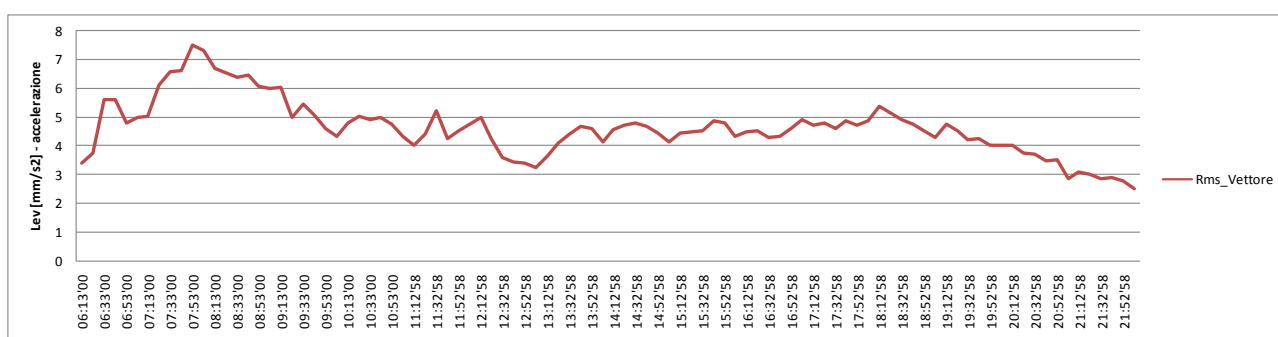
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: giovedì**



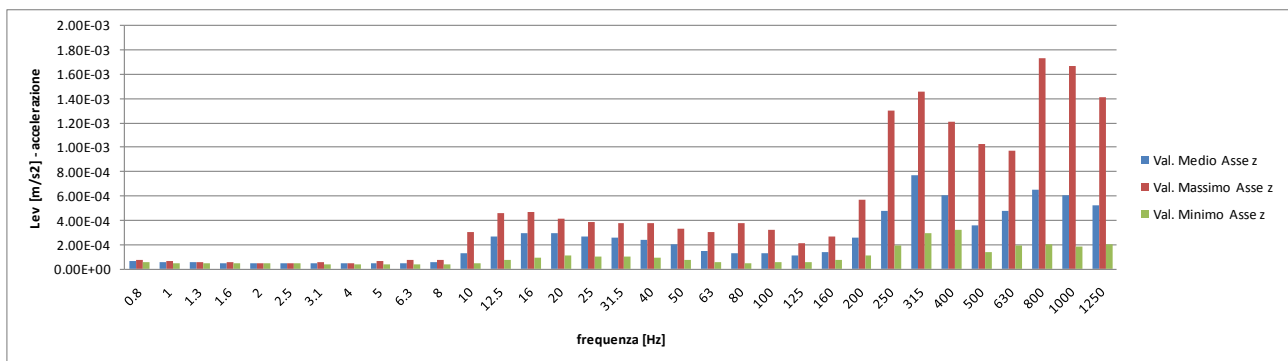
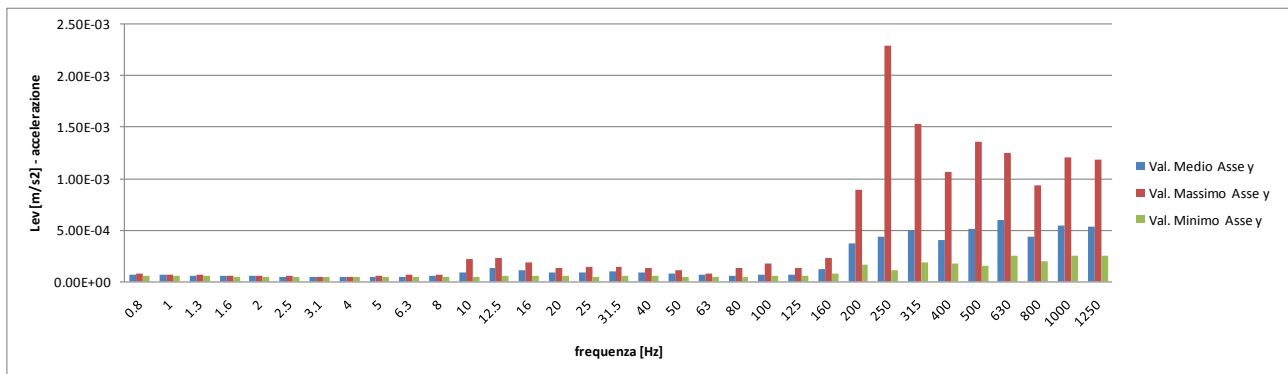
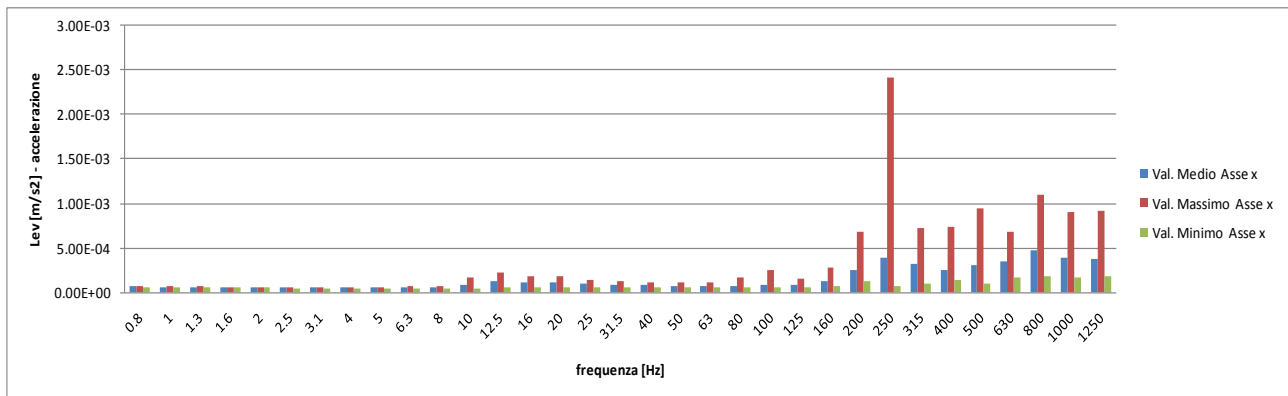
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

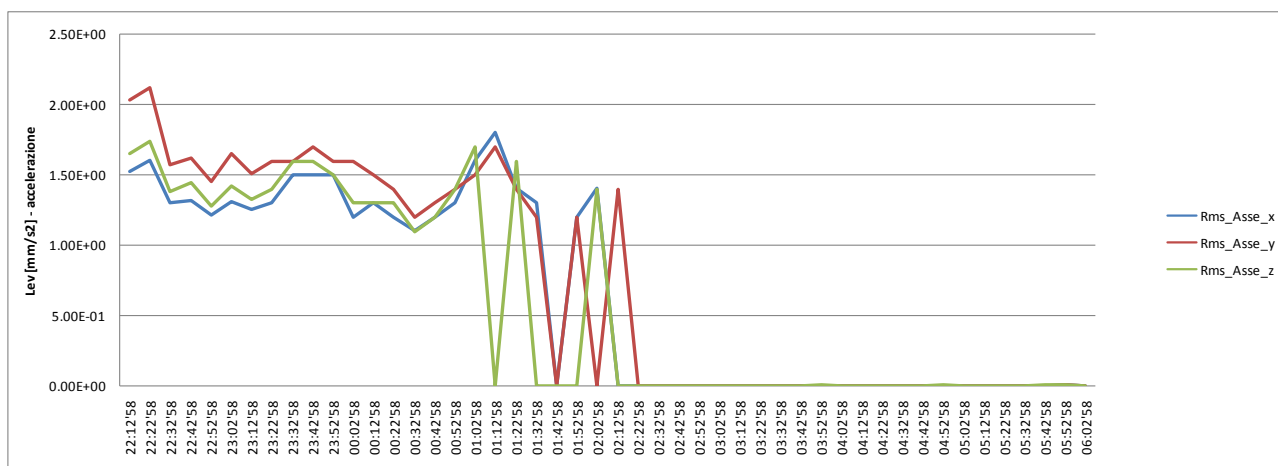


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

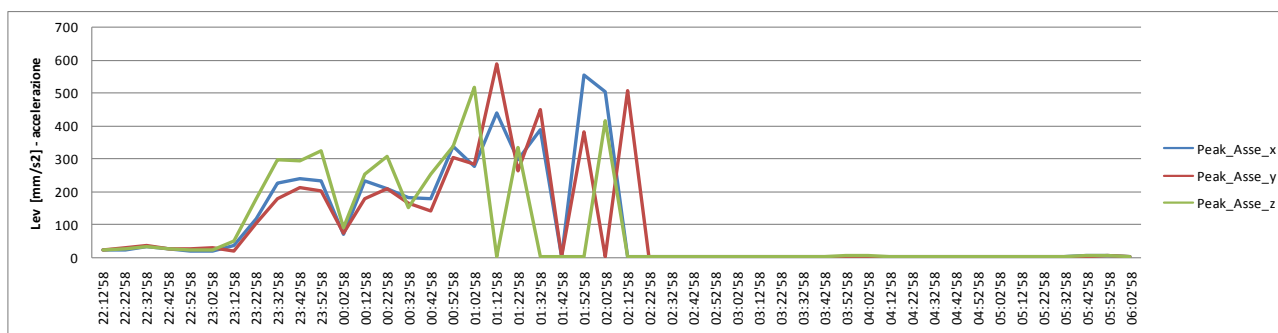


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

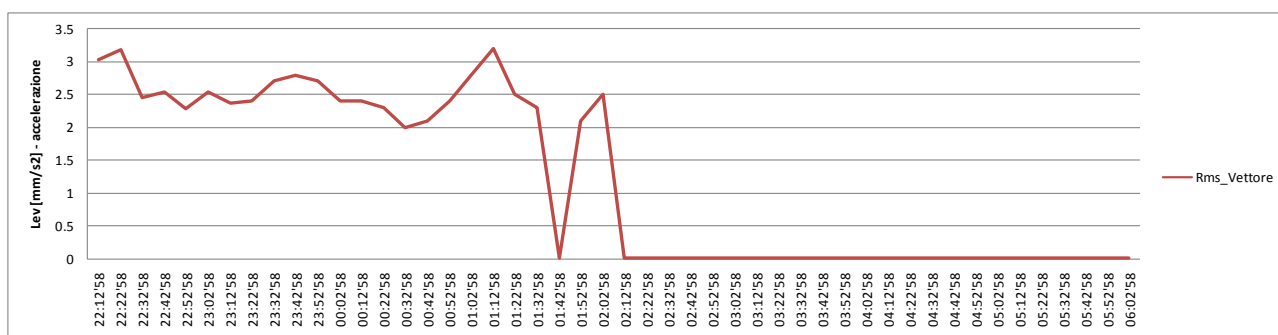
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: giovedì**



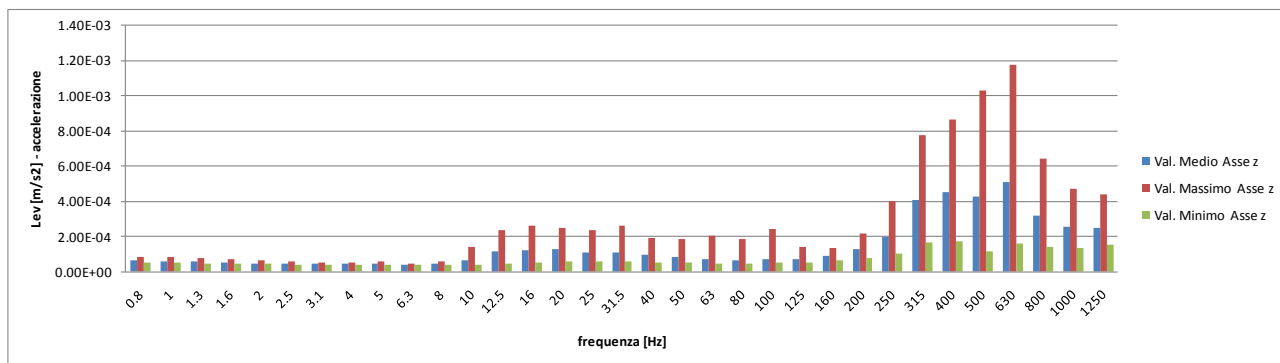
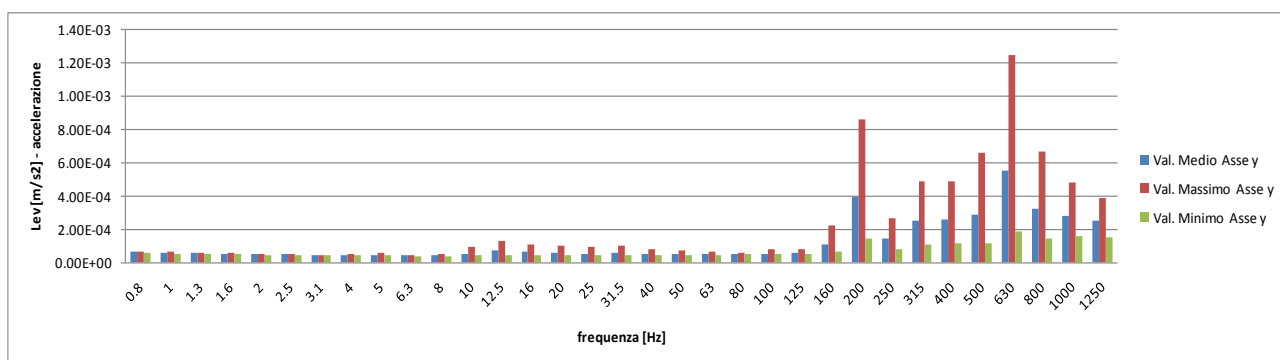
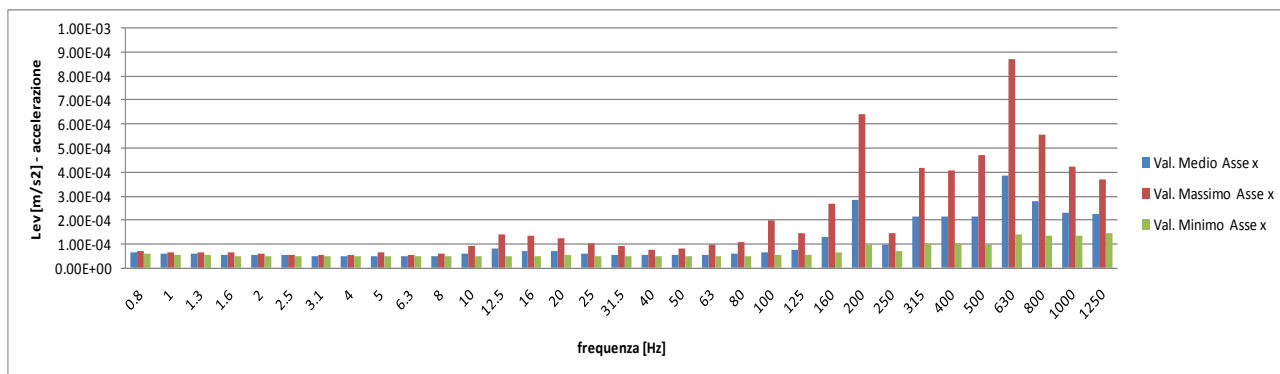
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

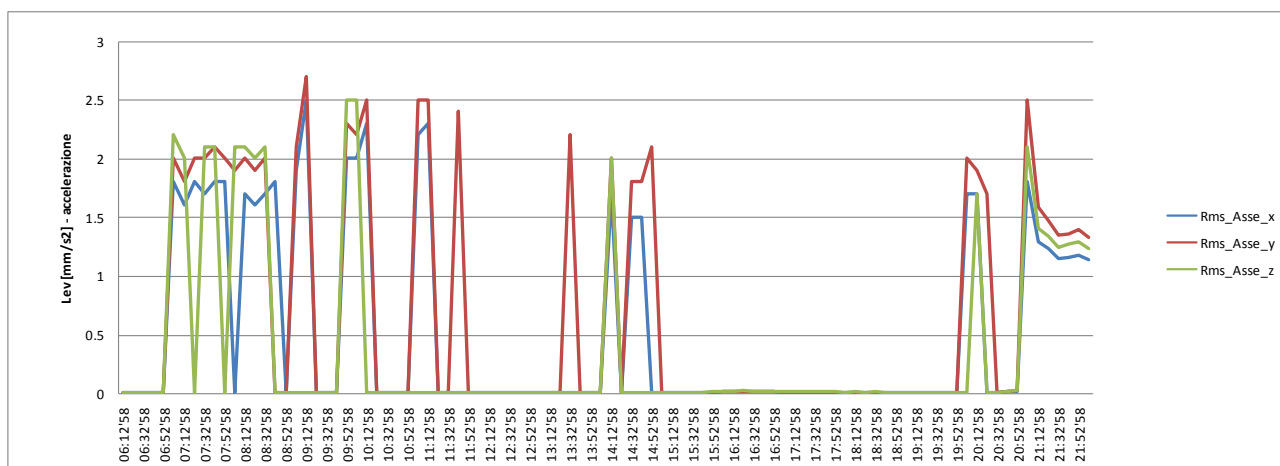


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

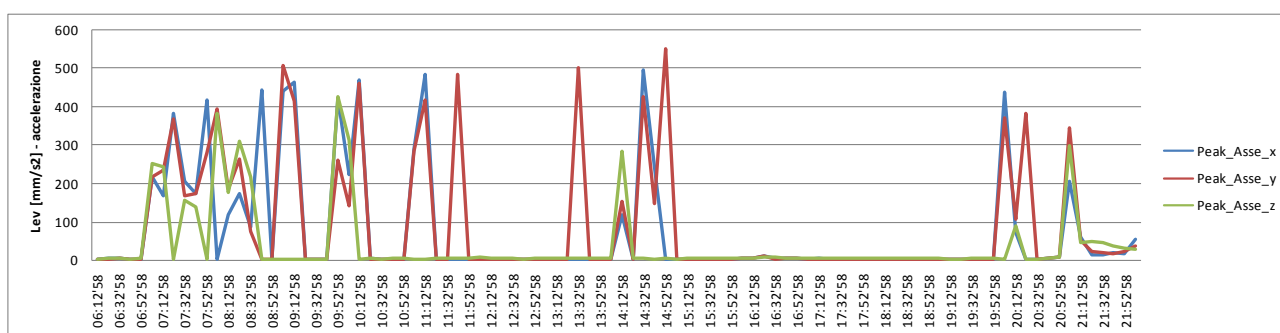


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

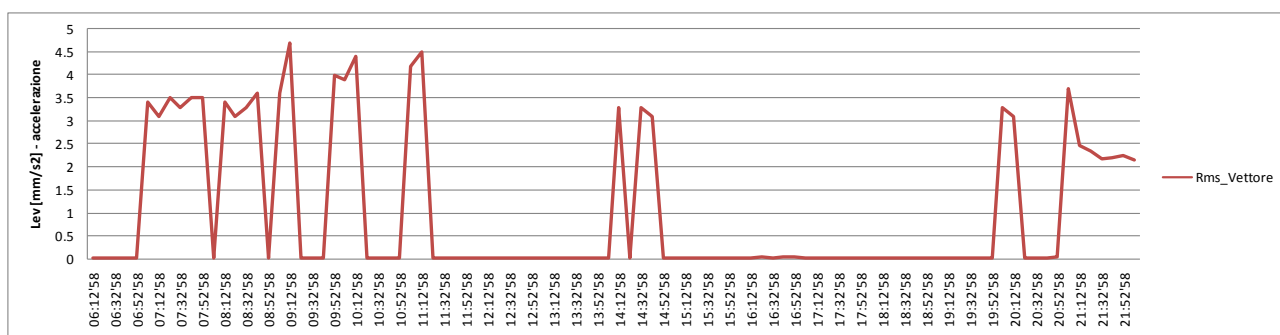
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: venerdì**



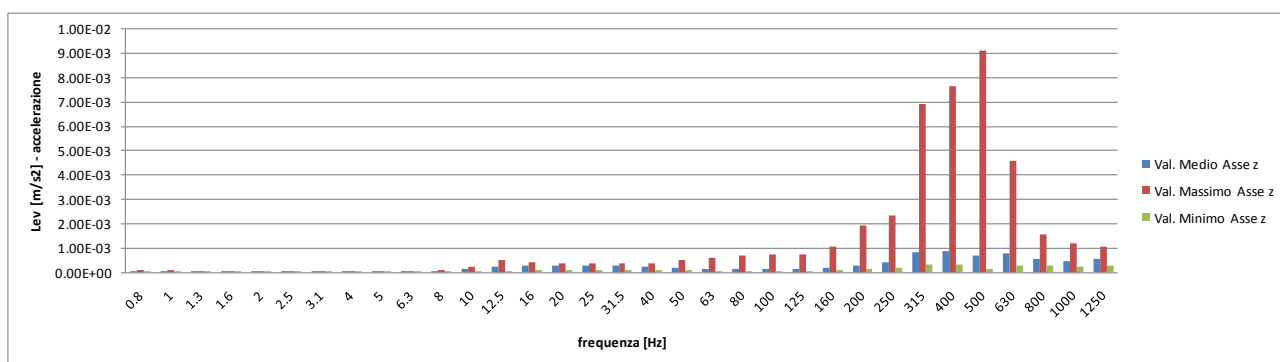
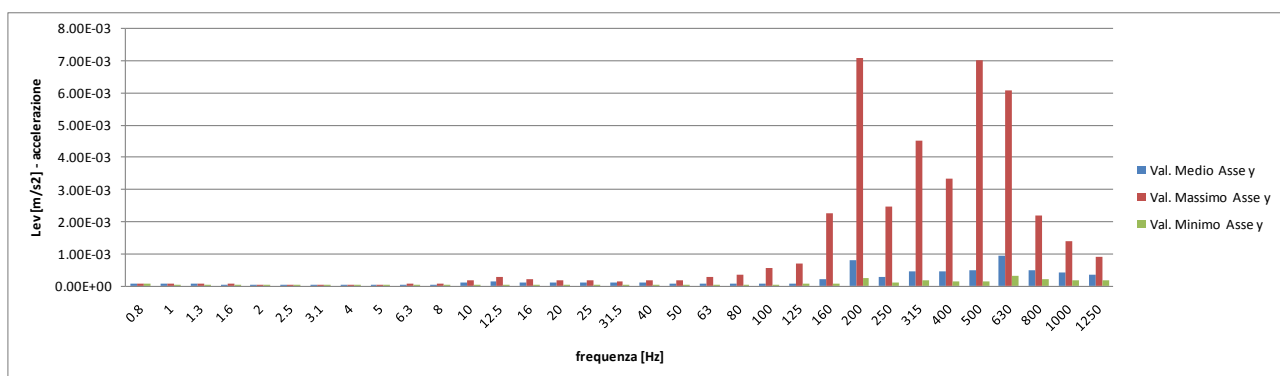
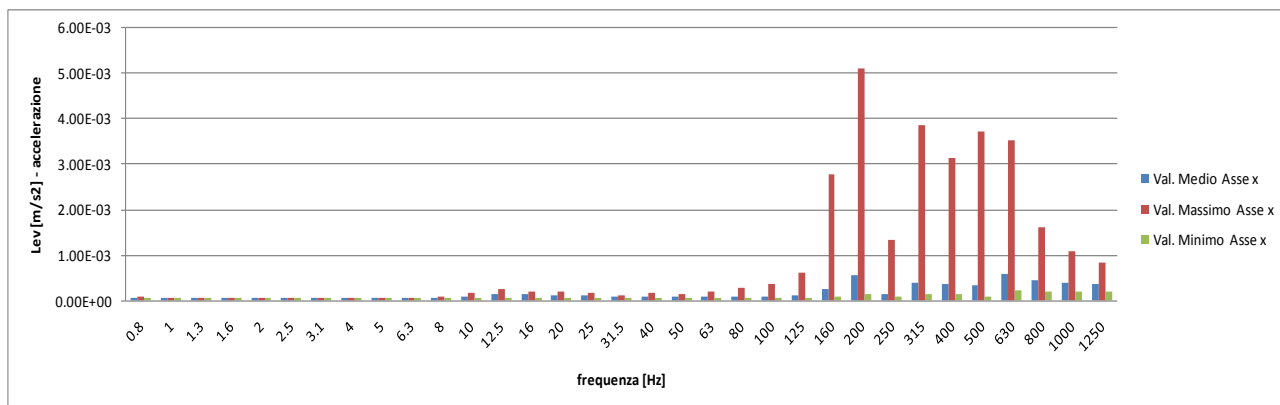
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

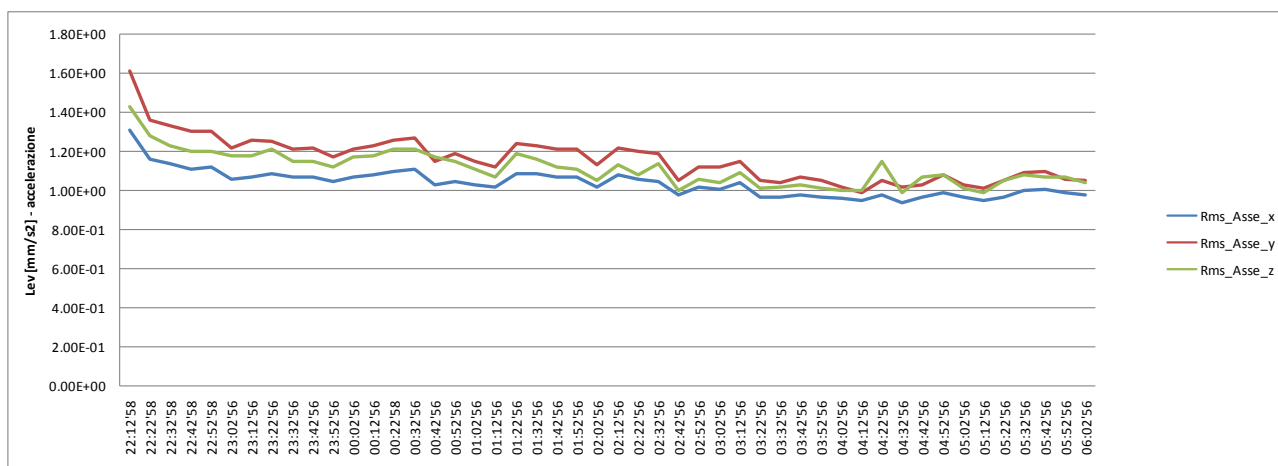


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

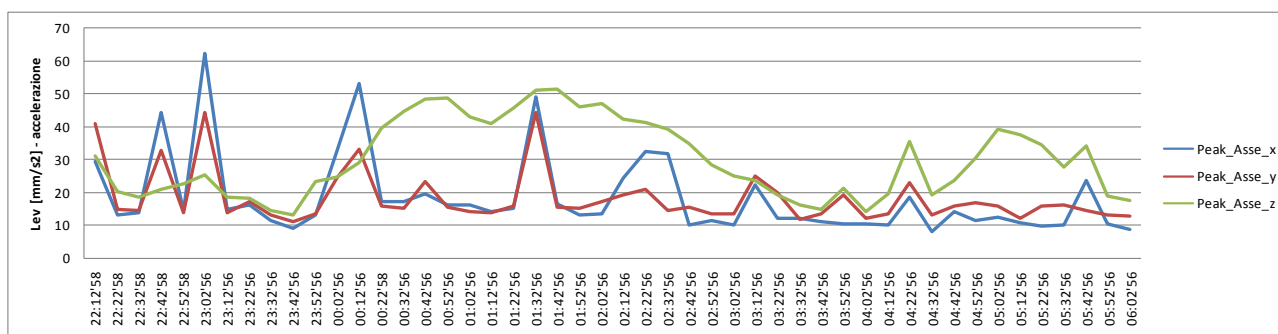


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

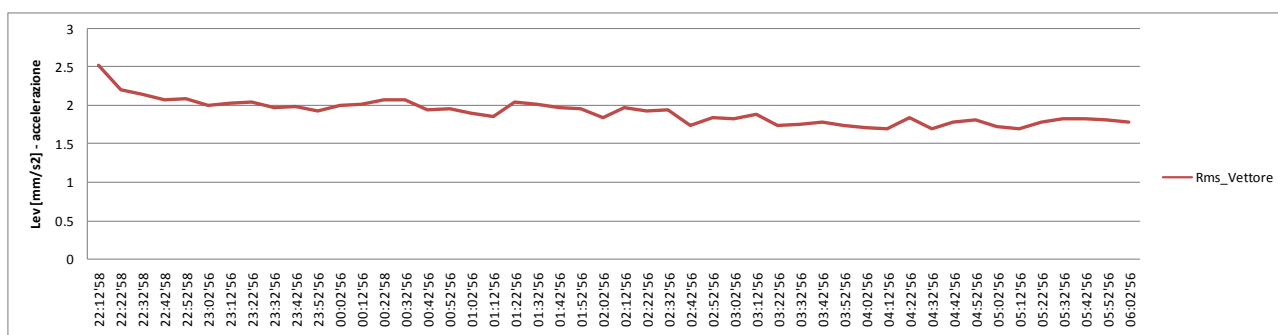
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: venerdì**



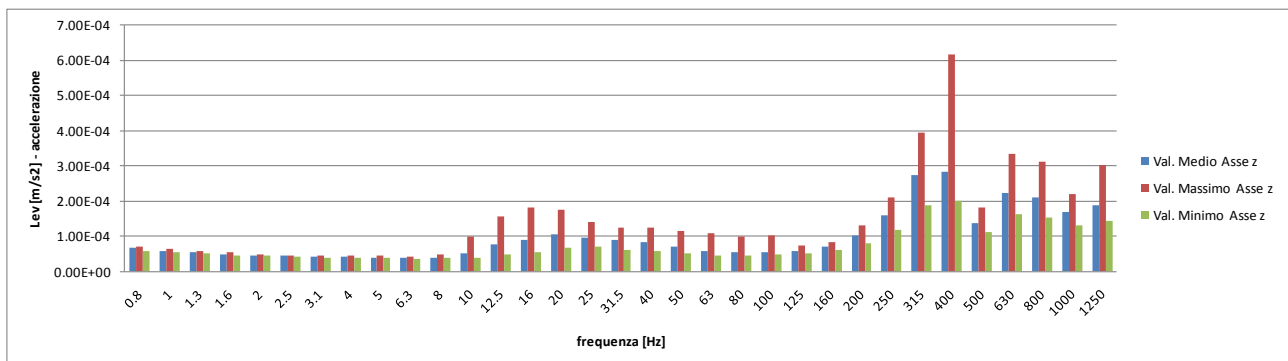
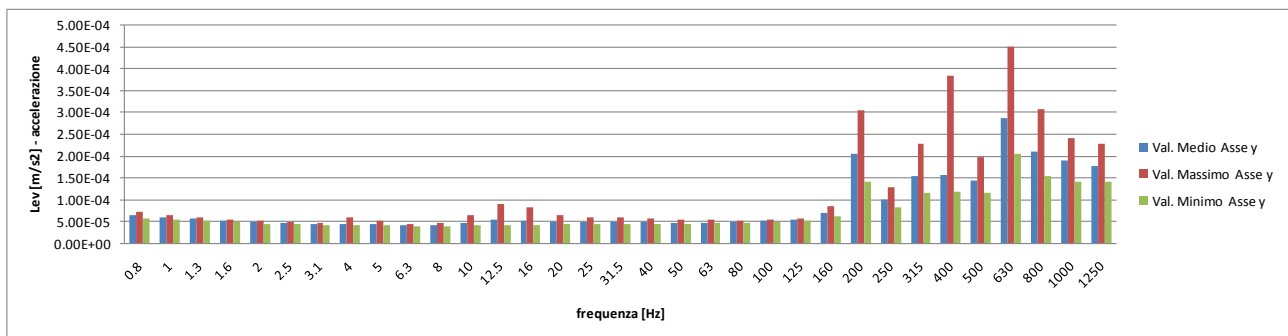
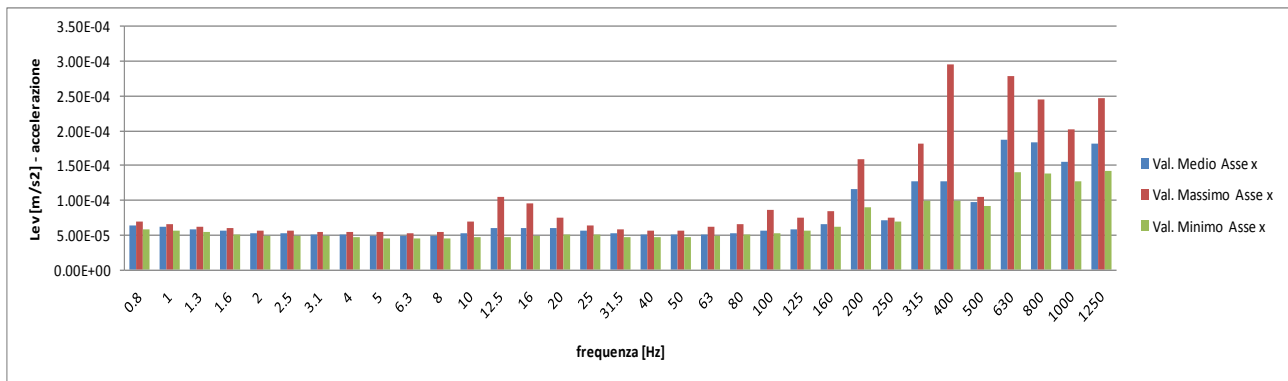
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

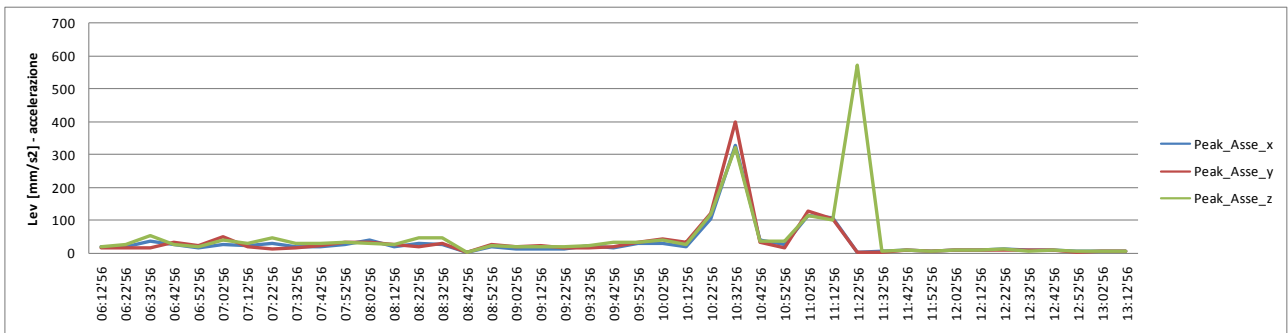


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

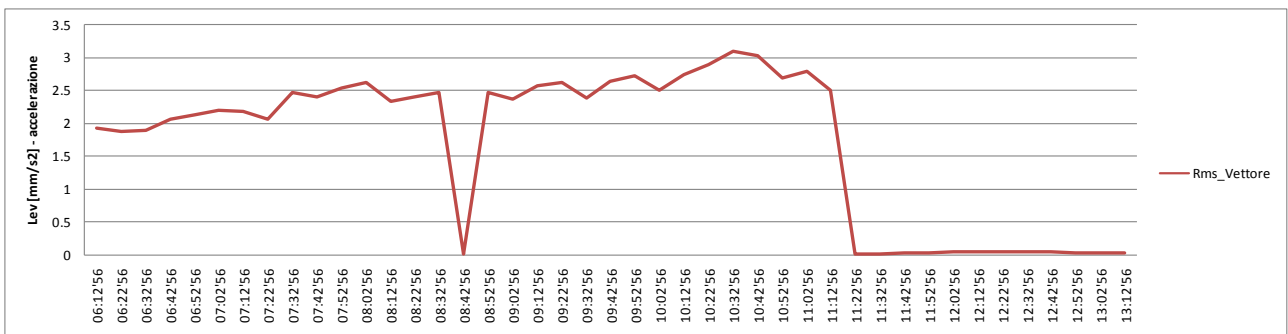
- **Settimo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: sabato**



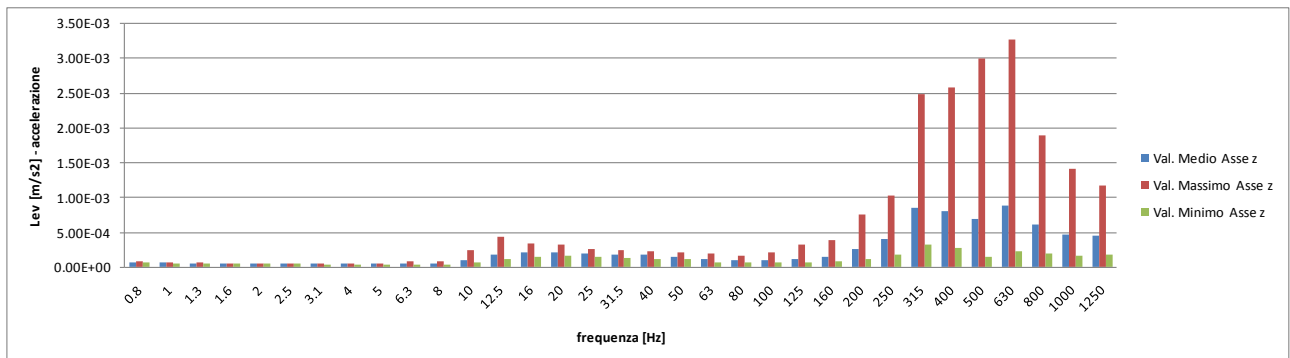
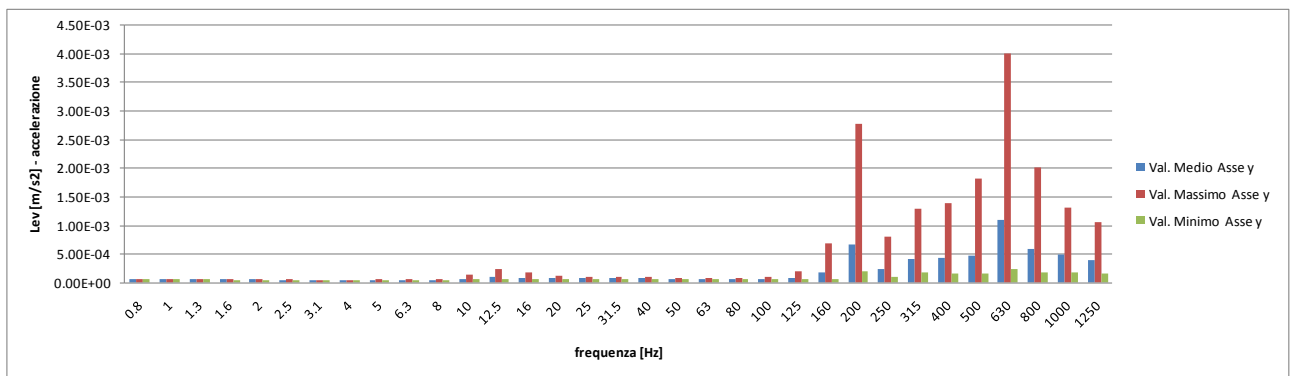
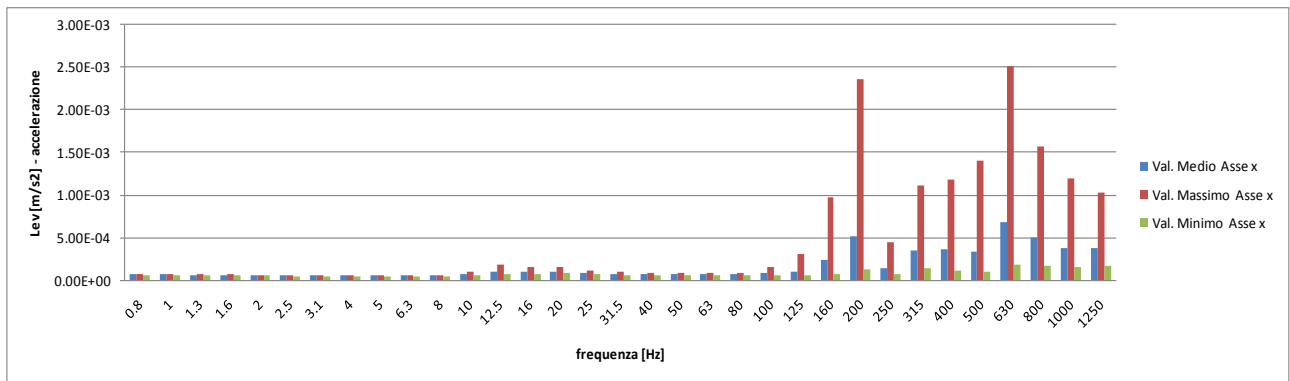
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione



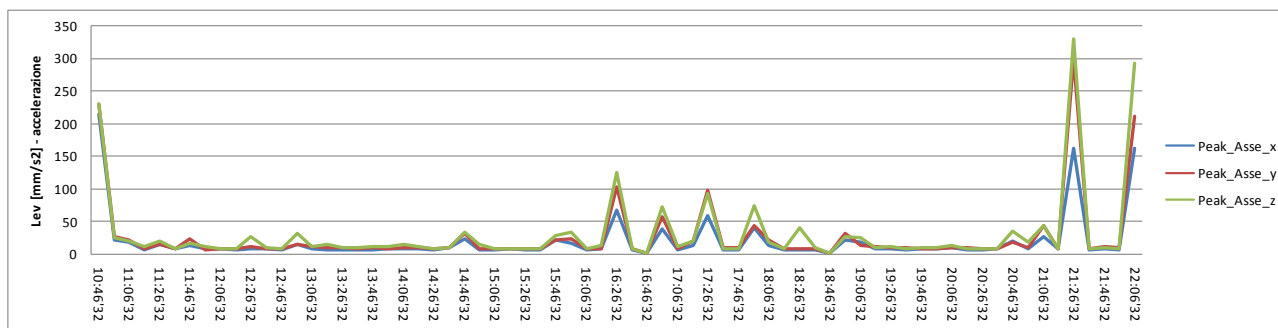
Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

Descrizione Punto di Misura	Identificazione fotografica
Posizionamento a 50 m infrastruttura – prossimità ricettore	

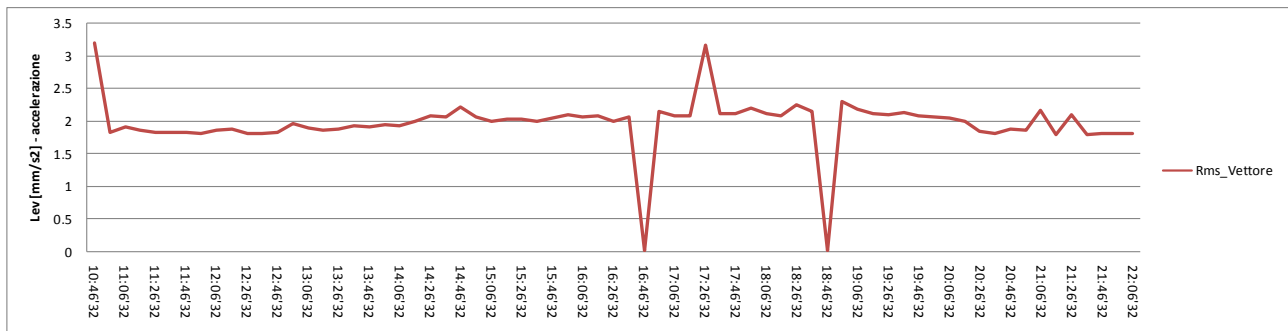
- Primo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: domenica**



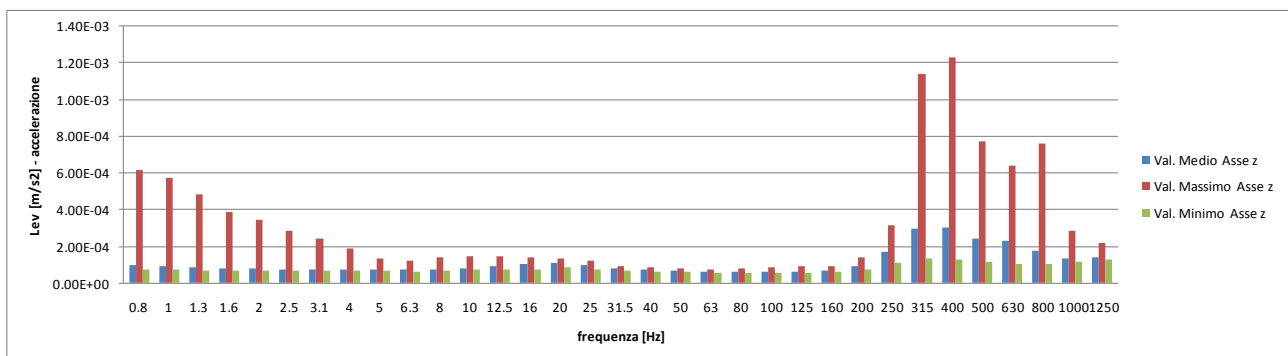
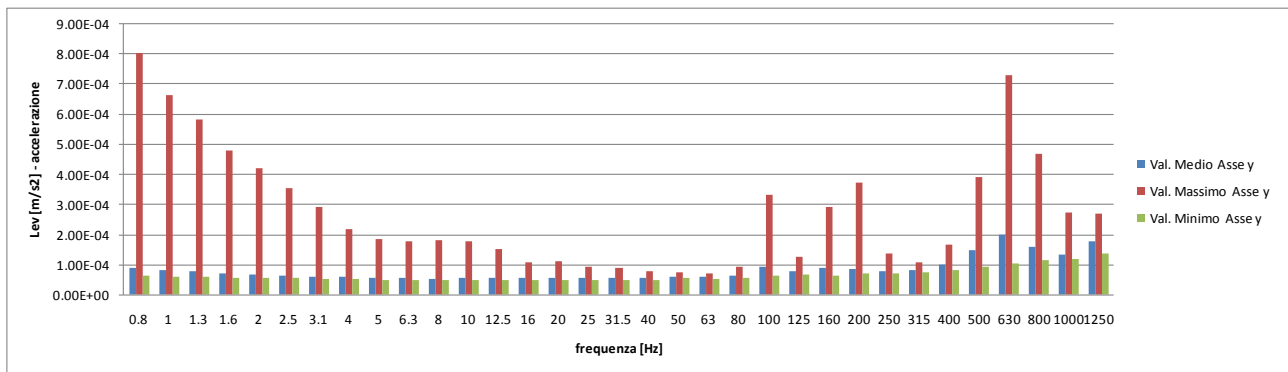
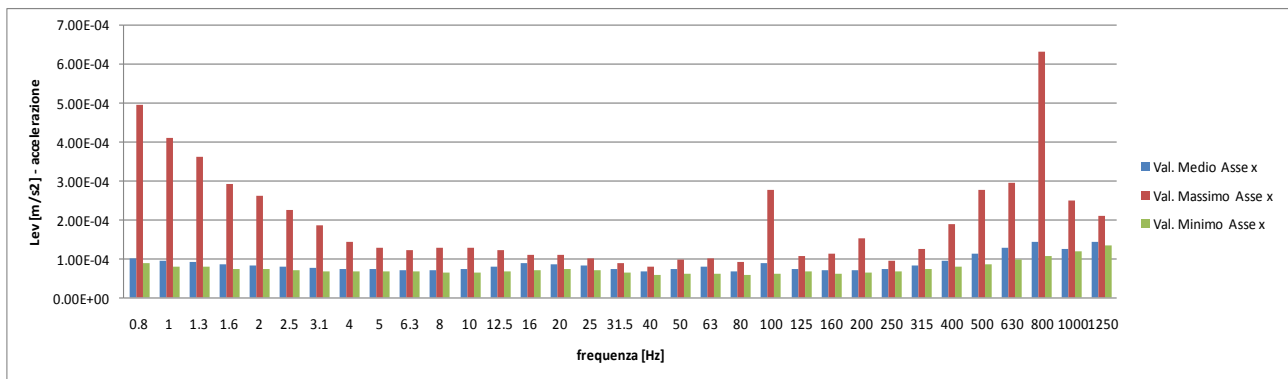
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

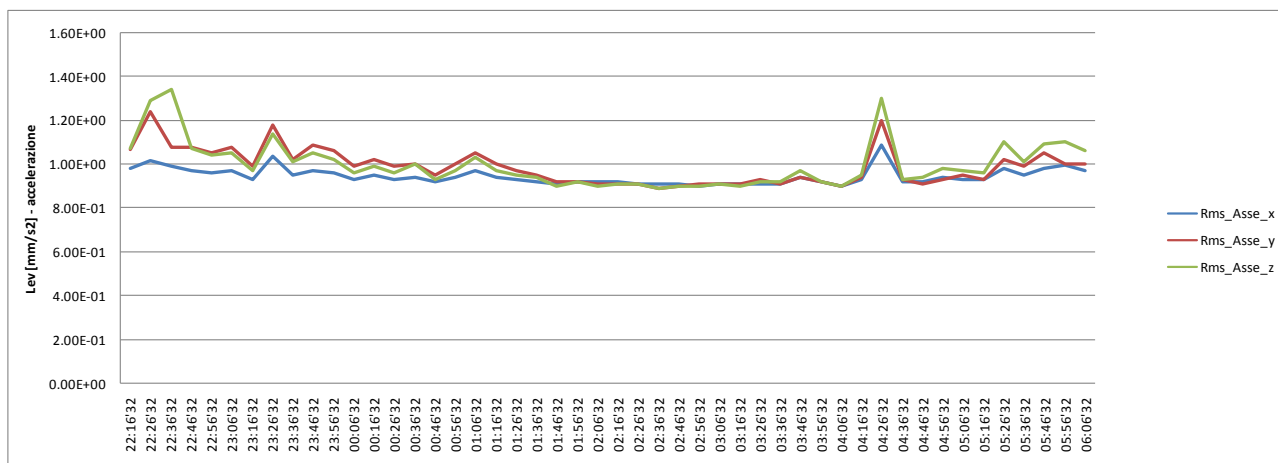


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

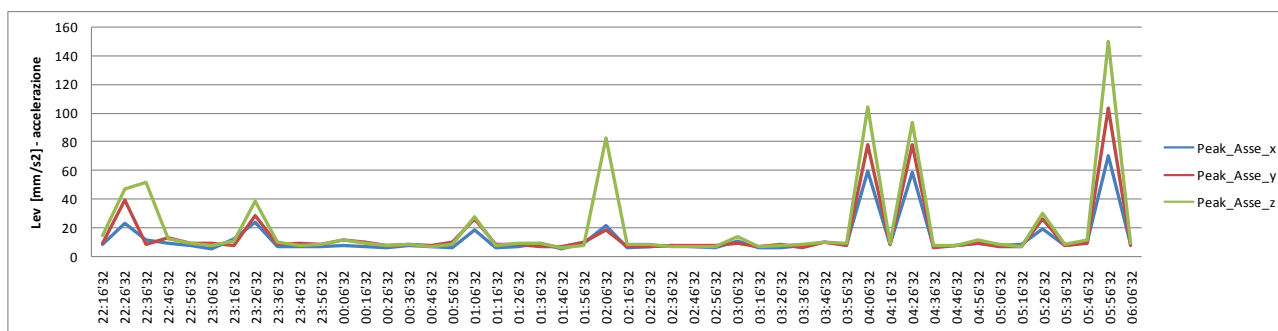


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

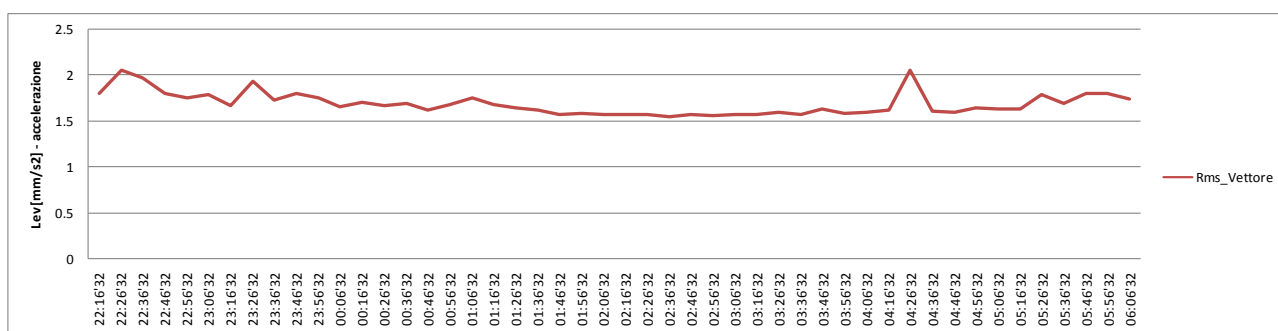
- **Primo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: domenica**



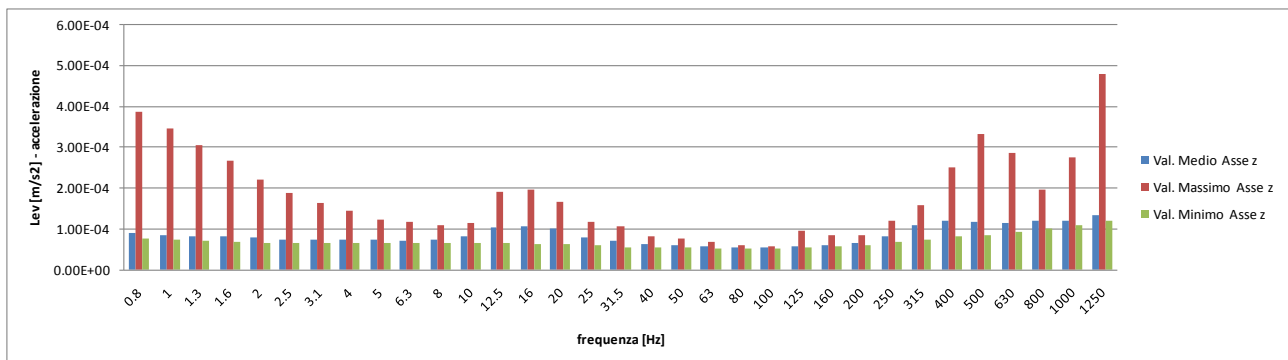
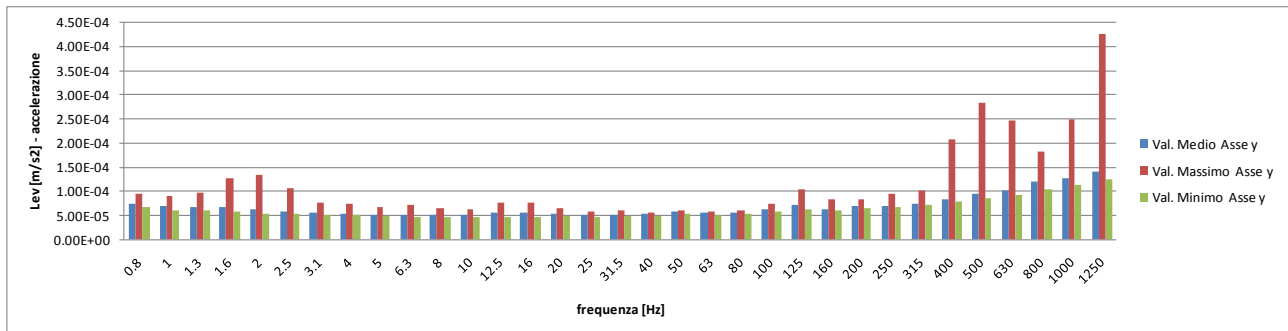
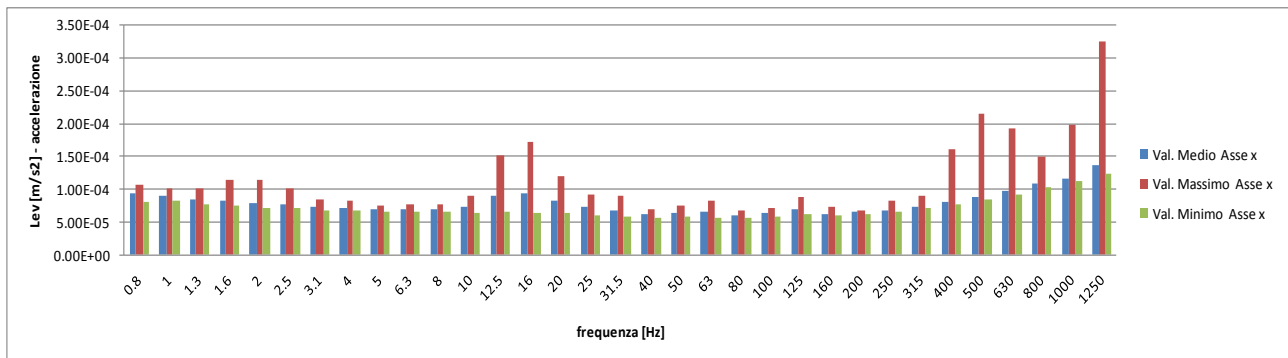
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

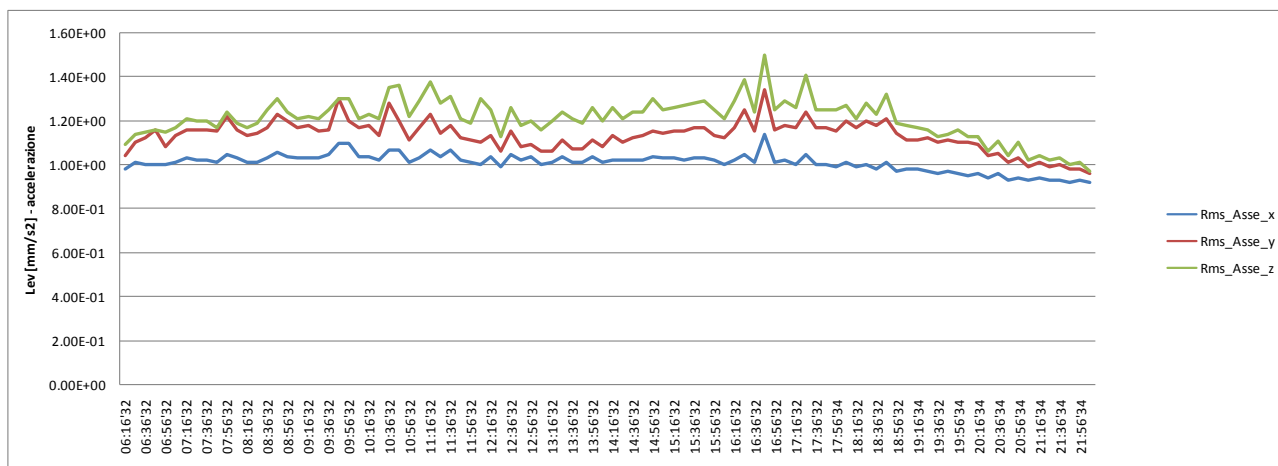


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

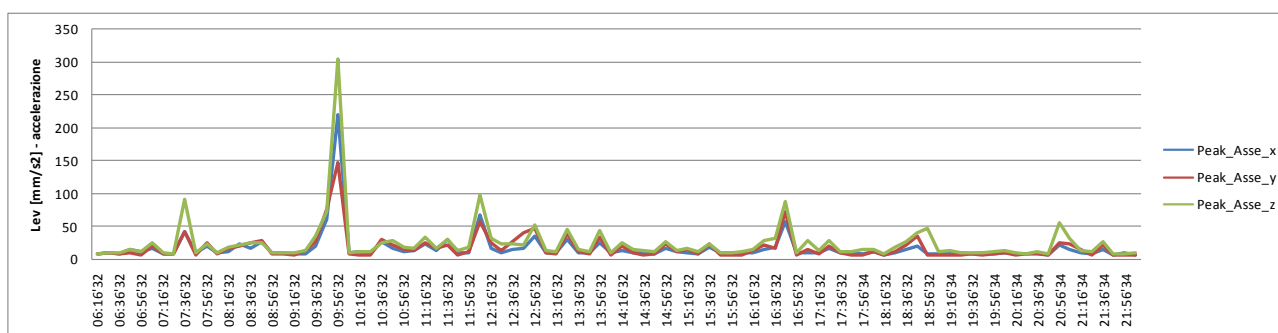


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

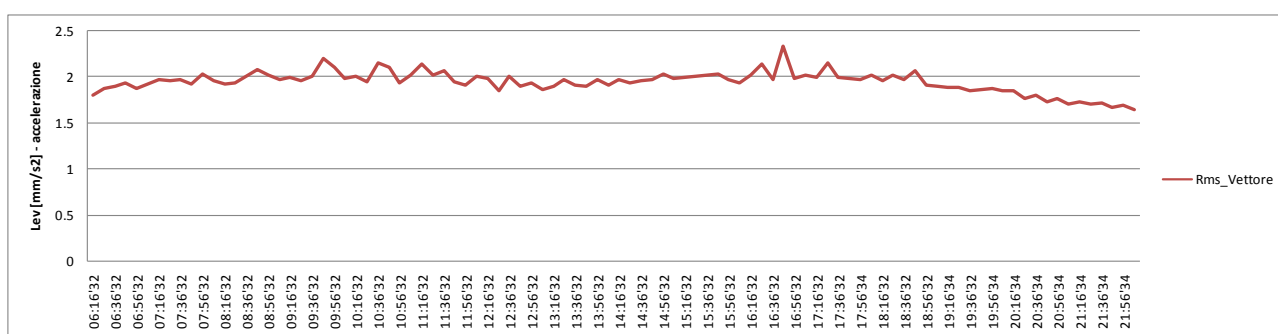
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: lunedì**



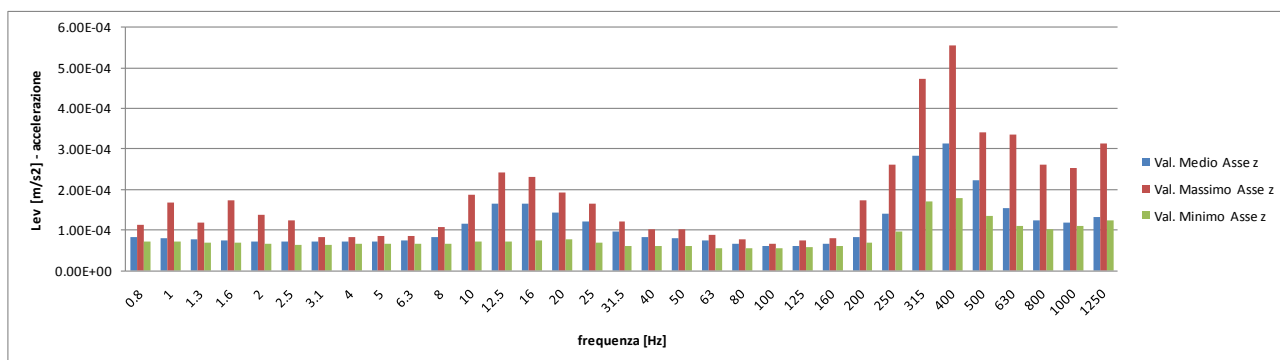
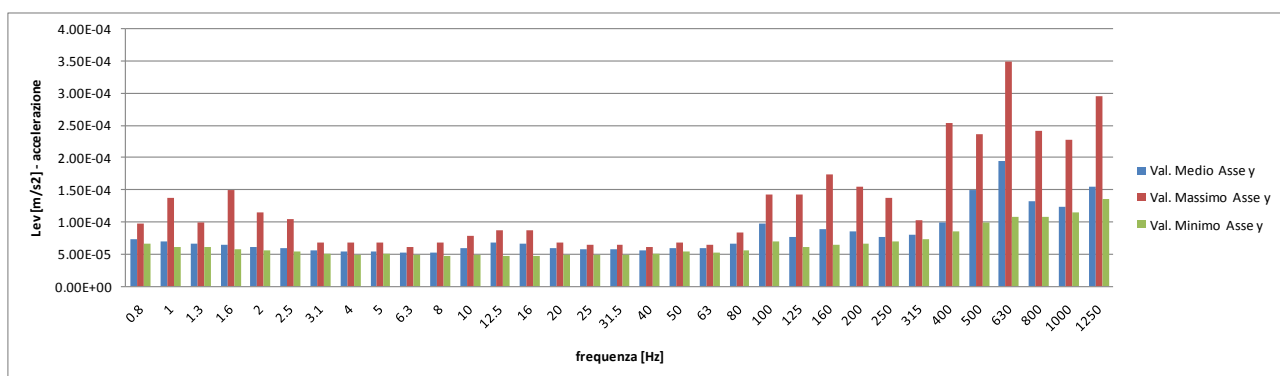
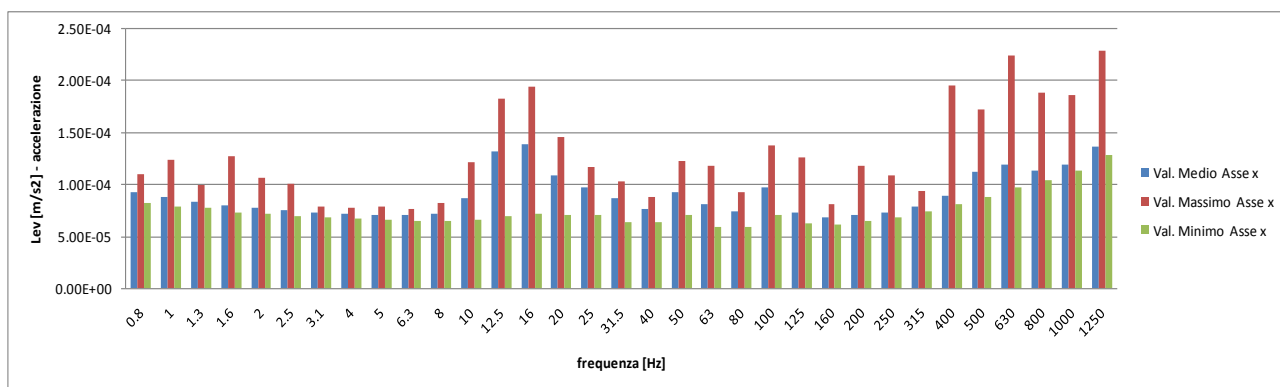
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

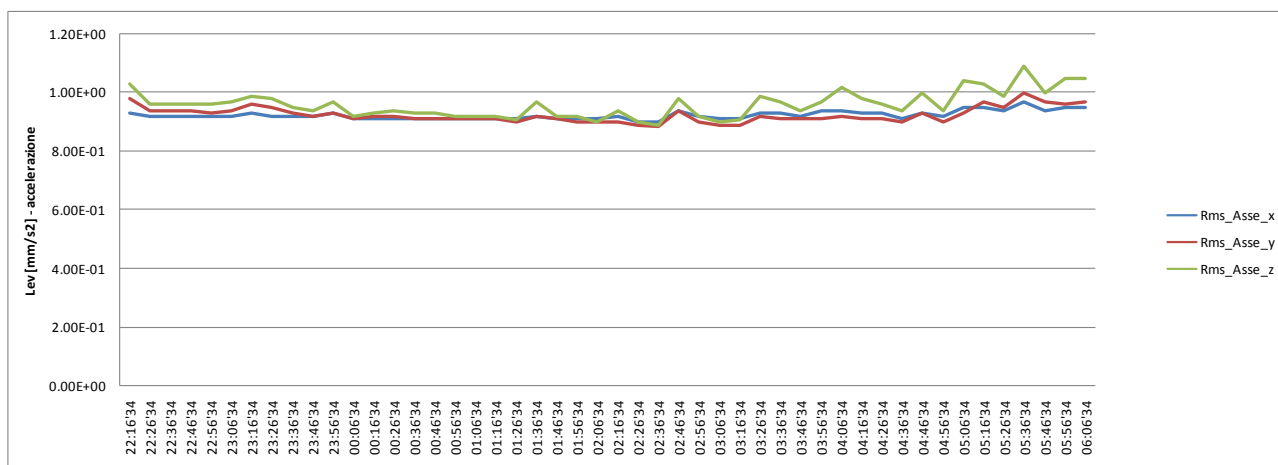


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

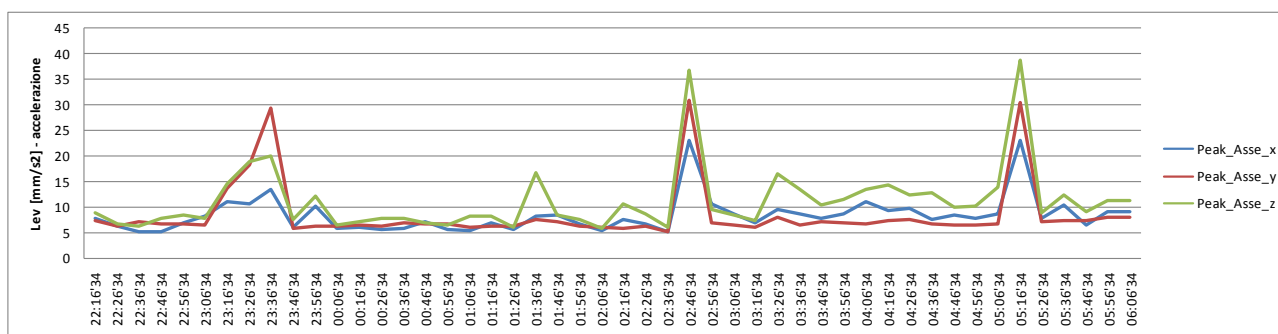


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

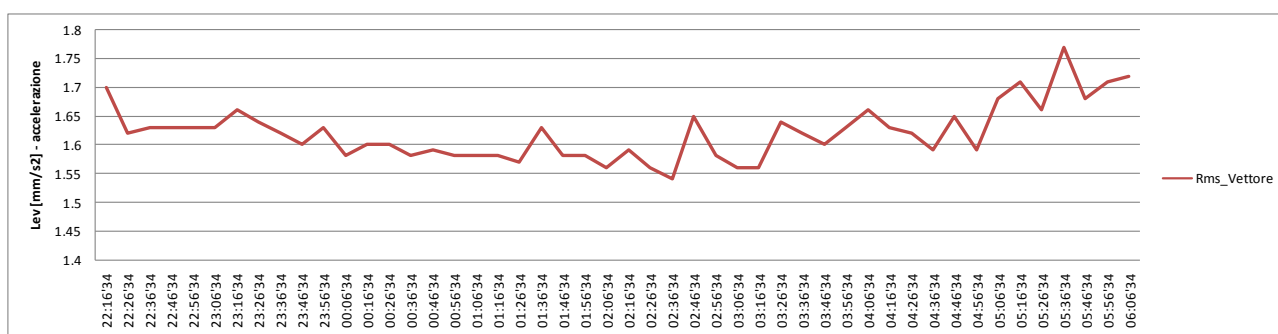
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: lunedì**



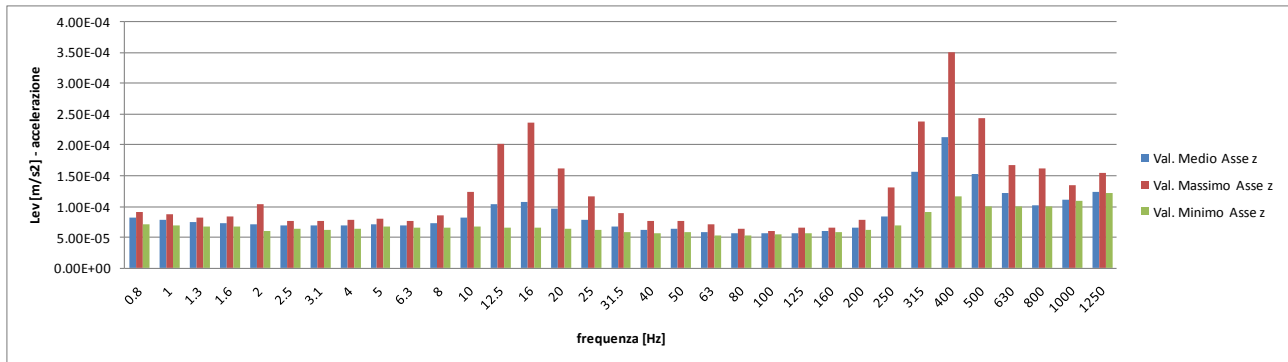
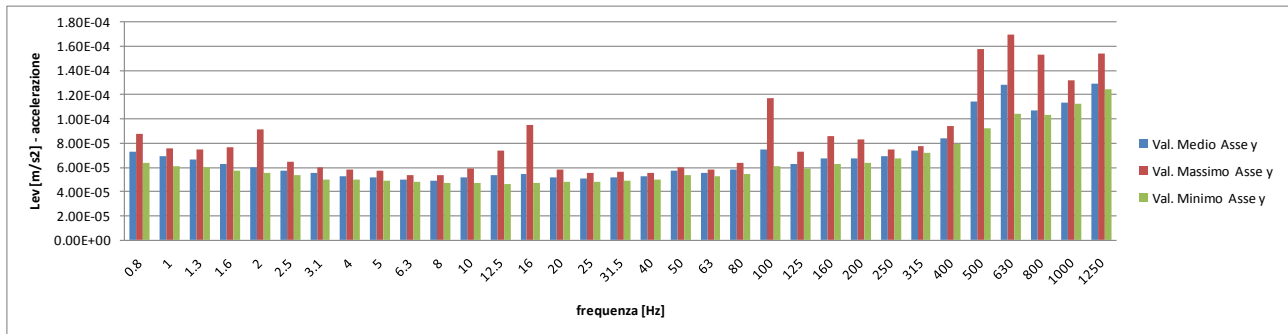
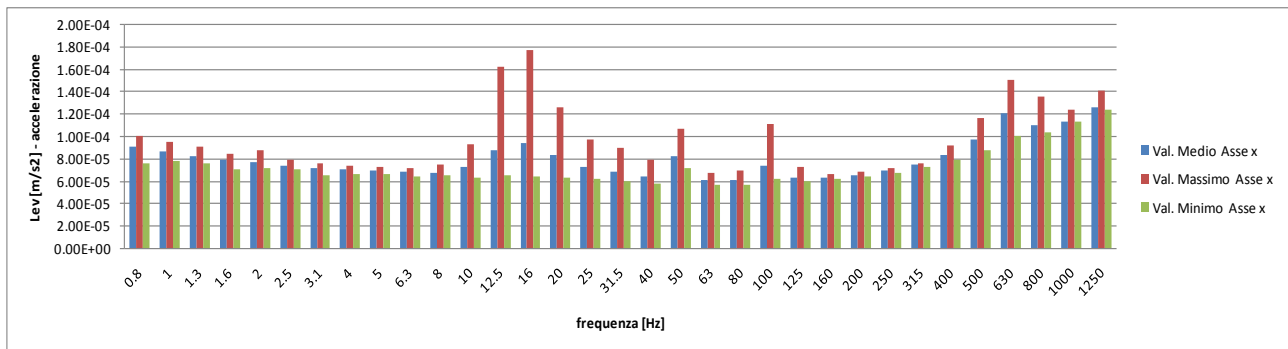
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

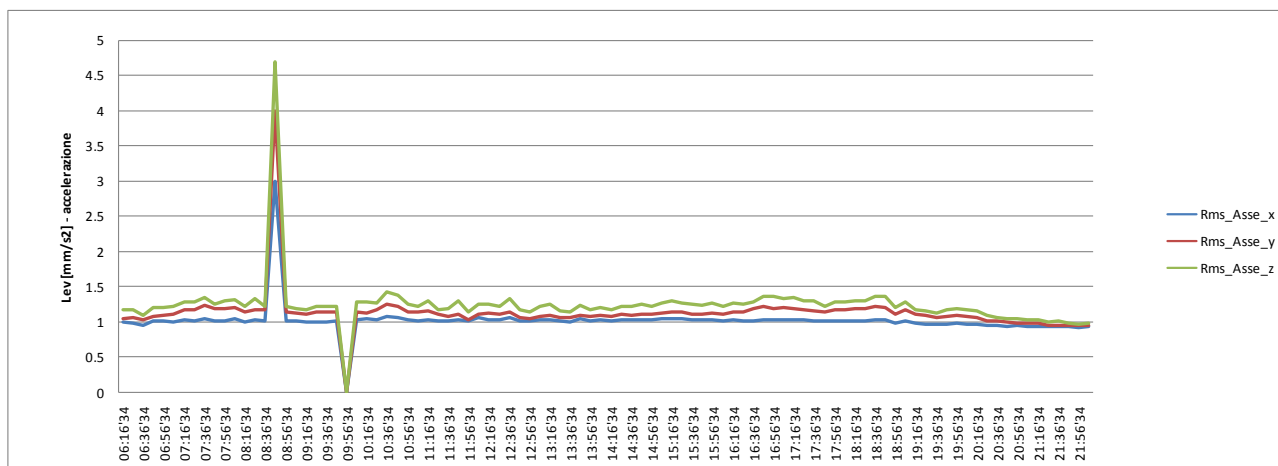


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

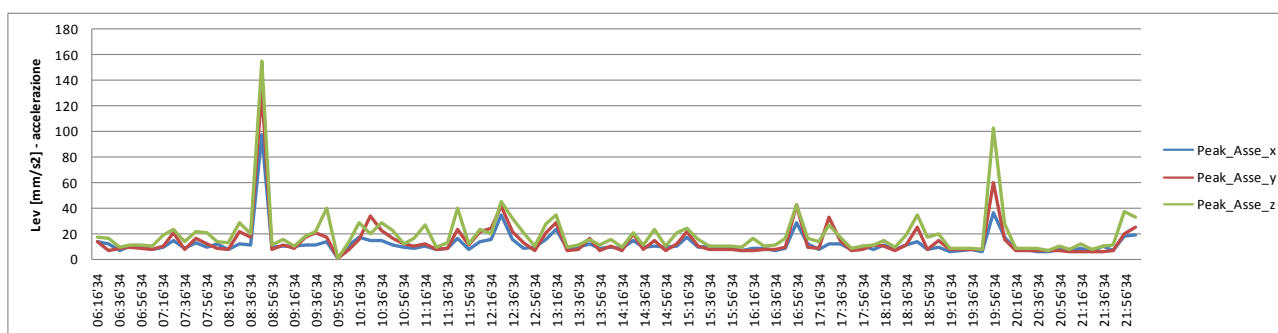


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

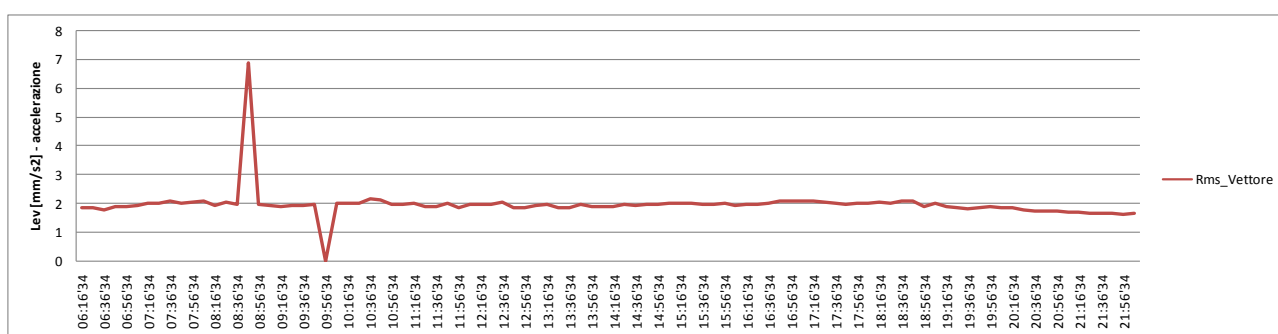
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: martedì**



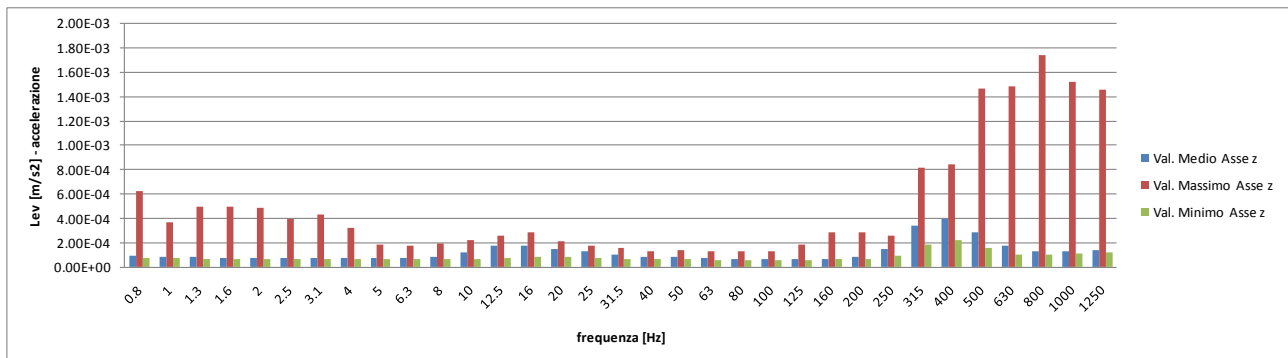
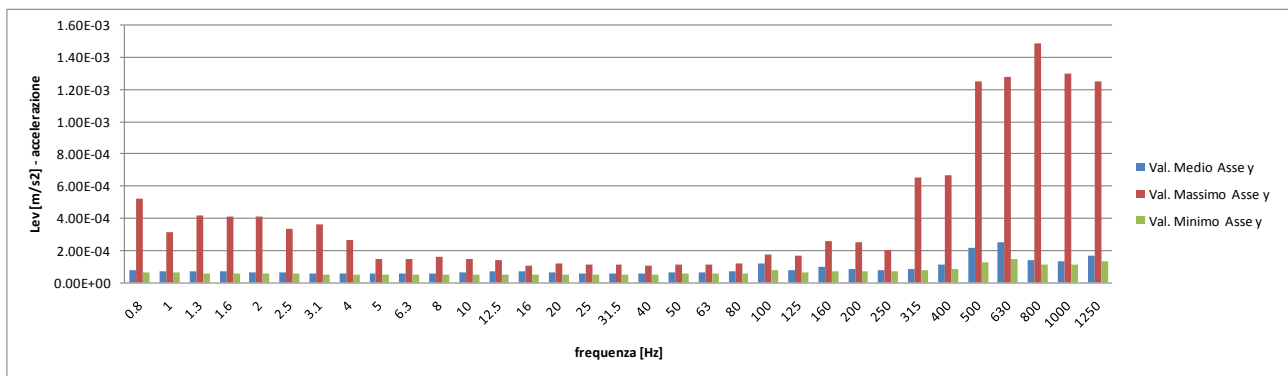
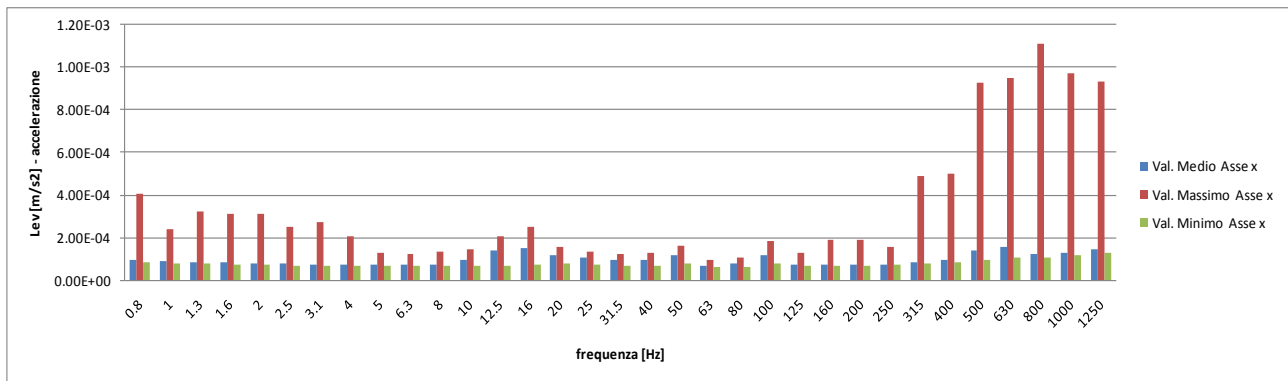
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

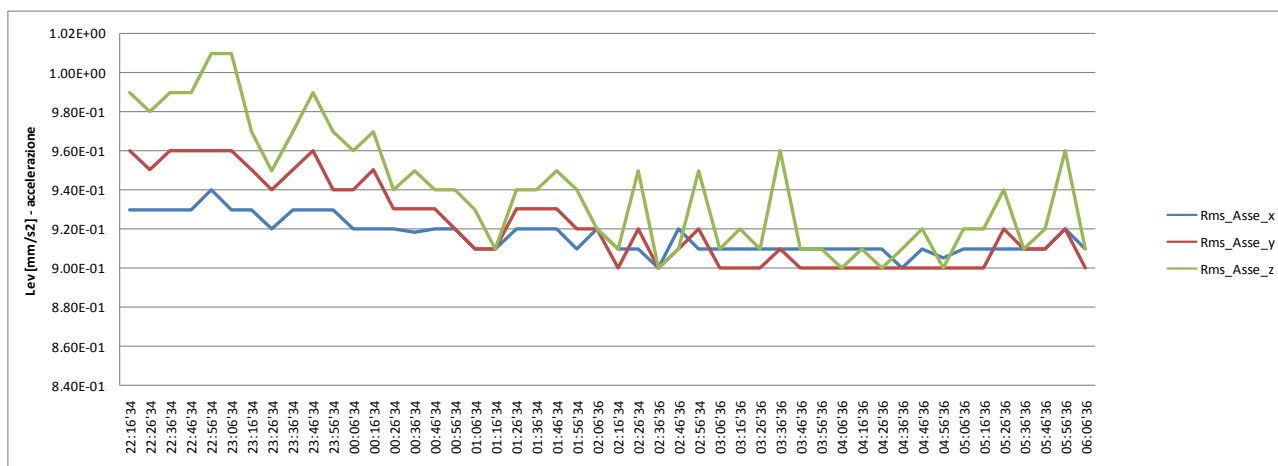


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

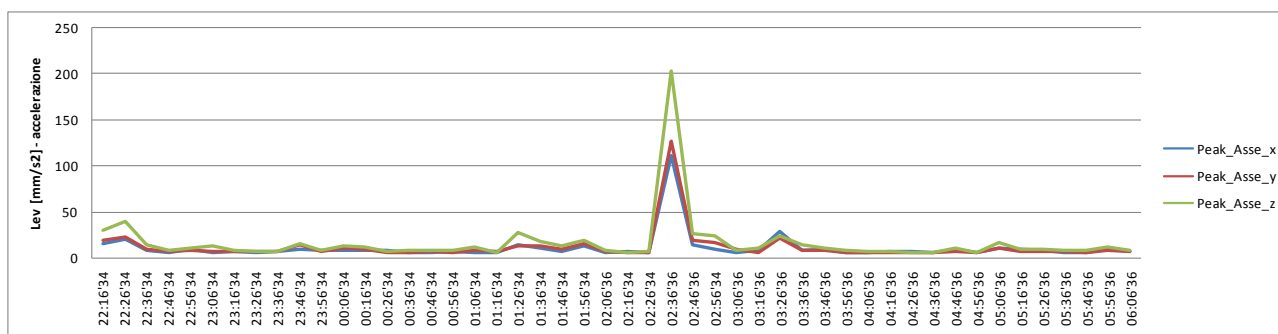


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

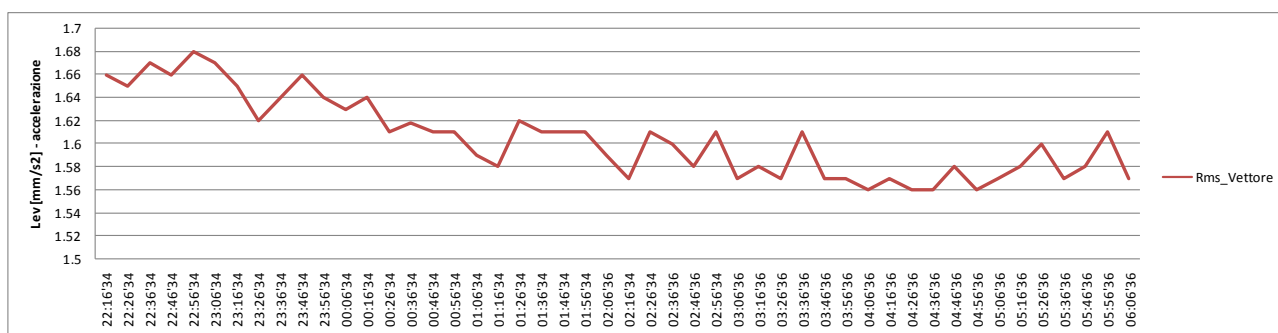
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: martedì**



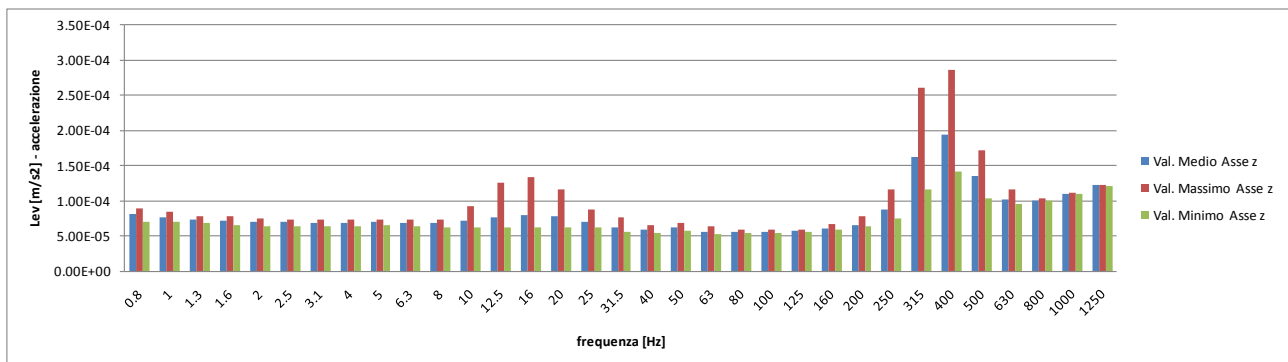
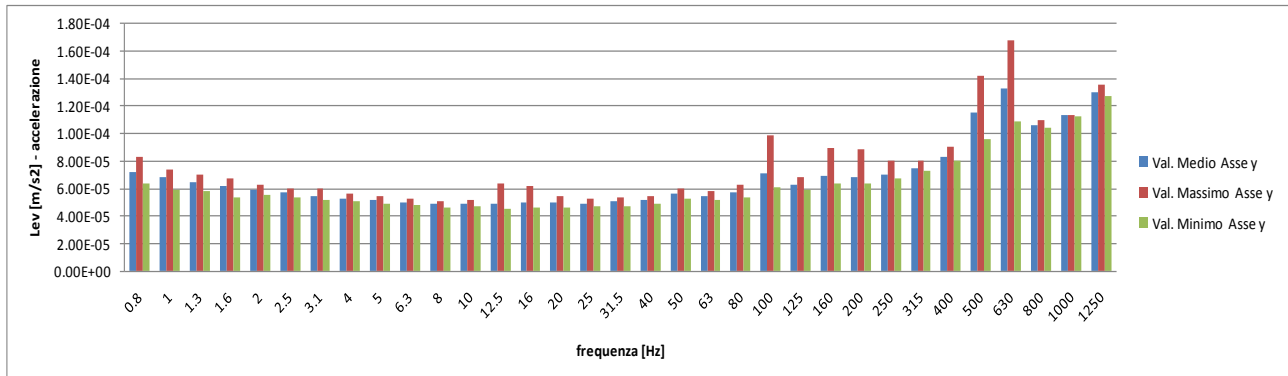
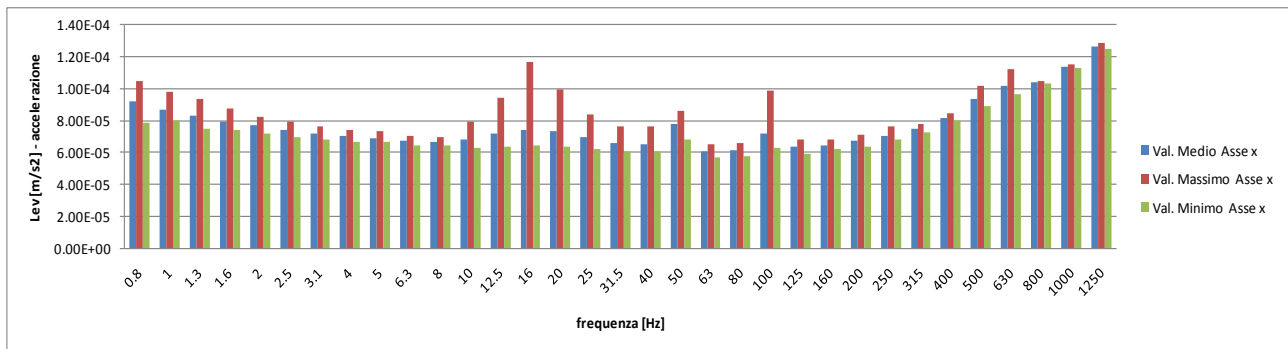
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

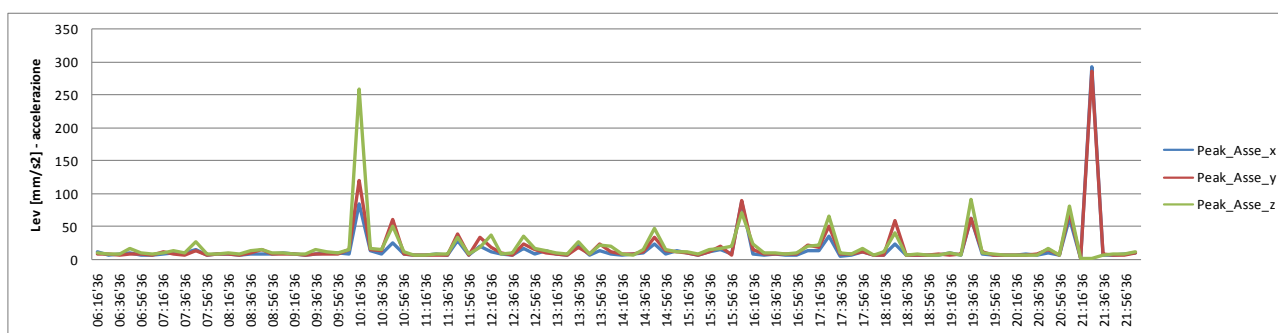


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

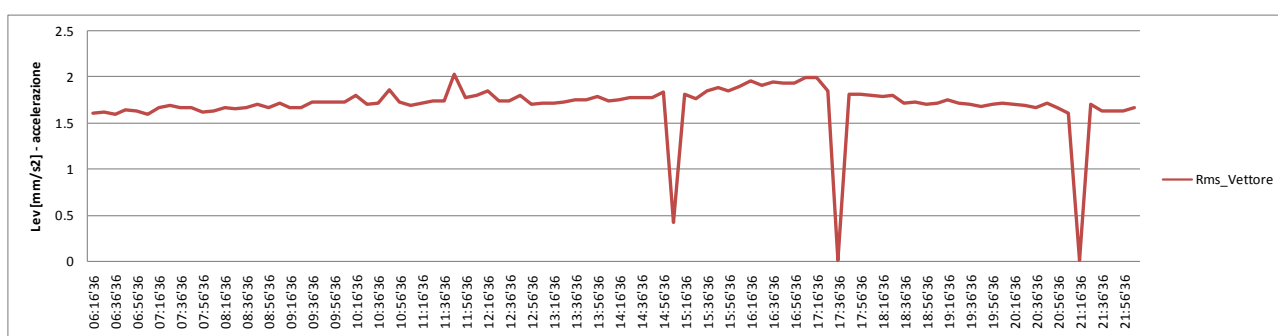
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: mercoledì**



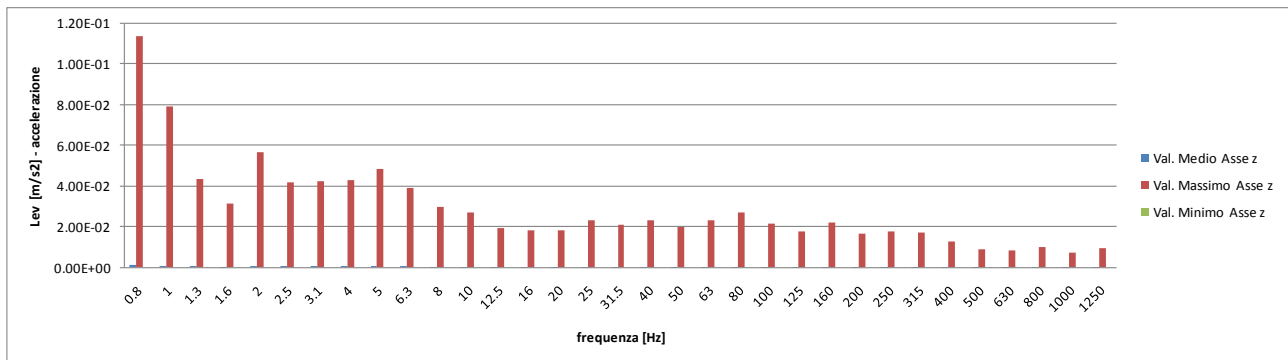
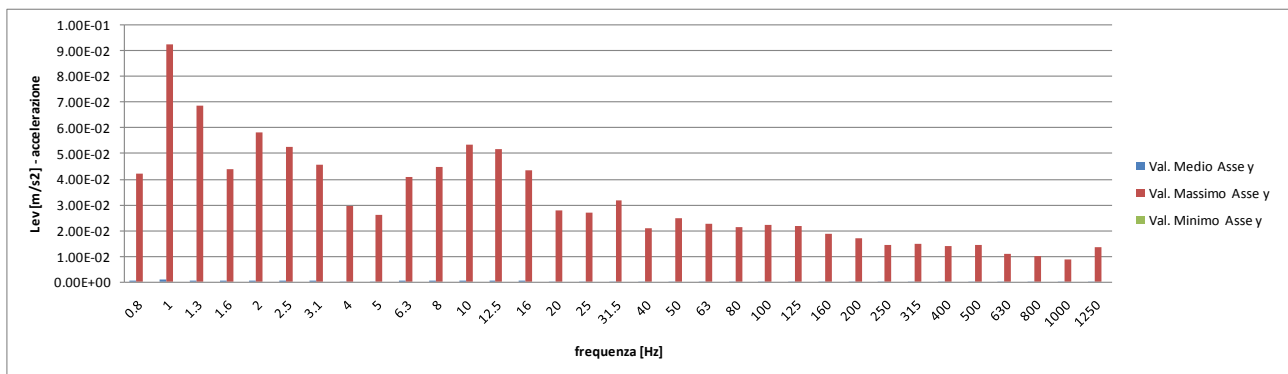
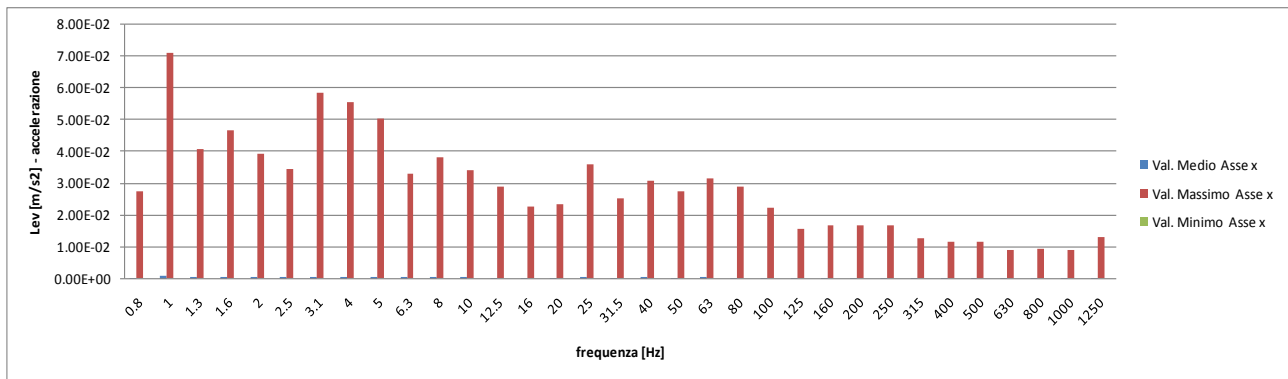
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

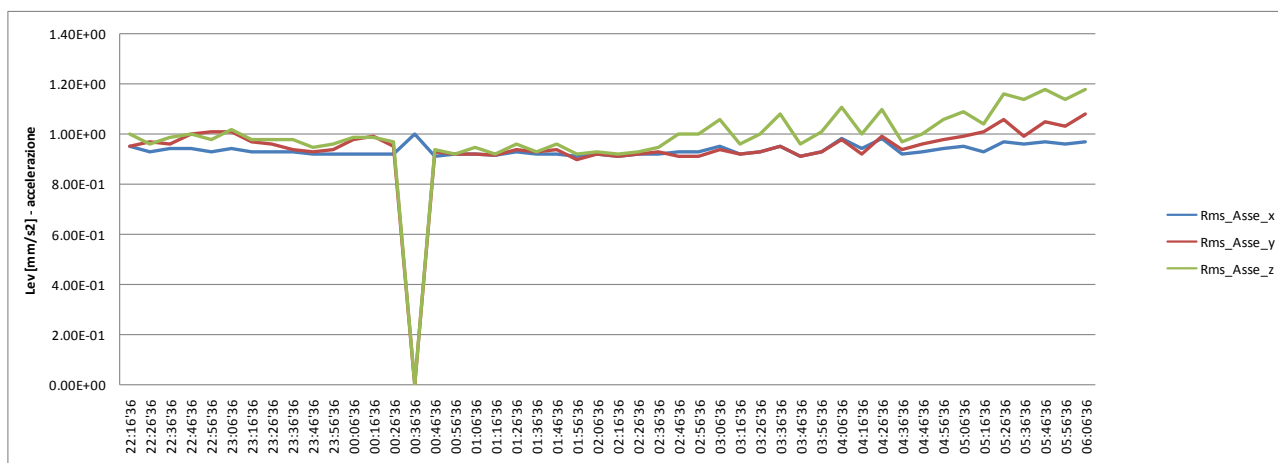


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

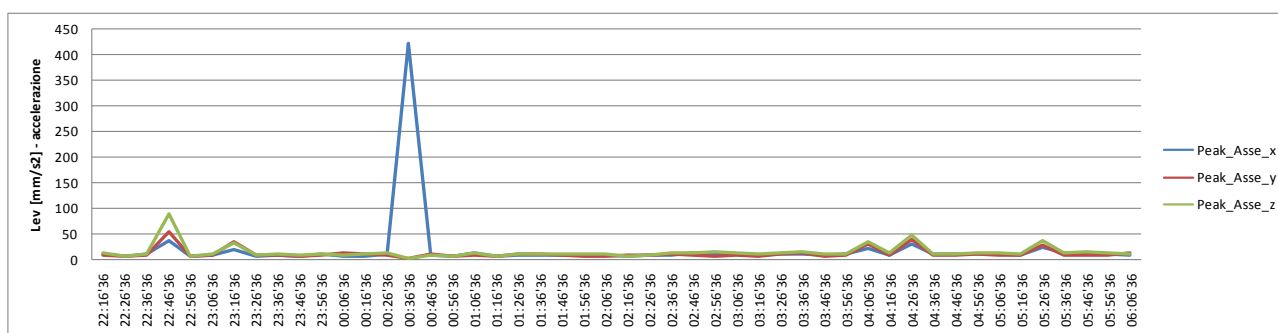


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

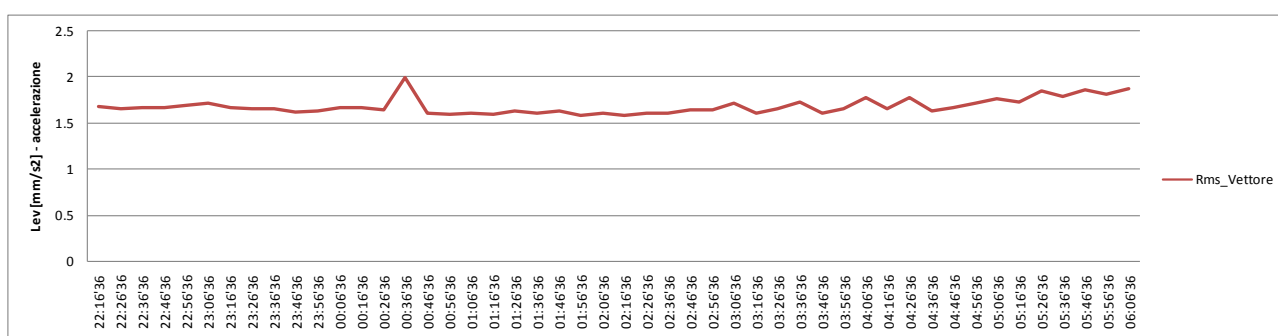
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: mercoledì**



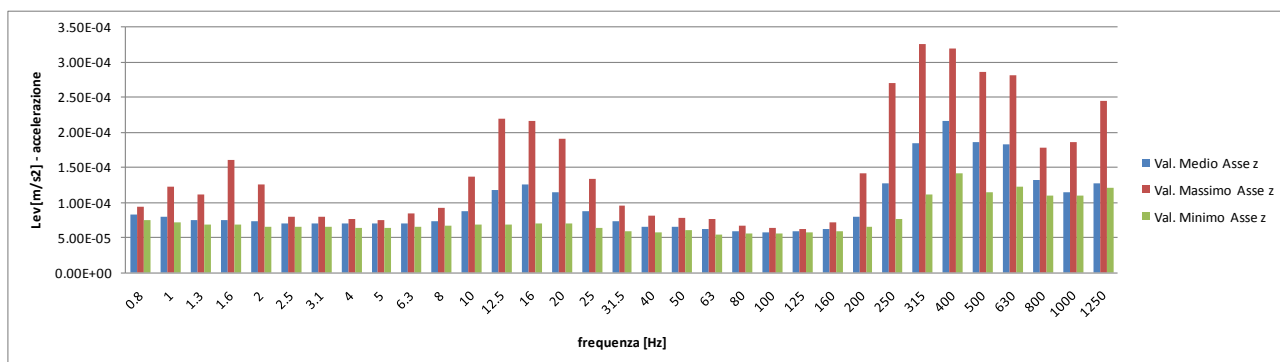
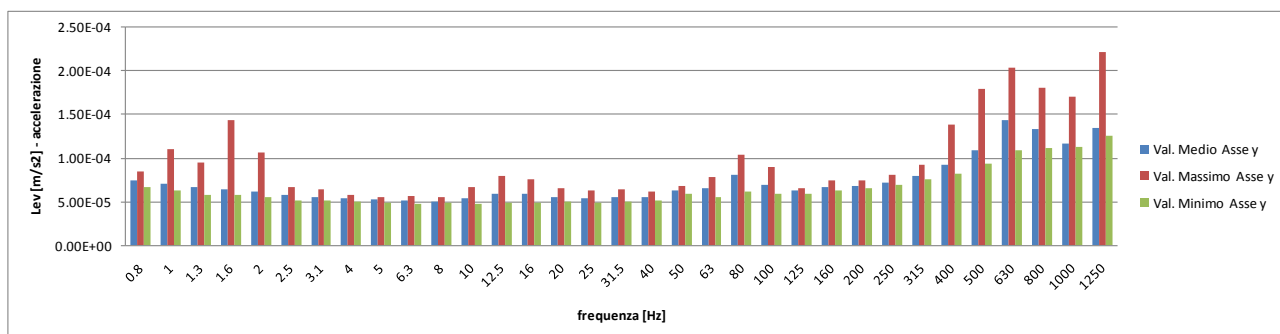
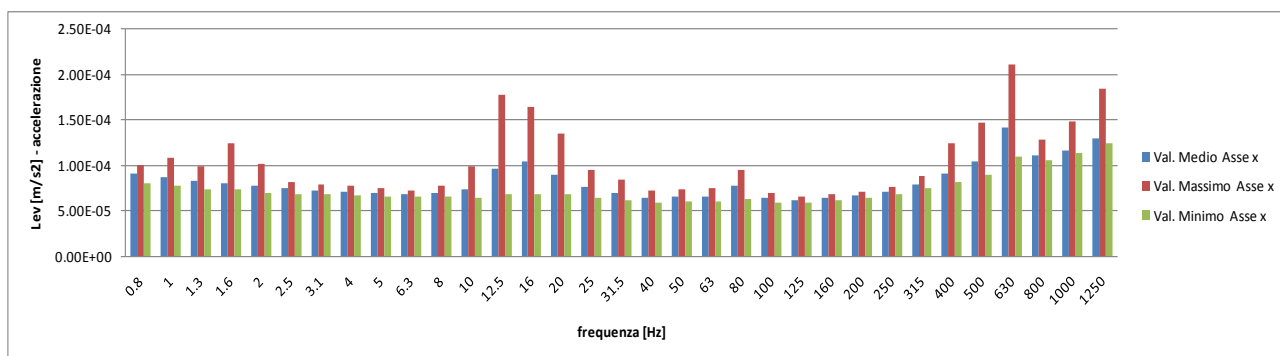
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

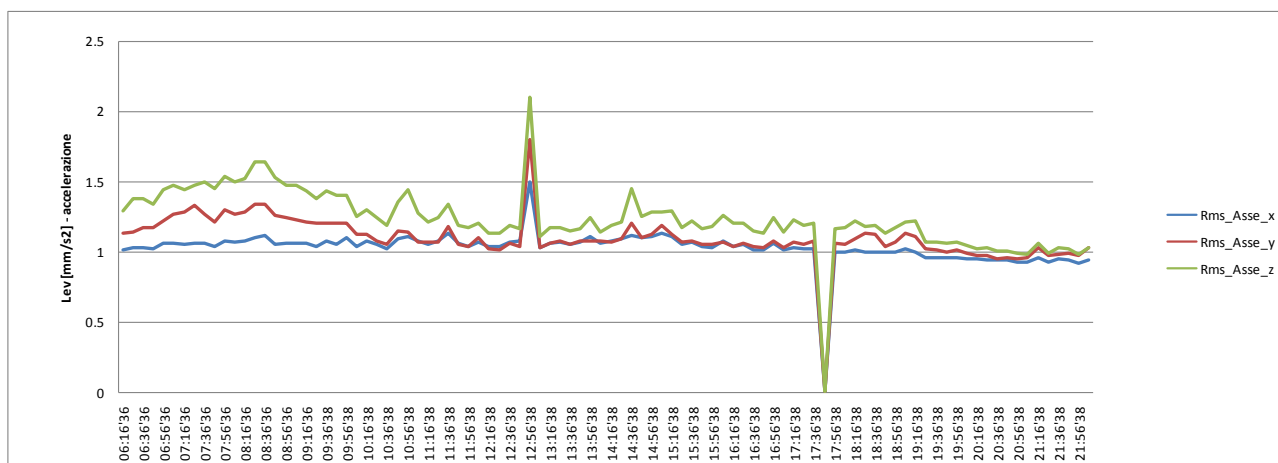


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

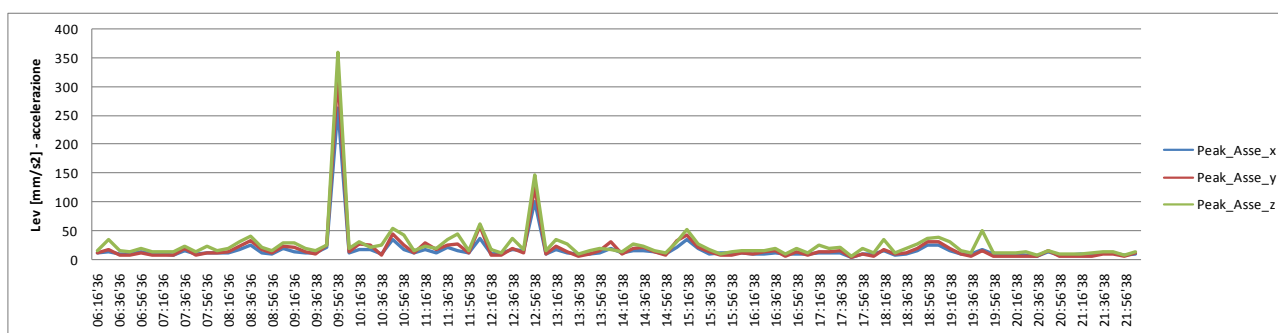


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

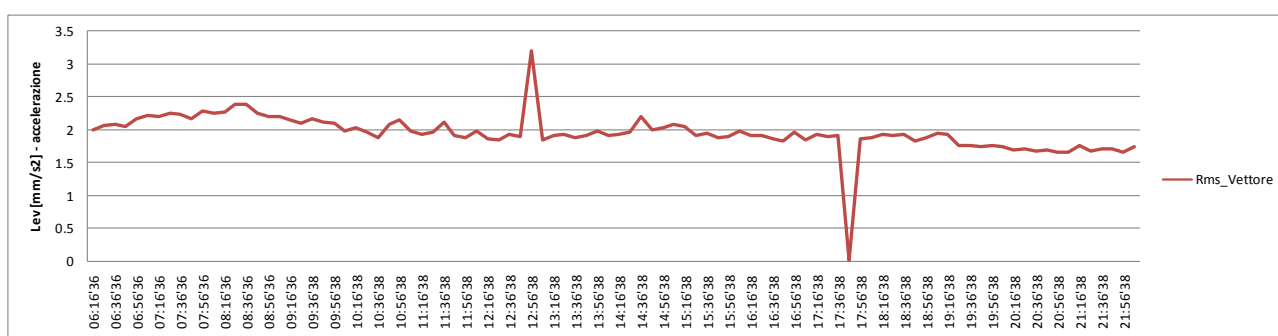
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: giovedì**



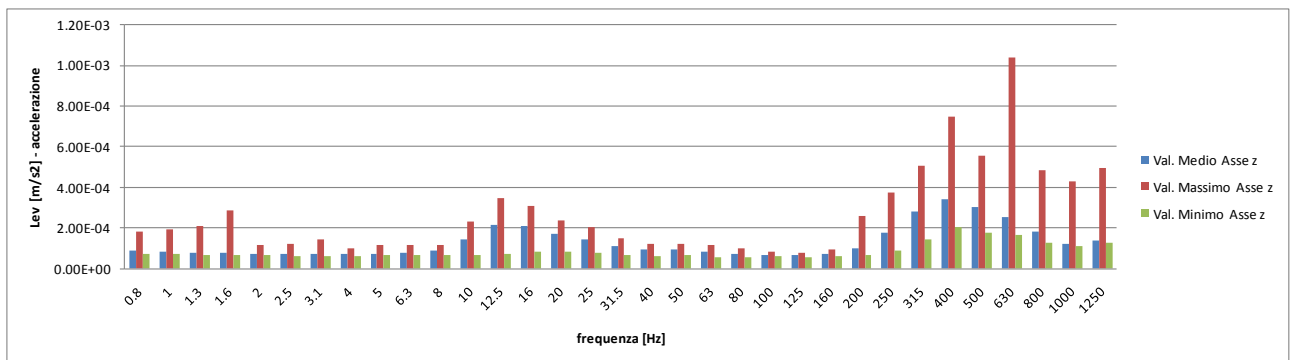
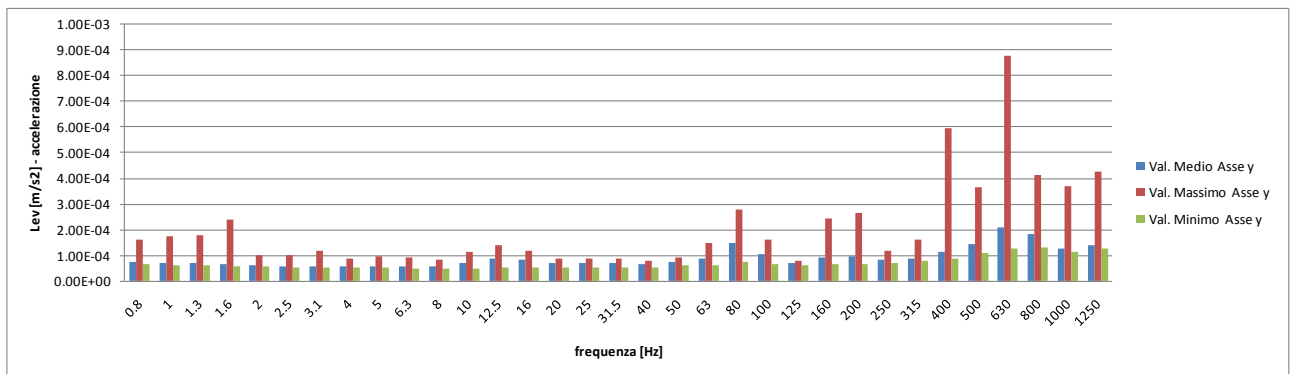
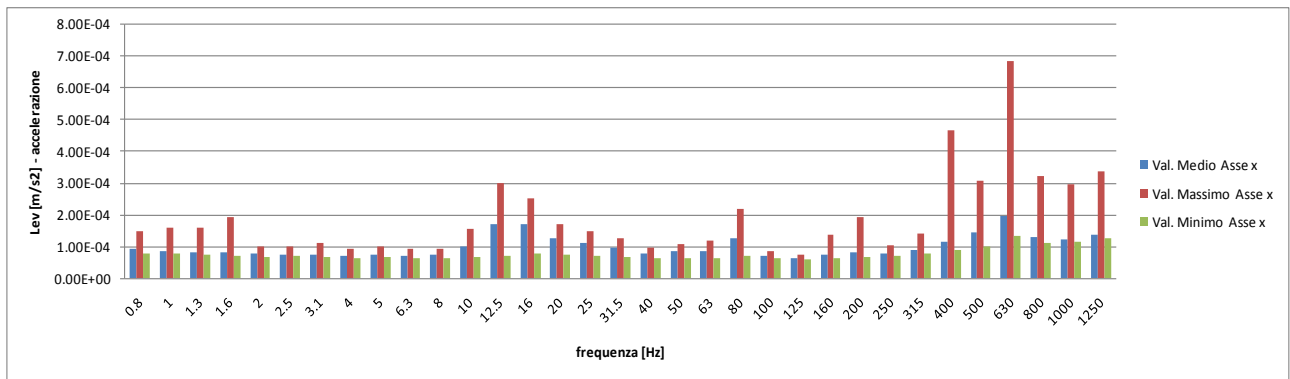
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

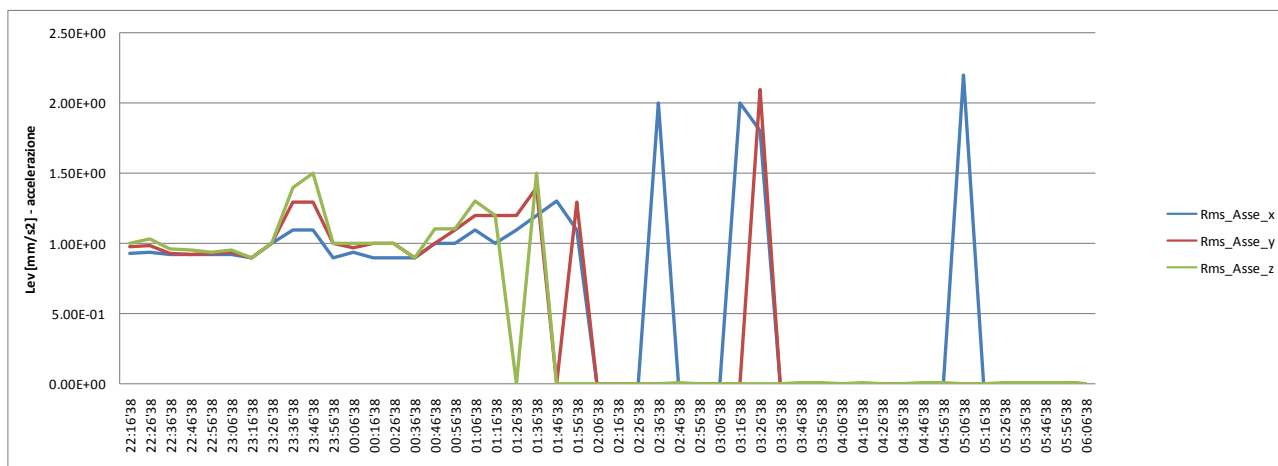


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

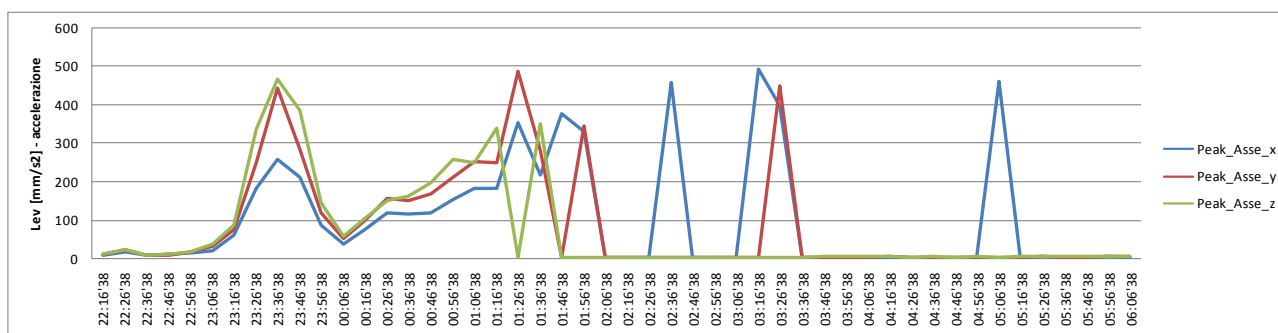


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

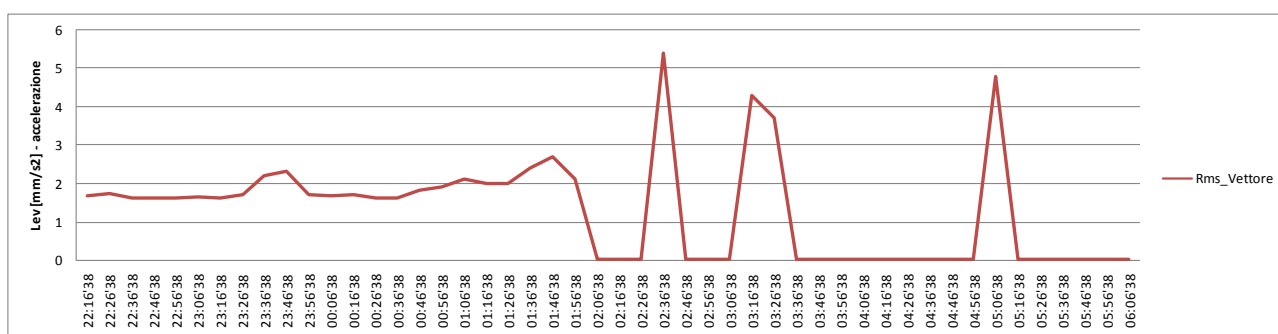
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: giovedì**



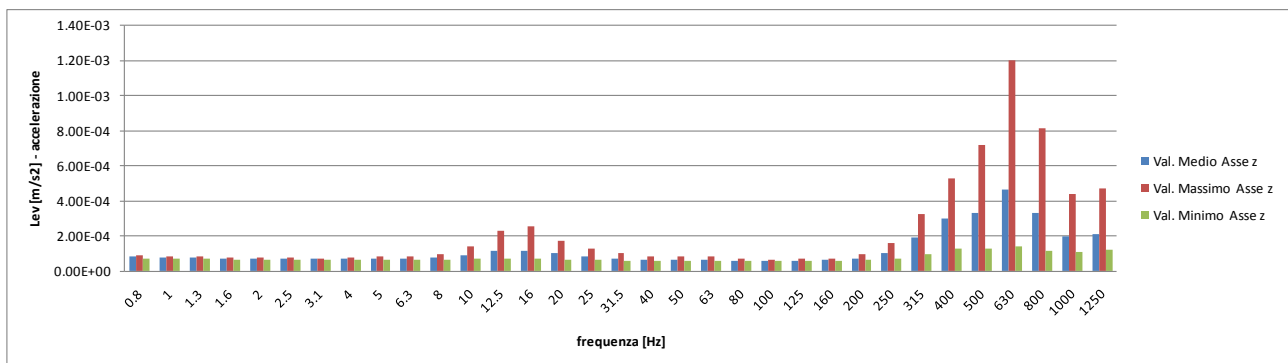
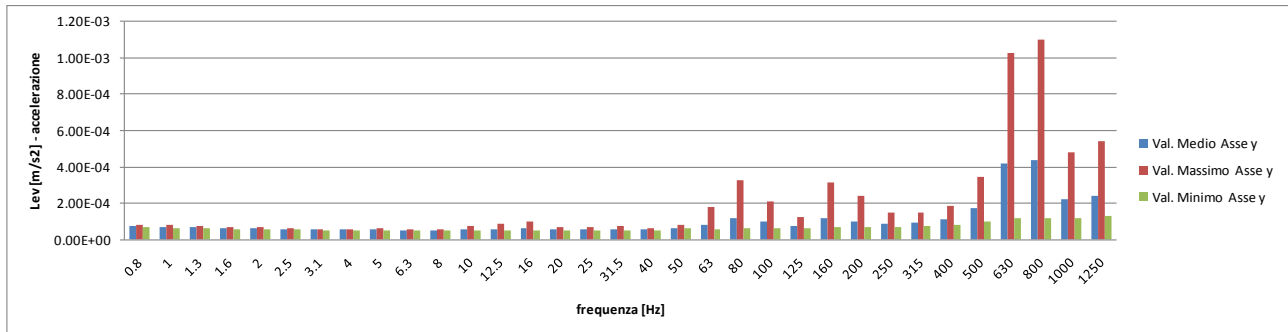
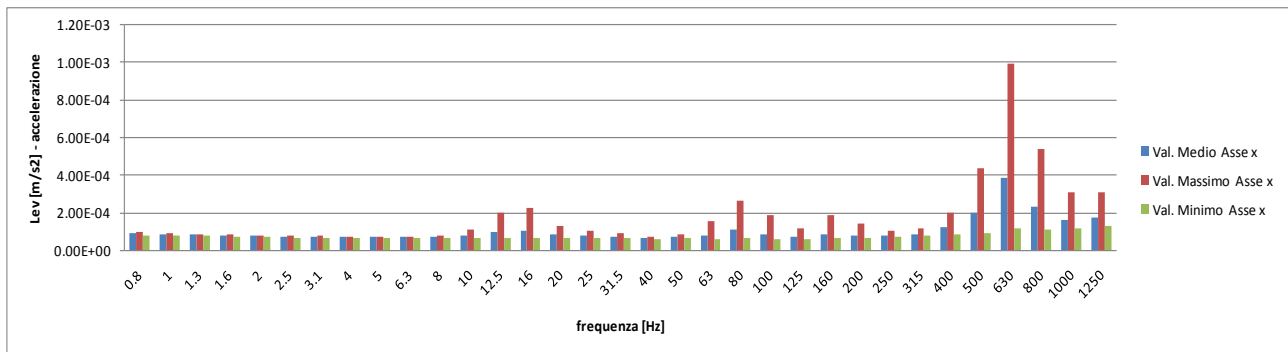
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

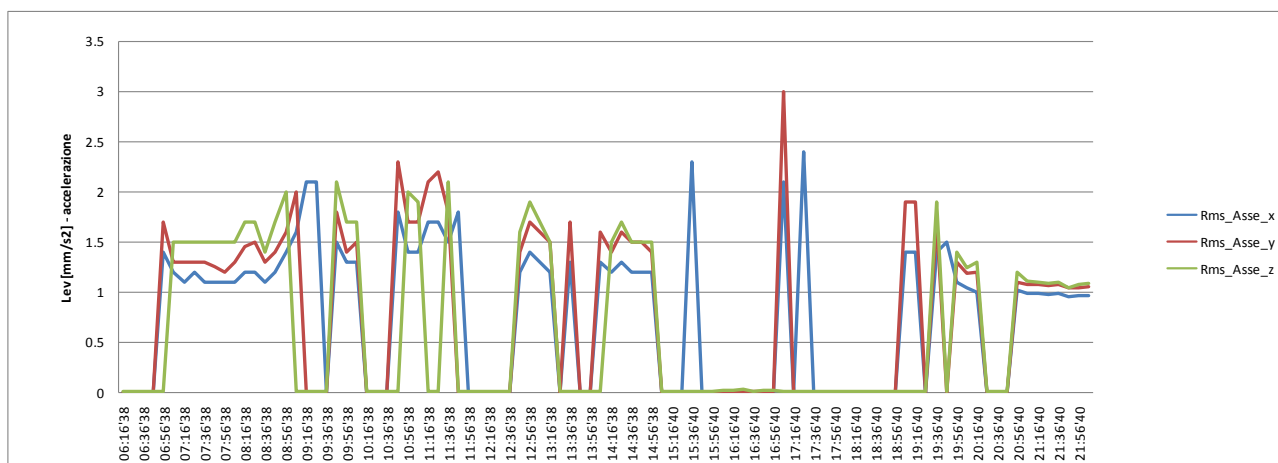


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

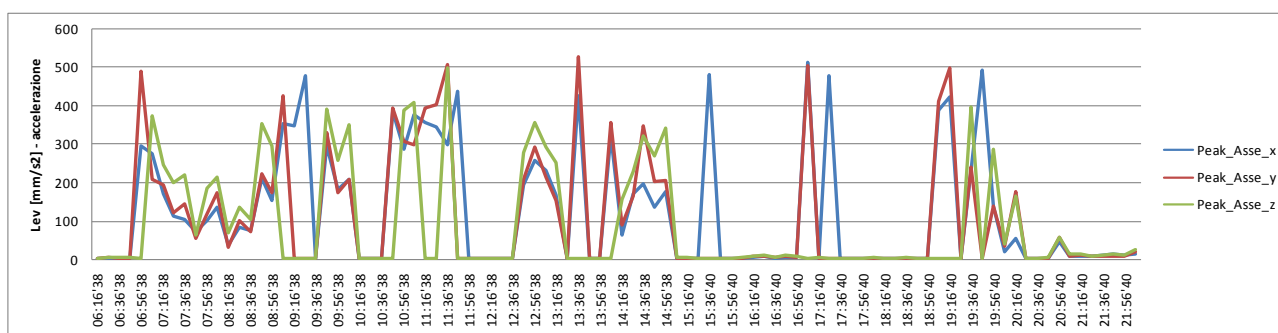


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

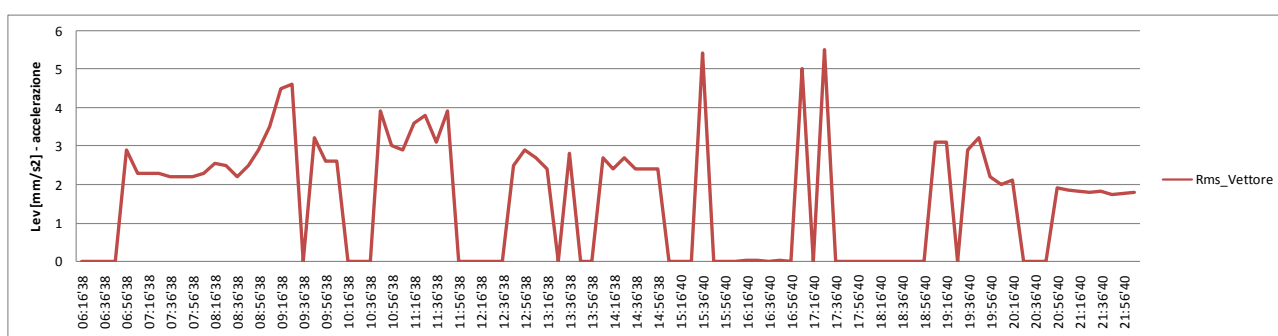
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: venerdì**



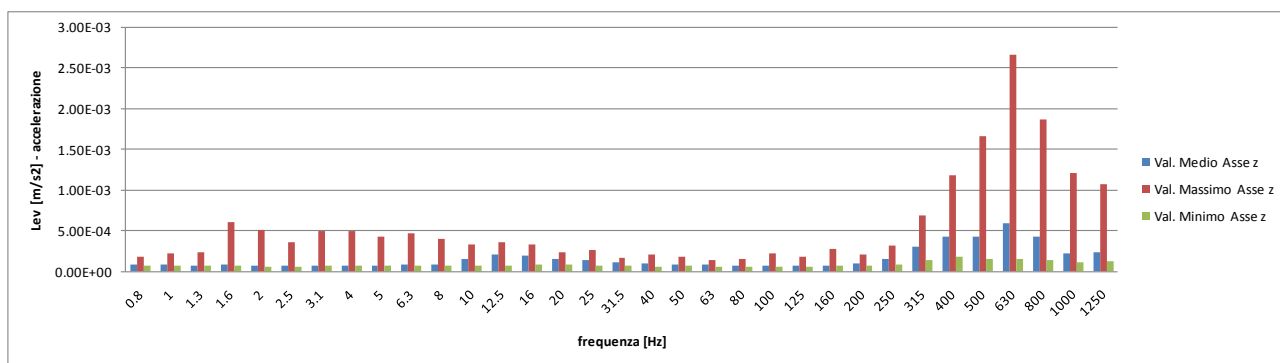
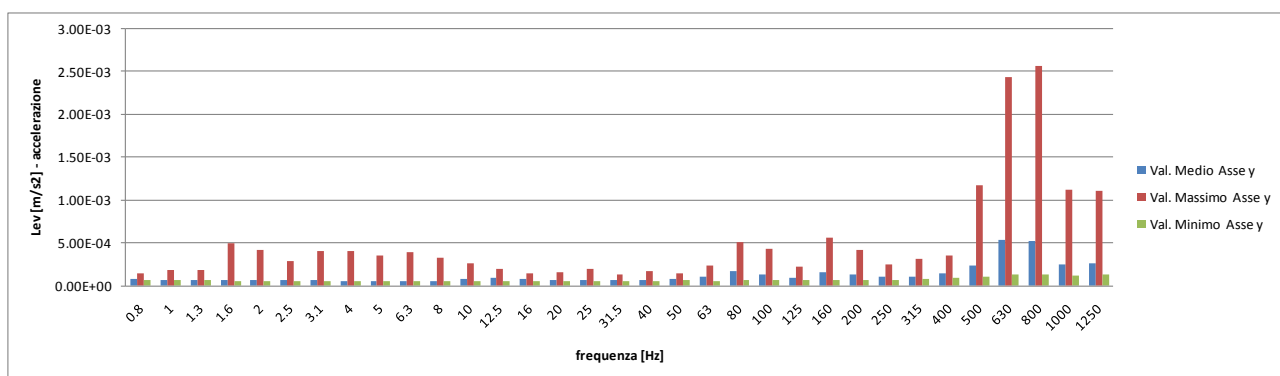
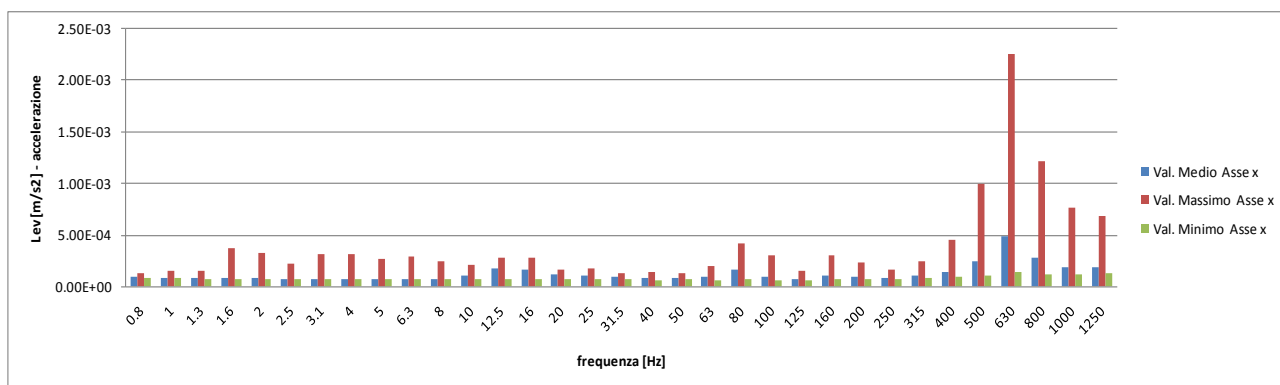
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

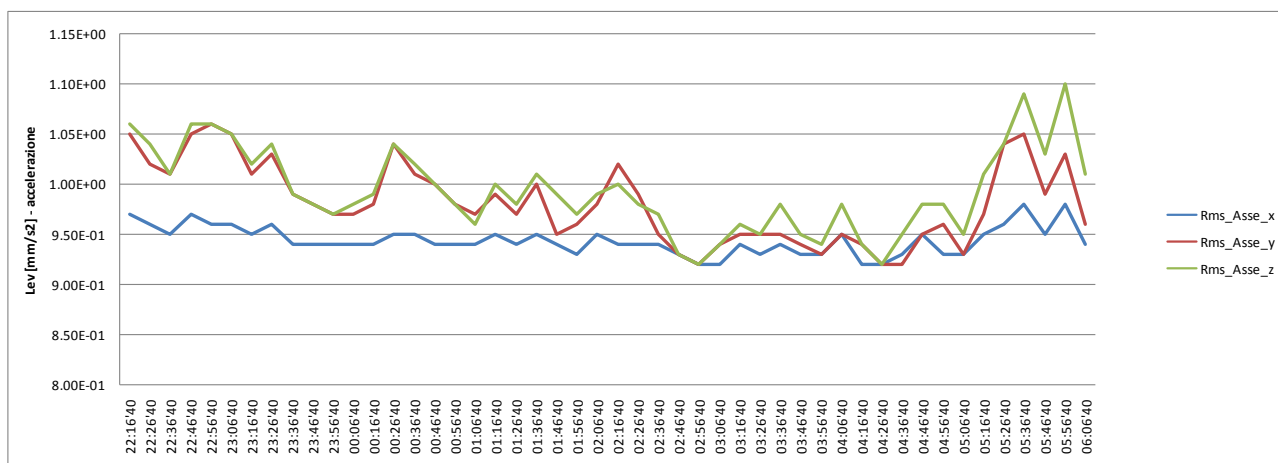


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

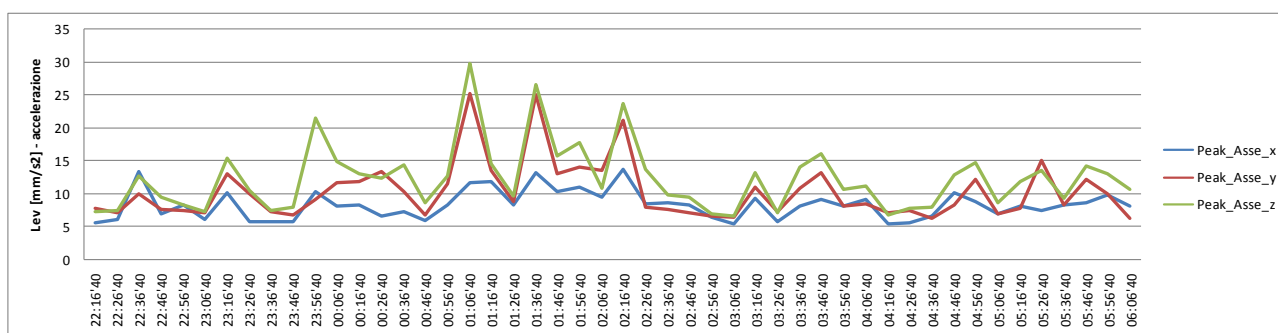


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

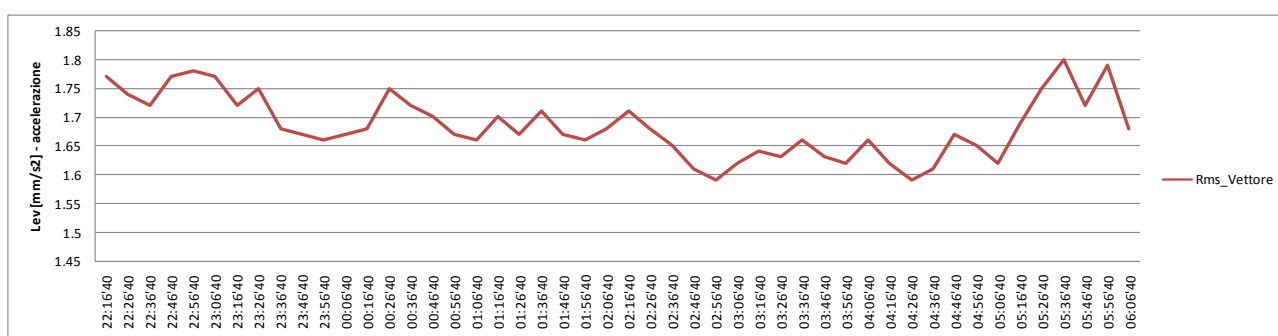
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: venerdì**



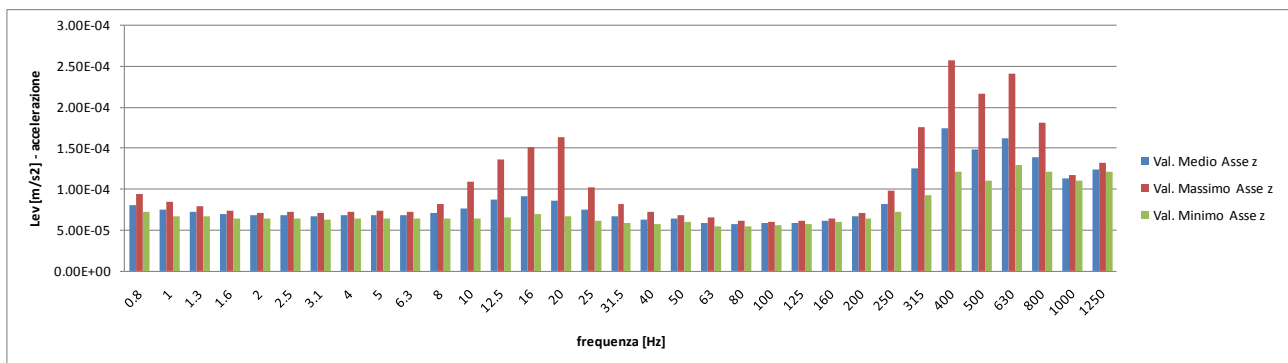
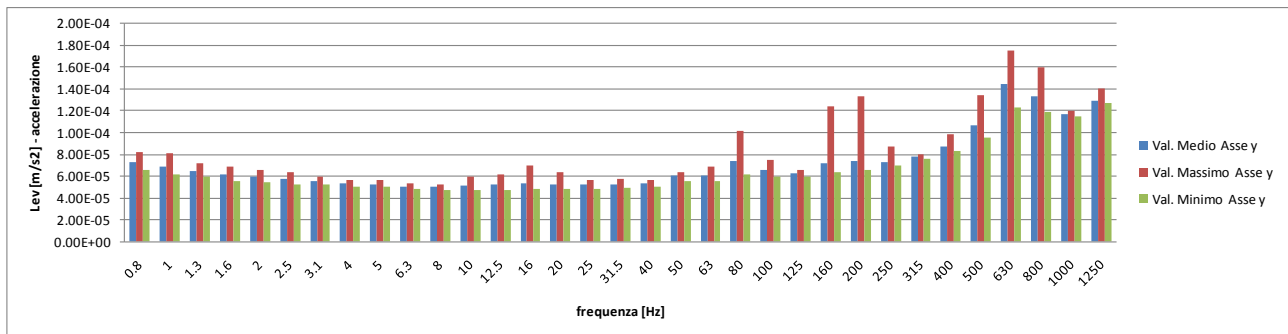
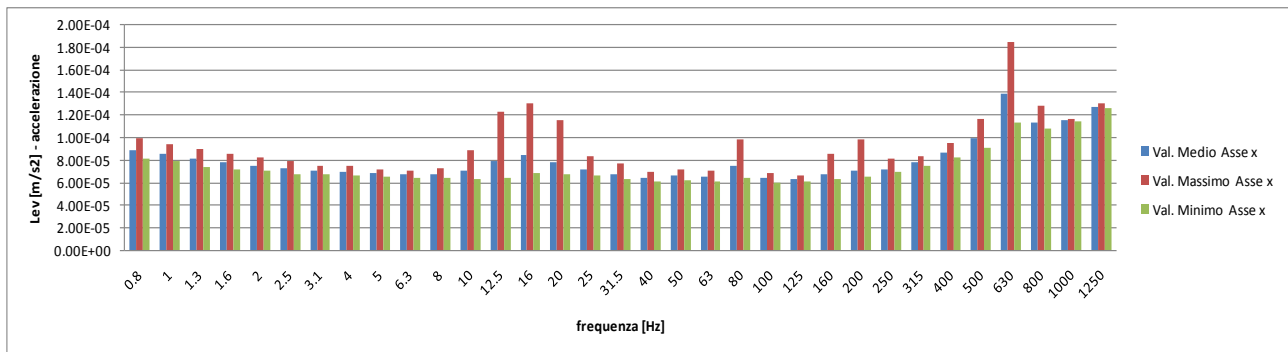
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

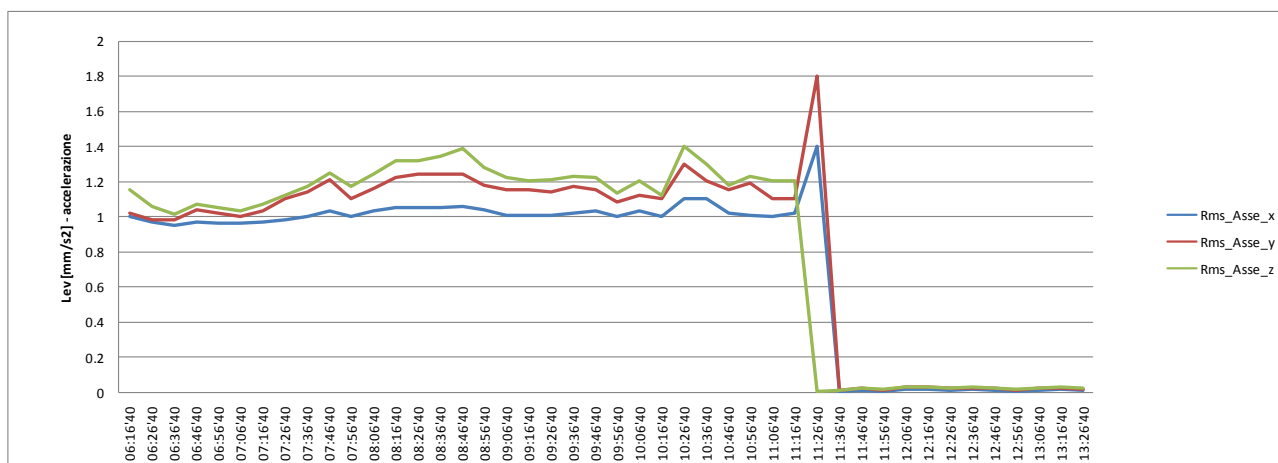


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

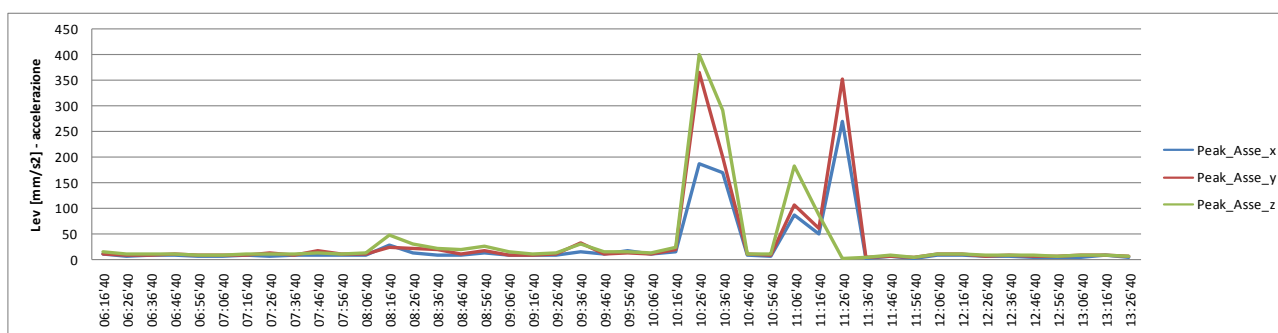


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

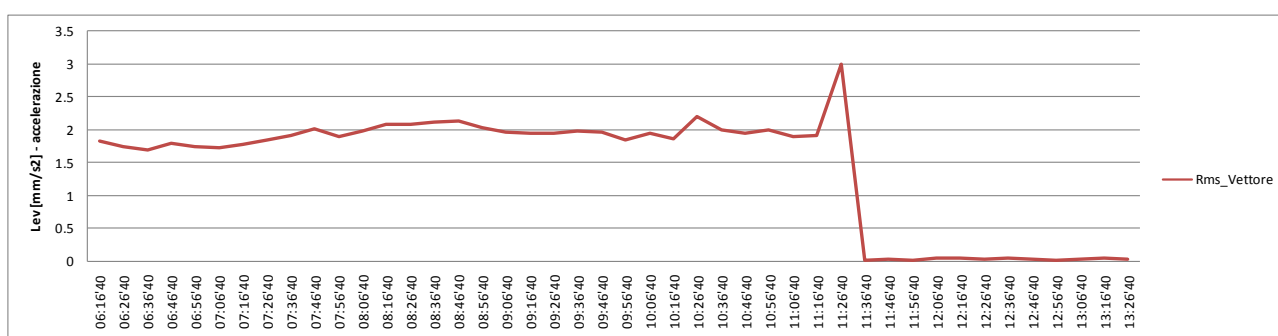
- **Settimo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: sabato**



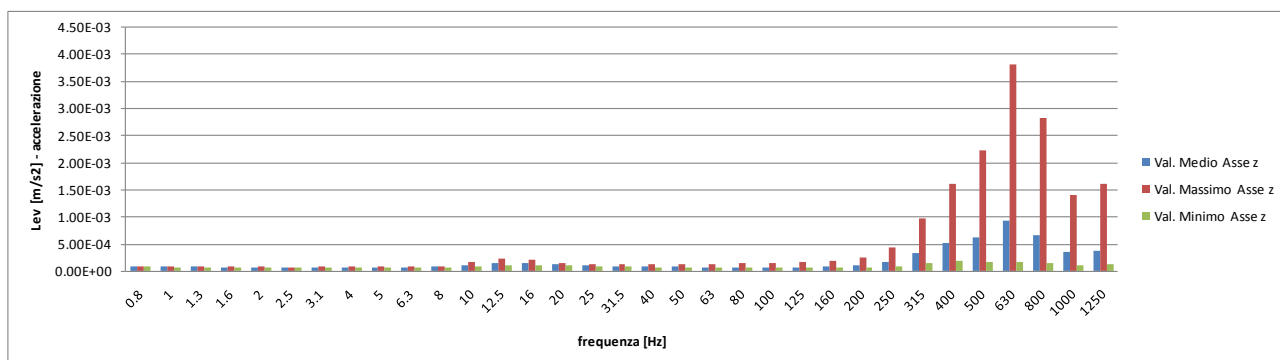
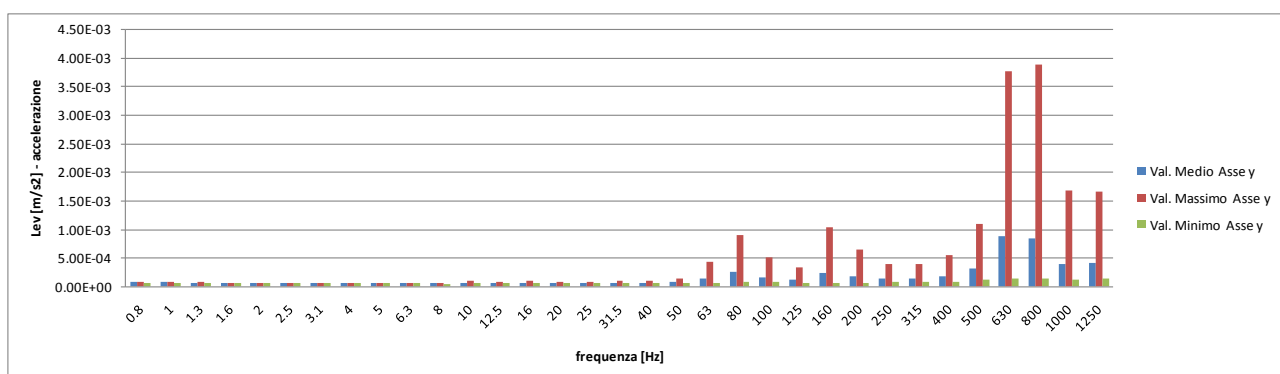
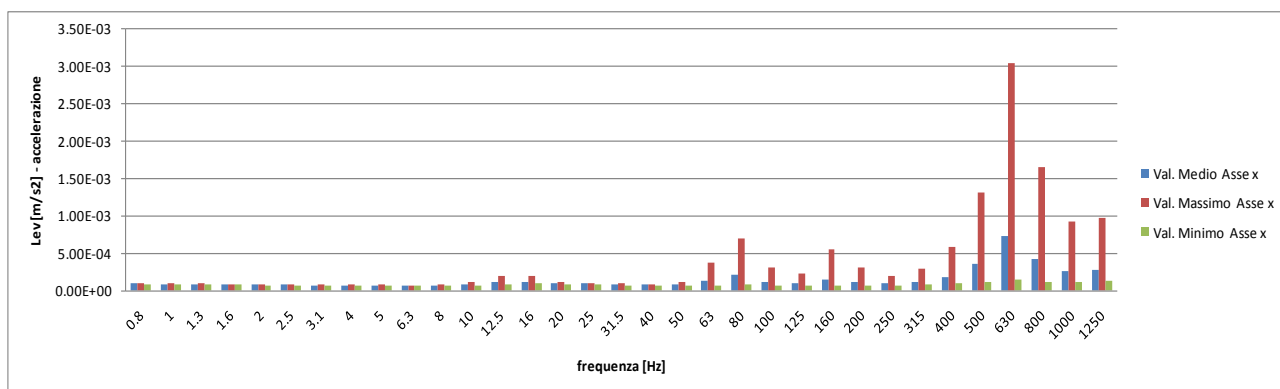
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione



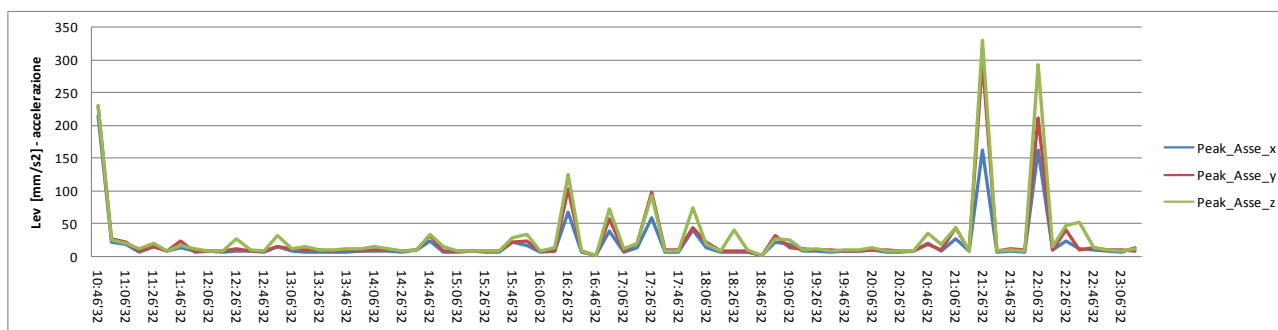
Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

Descrizione Punto di Misura	Identificazione fotografica
Posizionamento prossimità infrastruttura – distanza c.a. 10 m asse stradale.	

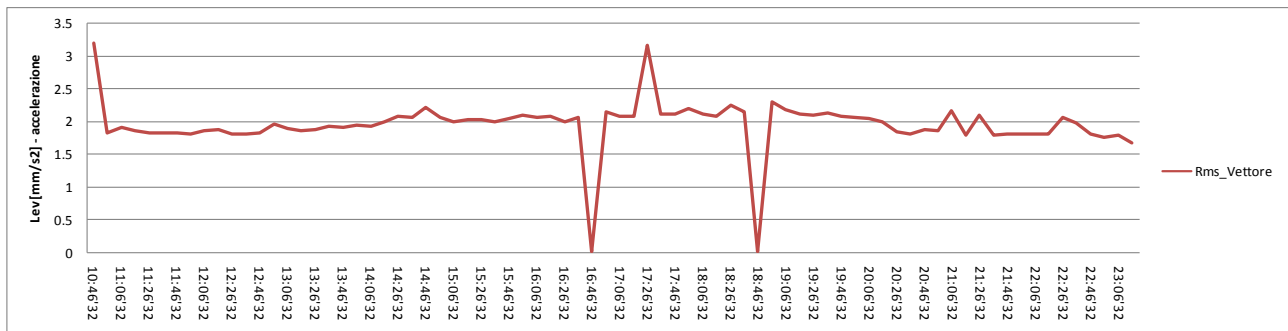
- Primo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: domenica**



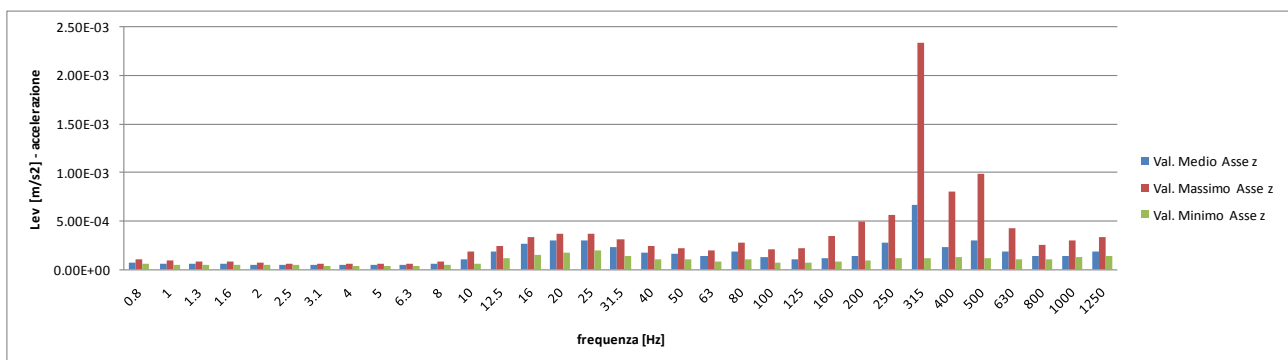
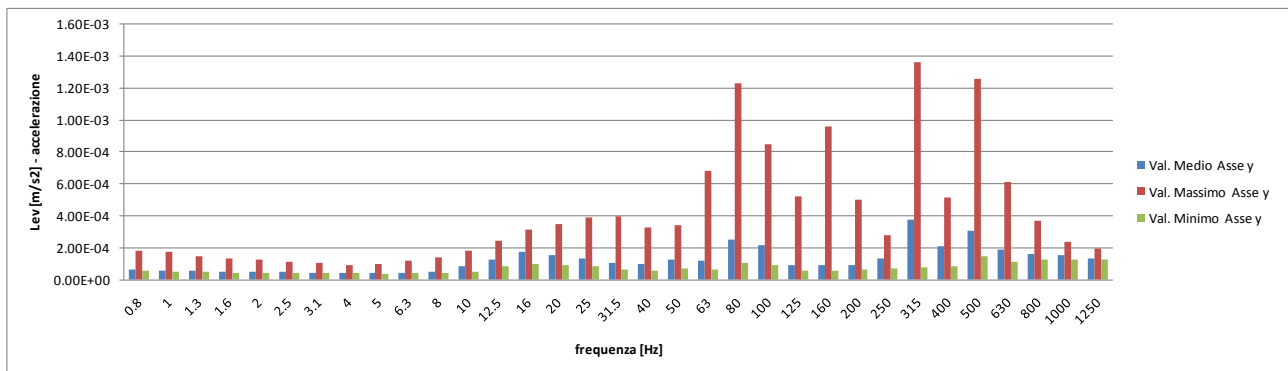
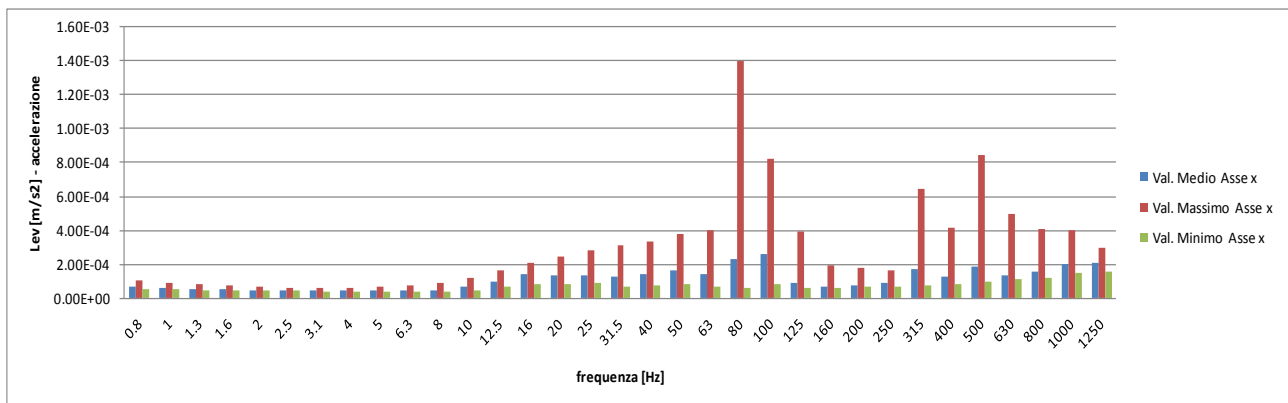
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

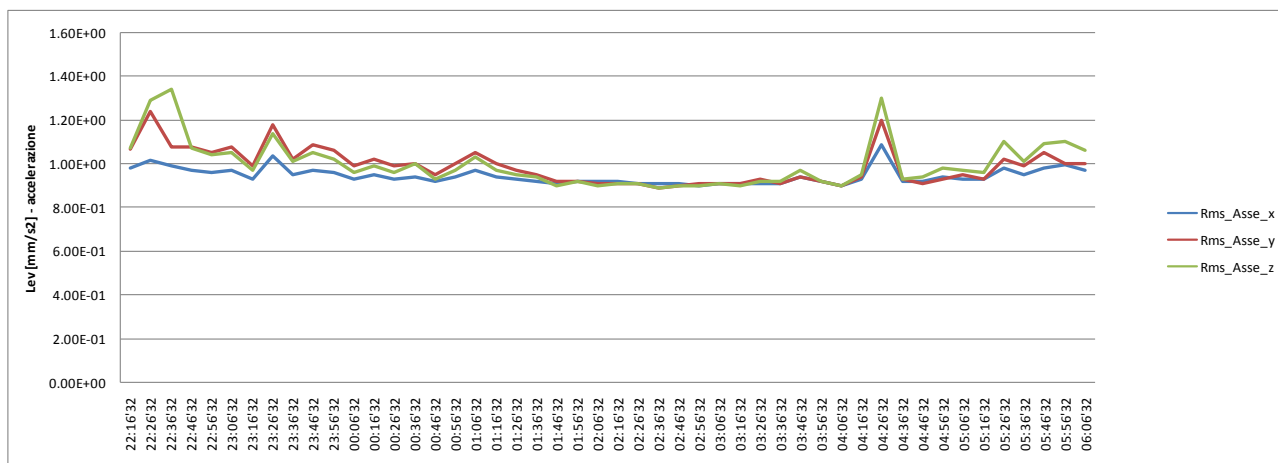


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

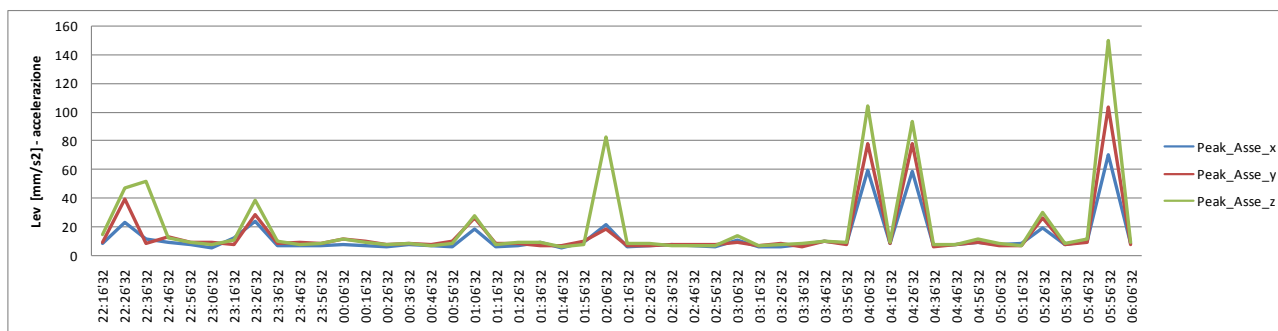


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

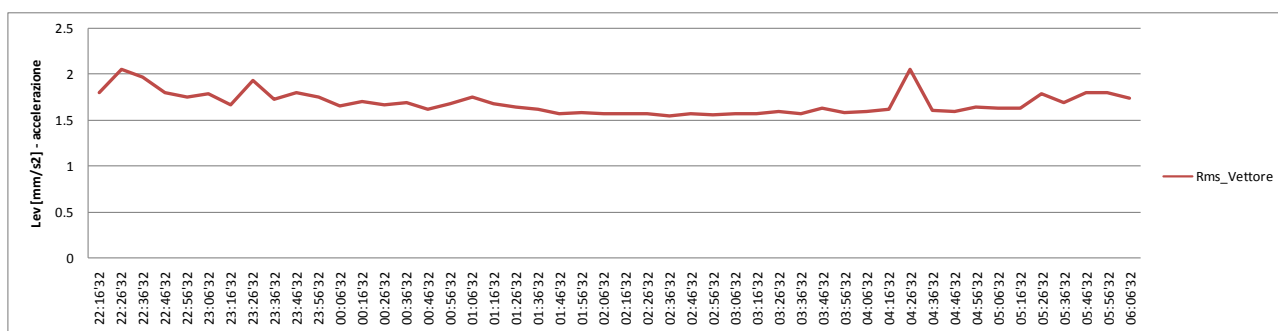
- **Primo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: domenica**



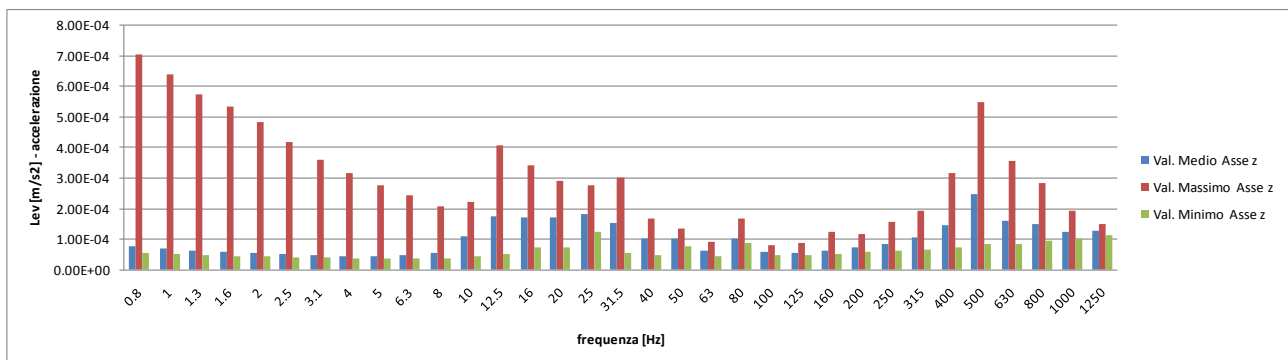
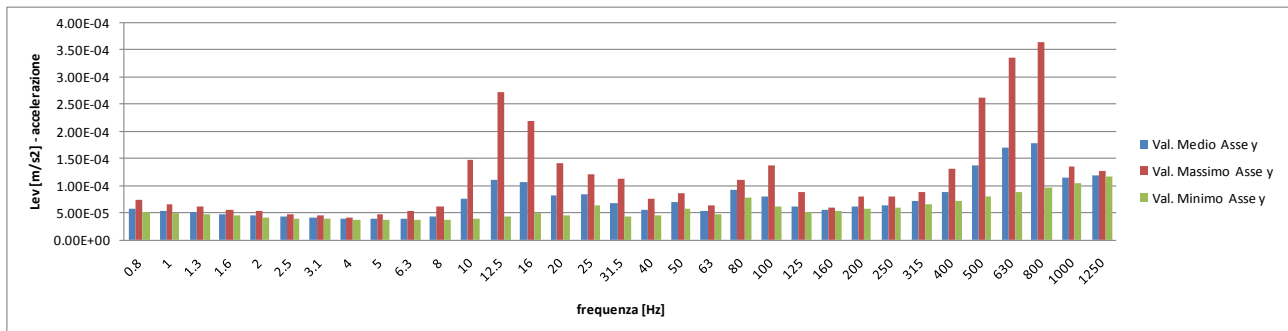
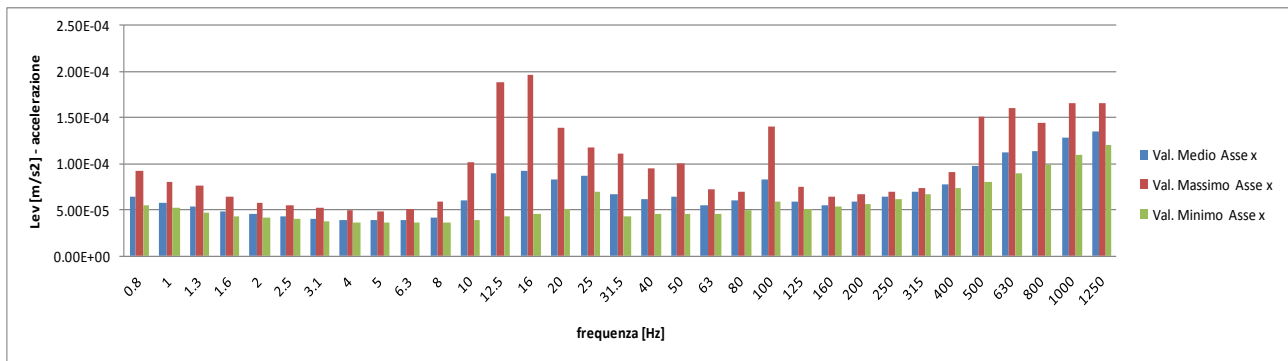
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

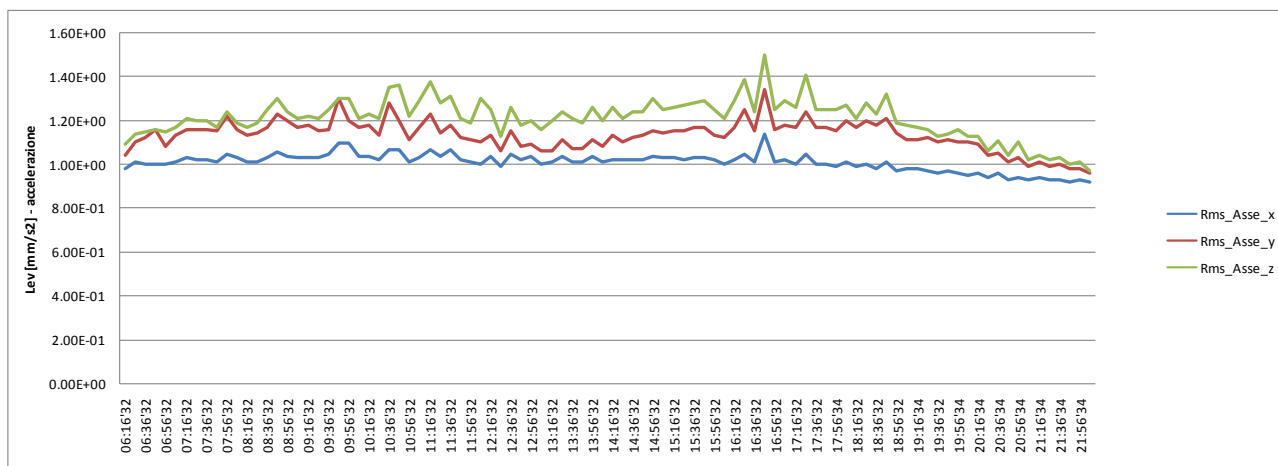


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

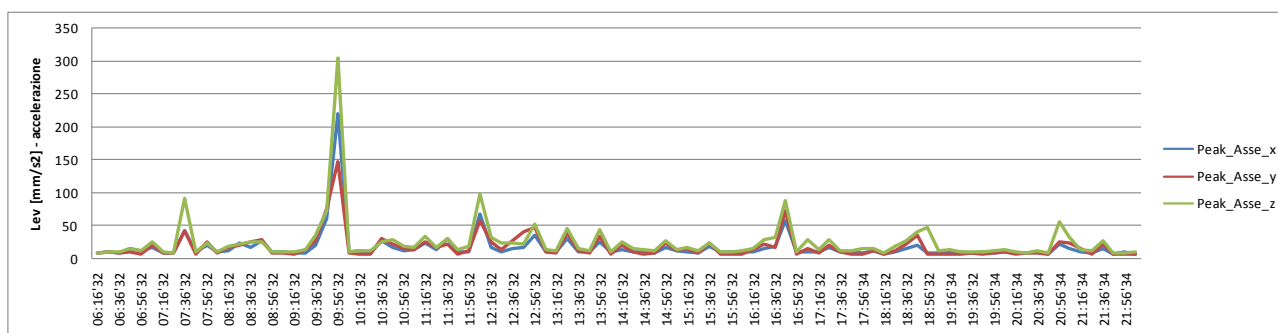


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

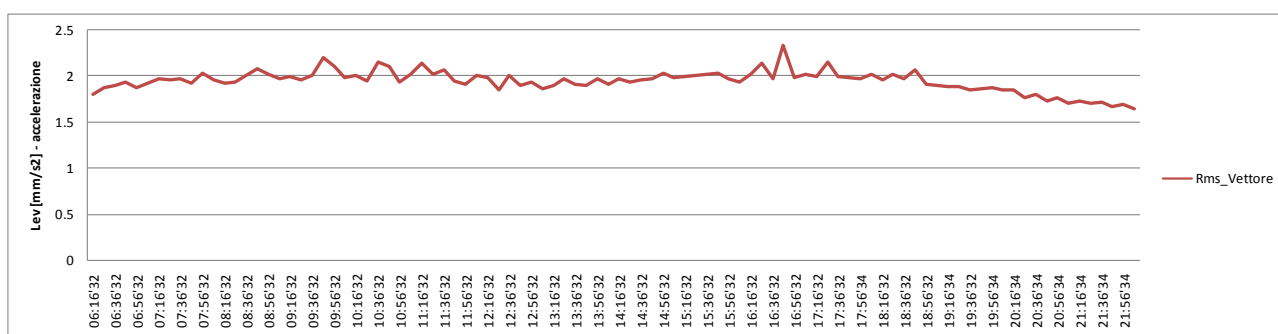
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: lunedì**



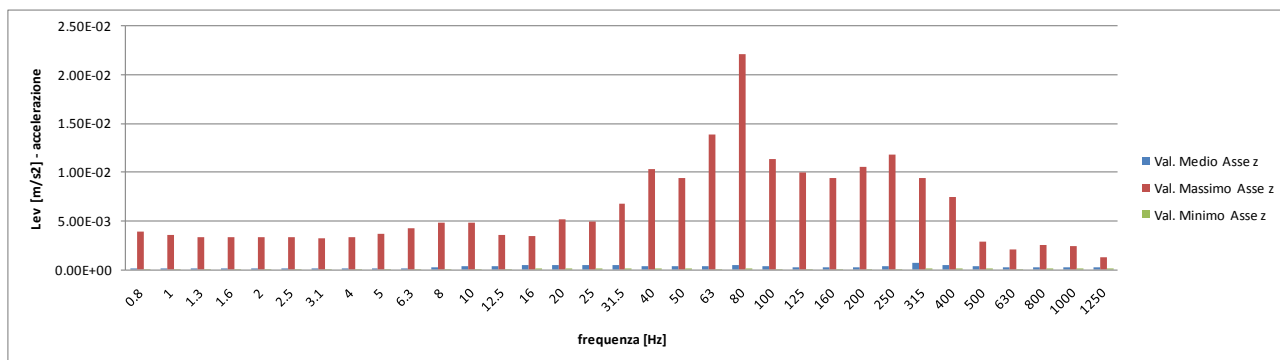
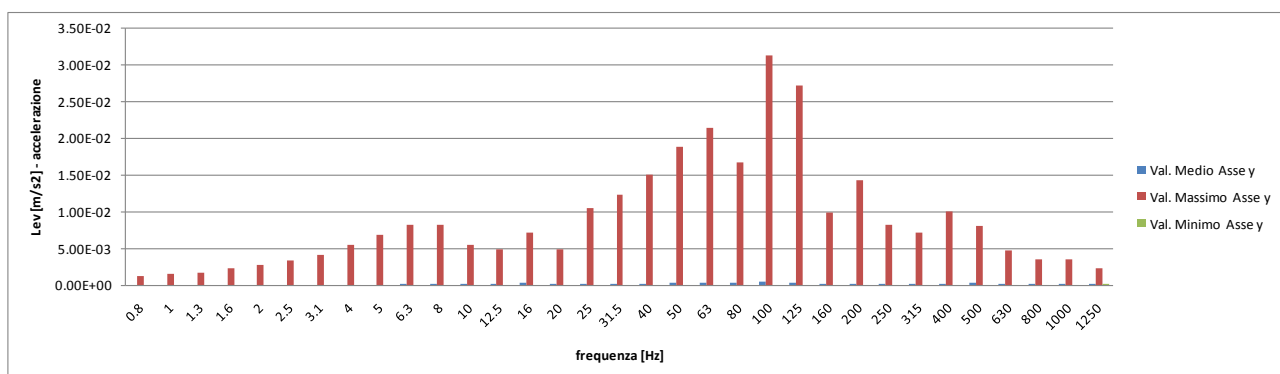
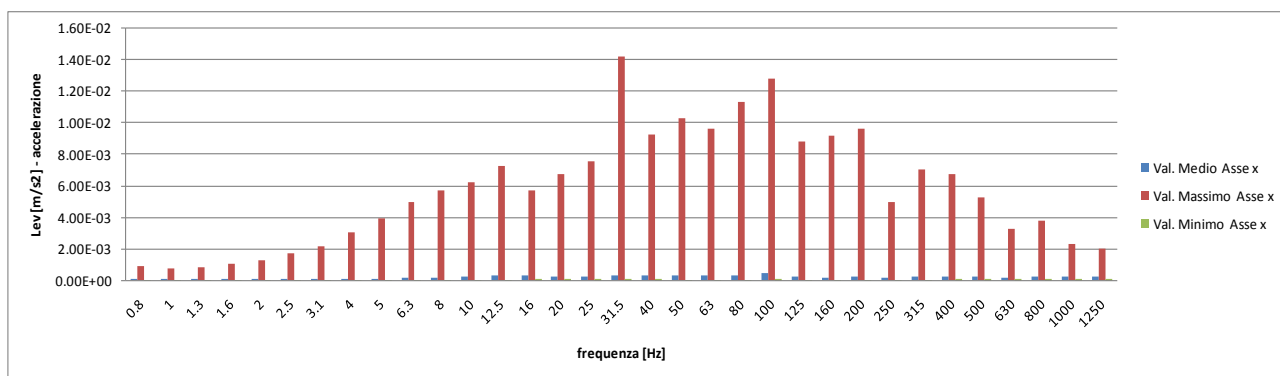
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

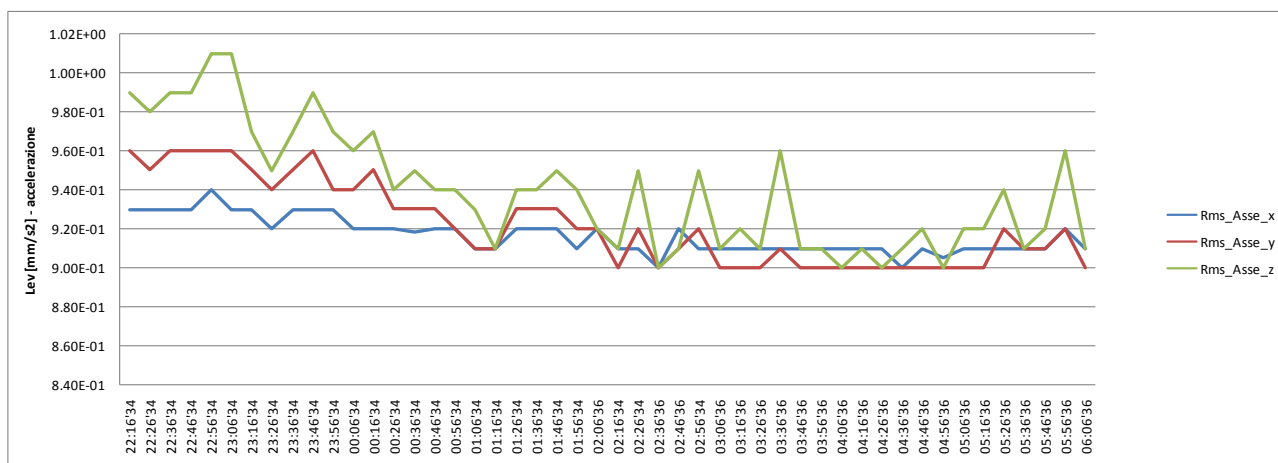


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

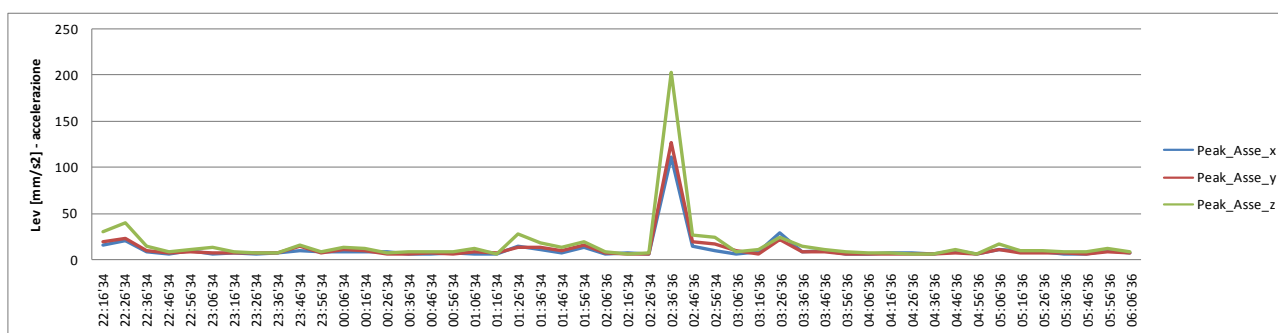


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

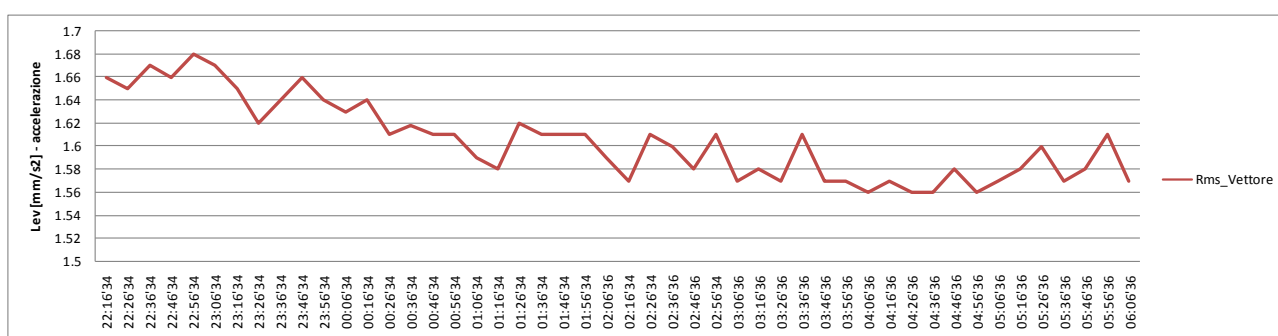
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: lunedì**



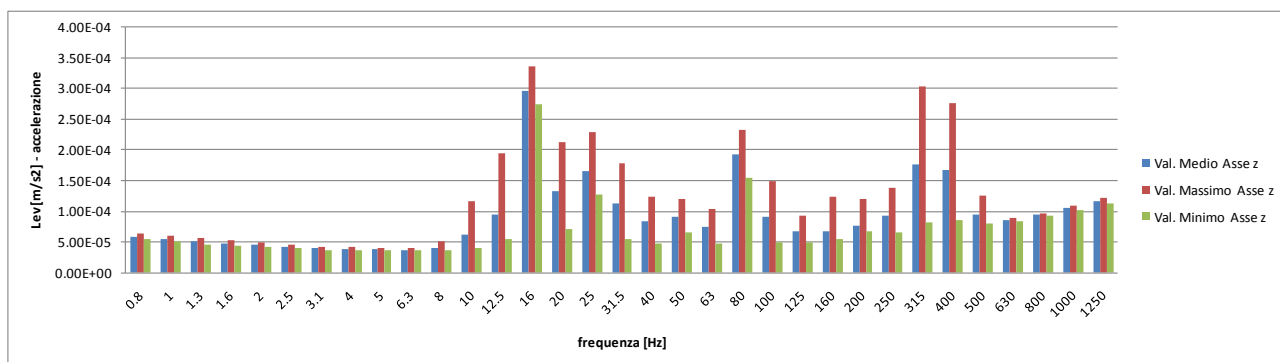
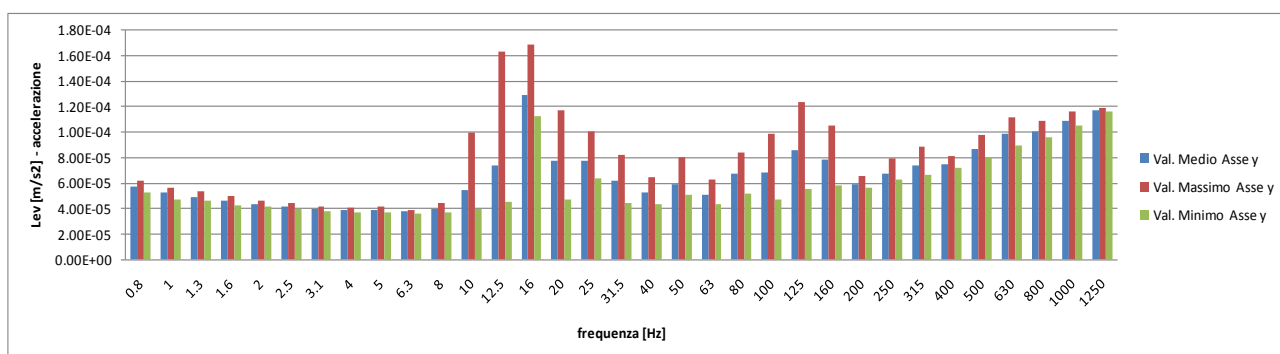
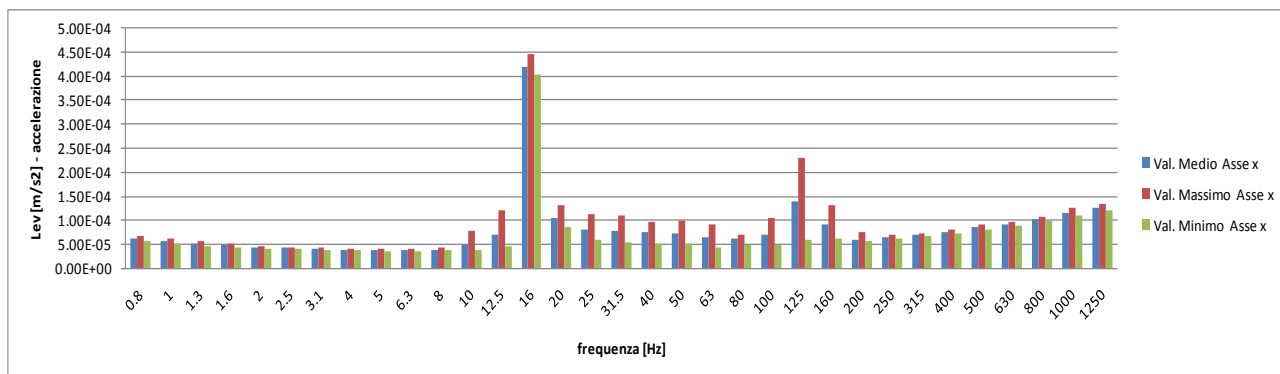
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

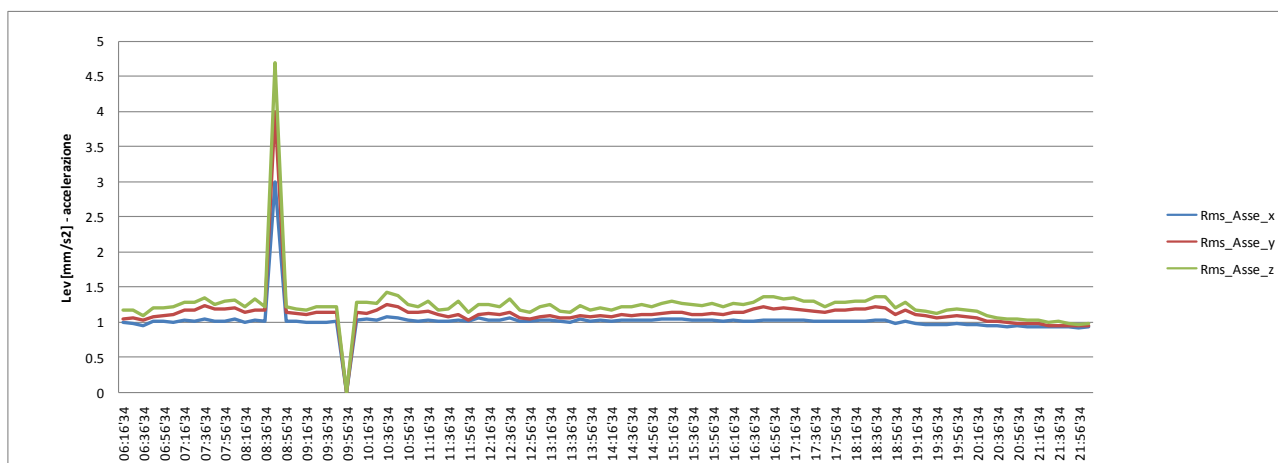


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

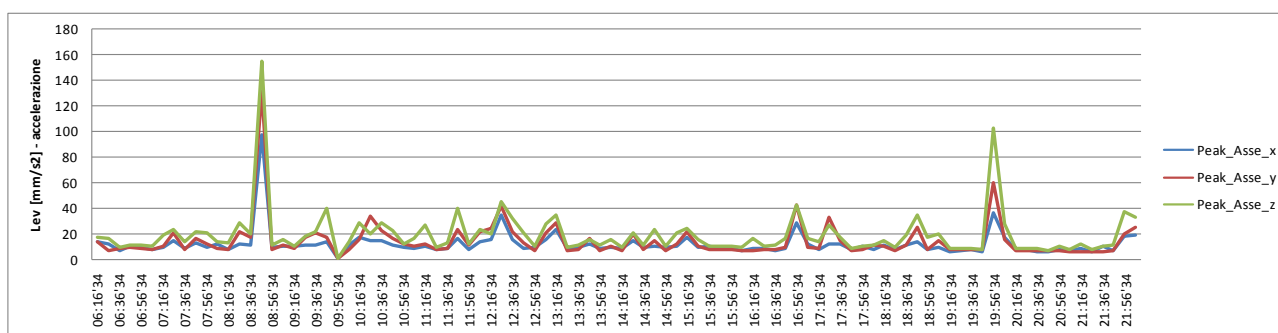


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

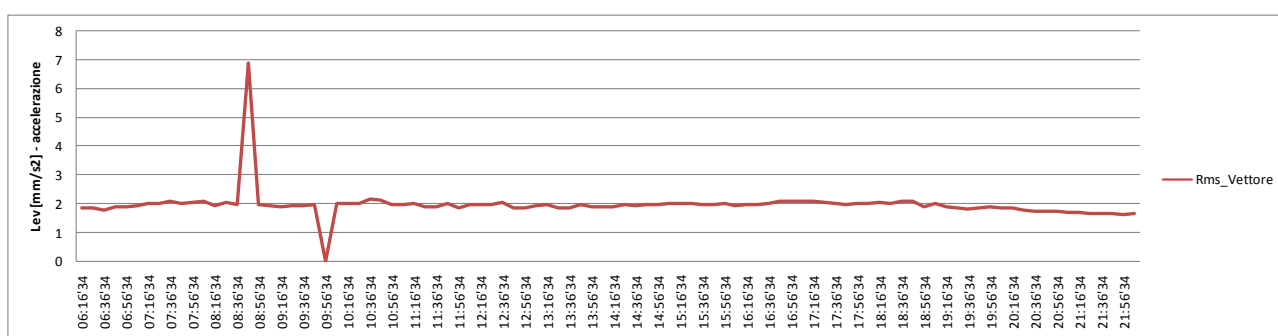
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: martedì**



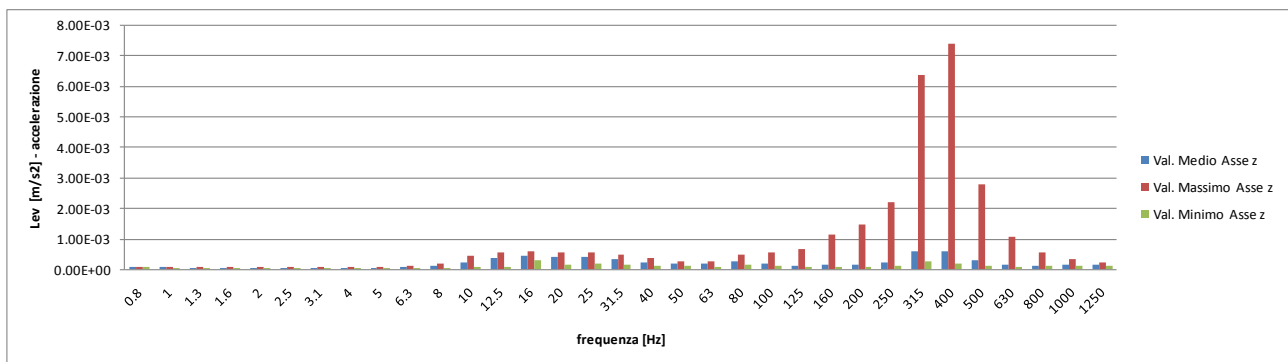
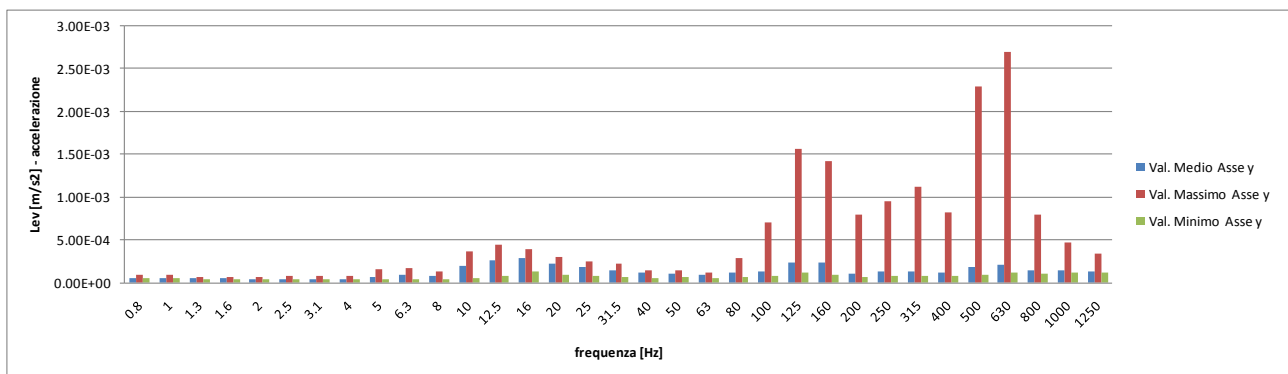
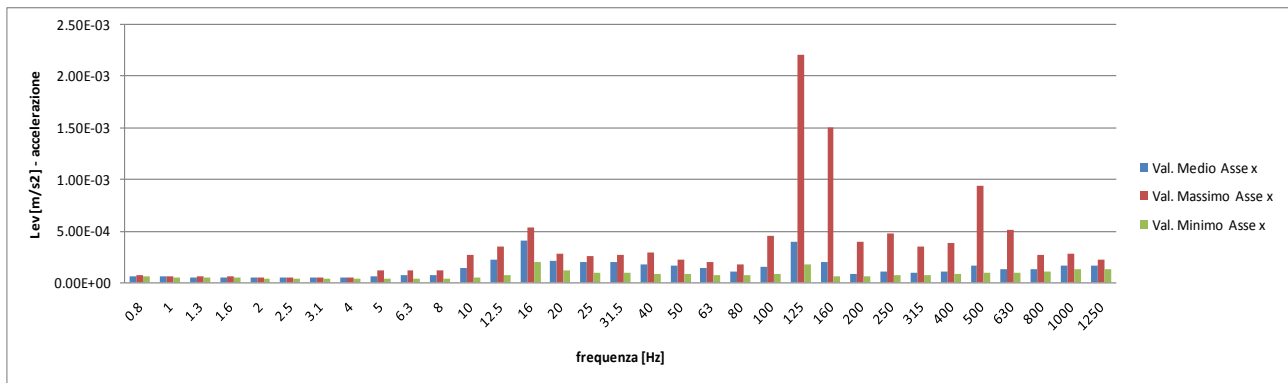
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

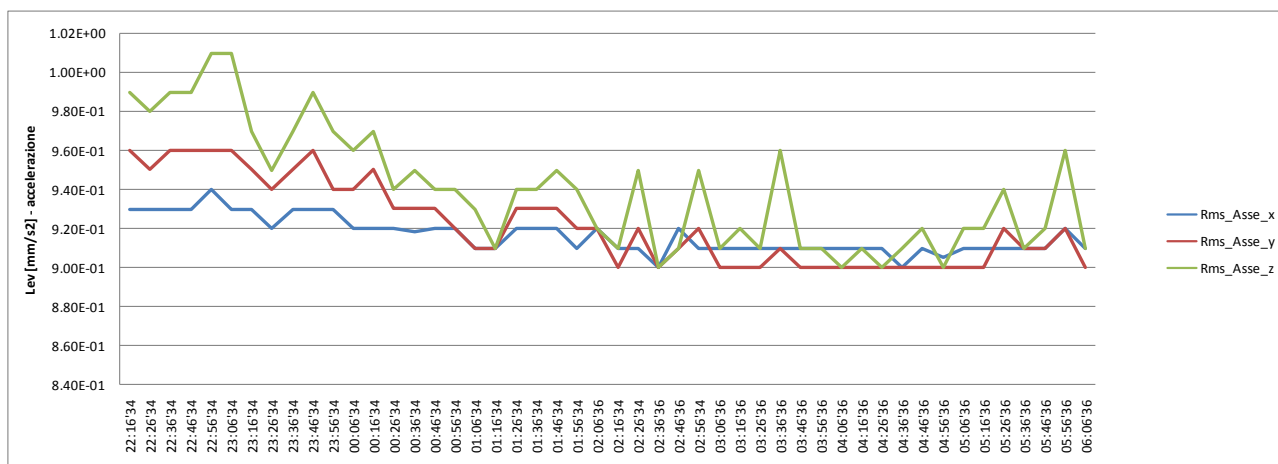


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

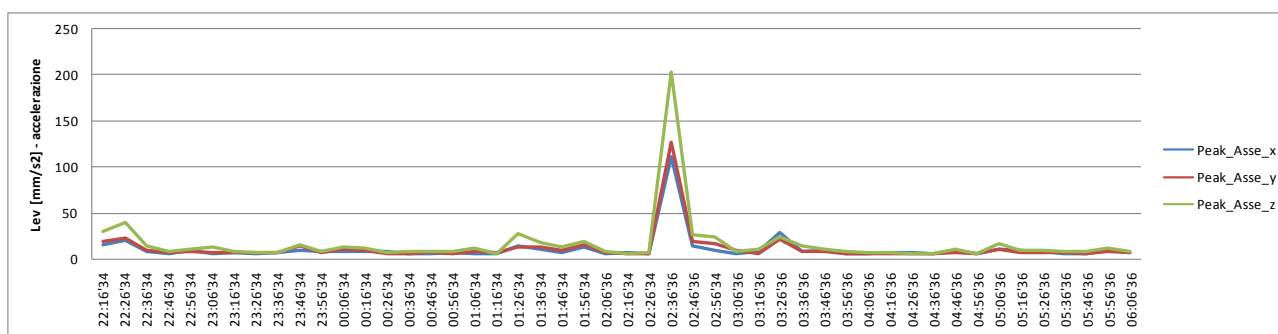


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

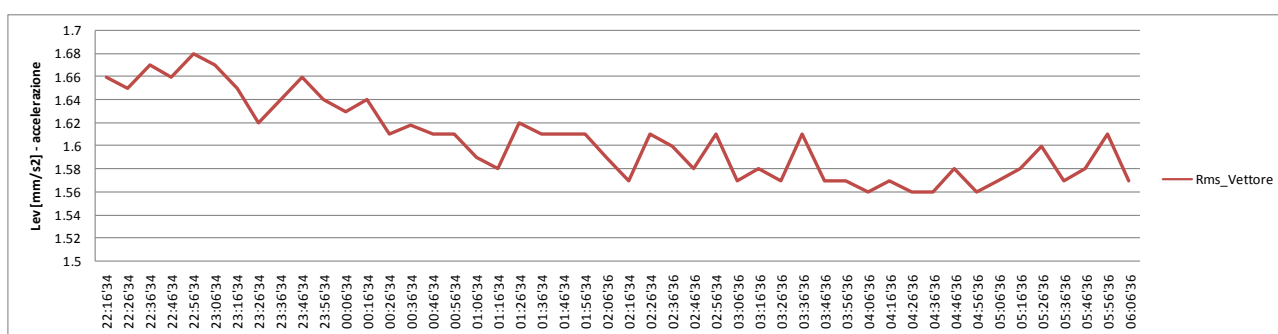
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: martedì**



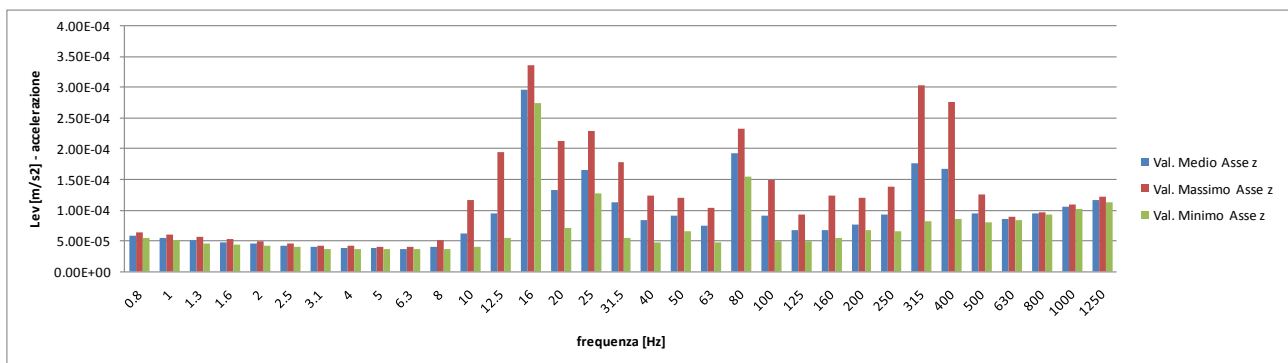
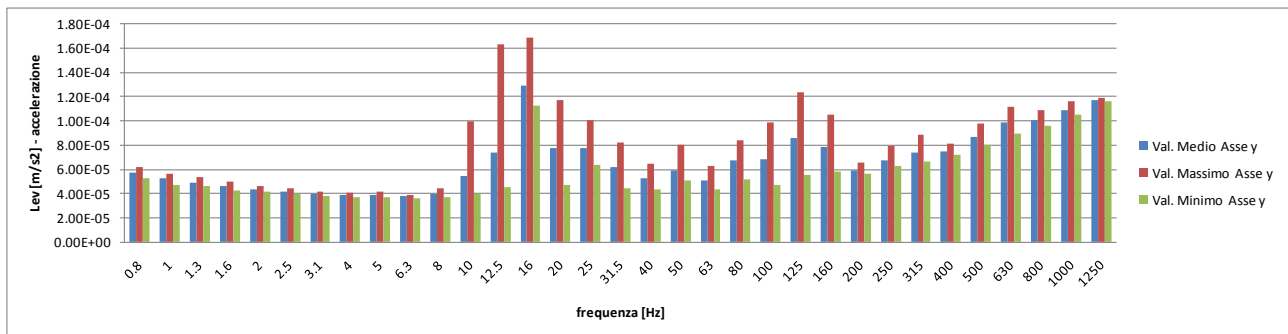
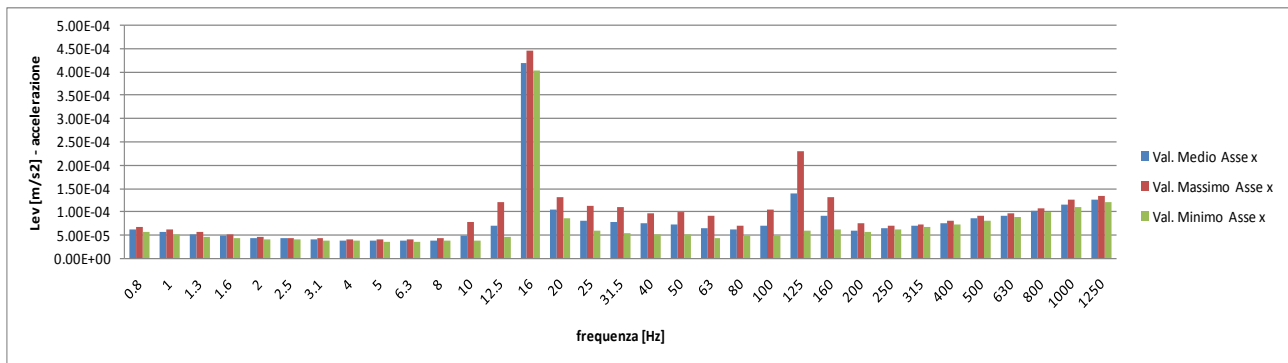
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

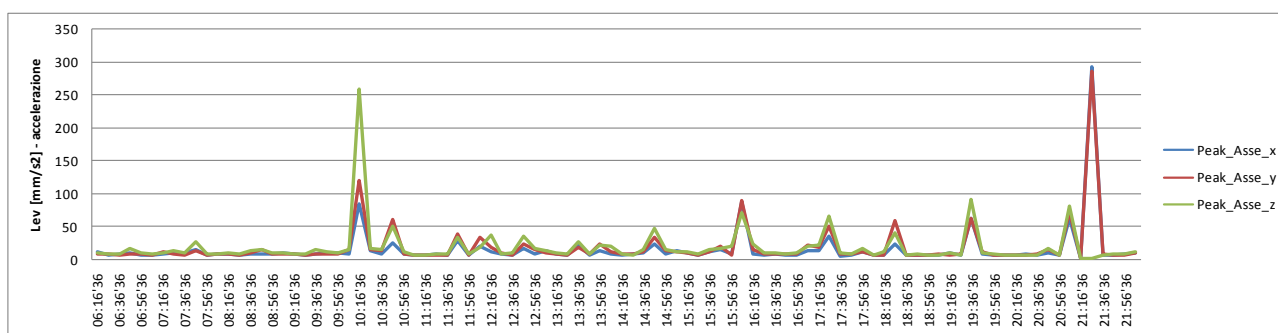


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

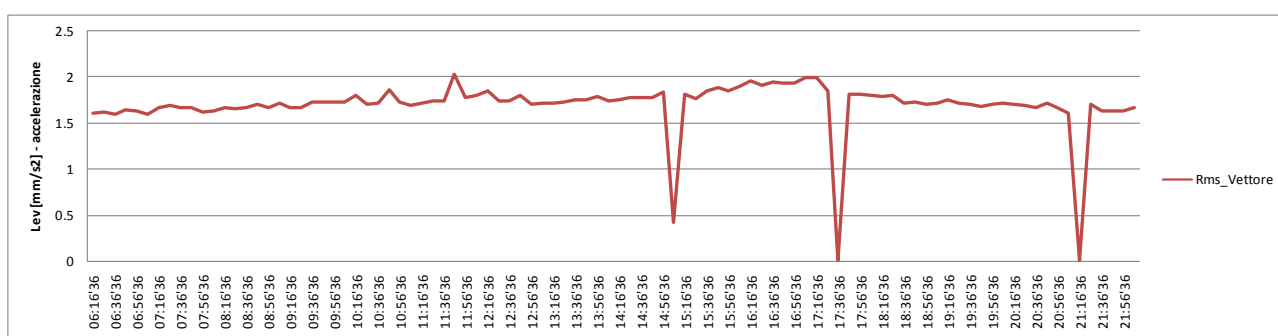
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: mercoledì**



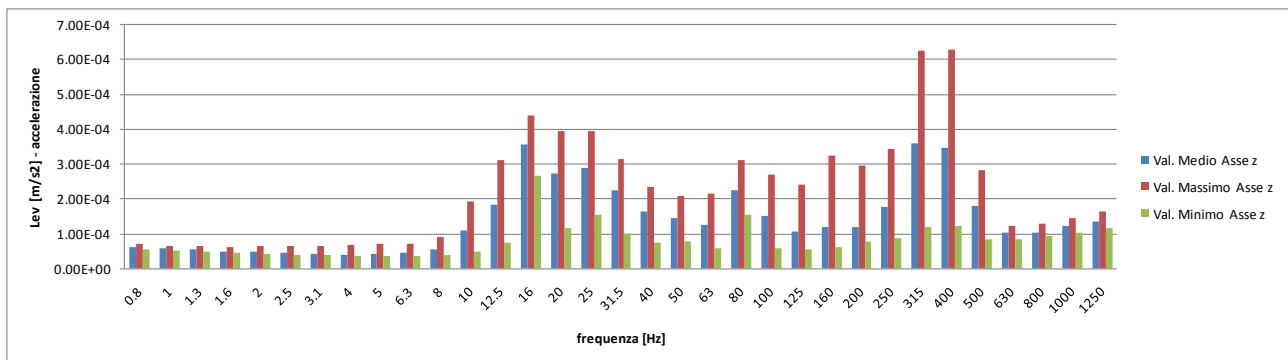
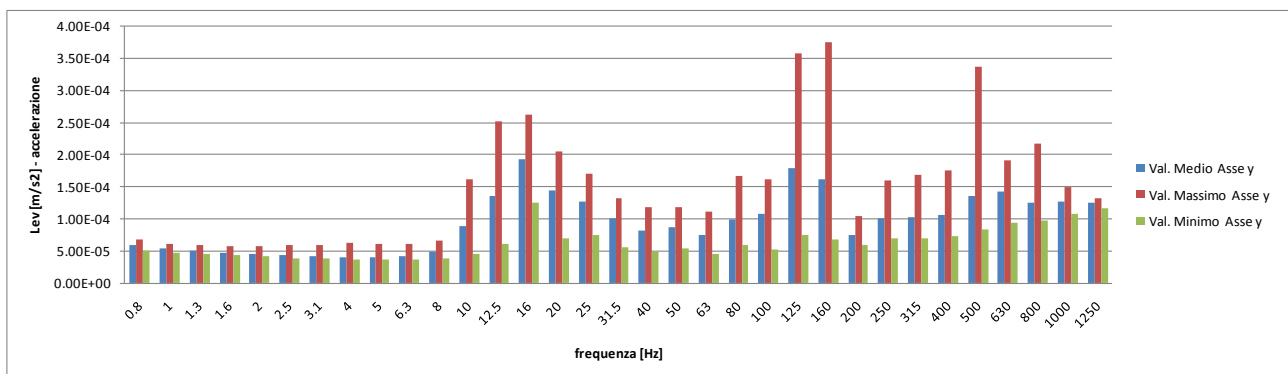
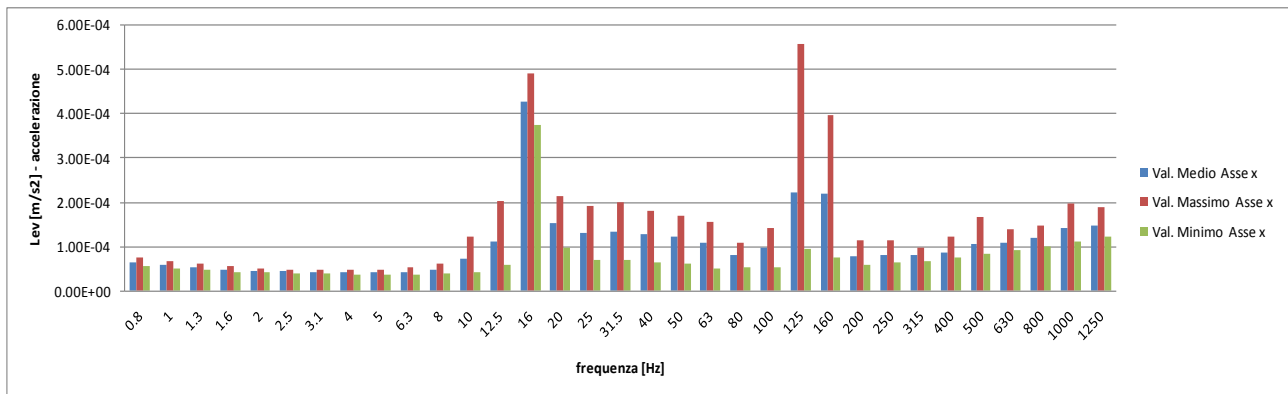
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

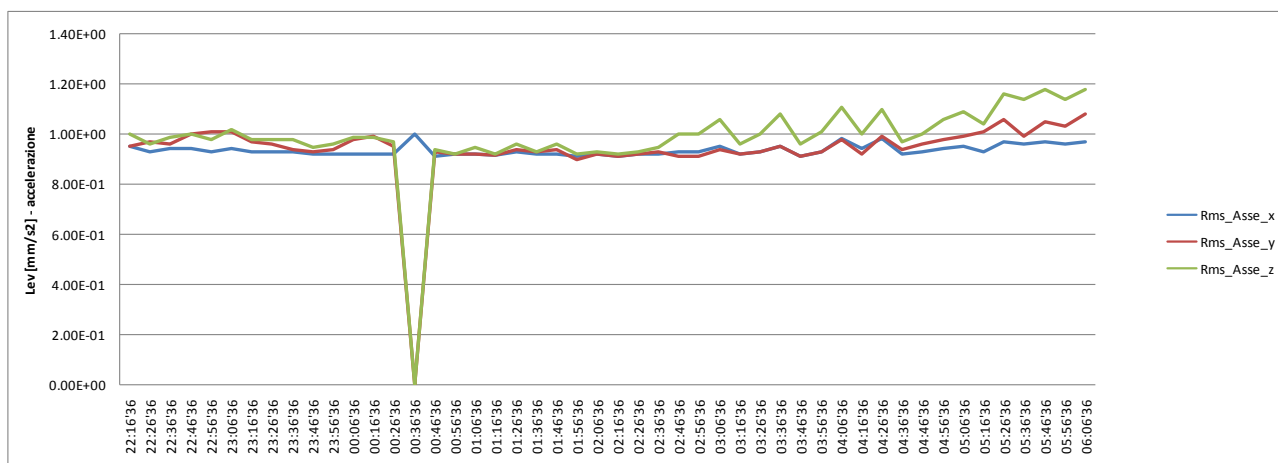


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

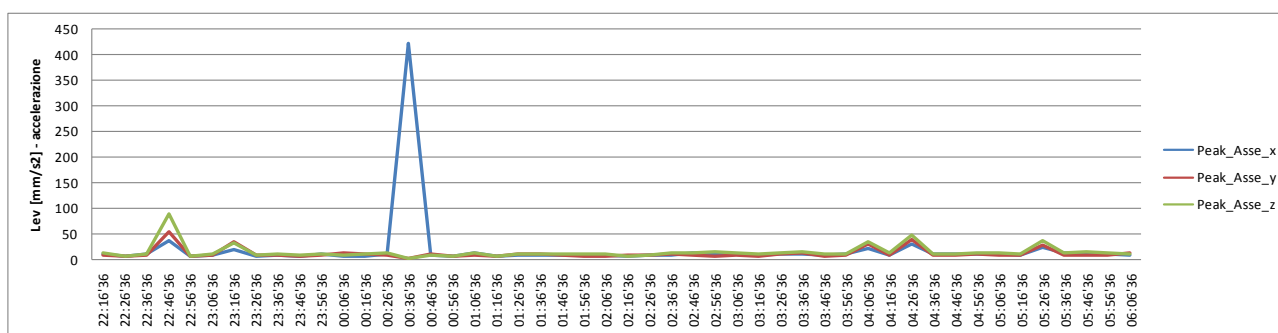


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

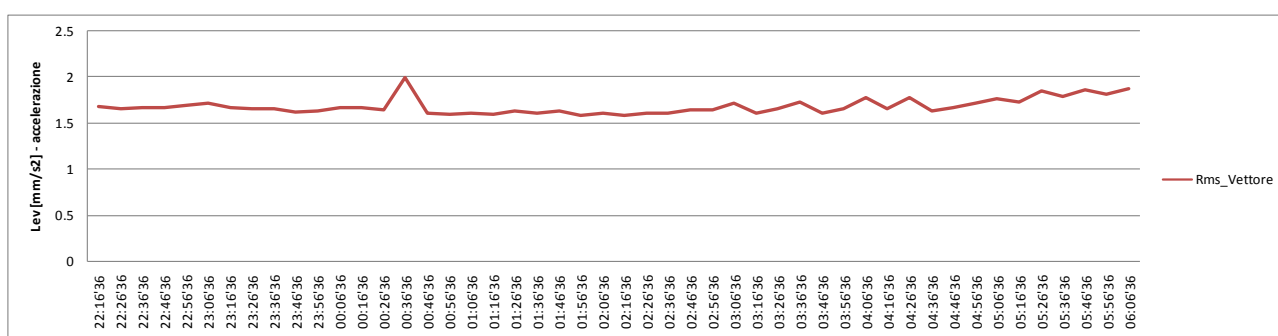
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: mercoledì**



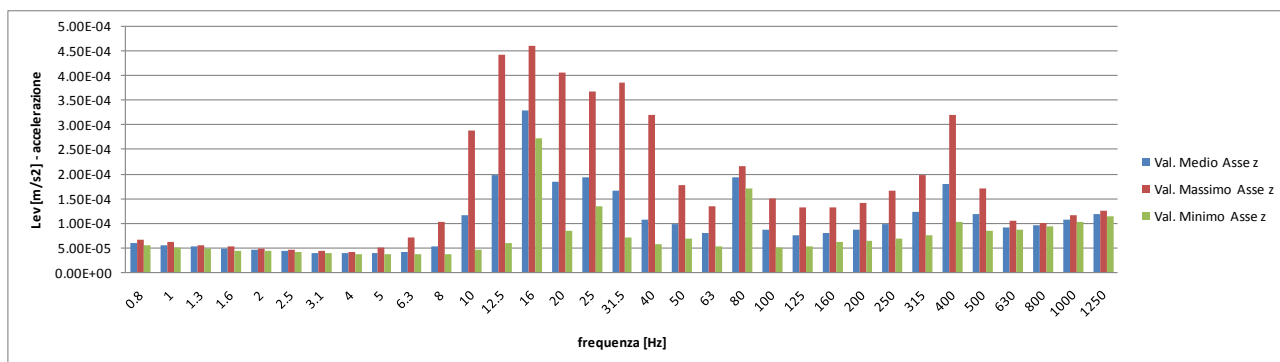
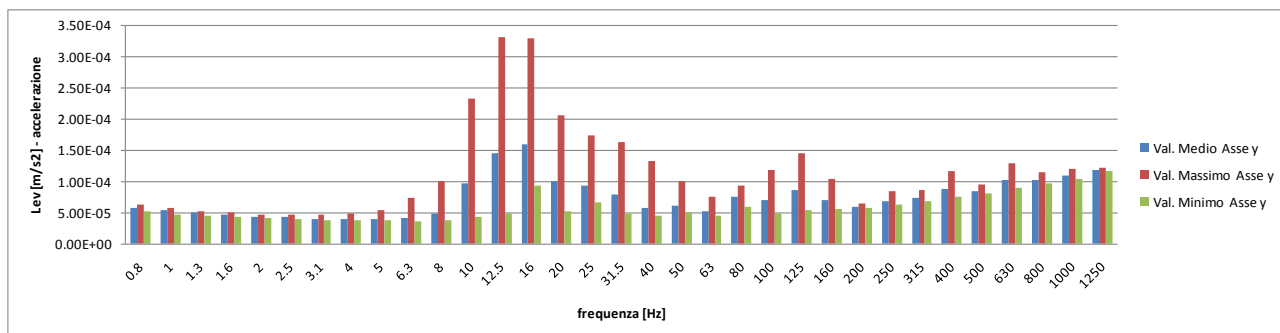
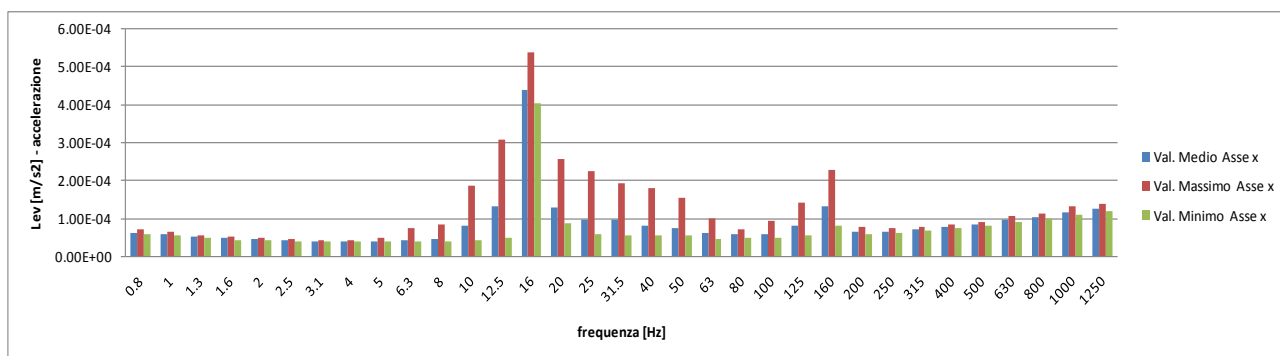
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

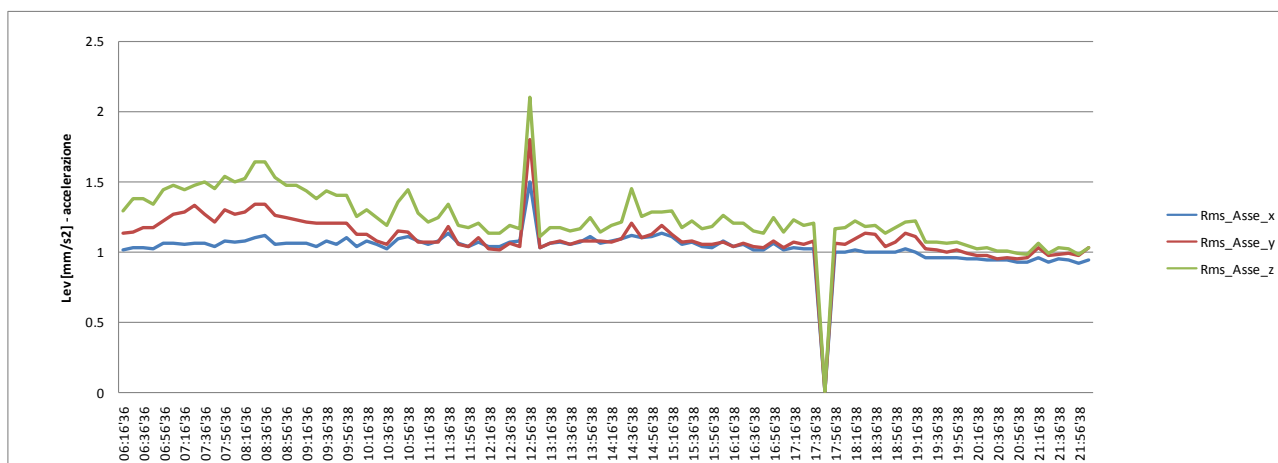


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

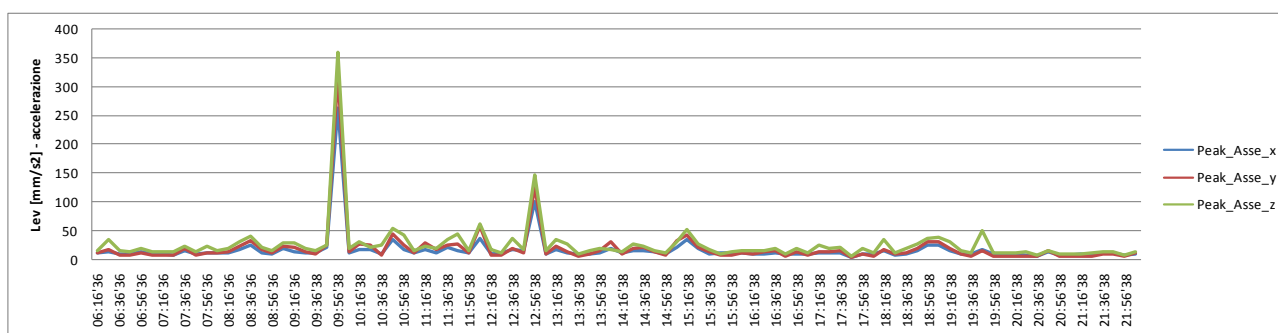


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

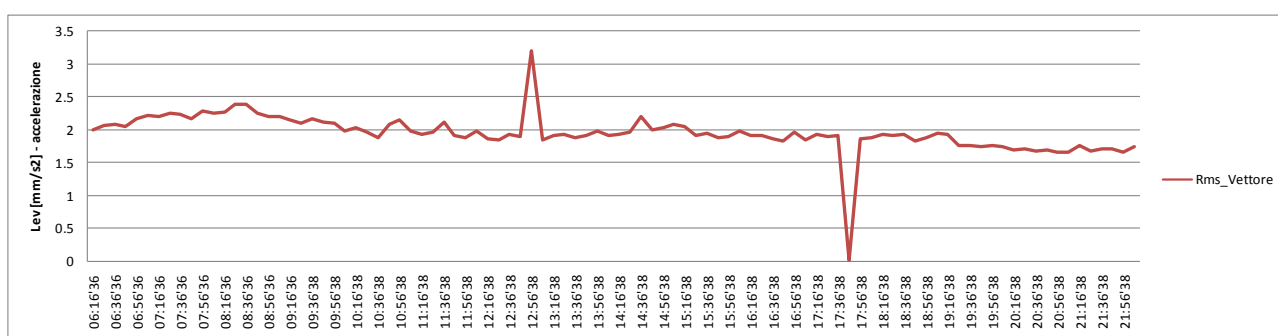
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: giovedì**



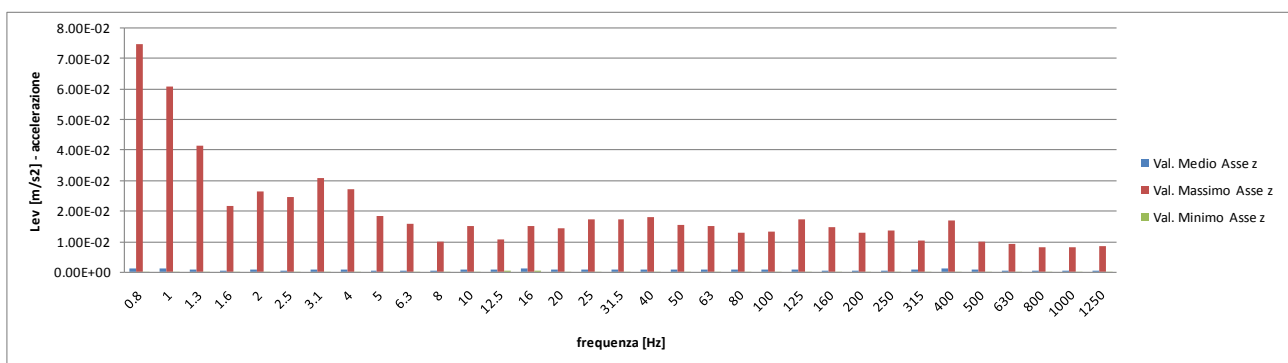
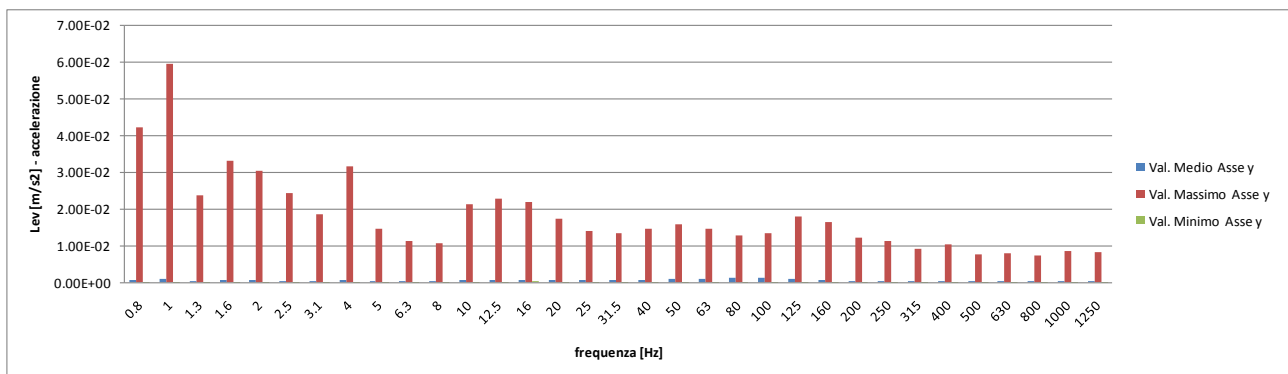
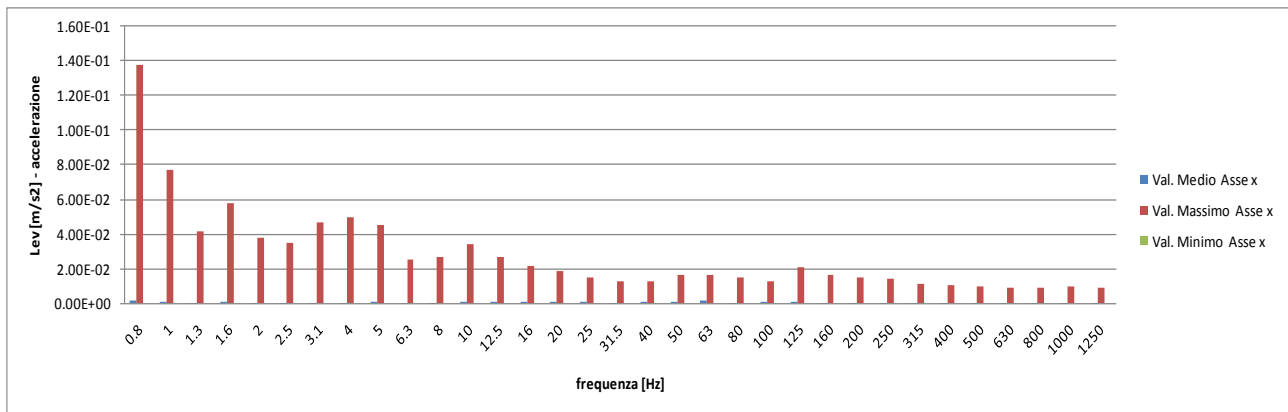
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

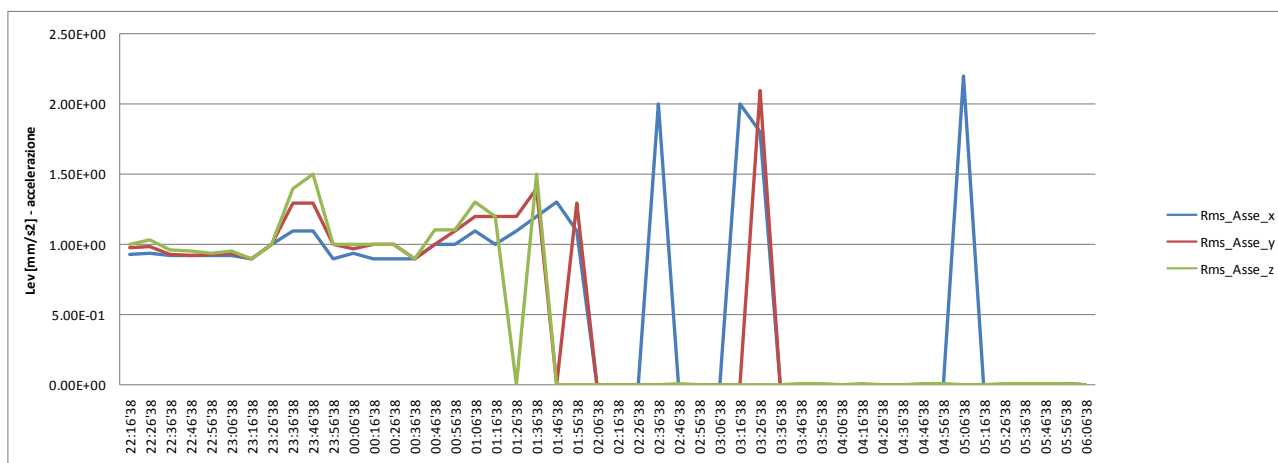


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

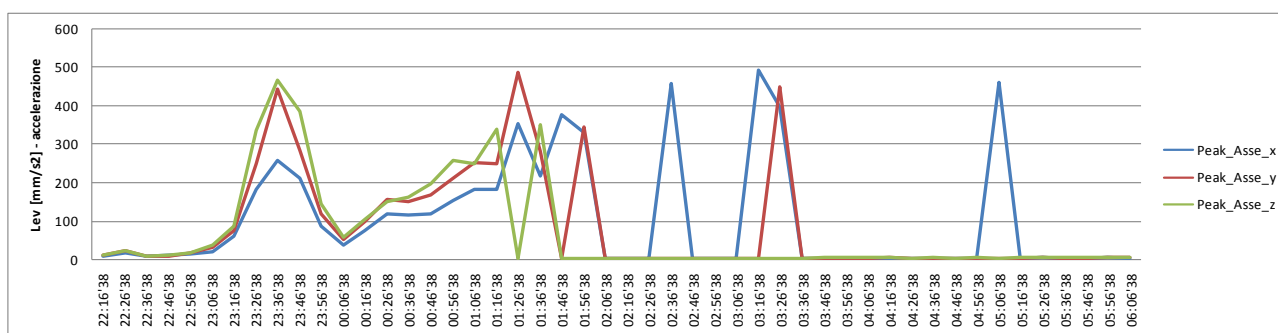


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

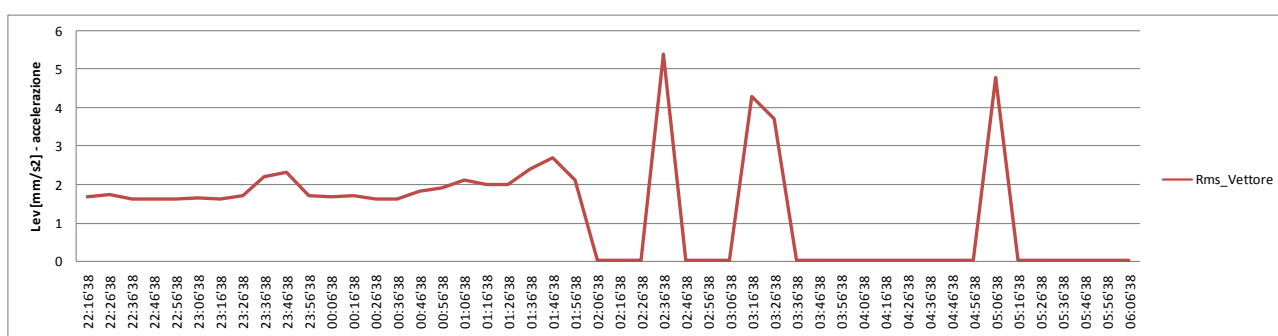
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: giovedì**



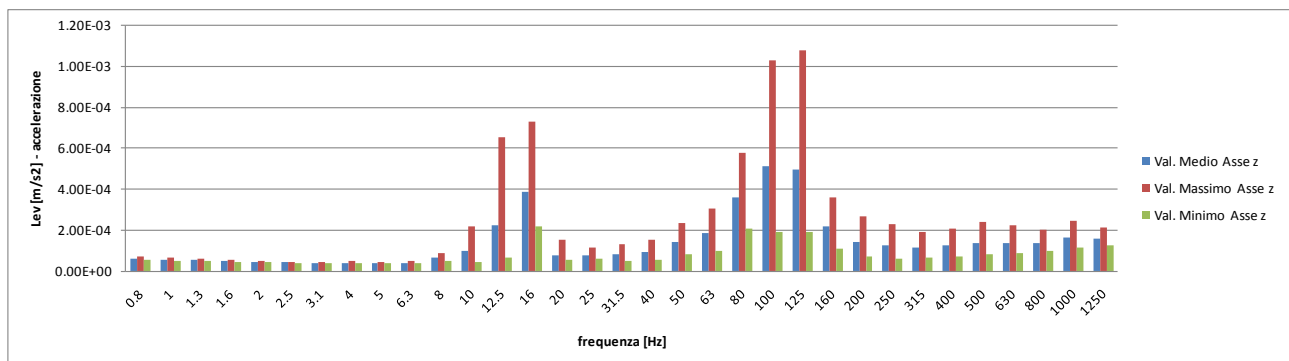
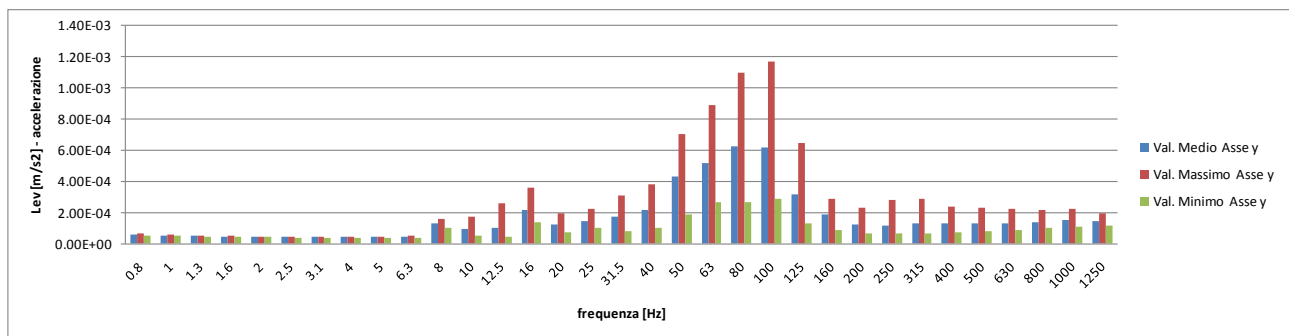
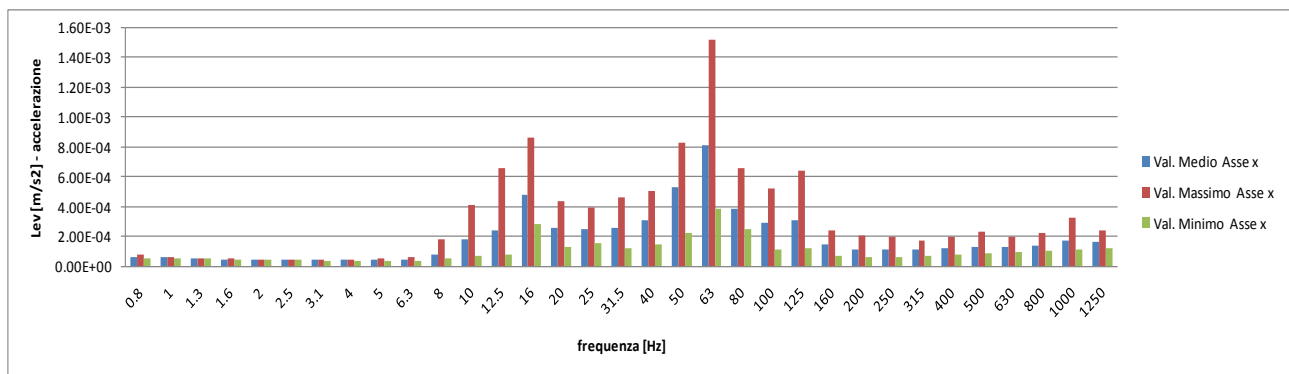
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

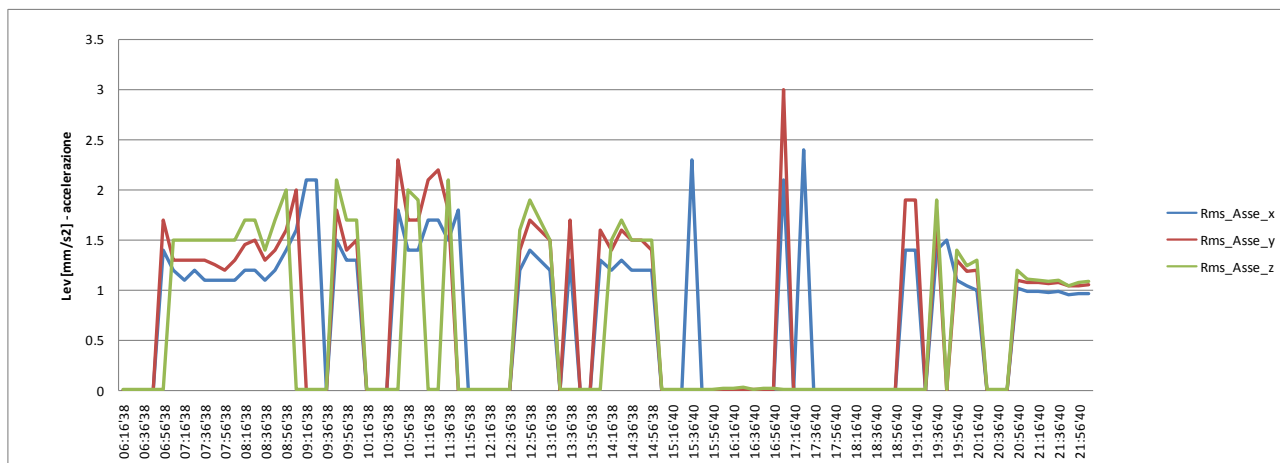


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

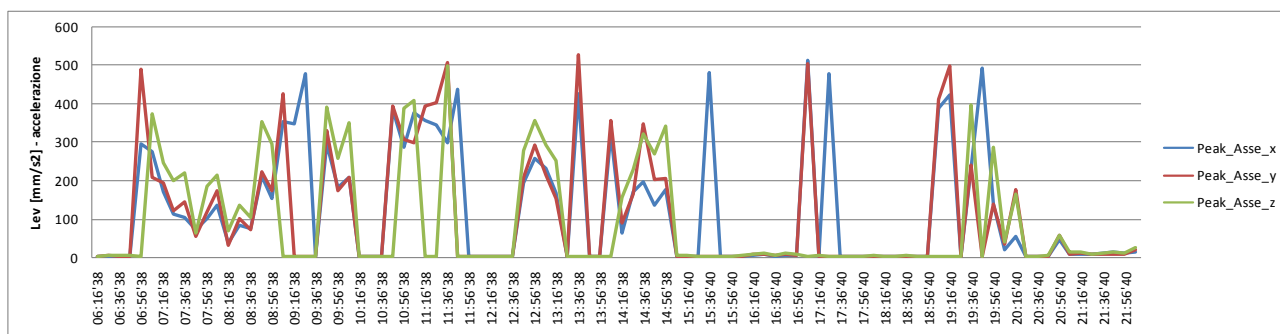


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

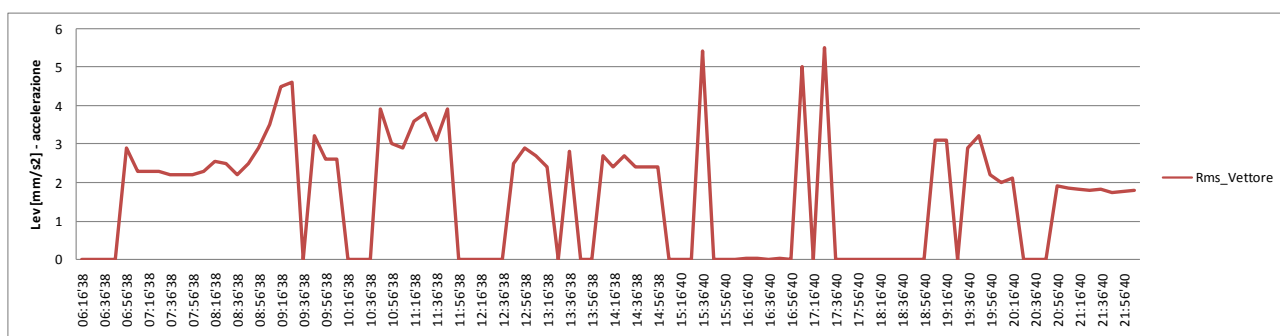
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: venerdì**



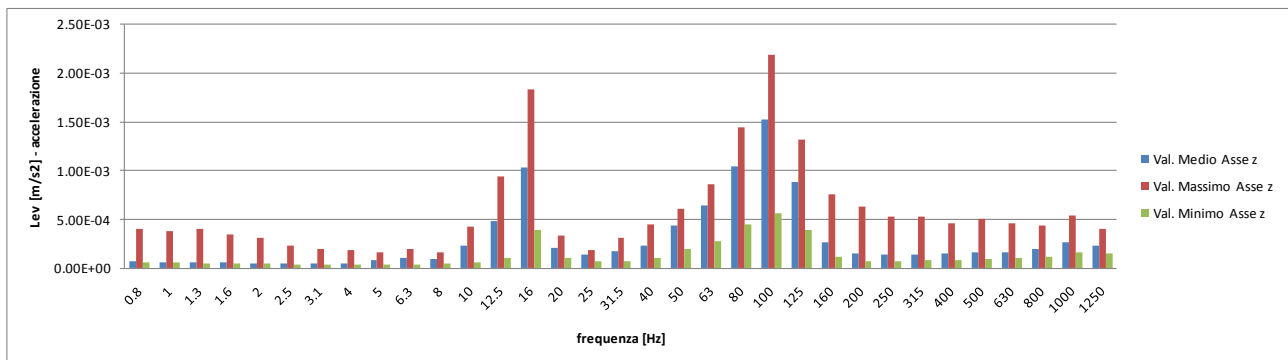
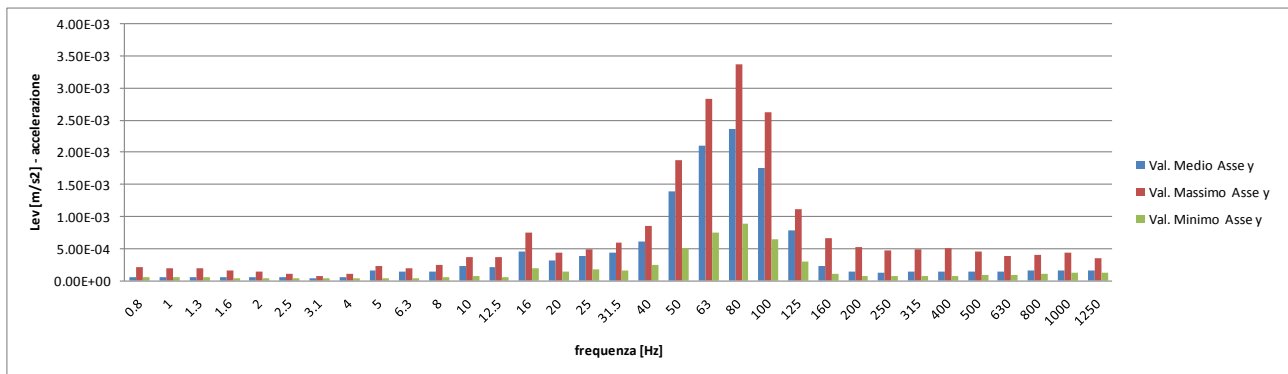
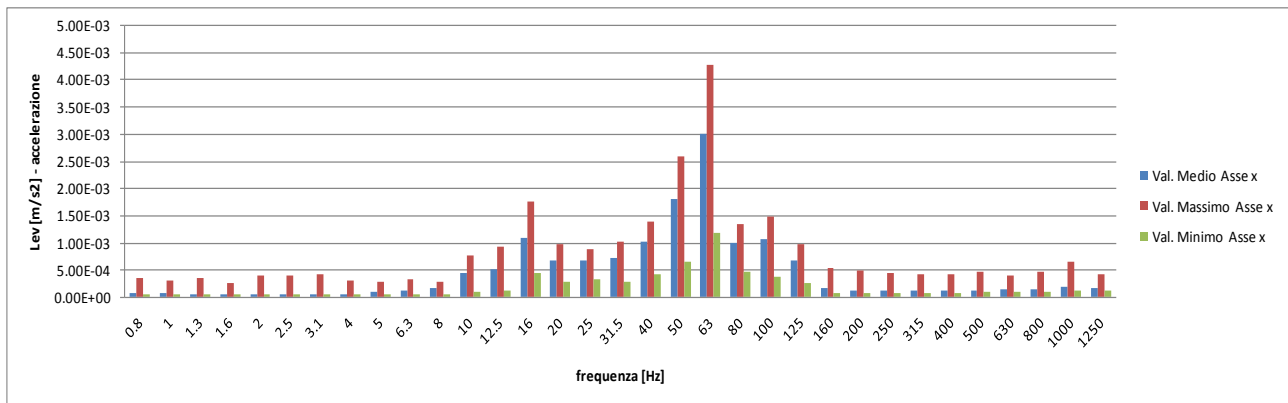
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

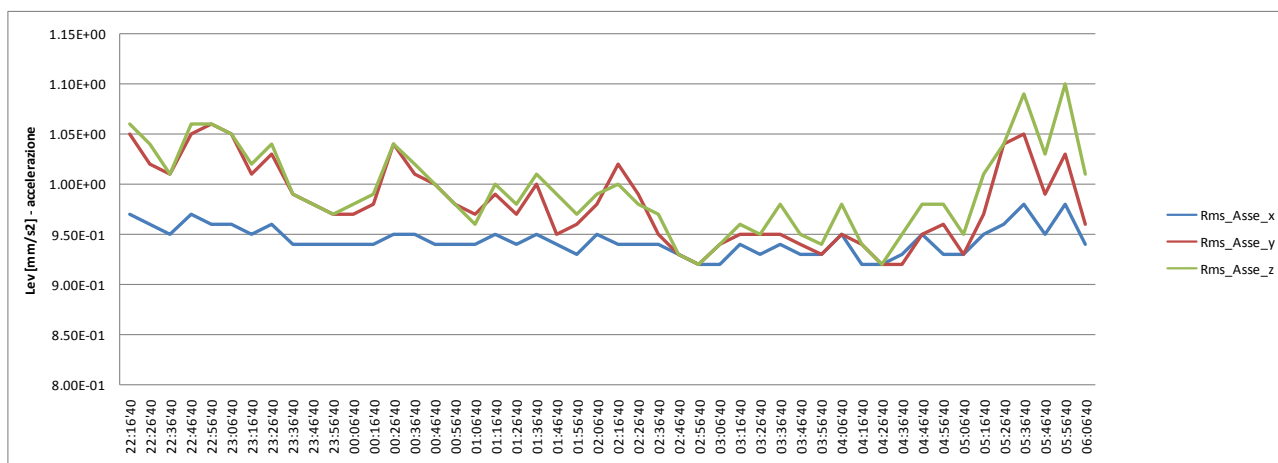


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

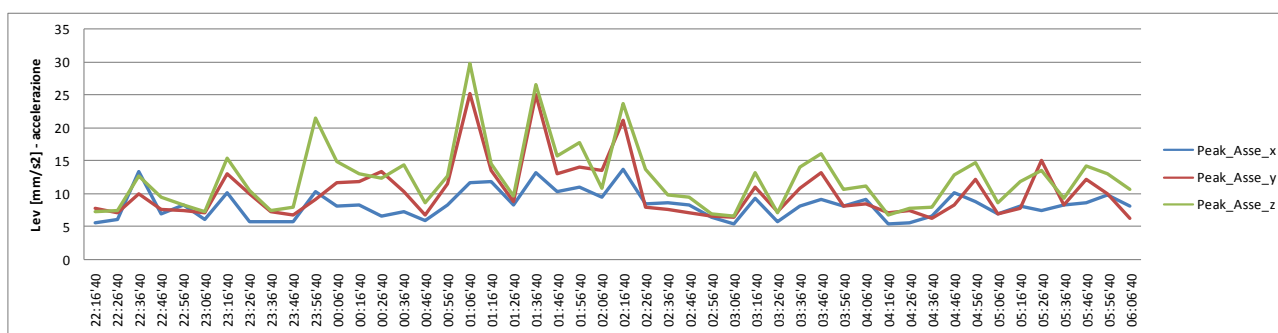


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

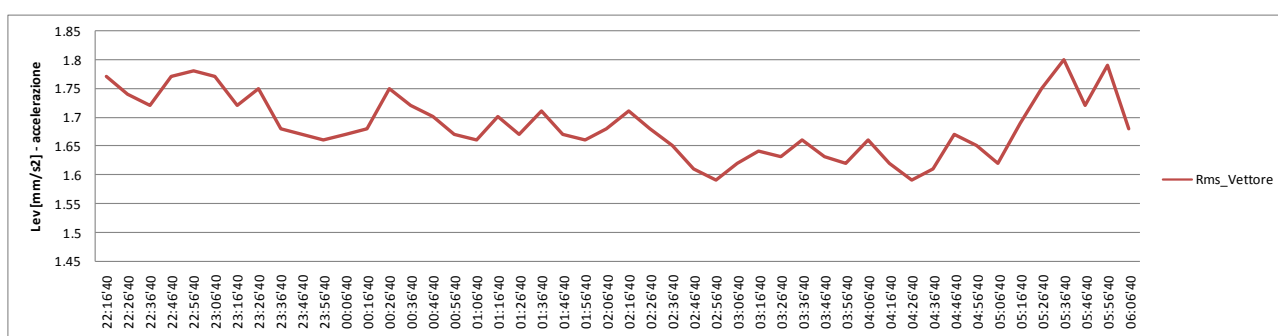
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: venerdì**



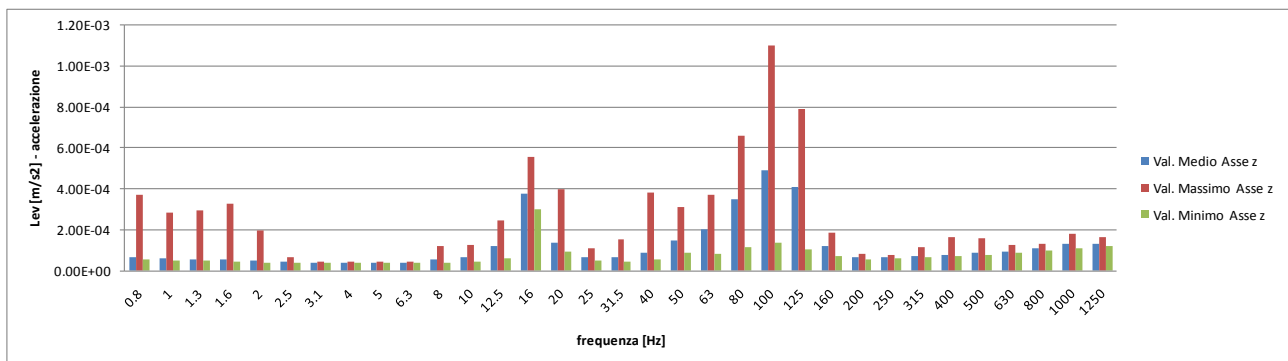
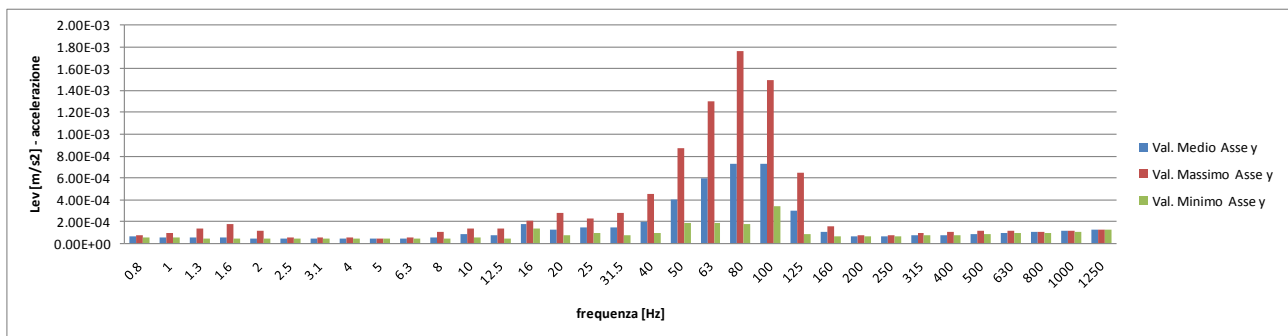
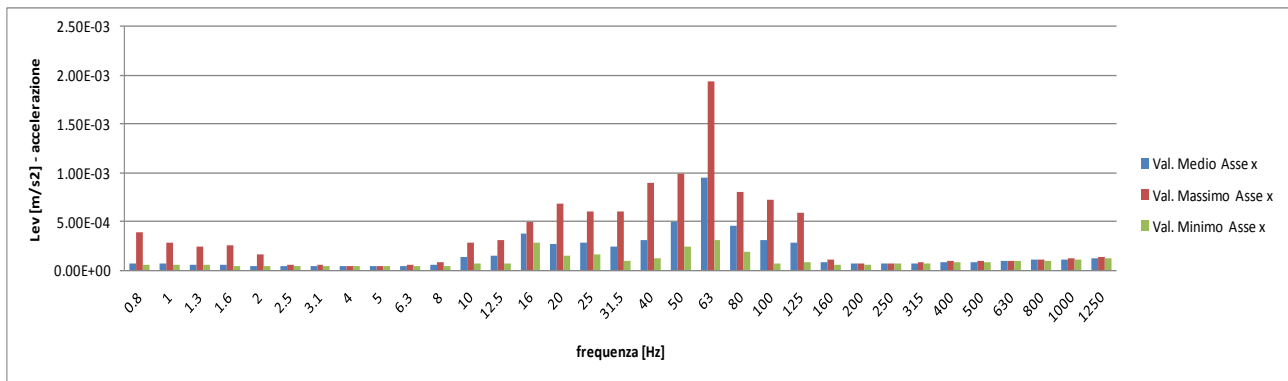
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

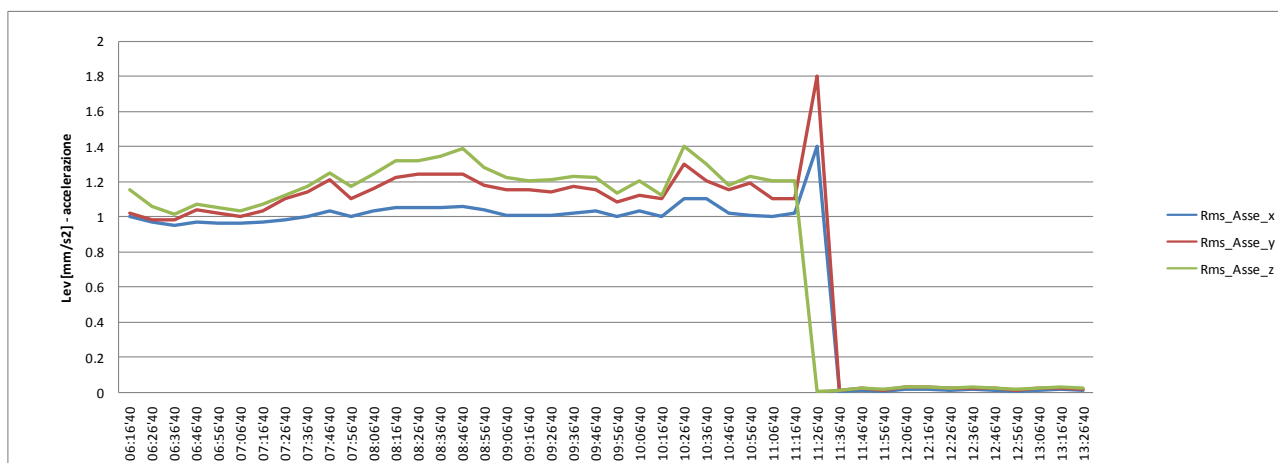


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

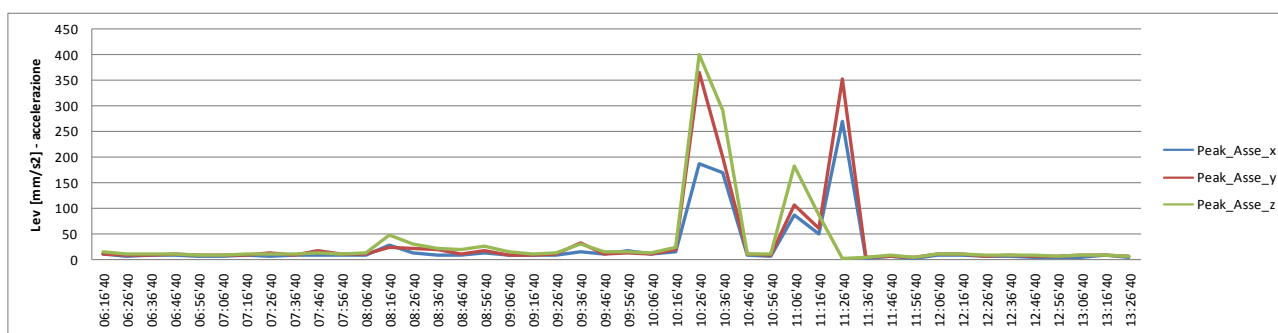


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

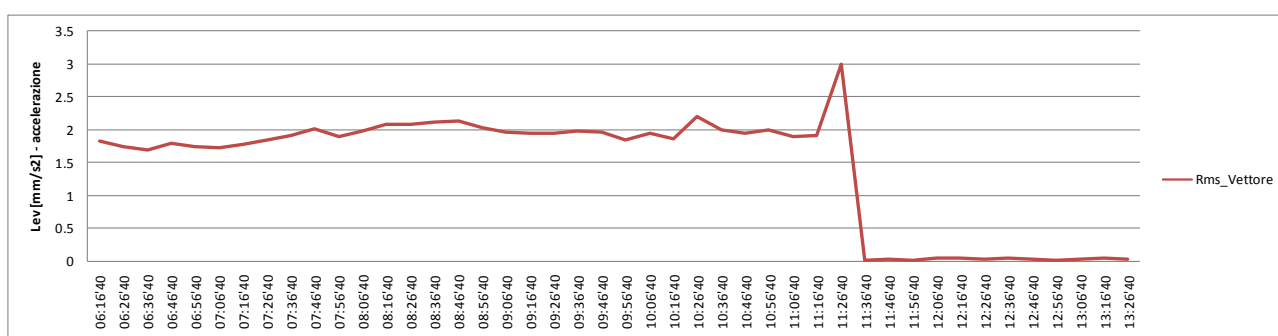
- **Settimo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: sabato**



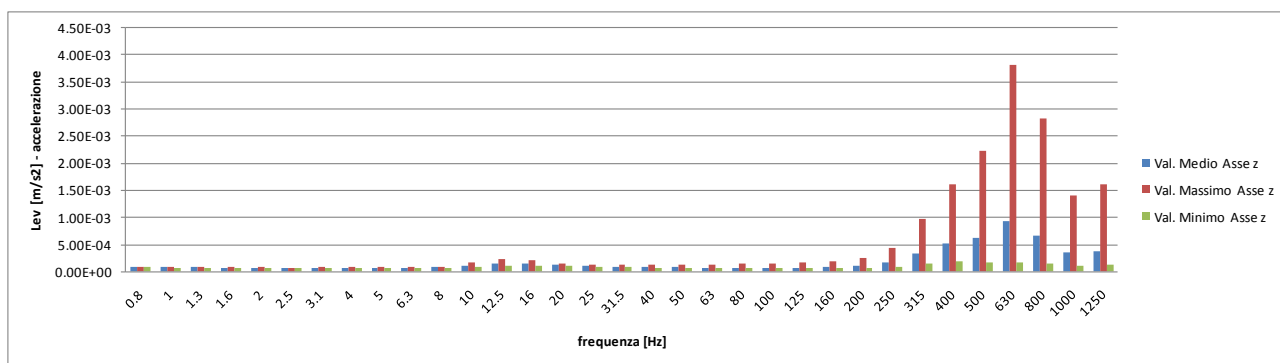
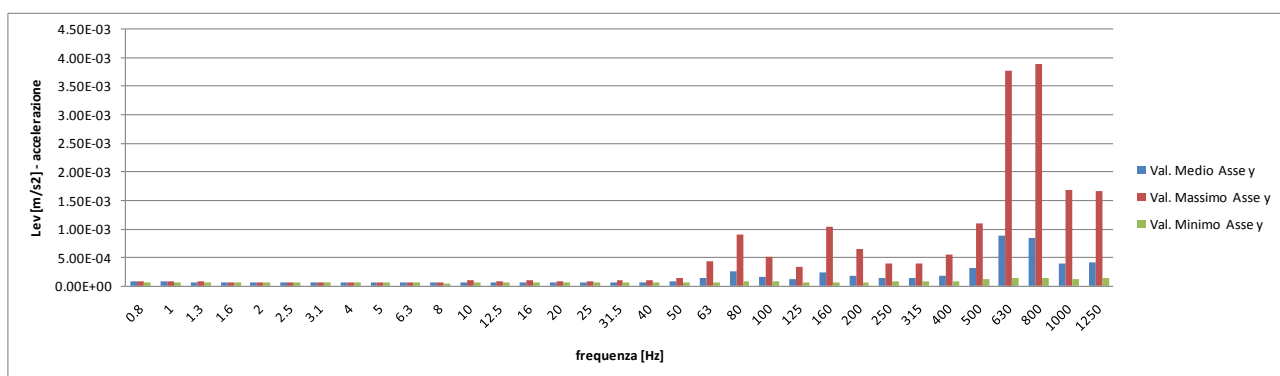
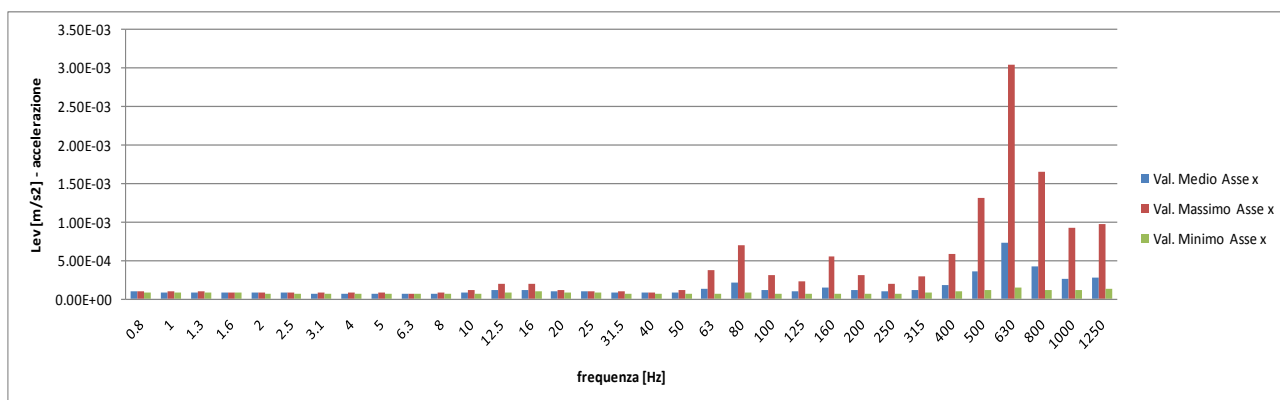
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione



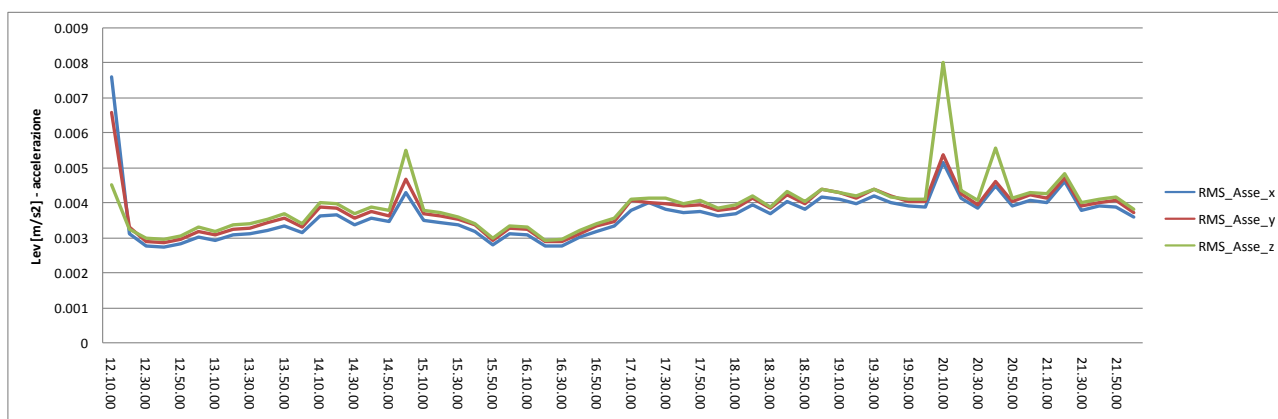
Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione



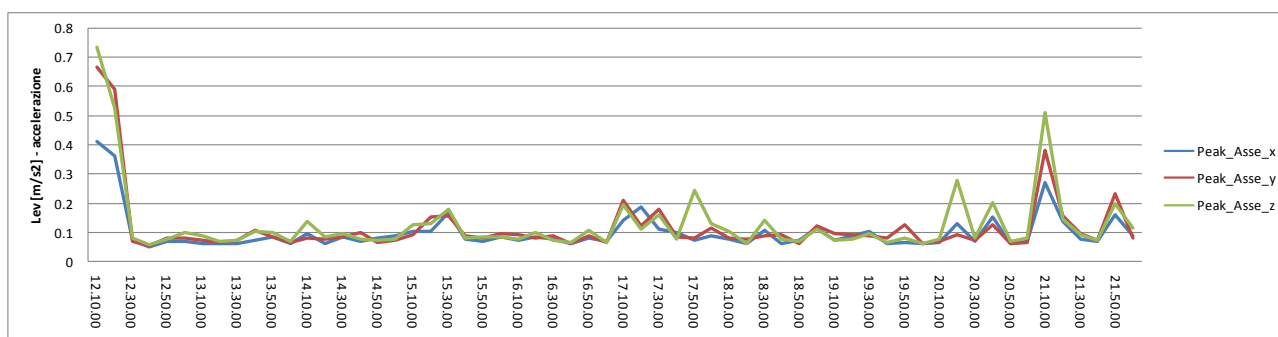
Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

Descrizione Punto di Misura	Identificazione fotografica
Posizionamento lato infrastruttura	

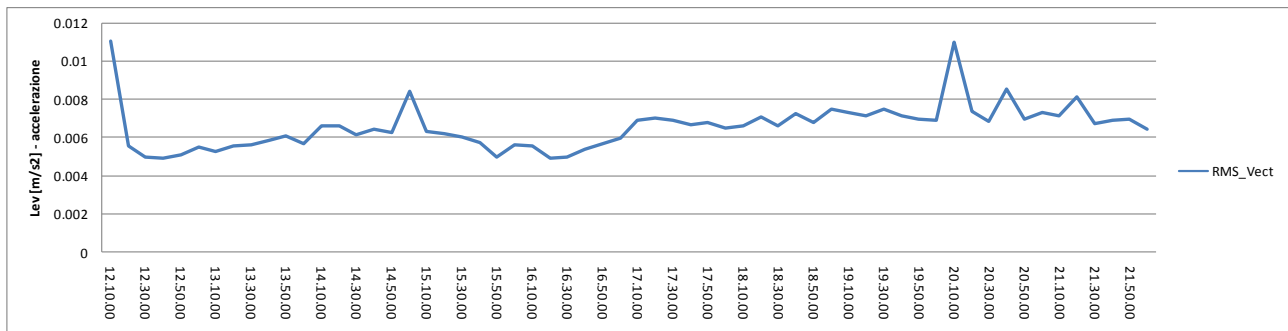
- Primo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: domenica**



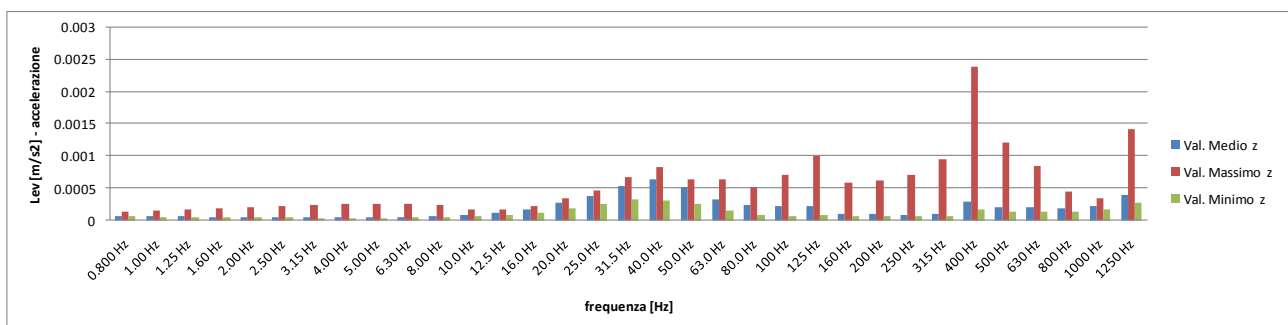
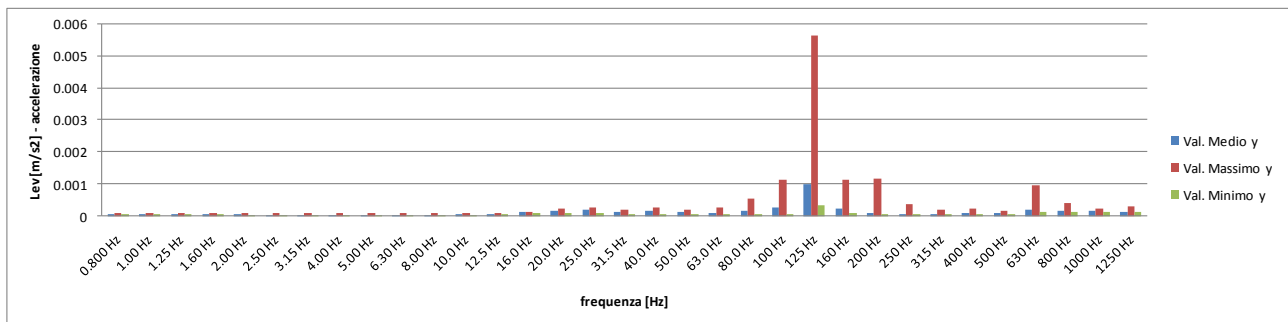
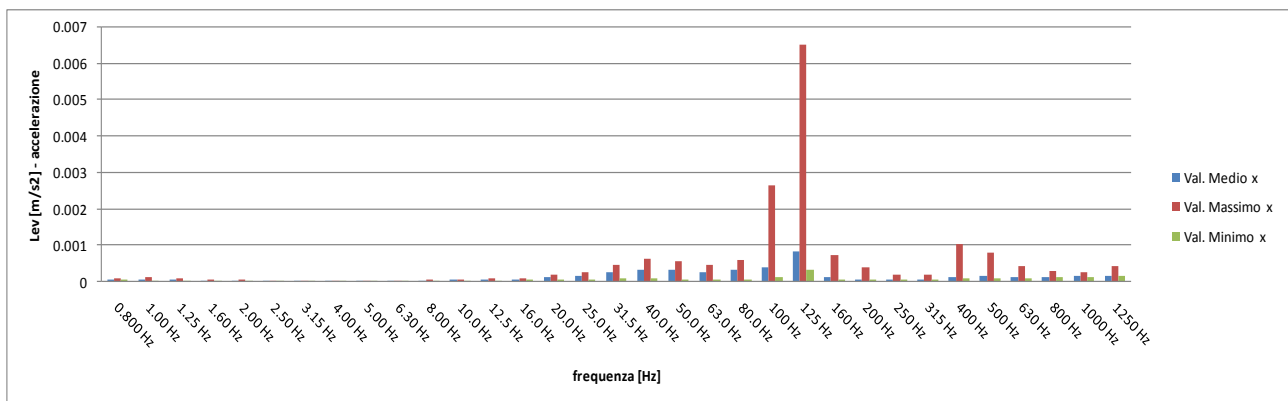
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

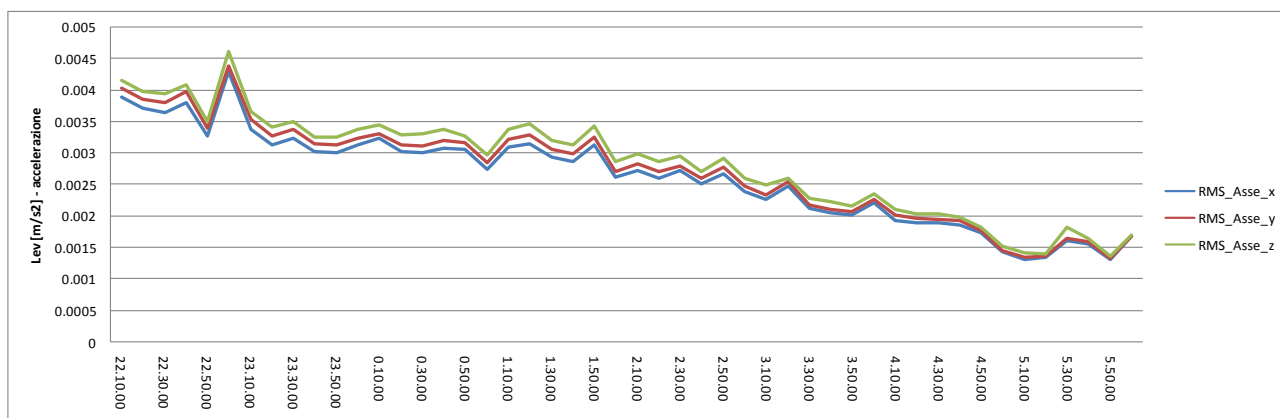


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

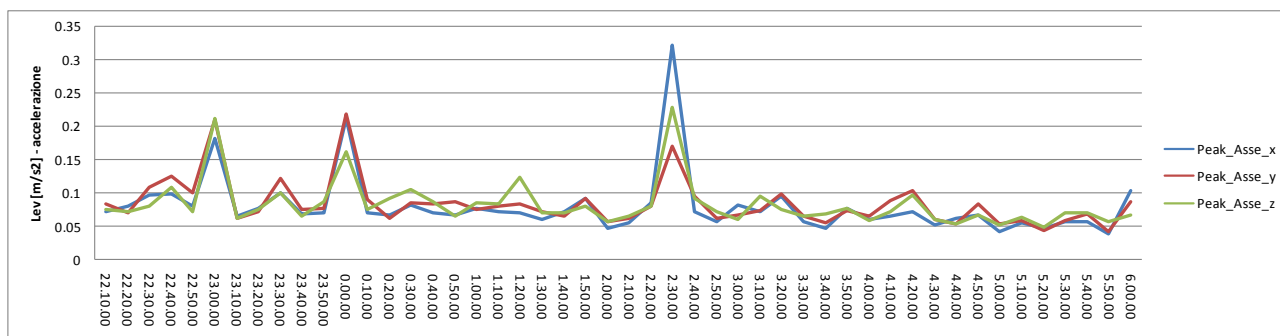


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

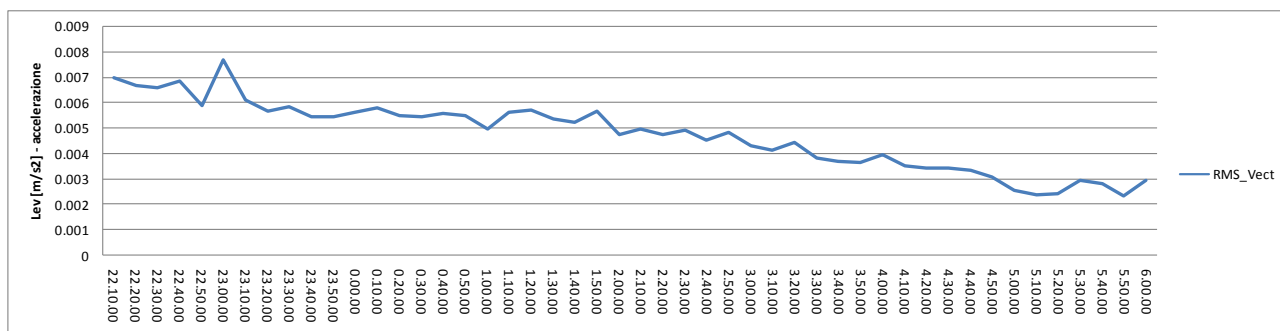
- **Primo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: domenica**



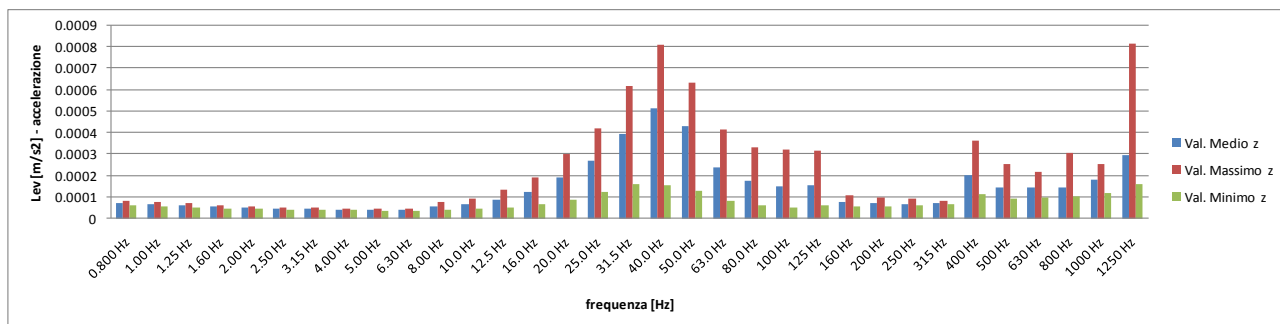
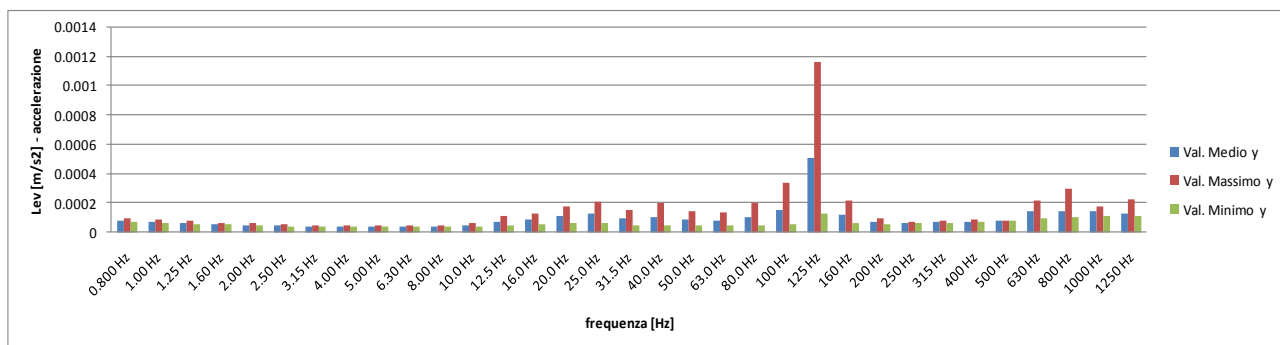
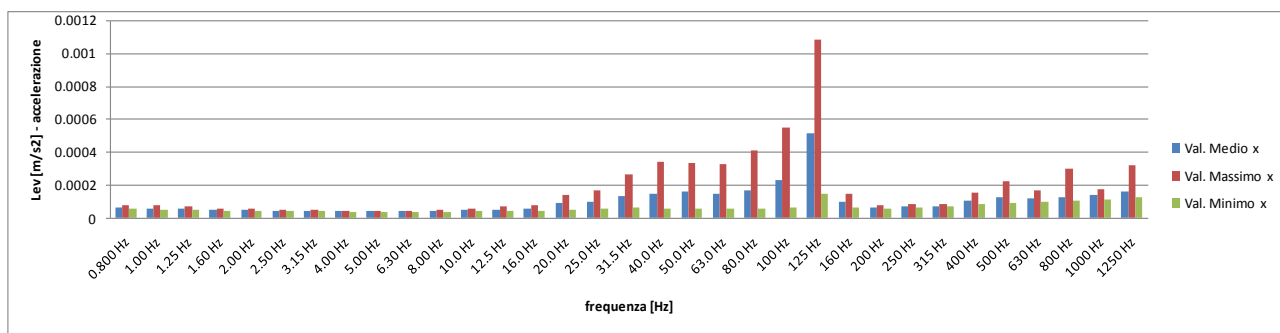
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

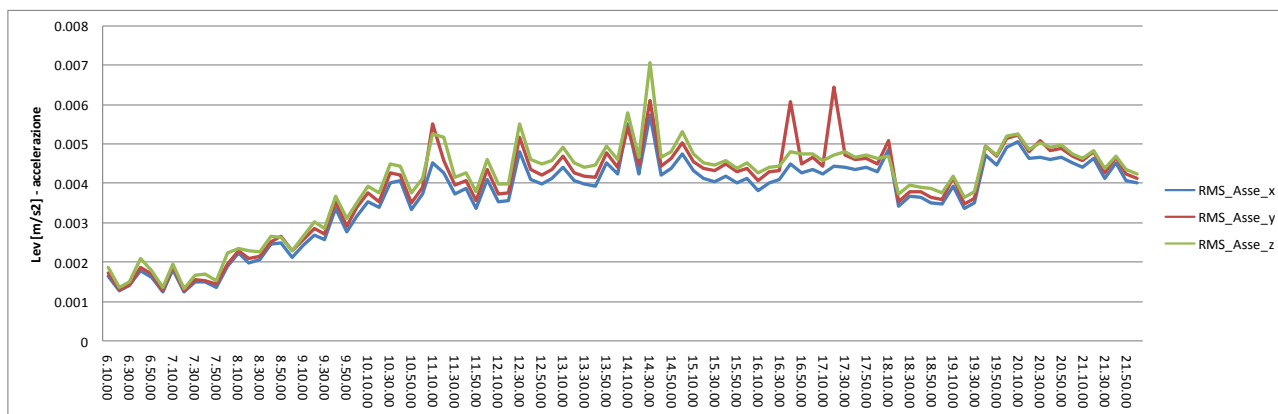


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

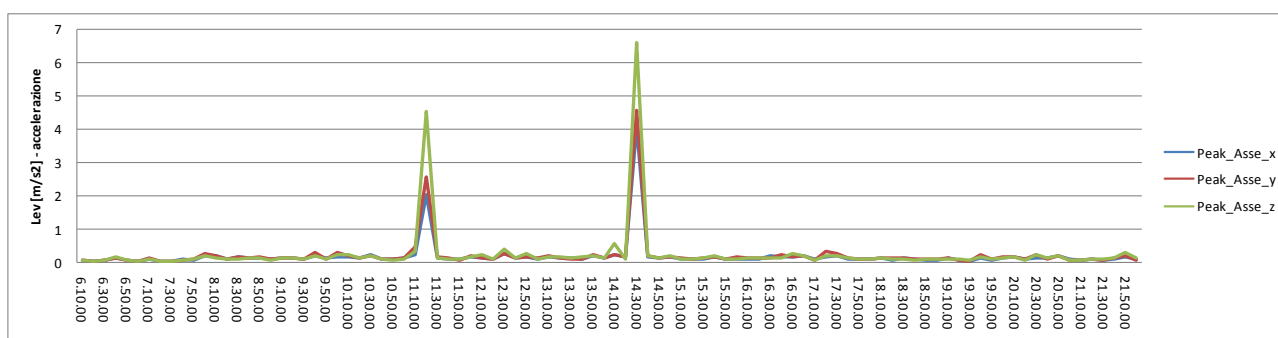


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

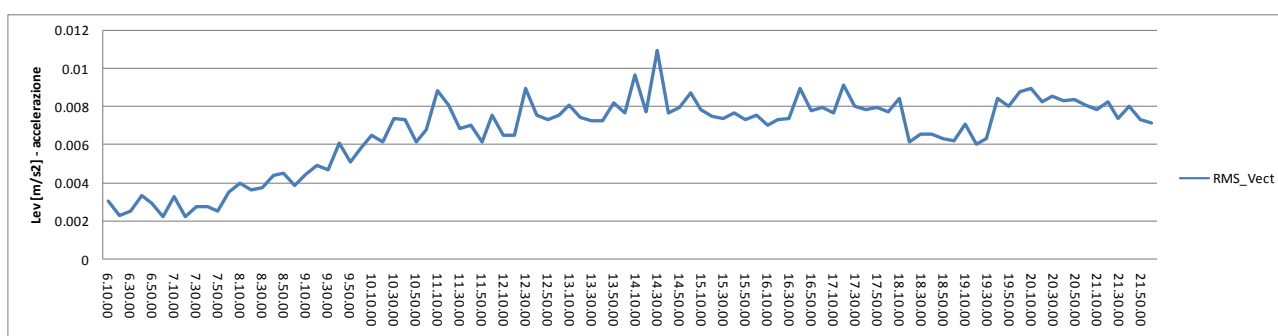
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: lunedì**



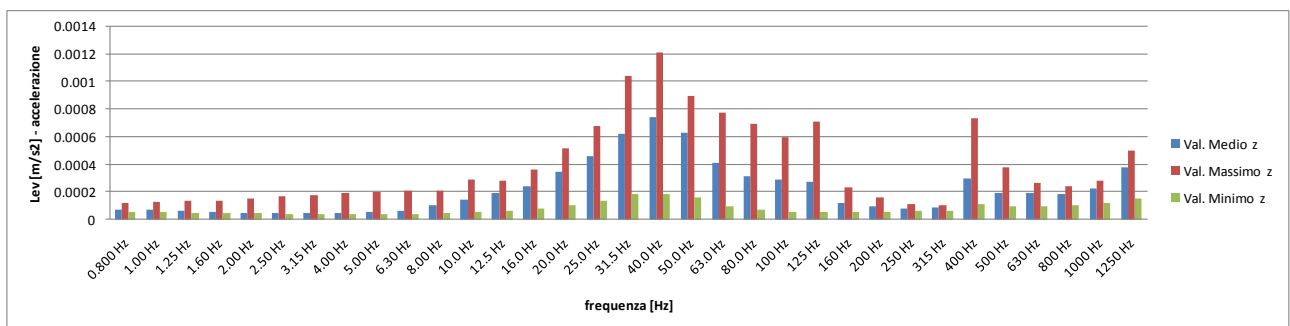
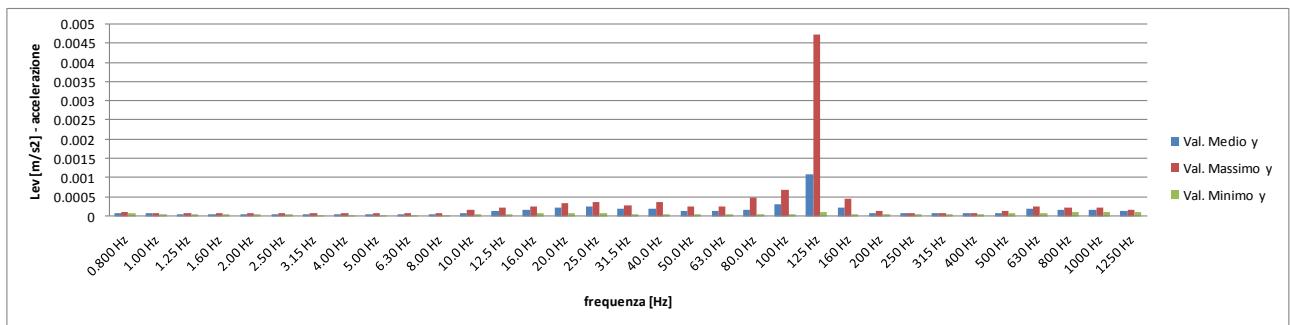
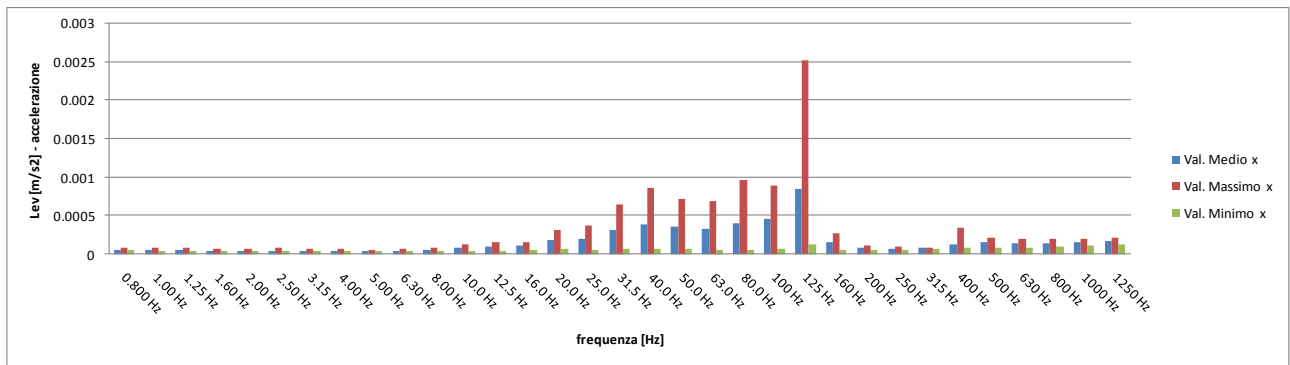
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

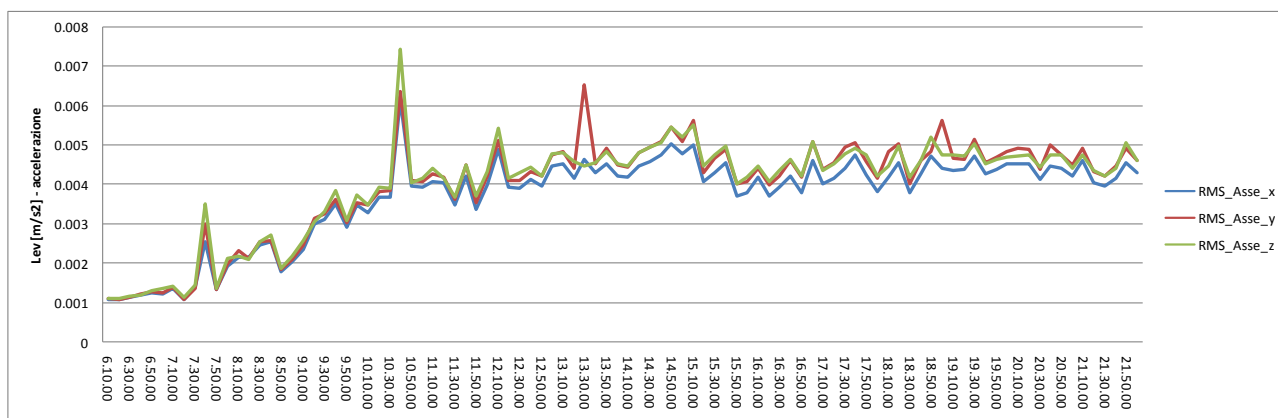


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

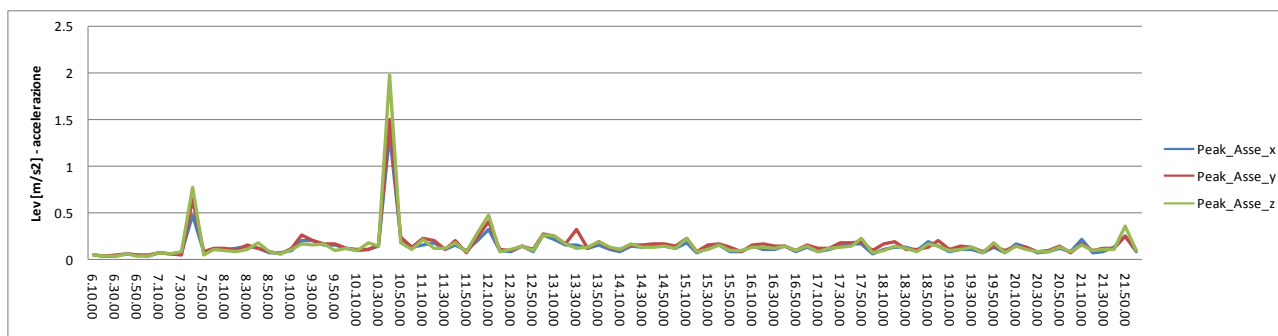


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

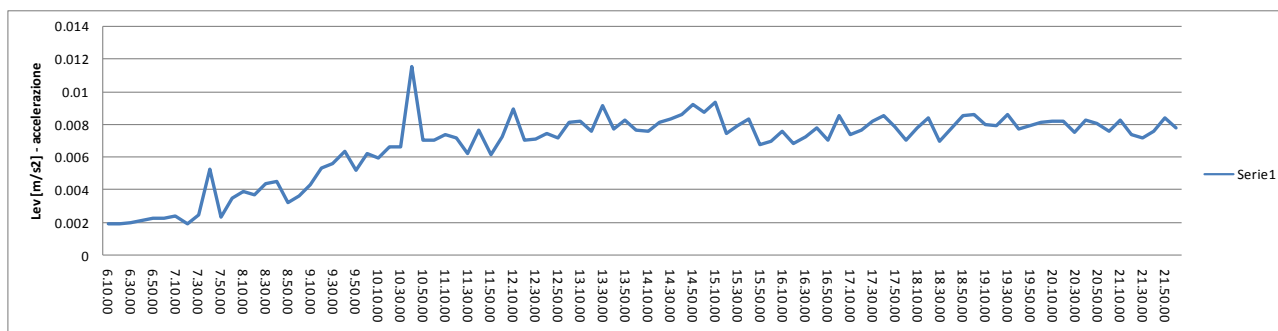
- **Secondo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: lunedì**



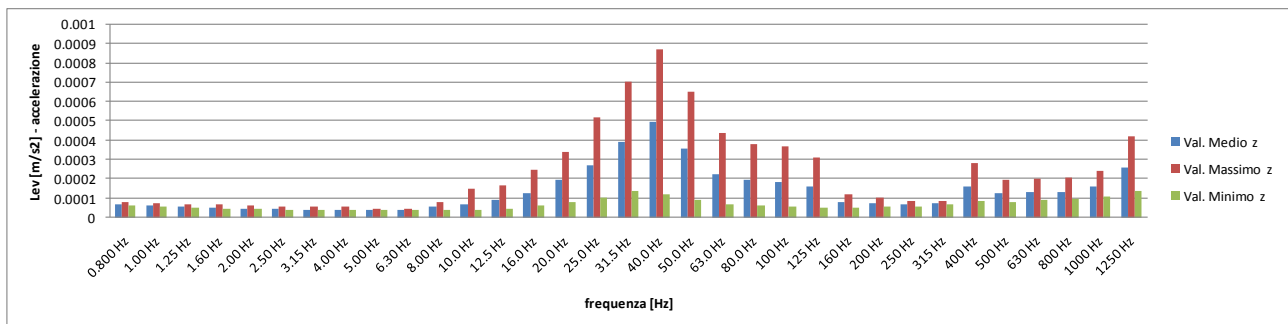
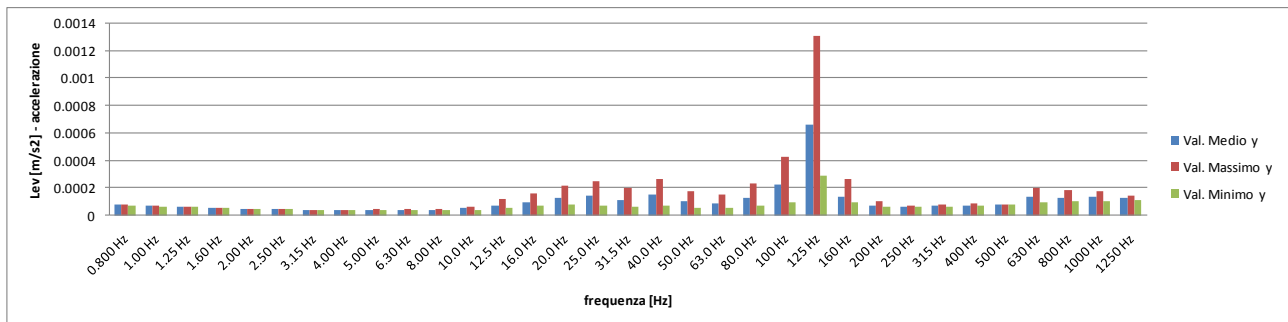
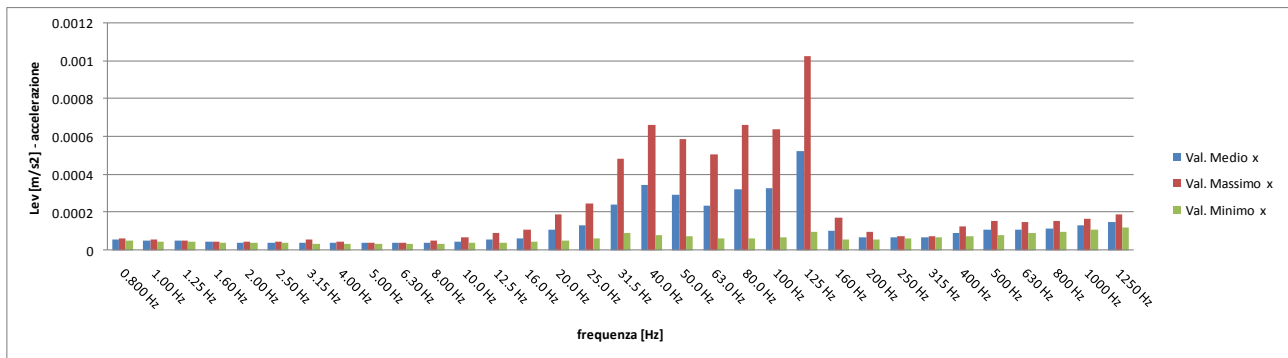
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

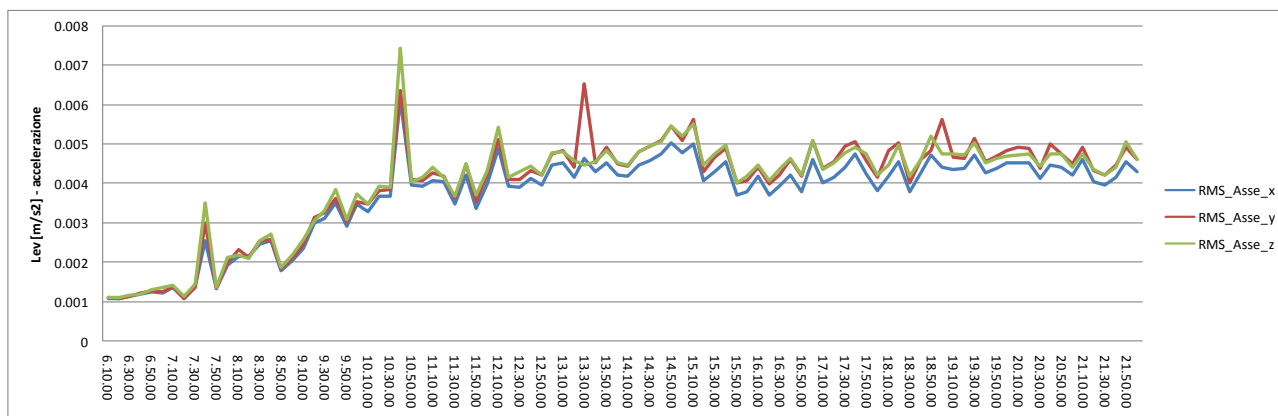


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

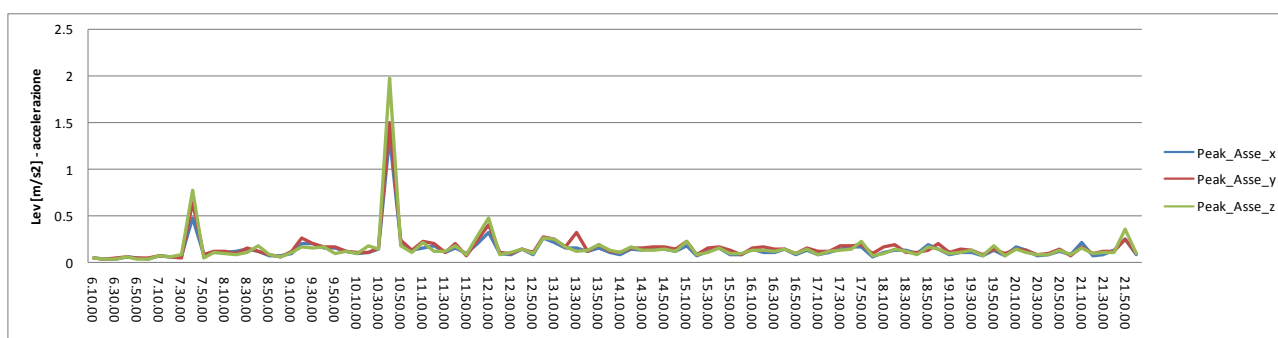


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

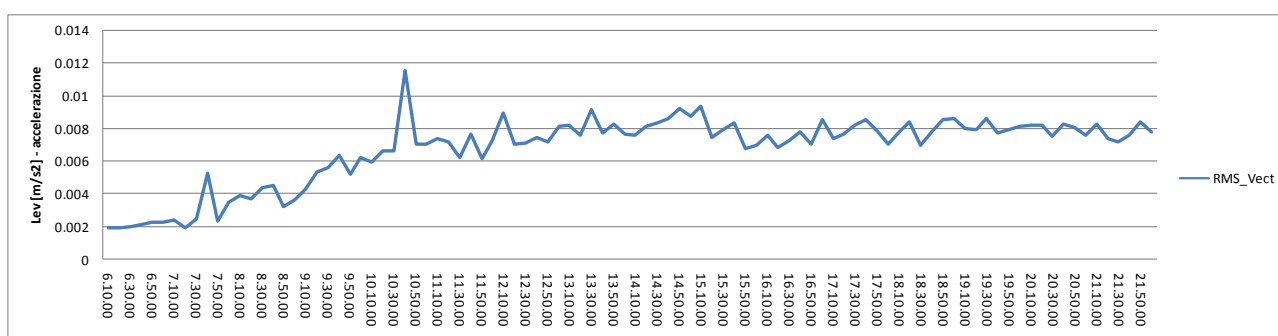
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: martedì**



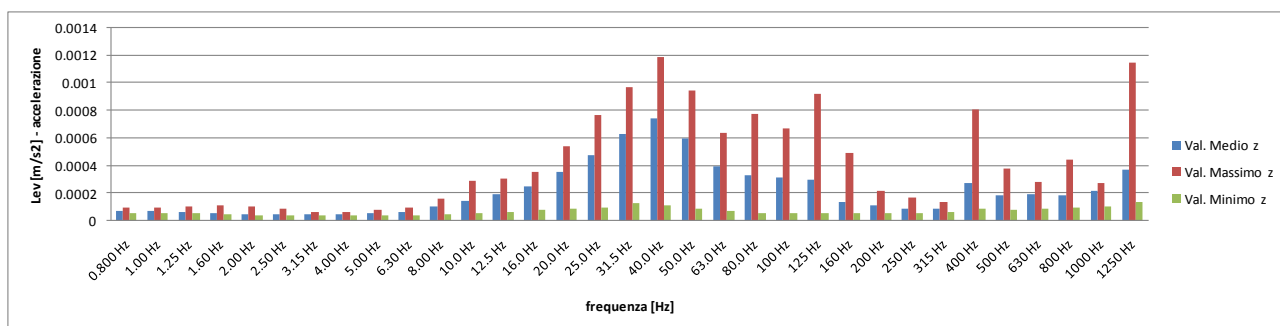
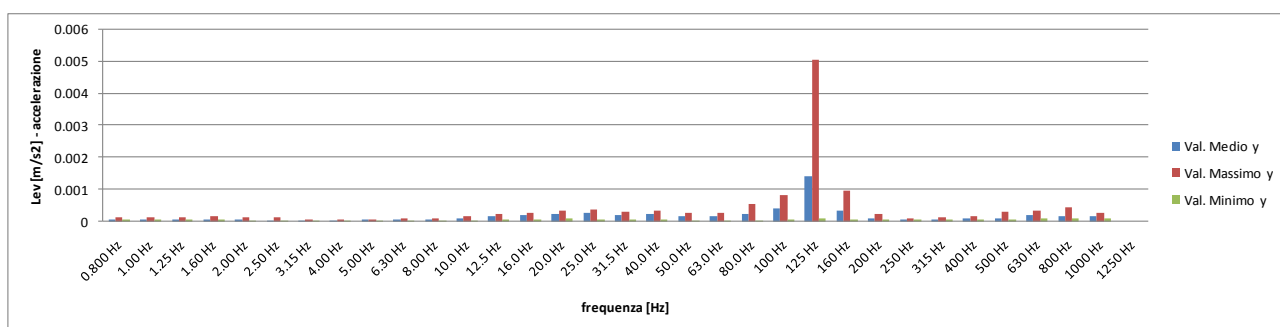
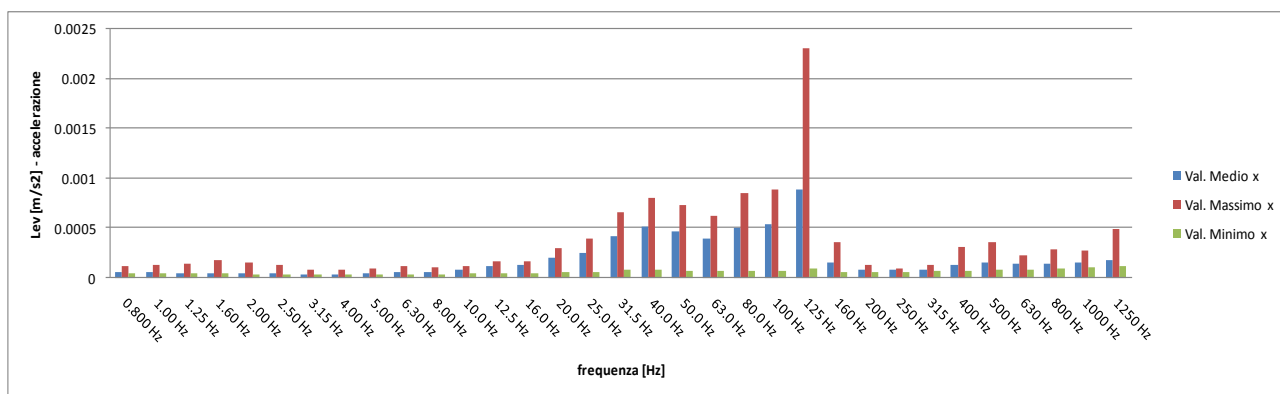
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

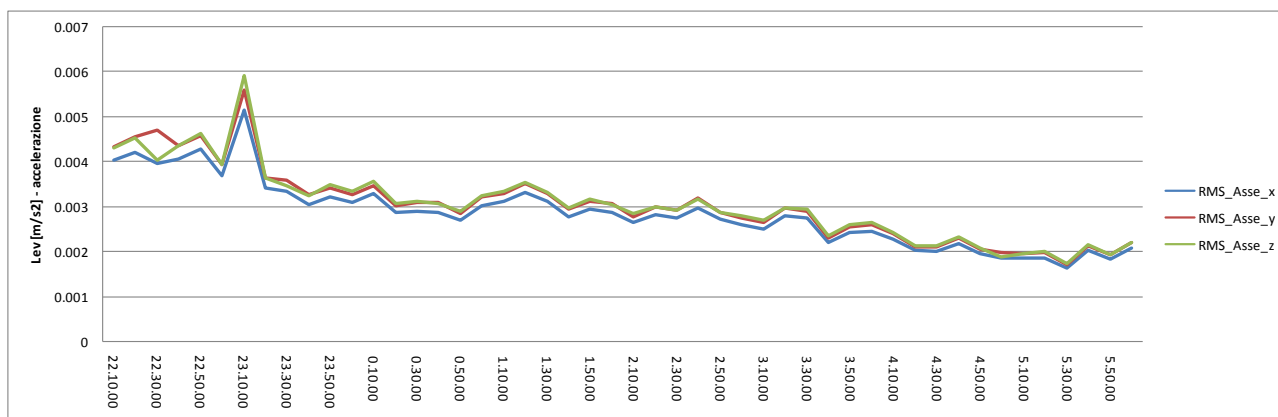


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

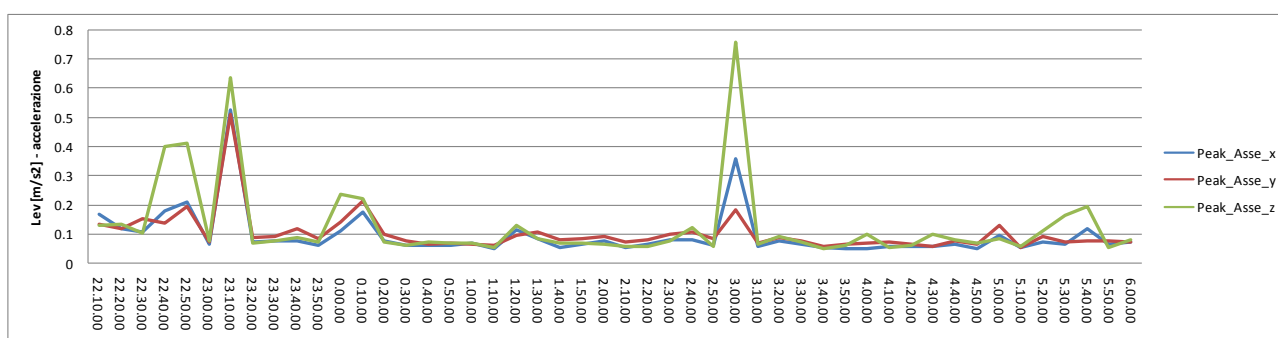


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

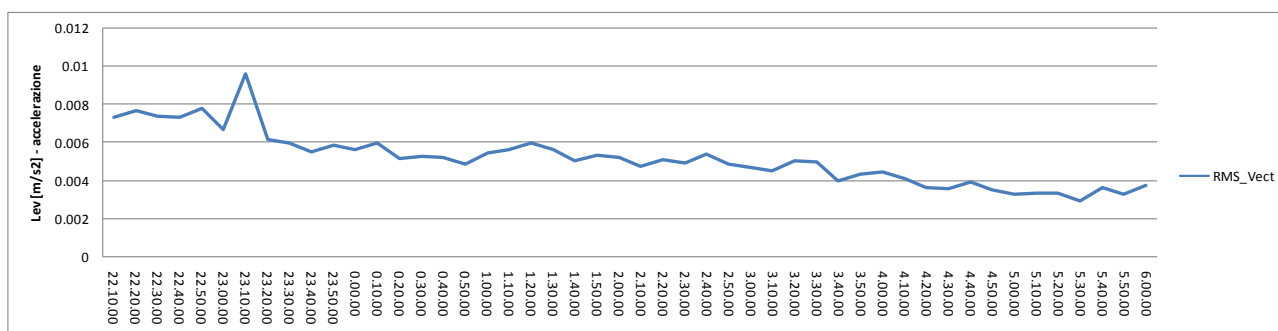
- **Terzo giorno di misura – periodo di riferimento notturno: martedì**



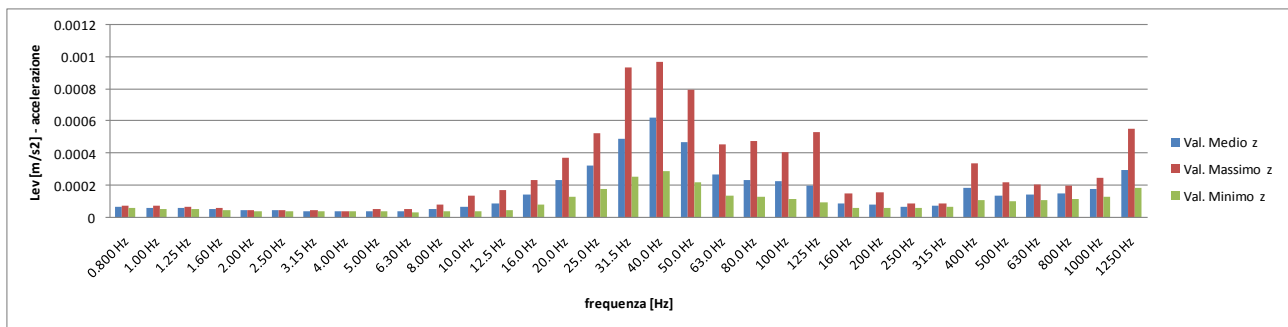
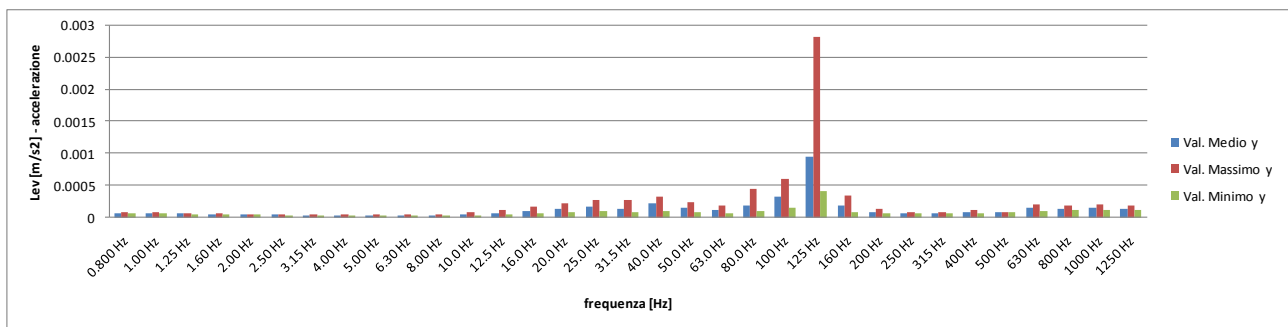
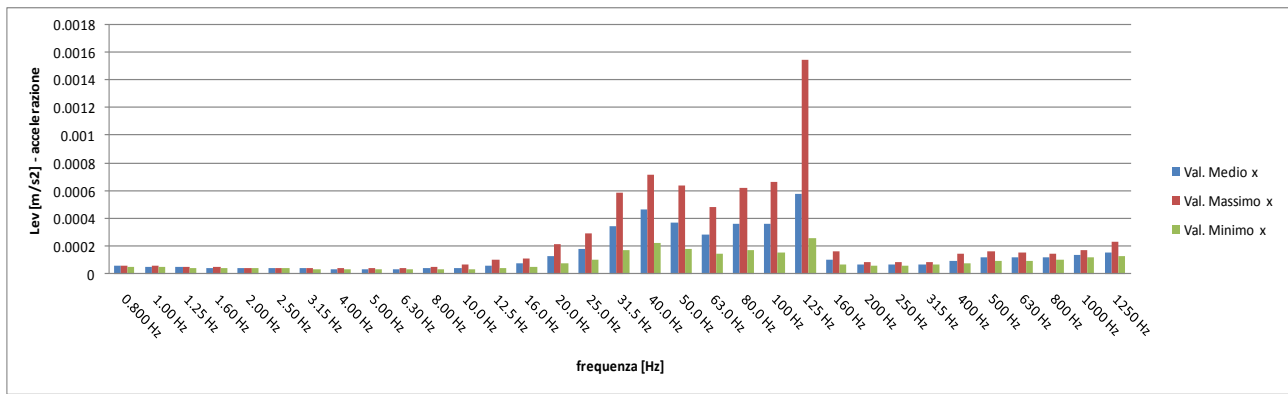
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

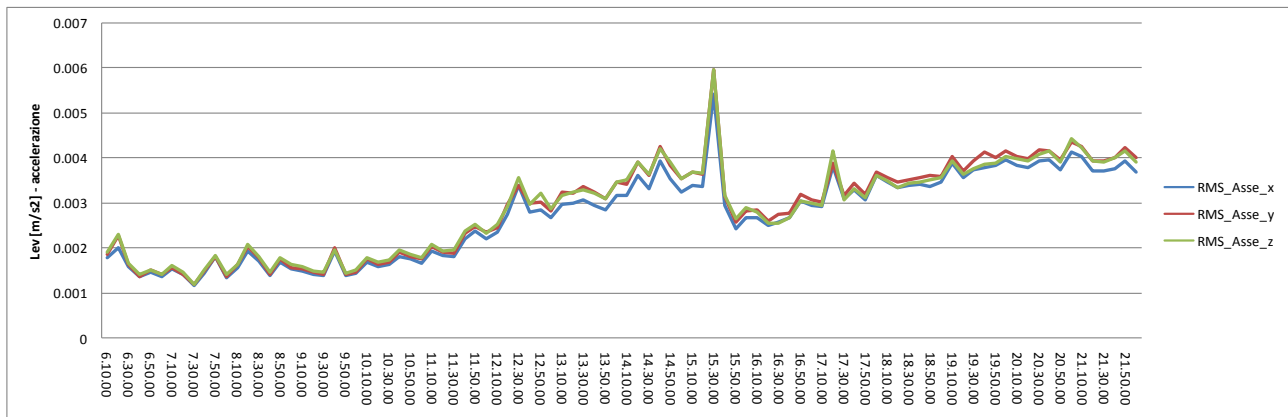


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

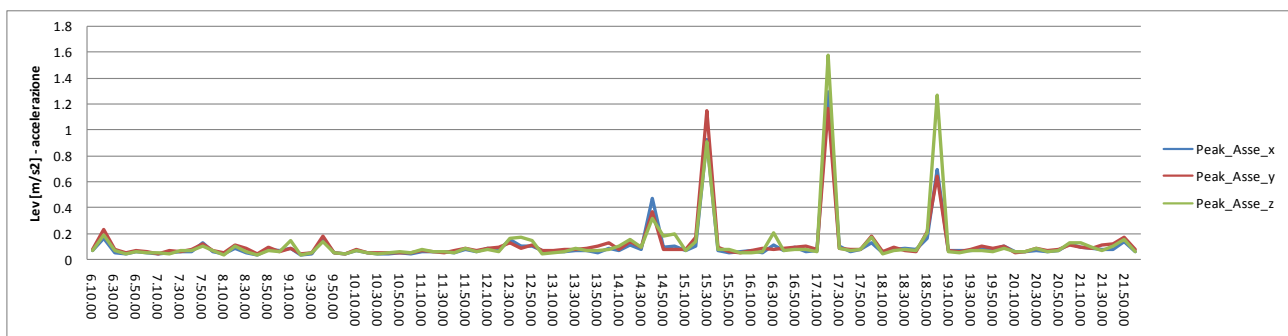


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

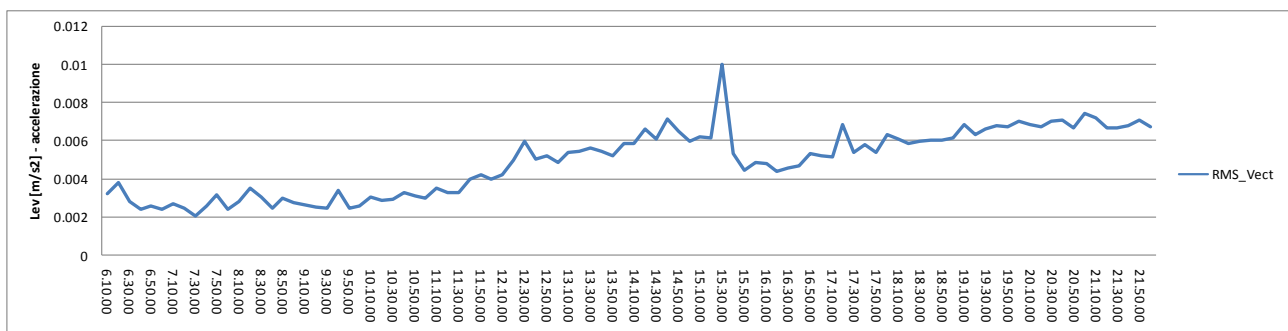
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: mercoledì**



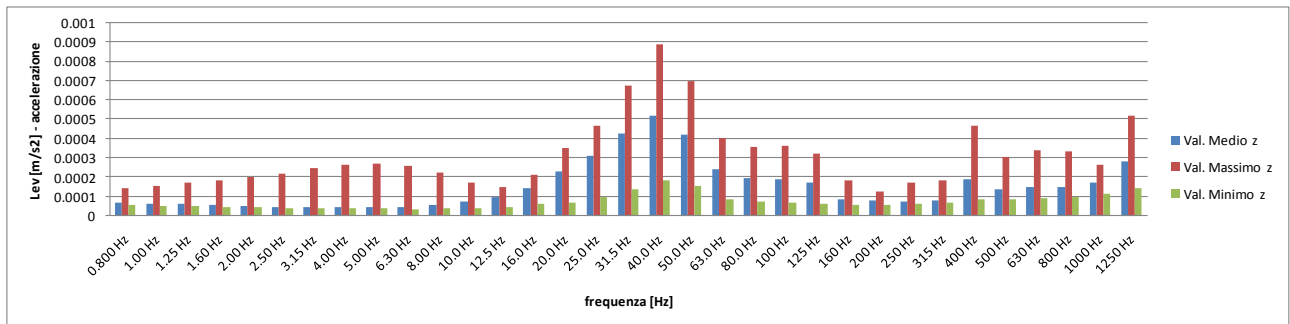
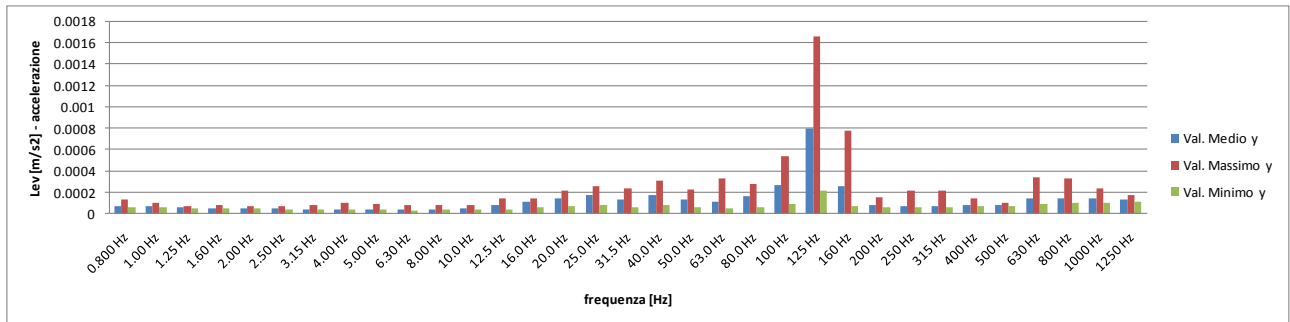
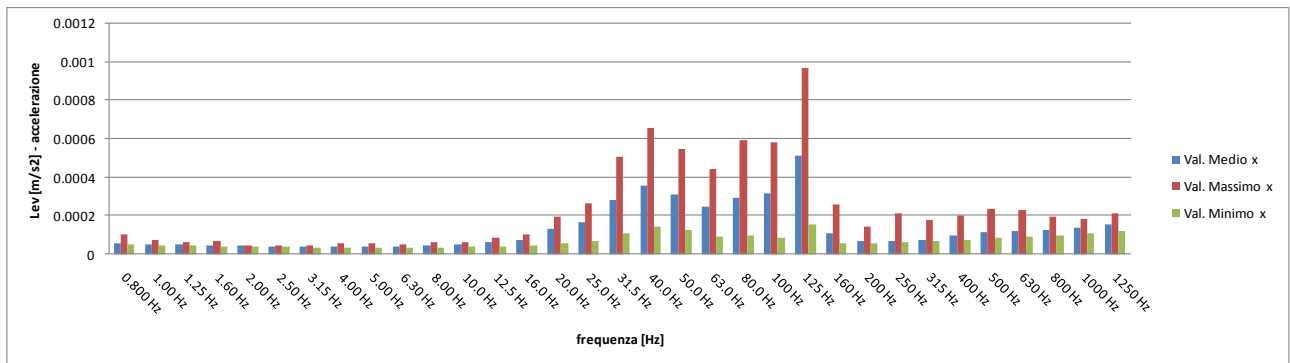
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

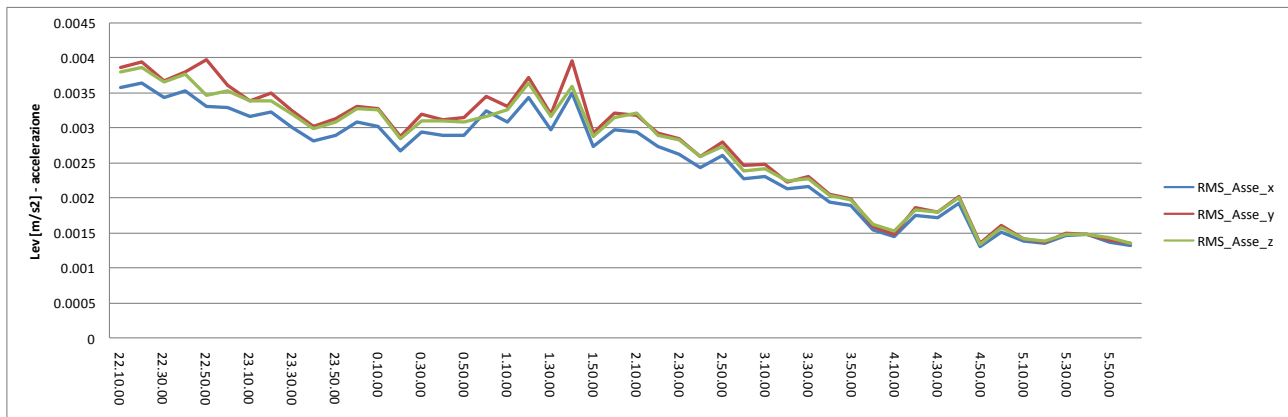


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

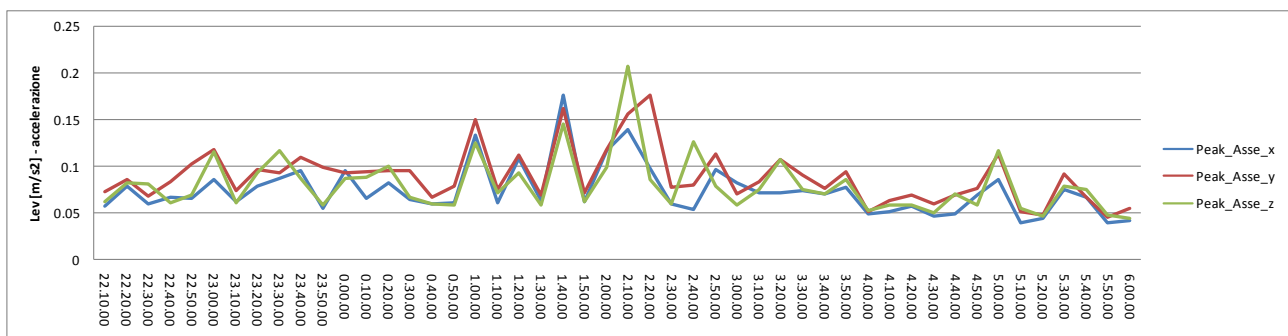


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

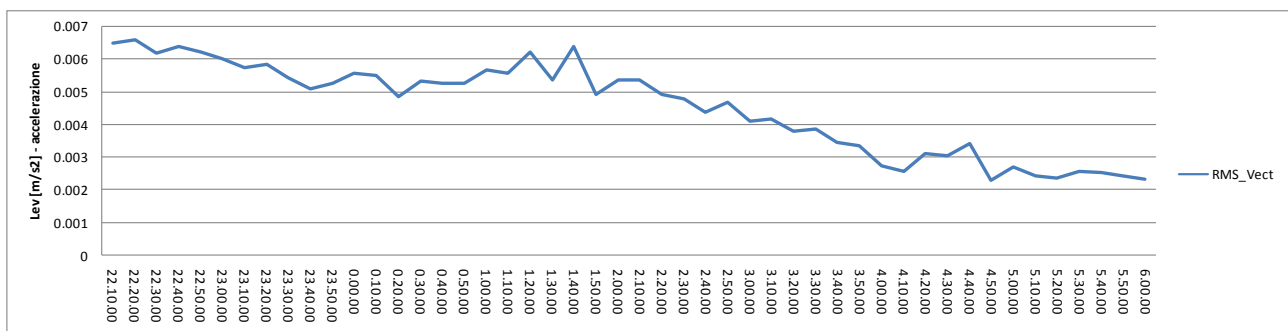
- **Quarto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: mercoledì**



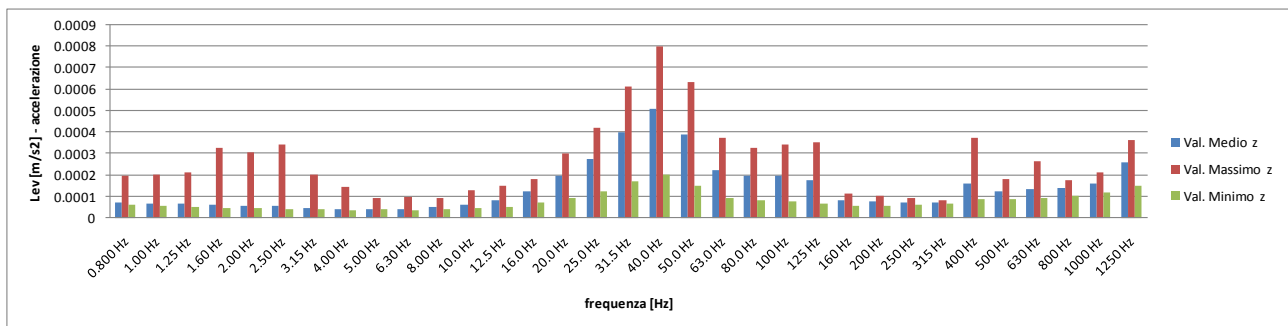
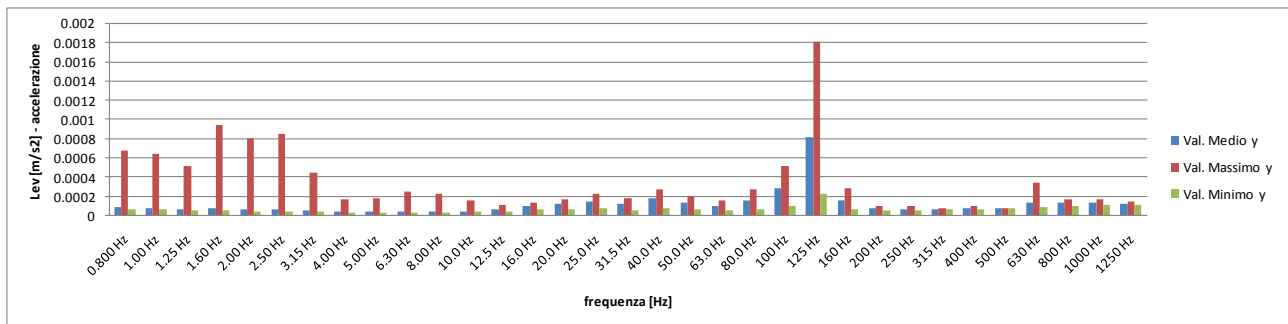
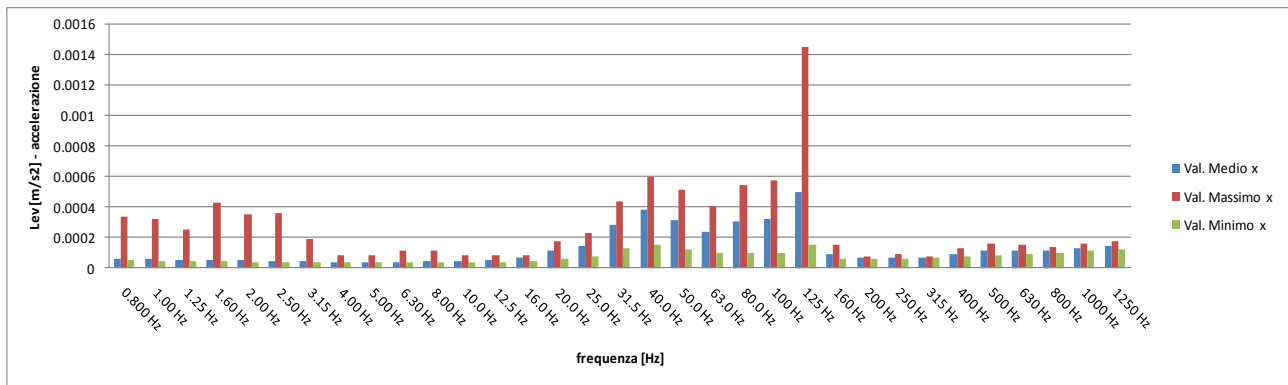
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

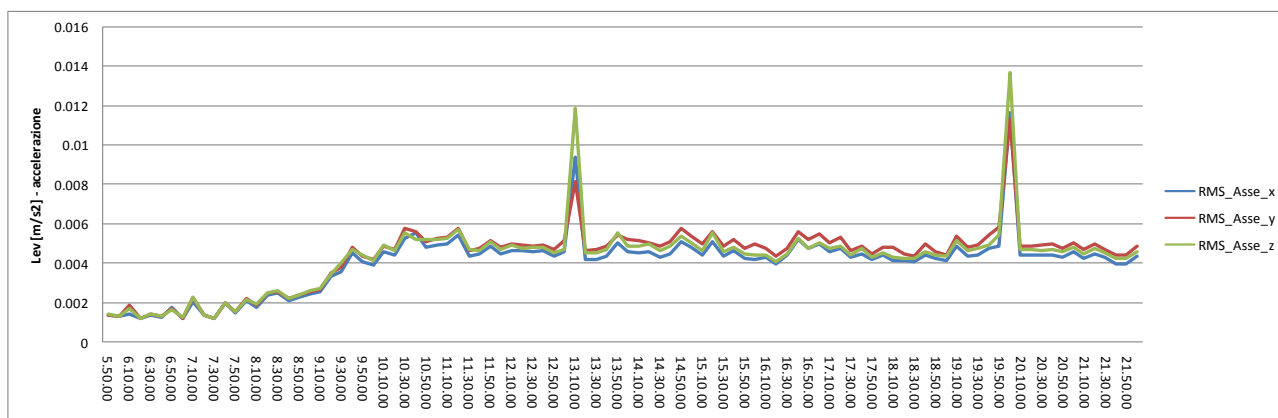


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

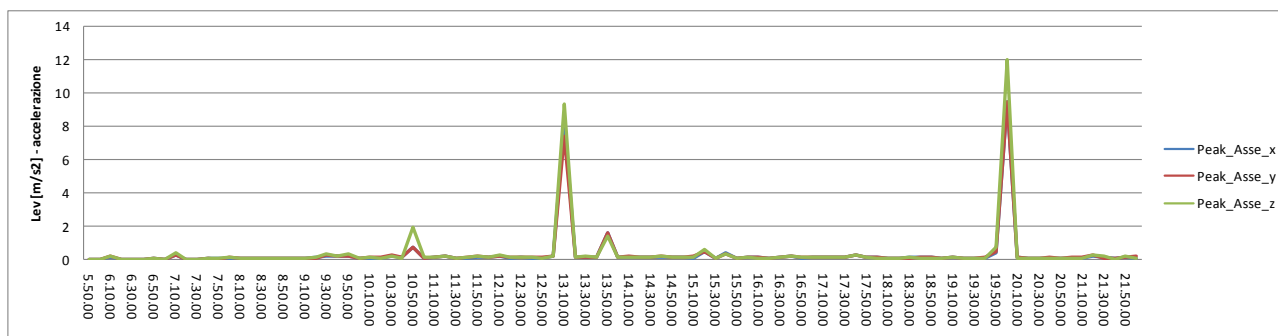


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

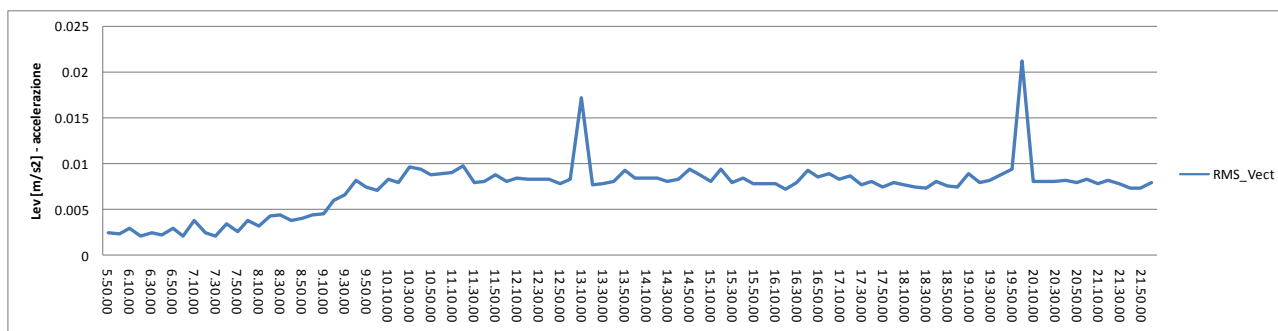
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: giovedì**



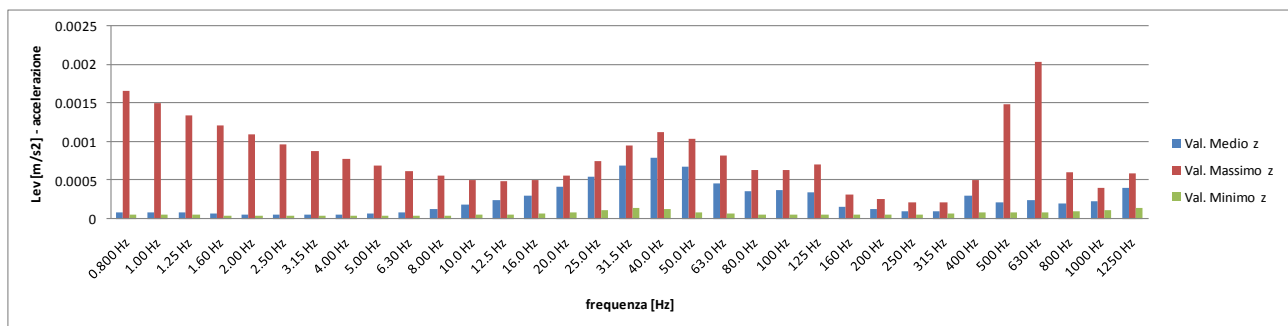
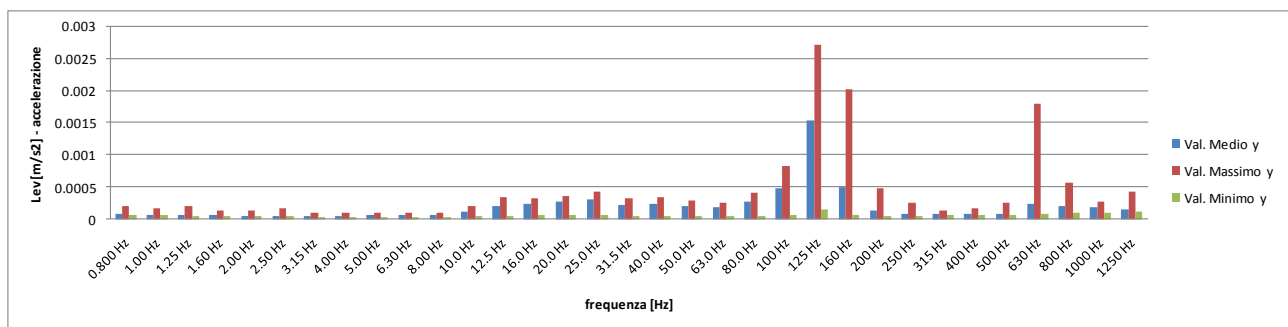
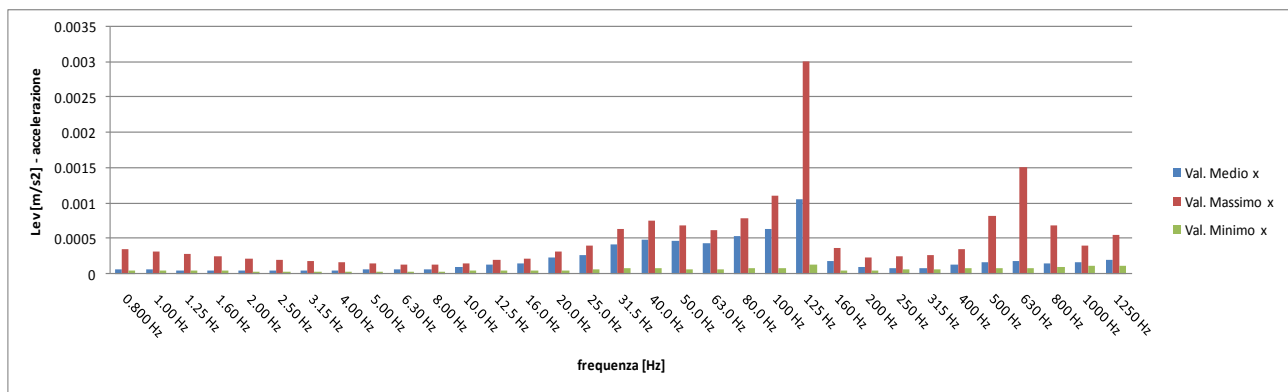
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

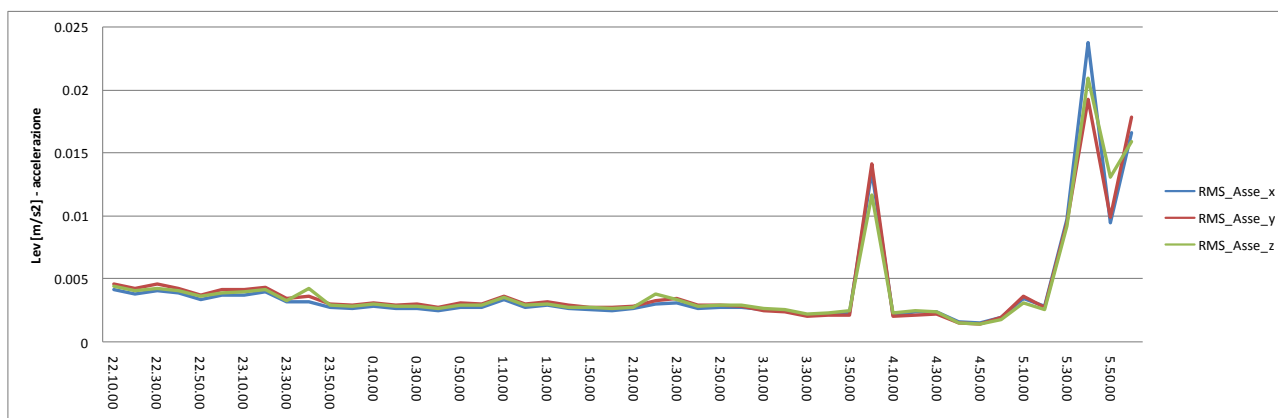


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

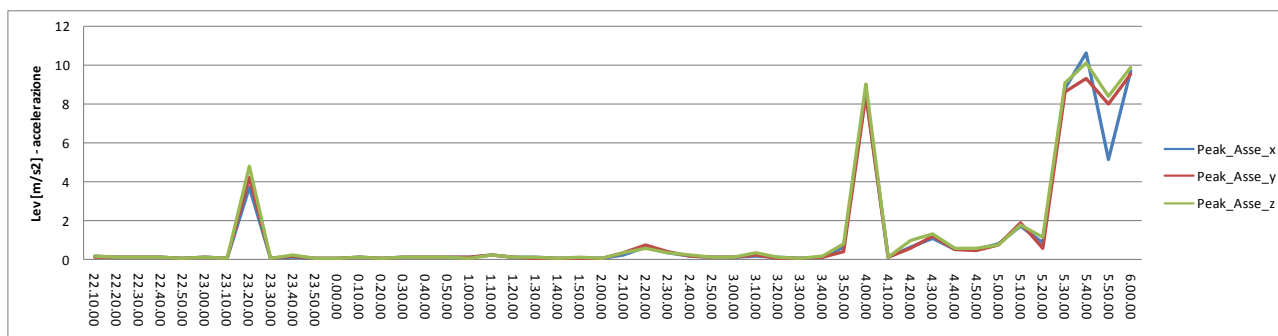


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

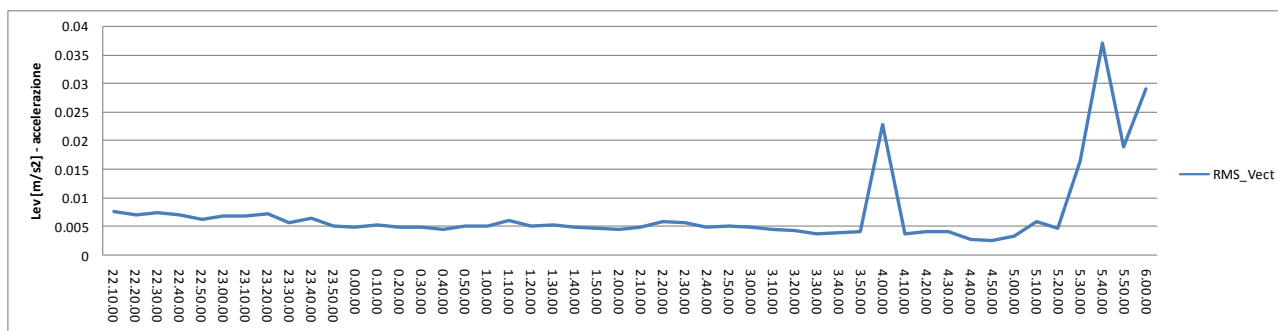
- **Quinto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: giovedì**



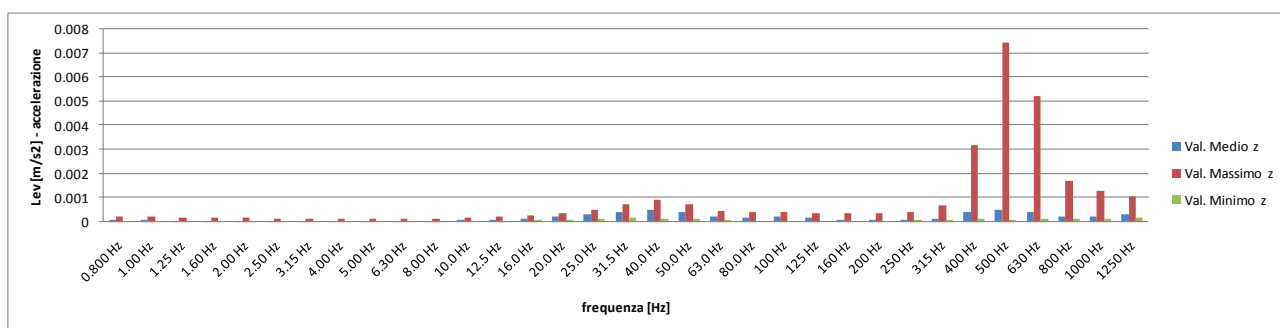
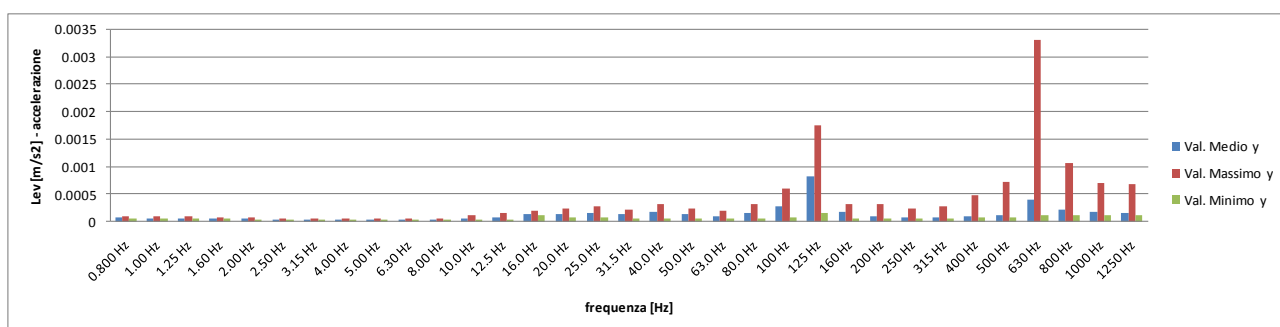
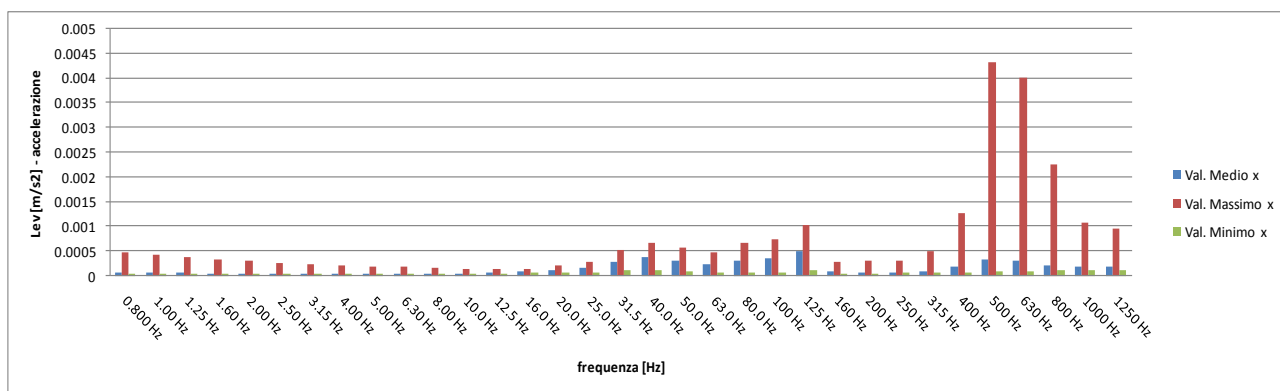
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

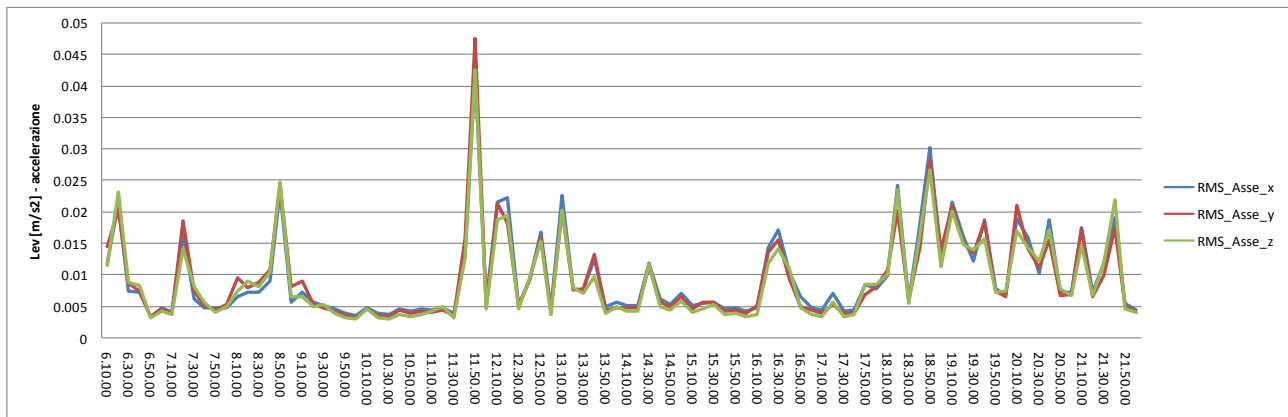


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

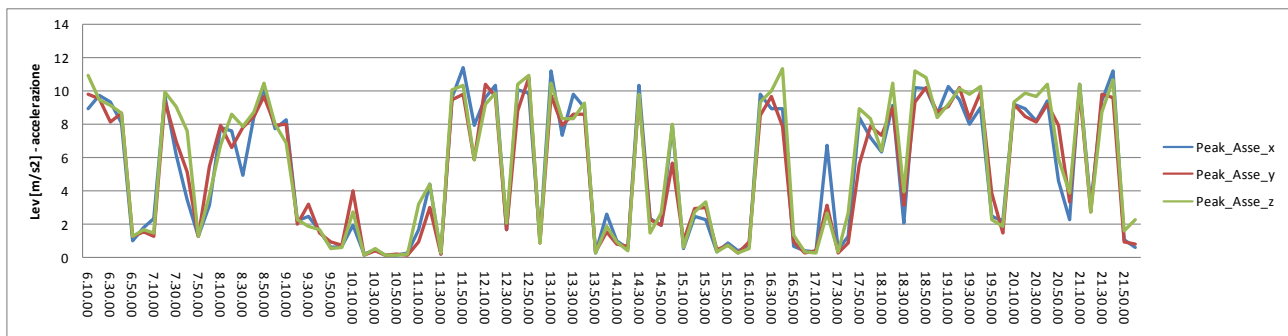


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

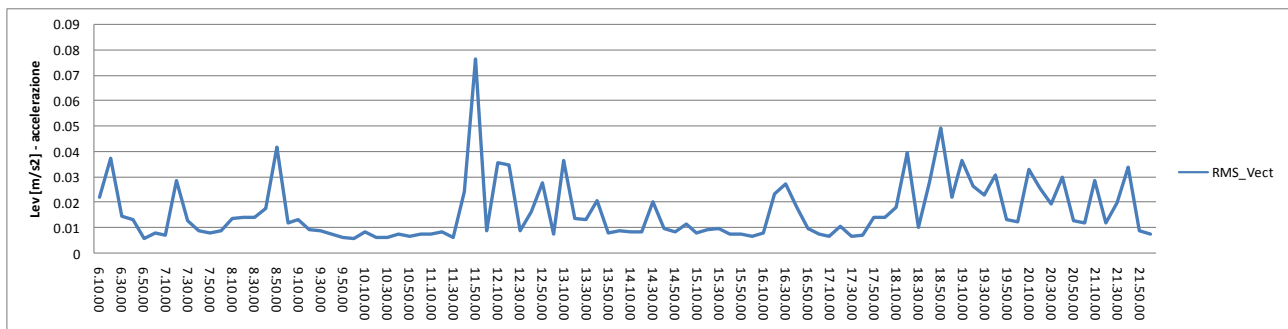
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento diurno: venerdì**



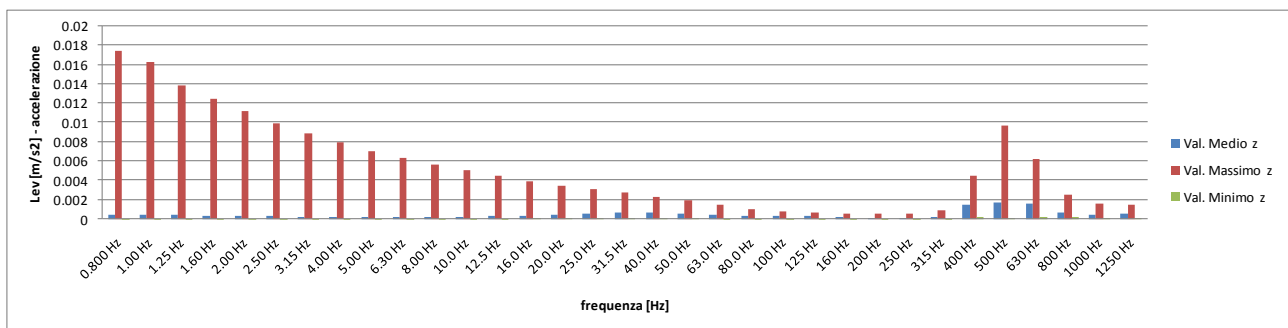
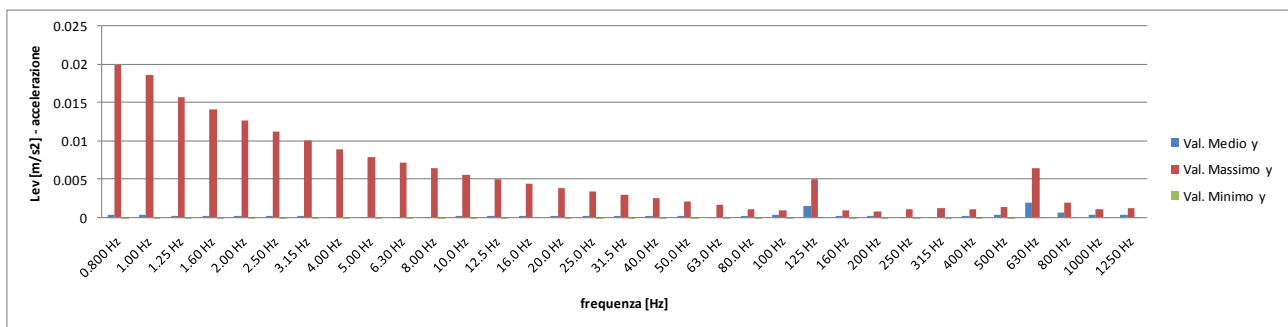
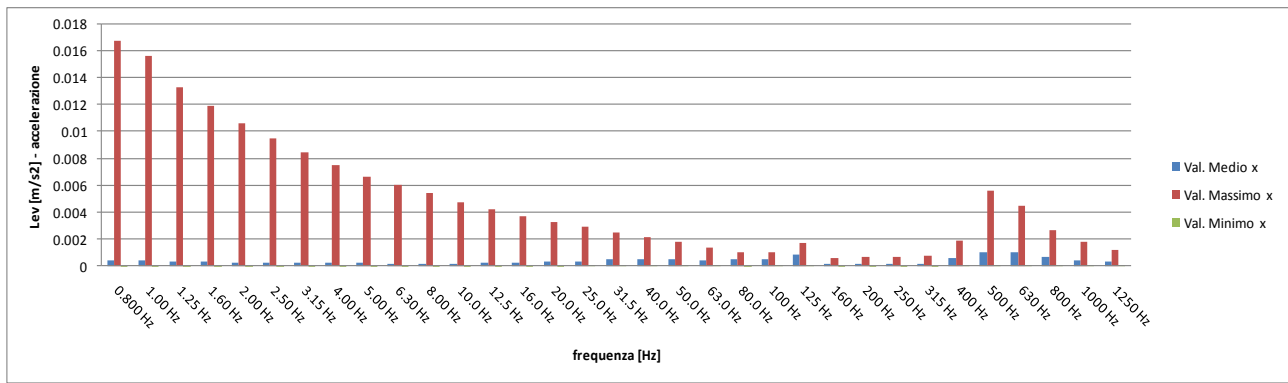
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

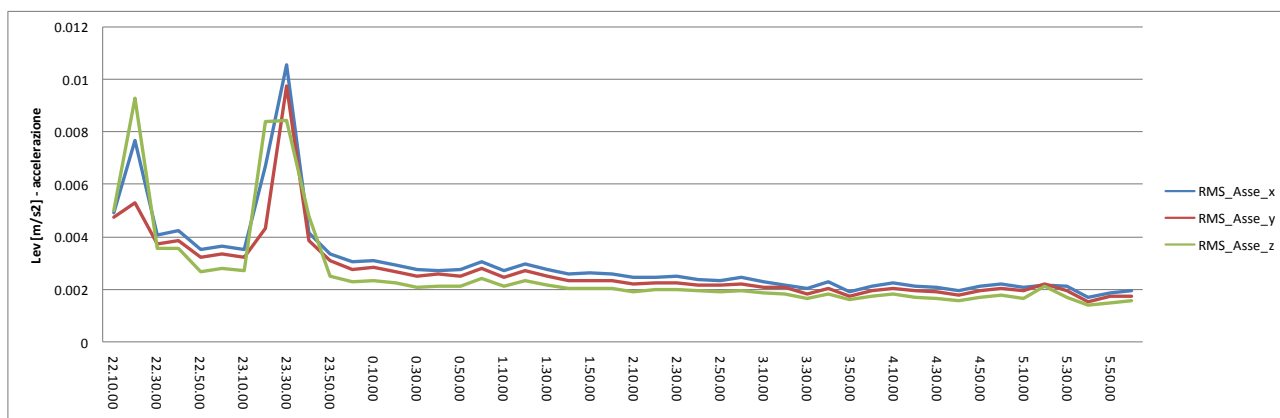


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

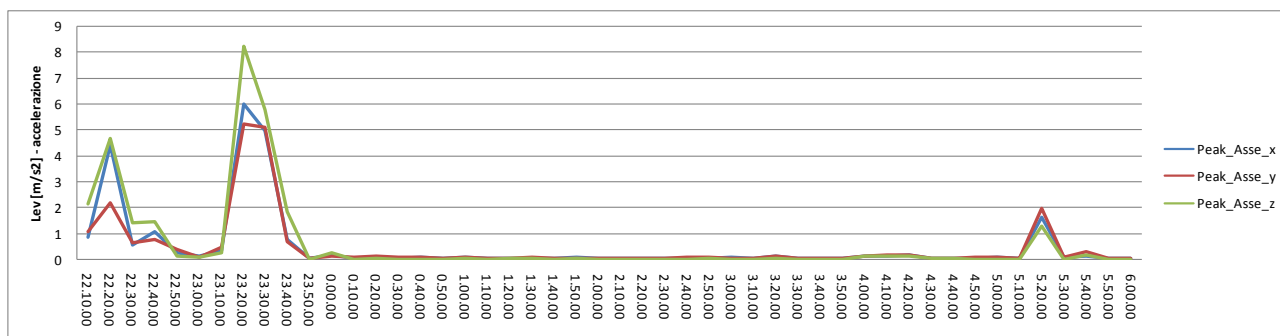


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

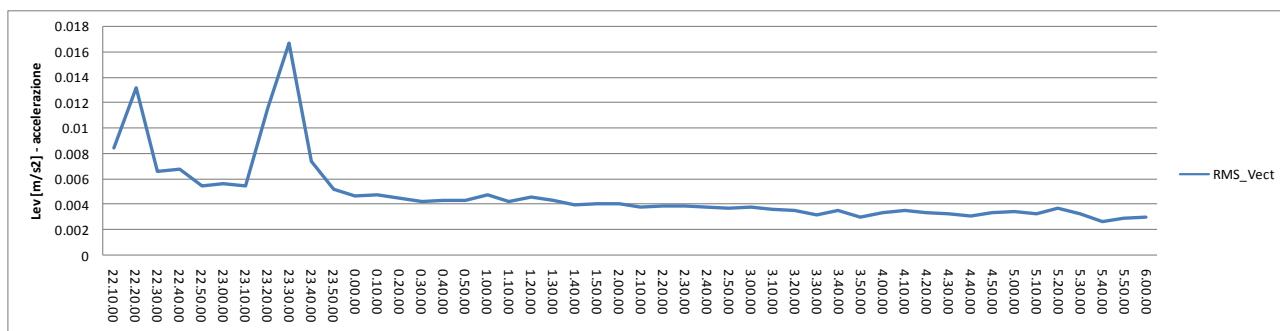
- **Sesto giorno di misura – periodo di riferimento notturno: venerdì**



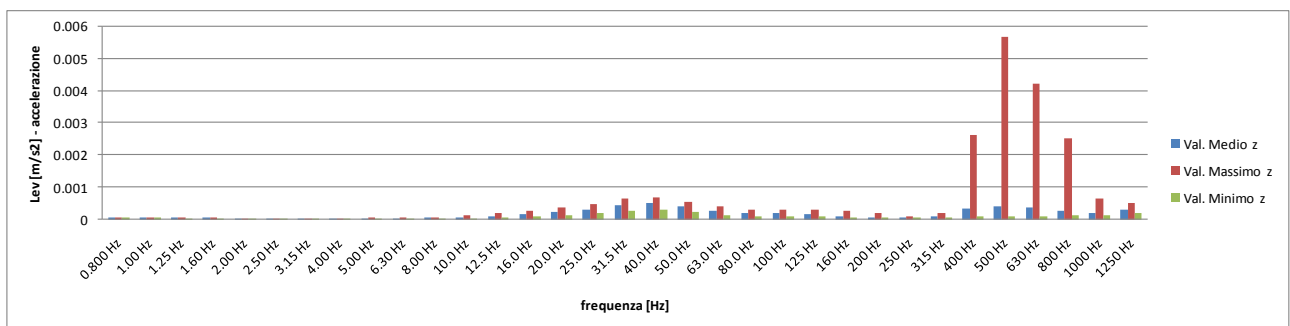
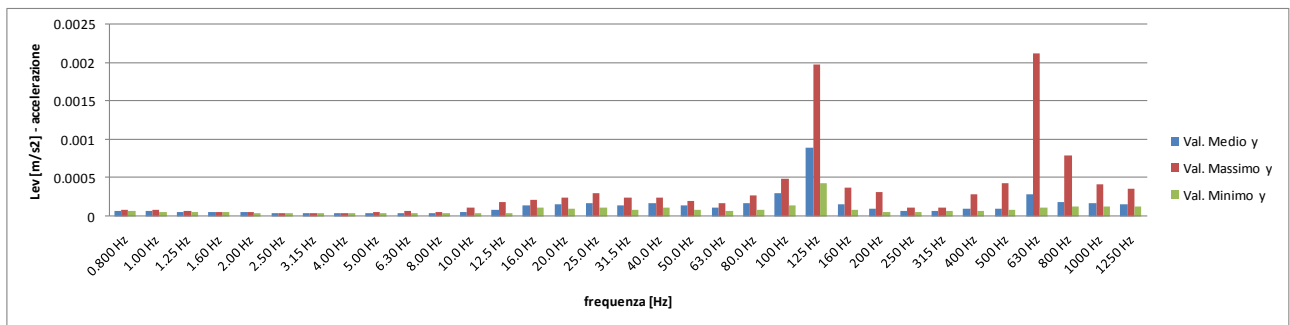
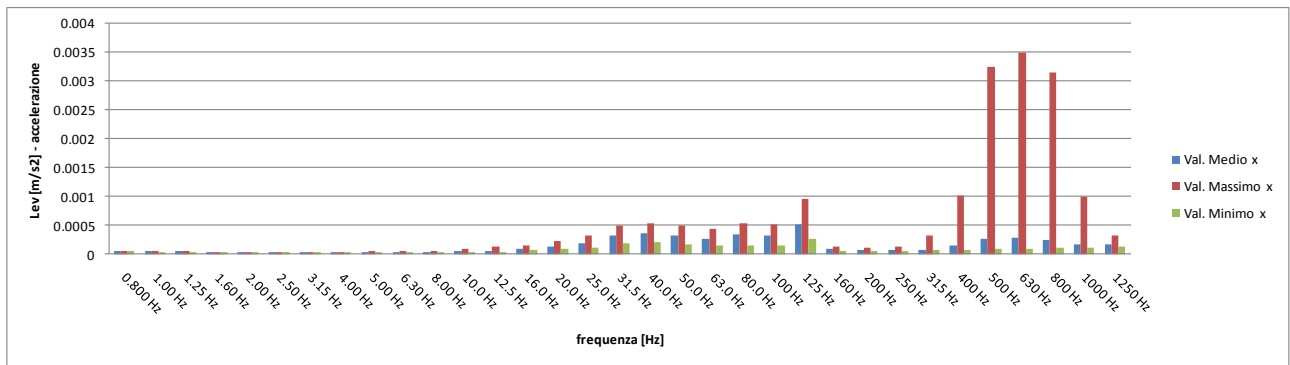
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione

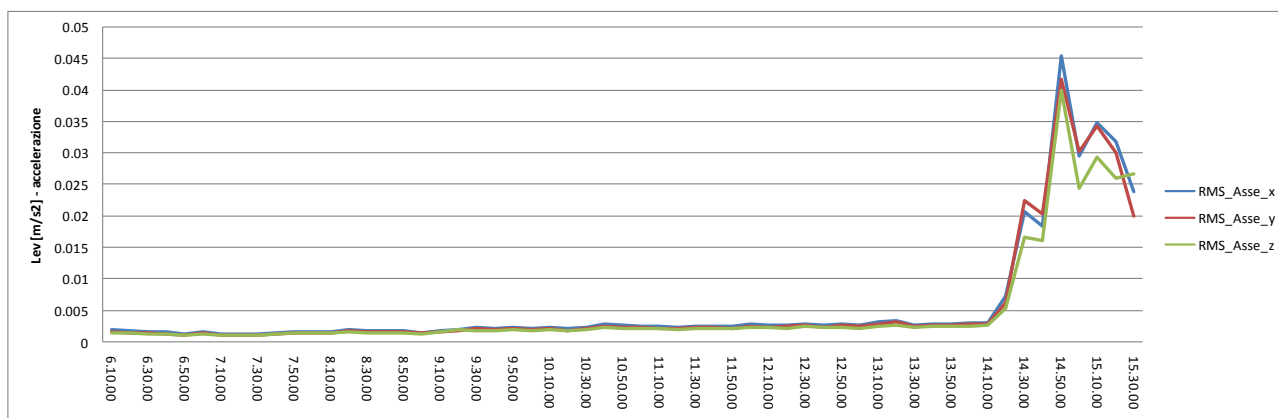


Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione

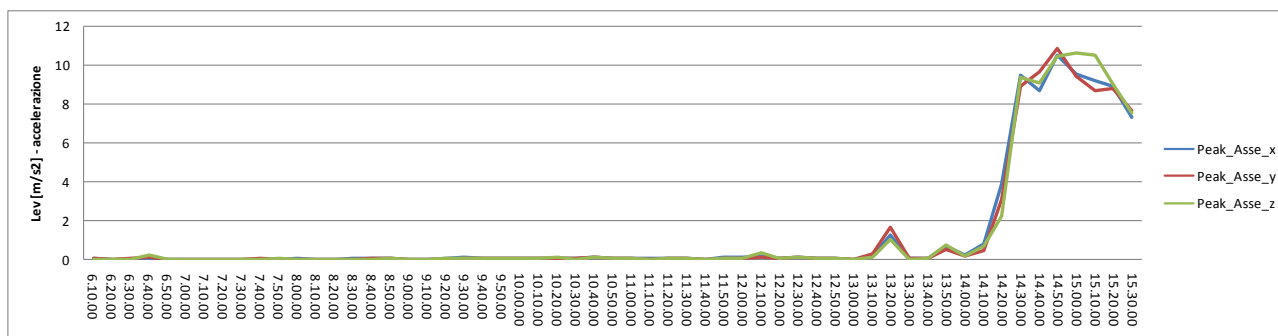


Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

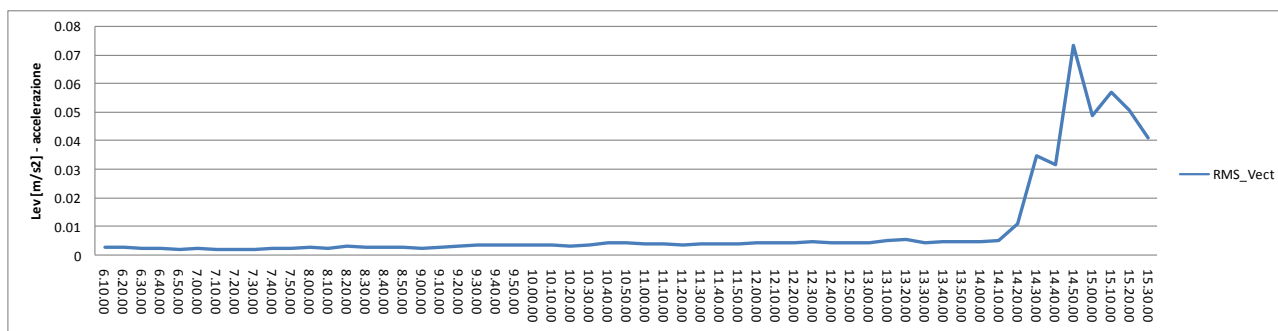
- **Settimo giorno di misura – periodo di riferimento diurno: sabato**



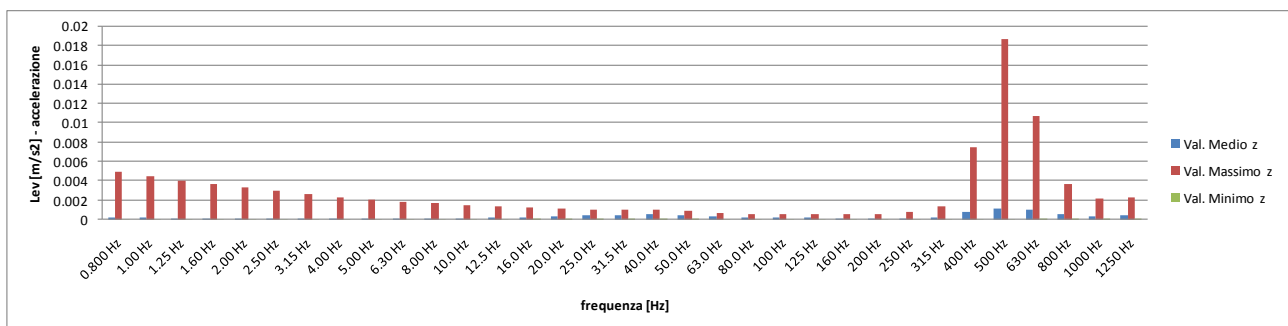
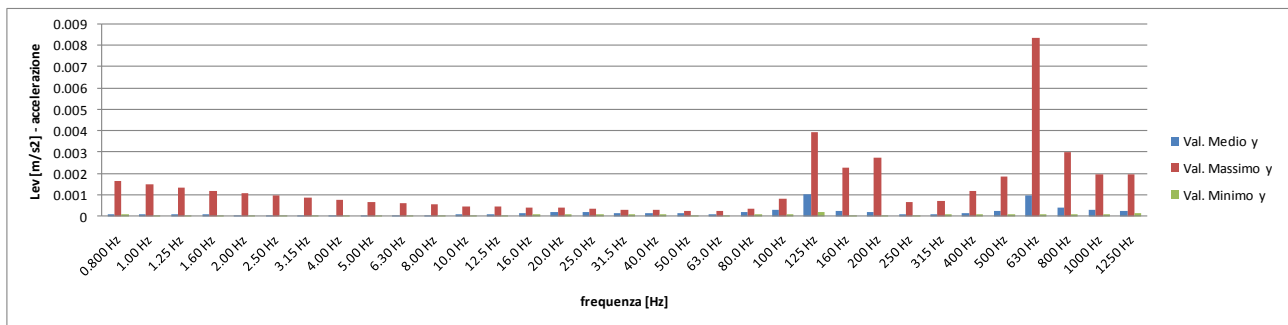
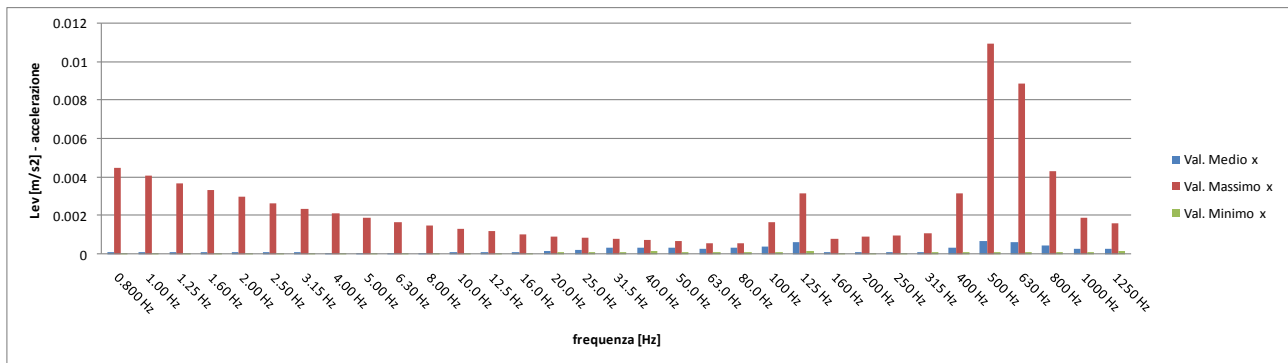
Andamento nel tempo dei valori RMS del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori Picco del segnale di accelerazione



Andamento nel tempo dei valori del vettore del segnale di accelerazione



Analisi energetica in frequenza del segnale misurato di accelerazione

11. ANALISI DEI RISULTATI

Nella presente ricerca di dottorato si è cercato di procedere all'analisi delle emissioni vibratorie legate ai flussi veicolari e dei mezzi pesanti lungo due grosse arterie di comunicazione : l'autostrada A4 e la tangenziale sud di Brescia.

Tali infrastrutture sono caratterizzate dall'aver una sostanziale omogeneità del terreno in prossimità delle infrastrutture, in modo tale che i risultati ottenuti possono essere sufficientemente confrontabili tra di loro.

Per brevità sono stati riportati i soli valori relativi all'ultima campagna di misure condotte lungo l'asse autostradale della A4 della tangenziale sud di Brescia.

Le indagini della ricerca di dottorato sono state svolte complessivamente per un totale di 12 punti di indagine settimanali per tipologia di infrastruttura, per un totale di 96 indagini settimanali triassiali dei parametri maggiormente significativi per le vibrazioni : il valore quadratico medio dell'accelerazione lineare ed il valore di picco.

La scelta della tangenziale è stata fatta in quanto l'infrastruttura sottoposta ad indagine è caratterizzata dall'aver un flusso continuo e molto eterogeneo dei mezzi: pesanti, leggeri ed autocarri.

Una prima difficoltà emersa nelle procedure di analisi dei dati, è stata la complessità nell'identificare uno spettro energetico medio da collegare a singoli passaggi per tipologia di veicolo.

Le infrastrutture sottoposte ad indagine sono caratterizzate da un flusso continuo e molto sostenuto di veicoli, per cui si è scelto di procedere, durante i rilievi presidiati, di verificare quali fossero gli eventi maggiormente presenti.

Tali eventi sono risultati essere il passaggio contemporaneo di circa 10/15 mezzi leggeri e 4 mezzi pesanti.

Si è proceduto quindi all'analisi ed all'identificazione dello spettro medio da potersi associare a tale evento, considerandolo l'evento base per l'analisi dei valori misurati e dei valori che potremmo ricavare con i modelli previsionali semplificati precedentemente esposti.

Dall'analisi dei diversi tracciati, si sono ottenuti i seguenti spettri medi di riferimento per gli eventi analizzati:

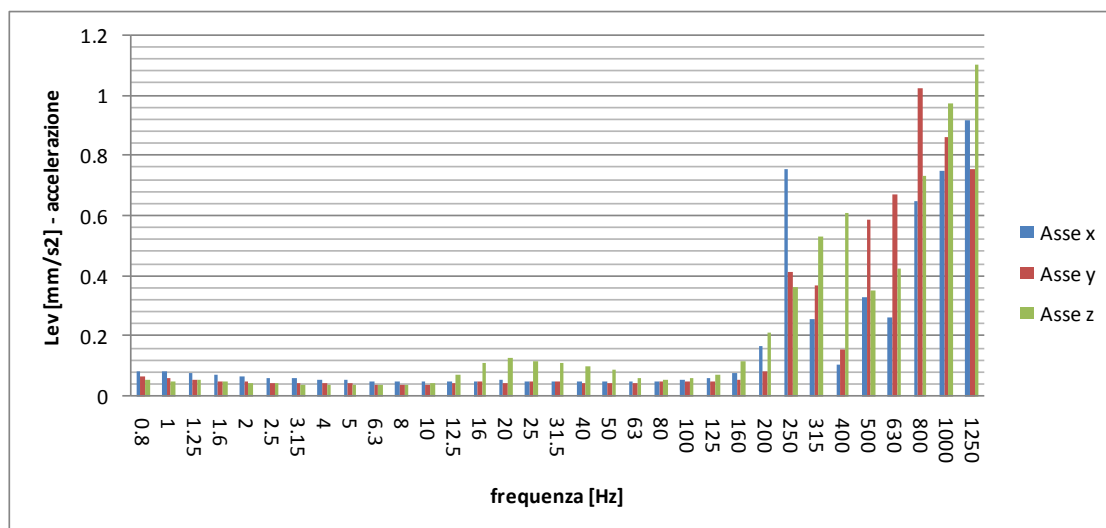


Fig. 42 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti)

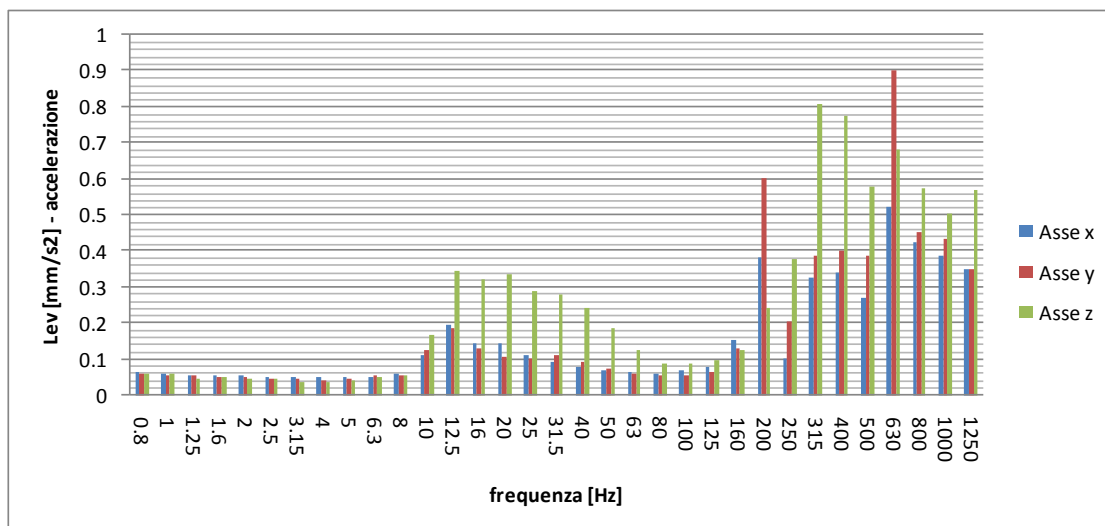


Fig. 43 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti e 10 leggeri) – distanza : 50 m

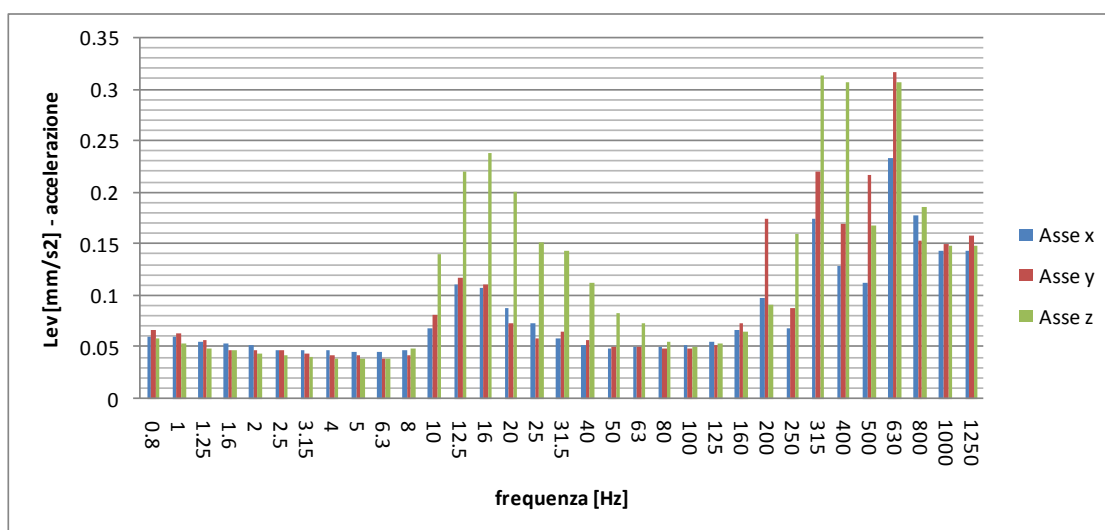


Fig. 44 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti e 10 leggeri) – prossimità infrastruttura

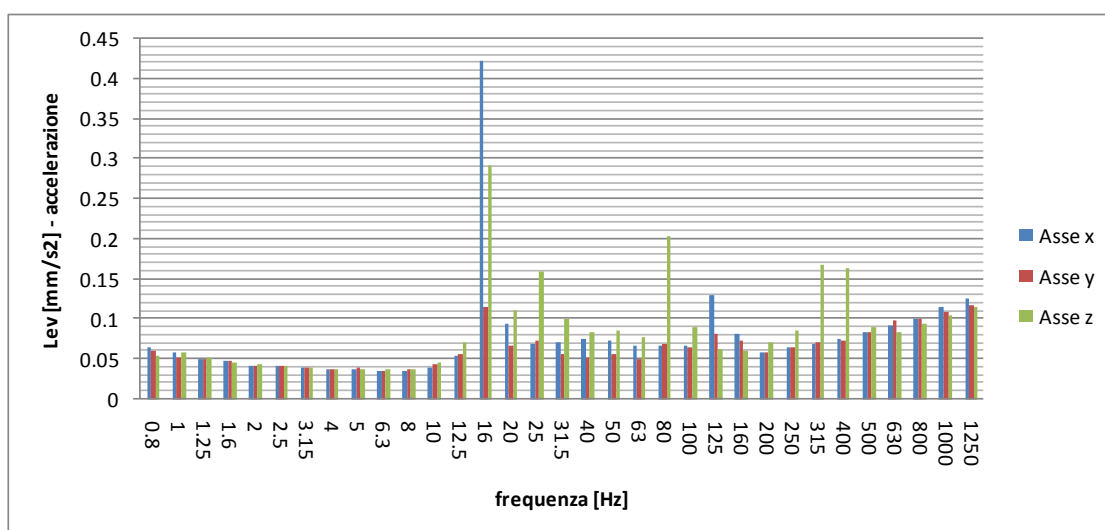


Fig. 45 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti e 10 leggeri) – distanza 70 m

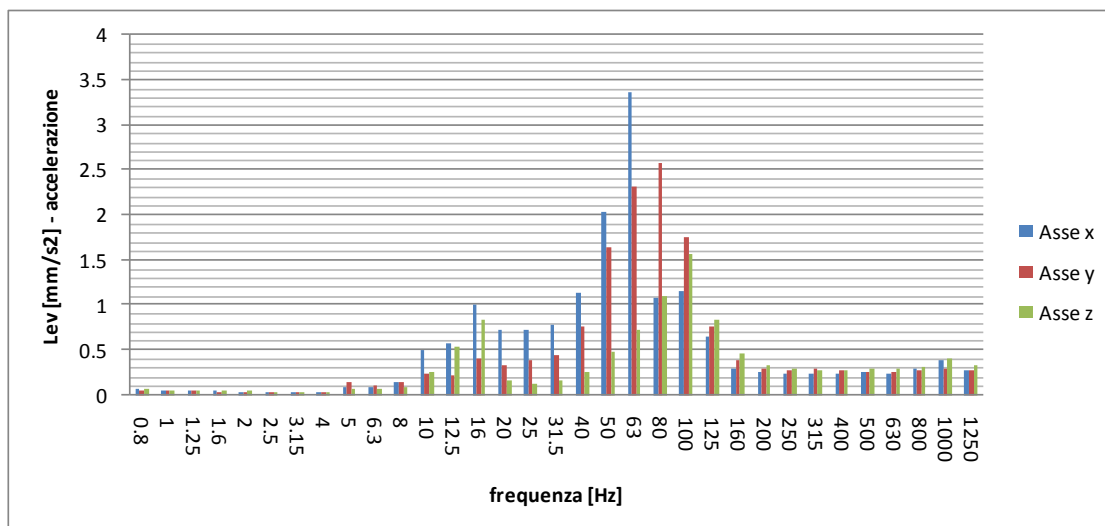


Fig. 46 : Analisi energetica eventi (10 leggeri) – distanza 70 m

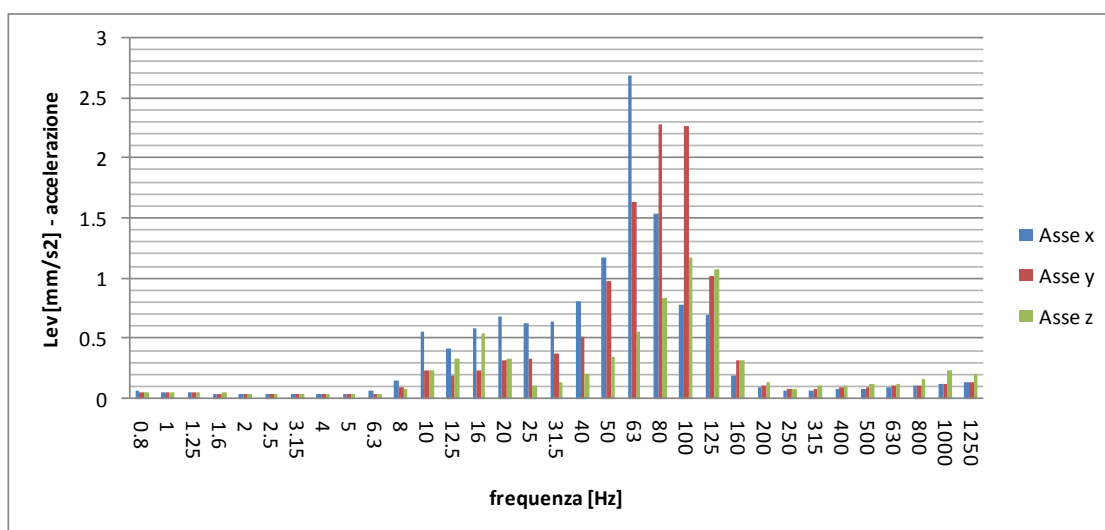


Fig. 47 : Analisi energetica eventi (10 leggeri) – distanza 50 m

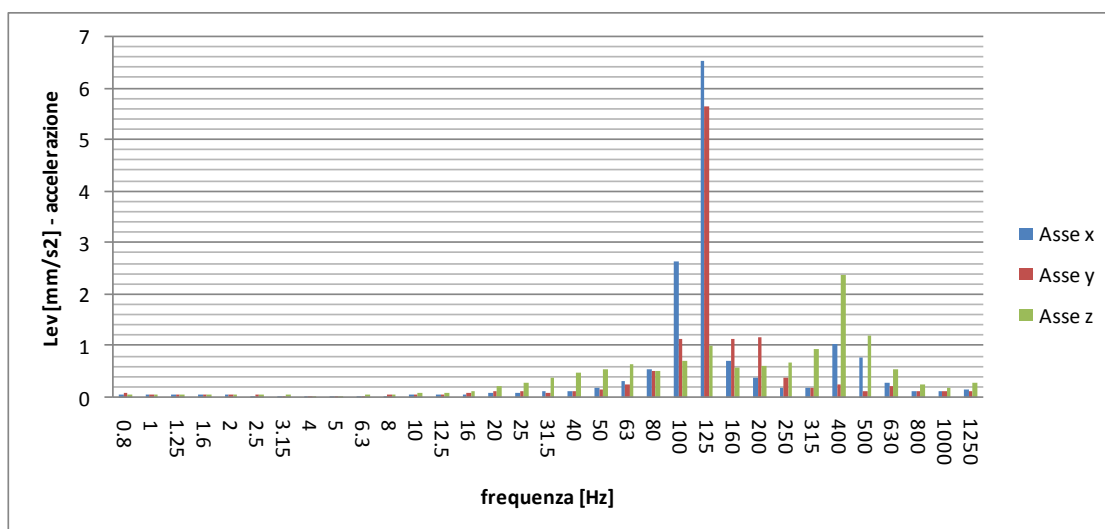


Fig. 48 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti) – distanza 70 m

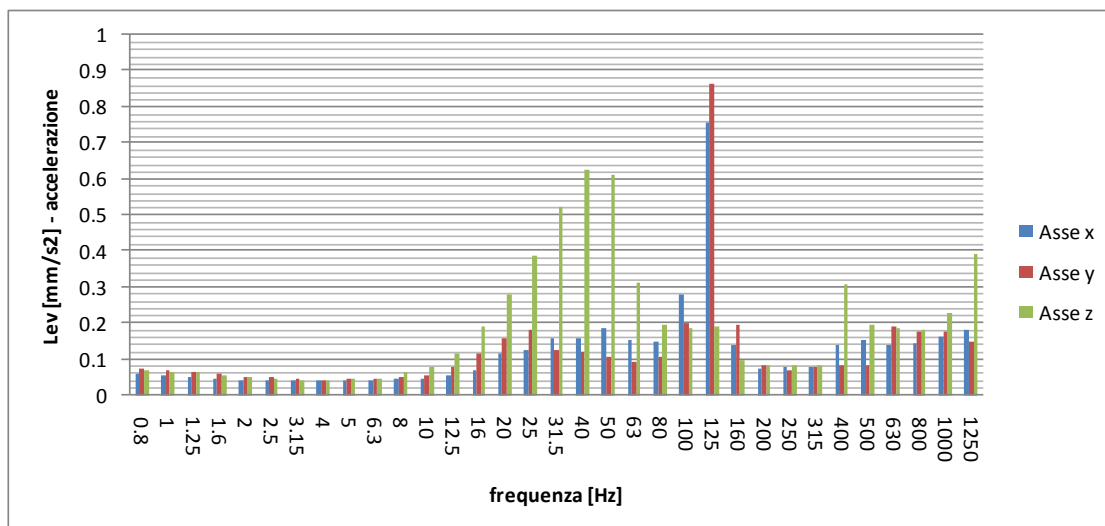


Fig. 49 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti) – bordo infrastruttura – punto 1

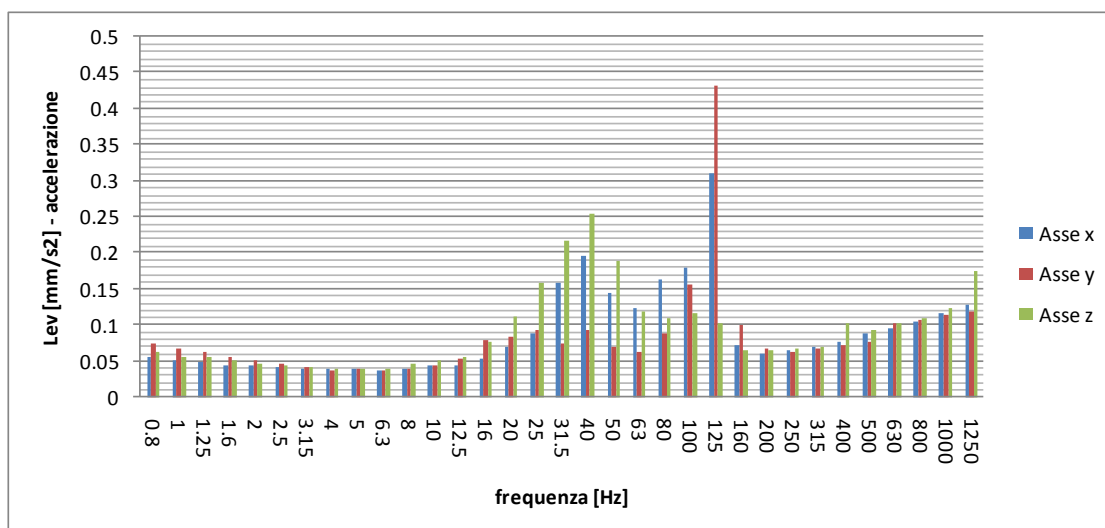


Fig. 50 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti) – bordo infrastruttura – punto 2

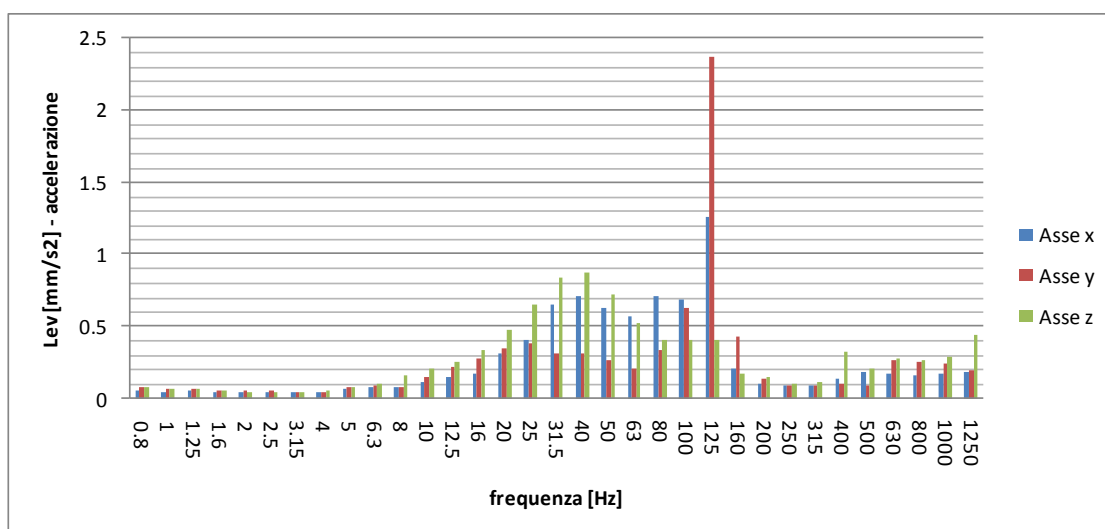


Fig. 51 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti) – bordo infrastruttura – punto 2

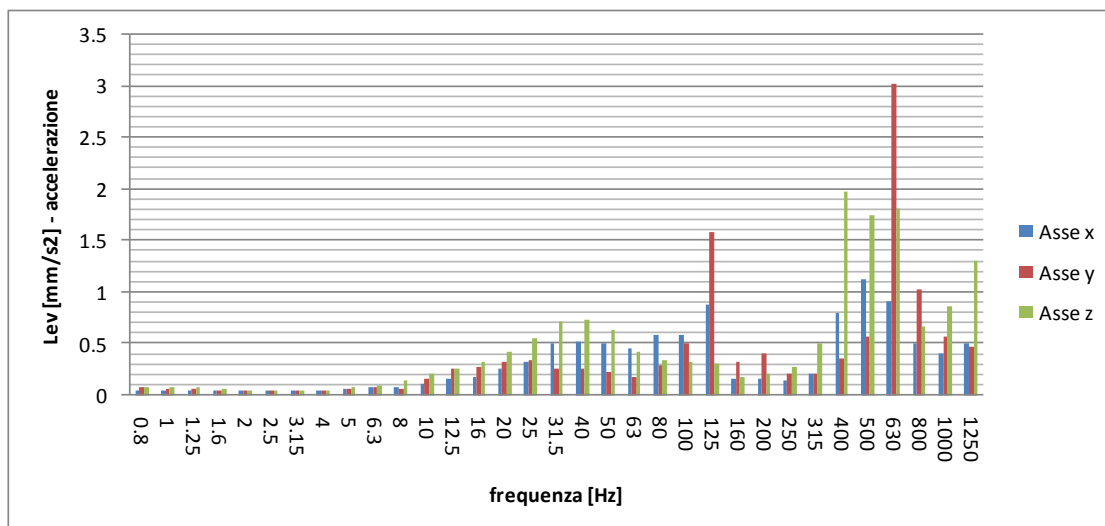


Fig. 52 : Analisi energetica eventi (10 automezzi pesanti e 10 leggeri) – bordo infrastruttura – punto 2

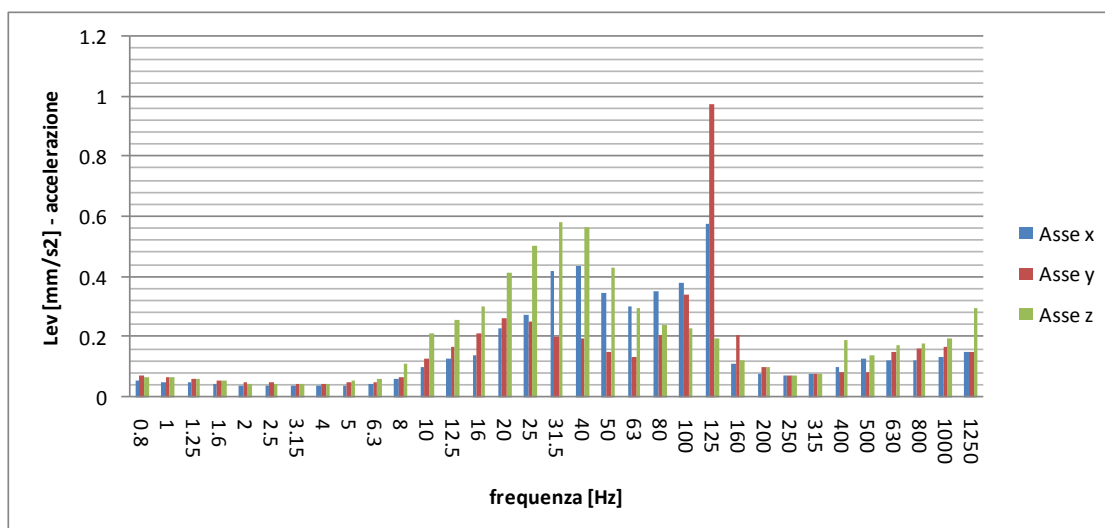


Fig. 53 : Analisi energetica eventi (10 automezzi leggeri) – bordo infrastruttura – punto 2

Come evidenziano i grafici di riepilogo sopra riportati, il numero dei flussi minimi contemporaneamente identificabili permette di avere degli spettri sufficientemente univoci dell'energia media trasmessa dal passaggio dei veicoli dall'infrastruttura nei confronti del terreno posto nelle immediate vicinanze. Si è infatti scelto di limitare la verifica dell'energia trasmessa entro i primi 70 m dall'infrastruttura di trasporto perché si ipotizza che il terreno in tale area in prossimità della stessa rimanga omogeneo.

Analizzando i dati si vede come alcune frequenze tipiche del comportamento dinamico del terreno si mantengano inalterate anche a media distanza dall'infrastruttura nei diversi punti scelti per il monitoraggio.

Tale evidenza verifica quando precedentemente esposto in merito ai modelli previsionali, ovvero, il valore misurato dell'accelerazione lineare trasmessa dal flusso minimo di veicoli identificati, si trasmette, per talune frequenze, caratteristiche del terreno, inalterata fino al raggiungimento dei primi ricettori sensibili ivi esposti.

Tale frequenza, se nota, abbinata ai valori che questa ricerca ha evidenziato per le diverse infrastrutture monitorate, permette di poter predire con sufficiente esattezza il livello di accelerazione lineare da attendersi in fondazione agli edifici maggiormente esposti, purché presenti nella prima fascia di distanza

dall'infrastruttura. Tale fascia si può considerare estesa, almeno in questa verifica sperimentale, fino a 100 m, ovvero fino alla distanza per la quale si possono ritenere omogenee le caratteristiche geologiche del terreno nei primi 15/20 m di profondità.

L'analisi dei dati evidenzia comunque una sostanziale riduzione del livello globale dell'energia meccanica misurata in prossimità dell'infrastruttura rispetto a quanto è possibile già misurare a breve distanza.

Tale evidenza sperimentale è giustificata dal comportamento dinamico della tipologia di terreno presente in prossimità dell'infrastruttura, che porta ad uno smorzamento della quantità complessiva di energia trasmessa.

Lo smorzamento evidenziato, comunque, in assenza di precipitazioni durante i monitoraggi, e di corsi d'acqua sotto la superficie, non cambia la suddivisione dell'energia trasmessa, mantenendola principalmente legata alla frequenza tipica del fenomeno vibratorio in propagazione nel mezzo di trasmissione.

12. CONCLUSIONI

L'aumentata domanda di trasporto su gomma porta ad una conseguente maggiore sensibilità delle popolazioni residenti e maggiormente esposte al rumore, ed ad una maggiore attenzione da parte dei tecnici verso il fenomeno delle vibrazioni meccaniche emesse dai mezzi di trasporto.

Gli studi di impatto ambientale per le nuove infrastrutture lineari di trasporto (DPCM 27/12/88) devono, ormai, necessariamente considerare la componente vibrazione visto l'aumentato numero di mezzi pesanti in circolazione sulle strade e la realizzazione di nuove infrastrutture per il trasporto sempre più veloce e sicuro delle merci e dei passeggeri.

La componente vibrazione viene spesso trascurata negli studi di impatto ambientale per numerosi motivi tra cui la forte dipendenza dei risultati dal punto di misura, la scarsa conoscenza della emissione da parte delle sorgenti e la varietà dei modi di propagazione dell'energia meccanica nel terreno che la stessa sorgente può eccitare in relazione anche alla composizione del terreno stesso.

Oltre a ciò, è evidente la mancanza, nel panorama normativo nazionale, di leggi che fissino i limiti ammissibili per la propagazione delle vibrazioni sulle strutture edilizie al fine di prevenirne eventuali danni arrecati ed eventuali condizioni di potenziale disturbo sull'uomo.

Questa presente tesi, riporta una sintesi dello studio condotto su alcune infrastrutture viarie di notevole importanza ed impatto sulla popolazione, presenti nel nord Italia.

Partendo dall'analisi del territorio su cui insistono le infrastrutture monitorate, si è proceduto alla raccolta di numerosi dati sperimentali.

Tale casistica, unica nel suo genere nell'attuale bibliografia in merito, ha permesso di ottenere dei risultati la cui validità permette di creare un punto di partenza sia per la futura taratura dei modelli previsionali sia per la creazione di una estesa banca dati di livelli di vibrazioni meccaniche emesse dai transiti dei veicoli pesanti e leggeri lungo le infrastrutture.

Dalle conclusioni del presente studio, e dalle evidenze emerse in sede di analisi dei risultati dei monitoraggi dei fenomeni vibratorii, potranno essere dedotti alcuni dei limiti da inserire nel futuro apparato normativo nazionale in termini di emissioni vibratorie delle infrastrutture.

Ulteriori analisi potranno essere condotte, seguendo la metodica tracciata dalla presente ricerca, al fine di caratterizzare il maggior numero possibile di infrastrutture esistenti, estendendo i risultati e la ricerca alle infrastrutture ferroviarie.

13. BIBLIOGRAFIA

- [1] Vestroni F., De Sortis A., Marzellotta R. (2004) - *Vibrazioni di natura antropica: il benessere delle persone e la sicurezza del costruito*. Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma La Sapienza – Atti del Convegno “ Ecosistema Roma”.
- [2] Mezzetti M. (2005) – *Danni negli edifici conseguenti a vibrazioni* – Laboratorio di acustica applicata.
- [3] Farina A. (2006) – *Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali*. Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale.
Rivista Neo-EUBIOS, n. 16. Maggio 2006 - ISSN 1825-5515
- [4] Materazzi A.L. (2001) – *Effetti delle vibrazioni di origine ambientale sulle costruzioni civili* – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia.
- [5] Coni M., Maltinti F., Portas S., Annunziata F. (1999) – *Criteri di progettazione di una metropolitana leggera in ambito urbano: un esempio applicativo sulla valutazione degli impatti ambientali* – Dipartimento Ingegneria del Territorio, Università degli Studi di Cagliari. – Convegno SIIV Cagliari 1999.
- [6] Barbaro S., Barrera G., Santamaria A.S., (2006) – *Messa a punto di una procedura teorico-sperimentale per la misura dell'impatto vibrazionale dovuto al traffico veicolare sugli edifici di interesse storico-artistico*. Conservation Science in Cultural Heritage - Vol 6 (2006) Quaderni di Scienza della Conservazione.
- [7] Fabbri A., (2007) – *Fenomeni vibratorii indotti da volate e da demolitori. Analisi e caratterizzazione delle cause di dispersione delle grandezze fondamentali* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Georisorse e Geotecnologie – XIX Ciclo – Università degli Studi di Bologna 27/08/2007.
- [8] UNI 9614 “*Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*”, Marzo 1990.
- [9] UNI 9916 “*Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*”, Aprile 2004.
- [10] DIN 4150-3 “*Effects of vibration on structures*”, Febbraio 1999.
- [11] ISO 4866 “*Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings*”, 1996.
- [12] UNI ISO 5348 “*Vibrazioni meccaniche ed urti. Montaggio meccanico degli accelerometri.*”, Marzo 1992.
- [13] UNI 11048 “*Vibrazioni meccaniche ed urti. - Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo.*”, Marzo 2003.

- [14] De Sortis A., Sanò T. (1997) – *La propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico*. Rivista “Le Strade” n. 9.
- [15] De Sortis A., Sanò T. (1999) – *Spettri di risposta del traffico stradale*. Rivista “Le Strade” n. 6.
- [16] Cestelli G., (1981) - *“Geotecnica e tecnica delle fondazioni”* – Vol. 2 - Edit. Hoepli, Milano.
- [17] Aiello V., (2001/2002) - *Vibrazioni prodotte da infrastrutture di trasporto in fase di costruzione e di esercizio* – Tesi di Laurea – Università degli Studi della Calabria – 2001/2002.
- [18] Simone A., Lantieri C., Vignali V., (2008) - *Vibrazioni da traffico in aree urbane: Effetti sugli edifici e tecniche di attenuazione*. – Atti del XVII Convegno Nazionale SIIV – Le reti di trasporto urbano, progettazione, costruzione, gestione - Enna 2008.
- [19] Di Mino G., Di Liberto C.M., (2008) – *Stato dell’arte degli interventi sul mezzo recettore e di propagazione per la mitigazione delle vibrazioni generate da sistemi di trasporto su ferro*. – Atti del XVII Convegno Nazionale SIIV – Le reti di trasporto urbano, progettazione, costruzione, gestione - Enna 2008.
- [20] Dondi G., Simone A., (2005) – *Soluzioni tecniche innovative per la mitigazione del rumore e delle vibrazioni da traffico stradale*. – Atti della Conferenza Nazionale sulla politica energetica in Italia. – Università di Bologna – 18-19 Aprile 2005.
- [21] Bucchi A., Dondi G., Bonini A., (1998) – *Generazione e propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico in aree urbane*. – Atti del VII Convegno Nazionale SIIV, Adeguamento funzionale e manutenzione delle infrastrutture viarie – Politecnico di Milano – 19-20 Ottobre 1998.
- [22] G. Dondi, A. Bonini, (2000) - *Propagazione delle vibrazioni da traffico: tecniche di mitigazione*, Atti del Convegno Nazionale Traffico e Ambiente, Centro Servizi Culturali S. Chiara, Trento, 21-25 febbraio 2000, pp. 469-489, Arti Grafiche Padovane (Padova), a cura di Alessandro Peretti e Paolo Simonetti.
- [23] Fracassa A., (1999) – Dottorato di ricerca in *“Infrastrutture di viabilità e trasporto”* – *Studio delle interazioni Treno – Sovrastruttura – Terreno – Ambiente* – Roma, Febbraio 1999.
- [24] G. Bongiovanni, P. Clemente, F. Persia, (2000) – *Centro Ricerche Casaccia ENEA (2000) – Vibrazioni indotte dal traffico sui monumenti* - Atti del Convegno Nazionale Traffico e Ambiente, Centro Servizi Culturali S. Chiara, Trento, 21-25 febbraio 2000, pp. 583-590, Arti Grafiche Padovane (Padova), a cura di Alessandro Peretti e Paolo Simonetti.
- [25] M. Acquati, S. Viganò, (2000) – *Metropolitana Milanese SpA –Armamenti antivibranti per metropolitane e tranvie* - Atti del Convegno Nazionale Traffico e Ambiente, Centro Servizi Culturali S. Chiara, Trento, 21-25 febbraio 2000, pp. 563-582, Arti Grafiche Padovane (Padova), a cura di Alessandro Peretti e Paolo Simonetti.

Ringraziamenti

Sento doveroso, alla fine di un percorso di dottorato di ricerca, ringraziare tutte le persone, che nel percorso fin qui fatto mi hanno donato parte della loro professionalità e passione per l'insegnamento.

Ringrazio il prof. Roberto Zecchin, il prof. Antonino Di Bella, il prof. Fabio Peron e l'Arch. Marcello Alderuccio dello IUAV per il supporto scientifico in questi anni di dottorato di ricerca.

Un ringraziamento speciale lo riservo al dott. Alessandro Peretti, perché grazie alla sua passione per il lavoro, ho potuto conoscere l'affascinante mondo delle vibrazioni meccaniche.

Il regalo più bello del mio percorso di dottorato sono tre colleghi, e grandi amici, con i quali ogni giorno condivido sfide ed emozioni senza le quali il mio lavoro non avrebbe un senso, e senza le quali il mio sogno, non sarebbe nato.

L'ultimo ringraziamento, ma non di certo per importanza, va ad Alessandra, il mio sole, il mio tesoro.