

Misure vibrazionali: monitoraggio del cantiere *[omissis]*

Estratti dalla relazione finale



Analisi svolte con il software *HoliSurface*®

4 luglio 2017



winmasw@winmasw.com

Sommario

1. Generalità	3
2. Dati e analisi	10
3. Sintesi dei risultati e conclusioni	32
4. Riferimenti bibliografici.....	37

www.winMASW.com

1. Generalità

Il presente lavoro di monitoraggio delle vibrazioni prodotte dalle attività di cantiere [omissis] è stato svolto secondo due direttive tecniche.

Da un lato si è verificato il semplice (per quanto fondamentale) non-superamento dei limiti di normativa (DIN4150), dall'altro, al fine di generalizzare i risultati e descrivere in modo completo il fenomeno vibratorio (specificatamente in relazione ai terreni presenti nell'area), si è andati ad analizzare l'attenuazione del segnale con la distanza, anche naturalmente considerando la folta bibliografia disponibile in merito.

In aggiunta, si è anche voluta verificare la risposta dell'edificio più prossimo all'area del cantiere (Ristorante [omissis]) rispetto le vibrazioni provocate in fase di lavorazione nell'area ad esso più prossima (AREA1 - vedi Figura 2.1).

Misure e analisi sono state effettuate giornalmente nelle due settimane da lunedì 27 marzo a venerdì 7 aprile 2017 e nella settimana 15-19 maggio 2017, secondo i criteri suggeriti dall'ampia letteratura disponibile (e.g. de Silva, 2005).

[omissis]

Figura 1.1. Ubicazione del cantiere [omissis].

Lo studio della propagazione (e quindi dell'attenuazione) delle onde sismiche in occasione di eventi sismici o, come nel caso oggetto del presente lavoro, in relazione ad attività di cantiere è ben nota e ampiamente descritta nella letteratura tecnico-scientifica.

In estrema sintesi, il fenomeno oggetto del monitoraggio svolto è determinato dalle attività di "palancatura" (inserimento di palancole) e "spalancatura" (rimozione delle stesse) svolto da un macchinario del genere di quello riportato in Figura 1.2. L'infissione/rimozione delle palancole è facilitata dall'applicazione di una vibrazione lungo l'asse verticale (le vibrazioni che si producono lungo gli assi orizzontali sono "effetti collaterali" indotti dalla complessa interazione tra palancola e suolo).

Tale attività induce delle vibrazioni che, naturalmente, si trasmettono nel terreno, propagandosi a distanza. Per una serie di ragioni sia geometriche che intrinseche del mezzo, l'ampiezza della vibrazione diminuisce con la distanza dalla sorgente delle vibrazioni stesse (che in questo caso è la macchina utilizzata per l'inserimento e rimozione delle palancole).

Sono due in particolare i fenomeni responsabili dell'attenuazione del segnale (vedi ad esempio Sato & Fehler, 2009):

- 1) fattori geometrici (l'energia va ad espandersi su un fronte/volume di terreno via via maggiore riducendosi conseguentemente di ampiezza);
- 2) fattori intrinseci legati a meccanismi di *attenuazione intrinseca* del segnale (parte dell'energia viene convertita in complesse deformazioni plastiche e in fenomeni termici).

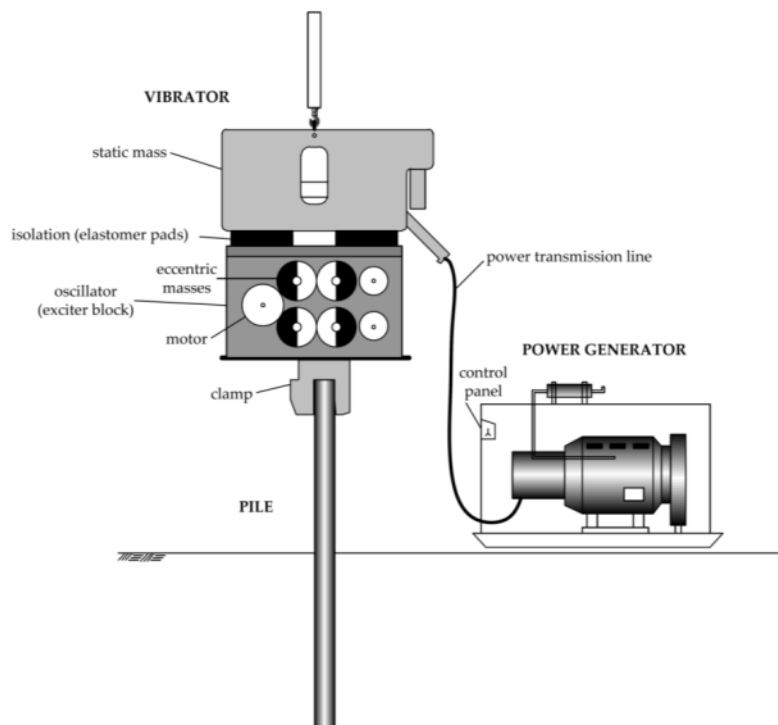


Figura 1.2. Schema della macchina utilizzata per le attività di infissione e rimozione delle palancole (da Deckner, 2013): l'infissione (o rimozione) delle palancole è svolta applicando una forza verticale con associata una vibrazione (applicata sempre lungo l'asse verticale) utile a favorire la penetrazione/estrazione della palanca nel/dal suolo.

Sono due le famiglie di onde che si generano nel caso qui considerato: le onde di volume (*body waves*) e le onde di superficie (*surface waves*) [vedi Figura 1.3]. Le prime si trasmettono all'interno dei materiali andando ad interessare volumi via via maggiori di terreno. Le seconde invece si propagano solamente in superficie (penetrano molto poco rispetto il piano di campagna) e, per questo motivo, subiscono una minore attenuazione di carattere geometrico. Nel primo caso infatti (onde di volume) l'energia viene per così dire diluita all'interno di una semisfera (volume), mentre nel secondo caso all'interno di una circonferenza. Ne consegue che l'ampiezza delle onde di superficie decresce in modo minore rispetto le onde di volume o, se vogliamo, mantiene per più tempo (cioè spazio) una certa ampiezza.

A questo si aggiunga il fatto che una forza di carattere verticale (come quella applicata in fase di infissione o rimozione delle palancole) già all'origine genera molte più onde di superficie che di corpo. In termini percentuali si calcola (Miller & Pursey 1955) che l'energia sprigionata da una forza verticale si trasformi per oltre due terzi in onde di superficie (essenzialmente onde di Rayleigh) e per il restante terzo in onde di volume.

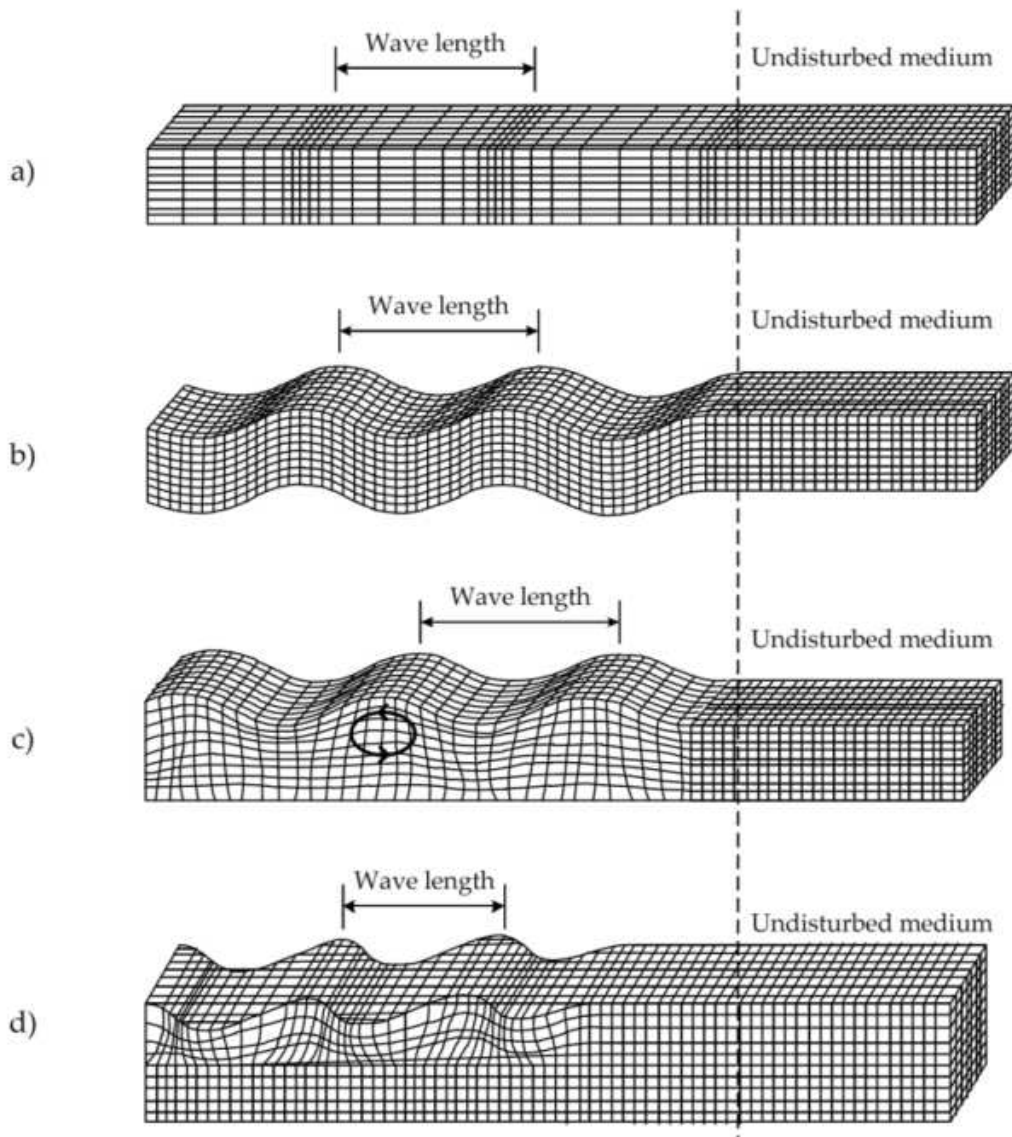


Figura 1.3. Dall'alto verso il basso: onde di volume (di tipo compressionale, P e di taglio, S) e onde di superficie (Rayleigh e Love).

Relativamente alle vibrazioni indotte dalle attività di cantiere del tipo di quelle poste in essere nell'area [omissis], riportiamo qui di seguito due grafici che sintetizzano quanto di più puntuale interesse per il caso in esame (le definizioni delle *direzioni* [verticale, radiale e trasversale] sono definite in Figura 1.4).

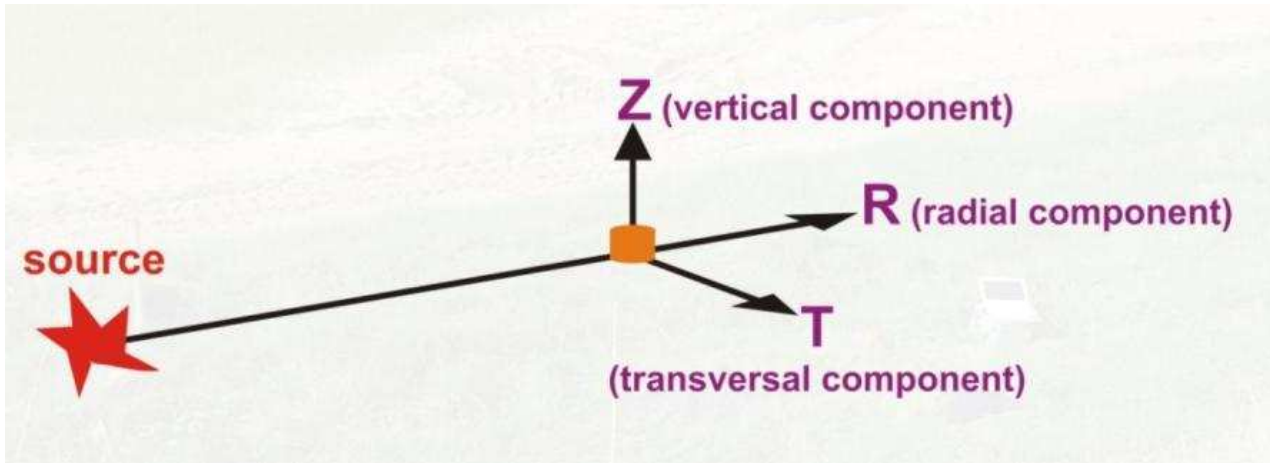


Figura 1.4. Definizione delle direzioni verticale (Z), radiale (R) e trasversale (T) rispetto la sorgente (*source*).

La Figura 1.5 riporta i valori di massima velocità osservati in funzione della distanza dalla sorgente in relazione ad attività di cantiere analoga a quella considerata per il cantiere [omissis]. Considerando che gli assi utilizzati sono di carattere logaritmico, si può notare l'esponenziale decremento dell'ampiezza della vibrazione all'aumentare della distanza dalla sorgente. Si noti come (considerando la media dei dati) già a circa 3 m dalla sorgente, il valore dell'ampiezza della vibrazione sia di indicativamente 8 mm/s (a 1 m dalla sorgente invece il valore appare di circa 30 mm/s).

I dati riportati in Figura 1.6 (tratti da altro studio) appaiono del tutto analoghi ai precedenti: considerando la media dei dati, anche qui già a circa 3 m dalla sorgente, il valore dell'ampiezza massima della vibrazione risulta di indicativamente 10 mm/s, scendendo poi a circa 2 mm/s a 11 m di distanza dalla sorgente.

Abbiamo qui sottolineato tali valori in quanto, per edifici comuni quali tutti quelli presenti nell'area attorno al cantiere [omissis], la normativa DIN4150 indica come valori di soglia (al di sopra dei quali sono possibili danni strutturali agli edifici) ampiezze di vibrazione tra i 5 e i 15 mm/s a seconda della frequenza della vibrazione stessa (per vibrazioni a 10 Hz il limite è di 5 mm/s, mentre per frequenze di vibrazione di 50 Hz il limite sale a 15 mm/s).

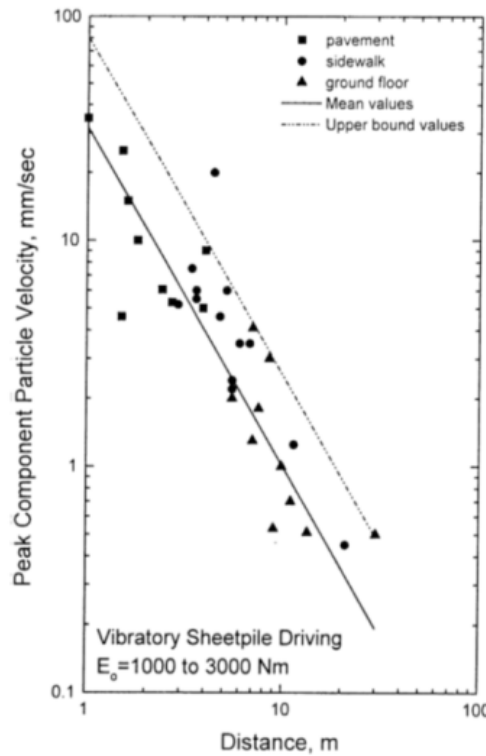


Figura 1.5. Decremento (cioè attenuazione) della massima velocità (*Peak Velocity*) in funzione della distanza in caso di sorgente analoga a quella utilizzata nel cantiere oggetto di studio. Da Athanasopoulos & Pelekis (2000).

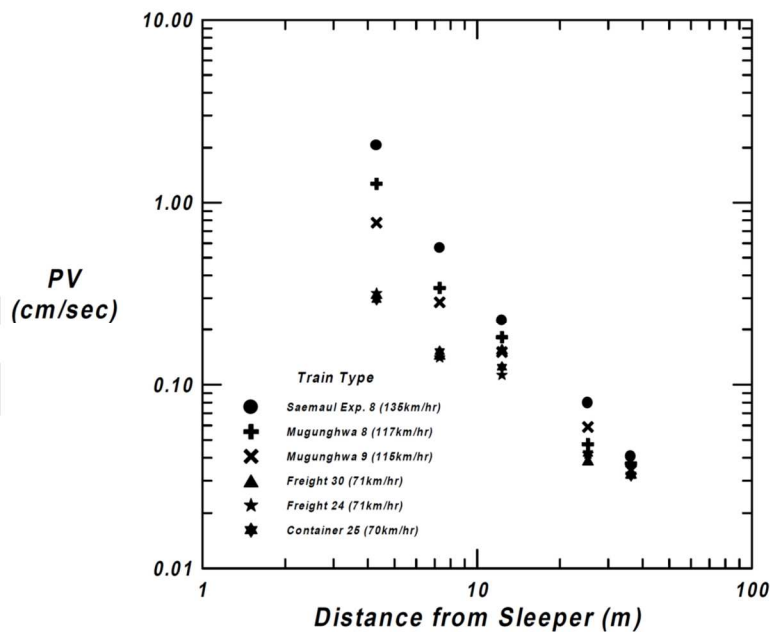


Figura 1.6. Decremento della massima velocità (*Peak Velocity - PV*) in funzione della distanza in caso di sorgente analoga a quella utilizzata nel cantiere oggetto di studio (grafico tratto da Kim & Lee, 2000). Come si può notare, l'andamento è del tutto analogo ai dati di Athanasopoulos & Pelekis (2000) riportati in Figura 1.5 [si ponga attenzione alle diverse unità di misura - qui in cm/s mentre nel precedente caso in mm/s].

Questo genere di dati, di carattere empirico, sono naturalmente descritti anche su un piano teorico. L'equazione comunemente utilizzata per esprimere il decremento di massima ampiezza del segnale in funzione dell'offset (cioè della distanza sorgente-punto di osservazione) è quella riportata ad esempio da Massarsch & Fellenius (2008):

$$A_2 = A_1 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{-n} e^{-\alpha(R_2-R_1)} \quad \text{eq. 1}$$

dove

A_1 = ampiezza della vibrazione alla distanza R_1 dalla sorgente

A_2 = ampiezza della vibrazione alla distanza R_2 dalla sorgente

α = coefficiente di assorbimento

Per le onde di superficie (le più ampie e quindi potenzialmente più dannose), il coefficiente n è pari a 0.5.

Il fattore α è facilmente determinato sulla base della seguente relazione:

$$\alpha = \frac{2\pi f D_M}{c_R} \quad \text{eq. 2}$$

dove

D_M = *damping* del materiale

f = frequenza della vibrazione

c_R = velocità dell'onda di superficie

Il valore del parametro D_M può essere calcolato dall'analisi di dati multi-offset o, in caso questi non siano disponibili, assunto tra 3 e 5% (vedi Massarsch & Fellenius, 2008). I valori caratteristici delle c_R può essere calcolato analizzando la propagazione delle onde di superficie o, noti i terreni del sito, facilmente stimato (Dal Moro, 2012; 2014).

Per dare un quadro ancora più puntuale ed esaustivo, riportiamo in Figura 1.7 i limiti indicati dalla normativa DIN4150. In estrema sintesi, i limiti di ampiezza delle vibrazioni al di sopra dei quali sono possibili danni di carattere strutturale sono funzione sia della tipologia di edificio (*classe 1* = edifici di carattere industriale; *classe 2* = edifici comuni; *classe 3* = edifici e monumenti di carattere storico particolarmente sensibili) che della frequenza della vibrazione.

Nel caso in esame (tipologia degli edifici presenti nell'area in esame) abbiamo evidentemente a che fare con la *classe 2* (edifici comuni) e, per quanto vedremo illustrando le analisi delle misure effettuate, la frequenza di riferimento (quella alla quale lavora la macchina utilizzata per le attività di cantiere) è attorno ai 35 Hz.

È d'uopo sottolineare come la frequenza utilizzata dal macchinario di cantiere (molto alta rispetto a quella tipica degli edifici - vedi oltre) è scelta dai produttori di questa tipologia di macchine proprio per non andare a interferire con le frequenze tipiche degli edifici (molto più basse).

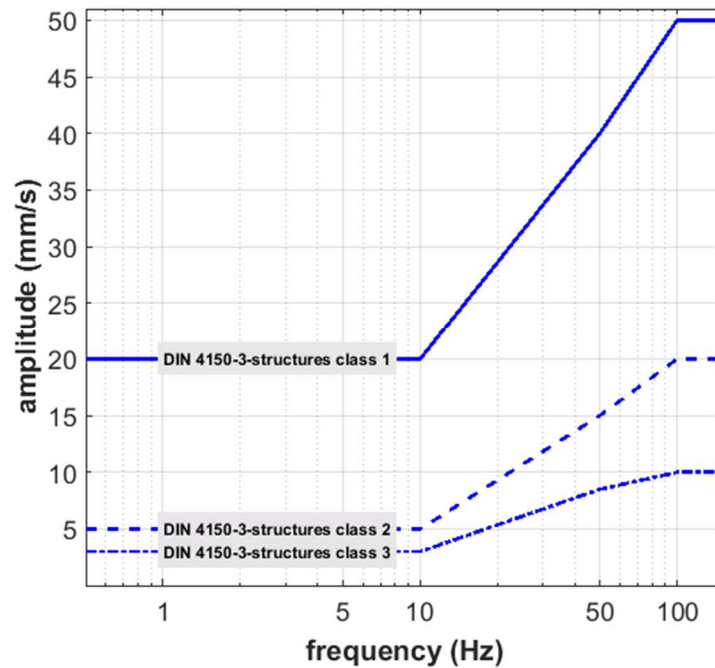


Figura 1.7. Limiti suggeriti dalla normativa DIN4150 riguardante le massime ampiezze (velocità di picco) al di sopra delle quali possono verificarsi danni di carattere strutturale alle tre tipologie di edifici considerati (classe 1= edifici di carattere industriale; classe 2 = edifici comuni; classe 3 = edifici particolarmente sensibili di carattere storico).

In alcune sezioni di questo rapporto tecnico si farà anche riferimento al *rapporto* o alla *variazione percentuale*, definiti dalle seguenti equazioni:

$$\frac{x_f}{x_i} 100 \quad \text{eq. 3}$$

$$\left[\left(\frac{x_f}{x_i} 100 \right) - 100 \right] \% \quad \text{eq. 4}$$

A quanto riassunto sino a qui, al fine di fornire un quadro complessivo del fenomeno oggetto di studio, aggiungiamo che le frequenze caratteristiche di un edificio in muratura di 2 o 3 piani, si aggirano tra i 5 e i 10 Hz (limiti minimi e massimi - vedi Chopra & Goel (2000) e Hong & Hwang (2000)) mentre le frequenze di lavorazione dei macchinari utilizzati nel cantiere in oggetto varia tra i 35 e i 40 Hz circa (vedi misure e analisi di seguito riportate).

2. Dati e analisi

Nelle successive pagine sono riportate le analisi effettuate su alcuni dei dati acquisiti nella giornata di lunedì 9 gennaio 2017 e nelle tre settimane considerate (due settimane da martedì 28 marzo a venerdì 7 aprile 2017 e settimana 15-19 maggio 2017).

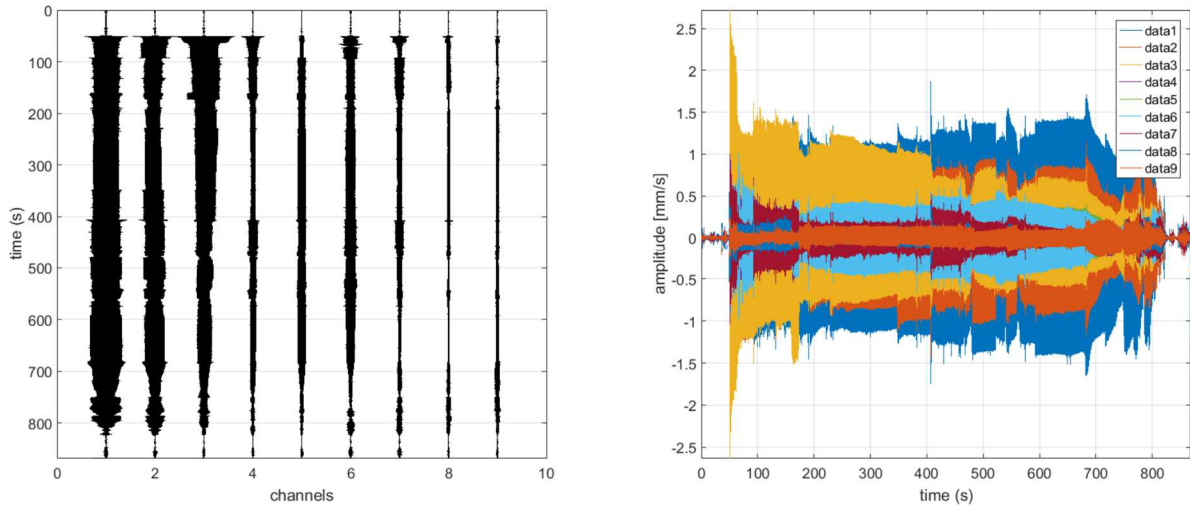
Per ogni giornata di monitoraggio vengono considerati solo i dati che han mostrato la maggiore ampiezza di vibrazione.

[omissis]

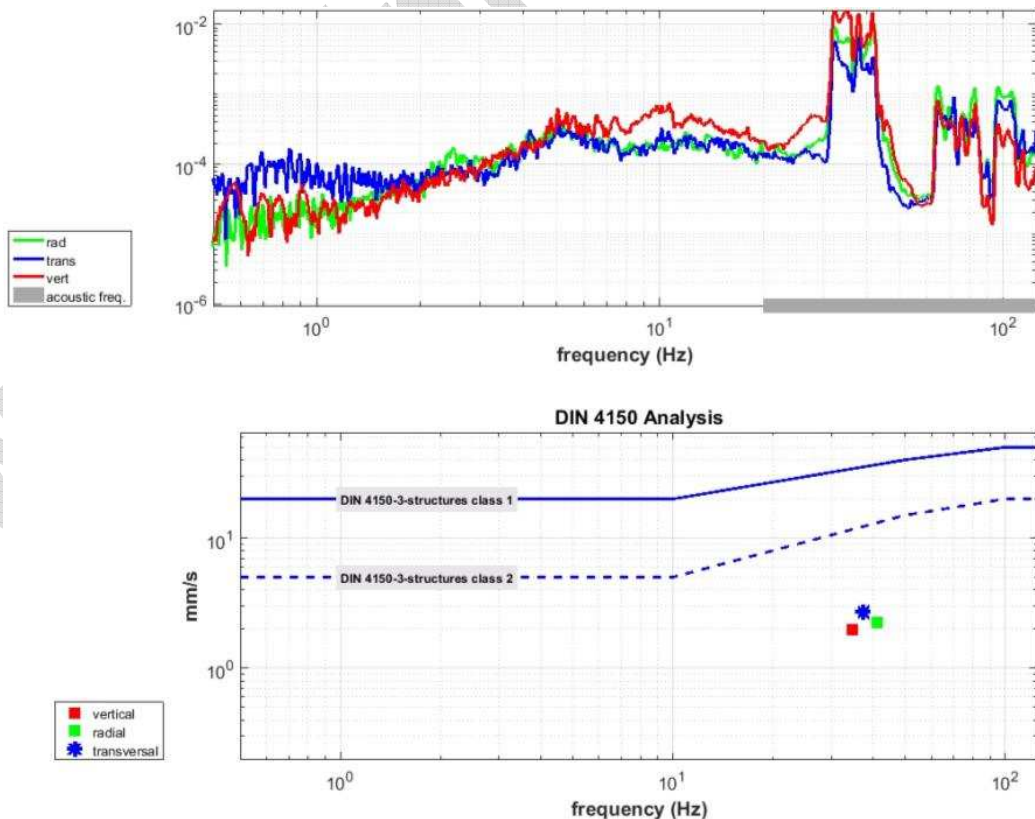
Figura 2.1. Dettaglio delle aree di lavoro così come riferite nel presente documento.

Giorno #1 - Mattina

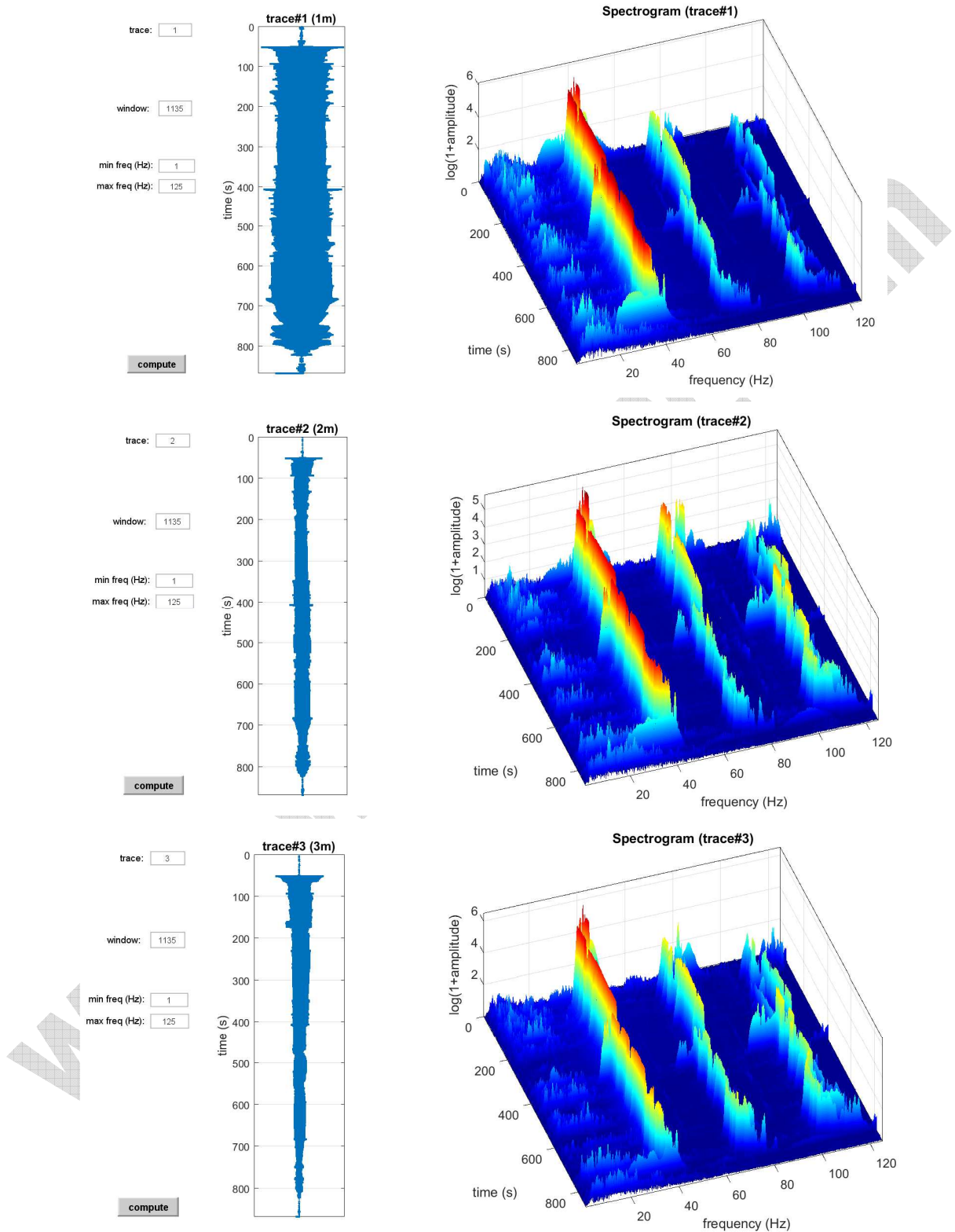
È possibile notare come in questo caso (si tratta del *dataset* che ha mostrato le maggiori ampiezze dell'intera giornata), il massimo dell'ampiezza delle tracce risulti di circa 2.6 mm/s (riferendosi chiaramente al sensore più vicino alla macchina, nella posizione P1 - vedi note introduttive alla giornata).



Si riporta qui di seguito l'analisi DIN4150 riferita al sensore P1 (quello con le ampiezze maggiori in quanto il più vicino alla sorgente - la macchina in attività nell'AREA1).



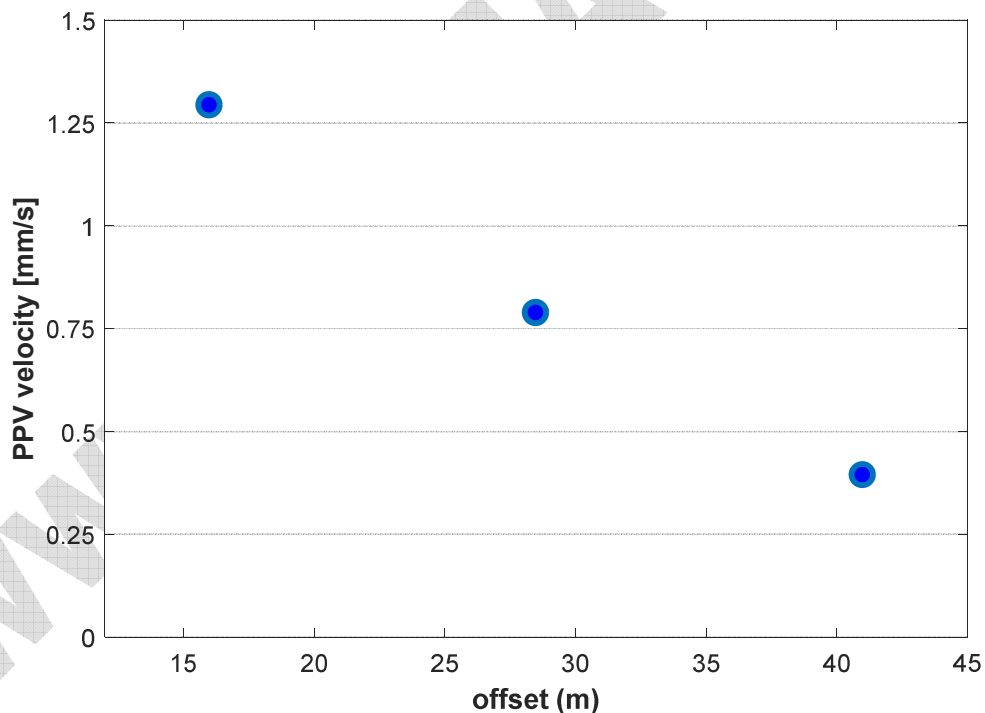
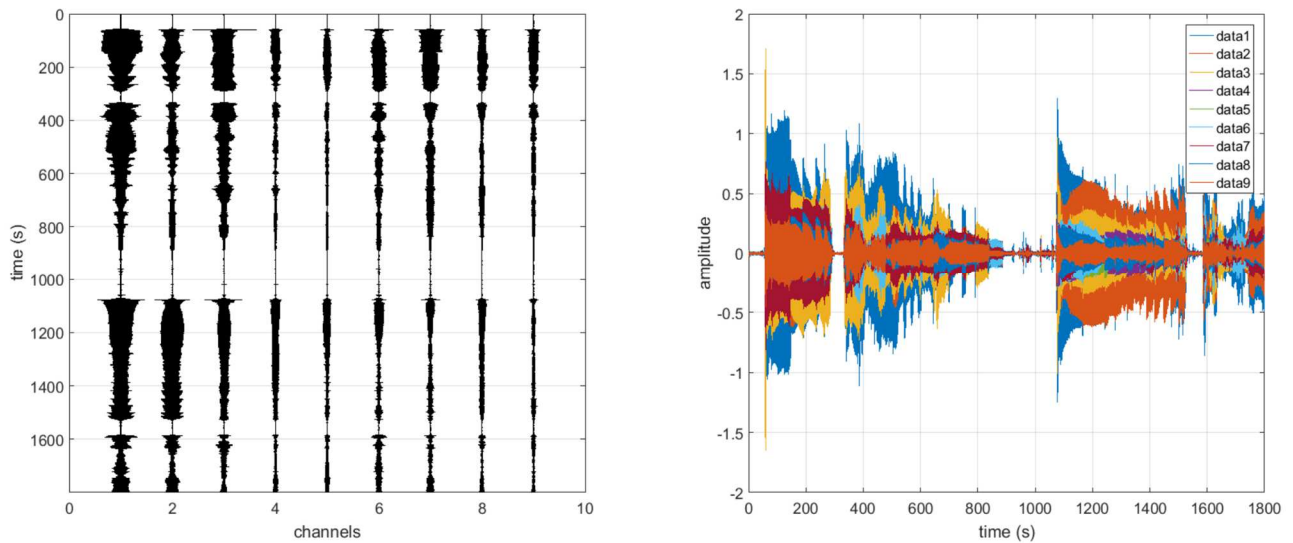
I tre spettrogrammi riportati qui di seguito (rispettivamente per le componenti verticale, radiale e trasversale) mostrano le altissime frequenze utilizzate (attorno ai 40 Hz, lontanissime dalle frequenze caratteristiche di qualsiasi tipologia di edificio).



Come chiaro dai dati e dalle analisi illustrate, il valore massimo di vibrazione (attorno ai 2.6 mm/s, ad una frequenza attorno ai 40 Hz), si trova ben al di sotto dei limiti suggeriti dalla normativa (che a quella frequenza è pari a circa 12 mm/s).

Pomeriggio

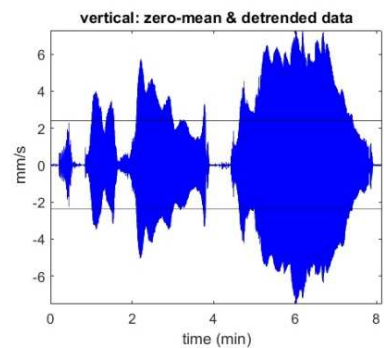
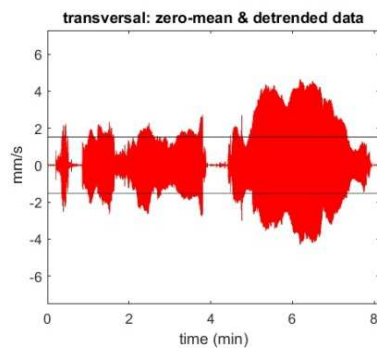
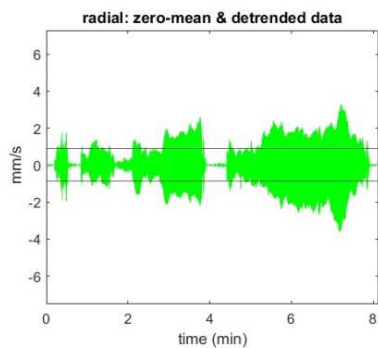
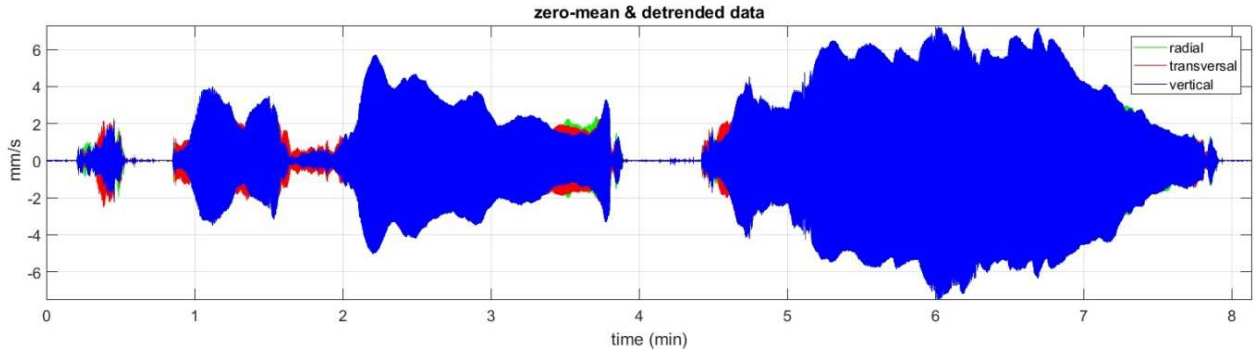
Ulteriori misure con tre sensori posti a distanze (*offset*) via via maggiori dall'area di lavoro (AREA1).



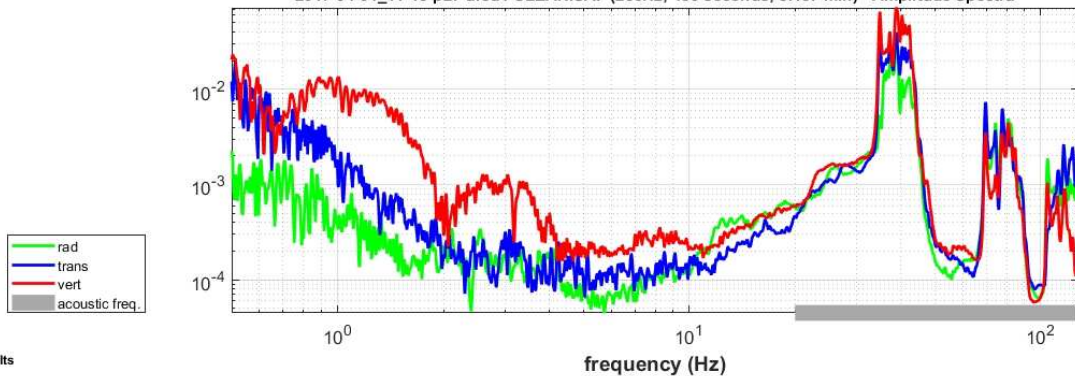
Diminuzione dell'ampiezza della vibrazione (mostrata il valore di picco di velocità, PPV) all'aumentare della distanza tra sorgente e sensore (*offset*). Evidente come l'ampiezza della vibrazione provocata dalle attività di cantiere risulti dal punto di vista strutturale (vedi anche considerazioni conclusive) assolutamente insignificante già a 15 m dalla sorgente (l'offset minimo considerato per le acquisizioni svolte nel pomeriggio del giorno 31 marzo).

Giorno#2

Attività di rimozione delle palancole dell'AREA4. Data l'estrema vicinanza tra sorgente e sensore (posto intenzionalmente a 7 m di distanza), le ampiezze verificate risultano relativamente elevate (circa 6.5 mm/s a quasi 40 Hz di frequenza).

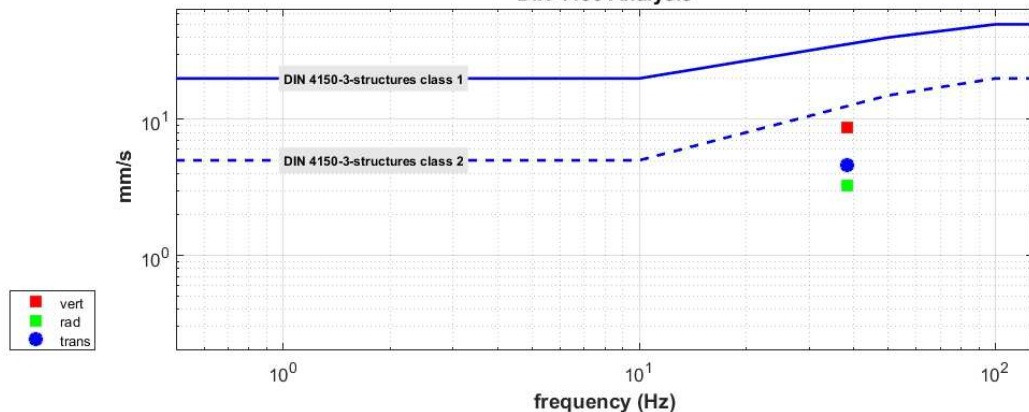


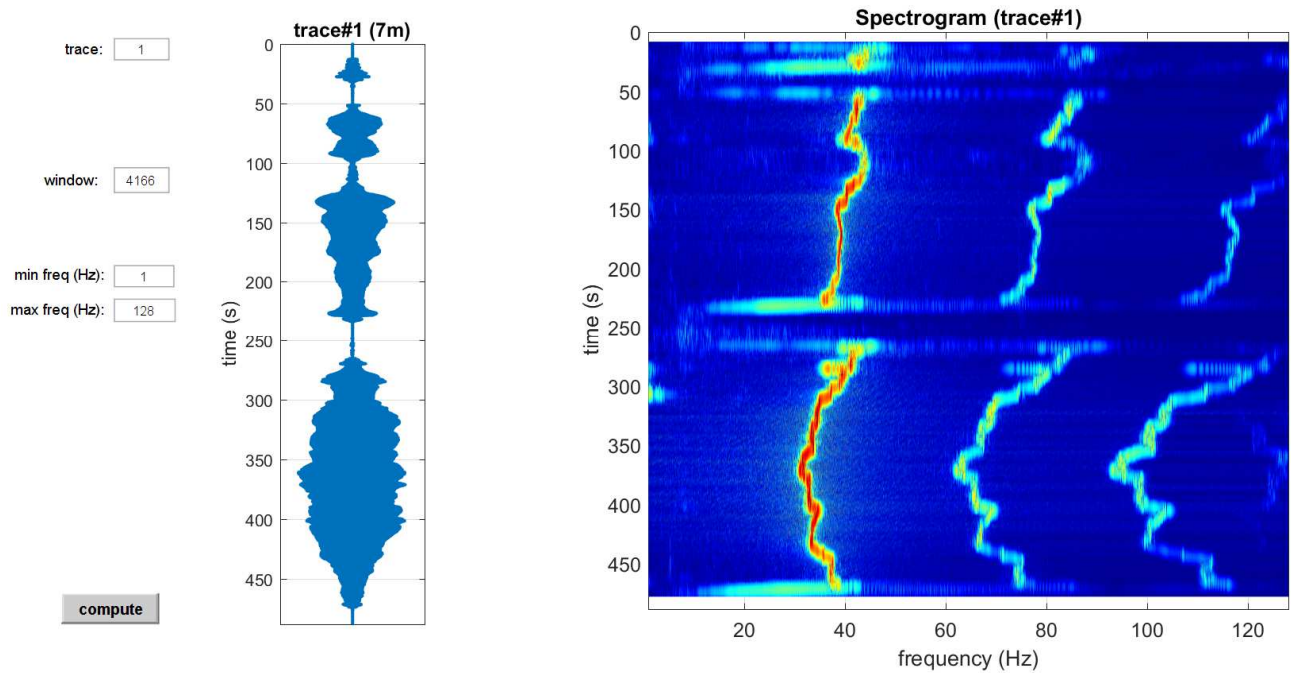
2017-04-04_11-15-p27-area4-CLEAN.SAF (256Hz; 489 seconds; 8.137 min) - Amplitude Spectra



Main velocity results
 PPV: 8.8976 mm/s
 PCPV vert: 8.6352 mm/s
 PCPV rad: 3.5875 mm/s
 PCPV trans: 4.6227 mm/s

DIN 4150 Analysis





Va da sé che, in ossequio alle leggi dell'attenuazione (vedi paragrafo introduttivo e conclusivo), anche a solo pochi metri di distanza l'ampiezza decresce esponenzialmente sino a dimezzarsi a solamente 5-6 m di distanza.

Vanno comunque notati due fatti:

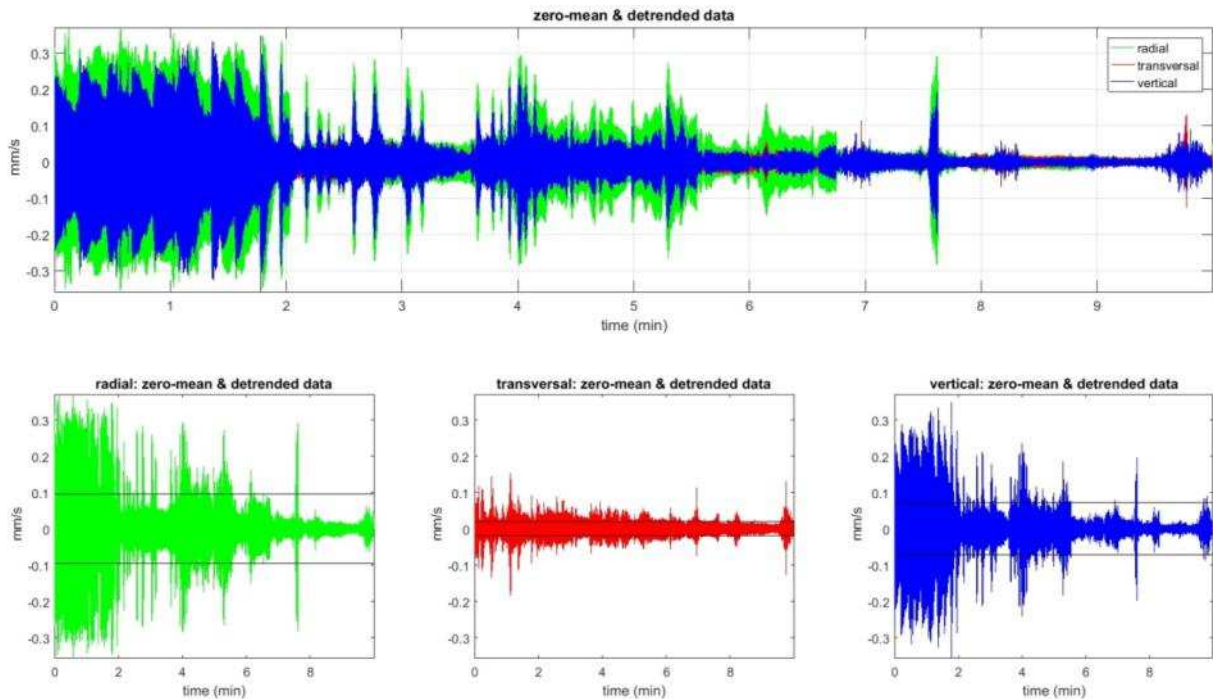
1. il limite per la classe 2 a 40 Hz non venga comunque superato nemmeno alla distanza utilizzata per le misure qui presentate (7 m).
2. il valore massimo è verificato per la componente verticale (che meno influenza le strutture, molto più sensibili alle vibrazioni sulla componente orizzontale (che risulta inferiore ai 5 mm/s [vedi analisi DIN4150])

Giorno#3

Misurazioni con strumento al primo piano del Ristorante [omissis] durante le lavorazioni in AREA1 (quella prossima al ristorante stesso - vedi Figura 2.1) e loro confronto con le misurazioni effettuate a macchina spenta.



Vibrazioni durante l'attività di cantiere



working folder:
 I:\ELIOSOFT\Dat\Concordia_vibrazioni\week2\giorno#GALLO_NERO\lavori in corso
 dataset:
 2017-04-07_10-56-GALLONERO_lavori_in_corso.saf

handling the data

step#1 (optional) - decimate
 128Hz

step#2 - computation
 599 window length (s)
 2 tapering (%)
 1% spectral smoothing (triangular window)
 show particle motion (raw data) HOLDIC
 class1 class2 class3
 offsets channels

step#3 - directivity analysis
 max freq 150 Hz

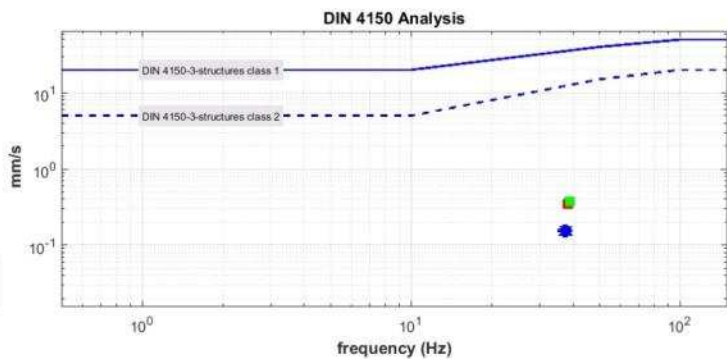
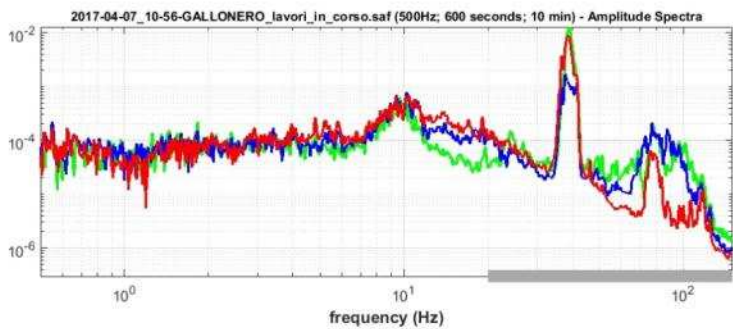


Main results
 PPV: 0.4783 mm/s
 PCPV vert: 0.35721 mm/s
 PCPV rad: 0.37101 mm/s
 PCPV trans: 0.19448 mm/s

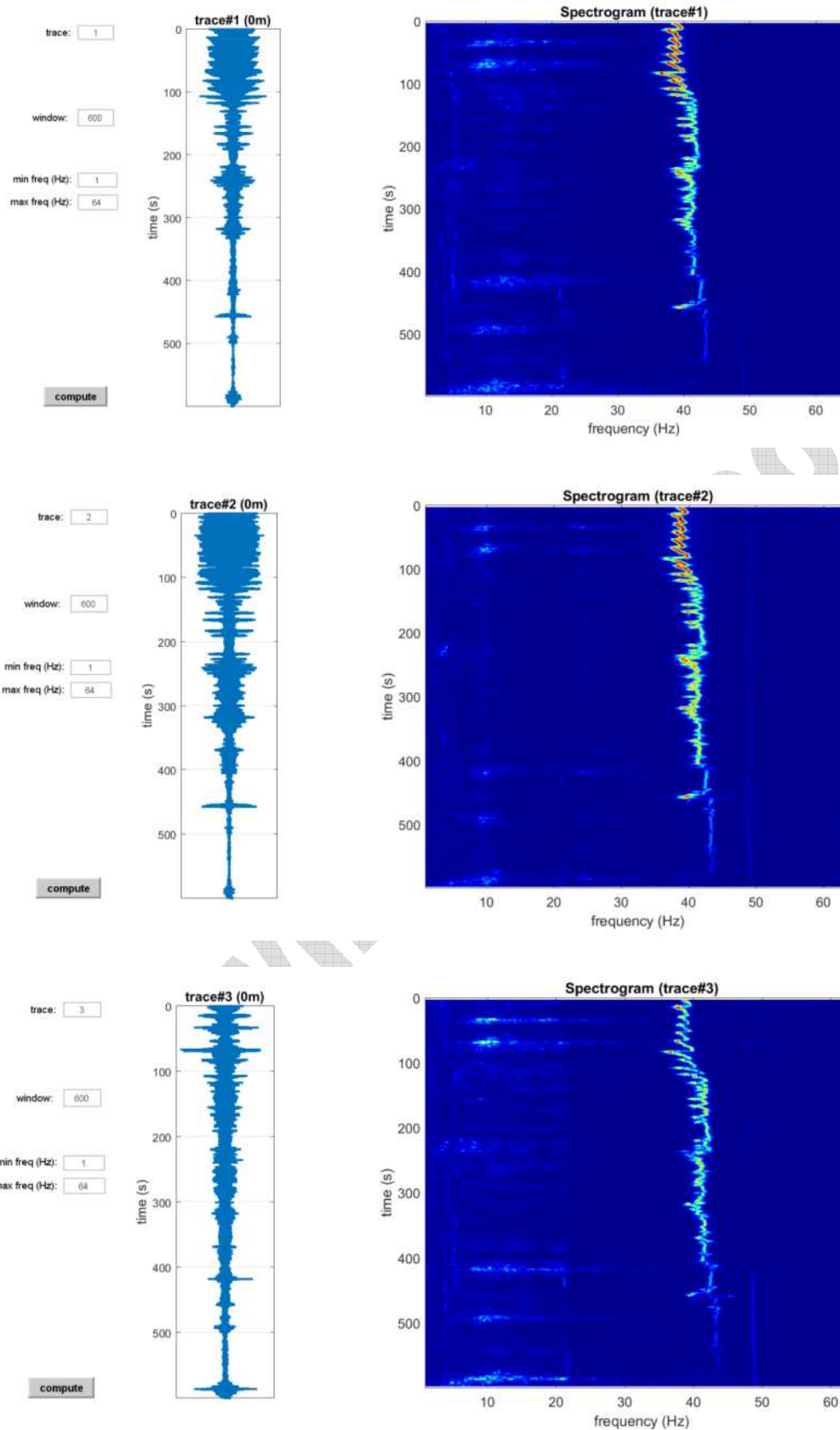
vibrations on humans
 accelerations (UN9614)

rad
 trans
 vert
 acoustic freq.

vertical
 radial
 transversal

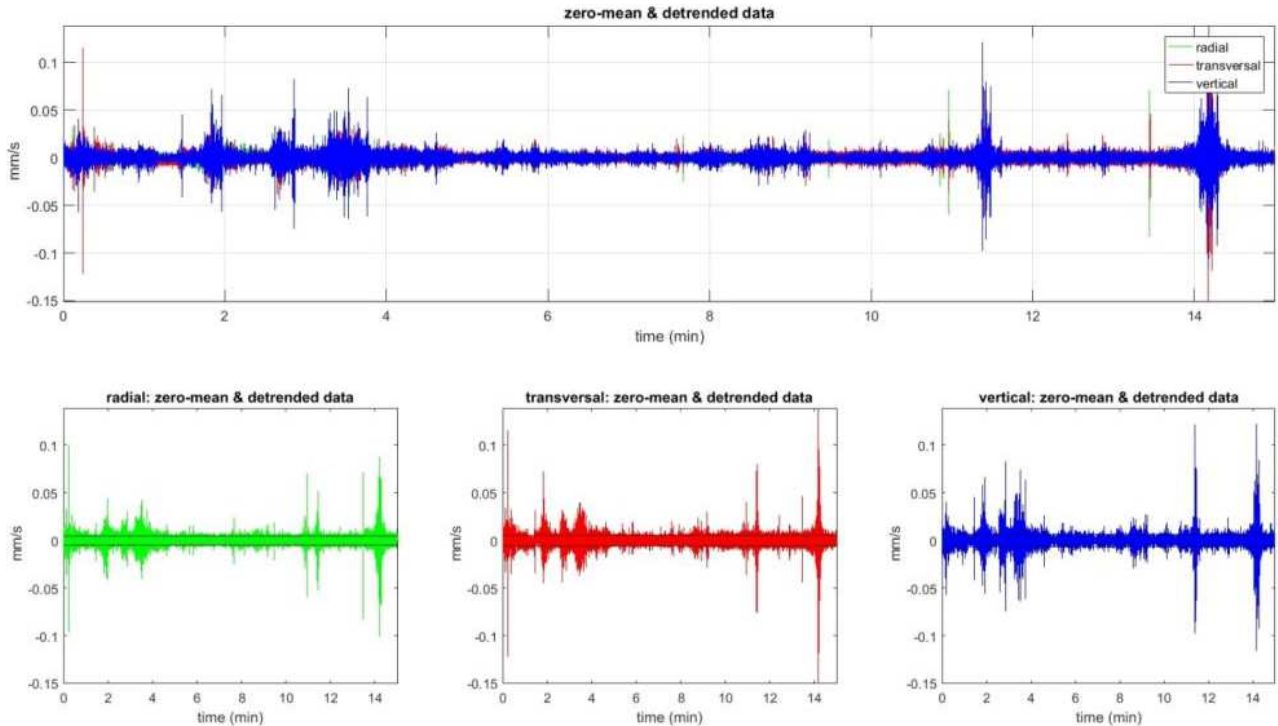


Analisi DIN4150: si noti il picco di ampiezza centrato attorno ai 40 Hz (molto lontano dalle frequenze proprie/naturali dell'edificio stesso - vedi oltre).

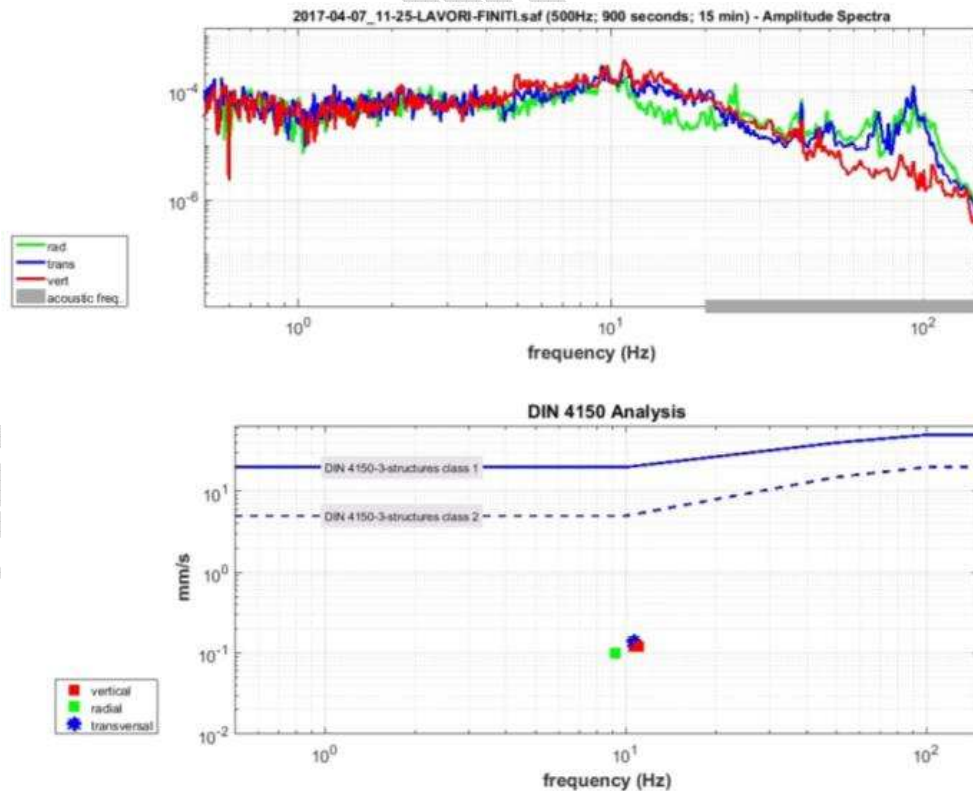


Spettrogrammi per le tre componenti (dall'altro al basso componente verticale, radiale e trasversale): si nota il tipico andamento con la macchina in lavorazione attorno ai 40 Hz (frequenze molto lontane da quelle caratteristiche di qualsiasi edificio).

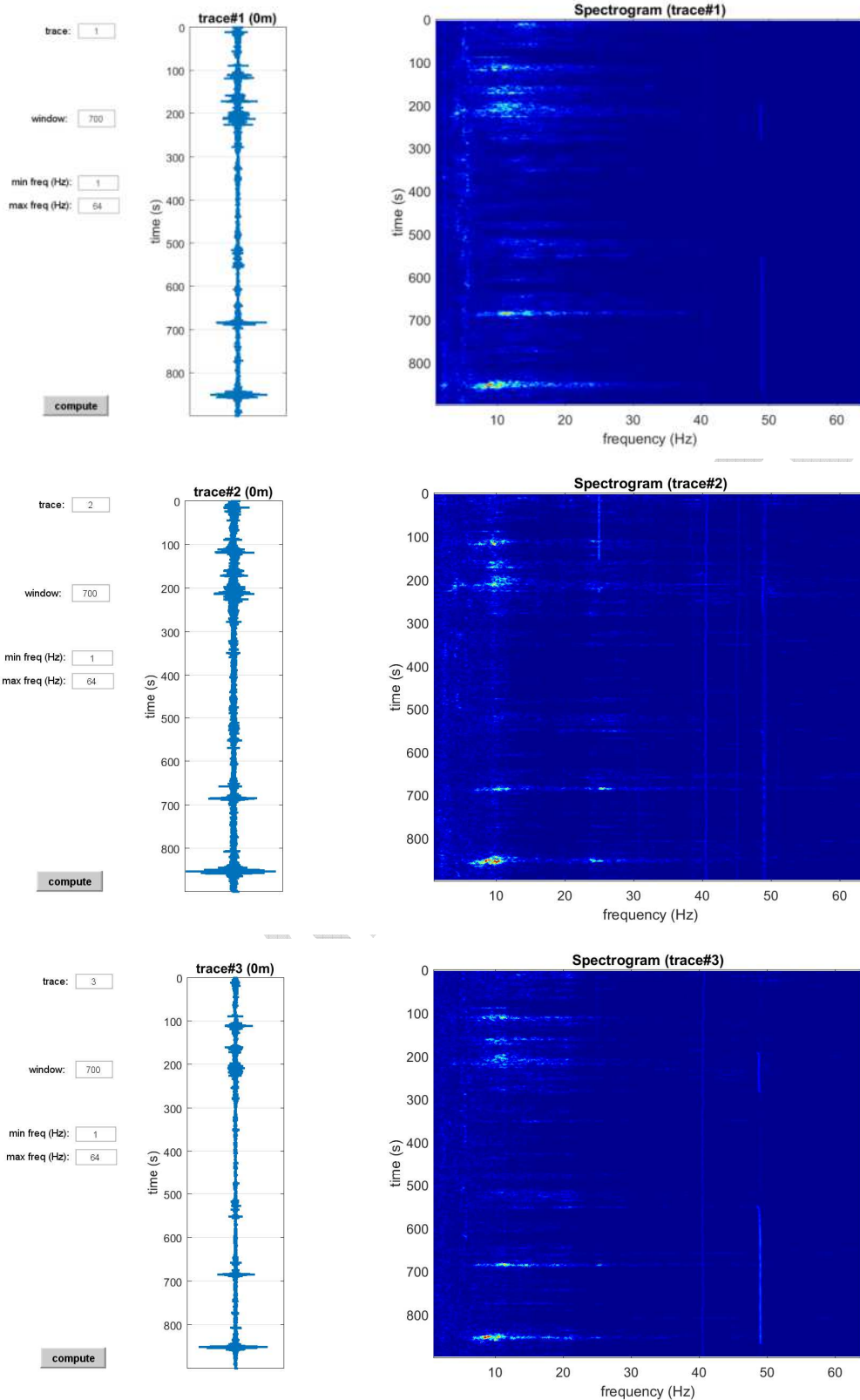
Vibrazioni edificio a cantiere fermo



Tracce acquisite a lavori fermi: si notano alcuni segnali legati in buona misura al traffico veicolare pesante lungo la prospiciente SS14.

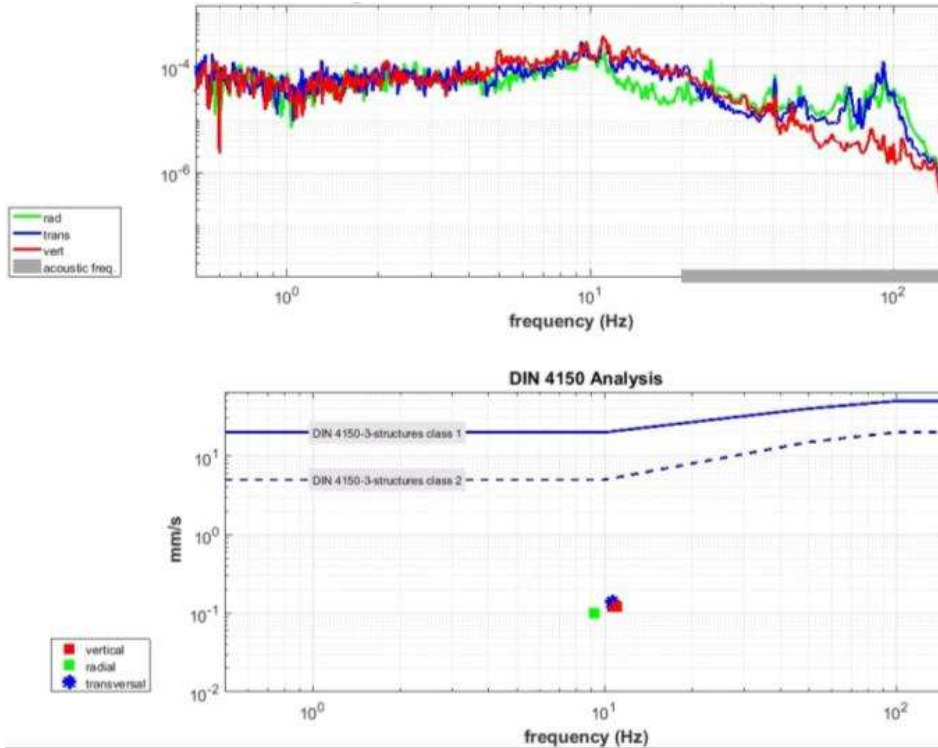


Analisi DIN4150: si noti l'assenza del picco di ampiezza centrato attorno ai 40 Hz (molto lontano dalle frequenze proprie/naturali dell'edificio stesso) indotto dall'attività di cantiere e bene evidente nelle analisi presentate nella precedente sezione.

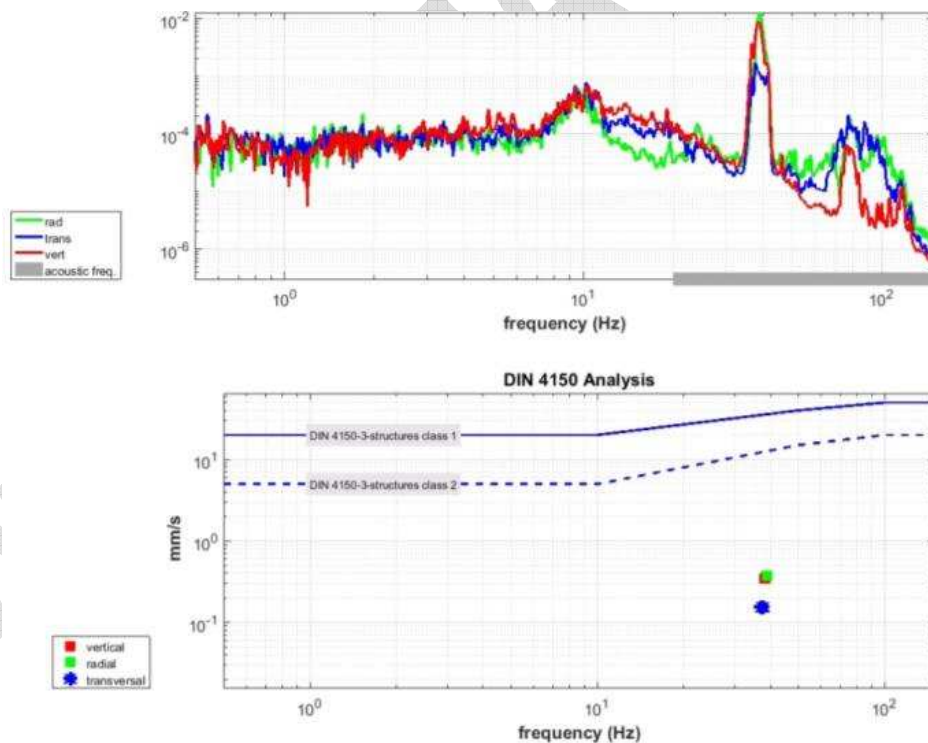


Spettrogrammi per le tre componenti (dall'altro al basso componente verticale, radiale e trasversale): si nota il tipico andamento con la macchina in lavorazione attorno ai 40Hz (frequenze molto lontane da quelle caratteristiche di qualsiasi edificio).

Commento alle misure vibrazionali durante i lavori e a macchine ferme



Vibrazioni naturali dell'edificio Ristorante [omissis] in assenza di attività di cantiere.

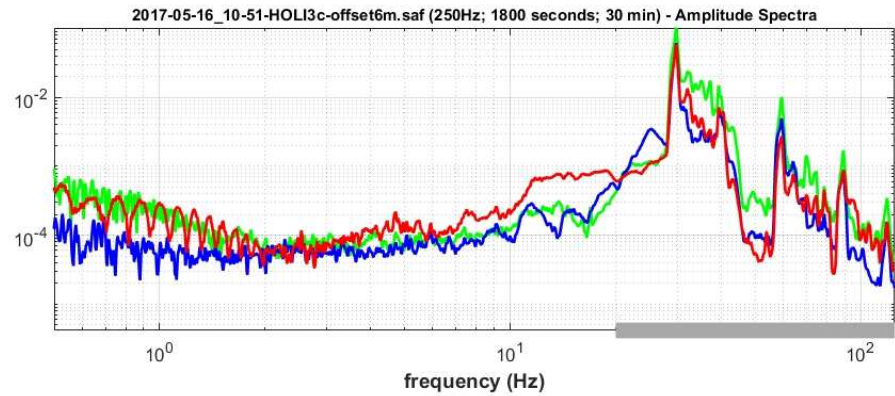
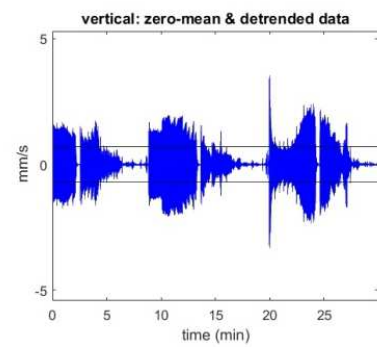
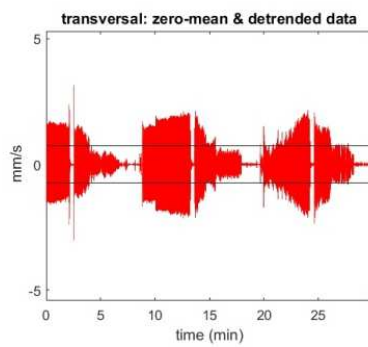
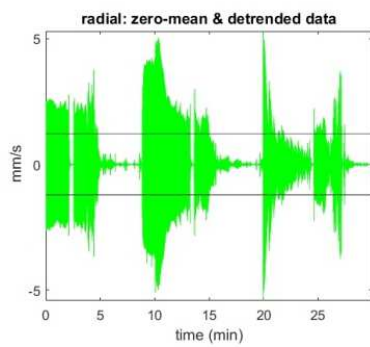
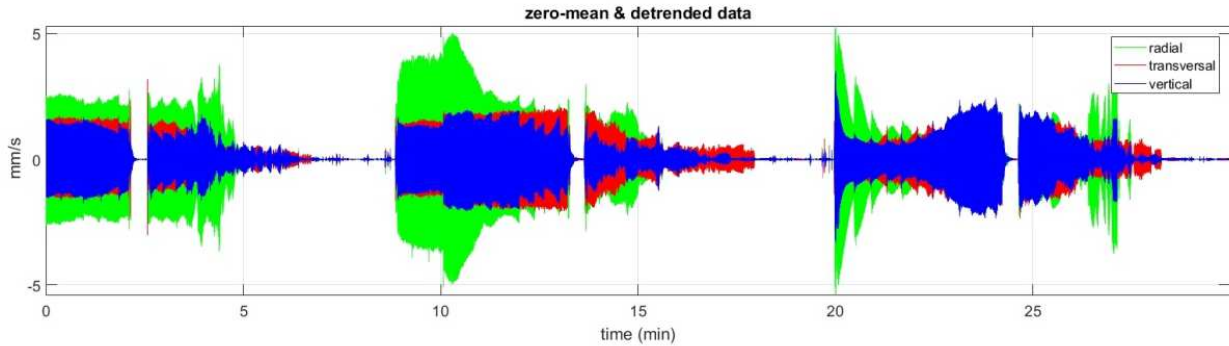


Vibrazioni dell'edificio Ristorante [omissis] durante le attività di cantiere in AREA1 (la più prossima al Ristorante stesso).

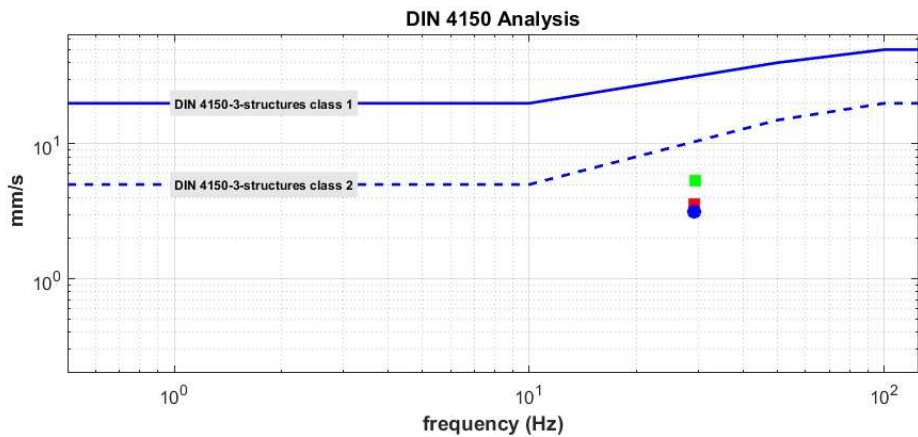
Il confronto tra le misure rende evidente l'insignificanza dal punto di vista strutturale delle vibrazioni dalle attività di cantiere nonostante la relativa vicinanza tra la struttura e l'AREA1 in cui in quel momento si stavano effettuando i lavori.

Giorno#4

Sensore a soli 6 m di distanza dalla sorgente. Le ampiezze massime sul piano orizzontale risultano di circa 6 mm/s (del tutto normali e coerenti con le normali condizioni descritte e sintetizzate tanto nel paragrafo introduttivo che in quello conclusivo).



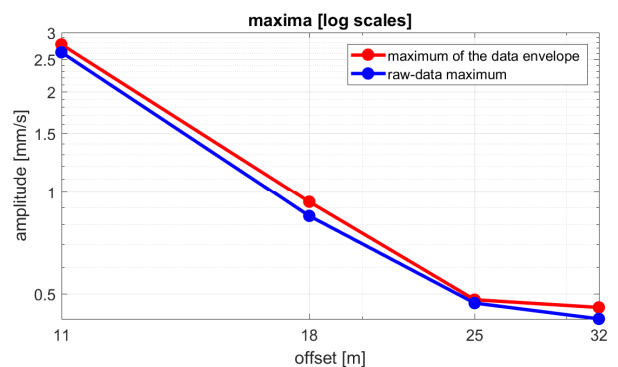
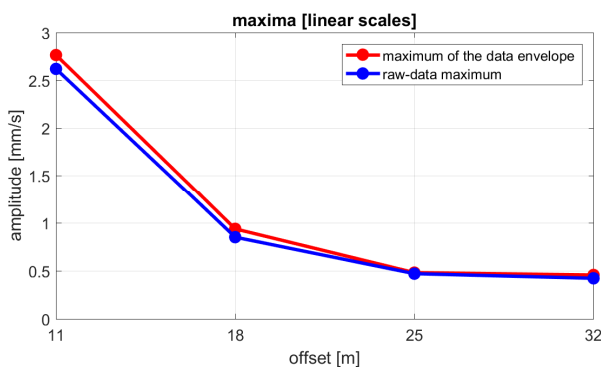
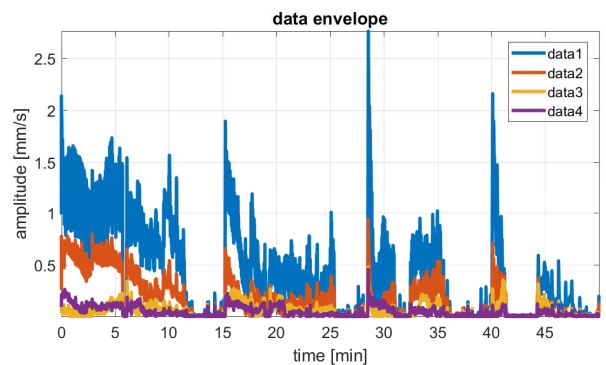
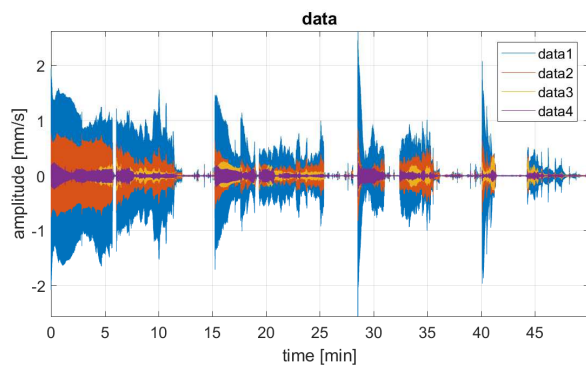
Main velocity results
 PPV: 6.3355 mm/s
 PCPV vert: 3.5518 mm/s
 PCPV rad: 5.4481 mm/s
 PCPV trans: 3.1661 mm/s



Acquisizione multi-offset atta a verificare l'attenuazione del segnale prodotto dall'attività di cantiere con la distanza. L'acquisizione è stata svolta secondo lo schema qui riportato:



I dati ottenuti e l'analisi del relativo decremento d'ampiezza sono sintetizzati qui di seguito.



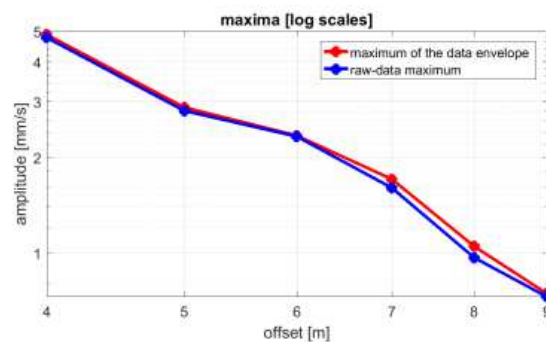
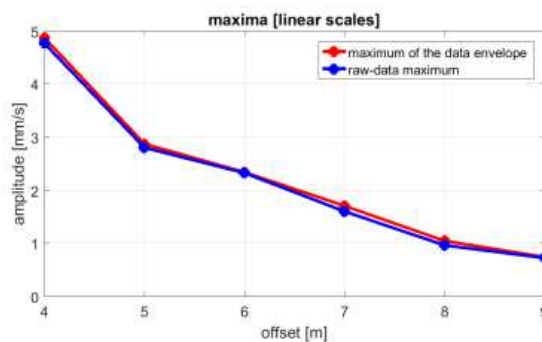
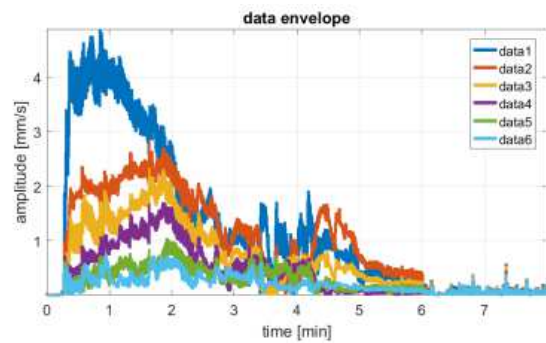
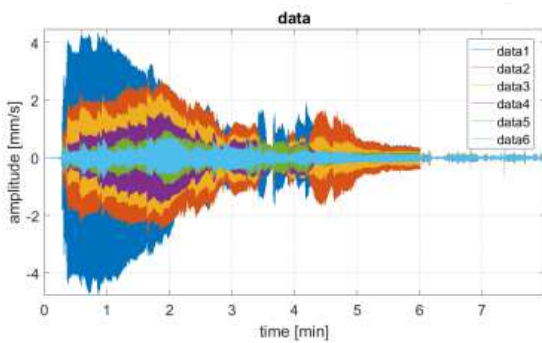
Appare evidente la diminuzione di carattere esponenziale dell'ampiezza della vibrazione (in ossequio all'eq. 1 ricordata nel paragrafo introduttivo), tale per cui a pochi metri dalla sorgente l'ampiezza è tale da non costituire un pericolo strutturale per edifici di classe 2 e 3 (vedi sintesi dei risultati nel paragrafo conclusivo).

Giorno#5

Lavori di *spalancolatura* in atto nell'AREA4 e acquisizioni nell'area verde di Via [omissis].

Mattina**Acquisizione#1**

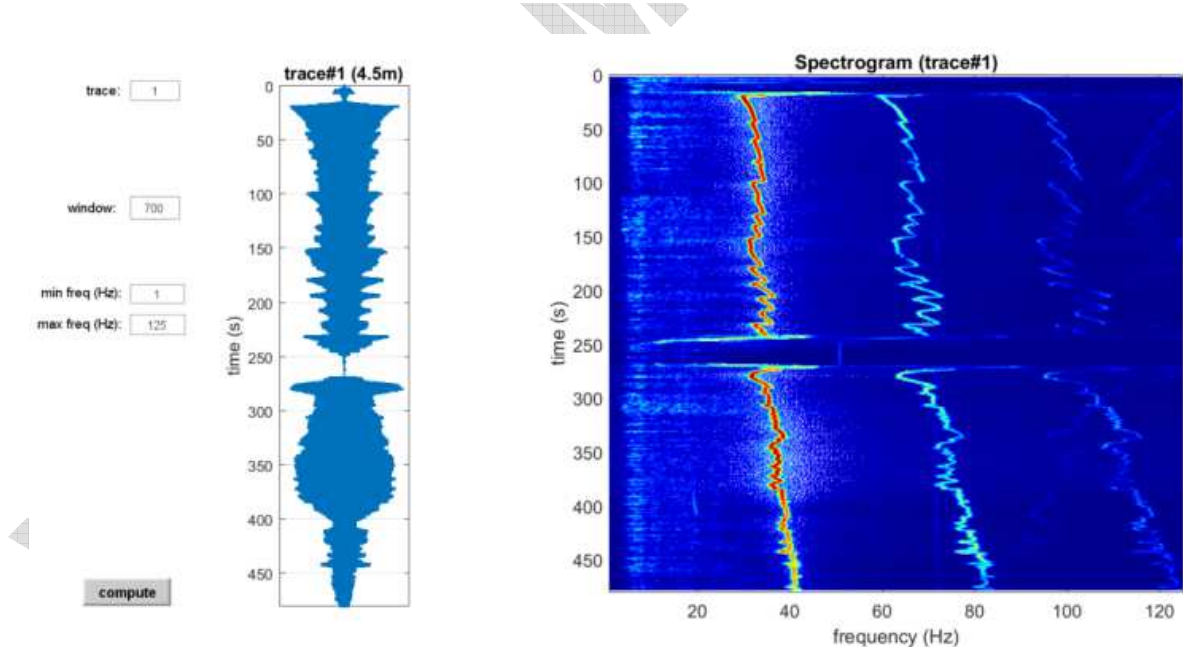
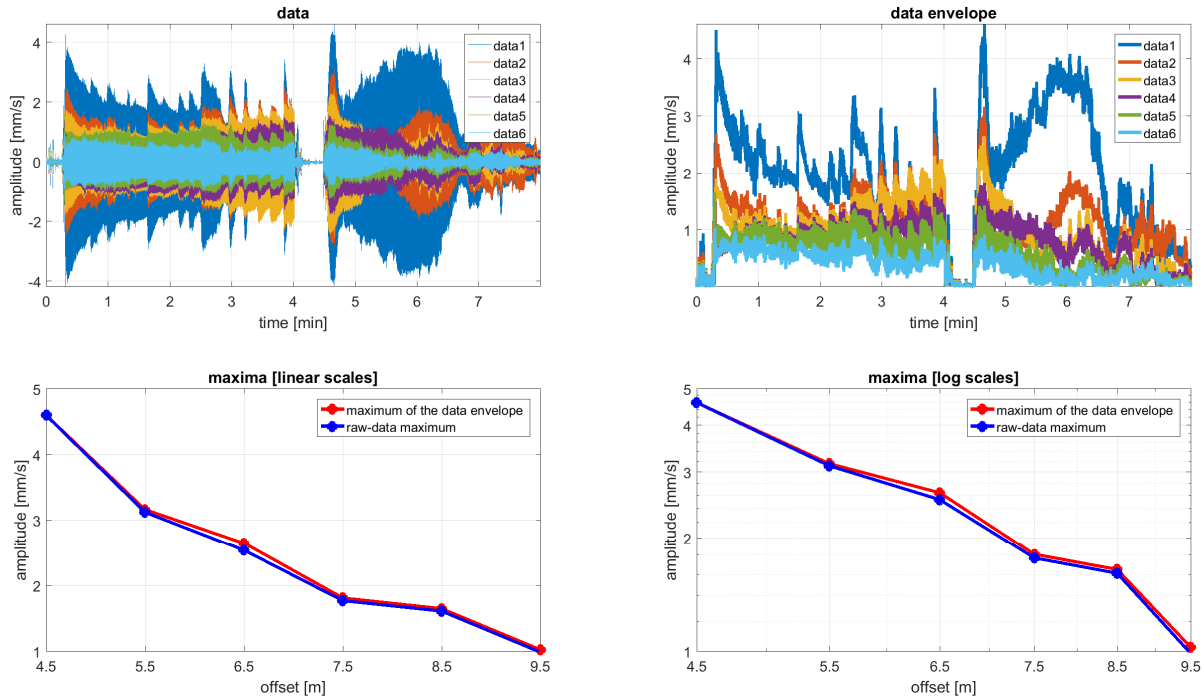
Acquisizioni multi-offset in Via [omissis]. Cinque (5) sensori (componente verticale).



L'analisi del decremento di ampiezza in funzione della distanza dalla sorgente (offset) mostra come a circa 4.5 m dalla sorgente il picco di velocità osservata risulti di 4.6 mm/s (40% del limite di normativa a 30 Hz [frequenza di lavoro della macchina utilizzata]), decrescendo poi sino a 1 mm/s (9% del limite di normativa) a 9.5 m dalla sorgente.

Acquisizione#2

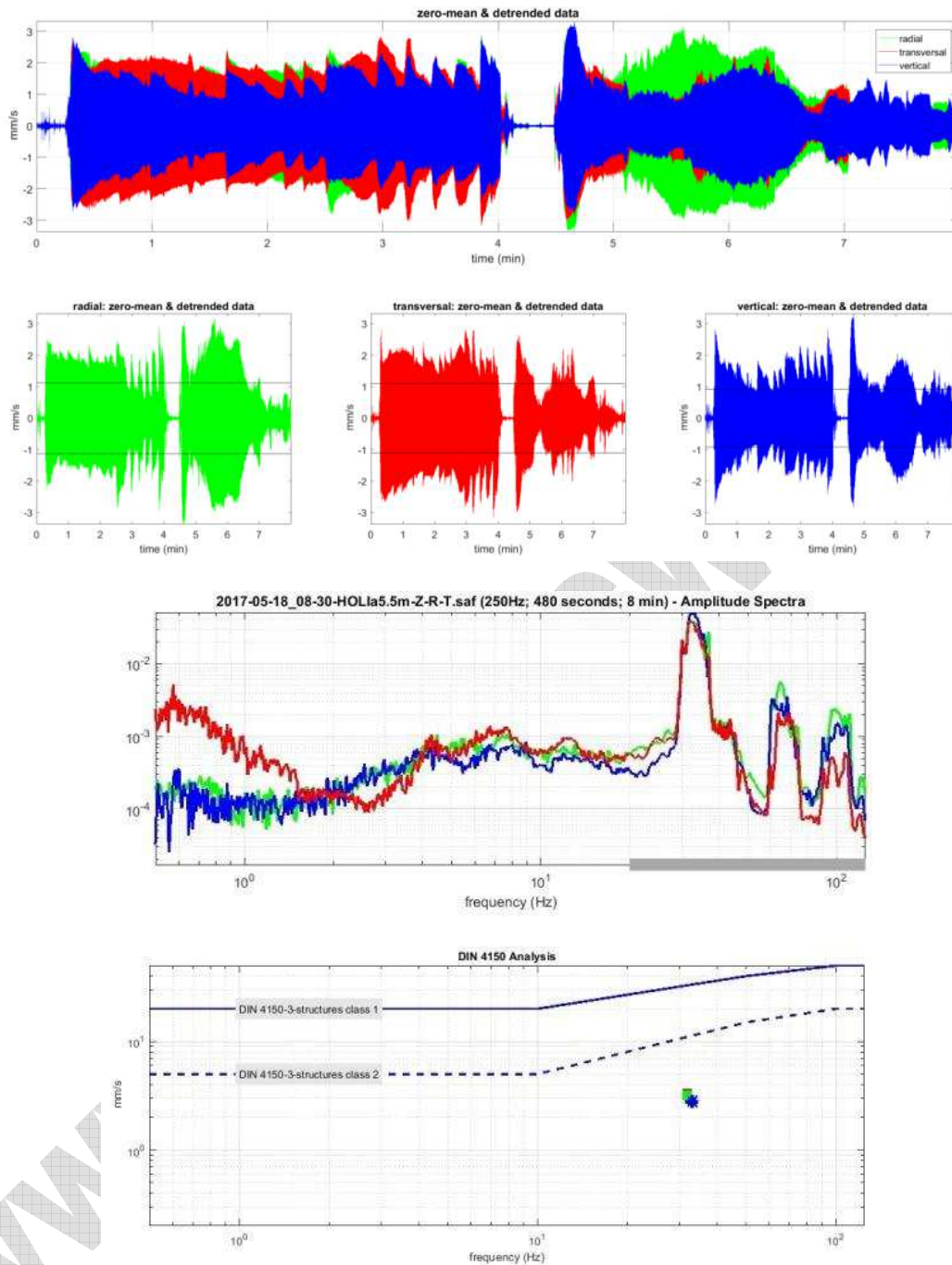
Dati *multi-offset* per verifica attenuazione delle vibrazioni in funzione della distanza dalla sorgente (offset minimo 5.5 m, distanza intergeofonica 1 m):



L'analisi del decremento di ampiezza in funzione della distanza dalla sorgente (offset) mostra come a circa 4.5m dalla sorgente il picco di velocità osservata risulti di 4.6 mm/s (40% del limite di normativa a 30 Hz [frequenza di lavoro della macchina utilizzata]), decrescendo poi sino a 1 mm/s (9% del limite di normativa) a 9.5 dalla sorgente.

Dati 3C (offset 5.5 m)

In questo caso il sensore triassiale si trova a soli 5.5 m dalla sorgente.



=== velocità di picco ===

Maximum PPV (total): 4.9385 mm/s

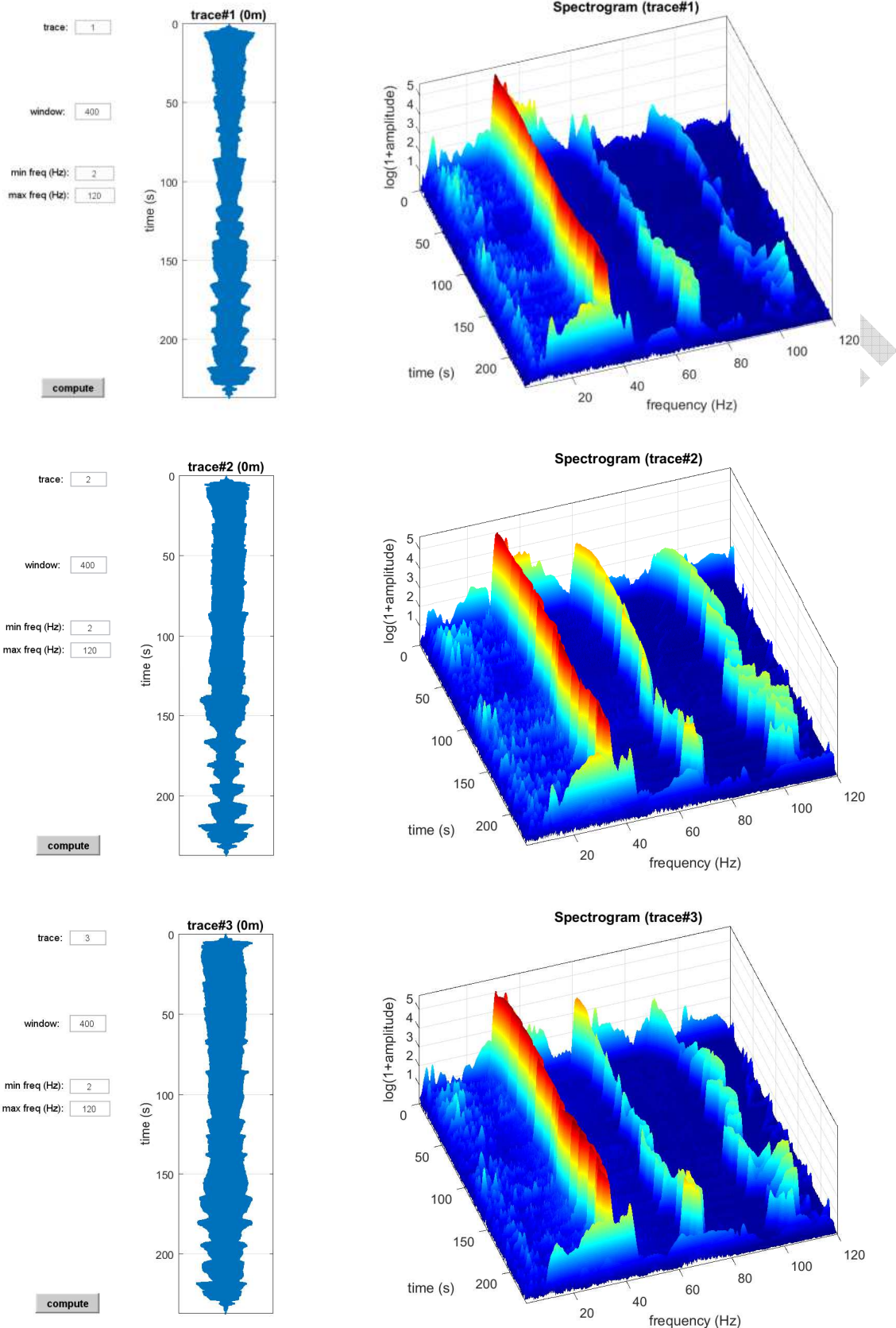
Maximum PPV (horizontal plane): 4.4237 mm/s

Maximum PCPV (vertical): 7.2426 mm/s

Maximum PCPV (radial): 3.3538 mm/s

Maximum PCPV (transversal): 3.3665 mm/s

Nonostante la vicinanza della sorgente (a soli 5.5 m) i valori di picco delle velocità (sul piano orizzontale, il più critico rispetto le possibili azioni sulle strutture) risulta pari a circa 4.4 mm/s.



Spettrogrammi per le tre componenti (dall'altro al basso componente verticale, radiale e trasversale): si nota il tipico andamento con la macchina in lavorazione tra 30 e 40 Hz (molto lontano dalle frequenze critiche di qualsiasi edificio). Ben visibili anche le armoniche superiori ad ampiezze via via minori e frequenze maggiori.

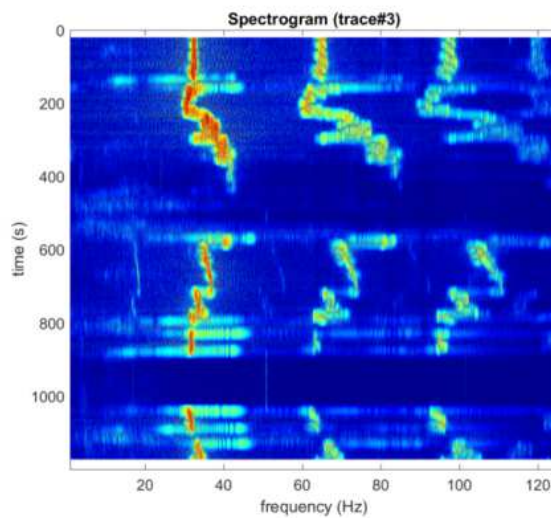
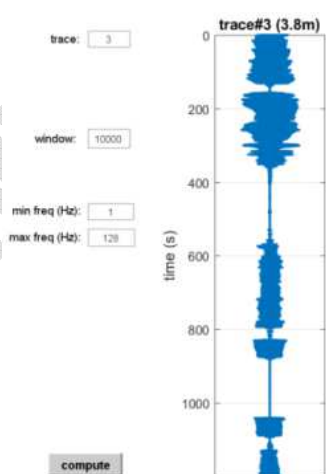
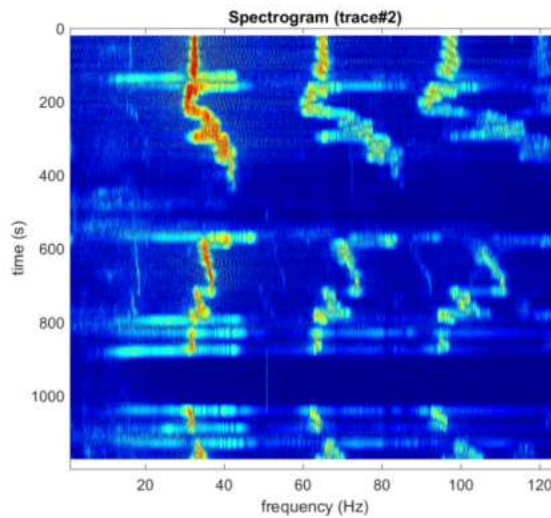
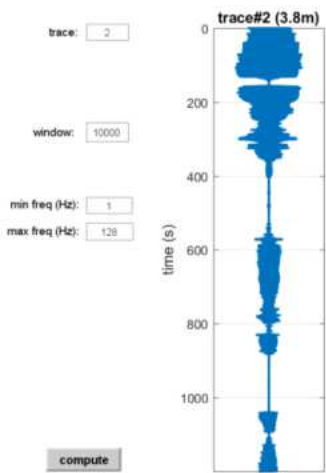
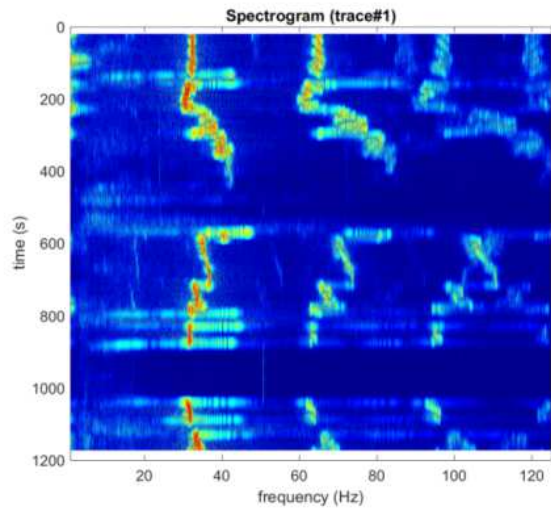
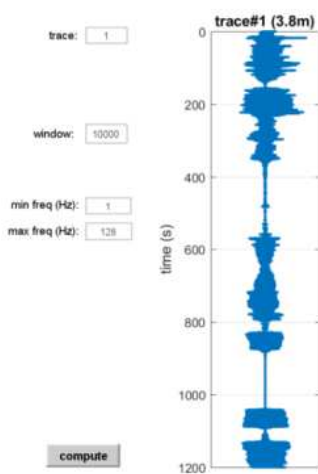
Giorno#6**Misure multi-offset e 3C in via [omissis]**

Qui si sono effettuate tanto classiche misure triassiali atte a verificare l'ampiezza delle vibrazioni lungo i tre assi (normativa DIN), tanto misure multi-offset atte a verificare l'attenuazione stessa delle vibrazioni.

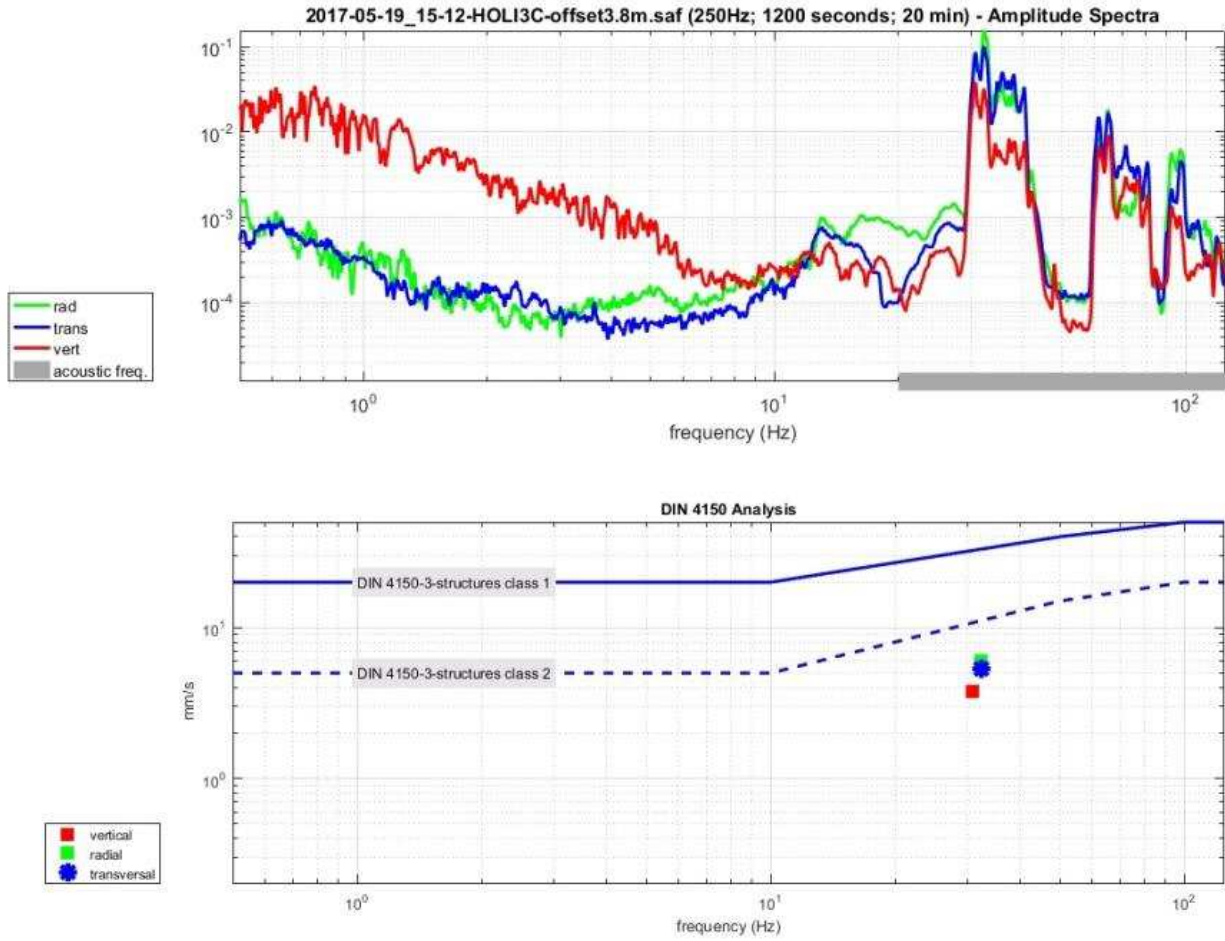


Misure triassiali

La prima rimozione di palancola è a soli 3.8 m dal sensore triassiale, successivamente in allontanamento di circa 1m.



Spettrogrammi per le 3 componenti (dall'altro al basso componente verticale, radiale e trasversale): si noti come il segnale sia sempre compreso tra 30 e 40 Hz.

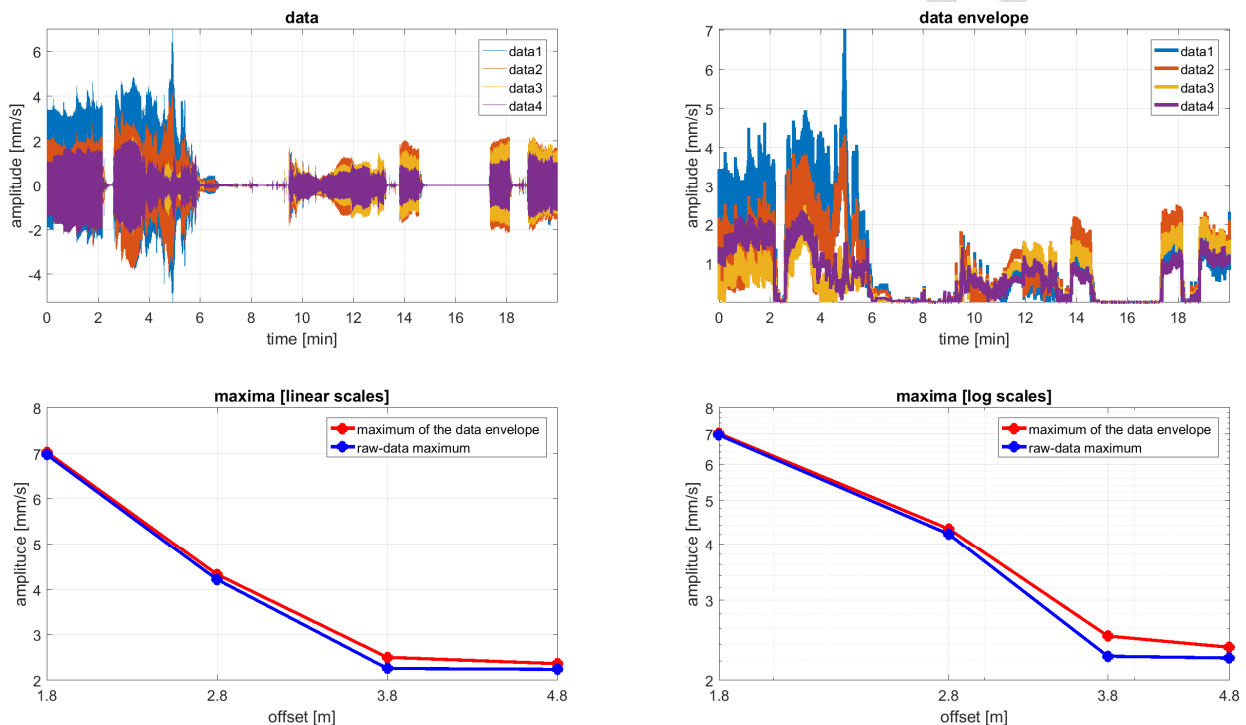


Analisi DIN4150: nonostante la prossimità della sorgente di vibrazioni (a 3.8 m di distanza), le ampiezze risultano al di sotto dei limiti suggeriti dalla normativa.

WWW.WINMASW.COM

Misure multi-offset

La prima *spalancolatura* è a soli 3.8 m dal sensore triassiale, successivamente in allontanamento di circa 1 m. Nella seguente figura sono riportati i dati relativi alla componente verticale acquisiti a rispettivamente 1.8, 2.8, 3.9 e 4.8 m dalla sorgente delle vibrazioni. Ricordando come il limite di normativa attorno ai 30 Hz (frequenza di lavoro della macchina utilizzata) sia di circa 12 mm/s, si verifica come, durante queste operazioni di *spalancolatura* i limiti non vengano sforati nemmeno in caso di *offset* molto limitati (in questo caso l'*offset* - cioè la distanza tra sensore e sorgente della vibrazione - è di 1.8 m).



Variazione dell'ampiezza della vibrazione in funzione dell'offset (in questo caso per la componente verticale). Il grafico in basso a sinistra riporta l'ampiezza massima per i tre offset indicati. In basso a destra si riporta lo stesso dato utilizzando una doppia scala logaritmica.

3. Sintesi dei risultati e conclusioni

Nelle pagine dedicate all'illustrazione dei risultati del monitoraggio delle vibrazioni prodotte dalla attività del cantiere ex deposito [omissis], si è mostrato come:

- 1) persino all'interno del cantiere, mai siano stati superati i limiti indicati dalla normativa (se non a distanze inferiori a circa 3-6 m dalla macchina utilizzata);
- 2) considerate le leggi dell'attenuazione del segnale (decremento dell'ampiezza della vibrazione con la distanza dalla sorgente) le attività poste in essere nel cantiere in esame non possono aver prodotto vibrazioni in grado di risultare pericolose a distanze superiori ai citati 3-6 m dalla sorgente (fatto verificato rispetto i dati raccolti nel cantiere e in accordo con i dati tecnico-scientifici disponibili in letteratura).

Rispetto fenomeni di risonanza è oltretutto da sottolineare come la frequenza di risonanza per una palazzina di 3 piani (altezze di circa 8-9m) sia di circa 4-7 Hz (Chopra & Goel, 2000 e Hong & Hwang, 2000), quindi lontanissima dai 35 Hz della macchina utilizzata per le attività di cantiere [spesso per avere una primissima stima della frequenza caratteristica di un certo edificio, si utilizza la semplice relazione empirica $12/n$, dove n è il numero di piani dell'edificio considerato].

Quanto riportato in Figura 3.1 (e nella successiva Figura 3.2) può essere considerato come la sintesi di tutto il lavoro di monitoraggio e analisi svolto.

La Figura 3.1 riporta i limiti di normativa (DIN 4150) per le due classi di edifici industriali (classe 1) e comuni (classe 2) con evidenziato il punto (in verde) che deve essere considerato come riferimento per il caso in esame. Tale punto si riferisce infatti all'intersezione tra i limiti riferiti alla classe 2 e la frequenza di riferimento in relazione alle operazioni svolte in cantiere (macchina operante con frequenze di lavoro tra i 30 e i 40 Hz).

Si vede come per tale frequenza il limite di normativa sia di indicativamente 12 mm/s (anche considerando l'ipotesi più pessimista di una frequenza di lavoro pari a 30 Hz).

La Figura 3.2 riporta tale limite (curva rossa) e l'ampiezza massima delle vibrazioni in funzione della distanza dalla sorgente (curva blu). Tale curva è stata verificata sulla base delle acquisizioni multi-offset illustrate in questa relazione e considerando l'eq. 1 riportata nel paragrafo introduttivo (certamente considerando i parametri del terreno locale _ dominato da terreni di tipo siltoso/argilloso - e della macchina che ha operato nel cantiere).

In particolare si è considerato un fattore di qualità Q pari a 7, una frequenza di riferimento di 35 Hz (quella di lavorazione della macchina utilizzata per le attività di cantiere) ed un'ampiezza A_1 arrotondata per eccesso (allo scopo di porsi nelle condizioni più sfavorevoli) di 20 mm/s ad 1m di distanza dalla sorgente (vedi misurazioni multi-offset presentate nel precedente capitolo).

La curva può anche essere confrontata con i dati disponibili in bibliografia e ricordati nel paragrafo introduttivo (vedi in particolare Figure 1.5 e 1.6): l'accordo appare stringente confermando che nell'area in oggetto l'attenuazione segue, non sorprendentemente, gli andamenti descritti dalla teoria e dagli studi empirici disponibili in bibliografia.

Il significato è molto chiaro e immediato: per la classe 2 (edifici di comune costruzione e uso) le vibrazioni provocate dalle attività di cantiere è potenzialmente pericolo dal punto di vista strutturale solamente per distanze inferiori a indicativamente 3-6 m. Anche nel caso si volesse considerare il caso di vibrazioni permanenti con limite di 5 mm/s, la distanza critica dalla sorgente risulterebbe pari a circa 7-8 m quindi ben minore delle distanze che separano le aree di lavoro all'interno del cantiere dalle abitazioni dell'area.

A distanze superiori l'ampiezza è tale da non superare i limiti indicati dalla normativa.

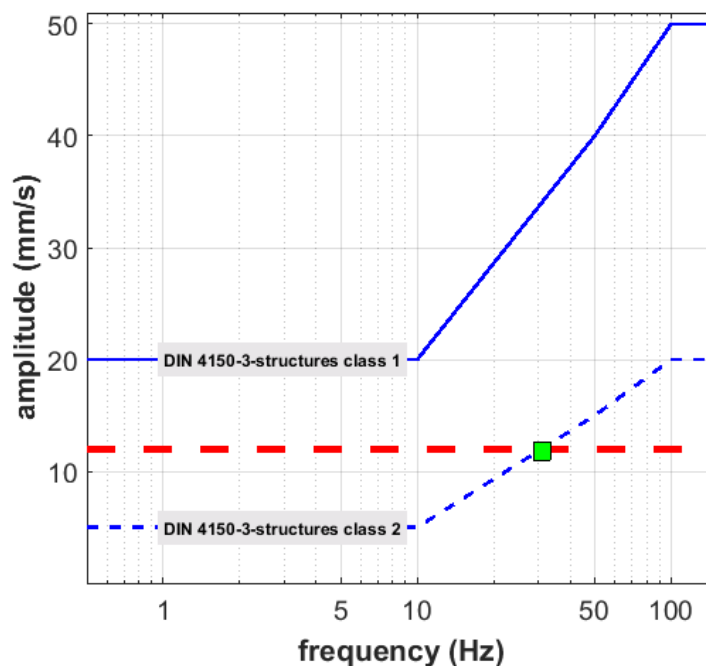


Figura 3.1. Curve di normativa (DIN4150) con indicazione del limite (punto verde) da considerare in relazione alle attività svolte nel cantiere in esame (macchina con frequenza di lavoro tra i 30 e i 40 Hz).

A titolo di esempio, l'ampiezza delle vibrazioni indotte dalle attività del cantiere a una distanza di 70 m dalla sorgente è di circa 0.5 mm/s (pari a circa il 4% del valore indicato dalla normativa).

Per avere un'idea di quanto siano 10 mm/s (1 cm/s) possiamo considerare come tale picco di velocità sia generato da un terremoto di magnitudo pari a circa 6.5 distante circa 100 Km (vedi Figura 3.3 e i lavori di Hayes, 1980 e Anderson & Uchiyama, 2011).

La distanza lineare tra il sito oggetto di indagine e l'epicentro del terremoto del Friuli del 1976 è pari a circa 75 Km e non risultano noti danni strutturali agli edifici della città in occasione di tale terremoto.

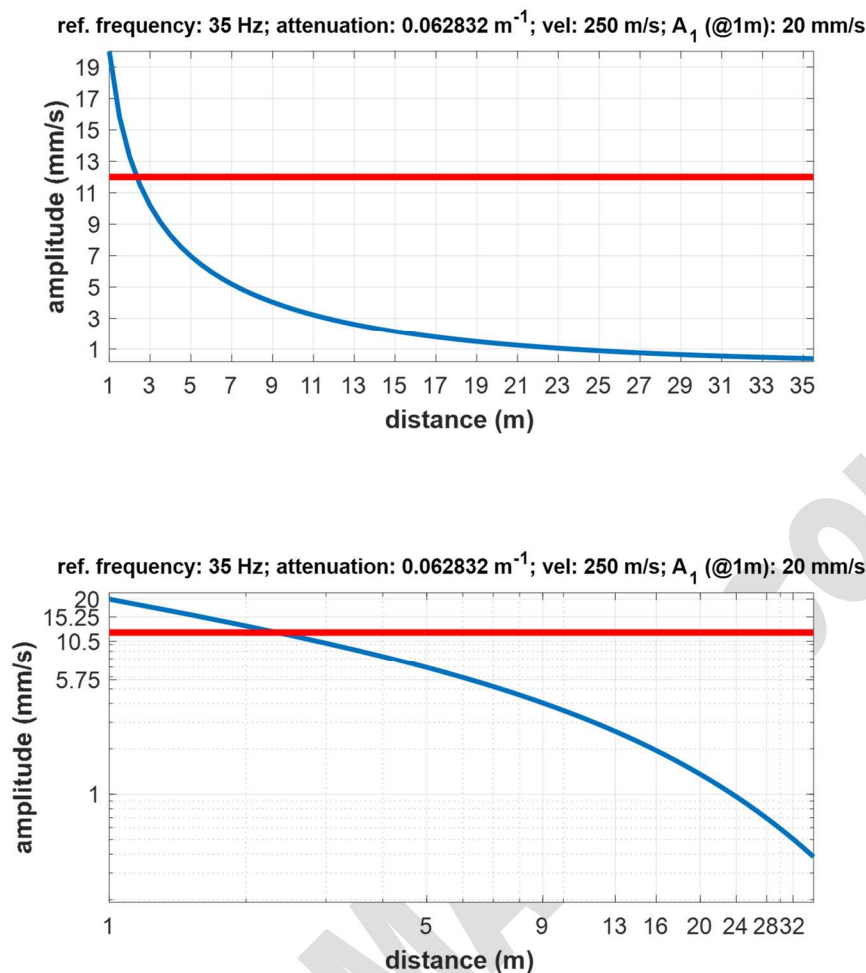


Figura 3.2. Relazioni tra distanza (offset) e picco di velocità determinata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sito e della tipologia di vibrazione indotta dalle attività di cantiere tenendo conto dell'eq. 1 riportata nel paragrafo introduttivo di questa relazione. La curva che descrive il decremento di ampiezza è riportata in blu, mentre la linea rossa riporta il limite di normativa (DIN4150) a 35 Hz (12 mm/s - vedi Figura 3.1 e relativo testo). Appare evidente che i limiti di normativa vengano superati solo per distanze inferiori a circa 3 m.

Su un piano più quotidiano, i dati sintetizzati in Figura 3.4 riferiscono quali siano i valori delle vibrazioni indotte da comuni attività quotidiane (porte o piedi che sbattono, martelli/trapani a percussione). Si nota come **in comuni edifici in muratura, piedi o porte che sbattono possono provocare vibrazioni di ampiezza anche superiore (0.3-17 mm/s) a quelle provocate dai macchinari quali quelli utilizzati nel cantiere in oggetto ad una distanza superiore a indicativamente 4m.**

A questo proposito è facile e immediato confrontare i dati relativi ad esempio alla mattinata di venerdì 19 maggio e nel pomeriggio di giovedì 18 maggio con il grafico riportato in Figura 3.2 (dati in perfetto accordo tra loro e con tutta la letteratura disponibile e menzionata nel paragrafo introduttivo) e con la tabella riportata in Figura 3.4.

In termini pratici, gli effetti delle vibrazioni provocate dalle attività di cantiere a 70-80 m di distanza (vedi ad esempio l'edificio a 3 piani posto al di là di Via [omissis]), sono

paragonabili a quelle provocate da un sisma di magnitudo 6.5 a 100 Km di distanza (vedi Figura 3.3) e agli effetti di trapani percussori o porte che sbattono all'interno dello stesso edificio (vedi Tabella riportata in Figura 3.4).

Si tratta di ampiezze pari a circa 0.5 mm/s e quindi del tutto insignificanti rispetto la possibilità di indurre danneggiamenti ad un edificio.

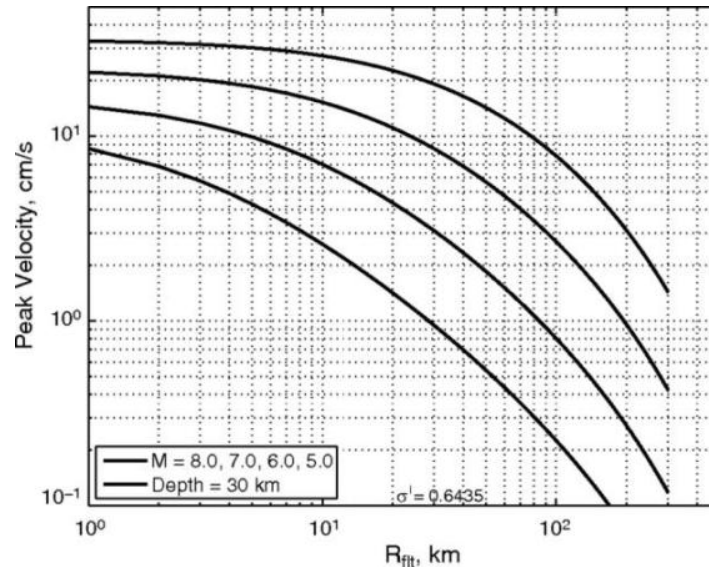


Figura 3.3. Relazioni tra distanza e picco di velocità per terremoti di magnitudo 5, 6, 7 e 8. È chiaro come, per i quattro terremoti considerati, si raggiunga un picco di velocità pari a circa 10 mm/s (1 cm/s) a rispettivamente circa 30, 85, 200 e 350 km dall'epicentro.

Vibration source	Resulting PPV (mm/s)		
	Modern steel frame office	Modern masonry dwelling	Old dwelling (thick, lime mortar masonry)
Normal walking	0.02-0.2	0.05-0.5	0.02-0.03
Foot stamping	0.2-0.5	0.3-3.0	0.15-0.7
Slamming doors	10-15	11-17	3-9
Percussive drilling	5-25	10-20	10-15

Figura 3.4. Ampiezza delle vibrazioni indotte da attività quotidiane (normale camminamento, battuta di piedi, porte che sbattono e martello/trapano a percussione) in tre diverse tipologie di edificio. Da Deckner (2013).

Un ulteriore esempio utile a comprendere l'entità (cioè la non rilevanza rispetto alla stabilità strutturale di un edificio) delle vibrazioni prodotte dalle attività di cantiere oggetto di monitoraggio è presentato in Figura 3.5 in cui si riportano i dati relativi al passaggio di un treno a 10 m di distanza dal sensore. La massima vibrazione indotta è pari a circa 2 mm/s (quindi al di sotto dei limiti di normativa per tutte le classi di edificio - vedi Figura 1.7). Tale valore è analogo a quello indotto dalla macchina utilizzata nel cantiere oggetto di studio a una distanza di circa 15-20 m. Pensare che vibrazioni necessariamente di minore ampiezza (quali quelle provocate dalle attività del cantiere in oggetto a distanze

superiori ai citati 15-20 m) possano indurre danni a strutture di classe 2 risulta del tutto ingiustificato sia considerando la normativa che la vasta letteratura tecnica.

Preme sottolineare ancora una volta come i limiti di normativa e le risultanze sintetizzate in Figura 3.1 e 3.2 risultino del tutto coerenti con i dati bibliografici raccolti nel paragrafo introduttivo di questa relazione.

Inoltre, le frequenze di lavorazione e quelle tipiche degli edifici che circondano il cantiere oggetto di studio sono significativamente lontane le une dalle altre, non potendosi quindi verificare fenomeni di risonanza.

Le stesse misure effettuate nell'edificio del [omissis] (vedi ad esempio i dati relativi alle giornate del 29 marzo e 7 aprile), mostrano come l'energia trasmessa all'edificio (che si trova ben più vicino al cantiere rispetto qualsiasi altro della zona) è ben al di sotto di qualsiasi soglia critica indicata dalla normativa e dalla letteratura tecnica.

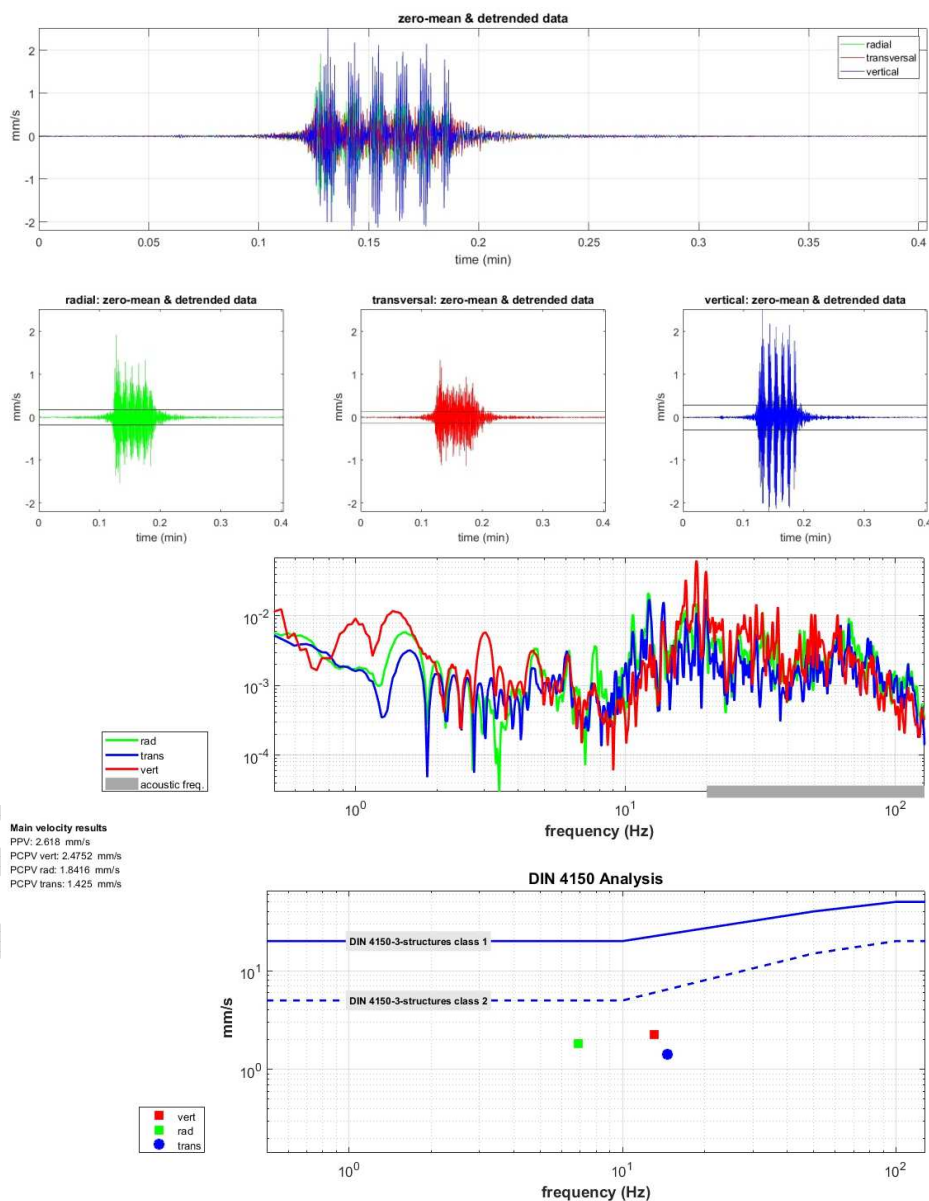


Figura 3.5. Ampiezza delle vibrazioni indotte dal passaggio di un comune convoglio ferroviario a una distanza di circa 10 m dal sensore. La massima ampiezza delle vibrazioni risulta pari a circa 2 mm/s (quindi inferiore alle soglie di normativa per tutte e tre le classi di edificio).

4. Riferimenti bibliografici

[omissis]

Analisi svolte con il software HoliSurface®

Vedi anche il libro

Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica

Dal Moro G. - pp. 280, ISBN 978-88-579-0878-6, Dario Flaccovio Editore (2019)



Giancarlo Dal Moro

Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica

La corretta e puntuale definizione delle velocità delle onde di taglio (V_s) è un fatto cruciale in diverse applicazioni di carattere geotecnico come anche nel campo delle micro-zonazioni sismiche.

Rispetto al precedente libro *Onche di superficie in geotecnica applicata*, in questo volume ci si preoccupa di puntualizzare e porre l'accento su alcuni fatti pertinenti all'analisi congiunta di dati sismici e di presentare gli avanzamenti dello stato dell'arte relativamente alla corretta definizione del profilo V_s .

Attraverso esempi, approfondimenti e casi studio, vengono illustrati diversi aspetti relativi in particolare alle seguenti tecniche: MASW (velocità di fase) e HoliSurface® (velocità di gruppo) multi-componente con analisi delle curve RVSr e RPM, analisi FVS, ESAC e MAAM, curve di dispersione modale ed effettive, HVSR e segnali di natura industriale.

Sono inoltre fornite nozioni e spunti riguardo all'analisi di dati vibrazionali di cantiere e alla caratterizzazione del comportamento di un edificio in termini di modi flessionali e torsionali (metodo classico basato su dati sincroni e metodo GHM).

Il testo mira a illustrare come, di fatto, non sussista alcuna differenza tra *teoria* e *pratica*. Quella che troppi vivono come una dicotomia è, infatti, un inesistente confine che definisce una sola e unica realtà: la conoscenza e la consapevolezza di quanto si compie e delle responsabilità che ne derivano. Prenderne coscienza è l'unico modo per tentare di contrastare il preoccupante e diffuso scadimento qualitativo dei lavori che riguarda anche importanti opere pubbliche e che appare determinato da un inadeguato sistema educativo, dall'assenza di puntuali controlli e dalla riduzione delle attività professionali a fatto meramente burocratico.

Giancarlo Dal Moro

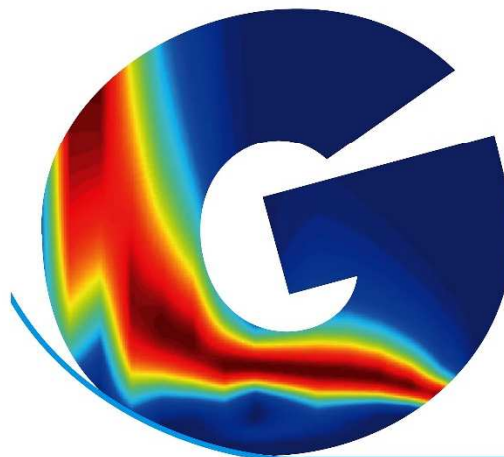


ACQUISIZIONE E ANALISI DI DATI SISMICI E VIBRAZIONALI PER STUDI DI CARATTERIZZAZIONE SISMICA E GEOTECNICA

Giancarlo Dal Moro



Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica



Geotecnica



DF 0878 € 48,00

- Le NTC nello scenario italiano ✓
- MASW multi-componente, HoliSurface®, ESAC, MAAM e HVSR ✓
- Analisi FVS e RPM - Analisi congiunta: concetti e pratica ✓
- Analisi vibrazionali di cantiere ✓
- Analisi vibrazionali per la caratterizzazione di edifici (metodo classico e GHM) ✓