

PROPONENTE



# MASTER PLAN 2014-2029

## AEROPORTO AMERIGO VESPUCCI FIRENZE

### STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE



**sede di CARRARA**  
Via Frassina, 21  
54033 CARRARA (MS)  
Tel. 0585.855624  
Fax 0585.855617

**sede di FIRENZE**  
Via di Soffiano, 15  
50143 FIRENZE (FI)  
Tel. 055.7399056  
Fax 055.713444

RESPONSABILE PROGETTO E COORDINATORE TECNICO:  
**Ing. Lorenzo TENERANI**

NOME ELABORATO

Quadro di riferimento Ambientale - Vibrazioni

CODICE ELABORATO

# SIA-AMB-05-REL-001

Codice elaborato		SIA-AMB-05-REL-001				Scala		
Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato / Data
A	Emissione per VIA	M. Viscardi	Feb 2015	M. Viscardi	Feb 2015	L.Tenerani	Feb 2015	Adf - V. D'arienzo

INDICE

1. PREMESSA	2
2. L'AREALE DI STUDIO	3
3. FENOMENI DI GENERAZIONE E PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI	5
3.1 Definizione di un fenomeno vibratorio	5
3.2 Vibrazioni indotte in ambito aeroportuale	6
3.2.1 Vibrazioni da impatto in fase di atterraggio	7
3.2.2 Vibrazioni indotte dai propulsori	12
3.3 Propagazione del fenomeno vibratorio	13
3.4 Impatto delle vibrazioni sugli edifici	19
4. PROCEDURA DI ANALISI ADOPERATA	22
4.1 Aspetti generali	22
4.2 Descrizione della metodologia adottata	22
4.3 Elenco della strumentazione impiegata	24
5. MISURAZIONE DI FASE 1 – CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE AEROPORTUALE	27
6. MISURAZIONE DI FASE 2 – CARATTERIZZAZIONE DEL PERCORSO DI PROPAGAZIONE	42
7. ANALISI CORRELATA DEI DATI E CONCLUSIONI	47
8. GLI IMPATTI VIBROMETRICI CORRELATI ALLA FASE DI CANTIERE	48
8.1 Aspetti generali	48
8.2 Le possibili vibrazioni indotte	48

## 1. PREMESSA

Nell'ambito delle analisi di impatto ambientale relative all'esercizio della futura nuova pista dell'aeroporto di Firenze si è inteso approfondire in via preliminare le eventuali implicazioni in termini di potenziali livelli vibrazionali indotti agli adiacenti edifici appartenenti al Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino, risultati quelli potenzialmente più esposti in virtù della relativa vicinanza al futuro sedime aeroportuale.

A tal fine si è inteso definire una procedura per l'analisi preliminare di tali parametri fisici sulla base delle caratteristiche operative del futuro aeroporto e delle caratteristiche geo-morfologiche dell'area oggetto di intervento.

Il presente documento contiene, pertanto, la trattazione dei fenomeni vibratorii correlabili alla fase di cantiere e di esercizio del Master Plan aeroportuale e costituisce parte integrante del Quadro di Riferimento Ambientale dello Studio di Impatto Ambientale.

Lo stesso è stato elaborato con la collaborazione dell'ing. Massimo Viscardi, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli al n. 12580, ricercatore di costruzione e strutture aerospaziali presso l'Università di Napoli.

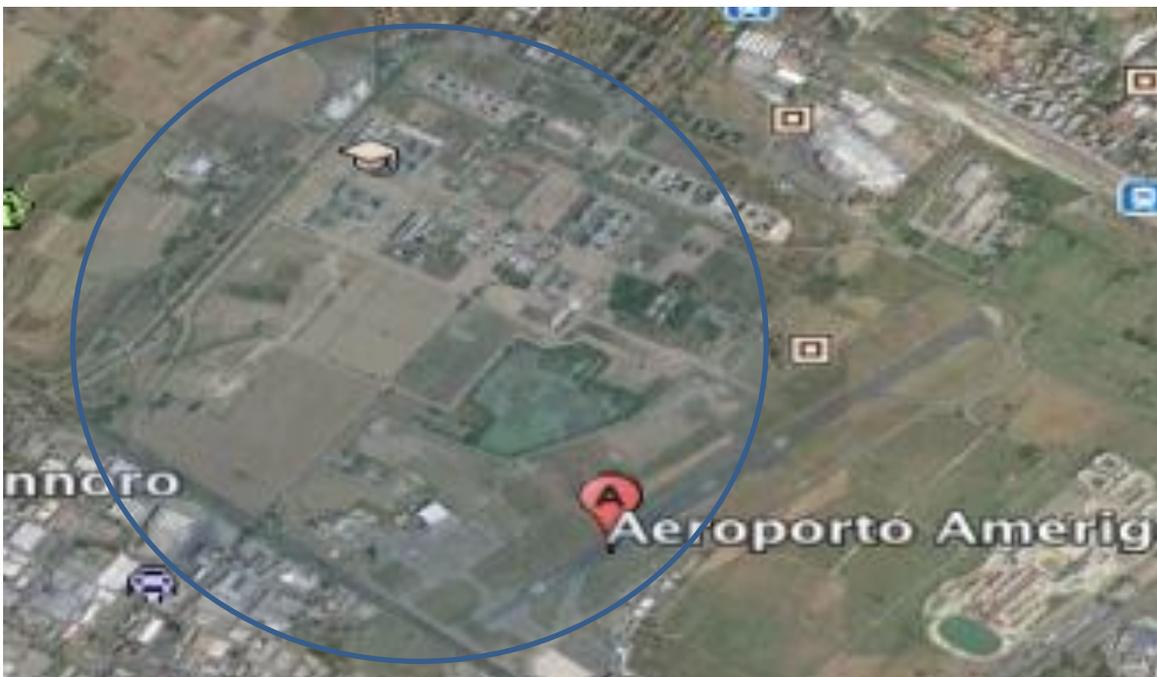
## 2. L'AREALE DI STUDIO

A seguito dell'approvazione dell'Integrazione al piano di indirizzo territoriale (PIT) per la definizione del Parco agricolo della Piana e per la qualificazione dell'aeroporto di Firenze, avvenuta il 16 luglio 2014, la società Aeroporto di Firenze (AdF) ha predisposto l'elaborazione del Master Plan aeroportuale in esame. All'interno del piano di sviluppo aeroportuale si prevede, in particolare, la realizzazione della nuova pista di volo, con orientazione 12/30 e sviluppo lineare pari a 2.400 metri, così come riportato in figura.



*Figura 1. Schematizzazione della nuova pista di volo*

Le successive immagini riportano una vista aerea dell'intera area.



*Figura 2. Individuazione dell'areale di intervento*

Immediatamente a nord del futuro sedime aeroportuale trova collocazione, all'interno del territorio comunale di Sesto Fiorentino, l'insediamento del Polo Scientifico e Tecnologico.

Detto insediamento risulta allo stato attuale parzialmente edificato rispetto alle future previsioni urbanistico e in funzione; in corrispondenza del medesimo comparto si riscontra, inoltre, la presenza di alcune attività estranee all'ambito didattico, sperimentale e scientifico, riconducibili in prevalenza al settore artigianale e produttivo.



*Figura 3. Vista del fronte meridionale del Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino*

Il Polo Scientifico e Tecnologico dell'Università di Firenze ha iniziato la sua attività intorno all'anno 2000. Vi sono attualmente collocate le sedi del Dipartimento di Chimica e del Dipartimento di Fisica e Astronomia, nonché alcune delle sezioni del Dipartimento di Neuroscienze, Psicologia, Area del Farmaco e Salute del Bambino (NEUROF ARBA), del Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA) e del Dipartimento di Biologia. Di particolare importanza il Centro Europeo per la Risonanza Magnetica nucleare (CERM) e il Laboratorio Europeo per la Spettroscopia Nonlineare (LENS), oltre al CISM, CRIST, GeneExpress, etc.

La frequenza dei decolli/atterraggi prevista dal Master Plan 2014-2029 (in incremento rispetto a quella attuale) e la futura giacitura della pista, prossima all'insediamento, hanno indotto a porsi il quesito circa l'impatto di tali eventi sulle attività didattiche e le attività di ricerca di tipo sperimentale, tali da poter prevedere sessioni di misura prolungate, della durata tipica da decine di minuti a varie ore.

Per quanto noto, questo avviene ad esempio durante misure di interazione luce-materia di vario tipo svolte in molti dei laboratori del Polo. Si possono portare esempi di misure di questo tipo tra quelle svolte presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia e presso il LENS, potenzialmente esposti agli effetti prodotti dall'esercizio delle operazioni aeroportuali. Analogamente, anche le misure che coinvolgono la microscopia ad alta risoluzione, presumibilmente in corso presso i laboratori INFN, ovvero quelle che riguardano la preparazione delle attrezzature per gli esperimenti sulle onde gravitazionali, ma anche le attività dell'acceleratore che utilizzano microfasci di ioni.

### 3. FENOMENI DI GENERAZIONE E PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI

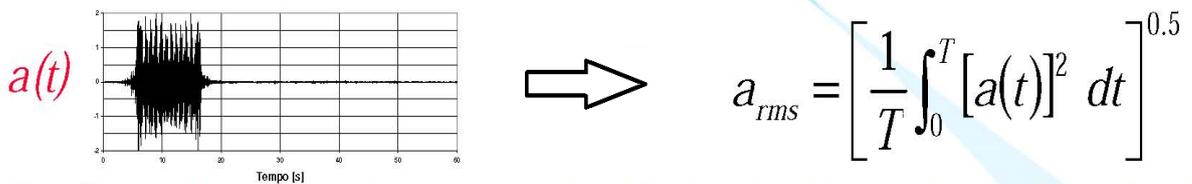
#### 3.1 DEFINIZIONE DI UN FENOMENO VIBRATORIO

La vibrazione è un moto ciclico attorno ad una posizione di quiete caratterizzato da una sorgente (veicoli, attività antropiche, cantieri, ecc.), da un mezzo di trasmissione (terreno) e un ricettore, ossia chi riceve il moto trasmesso (persone, edifici, infrastrutture).

In generale, i fenomeni vibratorii possono danneggiare edifici e manufatti, o produrre effetti negativi sullo svolgimento della normale attività umana.

Le grandezze di riferimento per la misura delle vibrazioni sono:

- il valore RMS (*Root Mean Square*) dell'accelerazione:



Il livello di accelerazione è espresso in dB (decibel, grandezza logaritmica) come:

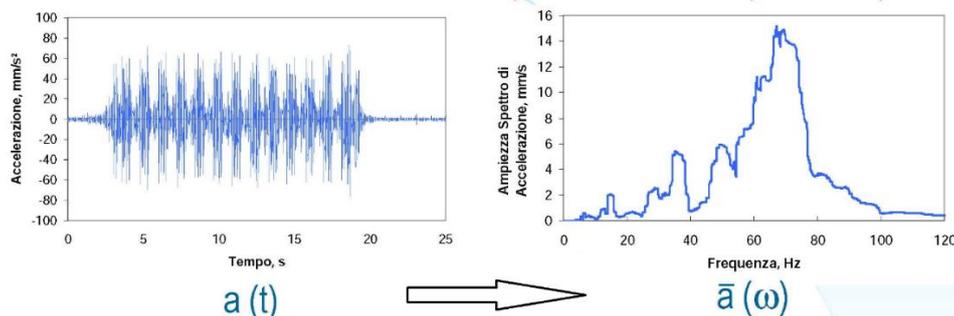
$$L = 20 \cdot \text{Log}_{10} \frac{a_{rms}}{a_0} \text{ dove } a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2 \text{ accelerazione di riferimento (norma ISO1683)}$$

- l'attenuazione DL del livello di vibrazione tra due punti A e B definito come:

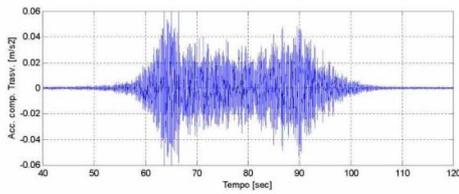


- lo spettro di frequenza esprimibile in termini di ampiezza (modulo) e fase. Nella pratica si valuta attraverso algoritmi numerici quali la FFT (*Fast Fourier Transform*)

La trasformata di Fourier converte una funzione in spettro continuo delle componenti in frequenza.



È usuale una rappresentazione spettrale del segnale vibratorio attraverso il calcolo del valore di accelerazione (RMS) per bande di frequenza definite dalla normativa (UNI9614 ad es.):



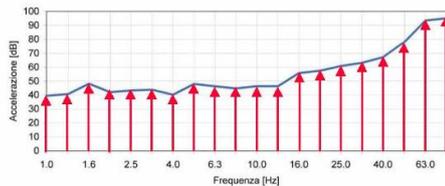
Segnale

Numero di banda di frequenza	Frequenza centrale [Hz]
0	1
1	1.25
2	1.6
3	2
4	2.5
5	3.15
6	4
7	5
8	6.3
9	8

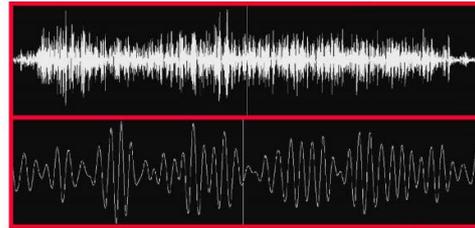
Numero di banda di frequenza	Frequenza centrale [Hz]
10	10
11	12.5
12	16
13	20
14	25
15	31.5
16	40
17	50
18	63
19	80

Filtraggio per bande di frequenza (ottave)

$f=2^n$  ( $n=0 \Rightarrow f = 1$  Hz,  $n=1/3 \Rightarrow f=1.25$  Hz,  $n=2/3$  ecc.)



Spettro in ottave (1/3 o 1/12) dei valori rms, in dB



Le vibrazioni possono produrre sulle strutture degli edifici notevoli danni tanto da creare situazioni di instabilità. La continuità delle vibrazioni può, inoltre, danneggiare apparecchiature elettroniche con conseguenti disfunzioni facilmente immaginabili.

Non va peraltro trascurata, in queste circostanze, la sensazione di disagio vissuta dalla popolazione che vive negli edifici stessi, soprattutto nelle ore notturne, anche se l'intensità delle vibrazioni non dovesse essere elevata.

Queste prime considerazioni mettono in luce l'importanza dello studio delle cause che innescano le vibrazioni, delle metodologie di rilevazione, dei criteri di assorbimento e di attenuazione delle vibrazioni.

Va tenuto presente che la pericolosità di una vibrazione dipende da tre fattori fondamentali:

- l'energia espressa dalla forza pulsante;
- il mezzo attraverso cui si trasmettono;
- la tipologia della struttura.

### 3.2 VIBRAZIONI INDOTTE IN AMBITO AEROPORTUALE

L'esercizio aeroportuale, e in particolare il traffico di veicoli, può in generale essere causa di vibrazioni indotte sulle strutture ed aree adiacenti le aree operative. Tali vibrazioni hanno generalmente una caratteristica di intermittenza, nel senso che sono associate a fenomeni dinamici di breve durata (operazioni di atterraggio e decollo dei velivoli, piuttosto che operazioni di taxi) separati da intervalli in cui la vibrazione ambientale denota un'ampiezza significativamente più bassa (in pratica coincidente con il rumore di fondo).

Le fasi che possono maggiormente indurre vibrazioni sono certamente quelle dell'atterraggio e del decollo.

Nel primo caso, l'impatto del velivolo con la pista, genera un trasferimento di energia di tipo abbastanza impulsivo che si tramuta in un movimento vibratorio che, dal punto di impatto, si propaga in direzione longitudinale, trasversale e verticale.

Nel secondo caso sono invece le onde di pressione generate dai propulsori che si propagano attraverso il mezzo aereo e, impattando sul terreno, inducono sollecitazioni dinamiche allo stesso. Anche in questo caso il movimento vibratorio, dal punto di impatto, si propaga in direzione longitudinale, trasversale e verticale.

### 3.2.1 Vibrazioni da impatto in fase di atterraggio

Le vibrazioni indotte in fase di atterraggio possono relazionarsi alle forze di interazione tra l'organo di atterraggio e la superficie della pista.

Durante tale interazione si ha, infatti, un trasferimento di energia, con caratteristiche essenzialmente di tipo impulsivo, che pone in vibrazione la pista.

Per comprendere meglio la dinamica di tale fenomeno, si può far riferimento alle normative per il dimensionamento degli organi di atterraggio che devono essere in grado di sopportare tali carichi, perché nel proprio dimensionamento si fa l'ipotesi di pista infinitamente rigida.

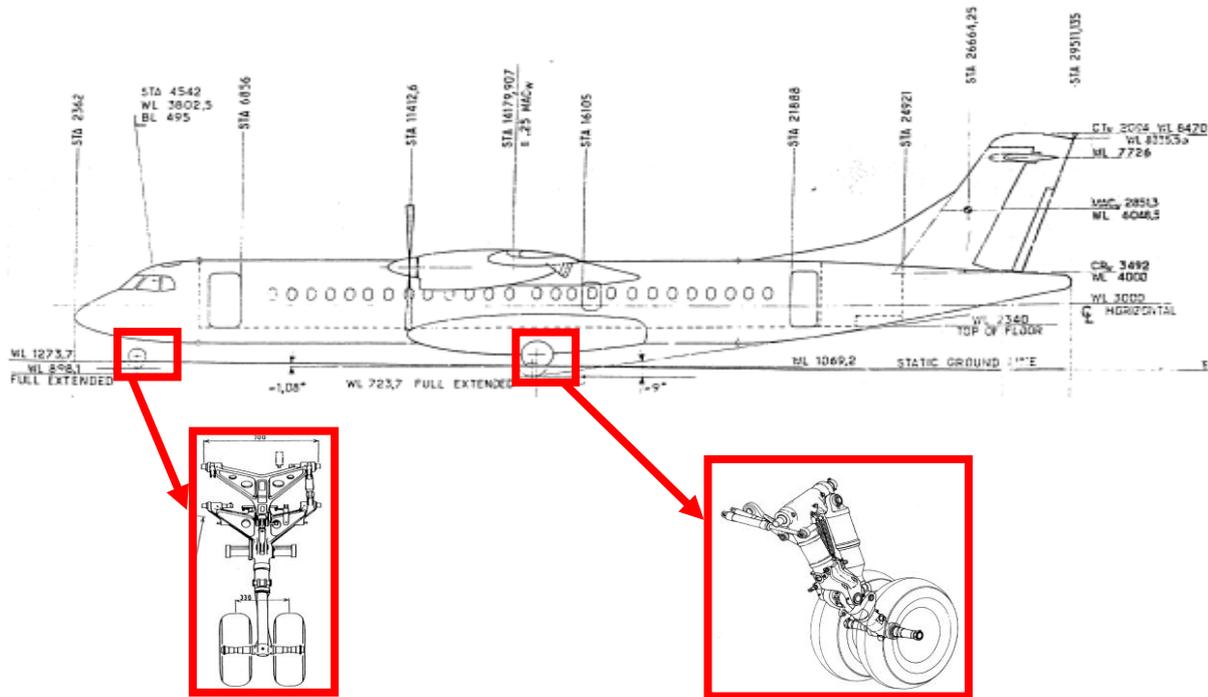


Figura 4. Schematizzazione degli organi di atterraggio (carrelli)

#### La normativa civile J.A.R. 25

In Europa la normativa civile J.A.R. è stata emanata per garantire la completa operatività del velivolo in condizioni di piena sicurezza. Per questo motivo l'Ente Certificante ricorre ad ispettori, il cui compito è quello di accertare che il produttore del velivolo abbia progettato l'intera struttura in conformità alle norme specificate. Solo dopo le necessarie verifiche è rilasciato il certificato di aeronavigabilità.

Per i velivoli con peso al decollo superiore a 12.500 libbre [5.670 kg], si fa riferimento alla JAR 25 denominata "Joint Aviation Requirements for Large Aeroplanes", basata sulla Parte 25 della Federal Aviation Regulations statunitense.

Le prescrizioni di interesse partono dal paragrafo 25.301 nel capitolo *General*, proseguendo per la parte inerente la verifica dei carichi sul carrello ad iniziare dai paragrafi 25.471 e 25.721 nei capitoli, rispettivamente, *Ground Loads* e *Landing Gear*. Tutte fanno capo alla sottoparte *C-Structural* della sezione 1.

Le specifiche generali sui carichi tengono conto delle seguenti situazioni:

- a) i requisiti di resistenza sono specificati in termini di carichi di contingenza e di carichi di robustezza e, salvo diversamente disposto, i carichi prescritti sono carichi di contingenza;
- b) tutti i carichi devono essere posti in equilibrio con le forze d'inerzia, tenendo conto di tutti gli elementi di massa appartenenti al velivolo, e devono essere distribuiti in maniera da riprodurre fedelmente le condizioni reali o da approssimarle in modo cautelativo;

- c) se le deformazioni sotto carico modificano la distribuzione dei carichi esterni o interni, si deve tener conto di tale nuova distribuzione;
- d) salvo diversamente specificato, deve essere applicato il coefficiente di sicurezza di 1,5 ai carichi di contingenza prescritti che sono considerati carichi esterni sulla struttura.

I requisiti generali sulla resistenza e deformazione mettono in rilievo che :

- la struttura deve poter sopportare i carichi di contingenza senza subire dannose deformazioni permanenti e a tutti i carichi, fino ai carichi di contingenza, la deformazione non deve pregiudicare la sicurezza d'impiego;
- laddove la flessibilità strutturale è tale che una qualche velocità d'applicazione del carico, suscettibile di verificarsi nelle condizioni d'impiego, possa causare sollecitazioni transitorie sensibilmente più elevate di quelle corrispondenti ai carichi statici, si deve tener conto degli effetti di tale velocità d'applicazione;
- la rispondenza della struttura ai succitati requisiti di resistenza e deformazione deve essere dimostrata per tutte le condizioni di carico critiche, attraverso analisi strutturale se la struttura è conforme ai tipi per i quali l'esperienza ha dimostrato che tali metodi danno affidamento, altrimenti per mezzo di prove di carico eseguite sino al livello del carico ultimo o minori se diversamente autorizzato.

### Carichi al Suolo

Sono specificati preliminarmente:

- a) *Carichi ed equilibrio.* I carichi limite al suolo devono essere considerati come forze esterne applicate alla struttura del velivolo. In ciascuna delle condizioni di carico al suolo specificate, le reazioni esterne devono essere messe in equilibrio con le forze d'inerzia angolari e lineari in maniera razionale o cautelativa (si riprende la norma b) delle specifiche generali sui carichi);
- b) *Posizioni critiche del baricentro.* Le posizioni critiche del baricentro, comprese nei limiti per i quali è richiesta la certificazione, devono essere scelte in modo da ottenere, in ciascun elemento del carrello di atterraggio, i carichi massimi di progetto. Devono essere considerate le posizioni in avanti e indietro, verticali e laterali del baricentro dell'aeromobile. Gli spostamenti laterali del baricentro rispetto all'asse del velivolo, che portano a carichi sul carrello principale non superiori al 103% dei carichi critici di progetto in condizioni di carico simmetriche, possono essere accettati senza considerare l'effetto di tali spostamenti laterali sui carichi degli elementi del carrello principale o sulla struttura del velivolo. Ciò vale però solo a condizione che siano originati dalla casuale disposizione di tutto ciò che viene trasportato, o dal casuale stoccaggio o uso non simmetrico del combustibile, e che ci siano inoltre opportune istruzioni per garantire che lo spostamento laterale rimanga entro i limiti citati.

Si evidenziano le disposizioni che sono preliminari alle norme attinenti l'atterraggio in linea di volo, con assetto cabrato, con deriva laterale:

- 1) i fattori di carico di inerzia verticale limite scelti, al baricentro del velivolo, non possono essere inferiori ai valori che si otterrebbero:
  - i. nell'assetto e in dipendenza dei carichi di resistenza corrispondenti alla condizione particolare d'atterraggio;
  - ii. con una velocità limite di discesa di 3,05 m/sec [10 feet/sec] al peso d'atterraggio di progetto (massimo peso per le condizioni d'atterraggio alla massima velocità di discesa);
  - iii. con una velocità limite di discesa di 1,8 m/sec [6 feet/sec] al peso di decollo di progetto (massimo peso per le condizioni d'atterraggio a velocità di discesa ridotta).
- 2) si può assumere che, durante l'impatto all'atterraggio, esista una portanza del velivolo non superiore al peso dello stesso e che essa sia applicata al baricentro del velivolo.

Si rilevano altresì le condizioni e le assunzioni inerenti il carico al suolo in generale :

- a) i fattori minimi di carico di inerzia limite corrispondenti alle velocità di discesa limite prescritte devono essere determinati in accordo con la norma corrispondente del capitolo Carrello di Atterraggio;
- b) l'Aeroplano deve resistere all'impatto dovuto all'atterraggio alle velocità di discesa prescritte, conservando inalterato il funzionamento di ciascun elemento predisposto alla dissipazione d'energia (inclusi i pneumatici), salvo che non accada un'anomalia che comunque non pregiudichi l'esercizio in sicurezza dell'elemento.
- c) eccetto per aeroplani per i quali gli effetti della flessibilità strutturale sono trascurabili, è necessario considerare l'effetto della risposta dinamica della struttura attraverso un'analisi che copra il comportamento del velivolo intero sino alla velocità di discesa limite di 3,05 m/sec. Il metodo d'analisi deve tenere in conto almeno i seguenti elementi:
  - i. la flessibilità strutturale (escludendo il carrello);
  - ii. le condizioni aerodinamiche assunte costanti;
  - iii. un modello analitico delle caratteristiche dinamiche del carrello principale, che sia verificato attraverso prove di caduta.

Il metodo di analisi può essere modificato quando si disponga di misure effettuate nel volo.

Vengono quindi fornite le condizioni di atterraggio nei casi sopra citati in linea di volo, con assetto cabrato.

#### Level landing condition

- a) Nell'assetto di linea di volo, si assume che il velivolo tocchi il terreno a una velocità la cui componente in avanti parallela al suolo vari da  $V_{L1}$  a  $1,25 V_{L2}$ , e che sia soggetta ai fattori di carico prescritti nelle disposizioni preliminari relative alle norme attinenti gli atterraggi paragrafo 1 con:
  - $V_{L1}$  uguale a  $V_{S0}$  (TAS-stallo) all'appropriato peso d'atterraggio e in condizioni standard a livello del mare;
  - $V_{L2}$  uguale a  $V_{S0}$  all'appropriato peso d'atterraggio e altitudini, in condizioni di giornata calda con temperatura di 41°F (23°C) al di sopra di quella standard.
- b) Se si desidera l'approvazione per atterraggio con componente di vento maggiore di 18,5 km/h [10 nodi], deve essere analizzato l'effetto dell'aumentata velocità di contatto.
- c) Assumendo che le seguenti combinazioni di componenti verticali e di resistenza agiscano sulla linea centrale dell'asse delle ruote, si applica quanto segue:
  1. per le condizioni di massimo carico per accelerare le ruote (massimo carico di *spin-up*), le componenti di resistenza che simulano le forze necessarie per accelerare le ruote fino alla specificata velocità al suolo devono essere combinate con le reazioni verticali del terreno che si hanno nell'istante in cui i carichi di resistenza sono massimi. Il coefficiente d'attrito tra i pneumatici e il suolo può essere stabilito considerando gli effetti della velocità di slittamento e della pressione delle gomme, tuttavia non è necessario che sia maggiore di 0,8. Questa condizione deve essere applicata al carrello, alle strutture di attacco direttamente interessate e a quegli elementi con grande massa quali serbatoi esterni del combustibile e gondole.
  2. per le condizioni di massimo carico verticale sulla ruota, una componente longitudinale di resistenza agente all'indietro, non inferiore al 25% della reazione massima verticale del terreno, deve essere combinata con la massima reazione del terreno esplicita nelle situazioni esaminate nelle disposizioni preliminari agli atterraggi e nelle condizioni del carico al suolo in generale.
  3. per le condizioni di massimo carico dovuto al ritorno elastico (massimo carico di *spring-back*), i carichi orizzontali agenti in avanti, che derivano da una rapida riduzione dei carichi di resistenza che accelerano le ruote, devono essere combinati con le reazioni verticali del terreno nell'istante

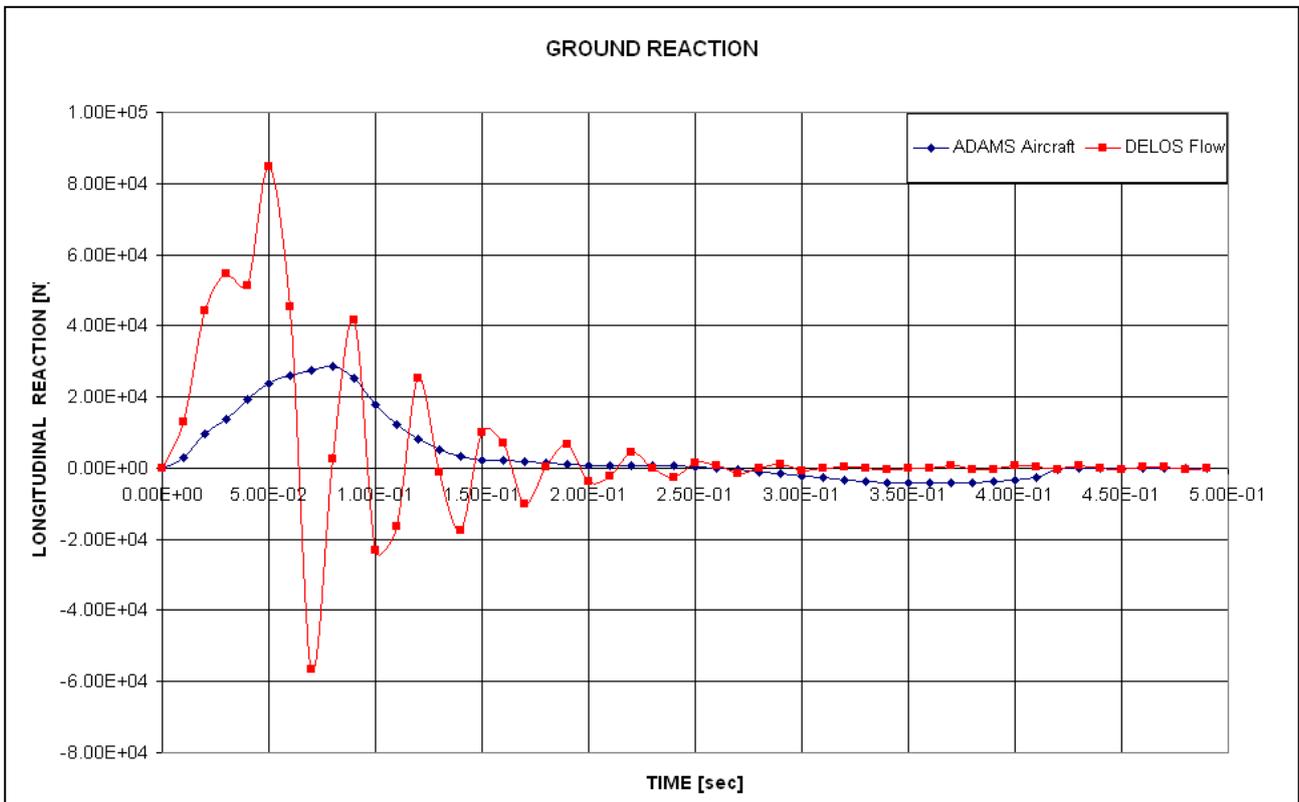
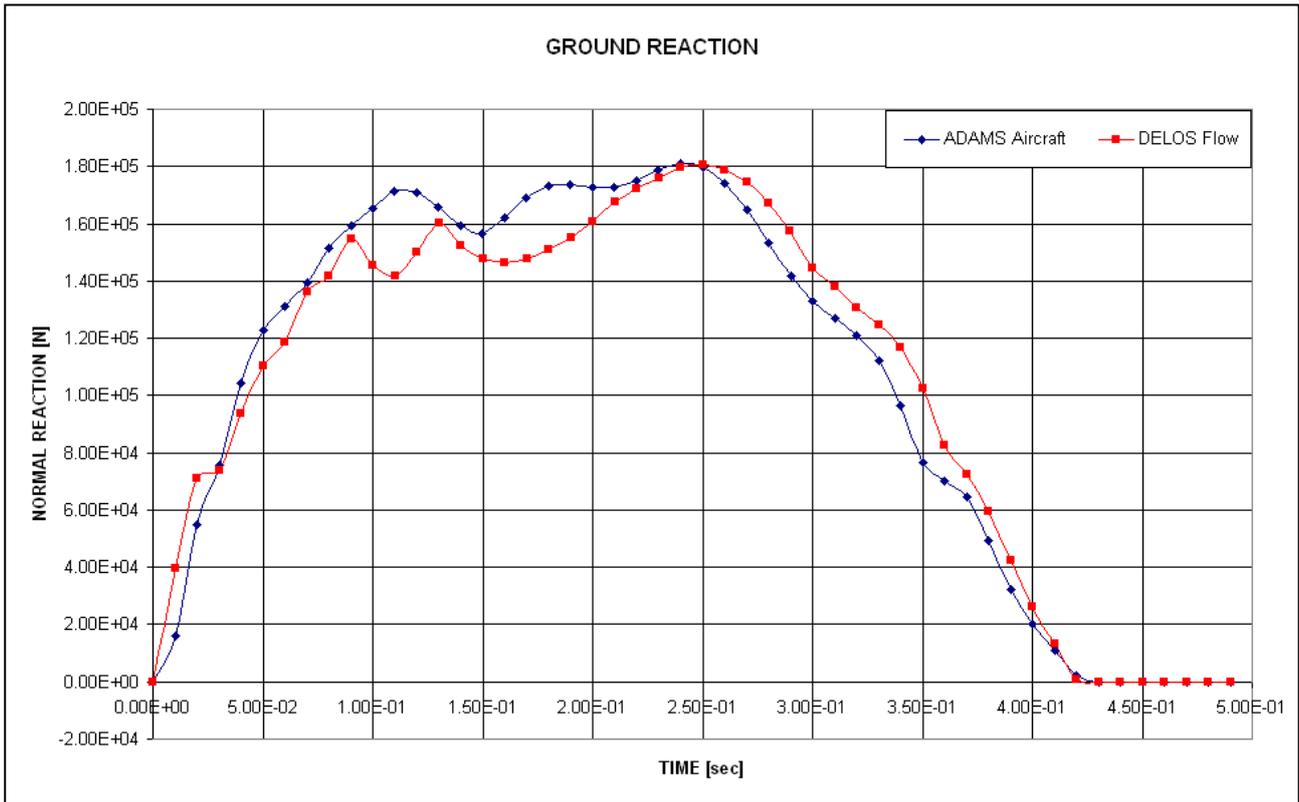


in cui il carico in avanti è massimo. Questa condizione deve essere applicata al carrello, alle strutture d'attacco direttamente interessate e a quegli elementi con grande massa quali serbatoi esterni del combustibile e gondole.

4. Va tenuta in conto la peggiore combinazione dei carichi che possono nascere durante un atterraggio con deriva laterale. In assenza di un'analisi più razionale, devono essere esaminate le seguenti condizioni:
  - i. un carico verticale uguale al 75% della massima reazione del terreno succitata, in combinazione con un carico di resistenza ed uno laterale pari rispettivamente al 40% e al 25% di questo carico verticale;
  - ii. deflessioni dell'ammortizzatore e del pneumatico pari al 75% della deflessione corrispondente alla massima reazione del terreno in situazione di velocità a discesa limite di 3,05 m/sec; non si considera tale caso di carico in presenza di pneumatici sgonfi.
- d) Per le condizioni d'atterraggio in linea di volo, nel caso di velivoli con ruotino anteriore, devono essere analizzate tutte le condizioni di cui ai paragrafi a-b-c della presente sezione assumendo che il velivolo abbia gli assetti seguenti:
  1. un assetto in cui le ruote principali tocchino il suolo e il ruotino anteriore lo sfiori;
  2. un assetto in cui il ruotino anteriore e le ruote principali tocchino il suolo contemporaneamente, sempre che alle specificate velocità di discesa e d'avanzamento tale assetto possa essere ragionevolmente ottenuto. Per questo assetto:
    - i. il carrello anteriore e quello principale possono essere analizzati separatamente, nelle condizioni di cui in c)-1. e c)-3. della sezione;
    - ii. il momento di beccheggio, nelle condizioni di cui in c)-2. e c)-4. della sezione, si assume che sia sopportato dal ruotino anteriore.

### Tail Down condition

- a) Si assume che il velivolo prenda contatto con il suolo con componenti in avanti e parallele al terreno delle velocità i cui valori siano compresi tra  $V_{L1}$  e  $V_{L2}$ , e sia soggetto ai fattori di carico visti nel paragrafo 1 delle disposizioni preliminari relative agli atterraggi. Si considera, inoltre, che la risultante delle componenti verticale e di resistenza specificate in c)-1. e c)-3. della precedente sezione agisca sulla linea centrale dell'asse delle ruote principali.
- b) Nel caso di velivoli con ruotino anteriore, si assume che l'aereo abbia un assetto corrispondente al minore tra l'angolo di stallo e l'angolo massimo che permetta il franco dal suolo di tutte le parti del velivolo stesso escluso le ruote principali.





### 3.2.2 Vibrazioni indotte dai propulsori

Questo potrebbe riguardare sia le vibrazioni dovute all'impatto degli aeromobili sulla pista, sia la trasmissione attraverso il terreno delle vibrazioni sonore emesse dai motori degli aeromobili a bassissima quota. Questo tipo di rumore diventa quindi assimilabile ad un rumore sismico.

I laboratori di ricerca del Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino che svolgono le misure più sensibili sono senza dubbio attrezzati con sistemi di smorzamento ottimizzati per il rumore sismico naturale, ma è del tutto da verificare che tali sistemi siano in grado di compensare anche il rumore aggiuntivo derivante dall'attività aeroportuale.

### 3.3 PROPAGAZIONE DEL FENOMENO VIBRATORIO

La propagazione dei moti vibrazionali segue le semplici regole dell'ottica geometrica, ed è ben rappresentata nel modello di Wood.

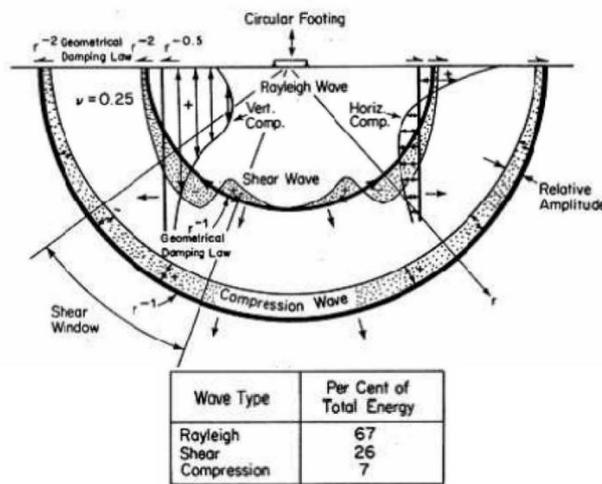
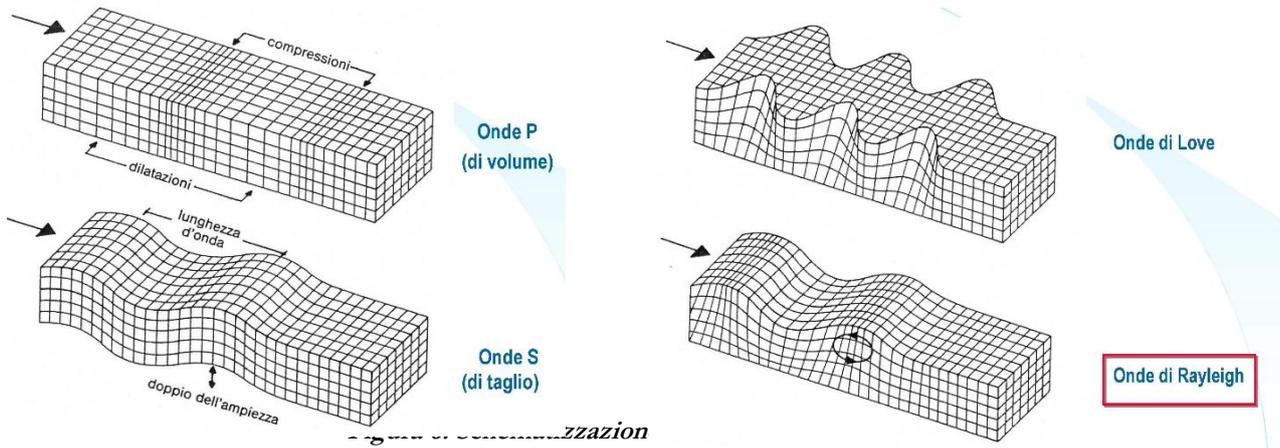


Figura 5. Schematizzazione del modello di Wood

In generale si possono schematizzare i modi di trasmettere le sollecitazioni meccaniche nel suolo con diversi di onde:

- Onde di volume “P”
- Onde di taglio “S”
- Onde di Love “L”
- Onde di Rayleigh “R”

Le figure seguenti ne mostrano una schematizzazione grafica.



L'onda di sollecitazione è caratterizzata dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  e dalla velocità di propagazione  $C$ . Le funzioni fondamentali che governano questi parametri sono le seguenti:

$$C = f \cdot \lambda$$

$$f = 1/T$$

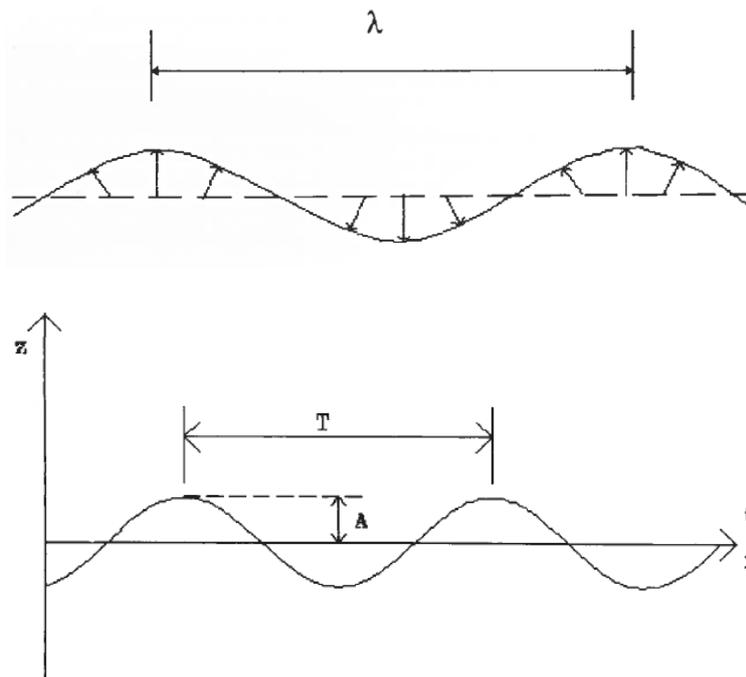
$$T = X/C$$

dove:

$C$  = velocità di propagazione (m/s);

$f$  = frequenza (Hz);

$\lambda$  = lunghezza d'onda (m).



Le funzioni che governano la velocità di propagazione in un mezzo perfettamente isotropo sono:

$$C_c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

$$C_s = C_t \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu}$$

con:

$E$  = modulo elastico;

$\nu$  = coefficiente di Poisson;

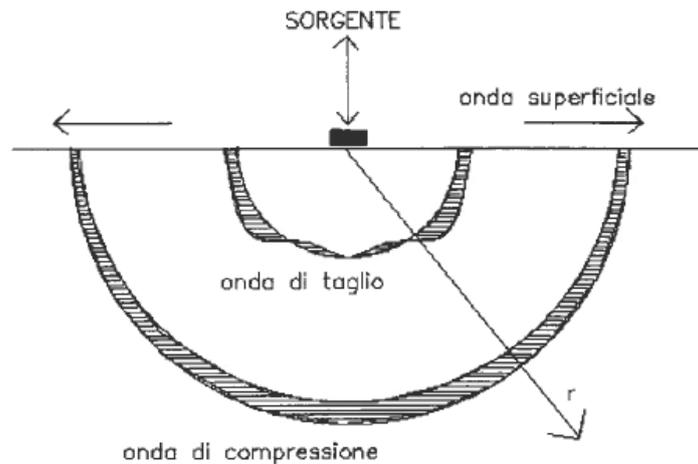
$\rho$  = densità.

I pedici  $c$ ,  $t$ ,  $s$  indicano rispettivamente la velocità di propagazione dell'onda di compressione, taglio, superficie.

Per quanto riguarda il terreno, la velocità di propagazione superficiale varia in un campo tra 60 e 150 m/s. Per confronto si pensi che nel calcestruzzo la velocità di propagazione di un'onda di compressione varia tra i 3.500 e i 4.500 m/s e nell'acciaio è di circa 5.000 m/s.

L'onda di compressione si propaga in forma semisferica in tutte le direzioni a partire dal punto di eccitazione. L'energia trasmessa ad un oggetto posto a distanza  $r$  dalla sorgente è inversamente proporzionale a  $r^2$ . Nel caso semplice di un'eccitazione con forma d'onda armonica contenente una sola frequenza di spicco, l'energia dell'onda trasmessa è proporzionale all'area sottesa all'ampiezza. La stessa ampiezza è inversamente proporzionale alla distanza  $r$ .

Le onde di superficie si muovono su un'area circolare a contatto con l'aria. Pertanto è facile comprendere perché si attenua di meno rispetto a quelle di compressione e taglio.



**Figura 7. L'andamento delle onde di sollecitazione su una sezione verticale**

In particolare, in un mezzo isotropo l'energia sviluppata da un impulso verticale si trasmette per il:

- 67% come onda superficiale;
- 26% come onda di taglio;
- 7% di compressione.

Da questi dati si comprende che è l'onda di superficie quella che va maggiormente ad interessare le fondazioni di edifici posti nella vicinanza di una forza impulsiva. È chiaro che nella realtà di un terreno, di certo non isotropo, contenente elementi disomogenei, come sassi e acqua, la distribuzione e propagazione dell'energia emanata da una sorgente può essere diversa da quella descritta nel modello. Va detto, comunque, che le indicazioni fornite rappresentano una distribuzione tendenzialmente vera anche nel caso reale.

Vanno fatte alcune considerazioni in merito alla frequenza.

Innanzitutto va sottolineato che esiste un legame diretto tra la frequenza e la velocità di propagazione; questo legame è definito dalla *dispersione*. Si può dimostrare come un'onda di superficie, nella sua propagazione, non mantiene la stessa forma. Inoltre, si può osservare che un'onda ad alta frequenza si propaga più velocemente di una a bassa frequenza.

Come ordine di grandezza si consideri che le frequenze di un'onda superficiale, in un terreno medio, variano tra i 5 ed i 35 HZ e che le ampiezze delle accelerazioni prodotte possono raggiungere i  $5 \text{ m/s}^2$  e si attenuano, disperdendosi nel suolo, fino a diventare inefficaci per valori di  $0,02 \text{ m/s}^2$ . Questi due limiti possono ottenersi, per una distanza tra sorgente e soggetto in esame, tra i 40 e 80 m .

Le modalità di propagazione e di attenuazione dei moti vibratorii nel mezzo terreno è funzione delle caratteristiche geologiche-geotecniche dei terreni e della loro geometria (che ne definisce le sue caratteristiche dissipative), della geometria della sorgente, del tipo di onda prevalente generato e chiaramente, della distanza del ricevitore dalla sorgente.

Le caratteristiche dissipative del mezzo all'interno del quale avviene la propagazione (terreno) sono dovute ad un fenomeno complesso risultante dalla interazione di diversi meccanismi, tra cui quelli ritenuti più importanti sono le perdite di energia di natura viscosa, per attrito tra le particelle di terreno e le dissipazioni dovute al movimento relativo tra fasi solida e fluida del terreno.

La valutazione del grado di attenuazione può essere valutata attraverso modelli teorici semplificati, basati su ipotesi semplificative per il caso in esame, oppure (come nel nostro caso) attraverso relazioni di attenuazione empiriche calibrate su risultati sperimentali (rilievi e misure in sito).

Le modalità di propagazione e di attenuazione dei moti vibratori nel mezzo terreno è funzione delle caratteristiche geolitologiche-geotecniche dei terreni e dalla propria geometria (che ne definisce le sue caratteristiche dissipative), dalla geometria della sorgente e del tipo di onda prevalente generato (P,S,R...) e chiaramente, della distanza del ricettore dalla sorgente.

Le caratteristiche dissipative del mezzo all'interno del quale avviene la propagazione (terreno) sono dovute ad un fenomeno complesso risultante dalla interazione di diversi meccanismi, tra cui quelli ritenuti più importanti sono le perdite di energia di natura viscosa, per attrito tra le particelle di terreno e le dissipazioni dovute al movimento relativo tra fasi solida e fluida del terreno.

La valutazione del grado di attenuazione può essere valutata attraverso modelli teorici semplificati, basati su ipotesi semplificative per il caso in esame, oppure (come nel nostro caso) attraverso relazioni di attenuazione empiriche calibrate su risultati sperimentali (rilievi e misure in sito).

Dal punto di vista geologico "l'area interessata dall'opera di progetto è parte di un deposito alluvionale rappresentato prevalentemente da limi argillosi (sensu A.G.I.) e/o argille limose variamente screziati per fenomeni di pedogenesi a pseudogley, con abbondanti concrezioni calcaree presenti a profondità media di circa 12,0 m da p.c.

Ove le concrezioni calcaree, a tali profondità, sono assenti, si rinvencono livelli limosi con macule di torba. Questi depositi costituiscono il corpo principale delle conoidi dei Torrenti Rimaggio e Zambra.

La soggiacenza dell'acqua dal p.c. è di 0,5 m. Essendo il terreno impermeabile, pur in condizioni di quasi totale saturazione, essa non è sede di una falda acquifera vera e propria. Ciò non esclude comunque che possano rinvenirsi piccole falde sospese in corrispondenza di lenti di materiali limoso-sabbiosi più permeabili ed in presenza di possibili paleo alvei sepolti".

### Esempio di Sezione Litologica ( B-B' perpendicolare all'area CNR)

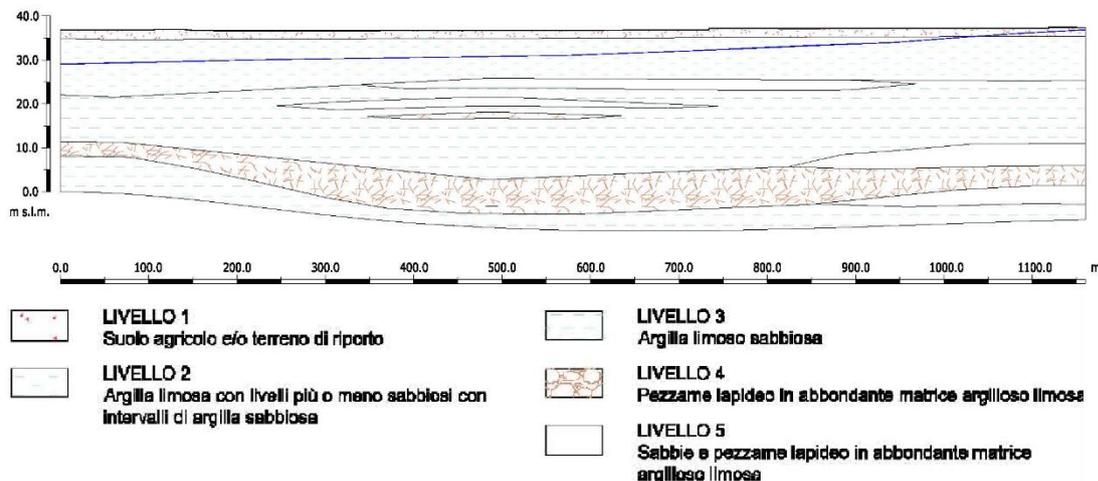


Figura 8. Sezione litologica dei terreni presenti nell'areale di intervento

La bibliografia esistente in materia attribuisce a questo tipo di terreni un alto grado di dissipazione come riportato nel grafico sottostante:

Attenuazione in funzione della distanza in diversi tipi di terreno: casi estremi

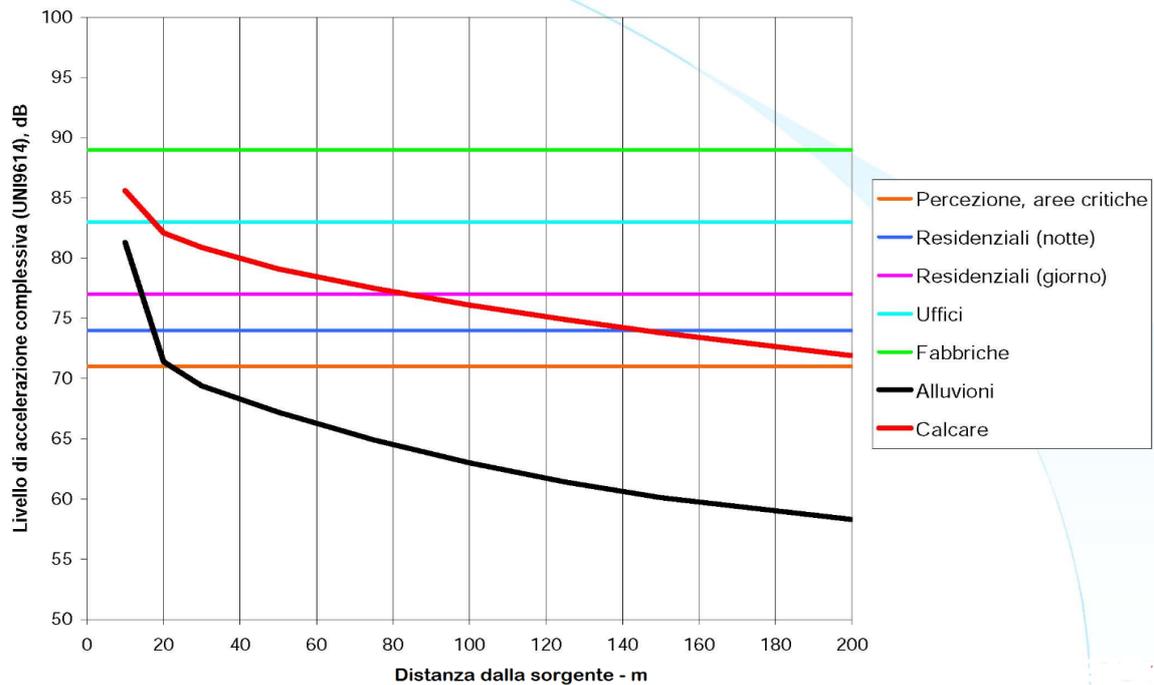


Figura 9. Diagramma di attenuazione delle vibrazioni in terreni di diversa tipologia

L'andamento delle caratteristiche di attenuazione generale può essere ricondotto a schemi sufficientemente lineari solo nel caso di propagazione in mezzi abbastanza omogenei.

Tale ipotesi, si può certamente adottare nel caso delle aree circostanti la pista aeroportuale (come sembra essere confermato dalle analisi geolitologiche), ma non nel tratto proprio della pista stessa.

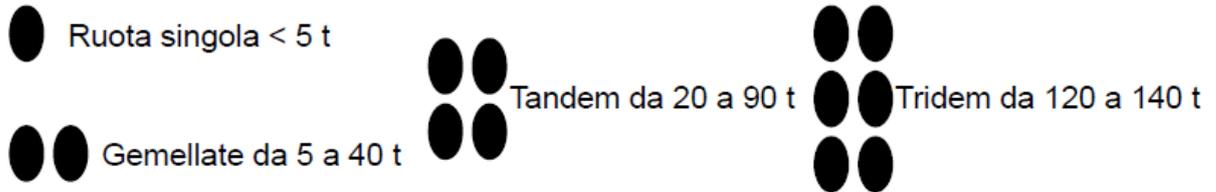
Caratteristiche della pavimentazione aeroportuale

Una pavimentazione aeroportuale è una struttura formata da una successione di strati costituiti da materiali con caratteristiche diverse il cui insieme è in grado di assolvere i seguenti compiti:

- formare una struttura stabile nel tempo e poco deformabile;
- risultare capace di resistere alle ripetute sollecitazioni dovute al passaggio degli aeromobili;
- trasferire il carico al piano di posa compatibilmente con la portanza di quest'ultimo;
- garantire una circolazione rapida e sicura degli aeromobili a terra in relazione ai problemi di aderenza pneumatico/pavimentazione;
- realizzare una superficie sufficientemente regolare tale da escludere vibrazioni dannose e assicurare un adeguato confort per i passeggeri.

Pertanto le pavimentazioni aeroportuali risultano funzionalmente simili a quelle stradali, ma con qualche differenza. Le differenze tra le pavimentazioni aeroportuali e stradali sono imputabili alla diversità tra i due traffici, in particolare:

1. *Entità del carico*: il carico massimo per asse singolo in ambito stradale è 12 t, pertanto con carico su ruota singola pari a 6 t; un DC-10 Sr 30 ha un carico su ruota singola di 24 t;
2. *Pressione di gonfiaggio*: nel caso dei veicoli stradali le pressioni sono variabili tra 2 e 6 bar, mentre per gli aeromobili commerciali sono contenute tra 1,5 e 14 bar, per aeromobili militari comprese tra 14 e 20 bar;
3. *Geometria del carico*: le ruote del carrello di un velivolo presentano diverse configurazioni (ruota singola, ruote, etc.):



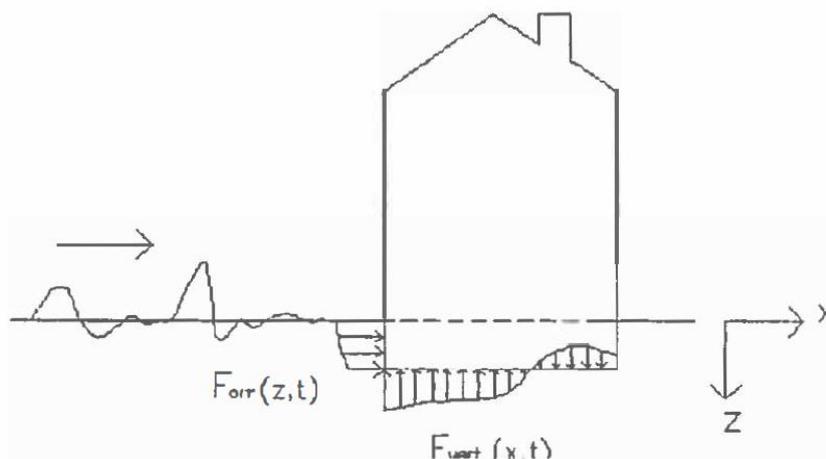
4. *Numero di ripetizioni di carico:* il numero delle ripetizioni è inferiore in ambito aeroportuale (es. forte traffico 130.000 mov/anno) rispetto ad un caso stradale (es. autostrada >1.000.000 pass/anno);
5. *Velocità di percorrenza:* le velocità di percorrenza degli aeromobili presentano una variabilità maggiore rispetto al campo stradale. Ad esempio sulla pista di volo esse variano tra 100 e 300 km/h, mentre sulle vie di circolazione le stesse sono contenute tra 20 e 50-90 km/h;
6. *Maggiore influenza alle condizioni climatiche:* a causa della grande estensione, delle deboli pendenze longitudinali e trasversali e dell'assenza di vegetazione.

### 3.4 IMPATTO DELLE VIBRAZIONI SUGLI EDIFICI

Le strutture possono essere sollecitate dinamicamente sia dall'interno sia dall'esterno.

In ognuno dei due casi bisogna valutare se l'eccitazione può danneggiare le strutture o parte di esse.

In caso di forza *esterne*, gli edifici vengono sollecitati attraverso onde superficiali che interagiscono con le fondazioni. Si mostra, schematicamente, di seguito, il trasferimento delle forze meccaniche da suolo a fondazioni:



**Figura 10. Indicazione schematica delle forze indotte alle fondazioni di un edificio dalle onde di sollecitazione superficiali**

Nell'analisi degli effetti delle vibrazioni su un edificio, particolare importanza è assunta dal materiale costituente, dalle caratteristiche dinamiche proprie delle singole strutture, dalla tipologia dell'edificio nel suo insieme, dalle fondazioni e dal terreno circostante.

Le onde di sollecitazione, dal punto di vista della pericolosità, possono essere caratterizzate attraverso due soli parametri, *frequenza* ed *ampiezza*, in quanto la velocità e gli spostamenti possono essere ricavati da questi.

È molto difficile determinare un limite di frequenza ed ampiezza che possa essere considerata dannosa per una struttura. Non esistono infatti limiti netti, ma è possibile individuare dei campi di pericolosità su cui basarsi.

Nel seguito questi limiti verranno chiamati *limiti di pericolosità*.

Per quanto riguarda la frequenza, questa si dimostra particolarmente pericolosa nel campo delle infrasonore (cioè meno di 16 Hz), in quanto rientrante nel campo delle frequenze naturali degli edifici o delle singole strutture.

Al riguardo dei materiali i più sensibili alle vibrazioni sono quelli meno assimilabili ad un materiale isotropo, o meglio, quelli che presentano una forte anisotropia in termini di resistenza. Ciò accade perché la vibrazione, propagandosi sotto forma di sollecitazione, in tutte le direzioni, troverà sfogo dove meno efficace è la resistenza del materiale. Caso tipico è quello delle murature che rappresentano uno dei materiali più a rischio di fronte alle sollecitazioni meccaniche. Un altro fattore importante nella valutazione della pericolosità della vibrazione è la *durata*. La durata della vibrazione abbassa i limiti di pericolosità ed in modo particolare l'entità limite dell'ampiezza dell'oscillazione. Come ordine di grandezza si pensi che per vibrazioni tra i 5 ed i 30 Hz, un'eventuale ampiezza di 0,5 m/s<sup>2</sup> può produrre danni anche per durata limitate, che siano ore o giorni. Un'ampiezza di 0,05 m/s<sup>2</sup> può essere, invece, dannosa se sopportata per lunghi periodi (mesi o anni).

E' possibile, allora, schematizzare le situazioni più tipiche che rappresentano una situazione di pericolo:

- l'intensità della sollecitazione dinamica, intesa come insieme dei valori di ampiezza e frequenza, supera anche per breve tempo il limite di resistenza di un elemento strutturale;
- l'eccitazione dinamica produce un assestamento differenziato delle fondazioni, provocando indirettamente una redistribuzione dei carichi, con possibile superamento dello stato limite;
- la frequenza di eccitazione corrisponde ad un sottomultiplo o alla frequenza fondamentale dell'edificio o di un suo elemento strutturale.

Ognuna di queste tre possibilità dovrà essere presa in considerazione nell'esame di un edificio sottoposto a vibrazioni, tenendo conto che tutte queste situazioni si possono presentare anche contemporaneamente.

Alla luce di quanto detto, è chiaro, quindi, che nella valutazione della pericolosità di una vibrazione vanno considerati diversi aspetti. In generale bisognerà valutare:

- a. le proprietà geotecniche del terreno;
- b. la tipologia delle fondazioni;
- c. la tipologia ed i materiali costituenti l'edificio;
- d. l'età;
- e. lo stato delle strutture.

Le proprietà geotecniche del terreno sono fondamentali nei casi in cui la sorgente è esterna. Per quanto riguarda le strutture, possiamo suddividere gli edifici in tre categorie:

- *I CATEGORIA*: Edifici con fondazioni adeguate o poggianti su pali di fondazione, comunque costituite da elementi strutturali in calcestruzzo armato, acciaio o legno. Le parti dell'edificio che non hanno compiti di resistenza e che sono costituiti da calcestruzzo non armato, murature o elementi lapidei, fanno parte della II categoria.
- *II CATEGORIA*: Edifici in muratura o dove la muratura è parte prevalente dei materiali costituenti
- *III CATEGORIA*: Edifici della II categoria ma di notevole età o di grande importanza storico-culturale o edifici non in perfetto stato di conservazione.

Sulla base delle categorie descritte viene presentato un grafico ed una tabella che ci forniscono delle indicazioni sui limiti di pericolosità di una vibrazione. Il grafico si basa sulla determinazione della frequenza della vibrazione e sull'ampiezza massima (picco del segnale di accelerazione positivo o negativo) subito dalla struttura in esame.

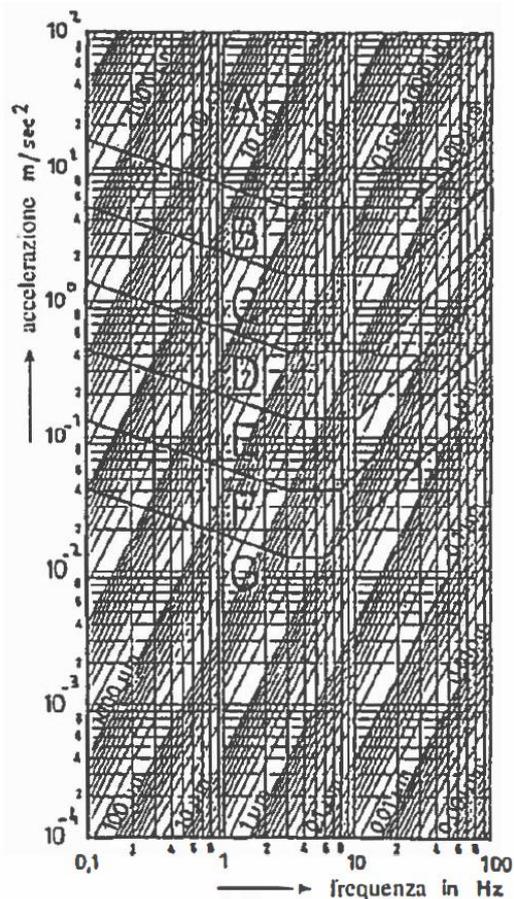


Figura 11. Grafico della pericolosità di una vibrazione

Si noti che il grafico sopra riportato è diviso in 6 zone segmentate A, B, C, D, E, F o campi di pericolosità determinati dall'identificazione di almeno due parametri di vibrazione, frequenza fondamentale o ampiezza dello spostamento o della velocità o dell'accelerazione. All'interno di dette zone esiste un concreto pericolo che le vibrazioni producano l'effetto descritto in tabella.

**TABELLA DEI DANNI E DELLA PERICOLOSITÀ**

	PERCETTIBILITÀ UMANA	SULLE STRUTTURE		
		INFLUENZA I CAT.	II CAT.	III CAT.
<b>A</b>	fortemente intollerabile	pericolo di collasso	pericolo di collasso	pericolo di collasso
<b>B</b>	intollerabile	forti danni localizzati	pericolo di collasso	pericolo di collasso
<b>C</b>	fortemente percettibile	formazione di fessurazioni	danni molto estesi	danni molto estesi
<b>D</b>	molto percettibile	fessurazioni in pochi punti	fessurazioni estese	fessurazioni estese
<b>E</b>	percettibile	non influente	fessurazioni in pochi punti	fessurazioni varie
<b>F</b>	appena percettibile	non influente	non influente	fessurazioni in pochi punti
<b>G</b>	non percettibile	non influente	non influente	non influente

I danni descritti si riferiscono a vibrazioni prodotte per periodi brevi, da poche ore ad alcuni giorni. Nel caso di vibrazioni prolungate, mesi o anni, possiamo considerare le pericolosità scalate di una casella.

La tabella riportata ha, comunque, un valore indicativo ed è basata principalmente sull'esperienza.

## 4. PROCEDURA DI ANALISI ADOPERATA

### 4.1 ASPETTI GENERALI

In via generale la valutazione dei livelli vibrazionali indotti da una qualsiasi sorgente richiede la definizione dei seguenti parametri:

- la definizione delle *caratteristiche della sorgente* (inteso come andamento delle ampiezze nel tempo ed il relativo spettro in frequenza) rilevate, quanto più è possibile, in prossimità della sorgente stessa;
- la definizione di una *relazione di attenuazione* che consenta di determinare il livello vibrazionale alla base del ricettore in condizioni di campo libero;
- la valutazione del possibile *impatto* che le vibrazioni in ingresso all'edificio possono determinare in termini di vibrazioni dei differenti elementi strutturali (solai, travi, ecc).

La possibilità di seguire una procedura di tipo analitico, o meglio numerico, per la determinazione del fenomeno è apparso in questo contesto praticamente non perseguibile in quanto:

- appare molto complesso determinare esattamente il processo di interazione dei carichi trasferiti dal velivolo (con tutte le variabilità del caso) con la pista (per la quale si necessiterebbe della conoscenza di dettaglio delle modalità costruttive e di una successiva verifica sperimentale per l'accertamento di tali proprietà);
- appare altrettanto complesso andare a determinare un modello numerico del percorso di propagazione delle onde vibrazionali attraverso il terreno; anche in questo caso affrontare con un approccio numerico del tipo FEM (*Finite Element Method*) il problema richiederebbe la conoscenza delle proprietà meccaniche dei singoli elementi di stratificazione del terreno;
- anche per questo ultimo aspetto, si richiederebbe la conoscenza dettagliata di tutti gli aspetti costruttivi degli edifici interessati dal fenomeno, per poter realizzare dei modelli di propagazione sufficientemente affidabili.

All'interno del presente Studio si è, dunque, preferito affrontare con un *approccio semi-empirico*, ma rigoroso, la trattazione del problema, nella consapevolezza di qualche assunzione che si è resa necessaria, ma nell'altrettanta convinzione dell'affidabilità complessiva del dato estratto.

Tutte le misure alla base dei risultati riportati all'interno del presente report e tutte le successive elaborazioni sono il risultato della campagna di misure condotte il 18 e 19 febbraio 2015 nelle aree interessate ai fenomeni oggetto di studio.

### 4.2 DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ADOTTATA

La procedura adoperata ha sostanzialmente visto due momenti successivi di indagine, che hanno interessato due distinte aree del territorio in esame (come si osserva dalla successiva immagine).

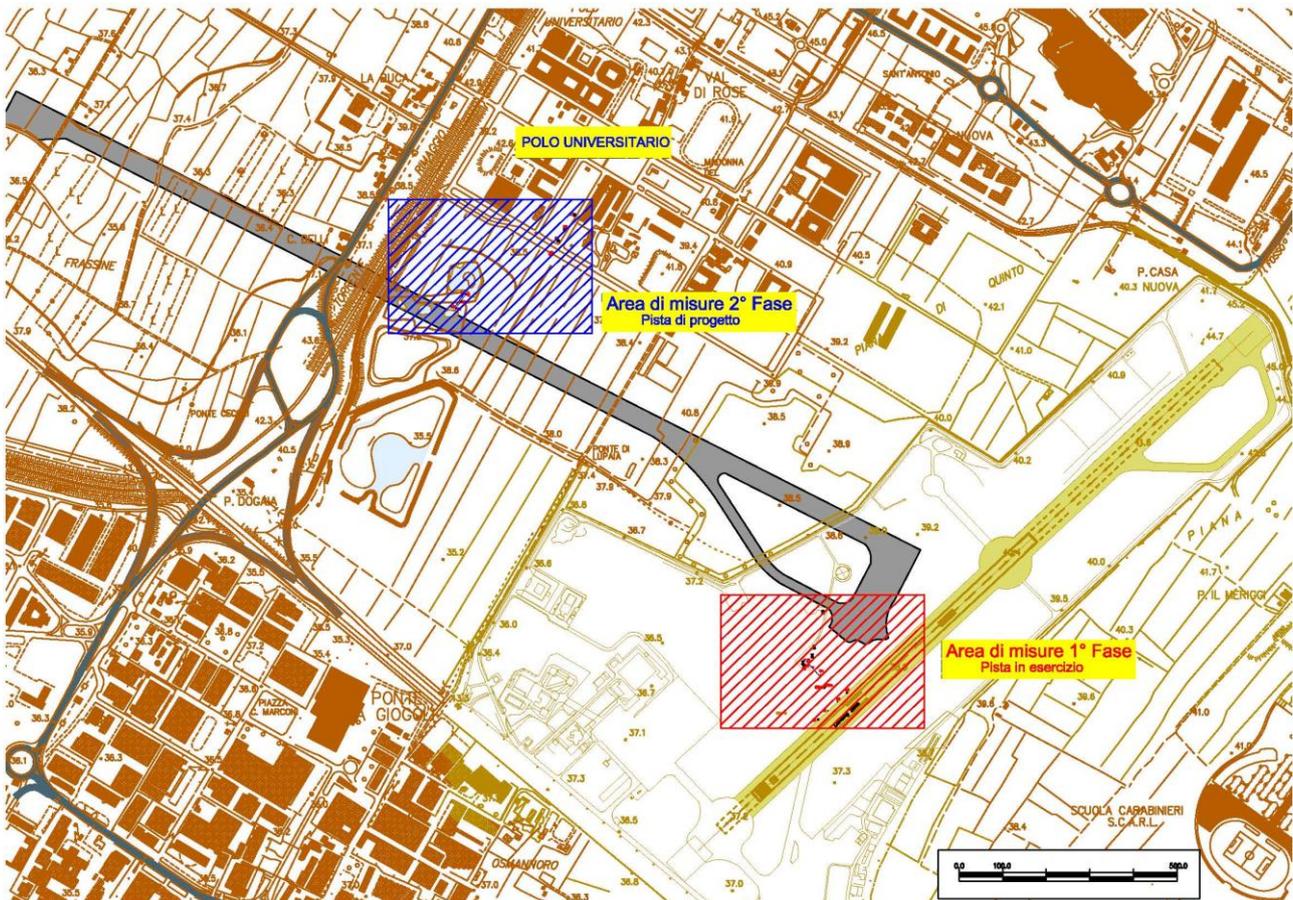


Figura 12. Aree e fasi di indagine

La 1° Fase è stata eseguita ai margini della pista attualmente in esercizio, ed ha previsto la registrazione dei livelli di vibrazione indotti dal traffico aeroportuale, sia in decollo, sia in atterraggio, sia in transito, al limite laterale della pista stessa.

Sono stati, quindi, disposti sensori sia parallelamente sia perpendicolarmente all'asse pista, oltre a triplette in acquisizione remota.

Contestualmente sono stati disposti sensori anche a distanze prestabilite dal bordo pista, in direzione normale alla stessa, per poter valutare i valori di attenuazione del fenomeno vibratorio come funzione della distanza dalla sorgente (i dettagli vengono riportati nel seguito).

La 2° Fase è stata, invece, espletata di fronte all'area CNR del Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino, all'altezza dei laboratori di ottica, e ha previsto la registrazione dei livelli di vibrazione, e quindi i valori di attenuazione del fenomeno vibratorio come funzione della distanza dalla sorgente, adoperando però una sorgente di energizzazione differente (massa battente). L'obiettivo primario è stato quello di caratterizzare i valori tipici di attenuazione del terreno nello stato originale. I dettagli vengono riportati nel seguito.

### 4.3 ELENCO DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Qualunque fenomeno di tipo dinamico viene descritto dalla variazione di una determinata grandezza fisica al trascorrere del tempo. Si prendono in considerazione grandezze cinematiche quali spostamenti, velocità od accelerazioni, che possono d'altra parte essere ricavate l'una dalle altre mediante opportune operazioni di derivazione o integrazione. In generale gli elementi principali di un sistema atto alla misura e valutazione dei livelli vibrazionali si possono identificare in:

- *sensori di rilevamento* (trasduttori dinamici e relativi sistemi di condizionamento), con il compito di convertire la variazione della grandezza cinematica di riferimento in proporzionali segnali di tipo elettrico;
- *unità di acquisizione* (con i relativi sottoinsiemi) con il compito di captare i suddetti segnali elettrici e renderli leggibili (su supporto cartaceo, digitale, etc..) per le successive elaborazioni;
- *algoritmi e software di trattamento dei dati.*

Per l'acquisizione dei dati sperimentali sono stati adoperati due indipendenti sistemi di rilevazione di vibrazione:

- sismometri o geofoni, misuratori di velocità di vibrazione collegati ad un sistema centralizzato di acquisizione dati (GEO + LMS SCADA);
- velocimetri del tipo “stand alone”, dotati del proprio sistema di acquisizione e gestione dei dati (SYSCOM).

#### Strumentazione GEO + LMS SCADA

Il primo set di sistemi di acquisizione adoperato è costituito da un set di geofoni/velocimetri sia del tipo verticale, sia orizzontale, aventi le seguenti caratteristiche:

- Tipo: geofono elettronicamente equalizzato;
- Risposta di Frequency: da 4,5 a 240 Hz;
- sensibilità: 24.0 mV/(mm/sec);
- Movimento spirale: 4,00 mm.

I sensori sono stati collegati ad una centralina di acquisizione (LMS SCADA – 24 Ch- 24 Bit) in grado di registrare e salvare i dati in formato digitale per permettere la fase di elaborazione in post-processing.

Tutta la fase di acquisizione e processing è stata realizzata per mezzo del software LMS Test Lab.

Nelle successive immagini un dettaglio dei geofoni e del sistema di acquisizione installato in cantiere.



Figura 13. Geofoni/velocimetri e centralina di acquisizione

#### Strumentazione SYSCOM Instruments

Il sistema è essenzialmente composto di due elementi:

- un sensore di velocità;

- una unità di acquisizione dati.

### Sensore di velocità

L' MS2003 contiene tre geofoni con relativa elettronica. Le caratteristiche tecniche sono:

- Tipo: geofono elettronicamente equalizzato;
- Risposta di Frequency: da 1 a 315 Hz;
- sensibilità: 25,5 mV/(mm/sec);
- Movimento spirale: 2,00 mm;
- Rapporto segnale-rumore: > 110 dB;
- Voltaggio di alimentazione: +/- 5 V;
- Assorbimento elettrico: < 10 mA;
- Intervallo di misura: +/- 114 mm/s.



Figura 14. Sensori di velocità

### Unità di acquisizione

Tale unità provvede all'alimentazione dei sensori e alla digitalizzazione dei relativi segnali; ha la possibilità di collegamento anche di tipo locale, tramite linea RS 232 ad un PC portatile.

Il modulo MR è un acquirente compatto a 3 o 6 canali, realizzato con una custodia in alluminio resistente agli urti e all'acqua. Il modulo, sulla base delle soglie di trigger impostate, rileva eventi vibratori e li registra su una memoria statica RAM interna.

Il modulo di acquisizione può essere configurato con il software utente Wincom attraverso una porta RS232. Quattro LED indicatori informano l'utente circa lo stato attuale di funzionamento e di attività del modulo di acquisizione.

Il modulo MR 2002 è dotato di una batteria di back up che garantisce un'autonomia di oltre 30 ore ed è dotabile di modulo GSM opzionale per il trasferimento dati in remoto. Il modulo MR 2002 comincia a registrare non appena sono verificate le condizioni di trigger prestabilite.

Una memoria di pre-evento registra i movimenti di piccola intensità precedenti l'evento vero e proprio (*p – waves* in caso di sisma). Il tempo del pre-evento può essere settato.

I segnali provenienti dai sensori vengono filtrati per evitare gli effetti dell' "aliasing" nella successiva fase di digitalizzazione (*filtri anti-aliasing*).

L'output del convertitore analogico/digitale a 16 bit è collegato al sistema bus.

Per evitare trigger spuri causati da picchi anomali o da fenomeni elettrici legati al funzionamento di alcuni componenti dei sensori, i segnali per il trigger sono filtrati da un filtro passa-banda e poi digitalizzati.

Una memoria statica CMOS alimentata da una batteria al litio serve come strumento di registrazione.

L'unità di digitalizzazione/registrazione è controllata da un processore CMOS; il firmware risiede in una FLASH – EPROM.

Un *self-test* viene effettuato automaticamente ad intervalli prestabiliti e effettua una verifica dell'intero sistema. Se si verifica un errore nel sistema, esso viene visualizzato con un LED e un messaggio di *warning*.

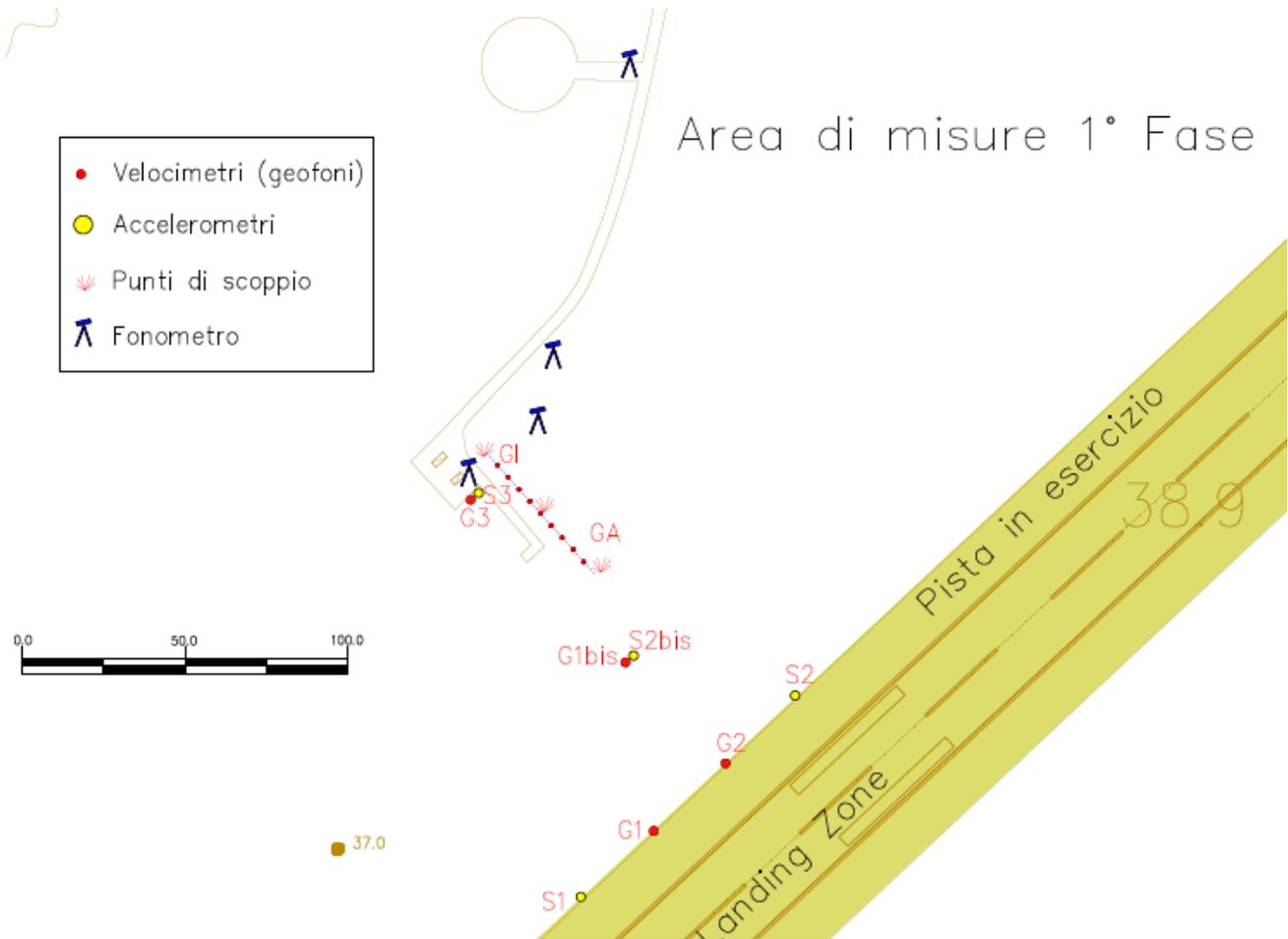
Si riporta, di seguito, la scheda illustrativa delle caratteristiche tecniche principali dell'unità di acquisizione.

Modello	MR2002-CE – SYSCOM Instruments
Numero di canali	3 o 6
Filtro antialiasing	Brickwall FIR, Cut-off all'80% della frequenza di Nyquist con 120 dB di attenuazione
Range dinamico	>96 dB pari a 16 bit
Risposta in frequenza	DC fino a 80 Hz a 200 sps
Frequenza di campionamento	fino a 1000 sps
Tipo di campionamento	simultaneo su tutti i canali
Modalità di acquisizione	in continuo, trigger
Real time uscita digitale	RS-232
Tipo di trigger	IIR bandpass filter (tre tipi disponibili)
Selezione del trigger	Indipendente per ciascun canale
Soglia di trigger e di allarme	Selezionabile da 0.5% al 100% del fondo scala
Trigger aggiuntivo	STA/LTA
Autodiagnostica	Controllo alla tensione di alimentazione, temperatura interna, RAM, integrità dei dati trasmessi e sistema di temporizzazione GPS
Tipo di salvataggio dei dati	salvataggio su PCMCIA
Trasferimento dei dati	trasferimento ad una postazione remota per mezzo di linee telefoniche, ISDN o GSM
Allarme	Il sistema è in grado di generare automaticamente un allarme quando riconosce un evento o quando fallisce il tentativo di autodiagnosi
Sistema di controllo	Configura la frequenza di campionamento, il tipo di filtro, il tipo e il livello di trigger, il canale di trigger, gestisce la comunicazione e il salvataggio dei dati
Tipo di sincronizzazione	GPS, oscillatore quarzato interno, DCF
RS 232 input	interfaccia RS 232 C con controllo via modem
Alimentazione	12 Vdc
EMI/RFI	Protezione da interferenze elettromagnetiche e da radiofrequenze
Batterie	batterie interne 12 V 12 Ah (è possibile utilizzare anche batterie esterne)
Autonomia	oltre 36 ore con le sole batterie interne
Dimensioni	230 mm x 200 mm x 110 mm

## 5. MISURAZIONE DI FASE 1 – CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE AEROPORTUALE

Facendo seguito a quanto esposto in precedenza, le seguenti immagini illustrano l'area di misura e la disposizione dei sensori.





**Figura 15. Sistema di misurazione di Fase 1**

Si osserva, dunque, come nell'ambito della Fase 1 sono state disposte 4 (S1, G1, G2, S2) postazioni di misura lungo il bordo della pista, distanziate di circa 50 metri l'una dall'altra, nella zona generalmente interessata dal primo impatto degli aeromobili durante l'atterraggio e dalla prima fase di *climbing* nella fase di decollo.

Si è poi disposta una postazione di misura a circa 120 metri dalla pista (G3, S3), normalmente all'asse pista.

Sono, infine, stati collocati altri 8 sensori (GA, ..., GI) a passo 5 metri l'uno dall'altro, a distanza (80, 85, ..., 120 metri) dal bordo pista. Quest'ultimo set di sensori è stato adoperato sia per la valutazione del fenomeno di attenuazione nella breve distanza, sia per il calcolo delle velocità tipiche del terreno, mediante una "classica" prova di geofisica.

Nelle successive immagini si riporta qualche immagine delle postazioni di misura.





*Figura 16. Sistemi di acquisizione dati utilizzati nell'ambito della Fase 1 di indagine*

Si è quindi proceduto alla registrazione dei livelli di vibrazione associati alle operazioni di atterraggio e decollo dei vari velivoli. Nelle successive immagini e tabelle si riporta qualche scatto ripreso durante le operazioni e l'elenco dei movimenti registrati.



*Figura 17. Aeromobili in fase di atterraggio e decollo*

<b>Compagnia aerea</b>	<b>Numero di volo</b>	<b>Tipo di velivolo</b>	<b>Diretto a</b>		<b>Ora</b>	<b>Note</b>
Swiss	LX01679	RJ1H	Zurich	Kloten	09:50	
Lufthansa	LH00309	E190	Frankfurt	Rhein/Main	09:50	
AirFrance	AF01067	A318	Paris	Charles De Gaulle	10:00	
Alitalia	AZ08502	E190	London	London City Apt	10:45	
Etihad	F700133	SB20	Zurich	Kloten	12:10	
Alitalia	AZ01678	A319	Roma	Leonardo da Vinci	12:10	
KLM	KL01642	E90	Amsterdam	Schiphol	12:35*	*Ritardo con decollo alle 13,15
AirFrance	AF01367	318	Paris	Charles De Gaulle	12:50*	*Ritardo con decollo alle 13:58
AirDolomiti	EN08195	E95	Munich	F.J.Strauss	13:10	
CityJet	WX00280	AR8	London	London City Apt	13:20	
Etihad	F700131	SB20	Geneva	Cointrin	13:45	
Vueling	VY06206	A319	London	Gatwick	14:00	
Lufthansa	LH00313	E90	Frankfurt	Rhein/Main	14:25	verso montagna
Swiss	LX01675	AR1	Zurich	Kloten	14:40*	*Ritardo con decollo alle 15:45
British Airways	BA03280	E70	London	London City Apt	15:00	
Vueling	VY01500	A319	Paris	Orly	15:10	
Airfrance	AF01567	318	Paris	Charles De Gaulle	16:00	

Tabella 1. Elenco dei movimenti di partenza (decollo) registrati

<i>Compagnia aerea</i>	<i>Numero di volo</i>	<i>Tipo di velivolo</i>	<i>In partenza da</i>		<i>Ora</i>	<i>Note</i>
AirFrance	AF01066	A318	Paris	Charles De Gaulle	09:15	
Swiss	LX01678	RJ1H	Zurich	Kloten	09:18	
Lufthansa	LH00308	E190	Frankfurt	Rhein/Main	08:58	
Alitalia	AZ08670	E190	Roma	Leonardo Da Vinci	10:05	
Alitalia	AZ01675	A319	Roma	LeonardO Da Vinci	11:00	Perso
Etihad	F700132	SB20	Zurich	Kloten	11:40	
KLM	KI01641	E90	Amsterdam	Schiphol	11:55	
AirFrance	AF01366	318	Paris	Charles De Gaulle	12:00	
AirDolomiti	EN08194	E95	Munich	F.J.Strauss	12:35	
CityJet	WX00281	AR8	London	London City Apt	12:40	
Etihad	F700130	SB20	Geneva	Cointrin	13:15	
Lufthansa	LH00312	E90	Frankfurt	Rhein/Main	13:50	
Swiss	LXZ1674	AR1	Zurich	Kloten	14:05	
British Airways	BA03279	E70	London	London City Atp	14:20	file 21 passaggio al suolo
AirFrance	AF01566	318	Paris	Charles De Gaulle	15:10	
Alitalia	AZ01677	A319	Roma	Leonardo Da Vinci	16:05	
AirDolimiti	EN08196	E95	Munich	F.J.Strauss	16:15	

*Tabella 2. Elenco dei movimenti di arrivo (atterraggio) registrati*

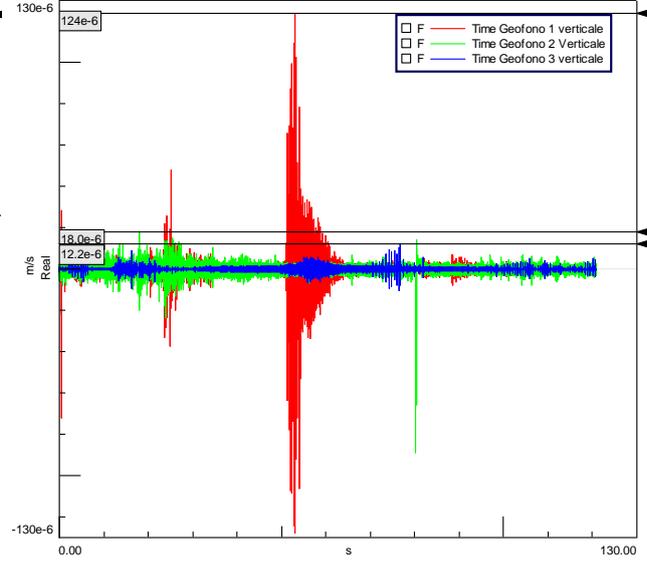
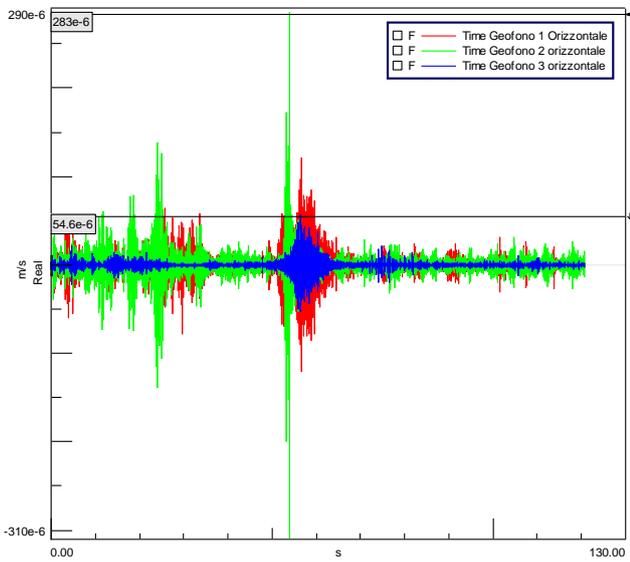
Per ognuno di questi eventi sono stati acquisiti i dati come precedentemente indicato.

Particolare interesse riveste il confronto delle ampiezze di vibrazione registrate nei punti prossimi alla pista e di quelli posti alle varie distanze. Di un certo interesse risulta anche l'analisi dei contenuti in frequenza di tali segnali, espressi per mezzo dei sonogrammi relativi ai vari sensori.

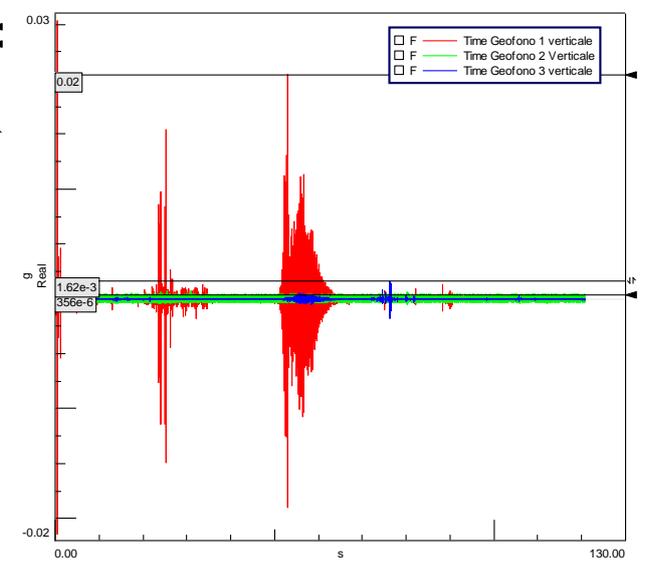
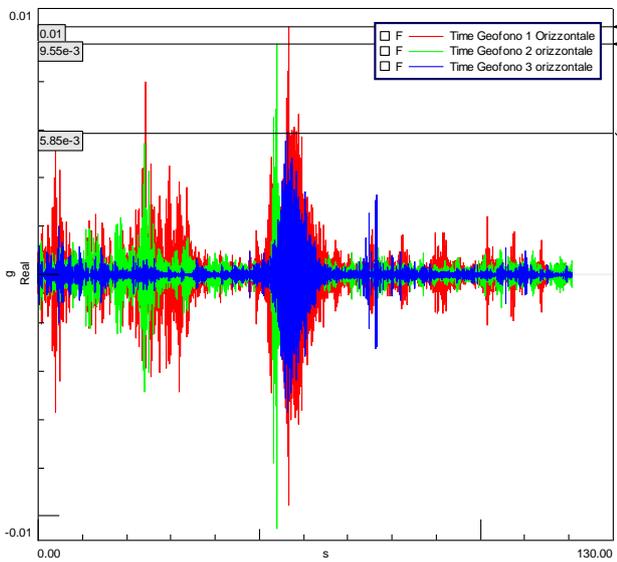
A titolo esemplificativo si riportano i dati per due degli eventi registrati, mentre nella successiva tabella si riporta una sintesi dei valori rilevati per tutti gli eventi.

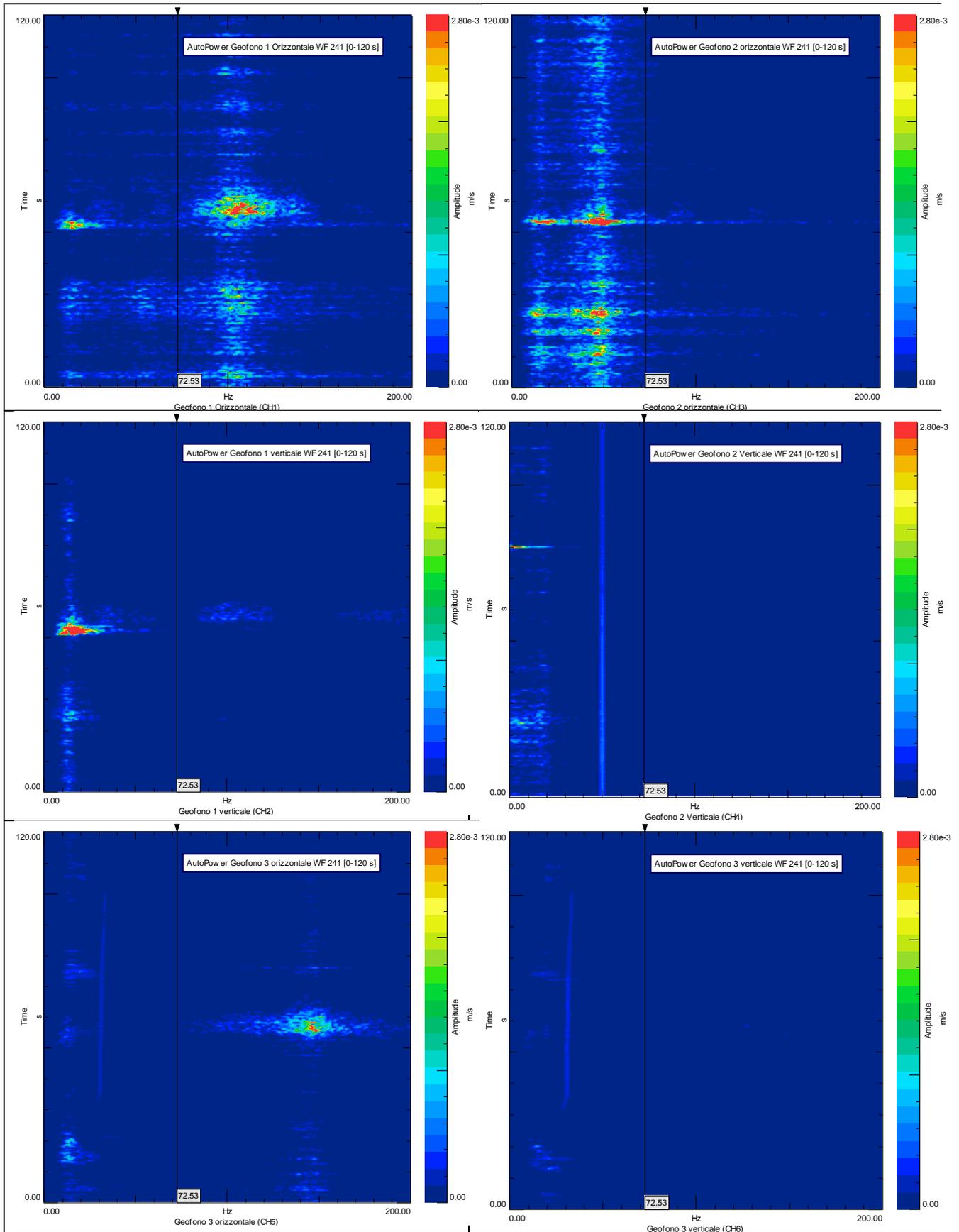
Atterraggio aeromobile modello A 318 Air France

*Velocità di Vibrazione*



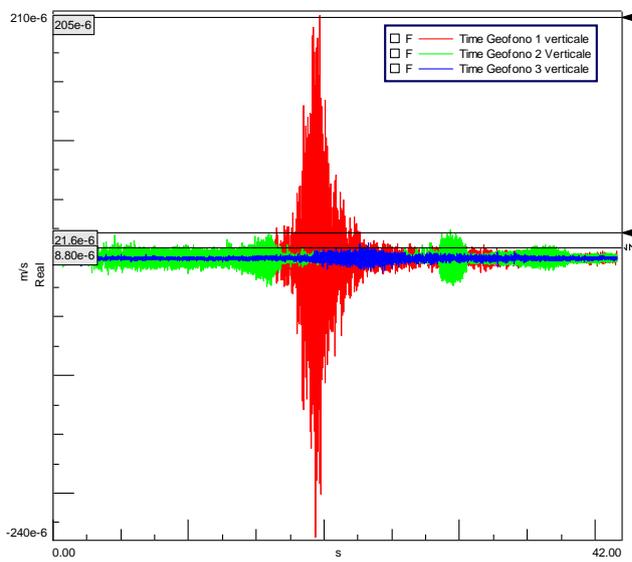
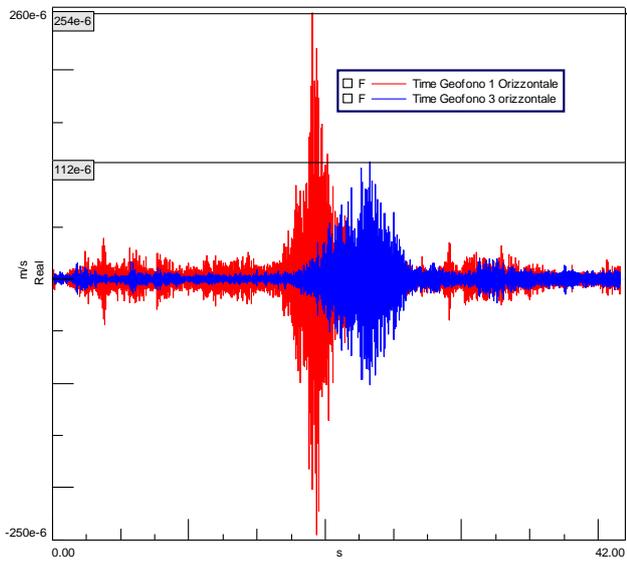
*Accelerazione di Vibrazione*



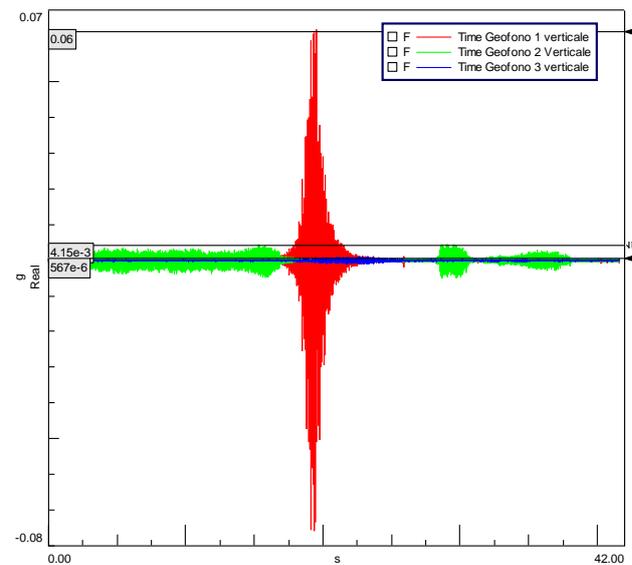
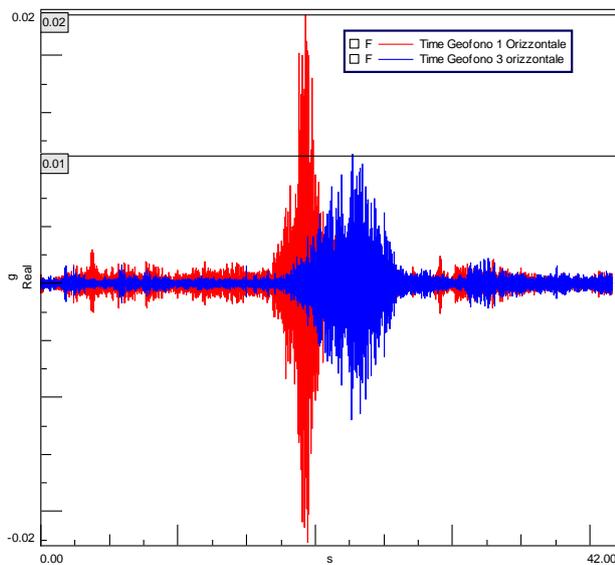


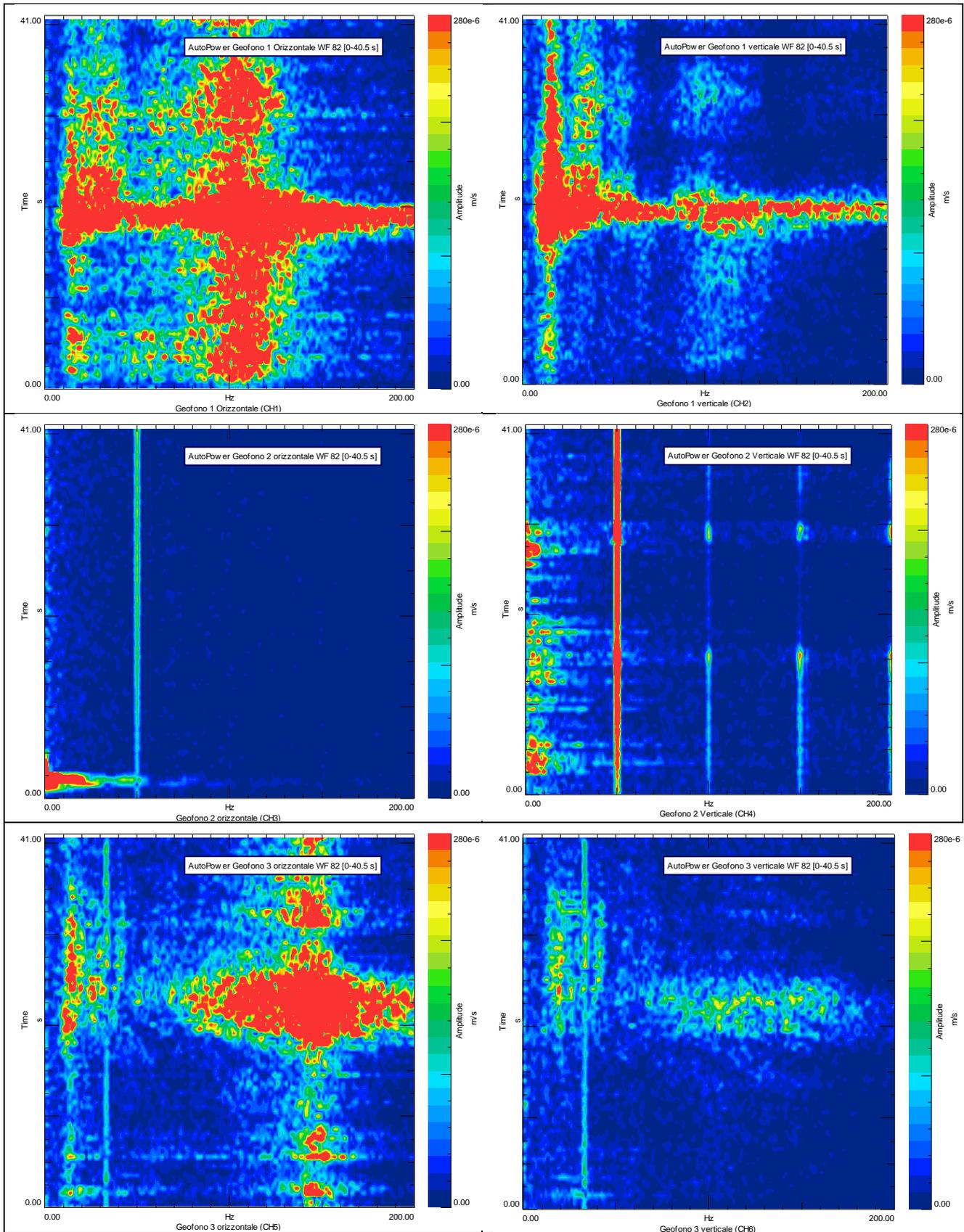
Decollo aeromobile modello A 319 (verso pista 05)

Velocità di Vibrazione



Accelerazione di Vibrazione





**Tabella Atterraggi**

**VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE**

VOLO	VELOCITA' ORIZZONTALE (m/s) * 10 <sup>-6</sup>			ACCELERAZIONE ORIZZONTALE (g) * 10 <sup>-3</sup>			VELOCITA' VERTICALE (m/s) * 10 <sup>-6</sup>			ACCELERAZIONE VERTICALE (g) * 10 <sup>-3</sup>		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Air France A138 12,00	121,00	284,00	55,80	10,00	9,55	5,85	124,00	18,00	12,20	20,00	0,55	1,62
KLM 11,50	58,40	104,00	27,70	4,63	4,18	3,08	25,50	20,50	10,00	6,62	0,02	0,38
AIR DOLOMITI 16,10	34,60	53,80	37,20	3,09	2,53	2,53	9304,00	483,00	824,00	9,25	0,70	0,53
AIR FRANCE 15,10	114,00	365,00	49,60	10,00	9,07	5,12	302,00	24,70	5,55	7,00	6,55	1,38
BRITISH 14,20	57,90	113,00	54,40	7,17	3,89	6,59	110,00	20,70	12,30	6,09	1,40	1,27
CITY JET 12,40	81,60	210,00	40,00	7,75	7,17	4,15	79,10	33,30	5,72	10,00	0,45	0,21
E95 AIR DOLOMITI 12,38	57,60	132,00	13,30	4,12	3,39	1,55	86,90	8,06	18,60	9,71	0,47	0,47
ETHIAD 13,00	33,80	59,10	10,70	3,84	3,10	1,29	44,20	2,47	3,21	20,00	0,64	0,16
ETHIAD 13,15	22,40	94,70	6,75	2,13	2,65	0,82	18,00	10,00	2,85	5,26	0,59	0,08
LUFTANSA 13,50	29,10	76,30	15,70	2,66	3,33	1,58	23,30	8,04	10,10	8,98	0,59	0,08
SWISS 14,05	89,30	327,00	59,40	5,81	8,88	5,09	123,00	15,30	13,20	6,25	0,57	0,47

**VALORI ESPRESSI IN dB**

VOLO	VELOCITA' ORIZZONTALE dB Vel			ACCELERAZIONE ORIZZONTALE dB Acc			VELOCITA' VERTICALE dB Vel			ACCELERAZIONE VERTICALE dB Acc		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Air France A138 12,00	101,7	109,1	94,9	99,8	99,4	95,2	101,9	85,1	81,7	105,9	74,6	84,0
KLM 11,50	95,3	100,3	88,8	93,1	92,3	89,6	88,1	86,2	80,0	96,3	47,5	71,4
AIR DOLOMITI 16,10	90,8	94,6	91,4	89,6	87,9	87,9	139,4	113,7	118,3	99,2	76,7	74,3
AIR FRANCE 15,10	101,1	111,2	93,9	99,8	99,0	94,0	109,6	87,9	74,9	96,7	96,2	82,6
BRITISH 14,20	95,3	101,1	94,7	96,9	91,6	96,2	100,8	86,3	81,8	95,5	82,8	81,9
CITY JET 12,40	98,2	106,4	92,0	97,6	96,9	92,2	98,0	90,4	75,1	99,8	72,8	66,3
E95 AIR DOLOMITI 12,38	95,2	102,4	82,5	92,1	90,4	83,6	98,8	78,1	85,4	99,6	73,2	73,2
ETHIAD 13,00	90,6	95,4	80,6	91,5	89,7	82,0	92,9	67,9	70,1	105,9	76,0	63,6
ETHIAD 13,15	87,0	99,5	76,6	86,4	88,3	78,2	85,1	80,0	69,1	94,3	75,2	57,4
LUFTANSA 13,50	89,3	97,7	83,9	88,3	90,3	83,8	87,3	78,1	80,1	98,9	75,2	57,4
SWISS 14,05	99,0	110,3	95,5	95,1	98,8	94,0	101,8	83,7	82,4	95,8	74,9	73,2

**Tabella Decolli**

**VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE**

VOLO	VELOCITA' ORIZZONTALE (m/s) * 10 <sup>-6</sup>			ACCELERAZIONE ORIZZONTALE (g) * 10 <sup>-3</sup>			VELOCITA' VERTICALE (m/s) * 10 <sup>-6</sup>			ACCELERAZIONE VERTICALE (g) * 10 <sup>-3</sup>		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
AIR FRANCE A318 ORE 10,05	254	0	112	10		1	250	21,6	8,8	60	4,15	5,67
ALITALIA A319 10,45	219	470	71,5	20	0,01729	8,83	162	171	7,07	80	22,23	3,56
ALITALIA A319 ore 12,10	129	172	68,2	11,91	0,01	7,9	96	12,7	9,04	40	1,02	2,71
AIR DOLOMIRI 13,35	227	342	66,7	20	0,01	8,31	196	3,5	6,66	60	1,02	5,96

**VALORI ESPRESSI IN dB**

VOLO	VELOCITA' ORIZZONTALE dB Vel			ACCELERAZIONE ORIZZONTALE dB Acc			VELOCITA' VERTICALE dB Vel			ACCELERAZIONE VERTICALE dB Acc		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
AIR FRANCE A318 ORE 10,05	108,1	#NUM!	101,0	60,2	#NUM!	40,2	108,0	86,7	78,9	75,7	52,5	55,2
ALITALIA A319 10,45	106,8	113,4	97,1	66,2	4,9	59,1	104,2	104,7	77,0	78,2	67,1	51,2
ALITALIA A319 ore 12,10	102,2	104,7	96,7	61,7	0,2	58,1	99,6	82,1	79,1	72,2	40,3	48,8
AIR DOLOMIRI 13,35	107,1	110,7	96,5	66,2	0,2	58,6	105,8	70,9	76,5	75,7	40,3	55,7

In base ai dati sopra riportati si sono calcolati i valori di attenuazione sui 120 metri che distanziano i punti di acquisizione lungo la pista da quelli posti a maggiore distanza.

Si è, infine, ritenuto interessante calcolare anche un valore medio di attenuazione per le varie sollecitazioni vibrazionali.

**Tabella Decolli**

**VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE**

Attenuazione / 120 metri			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
142	6	241,2	54,33
398,5	11,17	163,93	76,44
103,8	4,01	86,96	37,29
275,3	11,69	189,34	54,04

**VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE**

Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
1,183	0,050	2,010	0,453
3,321	0,093	1,366	0,637
0,865	0,033	0,725	0,311
2,294	0,097	1,578	0,450

**VALORI ESPRESSI IN dB**

Attenuazione / 120 metri			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
7,1	8,0	29,1	20,5
16,4	7,1	27,7	27,0
8,0	3,6	20,5	23,4
14,2	7,6	29,4	20,1

**VALORI ESPRESSI IN dB**

Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
0,059	0,066	0,242	0,171
0,136	0,059	0,231	0,225
0,067	0,030	0,171	0,195
0,118	0,064	0,245	0,167

**VALORI MEDI**

**VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE**

Attenuazione / 120 metri			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
229,90	8,22	170,36	55,53

**VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE**

Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
1,916	0,068	1,420	0,463

**VALORI ESPRESSI IN dB**

Attenuazione / 120 metri			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
11,43	6,56	26,66	22,74

**VALORI ESPRESSI IN dB**

Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
0,10	0,05	0,22	0,19

**Tabella Decolli**

VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE				VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE			
Attenuazione / 120 metri				Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.	Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
142	6	241,2	54,33	1,18	0,05	2,01	0,45
398,5	11,17	163,93	76,44	3,32	0,09	1,37	0,64
103,8	4,01	86,96	37,29	0,87	0,03	0,72	0,31
275,3	11,69	189,34	54,04	2,29	0,10	1,58	0,45
VALORI ESPRESSI IN dB				VALORI ESPRESSI IN dB			
Attenuazione / 120 metri				Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.	Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
7,1	8,0	29,1	20,5	0,06	0,07	0,24	0,17
16,4	7,1	27,7	27,0	0,14	0,06	0,23	0,23
8,0	3,6	20,5	23,4	0,07	0,03	0,17	0,19
14,2	7,6	29,4	20,1	0,12	0,06	0,24	0,17
VALORI MEDI				VALORI MEDI			
VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE				VALORI ESPRESSI IN SCALA LINEARE			
Attenuazione / 120 metri				Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.	Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
229,90	8,22	170,36	55,53	1,916	0,068	1,420	0,463
VALORI ESPRESSI IN dB				VALORI ESPRESSI IN dB			
Attenuazione / 120 metri				Attenuazione / 1metro			
Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.	Vel oriz	Acc. Oriz	Vel. Vert.	Acc. Vert.
11,43	6,56	26,66	22,74	0,10	0,05	0,22	0,19

Dall'analisi di quanto sopra appare abbastanza omogeneo il set di dati, ovviamente con scostamenti dovuti alla variabilità dei parametri che lo caratterizzano (tipologia di velivolo, punto di atterraggio/decollo, condizioni di carico, condizioni di velocità/climbing rate, ecc.).

L'analisi dei dati consente comunque di identificare valori sostanzialmente simili, sia per le fasi di decollo, sia di atterraggio; ciò sta a significare che la struttura della pista assorbe in modo egregio le componenti di forza trasmesse dagli organi di atterraggio, facendo in modo che le vibrazioni rilevabili nell'immediato perimetro esterno siano in pratica confrontabili con quelle indotte dai propulsori in fase di decollo.

In entrambi i casi si tratta di valori nell'intorno di 0,1 – 0,3 mm/sec se espressi in termini di velocità (ovvero tra 95 e 100 dB vel) e di 0,1 – 0,3 mm/sec<sup>2</sup> (ovvero tra 95 e 100 dB acc) se espresso in termini di accelerazione.

Tali valori si possono diagrammare per una migliore interpretazione del fenomeno attenuativo.

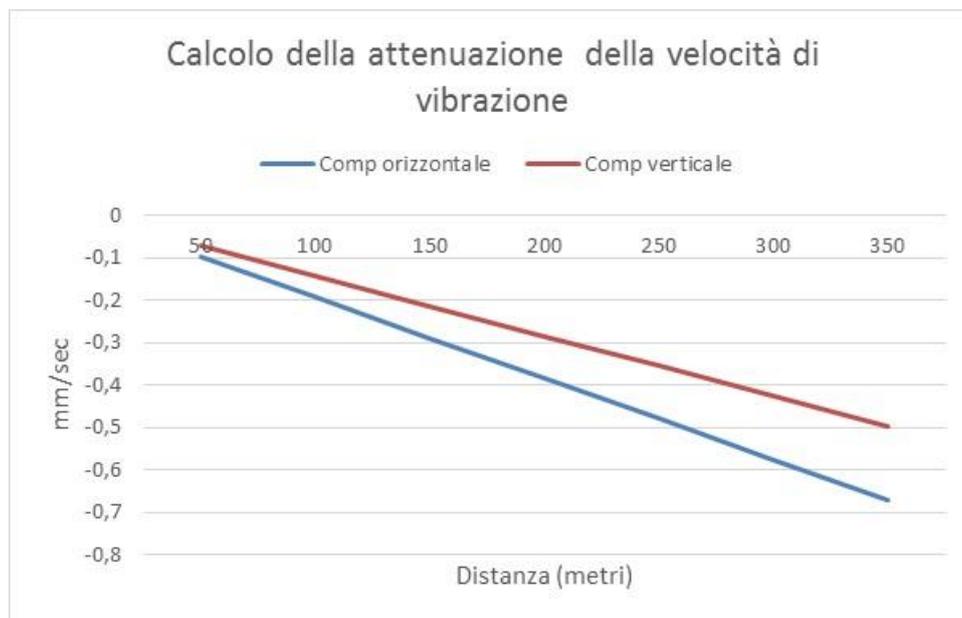
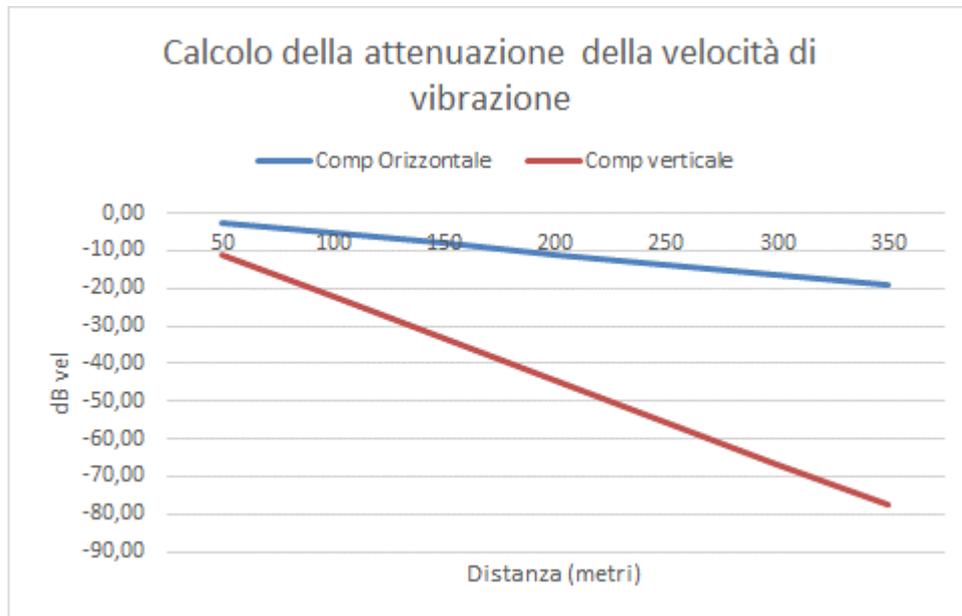
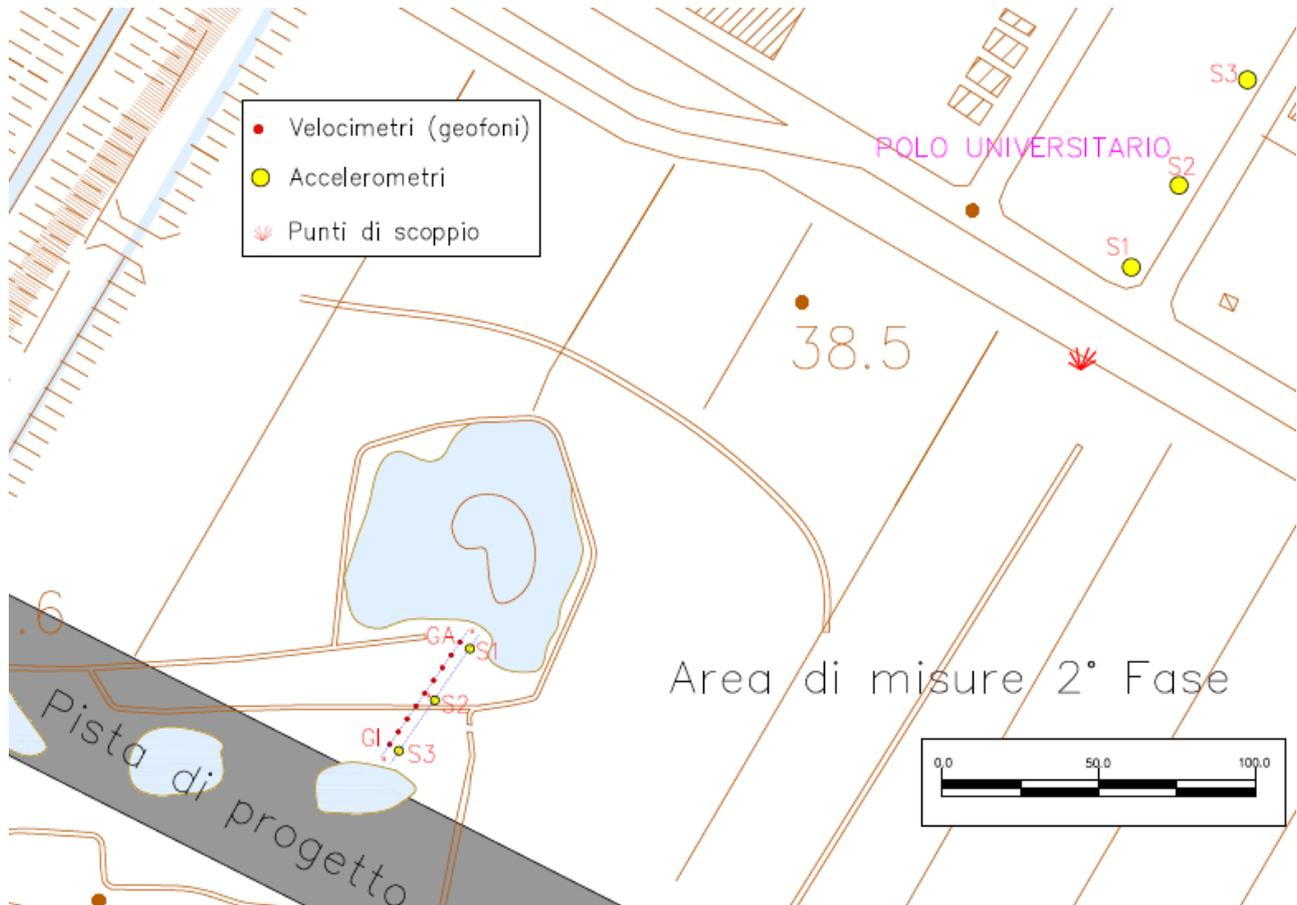


Figura 18. Diagrammi di attenuazione della velocità di vibrazione

## 6. MISURAZIONE DI FASE 2 – CARATTERIZZAZIONE DEL PERCORSO DI PROPAGAZIONE

La seconda fase dell'attività è stata, invece, svolta nella zona interessata dal futuro insediamento aeroportuale e, specificatamente, nella zona della futura pista (presso l'Oasi WWF Val di Rose) e nell'area dell'esistente Polo Scientifico e Tecnologico ad essa limitrofo.

La successiva planimetria indica nel dettaglio le zone di esecuzione delle prove e la numerazione dei sensori di misura adoperati.



**Figura 19. Sistema di misurazione di Fase 2**

Durante l'esecuzione dei test si è provveduto a energizzare il terreno per mezzo di una mazza battente (lasciata impattare su una piastra di distribuzione del carico per evitare fenomeni di dissipazione troppo localizzata).

Parallelamente sono stati acquisiti i segnali di vibrazione rilevati a distanza variabile dal punto di impatto, per consentire di valutare i parametri di attenuazione come funzione della distanza.

Durante le prove nella zona della futura pista sono stati adoperati contemporaneamente la linea di geofoni e le centraline Syscom, come precedentemente descritte (anche per un confronto dei dati rilevati); nella fase di misure nell'area del Polo sono state, invece, adoperate le sole centraline Syscom in quanto, operando su area pubblica, si è inteso non interferire con le normali attività ivi condotte e si è dunque operato con centraline che non richiedessero cablaggi e/o collegamenti a sistemi di acquisizione esterni.

Le prossime figure riportano qualche immagine dell'area di misura posta in prossimità della futura pista.



**Figura 20. Sistemi di acquisizione dati utilizzati nell'ambito della Fase 2 di indagine**

In questa prima configurazione i geofoni sono stati posizionati a distanza costante tra di essi e dai punti di impatto (passo di 5 metri tra di essi e 10 metri dalla sorgente) per essere in grado di determinare curve di attenuazione significative per la caratterizzazione del mezzo di trasmissione.



**Figura 21. Attività di energizzazione del terreno e rilevamento dei segnali di vibrazione**

Nelle successive figure vengono riportati un esempio di “time history” rilevata lungo la linea di geofoni quando si è proceduto all’impatto a circa 5 metri dal geofono 1 e i relativi valori sintetizzati di attenuazione.

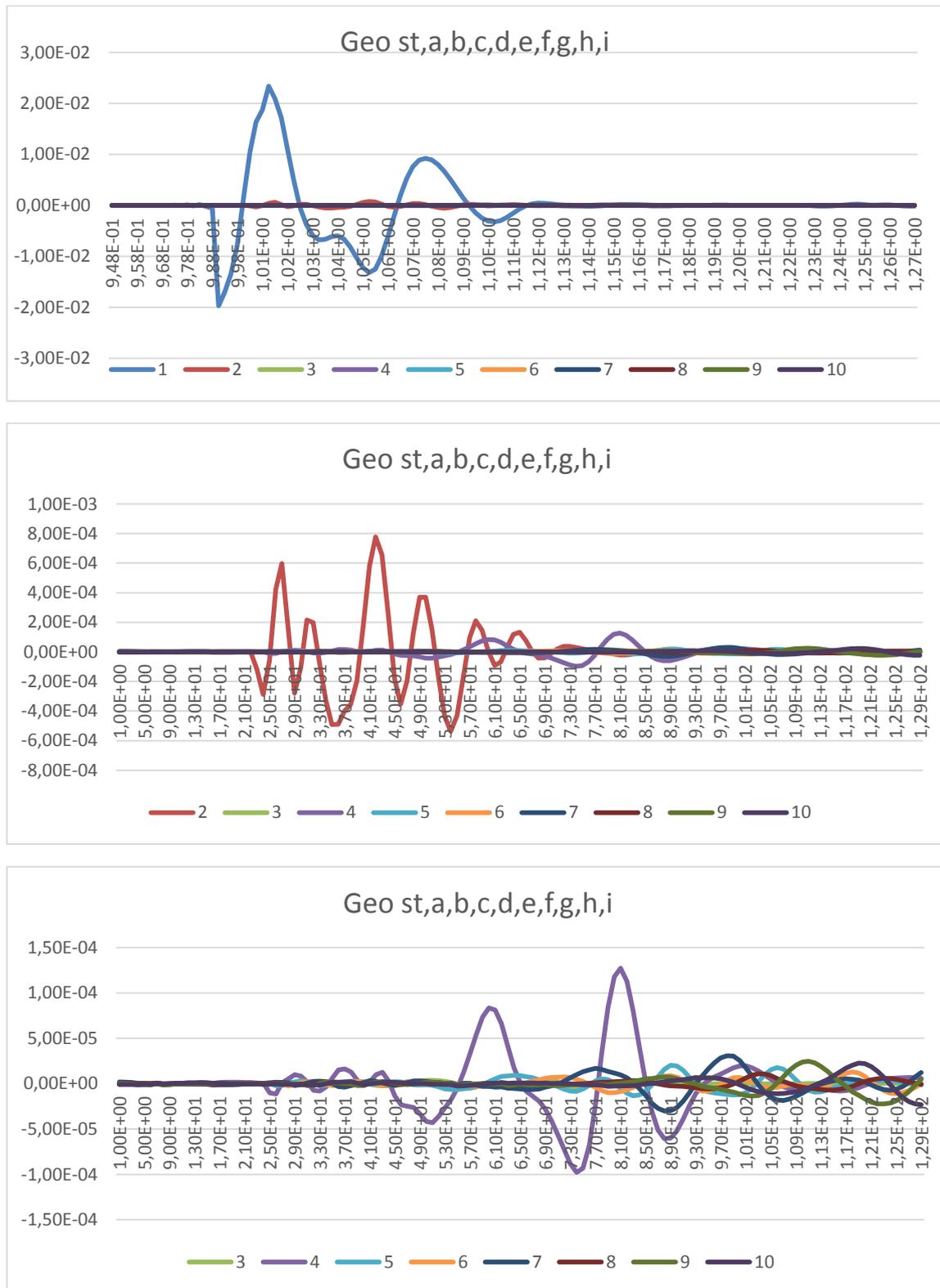


Figura 22. Andamento della velocità di vibrazione in funzione della distanza dalla sorgente

Una prima analisi dei dati, consente alcune considerazioni immediate:

- i livelli energetici trasferiti al terreno appaiono dello stesso ordine di grandezza di quelli rilevati in fase di atterraggio dei velivoli (se si osservano i valori rilevati a 30 metri dal punto di impatto che coincide con la distanza del bordo pista dal centro della stessa). Quindi le considerazioni che seguiranno si possono ritenere valide sia da un punto di vista “qualitativo”/ “comparativo” che “quantitativo”;

- dall'analisi delle curve è quantificabile il tempo di propagazione dell'onda sismica, che appare in linea con quanto atteso per la tipologia di terreni in esame;
- è possibile sintetizzare i dati di attenuazione rilevati, attraverso diagrammi di sintesi, come di seguito riportato a titolo esemplificativo.

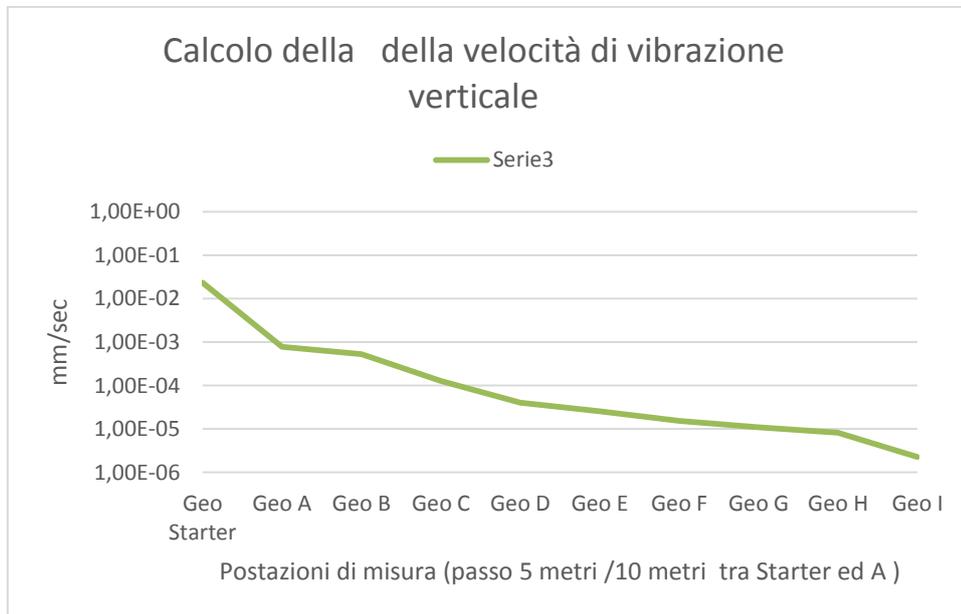


Figura 23. Diagramma di attenuazione della velocità di vibrazione

L'analisi del diagramma conferma l'ordine di grandezza dell'attenuazione come funzione della distanza, già rilevato in fase di misure nell'area adiacente alla pista. In realtà, in tale zona, attualmente ancora inalterata dal punto geo-morfologico, l'attenuazione sembra ancora superiore a quella rilevata nella zona della pista, in quanto siamo ancora in presenza di terreni sciolti a matrice argillosa.

Gli stessi valori sono confermati dai dati acquisiti mediante le centraline Syscom, il cui diagramma di attenuazione, relativo alla stessa fase di test, viene riportato nella successiva immagine.

In pratica si può sintetizzare che già dopo 40-50 metri dal punto di impatto, i livelli di vibrazione si possono ritenere ridotti di due ordini di grandezza.

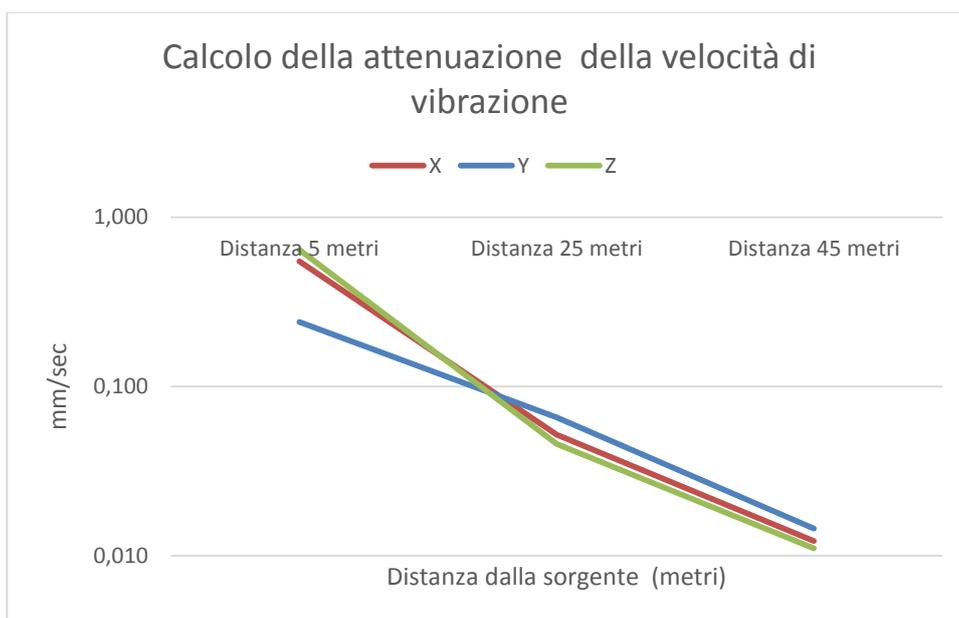


Figura 24. Calcolo dell'attenuazione delle velocità di vibrazione

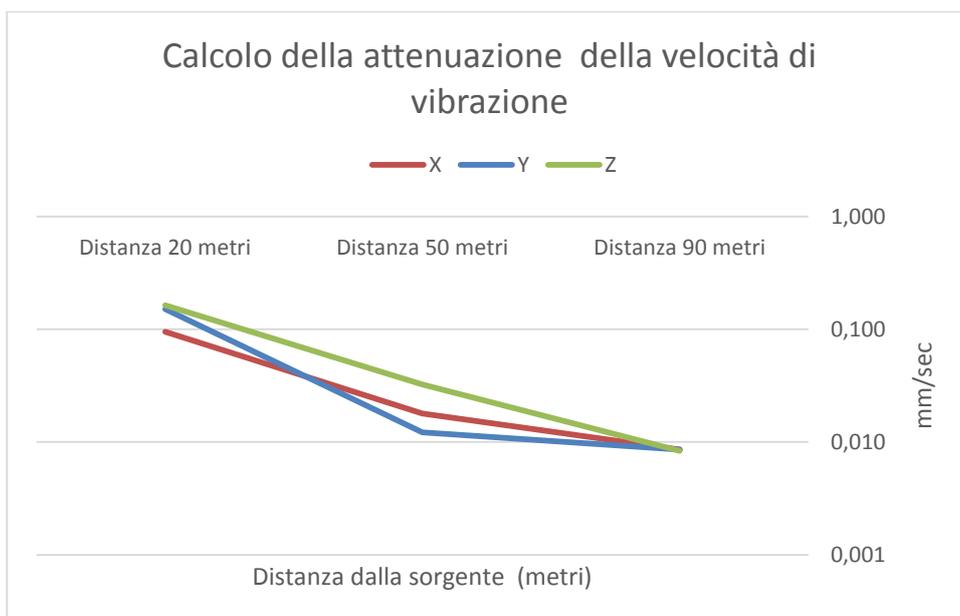
Per ragioni di completezza dell'indagine si è comunque deciso di condurre una campagna di misure anche nella zona del Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino, al fine di escludere qualunque forma di amplificazione associabile alla conformazione del terreno.

La successiva immagine mostra la zona di misura e i punti di installazione dei sensori, per il cui schema si rimanda a quello generale riportato nella parte iniziale del paragrafo.



**Figura 25. Strumentazione di misura installata presso l'area del Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino**

La successiva figura riporta un diagramma di sintesi di questa fase. Anche questa volta si possono confermare gli stessi andamenti riscontrati in precedenza.



**Figura 26. Calcolo dell'attenuazione delle velocità di vibrazione**

## 7. ANALISI CORRELATA DEI DATI E CONCLUSIONI

Un'analisi correlata dei dati di vibrazione rilevati in prossimità della attuale pista in esercizio e dei valori di attenuazione tipici dei terreni oggetto del nuovo insediamento aeroportuale porta alle seguenti considerazioni:

- in punti prossimi alla pista sono stati rilevati valori di picco delle velocità di vibrazione dell'ordine di 0,1 – 0,3 mm/sec;
- i valori di picco appaiono ridotti di circa due ordini di grandezza alla distanza di 100 metri dalla pista stessa <sup>1</sup>;
- tali valori risultano ancora maggiori se riferiti all'attuale area di progetto in virtù delle proprietà geotecniche dei terreni imperturbati;
- la correlazione dei due dati porta comunque a stimare un'attenuazione complessiva dei livelli vibrazionali, nel percorso di trasmissione da bordo pista all'edificio più prossimo (distanza di circa 250 metri), pari almeno a 4 ordini di grandezza;
- sulla base dei dati rilevati a bordo pista e delle attenuazioni indotte dal terreno, si prevedono livelli di vibrazione in prossimità degli edifici del Polo Scientifico e Tecnologico più prossimi al futuro sedime aeroportuale inferiori a 0,0001 mm/sec;
- tali valori appaiono del tutto insignificanti se rapportati a qualunque parametro di riferimento e risultano comunque inferiori ai livelli di rumore di fondo misurati in condizioni completamente imperturbate <sup>2</sup> (dell'ordine di  $10^{-3}$  mm/sec).

Sulla base delle conoscenze attuali, non si intravede dunque alcun pericolo per gli edifici, le attrezzature e/o le persone che insistono nell'area del Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino.

---

<sup>1</sup> Tale valore è invece pari ad un ordine di grandezza se riferito alla componente orizzontale di vibrazione rilevata in fase di decollo, in quanto in realtà, la causa di vibrazione è da attribuire all'onda acustica di pressione incidente, la cui impronta arriva a circa 50 metri dalla pista.

<sup>2</sup> Ovvero rilevati al centro dell'attuale OASI WWF Val di Rose in assenza di ogni forma di disturbo.

## 8. GLI IMPATTI VIBROMETRICI CORRELATI ALLA FASE DI CANTIERE

### 8.1 ASPETTI GENERALI

La realizzazione del quadro degli interventi in progetto troverà compimento in un arco temporale complessivo pari a quindici anni, al suo interno articolato in tre fasi pluriennali, così definite:

- Orizzonte Temporale 2018 - Breve termine, con durata pari a 4 anni;
- Orizzonte Temporale 2023 - Medio termine, con durata pari a 5 anni;
- Orizzonte Temporale 2029 - Lungo termine, con durata pari a 7 anni.

Come si evince dagli elaborati di cantierizzazione, nel primo orizzonte temporale (Orizzonte 2018) sono previsti tutti gli interventi volti alla realizzazione della nuova pista, del nuovo Terminal, di alcuni piazzali e raccordi, alla costruzione di nuove infrastrutture di volo e alla dismissione e alla successiva ricostruzione di alcune infrastrutture attualmente esistenti.

### 8.2 LE POSSIBILI VIBRAZIONI INDOTTE

Le vibrazioni si generano per le proprietà elastiche delle strutture e sono fenomeni determinati da trasferimenti di energia potenziale elastica in energia cinetica. Nascono generalmente a causa di forze perturbatrici che agiscono sul sistema meccanico e la loro ampiezza dipende dalle proprietà elastiche del sistema (vibrazioni forzate). Sperimentalmente si osserva che in un sistema meccanico, a seguito di una perturbazione delle condizioni iniziali di quiete e in assenza di forzanti esterne, i fenomeni vibratorii tendono ad attenuarsi più o meno rapidamente.

Se nel sistema fossero presenti solo le forze elastiche e le forze d'inerzia, il decadimento dell'ampiezza dei fenomeni vibratorii non si giustificerebbe (la forza elastica e quella d'inerzia sono entrambe forze conservative). Nella realtà sono presenti dei fenomeni dissipativi che, ad ogni ciclo di oscillazione, trasformano in energia termica o acustica, una quota parte dell'energia totale del sistema (inizialmente solo somma di quella elastica e di quella cinetica). Queste forze, che possono essere di diversa natura, si chiamano forze dissipative.

In linea di principio, le attività previste di cantiere, presentano delle operazioni potenzialmente disturbanti dal punto di vista delle sollecitazioni indotte (scotico, scavo, battitura, ecc.).

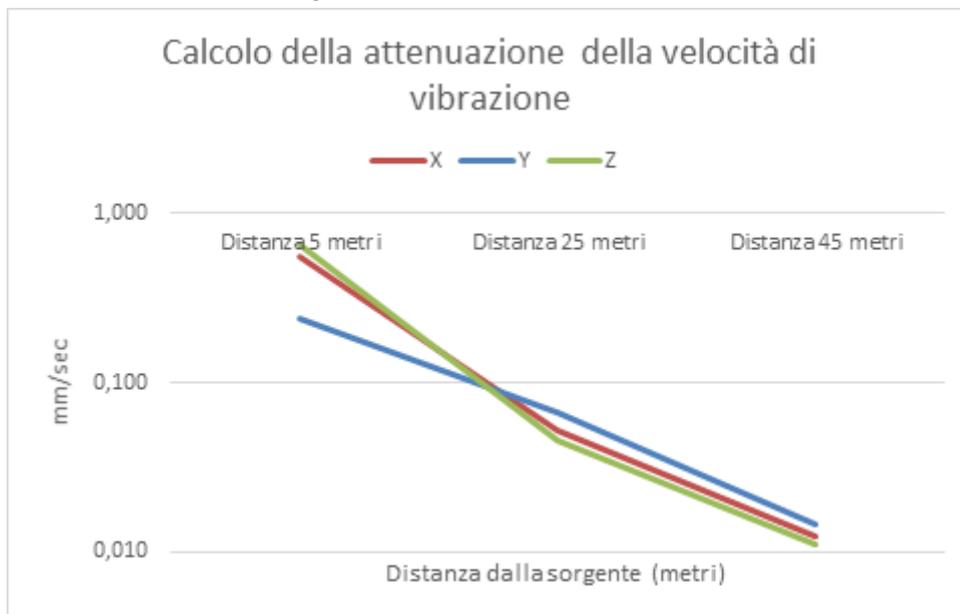




**Figura 27. Macchine operatrici previste in fase di cantiere**

Dal punto di vista della quantificazione energetica che le stesse generalmente possono indurre, studi presenti in bibliografia ed attività di monitoraggio precedentemente condotte in condizioni simili, limitano ad un livello di picco massimo di circa 10 mm/sec il livello di vibrazione misurato ad 1 metro dalla sorgente.

Questo dato può quindi essere visto in associazione a quanto emerso durante la caratterizzazione dell'area che può essere sintetizzato nel successivo diagramma.

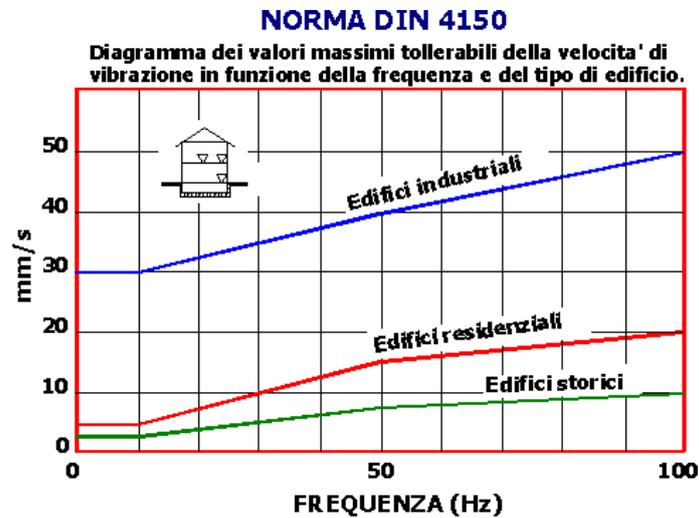


**Figura 28. Calcolo dell'attenuazione delle velocità di vibrazione**

In pratica, si può sintetizzare che già dopo 40-50 metri dal punto di impatto, i livelli di vibrazione si possono ritenere ridotti di due ordini di grandezza.

I livelli di vibrazione a distanze superiori risultano, quindi, del tutto trascurabili e dunque non possono ritenersi causa di alcun pericolo per gli edifici, le attrezzature e/o le persone che insistono nell'area del Polo Scientifico e Tecnologico.

I livelli di vibrazione attesi (al più dell'ordine di 0,001 mm/sec) risultano, infatti, significativamente inferiori a quelli in grado di indurre danni alle strutture (figura seguente) o disturbo alle apparecchiature presenti all'interno dei laboratori del Polo.



Soltanto nel caso di lavorazioni che dovessero realizzarsi al perimetro del sedime aeroportuale e che dovessero prevedere attività particolarmente invasive dal punto di vista delle vibrazioni indotte, si consiglia un'analisi di maggiore dettaglio.

Ad ogni modo si ricorda che a supporto dello Studio di Impatto Ambientale è previsto uno specifico Piano di Monitoraggio Ambientale che contempla, tra l'altro, anche l'esecuzione di opportune misure dei fenomeni vibrazionali, sia in fase di cantiere, sia in fase di esercizio.