

POLITECNICO DI TORINO



TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

“Analisi e verifica sperimentale dell’impatto vibro-acustico nel cantiere di una linea della metropolitana di Parigi”

“Analysis and experimental verification of vibro-acoustic impact upon the excavation site of a Paris underground line”

Relatore

Prof. Marco Carlo Masoero

Candidato

Daniele Fassola

Anno Accademico 2018-2019

SOMMARIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUZIONE..... | 5 |
| 2. CENNI SULLE VIBRAZIONI..... | 6 |
| 3. LEGISLAZIONE INERENTE AL MOTO VIBRATORIO..... | 7 |
| 3.1. LEGGE ITALIANA..... | 7 |
| 3.1.1. <i>Modalità di misurazione delle grandezze cinematiche da riscontrare</i> | 8 |
| 3.1.2. <i>Analisi spettrale</i> | 9 |
| 3.1.3. <i>Valutazione dei dati</i> | 10 |
| 3.1.4. <i>Normativa DIN 4150</i> | 11 |
| 3.1.5. <i>Normativa BS 7385</i> | 12 |
| 3.1.6. <i>Normativa SN 640312</i> | 14 |
| 3.2. LEGGE FRANCESE..... | 15 |
| 3.2.1. <i>Normativa ISO 2631</i> | 15 |
| 3.2.2. <i>Circulaire 1986</i> | 17 |
| 4. CENNI SUL RUMORE..... | 20 |
| 5. LEGISLAZIONE INERENTE AL RUMORE..... | 24 |
| 5.1. LEGGE ITALIANA..... | 24 |
| 5.1.1. <i>Legge Quadro del 1995</i> | 24 |
| 5.1.2. <i>Regolamento comunale per la tutela dall'inquinamento acustico di Torino</i> | 24 |
| 5.2. LEGGE FRANCESE..... | 25 |
| 5.2.1. <i>Decreto n° 2006-1099</i> | 25 |
| 5.2.2. <i>Rumore provocato da lavorazioni edili</i> | 26 |
| 6. PROGETTO EOLE..... | 27 |
| 6.1. TRACCIATO EOLE..... | 29 |
| 6.1.1. <i>Puits Gambetta</i> | 31 |
| 6.1.1.1. <i>Lavorazioni</i> | 31 |
| 6.1.2. <i>Puits Abrevoir</i> | 33 |
| 6.1.2.1. <i>Lavorazioni</i> | 34 |
| 6.1.3. <i>Puits Gouraud</i> | 35 |
| 6.1.3.1. <i>Lavorazioni</i> | 35 |
| 6.2. LA BASE SEINE..... | 36 |
| 6.3. GARE PORTE MAILLOT..... | 38 |
| 6.3.1. <i>Parte a cielo aperto</i> | 41 |
| 6.3.2. <i>Contre-Rideau</i> | 44 |
| 6.3.3. <i>Parte sotterranea della stazione</i> | 45 |
| 6.3.4. <i>Hall Periere</i> | 47 |
| 6.4. MISURE DI SICUREZZA ADOTTATE..... | 48 |
| 6.4.1. <i>Misure generali</i> | 48 |
| 6.4.2. <i>Per i siti fissi</i> | 49 |
| 6.4.3. <i>Cantieri mobili</i> | 49 |
| 7. MONITORAGGIO..... | 50 |
| 7.1. SISTEMI DI MONITORAGGIO INSTALLATI..... | 53 |
| 8. RUMORE ANTROPICO..... | 56 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 8.1. | RUMORE CONTINUO NEL TEMPO..... | 56 |
| 8.2. | RUMORE DISCONTINUO NEL TEMPO | 56 |
| 8.3. | STRUMENTAZIONE UTILIZZATA..... | 57 |
| 8.3.1. | <i>Fonometro</i> | 57 |
| 8.3.2. | <i>Vibrometro</i> | 59 |
| 8.4. | VERIFICHE NORMATIVE | 61 |
| 8.4.1. | <i>Rumore</i> | 61 |
| 8.4.2. | <i>Vibrazione</i> | 64 |
| 8.5. | RISULTATI MISURAZIONI FONOMETRICHE PER IMPIANTI A MOTORE | 66 |
| 8.5.1. | <i>Impianto di aerazione</i> | 66 |
| 8.5.2. | <i>Motore della macchina perforatrice</i> | 70 |
| 9. | ANALISI DI EVENTI SONORI E VIBRATORI | 73 |
| 9.1. | JET GROUTING | 73 |
| 9.2. | PAROIS MOULÉES..... | 78 |
| 9.3. | MACCHINA PERFORATRICE..... | 83 |
| 9.4. | PARCHEGGIO INTERRATO PALAIS DE CONGRÈS..... | 89 |
| 10. | CONCLUSIONE | 92 |
| | BIBLIOGRAFIA | 95 |

Indice delle figure

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1: Grafico della ponderazione in frequenza</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 2: Tabella della ponderazione in frequenza</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 3: Limiti delle vibrazioni indotte di continuo in funzione della frequenza</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 4: Limiti delle vibrazioni indotte impulsivamente in funzione della frequenza</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 5: Fonometro per la misura del rumore</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 6: Conversione del segnale eseguita tramite il microfono</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 7: Curva di risposta di un microfono</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 8: Grafici del livello sonoro e del livello sonoro equivalente</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 9 Progetto Gran Paris Express.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 10: Progetto del prolungamento del RER E.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 11: Tracciato da Gambetta a Porte Maillot</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 12: Tracciato da Porte Maillot a Saint-Lazare.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 13: Planimetria de pozzo di Gambetta.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 14: Lavorazioni in corso nel pozzo di Gambetta.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 15: Planimetria del Pozzo di Abreuvour</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 16: Planimetria del pozzo di Gouraud</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 17: Vista frontale della Base Seine.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 18: Vista in pianta della Base Seine.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 19: Planimetria Porte Maillot.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 20: Opere in costruzione a Porte Maillot.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 21: Zona centrale della stazione a cielo aperto.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 22: Zona di estremità ad ovest della stazione a cielo aperto</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 23: Zona di estremità est della stazione a cielo aperto.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 24: Strumentazione di monitoraggio intorno al pozzo di Gambetta</i> | <i>54</i> |
| <i>Figura 25: Strumentazione installata nei pressi del pozzo di Abreuvour.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 26: Strumentazione installata nei pressi del pozzo di Gouraud</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 27: Fonometro XL2 Analyser</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 28: Schermo del XL2 Analyser</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 29: Misure restituite dal fonometro.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figura 30: Spettro di risposta in bande di ottava per una misurazione del livello sonoro</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 31: Elementi di misura collegati al MicroMate</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 32: Scatola di alluminio in cui è alloggiato il geofono Instantel.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 33: Setup di un MicroMate per il monitoraggio continuo.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 34: Livello acustico equivalente senza lavorazioni in esecuzione.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 35: Spettro acustico in assenza di lavorazioni in esecuzione</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 36: Limiti delle vibrazioni impulsive in relazione alla frequenza</i> | <i>65</i> |
| <i>Figura 37: Grafico dei limiti della velocità di vibrazione secondo la DIN 4150</i> | <i>65</i> |
| <i>Figura 38: Impianto di aerazione</i> | <i>66</i> |
| <i>Figura 39: Grafico del livello equivalente in funzione del tempo a distanza 3 metri dall'impianto di aerazione</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 40: Spettro in bande di terzi di ottava della misurazione effettuata a distanza 3 metri dall'impianto di aerazione.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 41: Posizione rilevamento</i> | <i>67</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 42: Grafico del livello equivalente in funzione del tempo a distanza 10 metri dall'impianto di aerazione</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 43: Grafico del livello equivalente in funzione del tempo a distanza 14 metri dall'impianto di aerazione</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 44: Confronto tra gli spettri delle 3 diverse misurazioni fonometriche.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figura 45: Macchina perforatrice.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 46: Grafico del livello sonoro equivalente in funzione del tempo per il motore di una macchina perforatrice a 4 metri di distanza.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 47: Grafico del livello sonoro equivalente in funzione del tempo per il motore di una macchina perforatrice a 18 metri di distanza.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figura 48: Confronto tra gli spettri in bande di un terzo di ottava delle due misurazioni effettuate ...</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 49: Jet Grouting.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figura 50: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura 51: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura 52: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura 53: Confronto tra gli spettri sonori dei 3 eventi analizzati</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura 54: Pala a benna mordente in fase di scavo e rilascio materiale</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura 55: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figura 56: Grafico del livello acustico equivalente a distanza 40 metri dalla fonte.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figura 57: Verifica nei confronti delle vibrazioni per le costruzioni esistenti secondo la Circolare 1986</i> | <i>81</i> |
| <i>Figura 58: Verifica vibrazionale secondo la norma DIN 4150</i> | <i>82</i> |
| <i>Figura 59: Macchina perforatrice.....</i> | <i>83</i> |
| <i>Figura 60: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>84</i> |
| <i>Figura 61: Posizione seconda misurazione.....</i> | <i>84</i> |
| <i>Figura 62: Grafico del livello acustico equivalente a distanza 20 metri dalla fonte.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura 63: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura 64: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figura 65: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Figura 66: Confronto tra gli spettri acustici dei 4 eventi registrati</i> | <i>88</i> |
| <i>Figura 67: Trapano meccanico</i> | <i>89</i> |
| <i>Figura 68: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Figura 69: Verifica nei confronti delle vibrazioni registrate secondo la Circolare del 1986</i> | <i>91</i> |
| <i>Figura 70: Verifica nei confronti delle vibrazioni registrate secondo la DIN 4160</i> | <i>91</i> |

1. INTRODUZIONE

La presente tesi affronta l'argomento delle costruzioni sotterranee soffermandosi sul rumore indotto dalle diverse lavorazioni di cantiere e la possibile relazione con le vibrazioni del terreno provocate dalle stesse.

Questo tema è di grande attualità in quanto per non incorrere in sanzioni economiche e in lamentele da parte del vicinato è necessario un monitoraggio continuo dei livelli sonori e vibrazionali emessi dai cantieri.

Infatti, qualsiasi sito di scavo per la creazione di stazioni sotterranee della metropolitana, in ambiente urbano, utilizza una serie di macchinari che oltre ad un elevato livello sonoro possono produrre vibrazioni rilevanti nel terreno circostante.

La presenza di edifici prossimi al sito di lavoro porta alla possibilità di creare un disturbo agli abitanti e in alcuni casi un pericolo strutturale per le costruzioni esistenti.

In questo elaborato si intende dimostrare, oltre al rispetto delle normative inerenti per il sito studiato, la presenza di un legame tra le due diverse grandezze fisiche registrate.

Per soddisfare il primo obiettivo prefissato si è eseguito un inquadramento normativo degli argomenti trattati sia per la legislazione francese in vigore a Parigi, luogo delle misurazioni, sia per la legislazione italiana in modo da poter effettuare un paragone.

Il cantiere analizzato si trova in Francia, nella regione dell'Ile de France, più precisamente al confine tra i comuni di Parigi e Courbevoie; si tratta dello scavo di un tunnel per il prolungamento di una linea della metropolitana della capitale transalpina.

Per effettuare questa analisi si è deciso di avvalersi di due strumenti differenti: un fonometro per il rilevamento del suono e un vibrometro per misurare le velocità di vibrazione; essi sono stati adoperati in contemporanea per diversi intervalli di tempo, di durata compresa tra i 5 e i 10 minuti consecutivi.

È nota la difficoltà di trovare una dipendenza o una correlazione dimostrabile tra il livello sonoro e le vibrazioni registrate a causa dell'interferenza di altre attività, sia edili che urbane, che modificano o coprono completamente quelle ricercate.

Infatti, se l'evento vibrazionale dovuto alla lavorazione monitorata è facilmente identificabile grazie alla ripetitività del risultato e alla diversa analisi in frequenza, ciò non si può dire per quello sonoro che difficilmente è distinguibile dal rumore naturale o antropico percepibile nell'intorno della postazione di misura.

Risulta quindi imprescindibile una perfetta simultaneità delle registrazioni in modo da poter effettuare un confronto diretto tra le misure ottenute in funzione del tempo ed identificare possibili similitudini presenti.

2. CENNI SULLE VIBRAZIONI

Il problema delle vibrazioni negli edifici ha assunto, in questi ultimi anni, sempre maggiore importanza sia in relazione ai cambiamenti di tipologia strutturale presenti nelle costruzioni moderne, più snelle e più leggere grazie ad un più razionale utilizzo dei materiali con migliori caratteristiche di resistenza meccanica, sia in relazione al moltiplicarsi delle fonti di vibrazione. In special modo queste ultime possono essere generate dalle attività dell'uomo quali: attività di cantiere, scoppi di mine, funzionamento di macchinari, traffico stradale e ferroviario. Tutte le attività citate possono essere identificate come causa di disturbo e apprensione degli occupanti di edifici.

Per queste ragioni è diventato necessario verificare se le vibrazioni prodotte siano tali da indurre o meno danni alla costruzione, soprattutto in presenza di evidenti danni architettonici generati da altre cause.

In generale, problemi strutturali dell'edificio nel suo insieme, attribuibili a fenomeni vibratorii, sono estremamente rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause.

Perché le vibrazioni possano arrecare problemi di questo genere è necessario che esse raggiungano livelli tali da causare prima fastidio e disturbo agli occupanti.

Sono invece frequenti altre forme di danno, di entità definita "di soglia" che, senza compromettere la sicurezza strutturale degli edifici, ne possono determinare una riduzione del valore.

I danni di soglia si possono presentare sotto forma di formazione di fessure nell'intonaco, accrescimenti di fessure già esistenti, danneggiamenti di elementi architettonici.

Le vibrazioni possono essere generate dall'esterno, per esempio trasmesse attraverso il terreno oppure causate da sovrappressioni d'aria (per esempio traffico aereo, vento), o in alternativa dall'interno, come quelle dovute ad attività antropiche o ad azioni di macchinari.

Pertanto, per poter prevedere il danno causato da una determinata vibrazione risulta essere necessario, non solo conoscere il moto vibratorio scatenante con tutte le sue caratteristiche intrinseche ma anche le modalità di trasmissione di tutti i materiali che esso attraversa.

A seconda del terreno e della struttura il movimento può amplificarsi o ridursi, quindi, per un'analisi approfondita del sistema, bisognerebbe analizzare separatamente ogni casistica.

In verità, come è specificato nel capitolo seguente, la maggior parte delle normative fornisce dei parametri limite di velocità da rispettare che risultano essere affidabili per tutte le casistiche generali. Infatti, difficilmente un edificio può andare in crisi a causa delle vibrazioni indotte da cantieri o attività umane presenti nelle vicinanze della struttura.

3. LEGISLAZIONE INERENTE AL MOTO VIBRATORIO

3.1. LEGGE ITALIANA

Per quanto concerne il fenomeno vibratorio in Italia la normativa da perseguire risulta essere la UNI 9916 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici” del 2004. (UNI 9916, 2004)

Essa è una revisione tecnica della norma UNI 9916 del 1991 rispetto alla quale ogni singolo argomento è stato ampliato e dettagliato, inoltre, sono state aggiunti alcuni valori di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

Questa legge fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii in modo tale da permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

Si applica in generale a tutte le tipologie di edifici di carattere abitativo, industriale e monumentale. Ciminiere, ponti e strutture sotterranee, quali gallerie e tubazioni, non sono considerate dalla presente norma.

Per una corretta esecuzione delle misurazioni, premessa necessaria per giungere a descrivere completamente il fenomeno e valutare quindi la possibilità che esso produca danni, è necessario tenere conto dei seguenti fattori:

- meccanismo di eccitazione e trasmissione;
- durata del fenomeno;
- natura deterministica o aleatoria del fenomeno;
- distribuzione spettrale dell'energia.

In generale, la risposta di un edificio o dei suoi elementi strutturali sottoposti ad eccitazione dinamica e quindi il danno potenziale che questa può produrre, dipendono, oltre che dal contenuto spettrale dell'eccitazione stessa, dalle caratteristiche dinamiche dell'edificio.

Sarebbe dunque necessario ottenere una documentazione completa sull'edificio, prima di dare una valutazione del rischio di danno connesso con il fenomeno vibratorio in esame.

In particolare, l'attenzione dovrebbe essere concentrata sui seguenti aspetti:

- caratteristiche costruttive dell'edificio;
- stato di conservazione;
- caratteristiche delle fondazioni ed interazione con il terreno.

Tuttavia, in relazione agli obiettivi dell'indagine, lo studio della risposta degli edifici può essere affrontato in maniera più o meno approfondita e il livello di dettaglio della conoscenza degli aspetti sopra elencati può essere, quindi, più o meno accurato.

Il medesimo discorso può essere affrontato per il terreno che si frappone tra la sorgente e l'edificio, nonostante esso risulti essere di primaria importanza per analizzare la risposta della struttura.

Nella normativa in esame, l'influenza del tipo di terreno (trattata nell'Allegato C) considera, in via semplificata, esclusivamente la proprietà di coesione ed il grado di liquefazione del suolo

poiché esse sono caratteristiche che influiscono in modo determinante sulla frequenza dominante del fenomeno sismico.

3.1.1. Modalità di misurazione delle grandezze cinematiche da riscontrare

Il moto può essere misurato attraverso una qualunque delle grandezze cinematiche che lo caratterizzano (accelerazione, velocità, spostamento). Si deve però ricordare che:

1. l'accelerazione è la grandezza più facilmente misurabile grazie alla disponibilità di strumenti (accelerometri) molto efficienti che possiedono sensibilità e risposta in frequenza adeguate oltre a robustezza e facilità d'impiego elevata;
2. la velocità è la grandezza normalmente utilizzata per definire parametri e valori di riferimento nella valutazione del danno essendo direttamente legata all'energia cinetica.

La strumentazione esistente, pur essendo, come l'accelerometro, molto efficiente ed affidabile, presenta però dei limiti nella risposta alle basse frequenze.

Per questo motivo, specialmente quando si ha motivo di ritenere importanti le componenti del moto a bassa frequenza, è prassi comune misurare direttamente l'accelerazione ed ottenere poi la velocità per integrazione del segnale.

Quest'operazione tuttavia può introdurre errori, sia che venga eseguita in forma analogica oppure in forma digitale. Tali errori possono essere contenuti adottando adeguati procedimenti che dovranno essere sempre descritti e giustificati nel rapporto d'attività.

La modalità di misurazione della risposta dell'edificio deve essere scelta in funzione delle finalità dell'indagine e si distinguono due casi principali:

- Quando si tratta di verificare il livello di vibrazione alla base dell'edificio, per esempio in rapporto a valori di riferimento forniti da normative, o di calcolare una funzione di trasferimento tra la vibrazione alla base e la risposta dell'edificio, la posizione di misurazione deve essere scelta in corrispondenza della fondazione o, nel caso di edifici senza fondazioni, alla base del muro di sostegno esterno, ad un'altezza non maggiore di 0,5 m dal livello del terreno.

I punti di misurazione sulla fondazione devono essere predisposti, se possibile, sul lato dell'edificio prossimo alla sorgente di vibrazione.

Le vibrazioni per ciascun punto devono essere misurate sia in direzione verticale che in due direzioni orizzontali ortogonali, queste ultime scelte possibilmente con riferimento agli assi principali dell'edificio.

Per edifici ad ampia superficie di base, indicativamente con una dimensione di base maggiore di 20 m, le misurazioni devono essere eseguite simultaneamente in più punti (un punto di misurazione per ogni 10 m).

Nei casi in cui si debba tenere conto della funzione di trasferimento tra sorgente di vibrazioni e fondazione, per esempio per valutare l'influenza del terreno sul comportamento dinamico dell'edificio, si devono eseguire misurazioni contemporanee in prossimità della sorgente e della fondazione.

- Quando si tratti di valutare l'ampiezza di vibrazioni in particolari parti strutturali dell'edificio, il posizionamento dei trasduttori deve essere effettuato direttamente sulle parti strutturali, nei punti ove si presume che il fenomeno vibratorio abbia massima ampiezza.

Un esempio tipico sono le oscillazioni verticali dei solai.

Nel caso di sorgente esterna all'edificio, se la misurazione è finalizzata alla valutazione dell'ampiezza della risposta strutturale nel suo complesso è necessario effettuare la misurazione, oltre che in fondazione, all'ultimo piano dell'edificio, secondo tre direzioni ortogonali, scelte con riferimento agli assi principali della struttura.

Per edifici a più piani è opportuno aggiungere posizioni di misurazione ai piani intermedi.

In ogni caso i punti di misurazione dovranno essere in corrispondenza degli elementi strutturali che determinano la rigidezza dell'edificio. Se l'edificio ha più di 10 m di lunghezza, è opportuno installare posizioni di misurazione ad intervalli orizzontali di circa 10 m.

Qualora la sorgente di vibrazioni sia interna all'edificio, devono essere considerati, oltre ai punti di misurazione sopra indicati, quelli posti in vicinanza della sorgente, ritenuti critici in base ad osservazioni preliminari. (UNI 9916, 2004)

In generale è necessario misurare due diverse velocità relative al moto vibratorio che sono dette velocità di picco puntuale (p.p.v.) e la velocità di picco di una componente puntuale (p.c.p.v.).

La velocità di picco puntuale (p.p.v.) è definita come il valore massimo del modulo del vettore velocità misurato in un dato punto, o ottenuto per integrazione.

La determinazione della velocità di picco puntuale (p.p.v.) richiede la misurazione simultanea delle tre componenti mutuamente perpendicolari della velocità nel punto considerato (di solito due componenti orizzontali e la verticale).

Le tre componenti devono essere combinate vettorialmente per determinare, istante per istante, il modulo della velocità risultante, che deve essere confrontato con il valore della velocità di soglia di riferimento, stabilito dalla normativa.

La p.c.p.v. è definita come il valore massimo del modulo di una delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente in un punto o ottenute mediante integrazione.

3.1.2. Analisi spettrale

L'analisi spettrale è utilizzata per la determinazione della frequenza ed ampiezza delle componenti armoniche della risposta nel punto di misurazione considerato. Risulta di particolare interesse confrontare le componenti armoniche più significative dei segnali registrati con le frequenze di risonanza (stimate o determinate da opportune misurazioni) dell'edificio oggetto di indagine. L'analisi è, di solito, eseguita sui dati acquisiti attraverso una scheda ADC ("Analog to Digital Converter"), utilizzando un software di analisi.

Il sistema di acquisizione deve essere dotato di un filtro passa-basso con funzioni "anti-aliasing", la cui frequenza di taglio deve variare in funzione della massima frequenza di analisi impostata dall'operatore e della pendenza del filtro stesso.

Si può osservare che, ai fini del calcolo della risposta in termini di velocità, l'analisi può essere in genere limitata a frequenze fino a 100 Hz. È necessario tenere conto degli errori tipici dell'elaborazione digitale.

Sono di particolare importanza, in tale ambito, i seguenti aspetti:

- problemi legati alla risoluzione in frequenza, dovuti alla lunghezza finita dei segnali registrati;
- problemi legati al troncamento dei segnali registrati, per i quali si richiede un'opportuna "finestratura".

3.1.3. Valutazione dei dati

La valutazione della "pericolosità" del livello delle vibrazioni è un processo complesso e delicato per il quale non esistono criteri validi in assoluto; la tecnica propone, in ogni caso, due approcci diversi:

- Approccio teorico: in linea di principio è possibile utilizzare le tecniche dell'analisi dinamica per costruire un modello matematico della struttura, individuare i modi di vibrare e calcolare quindi la risposta strutturale e le sollecitazioni indotte. I valori ottenuti possono essere confrontati con quelli della resistenza dei materiali o con valori della risposta ritenuti ammissibili. L'approccio è complesso e oneroso sia per gli aspetti numerici sia per la quantità (e qualità) delle informazioni di partenza richieste. Per queste ragioni questo metodo risulta essere, nella maggioranza dei casi, fuori delle possibilità (anche economiche) d'indagine e il suo utilizzo è giustificato solo se si hanno seri dubbi che la sicurezza dell'opera possa essere compromessa o per opere di particolare valore socio-economico (per esempio beni monumentali).
- Approccio empirico: nella prassi corrente si ricorre ad un metodo empirico, basato sul confronto dei valori registrati con dati ottenuti da osservazioni passate. È evidente che il problema diviene allora quello di identificare da un lato, dei parametri sintetici che caratterizzano la "pericolosità" delle vibrazioni e dall'altro quello di fissare dei valori limite di sicurezza validi per ogni tipo di edificio (o per categorie di edifici).

A tale proposito si sottolinea come non esista in letteratura una documentazione sufficientemente univoca per arrivare a definire valori assolutamente certi; sono comunque disponibili, nella normativa internazionale, alcuni prospetti di valori limite di p.p.v. o p.c.p.v. Alla luce di questa considerazione, un giudizio finale, soprattutto se le ampiezze di vibrazione registrate sono prossime a quelle riportate nelle normative, deve essere basato su una seria analisi delle condizioni dell'edificio e dell'ambiente in cui si colloca. (UNI 9916, 2004)

Per semplicità e per uniformità con le leggi europee i valori limite delle vibrazioni in ambito strutturale, presi in considerazione dalla normativa italiana, si rifanno alle leggi tedesca,

inglese e svizzera (la DIN 4150 "Erschütterungen im Bauwesen - Einwirkungen auf bauliche Anlagen" del 1999, la BS 7385 "Evaluation and measurement for vibration in buildings" del 1993, la SN 640312 a "Effet des ébranlements sur les constructions" del 1992) che fanno riferimento al picco nel tempo della singola velocità (p.c.p.v.).

Nei casi in cui il valore di riferimento fornito dalle norme, con il quale la p.c.p.v. deve essere confrontata, vari con la frequenza allora si rende necessaria l'individuazione delle frequenze dominanti.

Tutte le norme specificano che i valori di riferimento indicati riguardano solo l'effetto diretto delle vibrazioni, non gli effetti indiretti quali, per esempio, cedimenti provocati dalla compattazione del terreno a seguito delle vibrazioni, i quali devono essere considerati a parte. I valori di riferimento indicati sono quelli al di sotto dei quali, salvo casi particolari, è ragionevole presumere che non vi sia danno; si specifica inoltre che il superamento dei limiti indicati non implica necessariamente il verificarsi del danno, ma è un segnale della necessità di indagini più approfondite.

3.1.4. Normativa DIN 4150

La DIN 4150-3 considera tre classi di edifici:

- edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- edifici residenziali e costruzioni simili;
- costruzioni che non appartengono alle prime due categorie e sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici).

La norma prevede la misurazione ed il controllo del livello di vibrazione sia in fondazione (per tutte e tre le componenti) che ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato per quanto riguarda le componenti orizzontali della velocità.

Tali misurazioni forniscono un quadro della risposta globale dell'edificio; sono inoltre necessarie misurazioni relative alla risposta dei solai ai singoli piani, che possono essere limitate alla misurazione della componente verticale della velocità, registrata al centro del solaio.

I valori di riferimento relativi alle vibrazioni di breve durata (cioè tali da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata) sono riportati Tabella 1. (DIN 4160, 1999)

| Categoria | Tipo di struttura | Velocità di vibrazione (mm/s) | | | |
|-----------|---|-------------------------------|---------|-----------|---------------------------------------|
| | | Misura alla fondazione | | | Misura al pavimento dell'ultimo piano |
| | | Campi di frequenza (Hz) | | | Tutte le frequenze |
| | | <10 | 10 ÷ 50 | 50 ÷ 100* | |
| 1 | Edifici industriali e commerciali | 20 | 20-40 | 40-50 | 40 |
| 2 | Edifici residenziali | 5 | 5-15 | 15-20 | 15 |
| 3 | Strutture particolarmente sensibili (es. monumenti) | 3 | 3-8 | 8-10 | 8 |

*Per frequenze superiori ai 100 Hz si possono applicare i valori riportati in questa colonna
linea 1 è aumentata di un fattore 2 per strutture civili

Tabella 1: Valori di riferimento relativi alle vibrazioni di breve durata

In presenza di vibrazioni continue che possano indurre fenomeni di fatica o amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata, i valori di riferimento per le componenti orizzontali del moto sono indicati nel Tabella 2 e sono indipendenti dal contenuto in frequenza del segnale.

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

Tabella 2: Valori di riferimento relativi alle vibrazioni continue

Per la componente verticale dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la p.c.p.v. 10 mm/s limitatamente alle prime due classi di edifici. Tale limite è indipendente dal contenuto in frequenza della registrazione e può essere inferiore per la terza classe di edifici.

3.1.5. Normativa BS 7385

La BS 7385 differentemente dalla precedente tratta solo il caso di vibrazioni trasmesse dal terreno, in altre parole le vibrazioni generate da sorgenti poste all'interno dell'edificio non sono contemplate.

I valori di riferimento forniti dalla norma, relativi a misurazioni in fondazione e riportati in Tabella 3 sono applicabili solo a edifici bassi (fino a 3 piani) e riguardano vibrazioni transitorie che non danno luogo a risonanza nella struttura. In caso di risonanza tali valori devono essere ridotti del 50%.

Per frequenze minori di 4 Hz, la norma richiede di verificare che lo spostamento non superi 0,6 mm (da zero al picco). (BS 7385, 1993)

| Classe | Tipo di edificio | "Peak component particle velocity" nell'intervallo di frequenza dell'impulso predominante | | |
|--|--|---|---|-------------------|
| | | Da 4 Hz a 15 Hz | Da 15 Hz a 40 Hz | Da 40 Hz a 250 Hz |
| 1 | Strutture a telaio o rinforzate. Edifici industriali e commerciali | 50 mm/s | | |
| 2 | Strutture non rinforzate. Edifici residenziali o piccoli edifici commerciali | Varia linearmente da 15 mm/s ($f=4$ Hz) fino a 20 mm/s ($f=15$ Hz) | Varia linearmente da 20 mm/s ($f=15$ Hz) fino a 50 mm/s ($f=40$ Hz) | 50 mm/s |
| Nota 1 I valori indicati sono alla base dell'edificio. | | | | |
| Nota 2 Per la classe 2, a frequenze minori di 4 Hz, non si deve superare uno spostamento massimo di 0,6 mm (da zero al picco). | | | | |

Tabella 3: Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.c.p.v.)

Vi è una parte di questa normativa che riguarda il controllo delle vibrazioni nel caso di battitura di pali. In questa particolare tipologia di costruzione la grandezza di riferimento non è più la "peak component particle velocity" bensì la "peak particle velocity", cioè il picco nel tempo del modulo del vettore velocità.

In Tabella 4 sono indicati i valori di riferimento, al di sotto dei quali è ragionevole presumere che non si verifichi danno minore o "cosmetic" (cioè non strutturale).

| Classe | Tipo di edificio | Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s | | |
|---|--|--|-----------------------|--------------------------------------|
| | | Fondazioni | | |
| | | Da 1 Hz fino a 10 Hz ^{*)} | Da 10 Hz fino a 50 Hz | Da 50 Hz fino a 100 Hz ^{*)} |
| A | Edifici residenziali costruiti a regola d'arte ed in buono stato di conservazione | 5 | 10 | 20 |
| B | Edifici costruiti per uso industriale e commerciale con struttura relativamente snella | 10 | 20 | 40 |
| C | Edifici massicci e rigidi costruiti per uso industriale e commerciale | 15 | 30 | 60 |
| *) Indicazioni fornite per estrapolazione. I dati relativi all'installazione dei pali indicano che le frequenze di vibrazione prevalenti sono contenute nell'intervallo da 10 Hz a 50 Hz. | | | | |

Tabella 4: Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.p.v.)

Edifici sotto tutela non rientrano nelle categorie sopra elencate e necessitano di particolare considerazione.

3.1.6. Normativa SN 640312

La norma riguarda le vibrazioni provocate durante le costruzioni dallo scoppio di mine, dalle attività di macchine di cantiere e dal traffico su strada e ferroviario.

La norma non è applicabile alle vibrazioni di frequenza minore di 8 Hz e non riguarda gli effetti indiretti delle vibrazioni, quali, per esempio, eventuali cedimenti del terreno su cui poggia l'edificio.

La grandezza di riferimento è la "peak particle velocity", cioè il picco nel tempo del modulo del vettore velocità. I valori di riferimento sono forniti in funzione della frequenza dominante della vibrazione, determinata dall'analisi spettrale della componente del vettore velocità con ampiezza maggiore.

In Tabella 5 sono indicati i valori di riferimento, al di sotto dei quali anche i piccoli danni sono poco probabili. Le soglie sono applicabili ai tipi di costruzioni ivi descritti. Sono considerati i casi di vibrazioni occasionali (numero di oscillazioni eccedenti il 70% del valore di velocità di riferimento maggiore di 1000), frequenti (numero di oscillazioni compreso tra 1000 e 100000) e permanenti (numero di oscillazioni maggiori di 100000). (SN 640213, 1992)

| Classe | Tipo di costruzione | Esposizione | Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s | | |
|---|---|--|--|--|--|
| | | | Posizioni di misura ^{*)} | | |
| | | | Da 8 Hz fino a 30 Hz ¹⁾ | Da 30 Hz fino a 60 Hz | Da 60 Hz fino a 150 Hz |
| A | Costruzioni molto poco sensibili (per esempio ponti, gallerie, fondazioni di macchine) | Occasionale Frequente Permanente | Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C | Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C | Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C |
| B | Costruzioni poco sensibili (per esempio edifici industriali in cemento armato o metallici) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata | Occasionale Frequente Permanente | Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C | Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C | Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C |
| C | Costruzioni normalmente sensibili (per esempio edifici d'abitazione in muratura di cemento, cemento armato o mattoni, edifici amministrativi, scuole, ospedali, chiese in pietra naturale o mattoni intonacati) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata | Occasionale Frequente Permanente | 15 6 3 | 20 8 4 | 30 12 6 |
| D | Costruzioni particolarmente sensibili (per esempio monumenti storici e soggetti a tutela) case con soffitti in gesso, edifici della classe C nuovi o ristrutturati di recente | Occasionale Frequente Permanente | Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà | Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà | Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà |
| *) Le posizioni di misura devono essere scelte sugli elementi rigidi della struttura portante o dove sono attesi i maggiori effetti delle vibrazioni. | | | | | |

Tabella 5: Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.p.v.)

3.2. LEGGE FRANCESE

All'interno del quadro normativo francese vi sono 2 leggi differenti che si occupano del problema vibratorio.

La ISO 2631 affronta l'argomento dal punto di vista del comfort e fornisce un metodo per la misura delle vibrazioni ma non è applicabile per la valutazione degli effetti indotti mentre la seconda la ISO 4866 fornisce dei limiti oltre i quali possono intercorrere danni strutturali.

Quest'ultima è una revisione tecnica della Circolare del 1986 dove sono specificati i limiti strutturali per diverse categorie di edifici sottoposti a vibrazioni.

3.2.1. Normativa ISO 2631

La prima delle due normative citate suggerisce di utilizzare i valori nella direzione dell'asse di vibrazione con la maggiore ampiezza della frequenza ponderata W_n e di classificare le vibrazioni secondo le principali tipologie di fonti, in modo da avere delle ampiezze di vibrazione differenti a seconda della categoria in cui si rientra.

Le principali distinzioni tra le fonti hanno portato alla definizione di 3 diverse attività generali:

- processi continui o semi-continui, ad esempio industriali
- attività permanenti intermittenti, ad esempio la circolazione stradale
- attività non permanenti e di durata limitata, ad esempio le costruzioni

In generale, le grandezze considerate accettabili sono spesso legate alle aspettative generali e a fattori economici, sociali e ambientali mentre non sono influenzate dai rischi per la salute a breve termine e l'efficienza nel lavoro.

Esistono situazioni in cui le ampiezze di vibrazione significativamente più elevate possono essere tollerate, in particolare nel caso di opere temporanee e fenomeni transitori, ad esempio i cantieri civili.

In questi casi qualsiasi fattore allarmante può essere ridotto implementando un programma di relazioni pubbliche appropriate.

Inoltre, all'interno dell'ISO 2631 vi è indicata la metodologia da utilizzare per effettuare una ponderazione in frequenza infatti, gli effetti delle vibrazioni variano con le frequenze e poiché il corpo umano presenta la massima sensibilità all'interno di un determinato intervallo di frequenze può essere necessario effettuare una ponderazione tramite filtri inseriti nello strumento.

La grandezza ottenuta in seguito alla ponderazione è detta accelerazione ponderata in frequenza a_w ed è correlata alla lesività della vibrazione.

Per determinare l'insieme della ponderazione in frequenza W_m , è indicato l'utilizzo dei parametri della funzione di trasferimento detti frequenze f_i . La funzione di trasferimento $H(p)$ è espressa dal prodotto di 3 fattori ovvero i due filtri passa alto e passa basso e la funzione di ponderazione.

Sono riportate in normativa le formule per i tre filtri H_h , H_l , H_t .

Infine, per calcolare il parametro richiesto si può passare attraverso una tabella che riporta i valori della ponderazione in frequenza W_m nelle bande di 1/3 di ottava, calcolate utilizzando le frequenze centrali vere con le limitazioni di bande da 1 a 80Hz.

Esse sono ricavate tramite l'accelerazione che è il valore d'entrata in tabella.

Tutto il procedimento descritto è riassumibile attraverso il grafico e la tabella riportati in Figura 1 e 2, rappresentante l'ampiezza del segnale in funzione della ponderazione in frequenza e della frequenza. (ISO 2631, 2018)

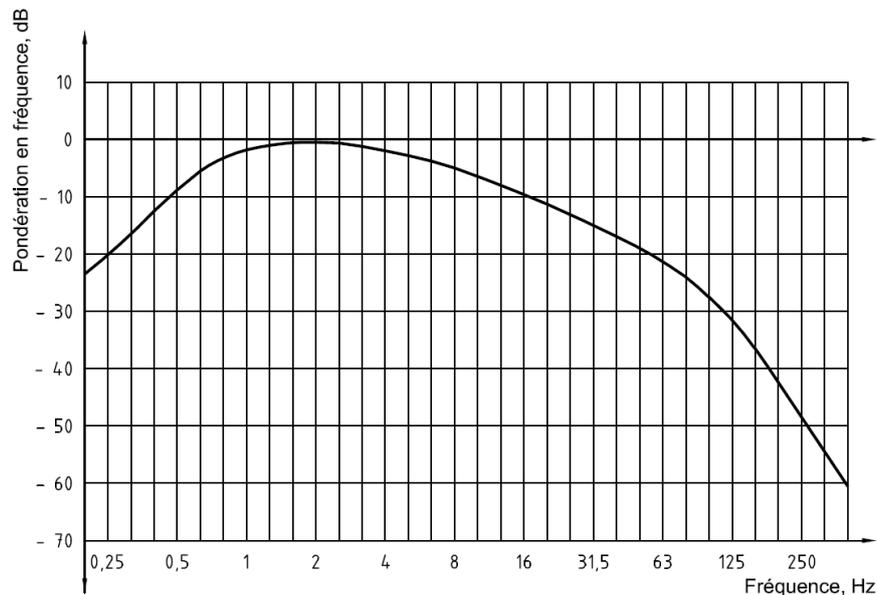


Figura 1: Grafico della ponderazione in frequenza

| x | Fréquence, Hz | | \overline{W}_m Facteur | \overline{W}_m dB |
|----|---------------|--------|-----------------------------|------------------------|
| | Nominale | Vraie | | |
| -7 | 0,2 | 0,1995 | 0,0629 | -24,02 |
| -6 | 0,25 | 0,2512 | 0,0994 | -20,05 |
| -5 | 0,315 | 0,3162 | 0,156 | -16,12 |
| -4 | 0,4 | 0,3981 | 0,243 | -12,29 |
| -3 | 0,5 | 0,5012 | 0,368 | -8,67 |
| -2 | 0,63 | 0,6310 | 0,530 | -5,51 |
| -1 | 0,8 | 0,7943 | 0,700 | -3,09 |
| 0 | 1 | 1,000 | 0,833 | -1,59 |
| 1 | 1,25 | 1,259 | 0,907 | -0,85 |
| 2 | 1,6 | 1,585 | 0,934 | -0,59 |
| 3 | 2 | 1,995 | 0,932 | -0,61 |
| 4 | 2,5 | 2,512 | 0,910 | -0,82 |
| 5 | 3,15 | 3,162 | 0,872 | -1,19 |
| 6 | 4 | 3,981 | 0,818 | -1,74 |
| 7 | 5 | 5,012 | 0,750 | -2,50 |
| 8 | 6,3 | 6,310 | 0,669 | -3,49 |
| 9 | 8 | 7,943 | 0,582 | -4,70 |
| 10 | 10 | 10,00 | 0,494 | -6,12 |
| 11 | 12,5 | 12,59 | 0,411 | -7,71 |
| 12 | 16 | 15,85 | 0,337 | -9,44 |
| 13 | 20 | 19,95 | 0,274 | -11,25 |
| 14 | 25 | 25,12 | 0,220 | -13,14 |
| 15 | 31,5 | 31,62 | 0,176 | -15,09 |
| 16 | 40 | 39,81 | 0,140 | -17,10 |
| 17 | 50 | 50,12 | 0,109 | -19,23 |
| 18 | 63 | 63,10 | 0,0834 | -21,58 |
| 19 | 80 | 79,43 | 0,0604 | -24,38 |
| 20 | 100 | 100,0 | 0,0401 | -27,93 |
| 21 | 125 | 125,9 | 0,0241 | -32,37 |
| 22 | 160 | 158,5 | 0,0133 | -37,55 |
| 23 | 200 | 199,5 | 0,00694 | -43,18 |
| 24 | 250 | 251,2 | 0,00354 | -49,02 |
| 25 | 315 | 316,2 | 0,00179 | -54,95 |
| 26 | 400 | 398,1 | 0,000899 | -60,92 |

NOTE x est le numéro de la bande de fréquences conforme à la CEI 61280:1995.

Figura 2: Tabella della ponderazione in frequenza

3.2.2. Circolare 1986

La circolare di 23/07/86 è legata alle vibrazioni meccaniche emesse nell'ambiente da installazioni classificate per la protezione dell'ambiente.

In particolare, sono trattati all'interno gli standard di emissione delle vibrazioni meccaniche che devono essere rispettate e la metodologia per valutare gli effetti sull'ambiente delle suddette vibrazioni emesse da una o più fonti appartenenti a questi impianti.

Queste regole tecniche comprendono due parti:

- una prima parte che specifica le informazioni di base relative ai fenomeni di vibrazione, la loro origine e i loro effetti sull'ambiente e il metodo di analisi.
- una seconda parte che fissa le norme di emissione delle vibrazioni meccaniche da rispettare e la metodologia di valutazione degli effetti ambientali.

I parametri principali che caratterizzano un'oscillazione sono la frequenza, lo spostamento e la durata.

I dati sperimentali possono essere presentati nelle seguenti forme:

- Registrazione in funzione del tempo, del movimento, della velocità o dell'accelerazione;
- Spettro di Fourier, entro un determinato intervallo di tempo, di ampiezza, velocità, accelerazione o energia
- Risposte temporali di oscillatori a singola frequenza e ammortamento dato, da cui si può calcolare uno spettro di risposta.

La registrazione continua in funzione del tempo è essenziale.

Vi sono inoltre alcune precauzioni da rispettare durante l'installazione degli strumenti che sono riportate come segue: "Tutti i sensori devono essere completamente collegati al loro supporto. Si deve fare attenzione a non collocare i sensori sui rivestimenti (zinco, intonaco, piastrelle,...) che possono causare vibrazioni se questi rivestimenti non sono solidali con l'elemento principale della costruzione. È inoltre necessario evitare di installare i sensori sui balconi, sulle lastre d'ingresso o sulle scale. Nelle costruzioni, i sensori devono essere orientati secondo gli assi della costruzione." (Circolare , 1986)

Per l'implementazione del metodo di misurazione della classe "Control", sono definite 3 diverse categorie di edifici:

- costruzioni resistenti
- costruzioni sensibili
- costruzioni molto sensibili.

Lo strumento utilizzato per la misura deve consentire la registrazione, in funzione del tempo, della velocità delle particelle nella banda di frequenza da 4 Hz a 150 Hz per le ampiezze di velocità tra 0,1 mm/s e 50 mm/s.

La circolare fornisce dei valori limite della velocità di vibrazione in funzione della frequenza registrata, inoltre separa due differenti categorie di vibrazione che devono essere verificate con soglie diversificate.

Per quanto concerne le vibrazioni continue il grafico di riferimento è riportato in Figura 3 con i tre differenti casi a seconda della categoria di appartenenza dell'edificio monitorato.

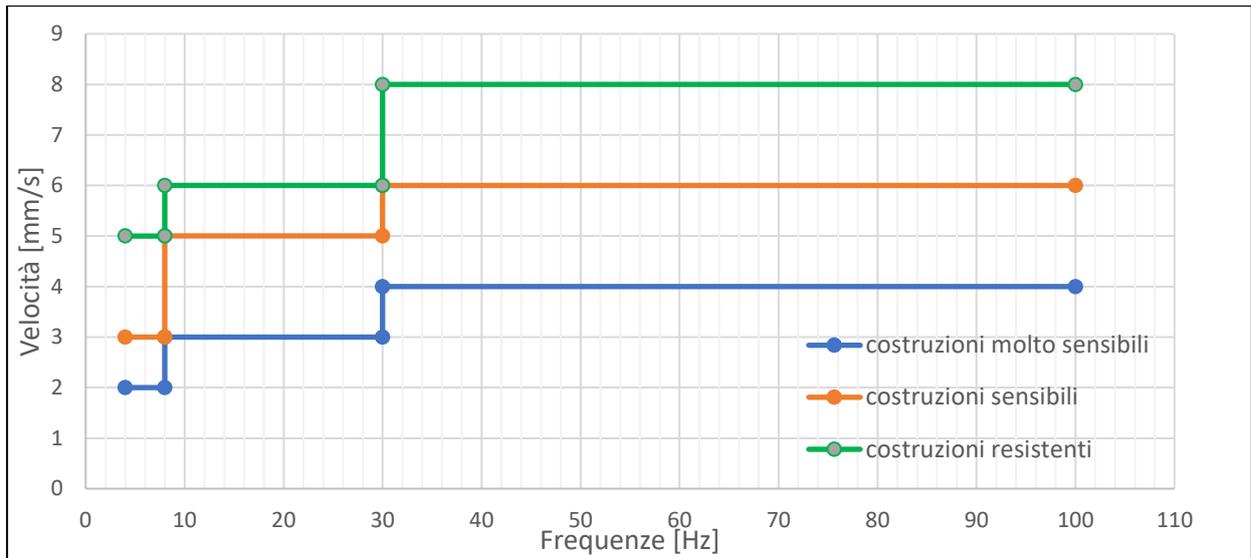


Figura 3: Limiti delle vibrazioni indotte di continuo in funzione della frequenza

Le vibrazioni impulsive e ripetute devono rispettare dei limiti meno restrittivi riportati in Figura 4.

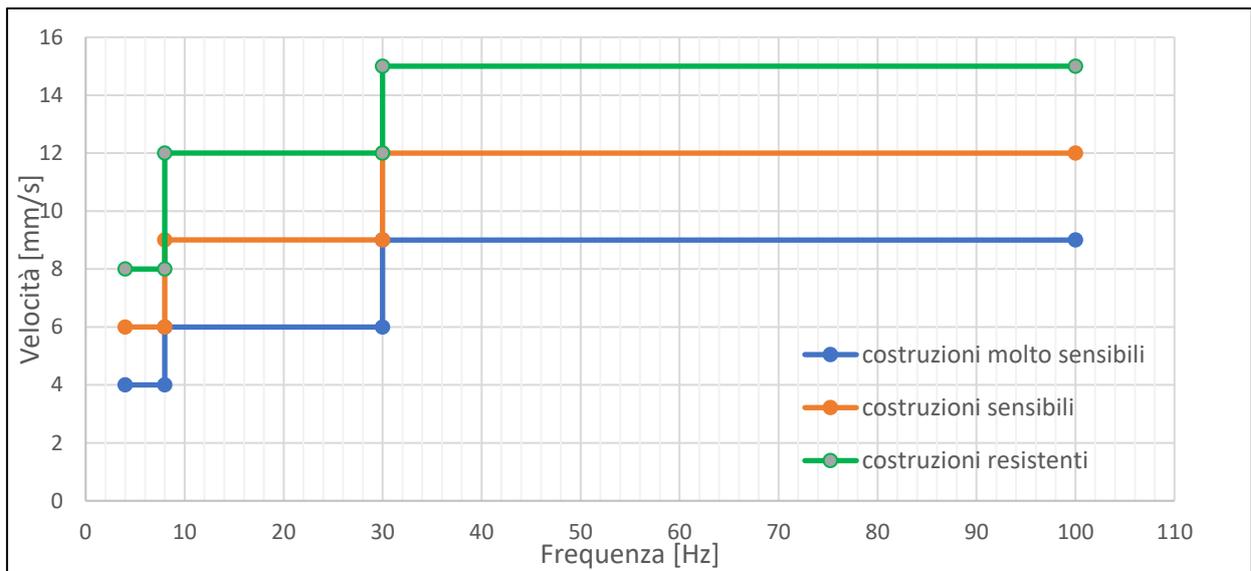


Figura 4: Limiti delle vibrazioni indotte impulsivamente in funzione della frequenza

4. CENNI SUL RUMORE

Il rumore derivante da lavori in ambito urbano rappresenta l'altra grandezza fisica che si vuole analizzare in questo elaborato. Affinchè lo studio risulti efficace, è necessario individuare lo strumento migliore per rilevare questa tipologia di disturbo e riscontrare i parametri che sono richiesti dalla norma tecnica.

Lo strumento deve essere elettronico e in grado di rilevare la variazione di pressione dovuta alla presenza di un campo sonoro, tramite un microfono; deve indicare successivamente su di un display ed eventualmente su un computer il livello di campo misurato.

I fonometri moderni, come quello raffigurato in Figura 5, sono anche in grado di effettuare l'analisi in frequenza del segnale captato.



Figura 5: Fonometro per la misura del rumore

Il microfono è il trasduttore pressione-tensione che permette di rilevare le variazioni del campo sonoro e converte il segnale di pressione acustica in un segnale elettrico che lo riproduce fedelmente, come illustrato in Figura 6.



Figura 6: Conversione del segnale eseguita tramite il microfono

Esso è contenuto in una struttura tubolare sensibile unicamente alla pressione, e non alla velocità del campo. Pertanto, è totalmente privo dell'effetto prossimità (per il quale si avrebbe una sovramplicazione delle basse frequenze).

La caratteristica fondamentale di questi microfoni è la sensibilità microfonica che è espressa in mV/Pa.

Le operazioni eseguibili dal fonometro devono essere riassumibili nella trasformazione del segnale di pressione acustica captato dalla piastrina elastica in un segnale elettrico; questa

operazione è effettuata dal condensatore mediante la variazione della sua “capacità”, secondo la legge $Q = CV$.

I microfoni per misure fonometriche sono di due tipi:

- per misure in campo libero
- per misure in campo diffuso

I microfoni per misure in campo libero hanno una risposta piana quando investiti da un’onda piana progressiva di testa. Possono essere usati all’aperto, puntandoli verso la sorgente sonora oppure in tutti gli ambienti, a patto che siano orientati verso la sorgente sonora predominante.

Nel caso in cui essi vengano utilizzati scorrettamente vi è la possibilità che sottostimino le componenti ad alta frequenza.

Per poter effettuare misure in ambienti con più sorgenti acustiche con presenza di rimbombi, e quindi molto ricchi di campi sonori, sono stati inventati i microfoni a campo diffuso.

In Figura 7 viene riportata la curva di risposta tipica di un microfono “omnidirezionale” detta anche “cardioide”.

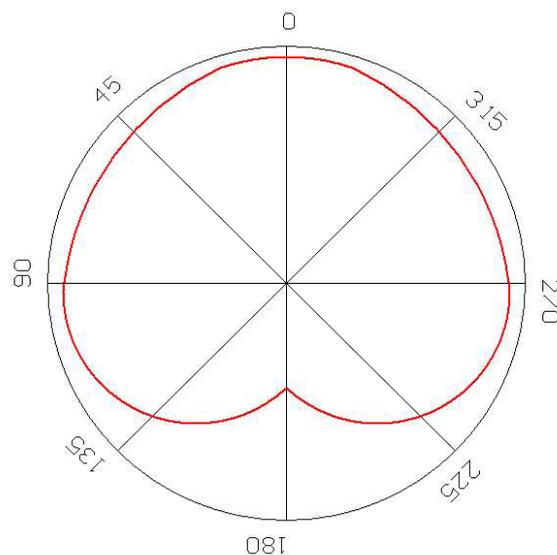


Figura 7: Curva di risposta di un microfono

Il fonometro è uno strumento che misura i valori istantanei con costante di tempo FAST (125ms), SLOW (1s), e IMPULSE. Non esegue quindi la misura del livello medio lineare.

In Italia la legge obbliga alla misura di un Livello Equivalente (Leq) definito come

$$Leq = 10 \cdot \log \frac{\left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P_i^2 \cdot d\tau \right]}{P_0^2}$$

Dove:

- P_0 è la pressione di riferimento e vale $2 \cdot 10^{-5}$ Pa,
- P_i è la pressione istantanea del campo sonoro.

Il valore a numeratore rappresenta il valore medio efficace della pressione esercitata dal campo sonoro nell'intervallo di tempo "T"; in realtà lo strumento rileva il valore campionato con una costante.

Nella pratica viene utilizzata la formula:

$$Leq = 10 \cdot \log \frac{\sum_{i=1}^N N_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}}{N}$$

Dove:

- L_i è il livello campionato (dB)
- N_i è il numero di campioni rilevati per il livello L_i

Il "livello equivalente" è una valutazione dell'energia acustica implicata nello svolgimento del fenomeno misurato, in altre parole esso corrisponde ad un livello costante che esprime tutta l'energia acustica emessa durante il tempo di misura, quest'ultimo deve essere scelto con molta attenzione.

Nell'esempio in Figura 8 vengono visualizzati i grafici del livello sonoro nel tempo e del livello sonoro equivalente.

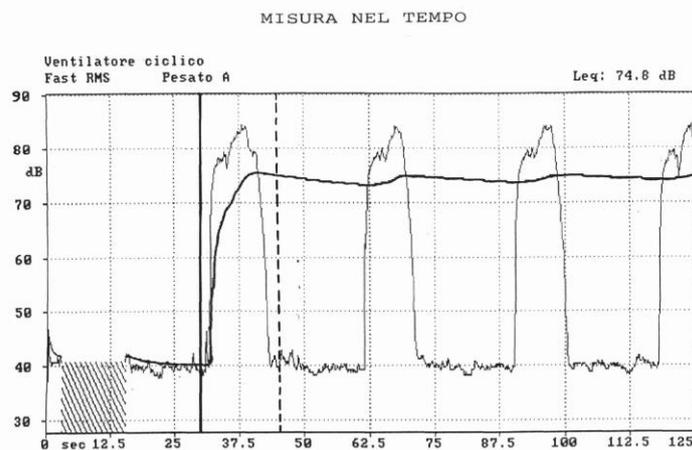


Figura 8: Grafici del livello sonoro e del livello sonoro equivalente

Per poter utilizzare lo strumento deve essere stato sottoposto ad una taratura per controllare che le misure effettuate in cantiere siano affidabili. Per tarare i fonometri e verificare il loro funzionamento è stato necessario effettuare una misura base che consta di tre fasi: calibrazione, regolazione e misura.

- La calibrazione è un procedimento che permette di tarare il fonometro in modo che rilevi dei valori corretti. Questo è possibile grazie al calibratore, il quale ha un valore preciso ed è stato applicato in testa al microfono, esso deve far visualizzare sul display il valore prescritto sulla sua targhetta.
- La regolazione è la fase in cui si setta lo strumento per compiere una misura determinata in un particolare ambiente. Vengono selezionati ad esempio il fondo scala, la ponderazione, e l'analisi in frequenza, in questa fase è preferibile che il microfono sia posizionato distante dal fonometro per non perturbare la misura.

- La misura è la fase in cui vengono rilevati i valori di livello di campo sonoro nell'ambiente in questione, queste tre componenti sono state verificate conoscendo il reale valore che deve essere riscontrato.

Solo una volta effettuato questo procedimento le misure riscontrate possono essere confrontate con i livelli sonori massimi imposti dalle diverse normative.

5. LEGISLAZIONE INERENTE AL RUMORE

5.1. LEGGE ITALIANA

Il problema dell'inquinamento acustico in Italia è affrontato dalle Legge Quadro del 1995 all'interno della quale si forniscono dei concetti basilari per la comprensione dell'argomento e si assegnano ai diversi enti statali le diverse competenze in merito.

5.1.1. Legge Quadro del 1995

Nello specifico, per quanto concerne i rumori derivanti da attività di cantiere le casistiche di applicazione, i limiti e le sanzioni derivanti dal non rispetto di questi ultimi sono tutte competenze assegnate ai comuni. (Ministero dell'ambiente, 1995)

Questo porta all'esistenza di diverse normative in merito che possono essere scelte direttamente dal consiglio comunale in base alle esigenze specifiche di ciascuna città.

In questo specifico caso è stata presa in esame la legge vigente nella città di Torino.

5.1.2. Regolamento comunale per la tutela dall'inquinamento acustico di Torino

Il suddetto regolamento è stato deliberato dal consiglio comunale in data 06-03-2016 e poi modificato nel 2018. All'interno del documento a partire dall'articolo 17 viene trattato il caso di cantieri edili e stradali, per i quali sono indicate le direttive per ottenere l'autorizzazione in deroga al superamento di limiti sonori urbani e vengono stabiliti i nuovi limiti da ottemperare se ottenuta l'autorizzazione con le rispettive sanzioni e provvedimenti restrittivi.

“Le soglie massime di immissione sonora autorizzabili in deroga per le attività di cantiere di cui all'articolo 17 del presente regolamento, da verificarsi in facciata al ricettore più esposto secondo le modalità descritte nell'Allegato C del D.M. 16 marzo 1998, sono indicati in funzione della fascia oraria nel seguente schema:

GIORNI FERIALI:

- $Leq = 75 \text{ dB(A)}$ su qualsiasi intervallo di 1ora nelle fasce orarie 8:00-12:00 e 14:00-20:00;
- $Leq = 70 \text{ dB(A)}$ su qualsiasi intervallo di 1ora nella fascia oraria 12:00-14:00;
- $Leq = 70 \text{ dB(A)}$ mediato sull'intera fascia oraria 8:00 - 20:00;
- $Leq = 65 \text{ dB(A)}$ su qualsiasi intervallo di 15 minuti nella fascia oraria 20:00-8:00;
- $Leq = 60 \text{ dB(A)}$ mediato sull'intera fascia oraria 20:00 - 8:00;

GIORNI PREFESTIVI:

- $Leq = 75 \text{ dB(A)}$ su qualsiasi intervallo di 1ora nella fascia oraria 8:00-12:00;
- $Leq = 70 \text{ dB(A)}$ su qualsiasi intervallo di 1ora nella fascia oraria 12:00-14:00;

Nei confronti di strutture scolastiche (limitatamente all'orario di svolgimento dell'attività didattica) e ospedaliere, o altri ricettori sensibili (es. case di riposo), i limiti di cui sopra sono ridotti di 5 dB(A). Nel caso la propagazione del rumore avvenga prevalentemente per via

interna saranno imposte inoltre specifiche limitazioni ai livelli interni di immissione.” (Comune di Torino, 2018)

“I cantieri edili, stradali o industriali attivati per il ripristino urgente dell'erogazione di servizi pubblici in rete (linee telefoniche ed elettriche, condotte fognarie, acqua potabile, gas, eccetera) e per il pronto intervento sul suolo pubblico, non sono tenuti all'osservanza di quanto stabilito nel presente Titolo, limitatamente al periodo necessario per l'intervento d'emergenza, e pertanto si intendono autorizzate in deroga.” (Comune di Torino, 2018)

5.2. LEGGE FRANCESE

L'argomento in esame viene trattato all'interno del quadro normativo francese con delle distinzioni riguardanti sia la tipologia di rumore che la l'azione scatenante tale rumore. In generale tutte le tipologie di rumore eccetto quelle dovute al traffico veicolare e le installazioni particolari (nucleari, per la difesa nazionale ecc) devono rispettare gli articoli dal R 1334-31 al R 1334-27 del decreto n°2006-1099 del 31 Agosto 2006 relativo al controllo del rumore.

5.2.1. Decreto n° 2006-1099

Nei casi sopra elencati questo decreto stabilisce che “l'interferenza con la tranquillità del quartiere o la salute dell'uomo è caratterizzata se l'emergere generale di questo rumore percepito da altri supera i valori limite fissati nello stesso articolo.”

Per definire i limiti viene fatta la distinzione tra emergenza globale ed emergenza spettrale “Tuttavia, l'emergenza globale e, se del caso, l'emergenza spettrale sono considerate solo quando il livello di rumore ambientale misurato, compreso il rumore particolare, è superiore a 25 decibel e se la misura viene effettuata all'interno delle stanze principali di un edificio, finestre aperte o chiuse, o 30 dB in altri casi.” (Decreto n°1099, 2006)

Si definisce l'emergenza globale come “La differenza tra il livello del rumore ambientale, compreso il rumore particolare, e il livello del rumore residuo costituito da tutti i rumori usuali, esterni ed interni, corrispondenti alla normale occupazione dei locali e al funzionamento delle apparecchiature in assenza del rumore particolare.” (Decreto n°1099, 2006)

Per farlo, si dovrà effettuare la misurazione dello stato iniziale, la stima in fase di preparazione del progetto del livello di rumorosità delle macchine e il monitoraggio continuo delle misure sonore.

I valori limite di emergenza sono di 5 decibel (a) durante il giorno (dalle 7.00 alle 22.00) e 3 dB (A) nei periodi notturni (dalle 22.00 alle 7.00), valori a cui viene aggiunto un termine correttivo in dB (A), a seconda della durata cumula del rumore particolare:

- 6 per una durata inferiore o uguale a 1 minuto, il tempo di misurazione del livello di rumorosità ambientale viene esteso a 10 secondi quando la durata cumulativa del rumore particolare è inferiore a 10 secondi;
- 5 per una durata superiore a 1 minuto e inferiore o uguale a 5 minuti;
- 4 per una durata superiore a 5 minuti e inferiore o uguale a 20 minuti;

- 3 per un periodo superiore a 20 minuti e inferiore o uguale a 2 ore;
- 2 per un periodo superiore a 2 ore e minore o uguale a 4 ore;
- 1 per più di 4 ore e minore o uguale a 8 ore;
- 0 per più di 8 ore sei per una durata inferiore o uguale a 1 minuto.

Per quanto concerne invece, l'emergenza spettrale, essa è definita "dalla differenza fra il livello di rumore ambientale in una banda standardizzata di ottava, compreso il rumore particolare in questione ed il livello di rumore residuo nella stessa fascia di ottava, consistente di tutti i rumori abituali, esterni ed interni, corrispondenti alla normale occupazione dei locali, in mancanza del particolare rumore in questione.

I valori limite di emergenza spettrale sono di 7 dB (A) nelle bande di ottava standardizzate centrate su 125 Hz e 250 Hz e 5 dB (A) nelle bande di ottava normalizzate centrate su 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz." (Decreto n°1099, 2006)

Le modalità con cui eseguire le misure di cui sopra sono state definite per ordine dei ministri responsabili della salute, dell'ecologia e dell'edilizia abitativa.

5.2.2. Rumore provocato da lavorazioni edili

Infine, vi è un caso trattato separatamente ed è quello del rumore derivante da cantieri che siano per lavori pubblici o privati, o lavori sui palazzi, in ogni caso sottoposti ad una procedura d'autorizzazione.

In queste casistiche il danno alla tranquillità del quartiere o alla salute dell'uomo è caratterizzato da una delle seguenti circostanze:

- la mancata osservanza delle condizioni stabilite dalle autorità competenti per quanto riguarda l'esecuzione dei lavori o l'uso o il funzionamento di attrezzature;
- Precauzioni inadeguate per limitare questo rumore;
- comportamento oltremodo rumoroso.

L'autorità amministrativa competente può prendere una o più delle misure previste nel codice dell'ambiente, quando ha constatato che le disposizioni degli articoli non sono soddisfatte.

Per ottenere le misure richieste è necessario ricavare i seguenti indicatori:

- LAeq(1s) (Lunghezza equivalente con intervallo di 1 secondo)
- LAeqGlissant (15min) (Media della lunghezza equivalente su 15 minuti di misurazione)
- Spettro di 1/3 d'ottava sulle bande comprese tra 20HZ-20000Hz

Gli allarmi saranno attivati se il livello misurato LAeq (1s) raggiunge o supera per più di 15 minuti di fila le soglie d'emergenza del rumore.

La composizione esatta del sistema di monitoraggio dipenderà dal fornitore del sistema.

La descrizione indicata nel libretto 6 del CCTP non è esaustiva; essa è una descrizione minima che deve essere adattata da ciascun fornitore alla richiesta.

Le informazioni di misurazione dovranno essere divulgate ai team di lavoro sotto forma di un sito Internet che presenta i dati in tempo reale e lo stato degli allarmi. (Decreto n°1099, 2006)

6. PROGETTO EOLE

Il progetto EOLE rientra tra i lavori pubblici appartenenti al Gran Paris Express ovvero la realizzazione di diverse linee della metropolitana, nuove o prolungamenti di linee esistenti, per permettere l'espansione e l'adeguamento del servizio di trasporto pubblico dell'Ile de France.

In particolare, sono previste la realizzazione delle linee 15, 16, 17 e 18 nella periferia della capitale francese, il prolungamento delle linee 14, 11 e del RER E (treno suburbano) (Figura 9). Questo progetto comprende più di 200 km di tracciato perlopiù sotterranei, 68 nuove stazioni e 7 centri tecnici e rappresenta l'ampliamento dei trasporti pubblici più impegnativo al mondo. Esso, una volta concluso, collegherà i principali poli di attività (aeroporti, centri commerciali, centri di ricerca e Università) e i territori metropolitani che ora sono difficilmente accessibili, quanto detto è illustrato dalle due mappe riportate di seguito. (Société du Grand Paris, 2018) Un altro obiettivo del Grand Paris Express sarà di ridurre l'inquinamento, la congestione e contribuire a creare una metropoli più rispettosa dell'ambiente.

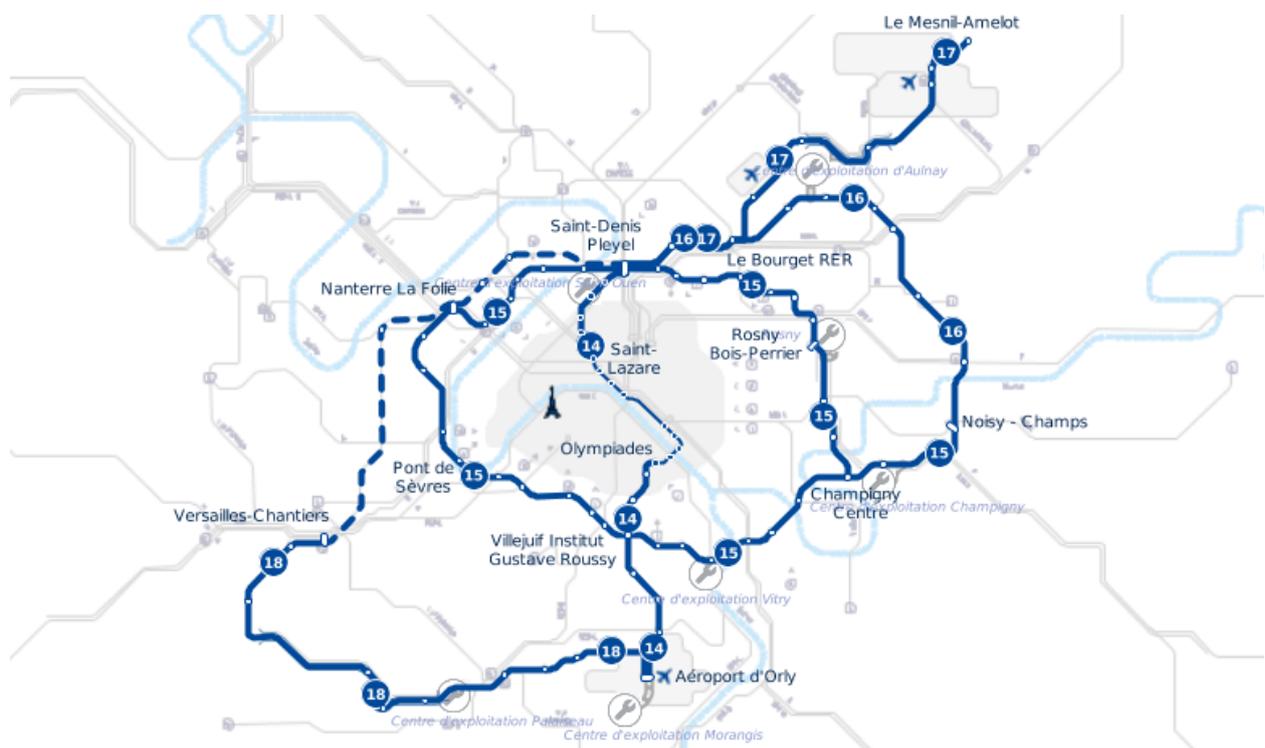


Figura 9 Progetto Gran Paris Express

Tra le diverse opere previste il primo lotto del prolungamento del RER E verso ovest è denominato progetto EOLE. (Figura 10)

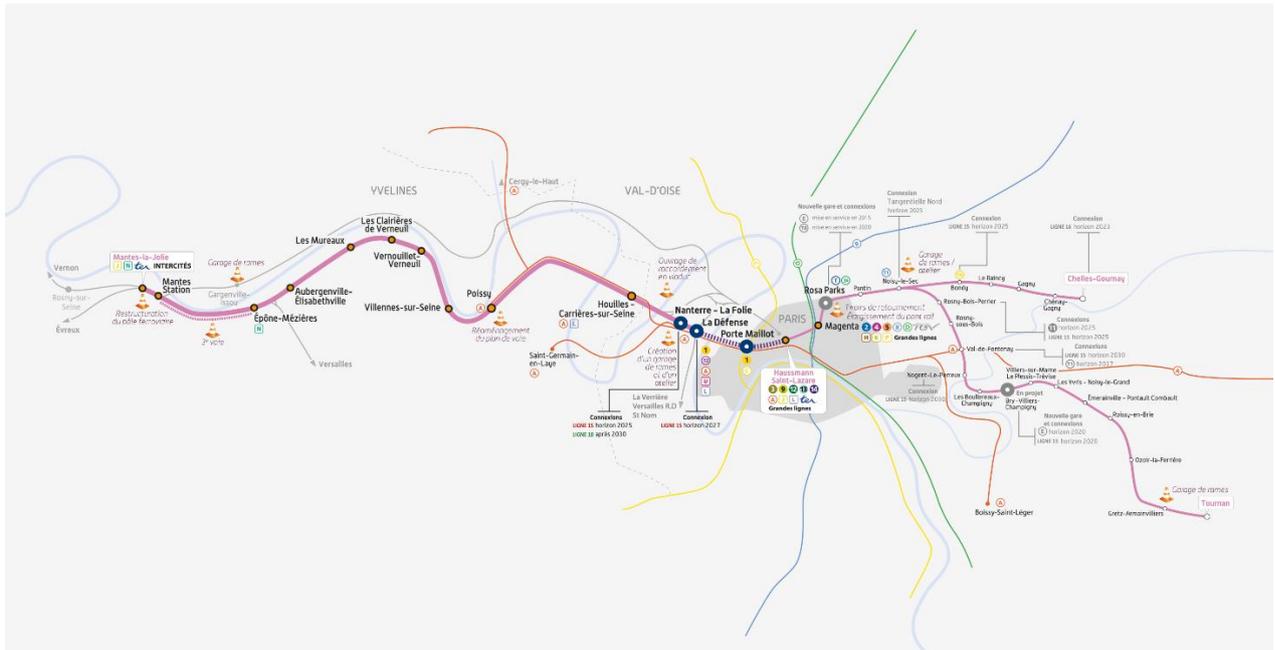


Figura 10: Progetto del prolungamento del RER E

Il progetto EOLE è stato dichiarato pubblicamente utile nel 1991.

Inizialmente prevedeva di collegare le linee della Gare de l'Est e della Stazione St-Lazare sotterranea e creare un servizio di RER che collegasse la periferia orientale (Chelles, Villiers-sur-Marne) e la periferia occidentale (Versailles, St-Nom-la-Bretèche).

Una prima sezione è stata commissionata nel 1999 tra Chelles/Villiers-sur-Marne e la nuova Stazione sotterranea della metropolitana Haussmann-St-Lazare.

Nel 2003, il servizio sul ramo di Villiers-sur-Marne è stato esteso fino a Tournan-en-Brie. L'estensione della RER E a ovest è inclusa nel progetto di Master Plan per l'Île de France approvata dal Consiglio regionale il 25 settembre 2008.

Questo progetto è condiviso tra le imprese RFF per l'infrastruttura e SNCF-Transilien per il materiale rotabile e Installazioni specifiche del trasportatore.

Il progetto attuale differisce significativamente da quanto previsto nel regime originale per la parte a ovest di EOLE, infatti ora il fine risulta essere quello di collegare la Val de Seine e il quartiere della Défense con l'est di Parigi.

Questo collegamento richiede l'estensione fino alla Défense del tunnel esistente (che attualmente si ferma a Haussmann-St-Lazare) per circa 8 km di superficie al livello del sito ferroviario della Folie, dove una nuova stazione sarà costruita e dove sorgerà il collegamento della nuova infrastruttura al gruppo V di Saint Lazare.

Su questa nuova sezione sotterranea sono previste due nuove stazioni metropolitane: una è situata a Porte Maillot e l'altra sotto il CNIT assicurando una corrispondenza con le linee già esistenti.

Le opere comprese nel progetto EOLE sono costituite dalle stazioni di Haussmann Saint Lazare (HSL) e Porte Maillot, il tunnel scavato con TBM e il collegamento a 9 pozzi distribuiti sui comuni di Parigi 8E (Friedland), Parigi 17a (Carnot), Neuilly-sur-Seine (Gouraud) e Courbevoie (Abreuvoir, Gambetta). (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

6.1. Tracciato EOLE

L'opera è realizzata all'interno dei comuni di Courbevoie, Neuilly sur Seine, il 17° e l'8° Arrondissement di Parigi. La lunghezza del tunnel scavato con fresa meccanica, tra il pozzo introduttivo (Gambetta), sito di installazione della talpa, e la stazione di Haussmann-Saint-Lazare è di circa 6100 m.

La profondità dell'opera varia da 20 a 45 metri eccetto nel tratto che passa sotto la Senna dove si passa a 16 metri di profondità.

Nella fase di lavoro, il tunnel assicura il flusso di materiali necessari per scavare e la conseguente evacuazione del materiale scavato dal fronte. Durante la fase di funzionamento, il tunnel circolare, avente un diametro interno funzionale di 9,70 m, permetterà il passaggio dei treni su due binari.

Lo scavo sarà diviso in diversi tronconi, individuati dai pozzi, di lunghezza inferiore al chilometro.

Dal fondo del pozzo di introduzione della talpa a Gambetta, lo scavo si diramerà sotto corso Gambetta a Courbevoie per poi virare verso via di Bezons, che passa vicino al pozzo di Abreuvoir, fino al passaggio sotto la Senna tra l'île de la Jatte a nord e l'île du Pont a sud.

Arrivato nel quartiere di Neuilly-sur-Seine, il tunnel prosegue sotto gli edifici, passando attraverso il pozzo di Gouraud e raggiungendo Charles de Gaulle Avenue, dove il tunnel si troverà vicino al pozzo di Hotel de Ville.

Il tunnel poi segue il viale, passa nelle vicinanze del pozzo Marché fino a quando raggiunge Porte Maillot.

La TBM sarà spostata all'interno della stazione e riprenderà il suo percorso di scavo, nel viale della Grande Armée, fino a passare vicino al pozzo Carnot, in seguito passerà per il pozzo Friedland inserendosi sotto l'edificio a nord di Boulevard Haussmann.

Quindi raggiungerà il pozzo Haussmann Messina e si dirigerà verso Gare Saint Lazare in costruzione per essere smontata.

Il tracciato è completamente riportato nelle Figure 11 e 12. (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

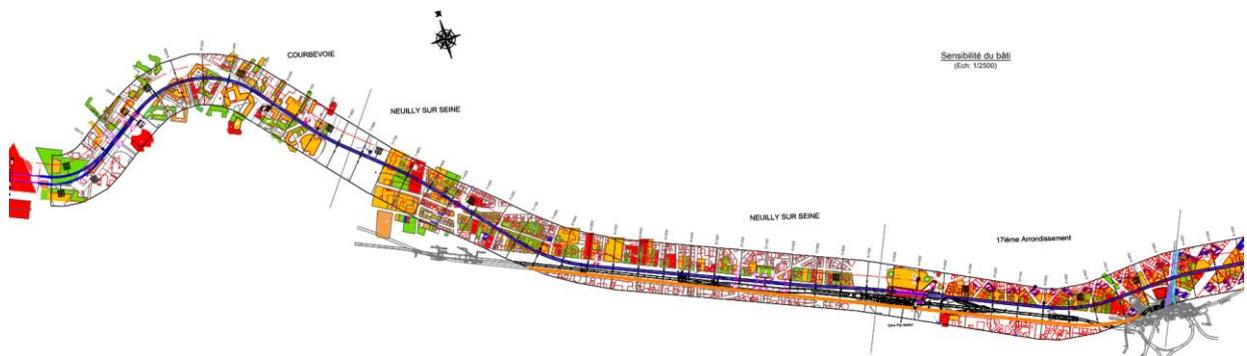


Figura 11: Tracciato da Gambetta a Porte Maillot

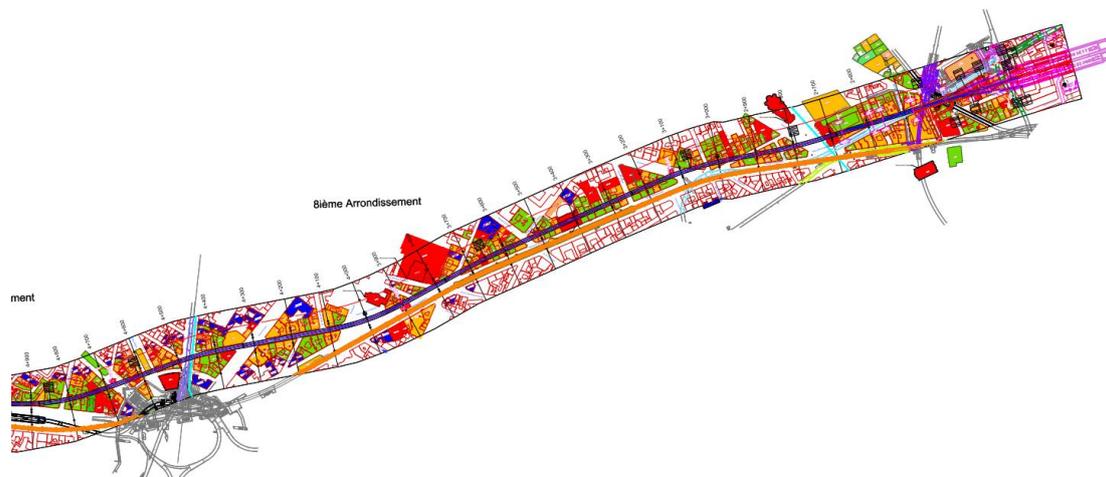


Figura 12: Tracciato da Porte Maillot a Saint-Lazare

Tutti i pozzi previsti hanno delle lavorazioni comuni da eseguire che, nella maggior parte dei casi, corrispondono alle seguenti:

- Supporto finale per gli scavi composto da diaframmi;
- Supporti provvisori degli scavi dei pozzi tramite blindature, pareti Berlinesi, pareti Lutétienne o pareti chiodate;
- Realizzazione di bullonature e chiodature, compresi eventuali depositi e test;
- Tutte le opere di terrazzamento a cielo aperto dei pozzi, dei montanti e le costruzioni connesse alla fasatura;
- Scavo sotterraneo e ritenzione dei rami di connessione;
- La costruzione della struttura (stipiti, lastre, scale di discesa e di emergenze, rivestimenti della galleria...);
- Lo scavo, il rivestimento ed il collegamento al traforo dei rami di collegamento ai pozzi;
- Tutte le prestazioni in opere di ingegneria civile (tramoggia, nicchia, guaine, tubi, ecc...).
- Le opere e gli inserti necessari per la fissazione dell'attrezzatura delle opere (prese, aste, rotaie, profili, guaine, ecc.);
- La costruzione di silos agglomerati in calcestruzzo;
- Le reti di recupero, raccolta e infiltrazione dell'acqua piovana incluse quelle all'interno o sotto strutture in cemento armato;
- La messa a terra delle opere;
- L'installazione delle gabbie di rinforzo;
- La realizzazione delle guarnizioni e delle loro protezioni;
- Tutti i lavori di arginatura compresi tiraggio, ancoraggio e fasatura delle barre;
- Il terrapieno a -0,50 m da TN, a destra della lastra di copertura e un livellamento alle condizioni iniziali con rivestimento impermeabilizzato.

La fresa verrà lanciata a partire dal pozzo Gambetta; per iniziare lo scavo e installare gli elementi della TBM, l'appaltatore avrà a disposizione il pozzo di Gambetta e 22 metri della galleria di unione con il pozzo di Gambetta del lotto 2, scavata con metodo manuale.

Per accorciare al minimo i tempi di inizio scavo la galleria di collegamento verrà utilizzata ancora con il supporto temporaneo costituito da chiodi e spritz beton.

Il tratto di tunnel nel quale si incontreranno i maggiori problemi sarà lo scavo nei pressi della stazione di Porte Maillot a causa della presenza di altre linee e dell'importanza della zona attraversata pertanto, si prevedono già degli accorgimenti da apportare alla metodologia di scavo.

L'ingresso e l'uscita della fresa dalla stazione di Porte Maillot si effettueranno all'interno di un profilo di terreno misto, composto da uno strato di sabbie di cottura sul fondo e uno strato di calcare grossolano in calotta.

Il calcare grossolano dovrà essere sottoposto a trattamento di iniezione su una lunghezza minima dello scudo più un anello, e su una corona di almeno 3 metri intorno alla linea di scavo (che incorpora la sezione da scavare). Il rinforzo del timpano è anche incorporato ed è previsto composto da 20 metri di bulloni in fibra di vetro utili alla stabilizzazione durante lo scavo.

6.1.1. Puits Gambetta

Nella fase di costruzione, il pozzo di Gambetta è utilizzato come sito di lancio della TBM per lo scavo del tunnel. Esso consente l'accesso al tunnel per la gestione dei flussi di terreno collegati allo scavo, dell'equipaggiamento e collega i diversi rami del tracciato ai pozzetti.

Nella fase di servizio, il pozzo fornisce la funzione di accesso di emergenza al tunnel EOLE.

Il pozzo Gambetta è rettangolare, le sue dimensioni nella parte inferiore dello scavo sono 15,40 m di larghezza e 25,40 m di lunghezza mentre la sua profondità varia da 36,20 a 36,85 m.

Esso è situato in un ambiente urbano denso con molti edifici circostanti che sono classificati in 3 differenti livelli secondo la loro sensibilità intrinseca: non sensibile, sensibile e molto sensibile.

La vicinanza delle costruzioni circostanti, la qualità media del terreno e la presenza di una falda freatica poco profonda hanno condotto ad adottare una soluzione basata sulla costruzione di diverse paratie in cemento armato molto profonde.

Lo scavo del pozzo è eseguito all'aria aperta fino al raggiungimento del fondo previsto che sarà protetto dalla previa installazione dei diaframmi periferici.

È prevista anche l'installazione di una discesa per il personale per tutta l'altezza del pozzo sia in fase di scavo che dopo messa in opera del fondo. Essa si compone di un ascensore per il personale associato e di una scala fissa e rigida.

6.1.1.1. Lavorazioni

Le lavorazioni previste sono visibili in pianta in Figura 13 (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015) e si prevede che la struttura definitiva del pozzo Gambetta è composta da:

- Diaframmi periferici;
- strati in calcestruzzo armato;
- una soletta di calcestruzzo armato al fondo del pozzo;
- di un calcestruzzo ricaricante sul ravanello;
- una lastra di copertura;
- un pavimento a livello di banchina;
- 6 piani intermedi;
- un fodero dell'elevatore;
- una scala di 1,50 m di larghezza su 11 piani e una seconda di 1,50 m di larghezza su 9 piani;
- tramogge di superficie diverse;
- due uscite di emergenza
- predisposizioni necessarie per la costruzione del futuro tunnel della linea 15 del MCP (Gran Paris Express);
- misure provvisorie necessarie per la creazione di un ramo di collegamento con il futuro tunnel della linea 15 MCP.

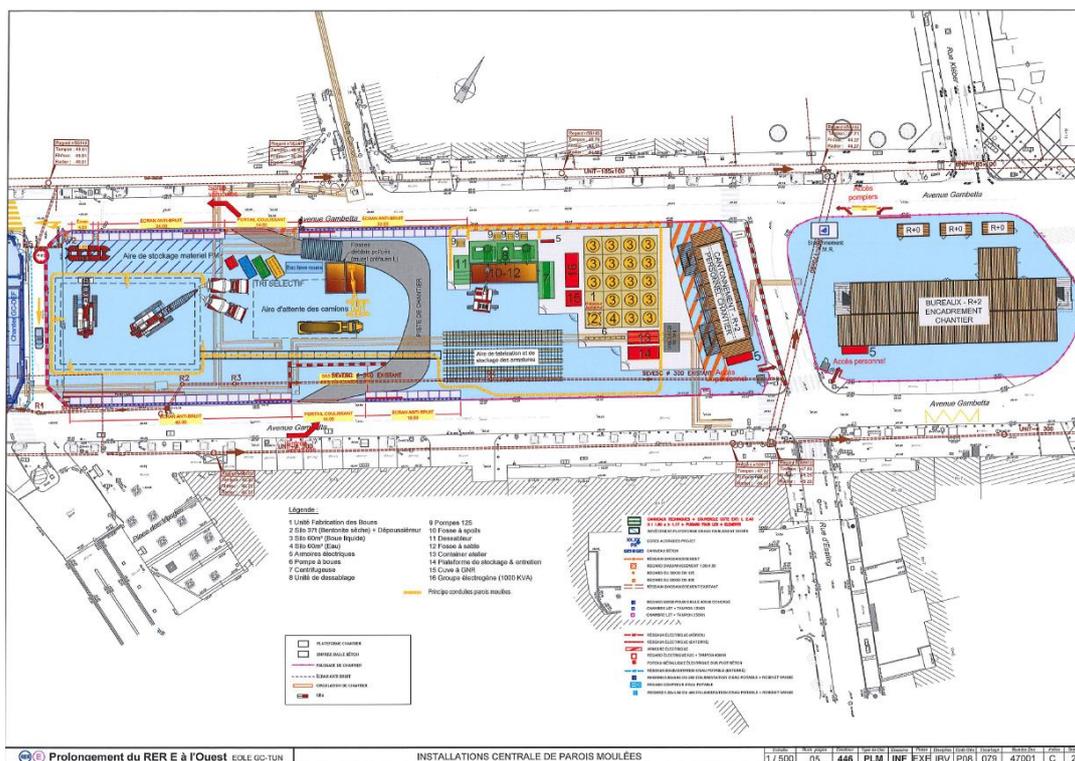


Figura 13: Planimetria de pozzo di Gambetta

Durante il periodo di stage lo scavo del pozzo di Gambetta era completato, inoltre, era già stata scavata la parte di galleria nella quale sarà posata e montata inizialmente la TBM. Le lavorazioni presenti in questo sito erano per lo più secondarie (Figura 12) eccetto il montaggio della fresa, effettuato ancora in superficie, per il quale si è reso necessario l'utilizzo di diverse gru con bracci meccanici di differenti lunghezze.

Questo pozzo è il primo nel quale sono iniziati i lavori poiché lo scavo partirà proprio da questo sito ed è previsto per il mese di febbraio 2019.

Inoltre, è dal pozzo Gambetta che si dirama il condotto che porterà il terreno scavato fino alla Base Seine, pertanto buona parte delle lavorazioni riguarda l'installazione di queste tubazioni per poter essere utilizzate immediatamente all'inizio dello scavo.

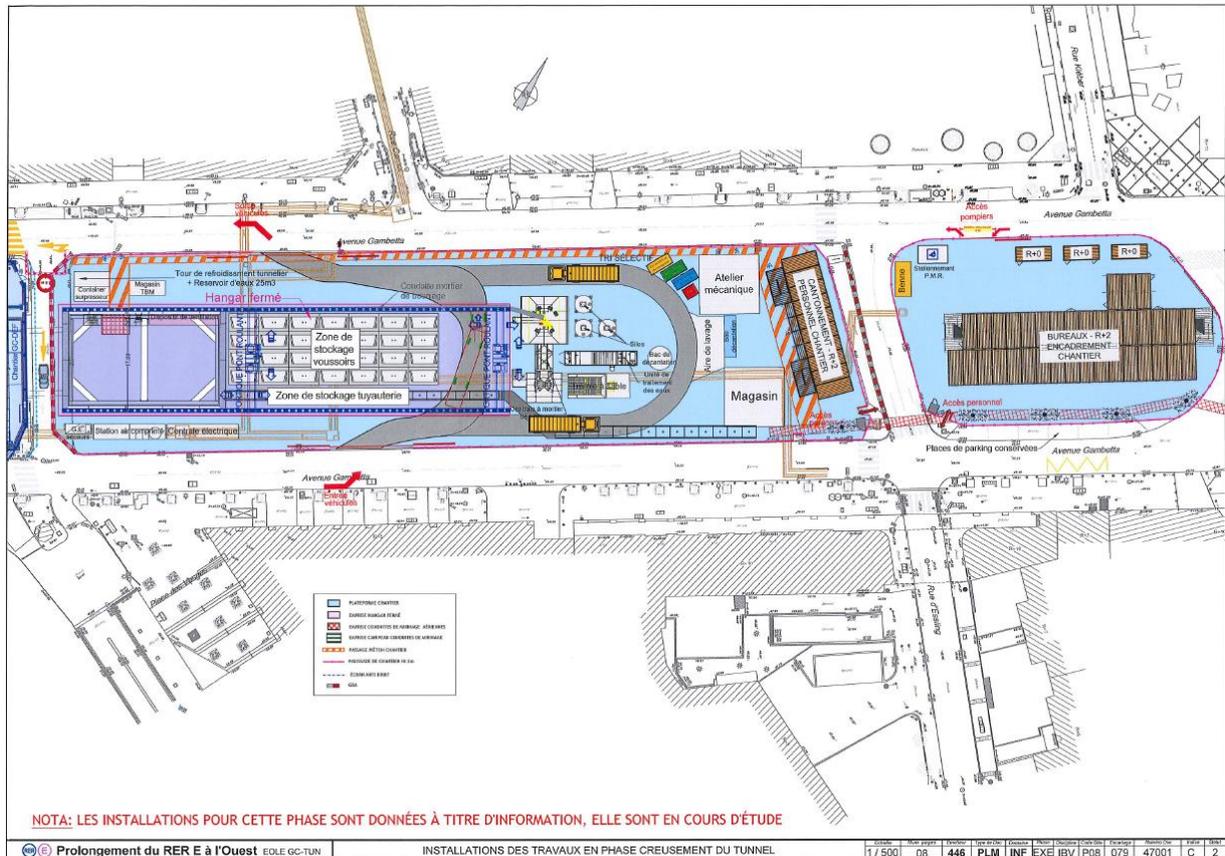


Figura 14: Lavorazioni in corso nel pozzo di Gambetta

6.1.2. Puits Abrevoir

Il pozzo di Abrevoir è situato nel comune di Courbevoie, nella Hauts de Seine, ed è stato previsto coprire un'area di parcheggio.

Quando viene utilizzato in fase di costruzione, il pozzo consente l'accesso al tunnel per la gestione dei flussi di terreno relativi allo scavo tra la talpa e la base costruita sulla Senna mentre durante la fase di servizio, il pozzo fornisce la funzione di accesso di emergenza al tunnel.

Il pozzo di Abrevoir è circolare e profondo 30,4 metri con raggio nella parte inferiore dello scavo di 4,00 m come tutti gli altri pozzi di accesso di emergenza e di 8,00 m in caso di trasporto di macchinari nella fase di lavoro.

La vicinanza delle costruzioni circostanti, la qualità media del terreno e la presenza di una faglia freatica poco profonda hanno condotto ad adottare una soluzione basata sulla costruzione di alcune paratie in cemento armato molto profonde.

Lo scavo del pozzo è eseguito all'aria aperta fino al raggiungimento del fondo previsto che sarà protetto dalla previa installazione dei diaframmi periferici.

È prevista anche l'installazione di una discesa per il personale per tutta l'altezza del pozzo sia in fase di scavo che dopo messa in opera del fondo.

Essa si compone di un ascensore per il personale associato e di una scala fissa e rigida.

6.1.2.1. Lavorazioni

Le lavorazioni previste sono visibili in pianta in Figura 15 (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015) e si prevede che la struttura definitiva del pozzo sia composta da:

- diaframmi periferici;
- uno strato di cemento armato;
- una soletta calcestruzzo armato al fondo del pozzo;
- una lastra di copertura;
- 5 piani intermedi;
- Partizioni di locali tecnici in muratura (agglomerati di calcestruzzo o calcestruzzo);
- Un ascensore;
- Di una scala larga 1,40 m di larghezza utile;
- Un'uscita di emergenza.



Figura 15: Planimetria del Pozzo di Abreuvoir

Questo pozzo è situato tra dei palazzi pertanto il dissipamento del rumore e delle vibrazioni dovute al cantiere è un argomento da monitorare con maggiore attenzione infatti, per

prevenire questo problema, sono state installate delle pareti anti-rumore lungo tutto il perimetro di confine del cantiere.

Durante il periodo autunnale il pozzo non era ancora stato scavato e le maggiori lavorazioni in corso riguardavano il miglioramento delle caratteristiche del terreno sottostante tramite la tecnica del Jet Grouting e la preparazione di fosse per i detriti.

Nella zona dedicata al Jet Grouting si è preparata antecedentemente una buca per l'accumulo dell'acqua e del liquido bentonitico derivante dall'utilizzo del macchinario e conseguentemente si è livellato il suolo nei dintorni in modo da consentire uno smaltimento naturale dei liquidi in eccesso.

Nella parte opposta del cantiere diverse pale meccaniche raggruppavano e caricavano il terreno scavato su dei dumper che transitavano per la via di fuga attrezzata lungo la diagonale del sito di lavoro.

6.1.3. Puits Gouraud

Il pozzo Gouraud si trova nel comune di Neuilly sur Seine, nella Hauts de Seine ed è situato nella Piazza Generale Gouraud. Nella fase di servizio, questo pozzo fornisce anche le funzioni di accesso di emergenza, ventilazione e uscita dei fumi dal traforo.

Il pozzo Gouraud è ellittico con profondità di 40,75 m. Le sue dimensioni nella parte inferiore del pozzo sono 16,50 m per il diametro minore (parallelo all'asse delle piste) e 19,40 m per il diametro maggiore.

6.1.3.1. Lavorazioni

Le lavorazioni previste sono visibili in pianta in Figura 16 (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015) e si prevede che la struttura definitiva del pozzo Gouraud sia composta da:

- diaframmi periferici;
- uno strato di cemento armato;
- una soletta calcestruzzo armato al fondo del pozzo;
- una lastra di copertura;
- 5 piani intermedi;
- un pavimento a livello di banchina;
- Partizioni di locali tecnici in muratura (agglomerati di calcestruzzo o cemento armato);
- uno spazio per elevatore;
- una scala larga 1,40 m di larghezza utile su 14 piani
- un impianto di ventilazione.

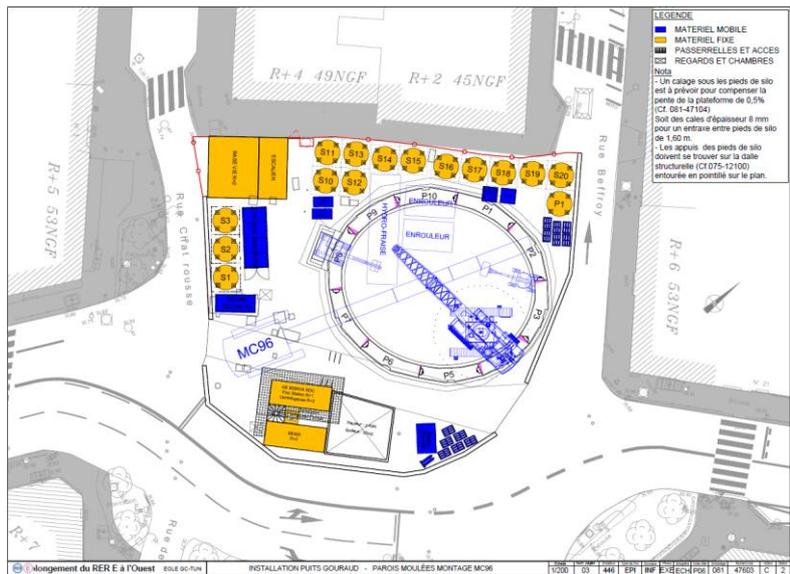


Figura 16: Planimetria del pozzo di Gouraud

Anche questo pozzo è situato in una zona densamente popolata e molto trafficata pertanto si sono dovute affrontare tutte le difficoltà derivanti attraverso una dettagliata programmazione dei lavori. All'interno del confine delimitato dalle pareti antirumore, parte del pozzo era già stata scavata quindi erano già installati i diaframmi di confinamento del pozzo e le diverse strutture previste per la stabilità dello scavo.

6.2. La Base Seine

La Base Seine si trova nel comune di Courbevoie ed è stata progettata per accumulo e smaltimento del terreno scavato. Nella soluzione descritta sui piani allegati al CCTP, la costruzione si riserva di rispettare, entro un raggio di 10 km massimo, un minimo di evacuazione del 70% delle terre estratte dallo scavo e condurle fino alla Senna.

Questo lavoro consiste di due parti in linea di principio:

- La piattaforma della Base Seine situata lungo il Quai Paul Doumer, sulla riva sinistra della Senna
- Il condotto di evacuazione che si trova sopra la strada e si dirama lungo il tracciato del tunnel.

Tutte le lavorazioni previste per la costruzione e la messa in opera della Base Seine sono riassunte di seguito:

- Le operazioni di dragaggio della Senna;
- Il supporto della banca da una tenda di palo del foglio;
- Il funzionamento di disboscamento degli alberi durante il periodo di lavoro e la loro sostituzione alla conclusione del lavoro;
- Le opere di fondazione della piattaforma effettuata tramite micropali, pali;
- La struttura della piattaforma

- La piattaforma di protezione contro gli shock stradali e fluviali (GBA, DBA, barriera anti-spillo, Embectage,...) ;
- Tutti i vincoli legati alla fase di costruzione e smantellamento della piattaforma;
- L'equipaggiamento della piattaforma per la fornitura di segmenti, l'evacuazione di rifiuti, il trattamento delle acque prima degli scarichi nelle opere igienico-sanitarie;
- La protezione dal fuoco della piattaforma;
- La protezione dei lavori limitrofi la piattaforma contro incendi;
- Smantellamento e l'evacuazione della piattaforma alla fine del lavoro, comprese le fondazioni;
- Lo smantellamento e l'evacuazione del sostegno della banchina e l'installazione di rocce in conformità con lo stato esistente;
- La riabilitazione dell'area.

Questa opera deve quindi consentire:

- L'attracco delle chiatte;
- Carico e scarico dei tagli al minimo;
- trasporto dei materiali (taglio, ecc...);
- L'immagazzinamento di questi materiali con una scorta minima di 5000 m³ di detriti.

È prevista lo smantellamento dell'intera opera al termine dei lavori di scavo del tunnel.

Le dimensioni della piattaforma situata lungo la Senna sono approssimativamente 135 m di lunghezza e 22 m di larghezza.

L'altezza libera delle strutture situate sopra la zona circolare è 6,00 m.

I pali che sostengono la struttura a terra si basano su pali e micropali tramite l'utilizzo di solette di distribuzione.

La piattaforma della struttura è costituita da lastre di calcestruzzo prefabbricate supportate da una struttura metallica composta da travi trasversali e travi longitudinali.

Tutti questi dettagli geometrici possono essere riscontrati anche in Figura 17 dove è riportata la planimetria frontale della struttura costruita sul fiume. (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

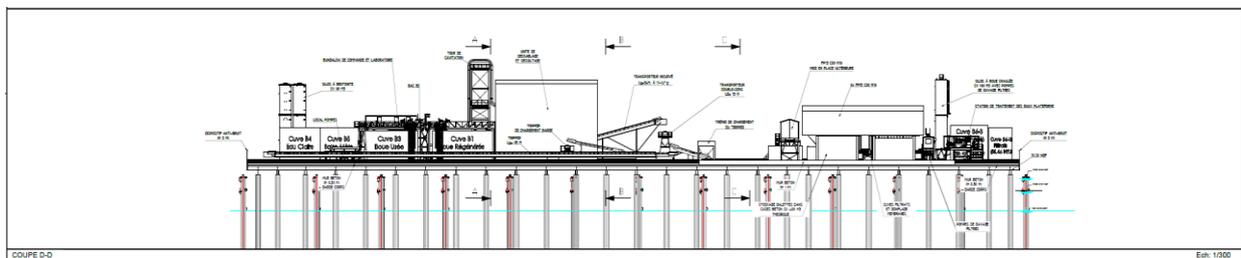


Figura 17: Vista frontale della Base Seine

Questa piattaforma comprende varie attrezzature quali:

- Dispositivi di sollevamento che consentono il carico e lo scarico dei materiali chiatte
- Dispositivi laterali antiribaltamento;
- Un dispositivo di illuminazione sotto la piattaforma;

- Protezione antincendio
- Delle paratie di contenimento del materiale;
- Un sistema di drenaggio e trattamento delle acque meteoriche;
- Nastri trasportatori;
- Un dispositivo che consenta lo stivaggio delle chiatte e la protezione della piattaforma per eventuali urti accidentali delle navi;
- Un dispositivo di protezione della piattaforma per liberarsi dal rischio di shock.

Come già specificato in precedenza la Base Seine è dragata per permettere che le chiatte accedano alla struttura situata in un'area non navigabile.

Di seguito è riportata la planimetria in pianta della struttura con tutte le lavorazioni in corso d'opera che ospita questo sito di stoccaggio del terreno.

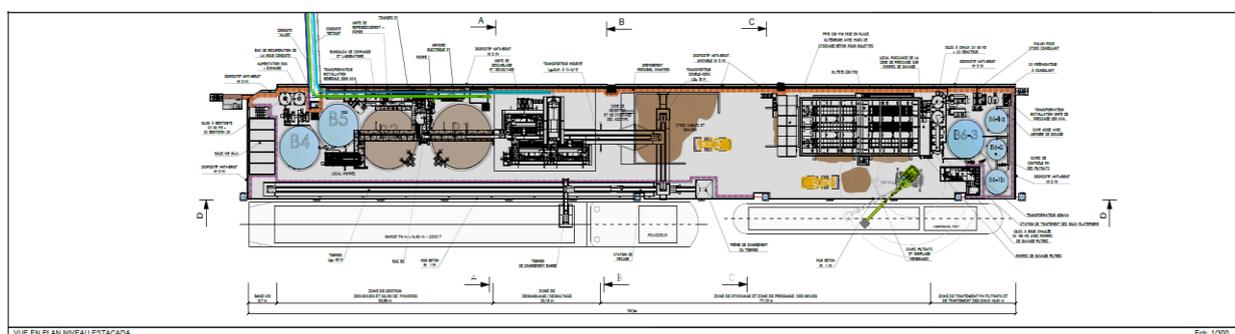


Figura 18: Vista in pianta della Base Seine

L'altra opera prevista per lo smaltimento del terreno scavato è un condotto sopraelevato collegato al pozzo di Gambetta, il quale si dirama per le strade di Courbevoie fino alla Base Seine dove verrà trattato il terreno e imbarcato per essere smaltito.

Questo condotto avrà un ottimo impatto a livello urbanistico poichè permetterà di non aumentare il traffico di dumper carichi di terreno che circolano per le strade, consentendo uno smaltimento dei residui di scavo più comodo e meno inquinante.

Allo stesso tempo la costruzione dell'opera sopraelevata richiederà più lavoro e più tempo rispetto all'alternativa classica.

Si avrà accesso ai due tubi del condotto anche dal pozzo di Abreuvoir che si trova più in prossimità della Senna di modo che il tragitto che dovrà percorrere il terreno sia più breve una volta che lo scavo arriverà nei pressi di quest'ultimo pozzo.

6.3. Gare Porte Maillot

La stazione ferroviaria di Porte Maillot si trova nel 17° arrondissement quindi in pieno centro della capitale francese. È costruita lungo l'asse est-ovest della Place de Porte Maillot, pertanto è inserita in un tessuto urbano e un sottosuolo denso che consta di diverse strutture di riferimento e di stazioni preesistenti della metropolitana (line 1 e RER C).

Riassumendo le opere presenti nei dintorni della stazione sotterranea sono:

1. A nord, il parcheggio sotto il Palais des Congrès (1970) e le sue rampe d'accesso che sorgono nella parte centrale della piazza a est e ad ovest;
2. A sud, vi è prima la stazione della metropolitana e il tunnel della linea 1 (1930) poi i binari del RER A (1970);
3. A ovest, si trova prima il tunnel stradale del Grand Maillot (1930), poi la tangenziale di Parigi (Boulevard périphérique) (1970);
4. Ad est, prima un impianto fognario principale, poi la stazione del RER C (tardo XIX secolo), il tracciato della linea 1 (fine Ottocento) e le fondazioni di edifici residenziali o commerciali;
5. Inoltre, sono presenti numerose condotti fognari, varie reti idriche ed elettriche

Questo complesso collegamento delle linee sotterranee è riportato in Figura 19 dove si può constatare meglio la vicinanza delle diverse opere e delle stazioni con la conseguente difficoltà di realizzare la nuova fermata del RER E senza modificare il tracciato delle altre linee o delle altre infrastrutture presenti nel piazzale di Porte Maillot. (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

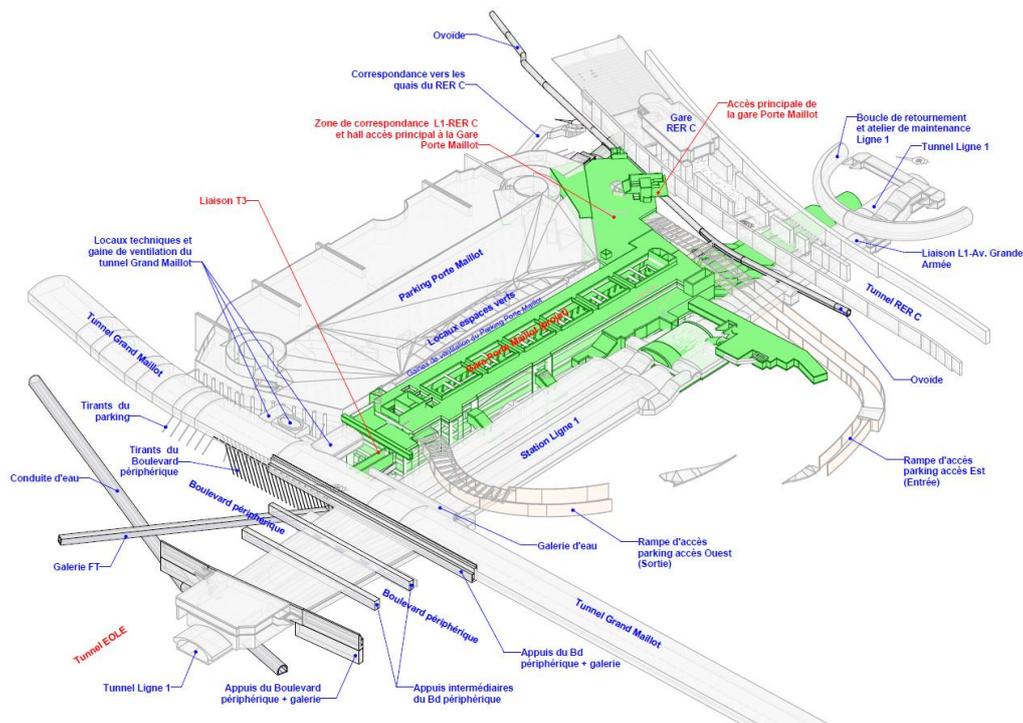


Figura 19: Planimetria Porte Maillot

Il progetto di GPM (Gare Porte Maillot) è costituito da diverse opere ingegneristiche presentate qui di seguito e il cui lavoro è fortemente influenzato tra esse o da opere esistenti:

- La parte a cielo aperto della stazione, a ovest, con una lunghezza di circa 155 m, che comprende tutti i lavori all'interno delle pareti di confine, le cui estremità hanno una fondazione sotto l'autostrada;
- Le palancole (contre-rideau) che verranno inserite nella parte sud e attraverseranno il tunnel del RER A;

- La parte sotterranea della stazione, a est, di una lunghezza di circa 72 m, la quale passa in particolare sotto le strade, la rampa del parcheggio, una fognatura di forma ovoidale, il tunnel del RER C, il tunnel della linea 1 e le abitazioni;
- La Hall Pereire, a nord, che sarà il lavoro futuro di corrispondenza tra la GPM e il RER C e i negozi del Palais des Congrès;
- Il collegamento con la linea 1 della metropolitana, a sud, che permetterà una connessione tra il secondo piano interrato della stazione e le banchine della stazione Porte Maillot;
- L'uscita di emergenza della stazione della metropolitana linea 1;
- Gli adattamenti del parcheggio interrato del Palais de Congrès.

Il cantiere di Porte Maillot si espande su un'area molto vasta e pertanto si è resa necessaria la separazione del sito in diverse zone destinate alla costruzione delle differenti opere facenti parte della stazione.

Nella figura seguente sono evidenziate con differenti colori le principali suddivisioni che sono state fatte, esse non sono esclusivamente legate ad una più rapida comprensione del cantiere bensì risultano essere separazioni concrete sia per quanto concerne le lavorazioni sia per il personale che vi lavora. Quindi risultano avere un avanzamento lavori indipendente l'una dall'altra.

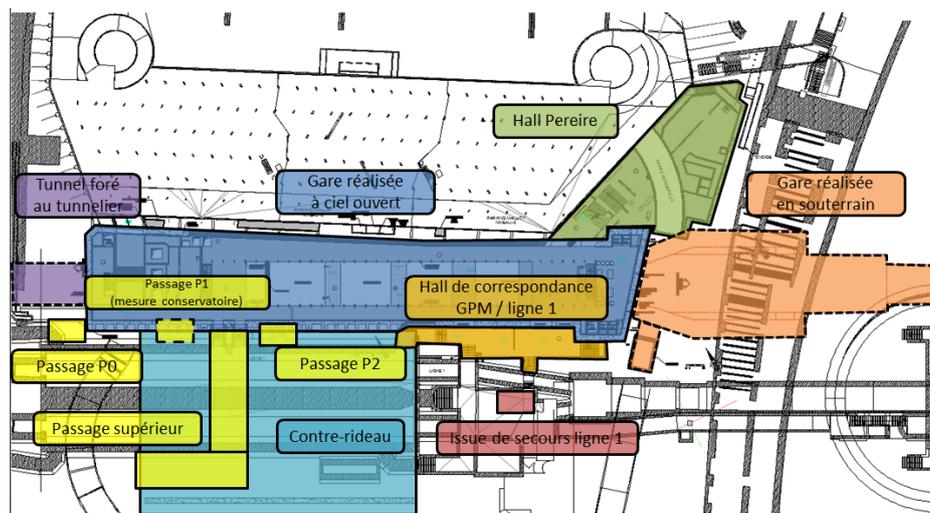


Figura 20: Opere in costruzione a Porte Maillot

Le lavorazioni da eseguire sono molteplici e di carattere molto differente per questa ragione è fondamentale una buona programmazione e il rispetto ossequioso delle regole di cantiere, in modo da non ostacolarsi durante le diverse fasi.

Fanno parte di questa separazione in zone la stazione a cielo aperto, la stazione sotterranea, il contre-rideau, la hall Pereire e i diversi passaggi sotterranei di collegamento che verranno ora analizzati più nello specifico.

6.3.1. Parte a cielo aperto

La parte a cielo aperto della stazione si trova sull'asse est-ovest, nella metà più a nord del centro della Piazza Porte Maillot e durante la fase di costruzione, questa porzione di opera sarà attraversata dalla TBM.

Essa sarà costruita preventivamente per consentire l'uscita della terra scavata e in caso contrario la TBM appropiterà di questo stop per effettuare una fase di manutenzione.

Inoltre, la parte a cielo aperto della stazione sarà utilizzata come zona di uscita della talpa una volta terminato tutto lo scavo previsto.

Nella fase di servizio, la parte a cielo aperto della stazione fornirà agli utenti l'accesso alle banchine del RER E e parteciperà alla corrispondenza tra le linee C ed E del RER, e della linea 1 della metropolitana e il centro commerciale del Palais des Congrès.

La struttura definitiva della parte a cielo aperto della stazione è costituita in particolare da:

- diaframmi periferici di diverso spessore;
- di una soletta di fondo in calcestruzzo armato;
- di piani laterali in calcestruzzo armato;
- 5 livelli di pavimenti in cemento armato;
- La struttura in metallo;
- di 4 montanti in metallo inclinati tra i livelli -2 e -4;
- di vele in calcestruzzo armato di spessori diversi;
- di 4 passerelle metalliche;
- supporti per scale fisse e pavimenti in metallo e 10 scale mobili;
- di griglie di ventilazione;

Le lavorazioni di questa parte della stazione devono forzatamente iniziare con la realizzazione di un rinforzo sotterraneo composto dai diaframmi in modo da permettere il conseguente scavo.

Queste paratie in cemento armato non potranno essere realizzate in una sola volta dal livello del suolo per l'intero perimetro della parte a cielo aperto della stazione, ciò porta ad una frammentazione della costruzione.

Inoltre, alcune parti del progetto descritto non possono essere effettuate direttamente ma necessitano di correttivi alla base:

- L'estremità Est è soggetta alla circolazione stradale e richiede l'eliminazione di opere esistenti quali le reti, la rampa ovest del parcheggio e la struttura di ventilazione esistente;
- La parete sudorientale è situata alla destra delle strutture di collegamento attuali fra la linea 1 della metro e il RER C, è quindi necessario effettuare un collegamento secondario per gli utenti e la conseguente eliminazione del corridoio esistente;
- La parete nord lungo il parcheggio richiede un profondo livello della fondazione del parcheggio per motivi strutturali (senza riporto nel parcheggio);

- La parete di nordest, all'interfaccia con la Hall Pereire, richiede prima del relativo completamento l'eliminazione dei tiranti esistenti del parcheggio e la demolizione del lavoro di connessione dell'utente.

Il programma di lavoro delle parti all'aria aperta della stazione è quindi organizzato per realizzare al più presto possibile la delimitazione fornita dai diaframmi.

In seguito, risulta necessario rinforzare il terreno compreso tra la stazione della linea 1 e la superficie attraverso l'iniezione controllata di cemento (Jet Grouting); questa procedura può portare a spinte negative utili per una più facile conclusione dell'opera.

Lo scavo della stazione a cielo aperto è effettuato in diverse tappe tramite l'uso di escavatori fino al fondo e grazie al supporto periferico derivante dalle paratie, inoltre vi è anche l'aggiunta di elementi strutturali provvisori per garantire la stabilità dell'opera.

Verrà anche installato un dispositivo di sigillamento ad estradosso composto da geomembrane ma il suo posizionamento definitivo dipenderà dallo scavo del tunnel quindi alcune strutture non portanti verranno terminate solo una volta passata la TBM.

La realizzazione dei diaframmi periferici è realizzata utilizzando un processo idro-tipo, per consentire un attraversamento più agevole degli strati di terreno molto consistenti (calcare grossolano) e per limitare i difetti di verticalità e gli impatti sulle opere esistenti.

Per non destabilizzare le opere circostanti, la messa in opera (foratura e concretizzazione) delle paratie in cemento armato è predisposta per pannelli di lunghezza limitata (massimo 3 m) e con alternanza continua.

La scelta della qualità del cemento da utilizzare varia a seconda dell'operazione in atto e dei requisiti richiesti in accordo con quanto enunciato nel documento "Notice sur les parements architectoniques".

A causa delle dimensioni di questa sezione della stazione si è effettuata una ulteriore suddivisione dell'area in 3 differenti zone:

1. Zona centrale (Figura 21) (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

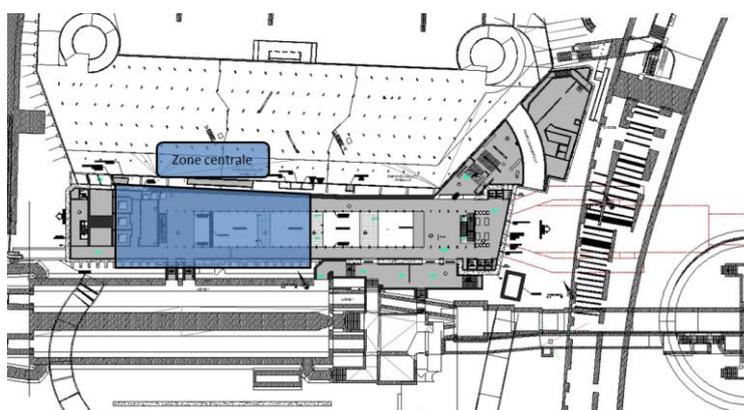


Figura 21: Zona centrale della stazione a cielo aperto

Al termine del lavoro preparatorio, si effettuerà il rinforzo del terreno per iniezione di cemento che circonda le volte della galleria della linea 1 della metropolitana e la stesura del fondo in CA (fase 1). La fase 2 comprende la costruzione della parete sud e del contre-rideau composto dai tiranti, quindi la messa in tensione di quest'ultimo (fase 3). La messa a terra della stazione

è allora possibile e di conseguenza la lastra di copertura lato sud viene installata per garantire una migliore connessione dei pannelli (fase 4).

In questa fase la stazione è quindi terrazzata fino al livello + 24,3 metri s.l.m. (fase 4).

Il parcheggio è soggetto ad un possibile puntellamento e la sua ventilazione esistente è demolita. Viene eseguita una chiodatura verticale sotto il parcheggio e un massiccio sostegno in cemento è direttamente applicato nelle fondazioni del parcheggio.

Dopo lo scavo della stazione fino al livello + 23,3 metri s.l.m., la ventilazione definitiva del parcheggio è reinstallata (fase 5). In seguito alla chiusura di tutti gli scavi provvisori la stazione è costruita fino al fondo di scavo in diverse fasi successive.

La fresa può quindi arrivare a Porte Maillot e attraversarla, nel frattempo i terreni di fronte al timpano ovest e est saranno stati trattati in anticipo.

2. Zona di estremità ad ovest (Figura 22) (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

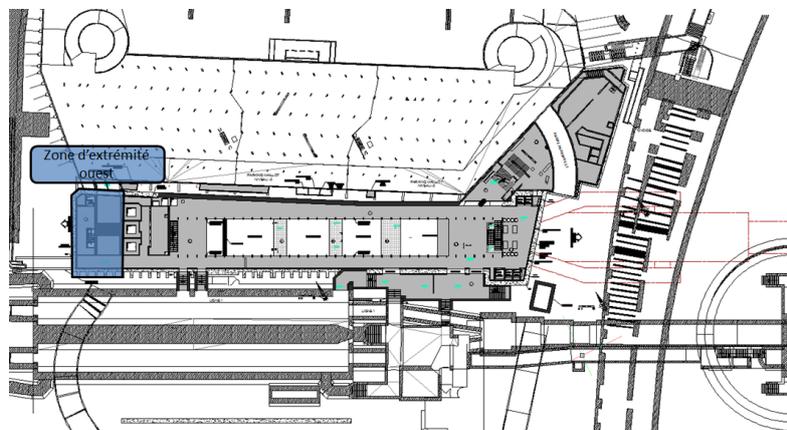


Figura 22: Zona di estremità ad ovest della stazione a cielo aperto

L'estremità occidentale della stazione, essendo al di sotto della strada, dovrà disporre di una lastra di copertura installata a terra non appena saranno conclusi i diaframmi periferici in modo tale da ristabilire al più presto il traffico stradale.

D'altro canto, la costruzione del muro della parte ovest è necessaria per mantenere il terreno immobile durante la costruzione della zona centrale, rendendo così possibile realizzare la parete nord.

3. Zona di estremità a est (Figura 23) (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

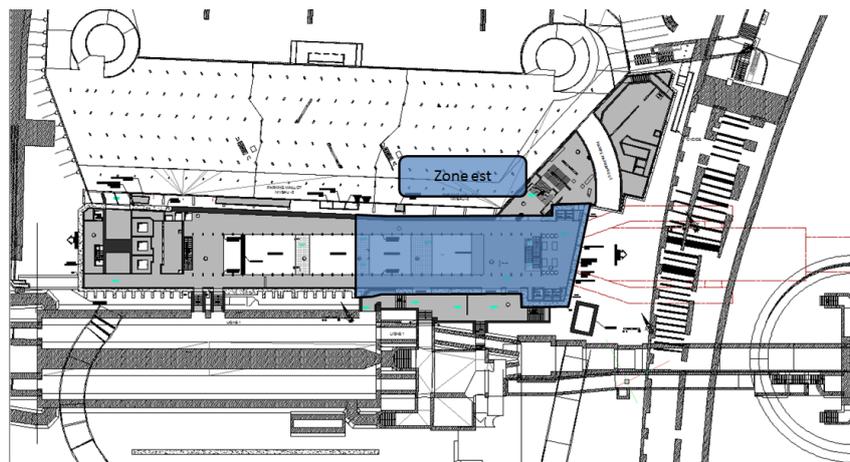


Figura 23: Zona di estremità est della stazione a cielo aperto

Il completamento della parete orientale della stazione a cielo aperto è necessario per essere in grado di mantenere il terreno immobile nel periodo in cui la zona centrale è in fase di scavo, rendendo così possibile la costruzione della parete nord. Inoltre, risulta fondamentale per consentire la costruzione del pozzo, della stazione della metropolitana e della Hall Pereire.

La grande estensione dell'area dedicata alla stazione a cielo aperto ha portato ad avere la contemporaneità di diverse lavorazioni durante il periodo di stage tra cui le principali sono:

- la realizzazione dei diaframmi periferici verso nord (parois moulées) che forniscono un rinforzo necessario alla seguente costruzione della stazione.

La tecnica utilizzata consiste nel formare uno scavo rettangolare tramite l'utilizzo di una gru con pala a benna mordente e contemporaneamente introdurre nel foro della bentonite allo stato liquido che riduce la coesione del terreno e facilita la sua rimozione. Infine, a scavo ultimato, vengono inserite le armature e il cemento creando i rinforzi voluti. Le perforazioni eseguite nella parte ovest del sito di lavoro attraverso l'utilizzo di un macchinario specifico che permette di perforare il terreno e formare dei piccoli pozzi tutti con le medesime dimensioni e scavati in breve tempo.

- nella stessa zona vengono eseguiti anche dei cicli di Jet Grouting per migliorare le caratteristiche del terreno.

6.3.2. Contre-Rideau

Il contre-rideau si trova su un asse est-ovest, nella zona a sud del cantiere e passa sopra la stazione del Linea 1. Questa parete in cemento armato che costituisce la palancola si dirama a partire da una altitudine di +26 metri sul livello del mare e i tiranti sono posti a + 35,5 metri s.l.m. mentre il terreno naturale è compreso tra + 39,50 metri s.l.m. e + 41 metri s.l.m.

Durante la fase di costruzione, questa opera garantisce la manutenzione dei diaframmi a sud della zona a cielo aperto della stazione, in particolare risulta essenziale durante le fasi di messa

a terra della stazione, al fine di minimizzare il movimento della volta della linea 1 della metropolitana.

Una galleria assicura l'accesso ai tiranti del contre-rideau per un'eventuale correzione della loro tensione durante la fase di lavoro.

È prevista l'installazione di circa 81 tiranti di 120 mm di diametro e 51 m di lunghezza (comprese tra le paratie della zona a cielo aperto della stazione e del contre-rideau), distanziati di 1 m ciascuno.

I diaframmi compresi nella costruzione di questa sezione della stazione sono la prima lavorazione da eseguire in questa parte della stazione.

In seguito, verranno scavate la galleria tecnica e il fascio di collegamento sul lato sud della parte a cielo aperto della stazione.

Infine, all'interno dei fori scavati vengono installati i cavi prima di riempire lo scavo; solo in un secondo momento, ma non oltre il raggiungimento del livello + 35 metri s.l.m., verranno tesi i tiranti.

Questa elaborata soluzione strutturale resterà in servizio fino alla conclusione della realizzazione della stazione e l'inizio del transito dei treni.

Una volta conclusi i lavori e dopo aver verificato che i movimenti del terreno si sono stabilizzati e rispettano le soglie imposte dal contratto, i tiranti saranno rilasciati.

Il rilassamento delle funi sarà effettuato progressivamente, in diverse fasi, controllando contemporaneamente il comportamento della linea 1 della metro.

Riassumendo le lavorazioni descritte durante la creazione e la messa in opera del contre-rideau si evidenziano le seguenti fasi:

- Fase 1: costruzione dei diaframmi periferici;
- Fase 2: realizzazione della galleria tecnica e del lato dei diaframmi a sud della parte a cielo aperto della stazione;
- Fase 3: scavo, realizzazione e installazione dei tiranti e dell'argine, messa in tensione delle aste;
- Fase 4 (dopo la costruzione di GPM): allentamento dei tiranti se i movimenti sono al di sotto delle soglie impostate.

Al momento dello stage gli scavi per l'installazione dei tiranti erano già stati eseguiti ma la delicata operazione di installazione non era ancora iniziata.

Questa lavorazione dovrà essere programmata con estrema attenzione in quanto i cavi passeranno nello strato di terreno sopra la stazione della Linea 1 che è una delle linee metropolitane principali del centro di Parigi, pertanto un eventuale errore nella tiratura potrebbe portare nella peggiore delle ipotesi alla chiusura temporanea della Linea 1.

6.3.3. Parte sotterranea della stazione

La parte sotterranea della stazione si trova su un asse est-ovest, sotto il marciapiede a est della piazza di Porte Maillot e sotto il tunnel del RER C.

Lo scavo di questa opera è previsto raggiungere una profondità di + 10,85 metri s.l.m. mentre il terreno naturale è situato a circa + 40,00 metri s.l.m.

Il lavoro della parte sotterranea della stazione sarà organizzato indipendentemente da quello della parte a cielo aperto.

Nella fase di lavoro, la TBM attraverserà la parte sotterranea della stazione da ovest a est, per questa ragione sarà necessario realizzare una contro-volta del tunnel principale con funzione di rinforzo.

All'interno del cantiere sarà presente una centrale a cemento che consentirà la fornitura di calcestruzzo per tutto il sito di lavoro.

Durante la fase di servizio, la parte sotterranea della stazione fornirà agli utenti l'accesso alle banchine e consentirà la corrispondenza tra le linee C ed E del RER, la linea 1 della metropolitana e il centro commerciale del Palais des Congrès.

Allo stesso tempo l'opera, chiamata anche "pozzo di manutenzione pesante" sarà usata per fini di manutenzione della stazione.

La parte sotterranea della stazione rappresenta la parte orientale della Gare Porte Maillot.

Lo scavo previsto per questa parte del sito ha delle dimensioni di lunghezza circa 72 m e una profondità media di 20,50 m rispetto al terreno naturale.

Questa sezione di cantiere è collegata alla parte a cielo aperto della stazione da delle gallerie scavate tra i piani -5 e -4 e collegate tra loro.

La struttura finale della parte sotterranea della stazione consiste di:

- Un pozzo di dimensioni 7,70 m x 7,70 m e di 31 m di profondità;
- Una galleria di accesso tra il pozzo e il piano -4 della stazione;
- Una galleria di accesso tra il pozzo e il livello "Wharf" di GPM di 3,60 m di apertura e da 4,10 m di altezza alla tomaia;
- Uno spazio sotterraneo cavo di dimensioni 13,48 m e 12,00 m di altezza;
- 2 corridoi di accesso alle gallerie delle scale ai piani -5 e -4, di dimensioni 10 m e 4,30 m di altezza;
- 2 gallerie per la messa in opera delle scale di 4,00 m di apertura e 5,10 m di altezza;
- 2 corridoi di accesso alla stazione al piano -4, di dimensioni 3,60 m;
- 2 scale fisse e 2 scale mobili;

A tal fine, l'appaltatore deve avviare le lavorazioni elencate in precedenza dalla realizzazione di un accesso specifico al lavoro in metropolitana compreso tra il pozzo e la galleria d'accesso. I diaframmi che delimitano il pozzo (puits travaux) e lo scavo del pozzo stesso dovranno tener conto dell'eterogeneità del terreno incontrato e di conseguenza predisporre delle precauzioni da adottare al fine di proteggersi dalla possibile collisione con le fondazioni della rampa del parcheggio.

Al momento della visita del cantiere il pozzo era già presente e, a causa delle sue dimensioni ridotte, gli spazi di manovra e introduzione di materiale all'interno dello scavo risultavano complicati.

Per questo motivo era richiesto l'utilizzo di diverse gru con differenti funzioni che velocizzavano lo spostamento di materiale.

Nella zona sotterranea, confinante con il parcheggio del Palais des Congrès, era in corso la costruzione di alcuni pilastri supplementari per poter supportare più agevolmente le nuove sollecitazioni dovute alla nuova linea del RER E.

6.3.4. Hall Pereire

La Hall Pereire si trova nella parte nord-est di piazza Porte Maillot, sotto la rotonda stradale e l'incrocio tra i viali Pereire e Gouvion-Saint-Cyr.

Il fondo di scavo di questa vasta sala sotterranea è ad un livello di +29 metri s.l.m. mentre il terreno naturale è a circa +40 metri s.l.m.

Essa rappresenta un'estensione della stazione ferroviaria di Porte Maillot, di forma trapezoidale e di dimensioni nella parte inferiore del fermo di circa 40 m larghezza massima e 60 m di lunghezza massima.

Nella fase di servizio, la Pereire Hall garantirà la corrispondenza tra le linee C e la E del RER, la linea 1 della metropolitana e il centro commerciale del Palais des Congrès.

Sarà anche attraversata dalla rampa da cui sarà possibile accedere al parcheggio interrato; quest'ultima dovrà essere ricostruita dopo la parziale demolizione durante il periodo lavori.

La struttura finale della Hall Pereire sarà costituita da:

- sul lato nord ed est da un muro composto da diversi diaframmi che si chiude a nord in corrispondenza del parcheggio e a sud contro la rampa stradale est;
- di una pavimentazione in calcestruzzo armato al livello -2, punteggiato da vari pozzi;
- lastra intermedia in cemento armato 0,50 m al livello -1;
- di una lastra di spessore variabile al livello di copertura;
- di una rampa di accesso al parcheggio porte Maillot, situato al livello -2 della Hall Pereire (il livello del parcheggio invece risulta essere al piano -3);
- di un'uscita di emergenza situato al livello della lastra di copertura;
- di coperture in calcestruzzo armato di spessori diversi;
- di pali di sostegno in calcestruzzo armato di diverse dimensioni
- di griglie di ventilazione;
- di dispositivi di tenuta dettagliati.

Nella prima fase dei lavori di questa parte di stazione, il traffico stradale della rotonda deve essere deviato, al fine di consentire la costruzione di un pozzo rinforzato in cemento armato che permetta la demolizione di una parte della rampa esistente del parcheggio, la realizzazione di una parte della rampa definitiva e la costruzione di un incrocio per il traffico automobilistico durante il lavoro della Hall Pereire.

In una seconda fase, il traffico veicolare della rotonda è deviato verso l'incrocio costruito in precedenza per permettere la costruzione dei diaframmi periferici della Hall Pereire, la realizzazione della parte est, compreso lo scavo, l'eliminazione di opere esistenti e la realizzazione di strutture definitive.

In questo caso le paratie in cemento armato saranno realizzate con un processo idro-tipo, per poter attraversare più agevolmente gli strati di terreno consistenti (calcare grossolano) e per limitare al massimo le tolleranze di non verticalità, così come gli impatti sulle opere esistenti. Infine, il collegamento in superficie della Hall Pereire è effettuato dopo un'ulteriore deviazione del traffico automobilistico.

6.4. Misure di sicurezza adottate

6.4.1. Misure generali

Alcune precauzioni dovranno essere prese indipendentemente dalla lavorazione in atto e dalla zona del tracciato interessata, in quanto risultano essere di fondamentale importanza per l'esecuzione dei lavori prevista dal progetto. (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2015)

La maggior parte di esse possono essere riassunte così:

- È prevista l'installazione di dispositivi di drenaggio e attrezzature esaustive per il trattamento e il rigetto delle acque del sito al fine di consentire il recupero e il rifiuto di tutta l'acqua di infiltrazione, deflusso e acqua pulita al bisogno del luogo proveniente dalle differenti aree in costruzione.

L'obiettivo è quello di consentire la realizzazione quasi a secco delle opere di ingegneria civile. L'attenzione del contraente è rivolta al rischio di allagamento in caso di temporali.

Egli deve quindi attuare tutte le misure necessarie contro questo rischio e mantenerle fino alla consegna definitiva delle opere.

Pertanto, l'appaltatore provvede affinché i suoi impianti di scarico degli effluenti siano conformi ai regolamenti correttivi dei comuni di Parigi, Neuilly e Courbevoie.

- Tutte le stazioni di pompaggio temporanee devono essere monitorate da trasmettitore telefonico. In caso di incidente, il trasmettitore telefonico dovrà chiamare immediatamente uno dei tre numeri preimpostati fino a quando non verrà informato il personale di manutenzione.
- Il contraente è responsabile della messa a terra e del collegamento equipotenziale di tutte le opere elettriche.
- Una passerella, scale, sale di collegamento, supporti, fondazioni, guardrails, carenatura, protezioni per il traffico stradale e pedonale, dispositivo di illuminazione, segnaletica e segnaletica stradale dovranno essere installate in sostituzione di ciascuna uscita o corridoio che sarà reso inagibile durante il periodo di lavori.
A carico dell'impresa appaltatrice sarà anche la demolizione di tutte queste opere una volta terminati i lavori di ampliamento della linea metropolitana.
- L'appaltatore assicura a proprie spese la protezione di facciate, muri e strutture di qualsiasi natura, se queste ultime si trovano in zone adiacenti alle zone di lavoro.
- La gestione temporanea del sito richiede la realizzazione di vie di accessibilità dei siti di lavoro e manutenzione del traffico e dell'accesso ai ripari.

Questi sono trattati in relazione alla classe di traffico corrispondente al loro uso e non a seconda del loro tempo di funzionamento. Il concetto di "strada provvisoria" non incide in alcun modo sulla qualità delle opere da effettuare.

- La segnaletica temporanea di siti fissi o mobili (meno di 3 ore) ha lo scopo di avvertire e guidare l'utente al fine di garantire la sua sicurezza e quella delle aziende coinvolte.

6.4.2. Per i siti fissi

Per questa tipologia di cantiere sono previste, oltre a quelle generali, numerose misure di sicurezza che concernono soprattutto la delimitazione del cantiere e possono essere riassunte nei seguenti punti:

- I pannelli perimetrali, opachi o semi-opachi di ciascun cantiere, devono essere di almeno 2 metri di altezza, in metallo altamente resistente agli urti e alle condizioni atmosferiche.

Il telaio deve essere saldamente infisso nel terreno per assicurare una resistenza efficace al vento e alle spinte orizzontali di possibili movimenti di folla.

Caratteristiche aggiuntive quali scivoli, muri parapetti ed altre sono messi in atto in siti che presentano rischio impatti a causa del traffico automobilistico.

- Le superfici dei pannelli sono anti-display e anti-graffiti, e i colori devono essere imposti dalla direzione lavori.
- Una finestra TH costituita da una rete metallica zincata a caldo (avente piccola mesh) di larghezza da 0,5 a 0,7 metri ogni 4 a 6 metri può essere aggiunta per eventuali scavi archeologici o topografici
- In alcuni casi particolari e previo accordo del supervisore, possono essere consentiti pannelli costituiti da "rete elettrosaldata zincata", tipo Heras o equivalente.

6.4.3. Cantieri mobili

Per i cantieri non fissi, ovvero con una durata prevista inferiore ai 2 mesi le norme di sicurezza sono meno severe e consentono dei pannelli di altezza 1 metro.

Deve essere installata in ogni cantiere un sistema completo di illuminazione (compresa l'illuminazione di emergenza e alimentatori associati) conforme alla legge in vigore in Francia.

7. MONITORAGGIO

I sistemi di monitoraggio, protezione e controllo delle lavorazioni previste saranno installati per ogni opera compresa nel contratto di lavoro.

I metodi utilizzati saranno adattati alle differenti casistiche da affrontare durante le lavorazioni con l'obiettivo di non creare disturbi alle opere o fastidi allo sfruttamento commerciale delle linee.

Nella zona di influenza geotecnica (ZIG), questo approccio globale è destinato a:

- garantire una più agevole scelta delle procedure decisionali di qualità e logistica da parte della direzione lavori;
- monitorare e analizzare il comportamento del terreno;
- monitorare e analizzare il comportamento delle opere esistenti (edifici, reti, strutture sotterranee);
- monitorare e analizzare il comportamento delle opere in costruzione;
- monitorare e analizzare fenomeni vibratorii e la produzione di rumore indotte dai lavori.

Inoltre, l'ispezione dovrà essere utilizzata per monitorare l'effetto delle deformazioni sul comportamento del terreno e degli edifici.

Lo scopo del sistema di ispezione installato è quello di visualizzare qualsiasi deformazione della volta della metropolitana, degli edifici e delle strutture già presenti lungo il percorso e garantire la continuità delle opere di costruzione.

Prima dell'inizio dei lavori, sono state effettuate delle misurazioni per una durata complessiva di tre mesi minimi per consentire la taratura delle misure.

Diversi servizi, compresa l'introduzione di sistemi di monitoraggio nelle gallerie esistenti e nelle strutture superficiali sono state previste al di fuori delle ore di funzionamento (di notte), previo accordo tra l'operatore e il proprietario.

L'apparecchiatura di monitoraggio installata sarà automatica ed effettuerà una serie oraria di misure visibile su sito web.

La strumentazione all'interno delle gallerie sarà fissata principalmente sotto l'arco del tunnel. I sistemi di manutenzione saranno mantenuti attivi per tutta la durata del lavoro e fino a 6 mesi dal completamento di quest'ultimo.

Le misure di monitoraggio previste sono essenzialmente le seguenti:

- Misure topografiche di livellamento di precisione sugli assi X, Y e Z
- Misure interferometriche
- Misure di vibrazione (compresa la misurazione del rumore a carico)
- Misure piezometriche
- Misure inclinometriche
- Misure estensometriche
- Misure fessurometriche
- Misure di spostamenti

- Misure soniche
- Misure acustiche
- Misure di convergenza del tunnel
- Ulteriori misure complementari per lo scavo del tunnel (monitoraggio della traiettoria dello scavo, iniezioni di cemento nel terreno, vincoli e deformazioni interne dei diaframmi)
- Misurazione continua del tenore di gas nel condotto del gas presente sulla destra della stazione

Due soglie, la soglia di vigilanza e la soglia di allerta, devono essere considerate per il monitoraggio dei lavori. Eccetto particolari richieste dovute a proprietari di terze parti e ben evidenziate nel piano di monitoraggio, queste due soglie sono definite all'inizio del lavoro sulla base degli studi di esecuzione effettuati dal contraente e pertanto possono essere considerate come lo scenario di riferimento.

Queste limitazioni possono essere adattate nel corso dei lavori a seconda del piano di avanzamento e del piano di monitoraggio.

La soglia di vigilanza è definita come percentuale dello scenario di riferimento; essa viene utilizzata per rilevare discrepanze tra le misurazioni osservate e le previsioni.

Oltre tale soglia, il contraente è tenuto a rafforzare il numero e la frequenza delle misure, e ad analizzare i risultati con precisione in relazione al contesto incontrato.

La soglia di allerta invece, corrisponde allo scenario di riferimento con un ragionevole margine di variabilità. Questa soglia serve:

- per continuare la verifica della conformità tra le previsioni di studio e il comportamento trovato;
- per continuare l'analisi dei risultati in relazione al contesto riscontrato,
- per evitare ulteriori distorsioni se questa soglia è superata,
- per avviare l'attuazione di contromisure predefinite in caso di superamento, per esempio modificando la pressione imposta dalla TBM adattandola ai lavori di betonaggio per le opere all'aperto.

Se le distorsioni tendono a superare la soglia contrattuale e le disposizioni adottate dal contraente non consentono di stabilizzare e correggere la situazione, potrebbe essere necessario un immediato arresto dello scavo e/o movimento dei lavori in questione.

Questa decisione può essere imposta dal proprietario nell'attesa che si raggiunga un livello di sicurezza compatibile con la ripresa dei lavori di scavo.

Infine, la soglia contrattuale consente di assegnare il rischio circostante tra il contraente l'appaltatore. Infatti, la responsabilità graverà sul contraente nel caso in cui le soglie contrattuali si dimostreranno rispettate.

In questo caso quindi l'eventuale lavoro di riparazione, così come le conseguenze sul decorso del relativo scavo (progettazione, metodologia di esecuzione...) saranno a scapito del contraente, anche se il lavoro è svolto da un terzo.

Al contrario, se le misurazioni effettuate rimarranno al di sotto dei valori definiti dalla soglia contrattuale, le conseguenze delle riparazioni dei disordini sul prossimo saranno a carico dell'amministrazione aggiudicatrice dell'appalto.

Questa soglia contrattuale resterà invariata per tutta l'esecuzione del contratto.

I valori assoluti di soglia riportati di seguito non considerano l'influenza delle possibili deformazioni dovute ad altri cantieri in zona Defense, Porte Maillot e HSL.

Di conseguenza, il contraente dovrà installare un dispositivo in grado di identificare chiaramente, in qualsiasi punto del progetto, gli spostamenti associati ai differenti lavori di ingegneria civile.

Per quanto concerne gli spostamenti differenziali, i valori di seguito riportati devono essere rispettati considerando anche l'effetto degli altri cantieri.

Per differenti zone del percorso, le soglie contrattuali da rispettare sono le seguenti:

| Seuils contractuels | Tassements différentiels (mm/m) | Tassements absolus (mm) |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Voirie et zones inoccupées | 2 | 30 |
| Bâti peu sensible | 2 | 30 |
| Bâti sensible | 1.6 | 20 |
| Bâti très sensible | 1.2 | 15 |

Tabella 6: Soglie contrattuali

Per esempio, nel caso dei tunnel già esistenti le diverse soglie da rispettare sono riportate in Tabella 7. (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2016)

| Ligne 13, Ligne 14, RER A, Ligne 2, Ligne 1 – section courante et zone de transitions | Seuils de pilotage | | Seuil contractuel |
|---|--------------------|----------------|-------------------|
| | Seuil de vigilance | Seuil d'alerte | |
| Déplacement vertical différentiel | 0.7 ‰ | 1 ‰ | 1.2 ‰ |
| Déplacement horizontal différentiel | 0.7 ‰ | 1 ‰ | 1.2 ‰ |
| Déplacement vertical (Uza et Uzb) | 10 mm | 12 mm | 15 mm |
| Déplacement horizontal (Uxa et Uxb) | 10 mm | 12 mm | 15 mm |
| Déplacement total (Ua et Ub) | 12 mm | 15 mm | 18 mm |

Tabella 7: Soglie riguardanti i tunnel già esistenti

Nel caso di punti singoli, in particolare quelli facenti parte delle opere metropolitane confinanti, altre soglie sono definite tramite accordi contrattuali più restrittivi.

Saranno invece presentate direttamente dall'appaltatore i valori delle soglie di vigilanza e allerta che si intende istituire per la messa in opera del cantiere.

Tali soglie pilota saranno definite sulla base degli studi di esecuzione effettuati dall'appaltatore.

Essi devono essere definiti secondo le seguenti regole:

- Le soglie di vigilanza saranno necessariamente inferiori al 70% dei valori di regolamento stimati alla fine degli studi di esecuzione;
- Le soglie di allerta saranno sempre inferiori alla soglia contrattuale e corrispondenti al 130% del valore di calcolo;
- I valori di soglia saranno suddivisi in zone lungo il percorso del tunnel e nelle vicinanze.

Le frequenze delle misurazioni da mantenere durante tutto il periodo di esecuzione lavori sono le seguenti:

- Le misurazioni effettuate dai fessurimetri e tilmetri saranno automatizzate e pertanto effettuate continuamente.
Questi dati saranno forniti sul database e aggiornati almeno una volta al giorno.
- Le misurazioni topografiche saranno effettuate secondo la frequenza e la metodologia seguente: il punto di misurazione zero a partire da un anno prima del passaggio della TBM e può essere eseguito manualmente (misura mensile).
Il rilevamento automatico continuo di acquisizione dovrà avere una frequenza minima di una misura per ora per tutti i parametri di rilevamento non appena l'edificio è a una distanza inferiore di 50 m dalla parte anteriore dello scavo e fino a quando non sarà superato di almeno 30 m.

7.1. Sistemi di monitoraggio installati

La maggior parte dei sistemi di monitoraggio previsti sono già stati installati, specialmente nelle zone adiacenti ai pozzi e alle stazioni, mentre lungo il tracciato del tunnel, non avendo ancora cominciato lo scavo tramite fresa, il monitoraggio è funzionante solo nel tratto di scavo iniziale dal pozzo di Gambetta fino alla Senna.

Per quanto concerne l'abitato intorno al pozzo di Gambetta le lavorazioni in corso sono ridotte al montaggio della TBM e alla sua installazione all'interno del pozzo pertanto le strumentazioni installate sono perlopiù rimaste dalla fase di scavo o improntate alle future sollecitazioni dovute agli inizi della fase di scavo del tunnel che avverrà nel Febbraio 2019.

Un numero elevato di prismi, vibrometri e chiodi è installato sulle facciate degli edifici che seguono il percorso del tunnel e le misure saranno lette dalle diverse stazioni totali predisposte o, dove costretti, manualmente.

Per ogni pozzo inoltre vi sono diversi inclinometri a lettura manuale che devono garantire il controllo della falda sottostante la zona di scavo.

Nella mappa sottostante sono riportati gli strumenti previsti per tutto il primo tratto di tracciato che si sviluppa nelle vie del centro di Courbevoie. (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, 2016)

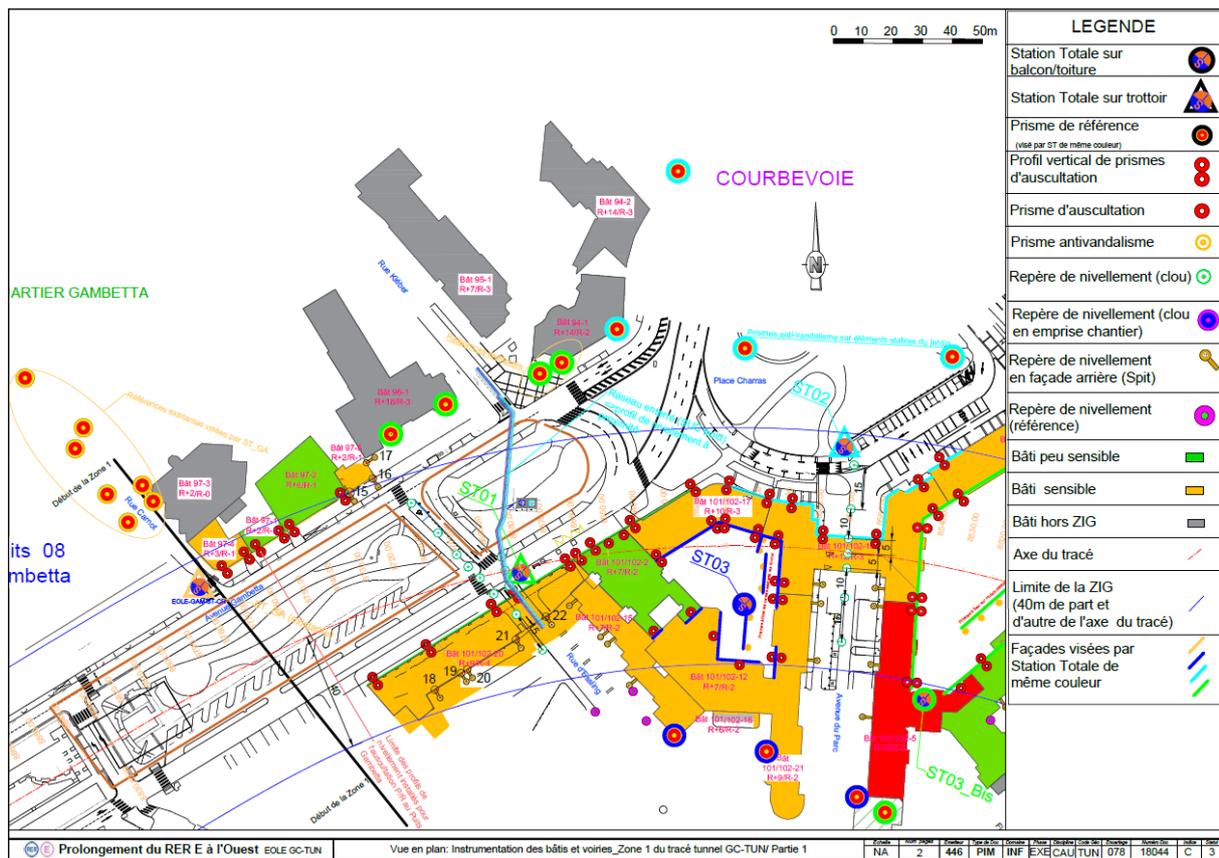


Figura 24: Strumentazione di monitoraggio intorno al pozzo di Gambetta

I diversi edifici sono classificati in 3 differenti categorie a seconda della sensibilità, rappresentate in mappa da 3 colori verde, giallo e rosso.

Ciò è utile per una prima visione d'insieme delle misure prese e per capire immediatamente la gravità di eventuali spostamenti.

Nei pozzi più distanti dalla zona di inizio scavo le strumentazioni installate si limitavano ai dintorni del pozzo stesso che come nei casi di Abrevoir e Gouraud sono posti in zone densamente popolate pertanto molto prossimi agli edifici.

Dalle due mappe seguenti si può notare come la presenza di prismi è elevata sia all'interno del cantiere sia esternamente sulle facciate delle abitazioni.

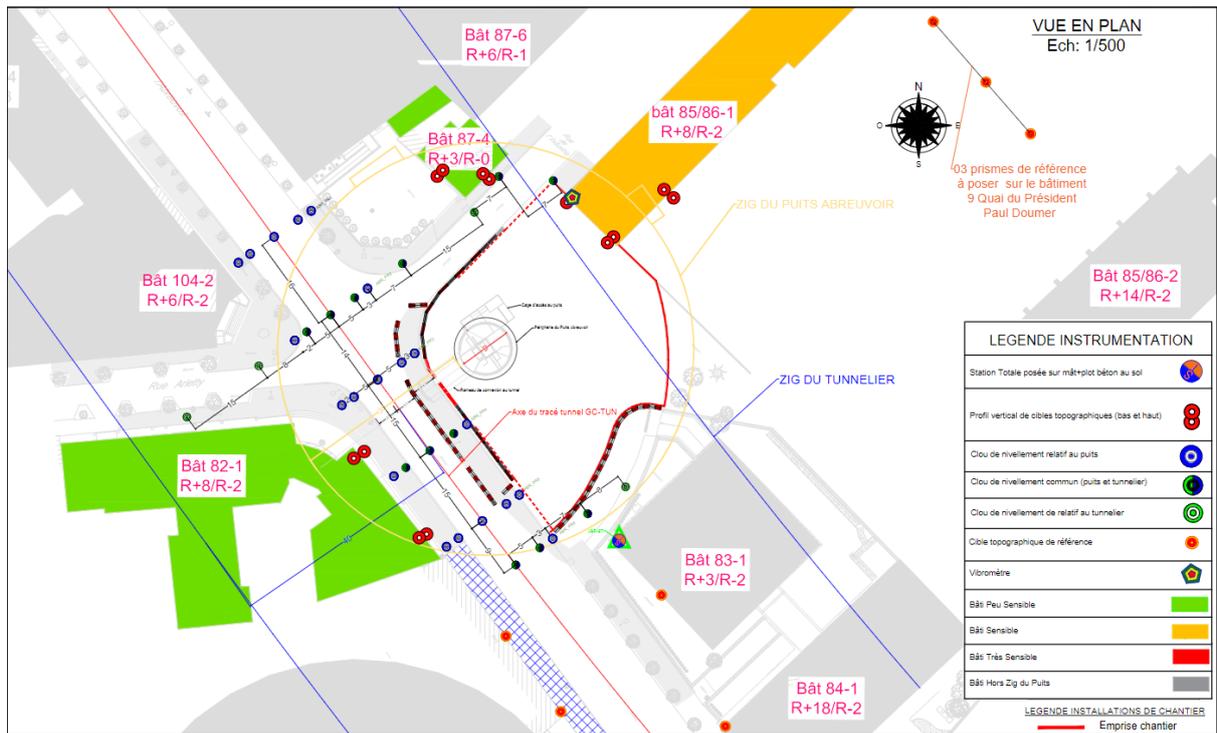


Figura 25: Strumentazione installata nei pressi del pozzo di Abreuvoir

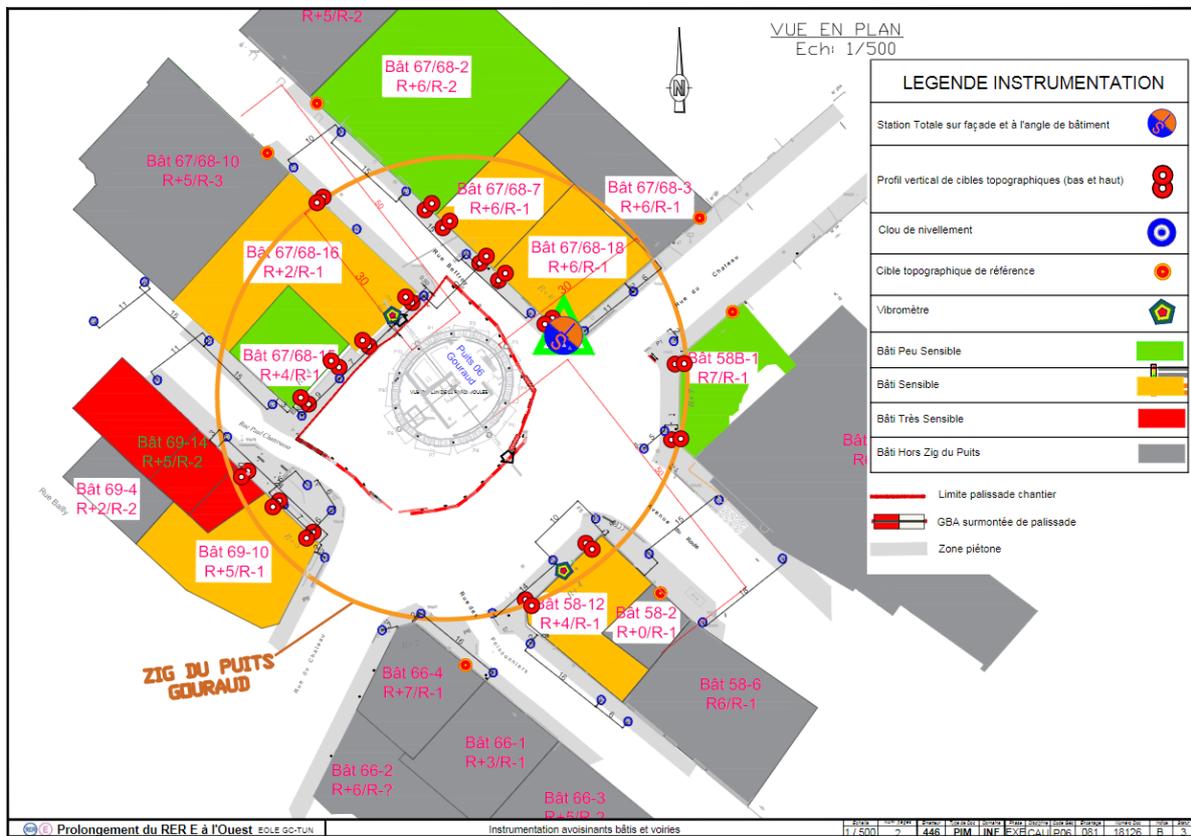


Figura 26: Strumentazione installata nei pressi del pozzo di Gouraud

8. RUMORE ANTROPICO

All'interno di un così vasto e diversificato sito di lavoro vengono adoperati la maggior parte dei macchinari di scavo esistenti, pertanto, risulta essere di interesse l'analisi della produzione e della propagazione di eventi sonori continui o puntuali, di natura antropica.

Il rumore prodotto dal funzionamento dalle diverse macchine di cantiere si può suddividere in due differenti fonti, una dovuta all'accensione del motore e una causata dalla lavorazione in atto.

8.1. Rumore continuo nel tempo

Il rumore prodotto dal motore acceso è tipicamente un evento costante che può variare di intensità a seconda della tipologia e della categoria del macchinario stesso ma nel cui spettro saranno difficilmente riscontrabili picchi o nette variazioni.

Seppur di minor interesse ingegneristico, a causa della sua limitata influenza a livello strutturale, il rumore prodotto da questa tipologia di evento può raggiungere elevati livelli sonori, ben oltre i limiti legislativi previsti.

Inoltre, essendo quelli analizzati eventi che persistono nel tempo anche diverse ore, per ridurre al minimo le interruzioni delle lavorazioni in atto, essi sono la principale causa di lamentele da parte degli abitanti.

In questi specifici casi l'analisi è stata ridotta alla misura del rumore tramite un fonometro di classe 1, per periodi di tempo compresi tra i 5 e 10 minuti consecutivi e alla conseguente verifica legislativa. Per quest'ultima risulta essere di fondamentale importanza la posizione del rilevamento in quanto all'interno del cantiere i valori raggiunti non devono rispettare alcun limite normativo bensì all'esterno non devono creare disturbo ai cittadini.

8.2. Rumore discontinuo nel tempo

Essendo il cantiere descritto destinato ad ospitare una linea di metropolitana sotterranea tutte le lavorazioni includono uno scavo più o meno profondo e più o meno ampio.

La metodologia di scavo cambia a seconda della realizzazione da eseguire ma tutte provocano degli eventi sonori ben riscontrabili e misurabili.

Questi eventi sono ben diversi da quelli continui infatti, non solo cambiano di intensità sonora a seconda del terreno incontrato e della tipologia di lavorazione, ma possono anche dipendere in parte dalle vibrazioni che i movimenti di terreno provocano all'interno dello strato scavato.

L'analisi effettuata, oltre al controllo del rispetto dei limiti normativi, aveva come obiettivo di identificare la presenza di una influenza delle vibrazioni nella generazione di rumore.

Per fare ciò si sono misurati contemporaneamente le vibrazioni indotte e il livello sonoro per degli intervalli di tempo compresi tra i 5 e 10 minuti.

Anche in questo caso la vicinanza al sito di scavo risulta essere un elemento da considerare con attenzione poiché probabilmente, allontanandosi dalla sorgente, le due grandezze fisiche

si dissiperanno in modo differente in relazione alle proprie caratteristiche di propagazione nei vari materiali attraversati.

Per effettuare questa analisi si sono utilizzati in contemporanea un fonometro di classe 1 per misurare il livello sonoro e un vibrometro composto di un oscillatore per ciascuno dei 3 assi cartesiani.

8.3. Strumentazione utilizzata

8.3.1. Fonometro

Il fonometro utilizzato è il XL2 Analyser della “nTi Audio” che oltre ad essere un avanzato misuratore di livello sonoro consente di misurare anche gli spettri RTA e FFT ad alta risoluzione, il tempo di riverbero RT60, la polarità e il ritardo. Alcune caratteristiche opzionali sono l’intelligibilità vocale STIPA, le funzioni di acustica, le curve di rumore, la calibrazione per il cinema, analisi pass/fail e acquisizione di misura remota. (NTi Audio, 2018)

In Figura 27 è riportata un’immagine dello strumento composto dal nucleo centrale e dal microfono.



Figura 27: Fonometro XL2 Analyser

L’XL2 è un potente misuratore di livello sonoro per eventi antropici e per il monitoraggio del rumore ambientale. Sono disponibili numerose varianti di misura quali: livello reale, Lmin, Lmax e Leq e possono essere misurate in combinazione con ponderazione di frequenza A, C o Z o ponderazioni tempo rapido, lento e di impulso facoltativo.

Tutti i risultati sono simultaneamente disponibili come evidenziato nella Figura 28 rappresentante lo schermo di visualizzazione dello strumento.



Figura 28: Schermo del XL2 Analyser

Una funzione utile presente in questo fonometro consiste nella possibilità di registrare tutte le informazioni acquisite su una scheda SD rimovibile.

Inoltre, l'XL2 permette la registrazione di file WAV per una documentazione completa dei livelli di pressione sonora misurati e l'aggiunta di note vocali ad ogni misurazione.

Durante le misurazioni effettuate ci si è limitati ad utilizzare la funzione dello strumento indicata come SLMeter che restituisce il livello sonoro registrato ad ogni secondo trascorso LAeq_dt, il valore medio LAeq che rappresenta il valore mediato sul periodo di registrazione trascorso, il massimo e il minimo livello acustico per ogni secondo LAFmax_dt (Figura 29).

```
# Measurement Setup
Profile:          Full mode
Timer mode:      continuous
Timer set:       --:--:--
Log-Interval:   00:00:01
k1:              0.0 dB
k2:              0.0 dB
kset Date:      k-Values not measured
Range:          20 - 120 dB

# Time
Start:           2018-11-26, 10:51:08
End:             2018-11-26, 10:56:20

# Broadband LOG Results
Date             Time             Timer             LAeq_dt           LAeq              LAFmax_dt         LAFmin_dt         LCPKmax_dt
[YYYY-MM-DD]   [hh:mm:ss]       [hh:mm:ss]       [dB]              [dB]              [dB]              [dB]              [dB]
2018-11-26     10:51:09         00:00:01         69.8              69.8              70.3              69.2              96.2
2018-11-26     10:51:10         00:00:02         69.8              69.8              70.2              69.1              96.3
2018-11-26     10:51:11         00:00:03         69.5              69.7              70.0              69.2              95.6
2018-11-26     10:51:12         00:00:04         69.4              69.6              69.9              68.9              95.3
2018-11-26     10:51:13         00:00:05         69.4              69.6              69.8              68.9              96.4
2018-11-26     10:51:14         00:00:06         69.4              69.6              69.9              69.0              95.8
2018-11-26     10:51:15         00:00:07         69.3              69.5              69.7              68.8              96.0
2018-11-26     10:51:16         00:00:08         69.8              69.6              70.3              69.4              96.7
2018-11-26     10:51:17         00:00:09         69.6              69.6              70.6              69.0              95.9
2018-11-26     10:51:18         00:00:10         70.2              69.6              70.9              69.1              95.9
2018-11-26     10:51:19         00:00:11         70.6              69.7              71.2              70.3              95.7
2018-11-26     10:51:20         00:00:12         72.4              70.0              75.2              70.3              97.8
2018-11-26     10:51:21         00:00:13         72.6              70.3              73.2              72.0              97.8
2018-11-26     10:51:22         00:00:14         71.2              70.4              72.7              70.4              96.7
2018-11-26     10:51:23         00:00:15         70.3              70.4              70.8              69.8              95.8
```

Figura 29: Misure restituite dal fonometro

Inoltre, vengono sempre riportati il valore di picco raggiunto durante la misurazione, la registrazione per poter riascoltare e uno spettro di risposta in bande di ottava nel quale si evidenziano i livelli sonori raggiunti alle diverse frequenze partendo dalla banda 6,3 Hz fino a 20000 Hz. Un esempio è riportato in Figura 30.

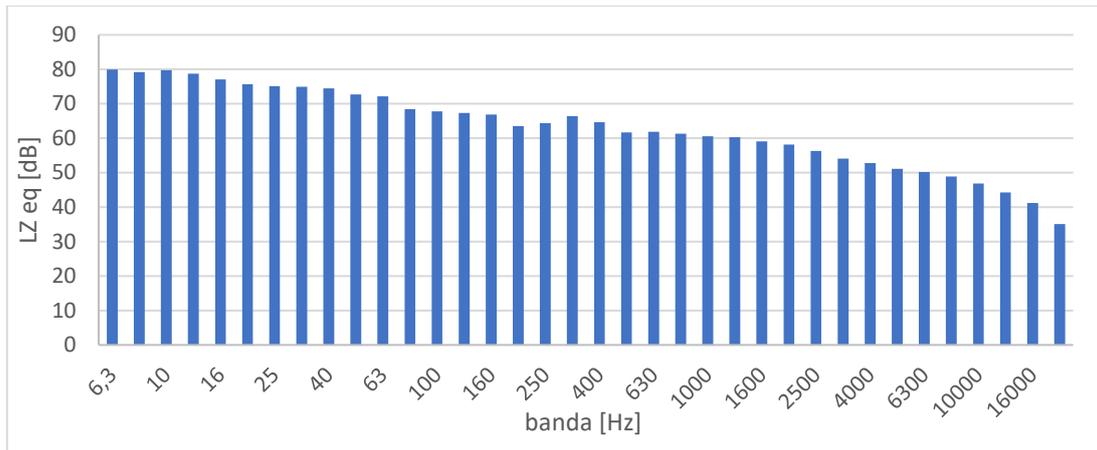


Figura 30: Spettro di risposta in bande di ottava per una misurazione del livello sonoro

8.3.2. Vibrometro

Le misure vibrometriche sono state eseguite con l'ausilio di un velocimetro "Instantel-MicroMate" di ultima generazione che permette di registrare le vibrazioni e le sovrappressioni d'aria con un'unica unità di controllo. (Instantel, 2018)

Il MicroMate dispone di quattro canali disponibili: tre per un geofono triassiale e uno per la pressione dell'aria o per un microfono di livello sonoro come evidenziato in Figura 31.



Figura 31: Elementi di misura collegati al MicroMate

Una porta ausiliaria opzionale e una porta USB integrata espandono le capacità di monitoraggio, grazie a questa funzione il MicroMate rileverà automaticamente i dispositivi collegati.

L'unità principale è dotata di un pannello superiore completamente sigillato mentre i connettori sono completamente sigillati, non corrosivi, etichettati e codificati a colori per una facile identificazione e installazione. Il range di temperatura di funzionamento per cui è stato progettato lo strumento varia da -40 °C a 55 °C.

Esso fornisce una soluzione completa di monitoraggio remoto con supporto per i programmi Instantel 's Auto Call Home™, THOR™ e Vision™.

Gli eventi registrati possono essere recuperati con una chiavetta USB (nessun PC richiesto) o utilizzando un modem e la funzione auto-chiamata di InstanTel. Con auto Call Home è possibile inviare automaticamente un evento al proprio computer ogni volta che viene ricevuto.

Lo strumento di misura fondamentale per ottenere le vibrazioni indotte dagli scavi è il geofono triassiale; nello specifico quello fornito con il MicroMate misura le vibrazioni al suolo su tre piani differenti: verticale, trasversale e longitudinale.

Ogni geofono è progettato con un alloggiamento di alluminio di forma circolare che fornisce una protezione dai possibili urti, questo contenitore è riportato in Figura 32.

Esso può essere imbullonato direttamente su superfici dure o può essere incollato su una superficie morbida.

Il geofono si collega direttamente alla porta codificata presente sull'unità di monitoraggio del MicroMate grazie all'ausilio di un cavo con lunghezza variabile dai 2m ai 5m.



Figura 32: Scatola di alluminio in cui è alloggiato il geofono InstanTel

È possibile impostare le diverse modalità di misura delle vibrazioni sia direttamente sullo strumento sia per via remota tramite connessione internet, garantendo quindi la possibilità di effettuare una parziale manutenzione dello strumento anche senza l'obbligo di recarsi sul luogo dell'installazione del MicroMate.

La scelta del settaggio del vibrometro risulta dipendere fortemente dall'obiettivo che si vuole raggiungere con l'utilizzo dello strumento.

Normalmente per delle operazioni di monitoraggio continuo si determina un limite di trigger oltre il quale lo strumento segnala un'allerta, registra il singolo evento con intervalli infinitesimi di misure per una durata prestabilita e una volta terminato l'evento invia immediatamente la registrazione al destinatario.

Se le vibrazioni non superano i limiti imposti lo strumento monitora di continuo il sito ma invia le misurazioni con cadenza regolare preimpostata, in modo tale da non intasare la linea telefonica per eventi di poco interesse.

In Figura 33 è mostrato un settaggio effettuato da remoto che corrisponde a quello sopra descritto per un monitoraggio classico.

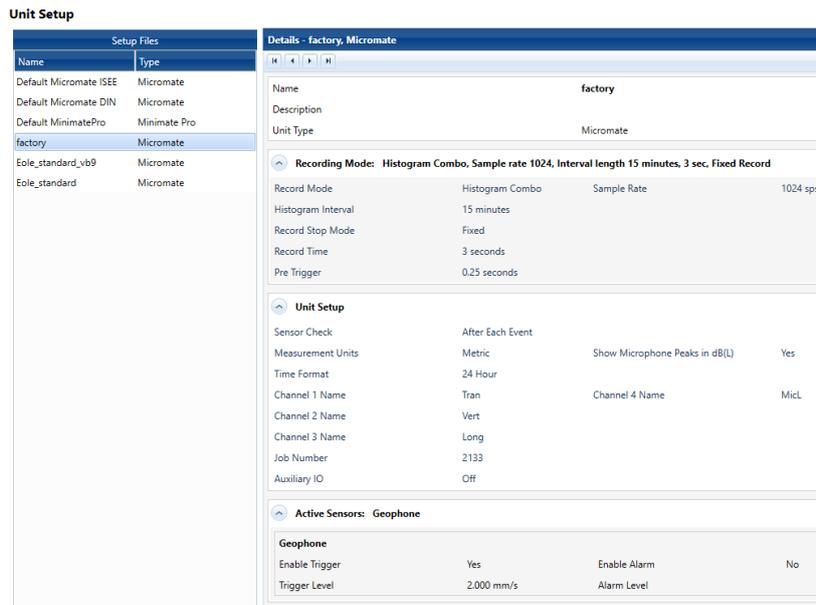


Figura 33: Setup di un MicroMate per il monitoraggio continuo

Nel caso in esame, poiché l'obiettivo prefissato prevedeva di dimostrare una correlazione tra le vibrazioni indotte nel terreno dai macchinari di scavo e il rumore da essi emanato, si è preferito adeguarsi alle modalità di registrazione imposte dal fonometro.

Pertanto, essendo le misure acustiche ottenute costanti e con intervallo di un secondo si è impostato il vibrometro con le stesse modalità ovvero una misura al secondo senza imporre nessun limite di allerta.

Questo in quanto, nel caso di superamento di una soglia imposta, automaticamente lo strumento avrebbe cambiato l'intervallo di campionamento rendendo difficile un paragone nello spazio del tempo con le misure ricavate dal fonometro.

Per poter effettuare questo studio è stato di importanza fondamentale predisporre una perfetta calibrazione degli orologi dei due differenti strumenti per poter osservare una chiara sincronia tra i due fenomeni fisici.

8.4. Verifiche normative

8.4.1. Rumore

Nella maggior parte dei casi le normative utilizzano come unità di misura del suono i dB (A) che si distaccano leggermente dai dB.

Questa distinzione è legata al fatto che l'orecchio umano ha la massima sensibilità tra 800 ed i 2000 Hz ed attenua fortemente suoni al di sotto dei 400 Hz. Ciò significa che un suono a bassissima frequenza (decine di Hz) per essere percepito deve avere una variazione di pressione di migliaia di volte più grande rispetto alla minima pressione di $20\mu\text{Pa}$ a 1000Hz.

Non solo l'orecchio umano reagisce alle varie frequenze in modo diverso, ma inoltre, la risposta ampiezza verso frequenza non è lineare e varia in funzione del valore medio di rumorosità dell'ambiente.

Da qui l'esigenza di trovare una misura di livello di pressione che simulasse più verosimilmente l'apparato uditivo umano.

A questo fine è di uso comune misurare il livello di pressione dopo aver inserito 4 tipi di equalizzazione normalizzate detti filtri di tipo: A, B, C e D.

Il filtro A, di nostro interesse, utilizza la curva di risposta del circuito corrispondente alla curva isofonica a 40 phons dell'orecchio umano e consente misure accurate di pressioni sonore modeste come quelle generate nell'ambito di una normale conversazione. È il filtro più usato per parecchie leggi d'inquinamento acustico.

Riassumendo per Decibel (A) o decibel pesato A (dBA) si intende la variazione di livello dell'intensità sonora che tiene conto della maggiore sensibilità dell'orecchio umano alle basse frequenze comportando delle modificazioni convenzionali (basate su considerazioni empiriche) dei valori della curva relativa al livello sonoro equivalente.

Per effettuare le verifiche secondo la normativa francese specificata al capitolo 5.2. è stato necessario effettuare una misura in assenza di lavorazioni all'esterno di uno dei cantieri per poter eseguire il confronto richiesto.

Infatti, per le lavorazioni edili la norma prevede una misurazione del livello equivalente e una dello spettro acustico, eseguite prima di iniziare i lavori, o all'interno di edifici o comunque su suolo pubblico.

Nel caso in esame non è stato possibile ottenere una registrazione antecedente all'inizio dei lavori pertanto si è scelto di effettuare una misurazione, in assenza di lavorazioni, vicino alle abitazioni nei pressi del cantiere Puits Abreuvoir e i due grafici richiesti sono mostrati nelle due figure seguenti.

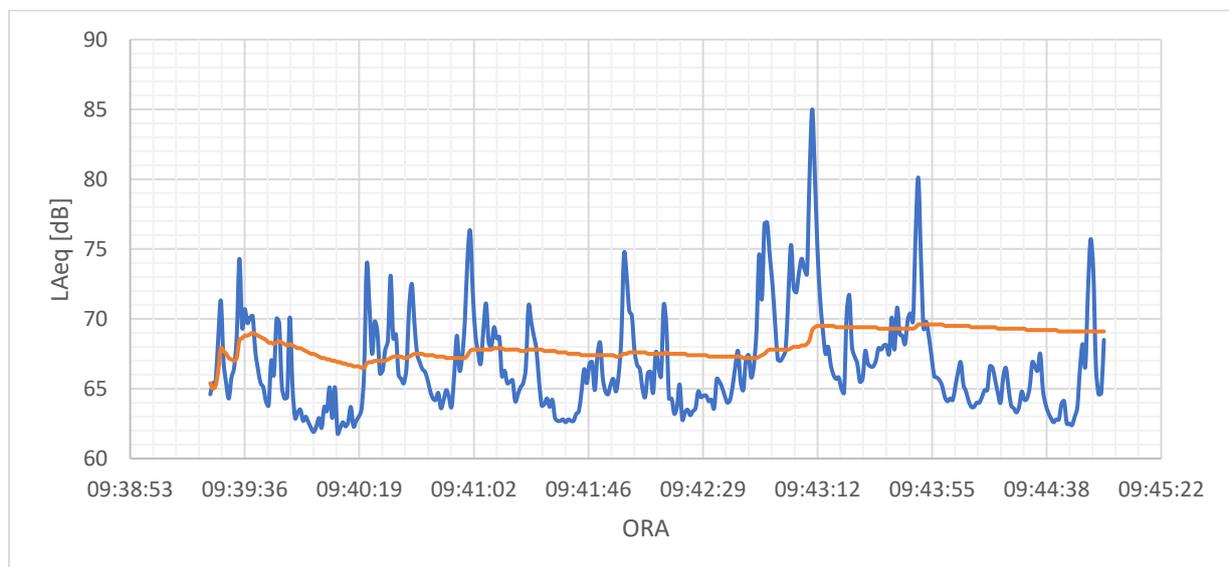


Figura 34: Livello acustico equivalente senza lavorazioni in esecuzione

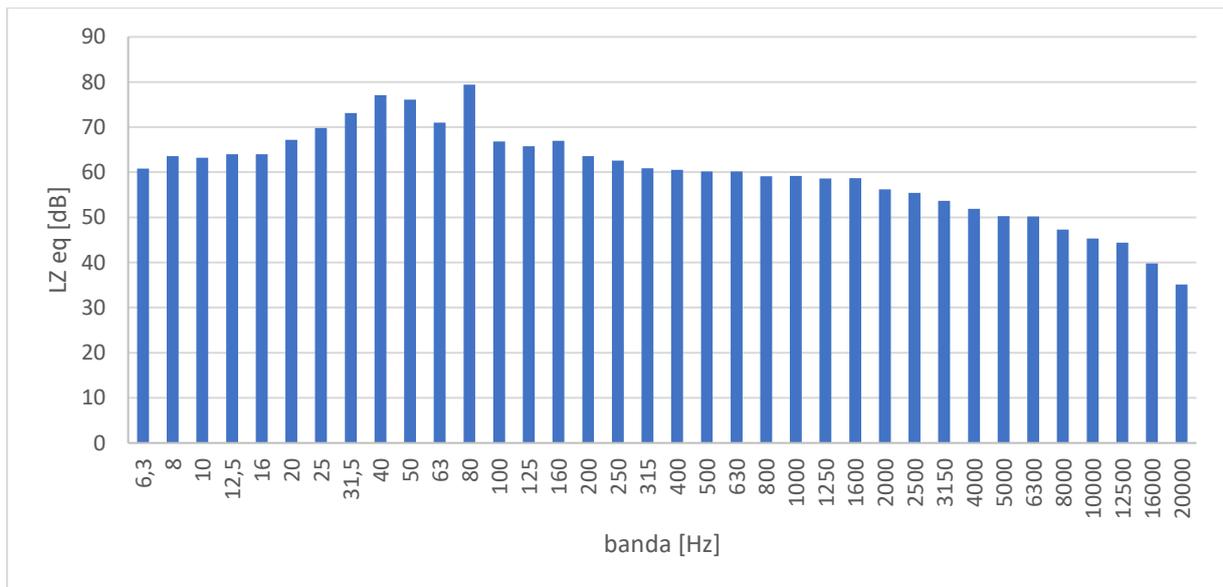


Figura 35: Spettro acustico in assenza di lavorazioni in esecuzione

Dalla curva in Figura 32 è necessario ricavare un valore medio di livello acustico da tenere in considerazione per le verifiche ed esso rappresenterà il livello di rumore ambientale compreso il rumore particolare.

Poiché sono presenti diversi picchi relativi al passaggio delle vetture che influenzano la media del livello acustico risulta essere più preciso considerare il valore corrispondente al 95 percentile raggiunto durante la misurazione. Esso corrisponde alla soglia superata dal 95 % dei valori registrati nell'intervallo di tempo considerato e risulta essere pari a 62,7 dB (A).

La norma francese permette un superamento del livello sonoro ambientale, precedentemente registrato, di una quantità di decibel differente a seconda della durata dell'evento:

- Per durate inferiori al minuto consecutivo è consentito superare di 11 dB (A) il livello di rumore ambientale misurato; pertanto il limite imposto per i cantieri analizzati e per durate inferiori al minuto sarà di 73,7 dB (A).
- Per durate da 1 a 5 minuti consecutivi è consentito superare di 10 dB (A) il livello di rumore ambientale misurato; pertanto il limite imposto per i cantieri analizzati e per durate tra 1 e 5 minuti sarà di 72,7 dB (A).

All'aumentare delle durate diminuiscono sempre più i dB (A) consentiti fino ad arrivare a:

- Per durate superiori alle 8 ore consecutive è consentito superare di 5 dB (A) il livello di rumore ambientale misurato; pertanto il limite imposto per i cantieri analizzati e per durate prolungate sarà di 67,7 dB (A).

Nel caso in esame le durate delle diverse lavorazioni persistono per tutto il periodo di scavo quindi nonostante le registrazioni siano tra i 5 e 10 minuti consecutivi risulta essere più corretto e più cautelativo considerare la soglia corrispondente a durate superiori a 8 ore consecutive.

Per quanto concerne invece il grafico in Figura 33, i valori limite di emergenza spettrale sono di 7 dB (A) nelle bande di ottava standardizzate centrate su 125 Hz e 250 Hz e 5 dB (A) nelle bande di ottava normalizzate centrate su 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.

In altre parole, è consentito superare i valori misurati del livello sonoro ambientale in banda di ottava di 7 dB (A) per le bande centrali e 5 dB (A) per le bande ad alta frequenza.

È evidente come lo Stato francese consenta una elevata libertà decisionale alla ditta costruttrice che è tenuta a rispettare dei limiti basati su una misurazione ambientale autoeseguita.

Contrariamente in Italia lo Stato preferisce delegare ai Comuni l'onere di imporre delle soglie che potranno differire a seconda delle condizioni ambientali incontrate.

Per un confronto con la legge italiana, prendendo ad esempio la normativa del Comune di Torino, è riportato che l'attività di cantiere rilevata al di fuori di esso non può superare nelle ore diurne i 75 dB (A) per misure di 1 ora consecutiva e i 70 dB (A) per misure generiche durante l'arco della giornata.

Quindi risulta essere leggermente più restrittiva ma in linea con la normativa francese sul rumore proveniente da lavorazioni edili.

8.4.2. Vibrazione

L'analisi da svolgere volge verso la verifica delle soglie previste per le vibrazioni indotte su edifici adiacenti ai vari siti di lavoro, nel caso in cui le velocità riscontrate siano dovute alle lavorazioni di cantiere.

Secondo la normativa francese i valori limite in funzione della frequenza dipendono dalla tipologia di vibrazione (continuo o impulsiva) e dalla categoria dell'edificio monitorato.

La maggior parte degli edifici presenti intorno ai pozzi e alle stazioni in costruzione sono edifici residenziali e sono considerati di classe sensibile.

Le vibrazioni indotte dai macchinari di scavo non possono essere considerate continue a differenza di quelle che sarebbero provocate dallo scavo del tunnel mediante fresa meccanica. Pertanto, i limiti a cui fare riferimento sono riportati in Figura 36.

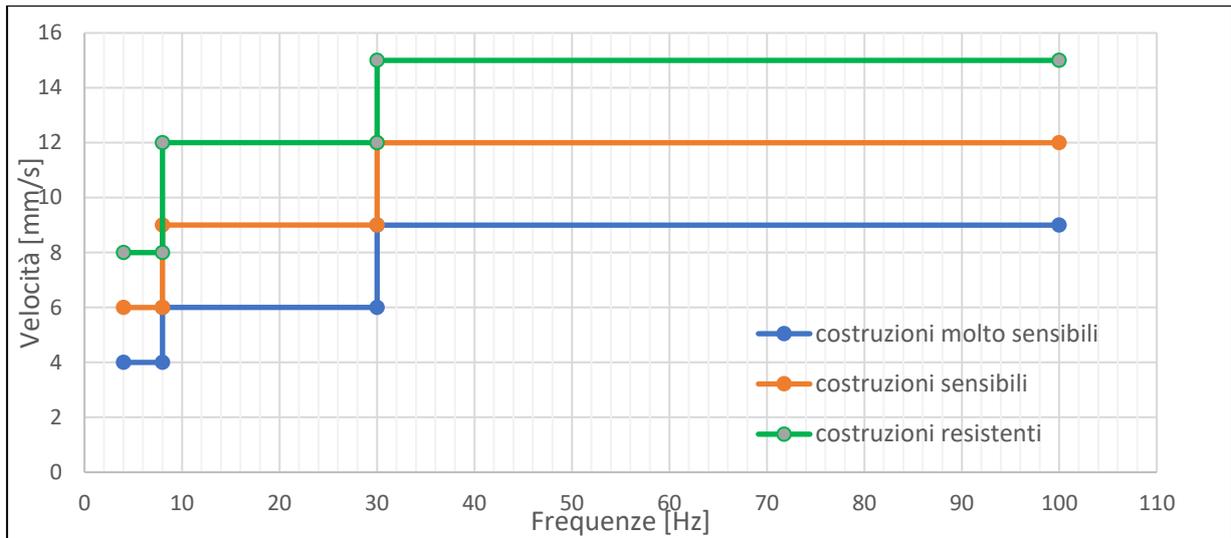


Figura 36: Limiti delle vibrazioni impulsive in relazione alla frequenza

Per un confronto con la legge italiana è necessario riferirsi alla normativa tedesca DIN 4150 che fornisce i grafici per il superamento della soglia in tre diverse categorie di edificio come specificato nel capitolo 3.1.4., e i relativi valori per tutte le casistiche. (Figura 37)

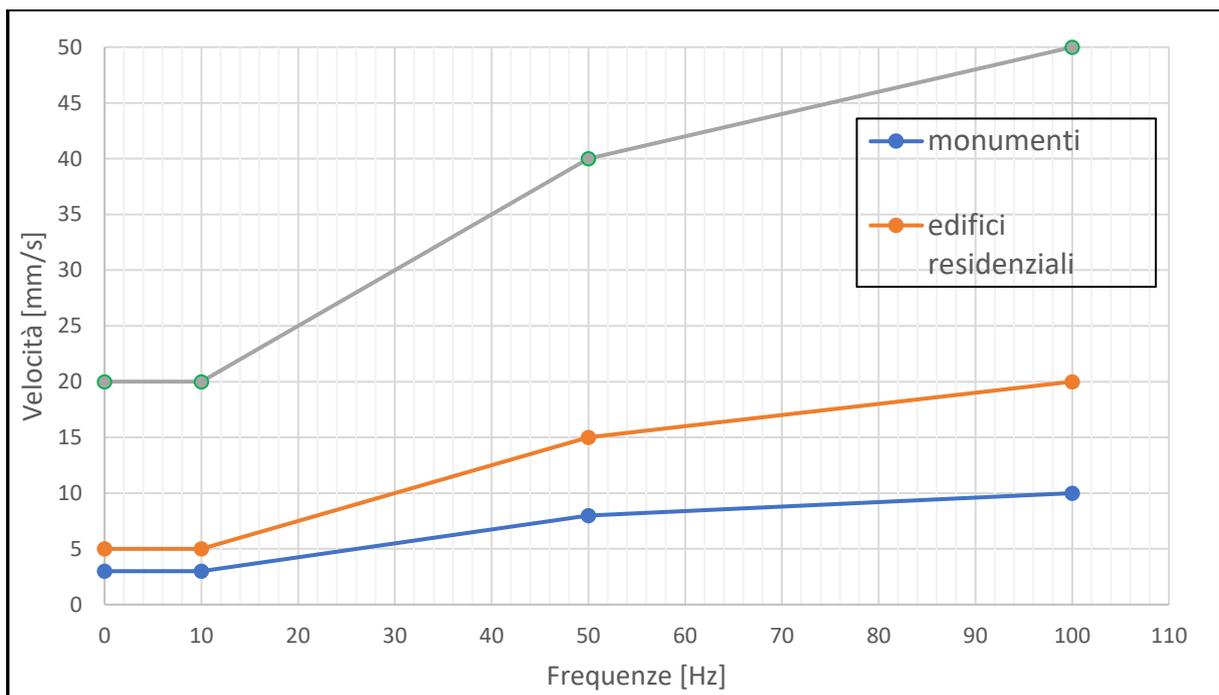


Figura 37: Grafico dei limiti della velocità di vibrazione secondo la DIN 4150

Essi risultano essere leggermente più severe rispetto ai limiti imposti dalla legge francese riportata in precedenza.

8.5. Risultati misurazioni fonometriche per impianti a motore

Come già ribadito in precedenza questa particolare fonte di inquinamento acustico mantiene circa costante il livello sonoro nel tempo durante l'intero periodo in cui il motore risulta essere acceso.

I due fini principali di queste misurazioni sono stati di controllare il rispetto dei limiti imposti dalla legge ed evidenziare il dissipamento del rumore con l'allontanarsi dalla sorgente.

Quest'ultima analisi non è stata di semplice soluzione in quanto uscendo dai vari siti di lavoro aumentano i rumori non provenienti dalle lavorazioni come per esempio quelli dovuti al traffico stradale e pertanto risulta molto complicato riuscire a separare le diverse misurazioni in base alla fonte. Tuttavia, il passaggio di singoli veicoli porta ad un brusco aumento del livello sonoro fino a valori ben superiori rispetto a quelli registrati di continuo, questo picco si smorza non appena l'auto si allontana.

Quindi nel caso del monitoraggio di rumori pressochè costanti, come i motori analizzati, si riesce a distinguere la diversa fonte.

8.5.1. Impianto di aerazione

Il primo motore monitorato è un impianto di aerazione presente all'interno del cantiere del pozzo di Abreuvoir, quindi in un sito di limitata estensione con uno spazio dedicato alle lavorazioni ridotto (Figura 38).

I risultati hanno evidenziato come all'interno del cantiere e in assenza di altre lavorazioni in contemporanea, il livello sonoro si attesta intorno agli 85 dB (A) il che giustifica ampiamente l'obbligo da parte di tutto il personale presente all'interno del sito di indossare i tappi protettivi per le orecchie.

I risultati del livello equivalente per un periodo limitato a 5 minuti e 12 secondi e ad una distanza di circa 3 metri dal macchinario e lo spettro in bande di ottava per lo stesso evento sono riportati di seguito.



Figura 38: Impianto di aerazione

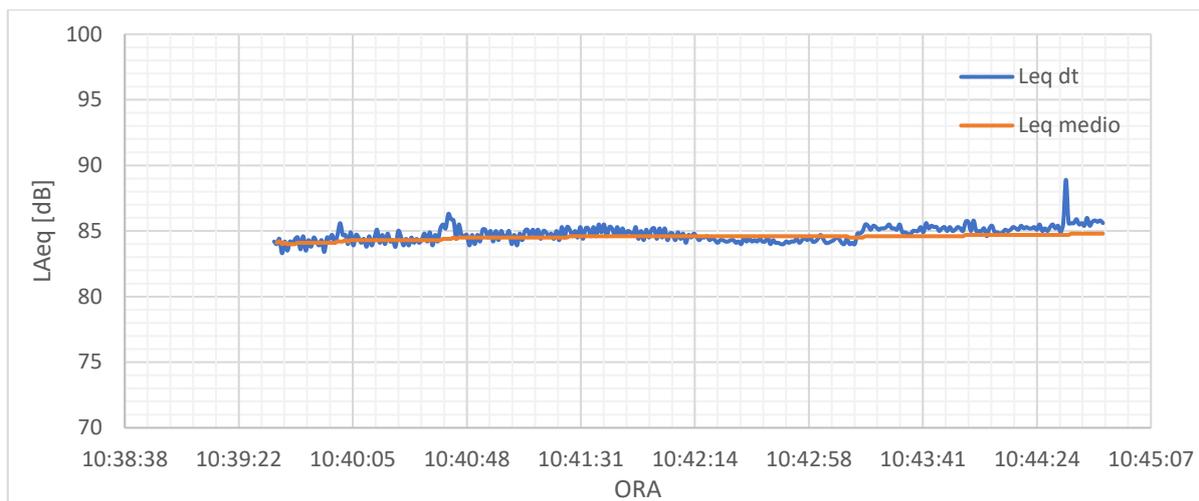


Figura 39: Grafico del livello equivalente in funzione del tempo a distanza 3 metri dall'impianto di aerazione

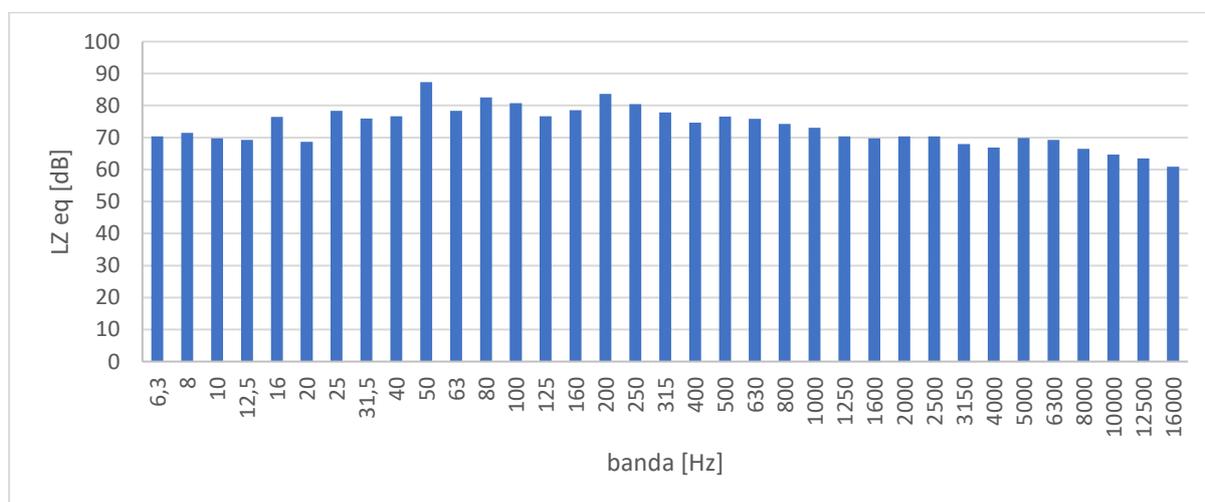


Figura 40: Spettro in bande di terzi di ottava della misurazione effettuata a distanza 3 metri dall'impianto di aerazione

Una volta eseguito il rilevamento ci si è spostati appena al di fuori del cantiere (Figura 41), al di là della barriera antirumore, per eseguire una seconda misurazione ad una distanza di circa 10 metri dal macchinario ma sul marciapiede opposto alle abitazioni più vicine al sito e i risultati ottenuti sono riportati di seguito.

Il risultato mostra come vi sia la presenza di diversi picchi di elevata intensità ma breve durata che sono riconducibili al passaggio di alcune autovetture.

Effettuando il calcolo del 95 percentile della registrazione come effettuato per il valore ambientale considerato dalla normativa francese, il livello sonoro si è abbassato fino a 69,8 che risulta essere una misura inferiore a quelle prodotte dalla circolazione dei veicoli.



Figura 41: Posizione rilevamento

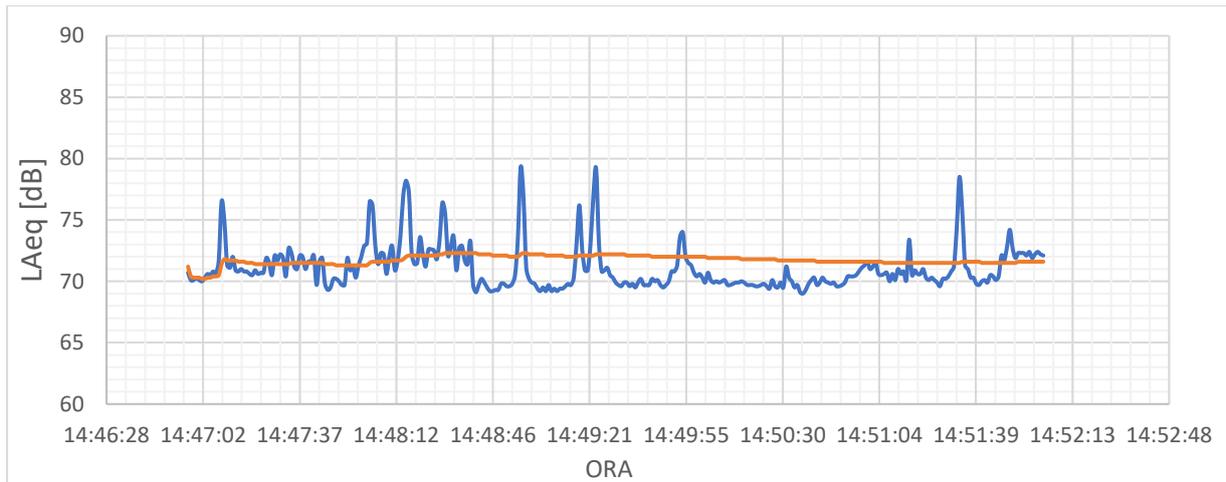


Figura 42: Grafico del livello equivalente in funzione del tempo a distanza 10 metri dall'impianto di aerazione

La registrazione mostrata rientra all'interno dei limiti di legge previsti a Parigi a seconda della valutazione sulla categoria di durata da rispettare. Infatti, se si considera il rumore solo per la durata della registrazione il valore di livello sonoro equivalente mediato per 5 minuti consecutivi non supera il livello medio ambientale, 62,7 dB (A), più l'aliquota di 10 dB (A) prevista per il livello di emergenza.

Ma essendo il motore acceso per quasi la totalità del tempo di lavorazione risulta essere più adeguato considerare l'aliquota minima di 5 dB corrispondente a durate superiori a 8 ore consecutive, ottenendo così una soglia di 67,7 dB contro i 69,8 dB misurati.

Se il cantiere si trovasse nel Comune di Torino rispetterebbe la normativa infatti il livello acustico derivante dal motore non presenta picchi superiori a 75 dB ma il livello medio di un'ora sarebbe inferiore ai 70 dB consentiti anche se di poco.

In seguito, si è eseguita una misura sul lato del marciapiede opposto cioè quello prossimo alle più vicine abitazioni e quindi nella posizione più adeguata al fine di eseguire una verifica legislativa. (Figura 43)

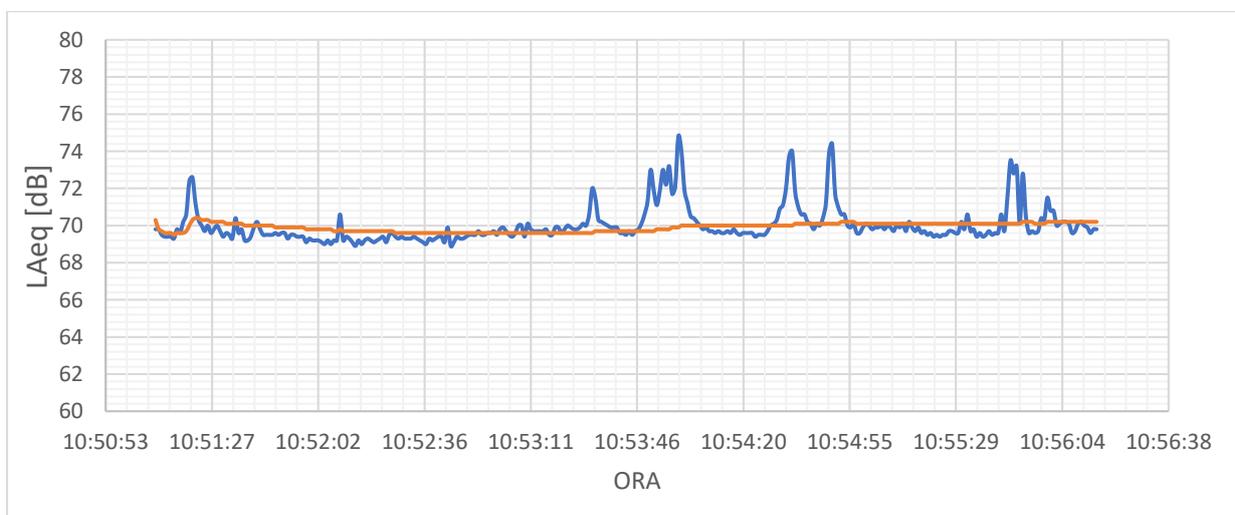


Figura 43: Grafico del livello equivalente in funzione del tempo a distanza 14 metri dall'impianto di aerazione

Anche in questo caso si distinguono agevolmente i picchi dovuti al passaggio di veicoli a motore e per escluderli si è cercato il valore corrispondente al 95 percentile che è risultato essere pari a 69,2 dB (A).

Con questa lieve riduzione del livello sonoro medio la legge di Torino sarebbe rispettata dal cantiere. Pertanto, è evidente come vi sia ancora una diminuzione del rumore ma che essa risulta essere di minore entità rispetto a quella avvenuta nei primi metri, probabilmente anche grazie alla presenza della barriera antirumore. Quest'ultima ipotesi è anche confermata dal confronto tra i 3 diversi spettri acustici riportati in Figura 44.

Nel caso della registrazione più prossima al confine del cantiere non viene rispettata la normativa francese né per frequenze medie né alte mentre allontanandosi fino al marciapiede adiacente alle abitazioni i valori rientrano nei limiti imposti.

Per esempio, per 500 Hz si ha 60,9 dB che è inferiore al limite di 65,2 dB.

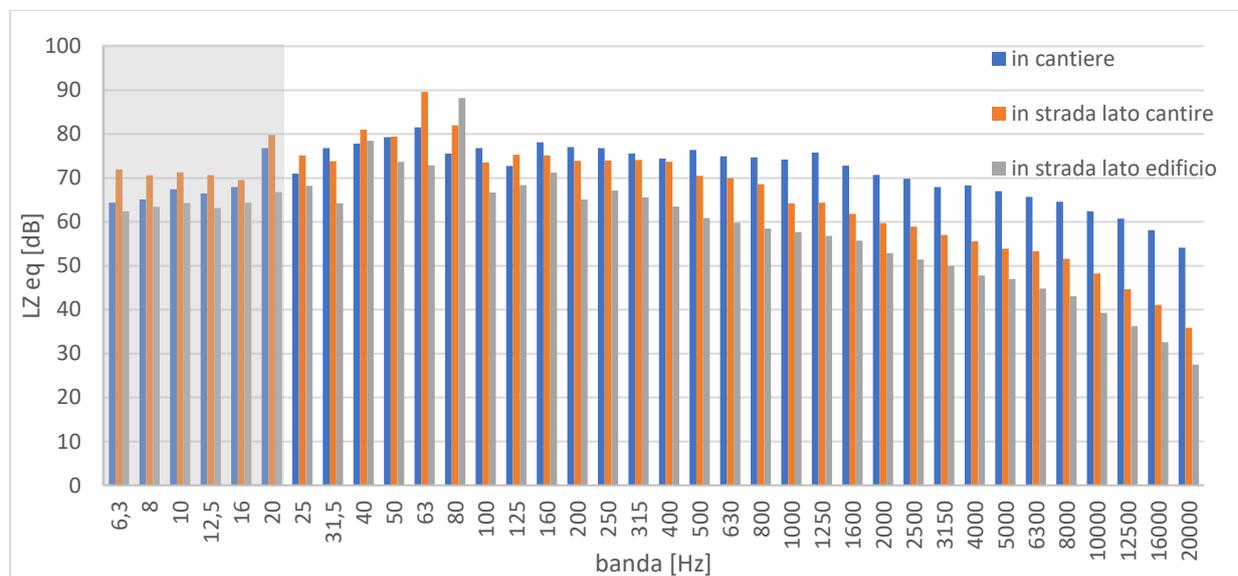


Figura 44: Confronto tra gli spettri delle 3 diverse misurazioni fonometriche

Infatti, è molto evidente un abbassamento del livello sonoro per frequenze elevate, come richiesto alle barriere anti-rumore mentre per frequenze basse si può avere anche un'amplificazione del livello sonoro.

In alcuni casi questo fenomeno può essere dovuto al passaggio di veicoli in piena accelerazione che si tramutano in dei picchi di livello sonoro nello spettro.

8.5.2. Motore della macchina perforatrice

L'altro motore analizzato è quello di una macchina perforatrice in azione nel cantiere di GPM (Figura 45), in particolare nella parte a cielo aperto, nella zona ovest del piazzale.

Anch'esso si trovava in prossimità del confine del cantiere pertanto è stato possibile eseguire una misura nelle vicinanze dello strumento e una fuori dal cantiere per poter effettuare un paragone tra le due.

La misura è stata presa durante una fase di stallo della perforatrice ma di accensione del motore; vi è comunque la presenza del disturbo dovuto alle altre lavorazioni in atto nel vasto cantiere di Porte Maillot.

Inizialmente la distanza a cui è stato installato il fonometro sul treppiedi ad una altezza di circa 1,5 metri come richiesto dalla normativa, era di soli 4 metri dal motore acceso e i risultati del livello sonoro per una durata di circa 6 minuti, sono riportati in Figura 46.



Figura 45: Macchina perforatrice

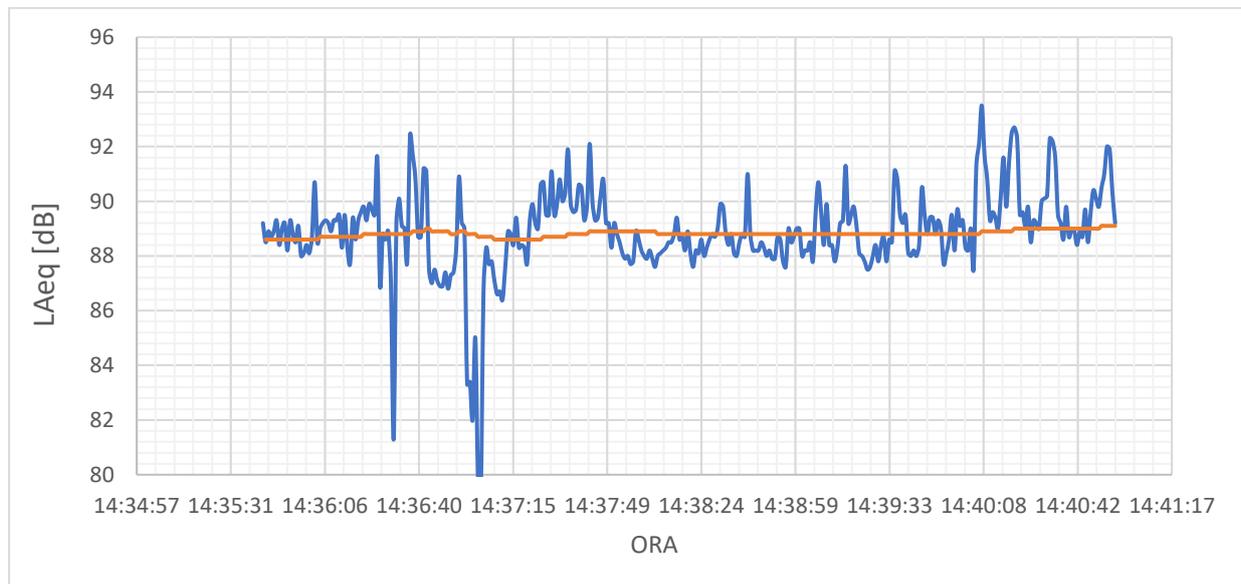


Figura 46: Grafico del livello sonoro equivalente in funzione del tempo per il motore di una macchina perforatrice a 4 metri di distanza

Eseguendo il calcolo del 95 percentile per la registrazione mostrata si ottiene un valore del livello acustico medio di 87,1 dB (A).

Uscendo dal cantiere, a circa 18 metri dal motore, l'evento registrato risulta notevolmente inferiore ma con dei picchi dovuti al rumore stradale poiché il piazzale di Porte Maillot è molto trafficato.

Il rumore proveniente dal macchinario non è di facile rilevamento in quanto mischiato a quelli derivanti da attività antropiche ma si può ipotizzare mediamente intorno ai 74 dB (A) dal grafico riportato di seguito. (Figura 47)

Il risultato analizzato, considerato il 95 percentile, è di 72,8 dB (A) e come nel caso precedente se si considera un rumore di durata prolungata non si rispettano i limiti prestabiliti dalla norma francese che consente un livello acustico mediato di 67,7 dB (A) massimi come specificato nel capitolo 8.4.1.

Volendo effettuare una verifica con la normativa specifica vigente a Torino, il limite di livello acustico medio supererebbe i 70 dB imposti con la possibilità quindi di incorrere in sanzioni.

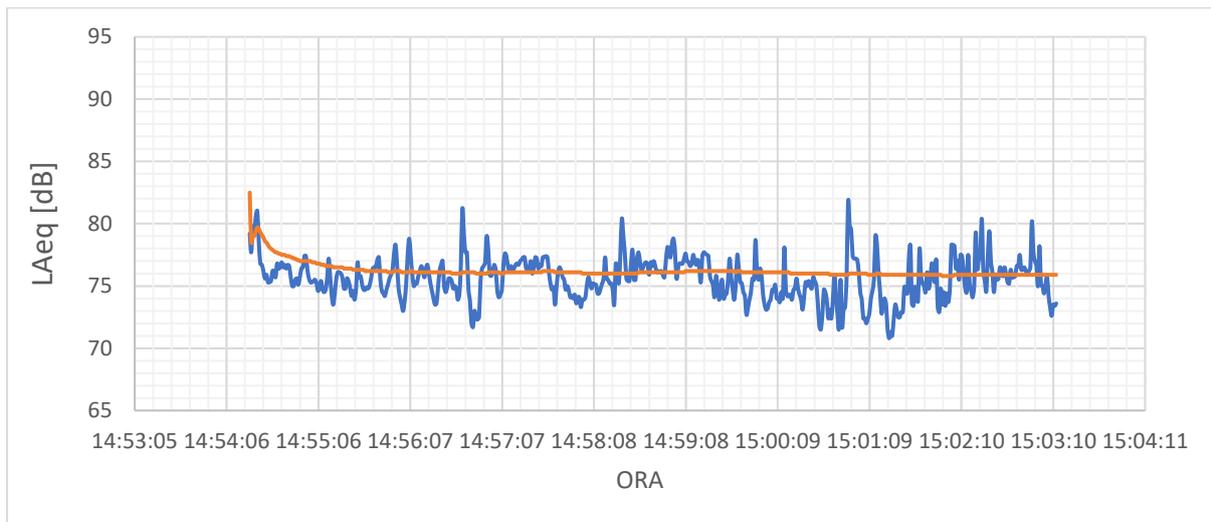


Figura 47: Grafico del livello sonoro equivalente in funzione del tempo per il motore di una macchina perforatrice a 18 metri di distanza

Per quanto riguarda gli spettri ricavati dalle due diverse misurazioni (Figura 48) si può affermare, con le dovute precauzioni, che il livello equivalente si è ridotto notevolmente per le alte frequenze mentre resta ancora elevato e persino superiore per quelle basse che però sono influenzate dalla prossimità della strada.

Secondo la normativa francese il livello equivalente in strada dovrebbe avere un massimo nelle bande centrali di circa $75,2 + 7$ dB (A) quindi 82,2 dB (A) (Capitolo 8.4.1.) mentre per le alte frequenze si riduce notevolmente fino a $60,2 + 5$ dB (A) cioè 65,2 dB (A) perciò si è leggermente al di sopra dei limiti in quanto per esempio la banda a frequenza 500 Hz arriva a 66,9 dB.

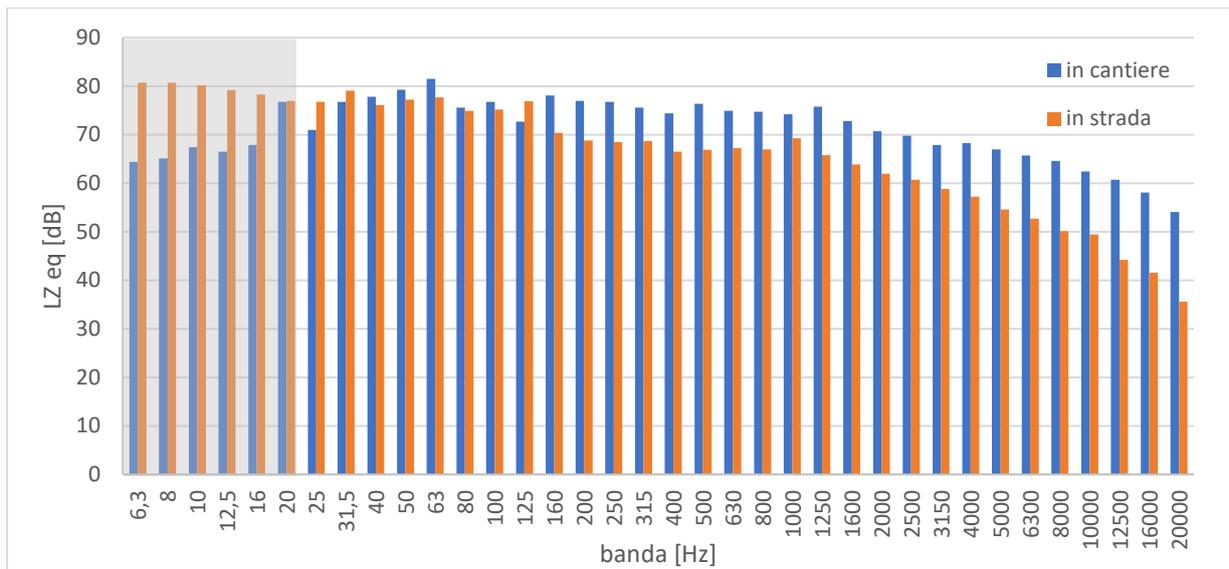


Figura 48: Confronto tra gli spettri in bande di un terzo di ottava delle due misurazioni effettuate

9. ANALISI DI EVENTI SONORI E VIBRATORI

Le diverse lavorazioni di scavo imprimono delle forze al terreno che si tramutano in spostamenti o vibrazioni del suolo; essi si propagano a partire dalla sorgente fino al completo dissipamento in percorsi dipendenti da diversi fattori.

In contemporanea si ha la presenza di eventi sonori distinti, più o meno intensi, che possono essere collegati alle lavorazioni in atto e di conseguenza anche alle vibrazioni indotte sul terreno.

In questo capitolo vengono riportate ed analizzate alcune misurazioni effettuate nei pressi di differenti macchinari di scavo che hanno prodotto sia rumore che vibrazioni, nell'intento di trovare una spiegazione al fenomeno e indicare gli studi da perseguire per poter comprendere il legame tra i due eventi in relazione alle casistiche affrontate.

9.1. Jet Grouting

La prima misurazione ad essere analizzata si riferisce alla tecnica del Jet Grouting utilizzata per migliorare le caratteristiche tecniche del terreno presente nei pressi della zona in cui sorgerà un pozzo.

In questo caso il sito osservato è stato quello di Abreuvour dove si stava inserendo questa miscela nel terreno fino a profondità di circa 20 metri.

La posizione del buco di perforazione veniva cambiata ogni giorno effettuando quindi diversi innesti ravvicinati di materiale bentonitico.

Man mano che lo strumento scende più in profondità si aggiunge meccanicamente un braccio al macchinario fino a raggiungere le profondità prefissate.

Ne consegue che il rumore e le vibrazioni maggiori si siano riscontrate nei periodi in cui lo strumento era intento a perforare la parte più superficiale del terreno, mentre, una volta arrivato a profondità maggiori, le vibrazioni in superficie si dissipassero, almeno in parte, nello strato di terreno attraversato.

Come si evince anche dall'immagine riportata in Figura 49, inizialmente fonometro e velocimetro sono stati posizionati ad una distanza di circa 4 metri dal macchinario perforatore. Questa scelta ha permesso di ottenere delle misure di rumore pulite cioè senza interferenze dovute a lavorazioni adiacenti in quanto il livello sonoro dovuto al Jet Grouting raggiungeva valori molto maggiori rispetto ai rumori provenienti dal resto del cantiere.

Si è potuto così effettuare un paragone tra le misure di vibrazione e di rumore prese nello stesso periodo di tempo (tra i 5 e i 10 minuti) e ipotizzare un legame tra le due.



Figura 49: Jet Grouting

Questo procedimento è stato messo in pratica più volte pertanto di seguito vengono riportati i risultati delle misurazioni più significative.

È importante specificare come i fori di sondaggio dai quali è fatto penetrare il macchinario siano diversi a seconda delle misurazioni ma allo stesso tempo a distanza di pochi centimetri tra loro.

Questa condizione ci permette di poter confrontare le diverse misure effettate con la certezza che le caratteristiche dei terreni attraversati siano le stesse e anche le profondità dei vari strati non differiscano in modo influente sull'analisi svolta.

➤ Evento 1

| FISHE | |
|-------------------------|---------------------------|
| CANTIERE | Abreuvor |
| STRUMENTO | JET Grouting, in cantiere |
| DATA MISURA | 26/11/2018 |
| ORA | 10:14:47 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:10:29 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:10:29 |

Tabella 8: Fische per la registrazione dell'evento

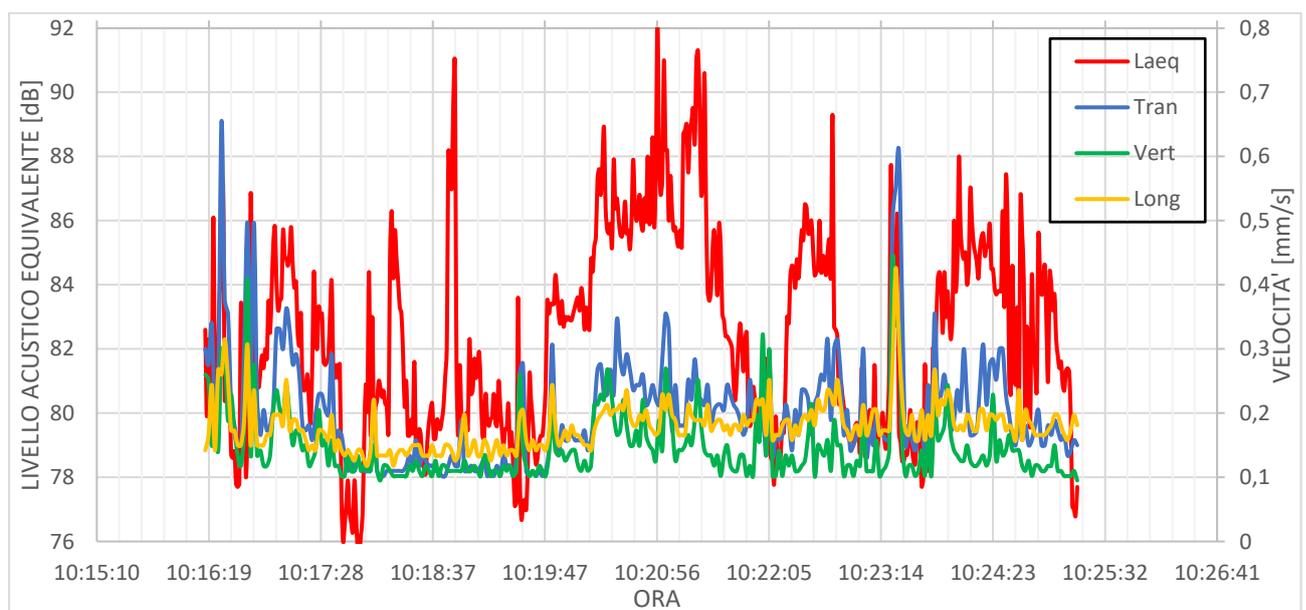


Figura 50: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

In questo caso si stava introducendo la bentonite tramite il processo di Jet Grouting ad una profondità abbastanza elevata, circa 20 metri, pertanto i risultati mostrano come il livello medio di entrambe le misurazioni non sia elevato.

Il livello sonoro varia tra i 76 e i 92 dB (A) mentre le vibrazioni sono limitate infatti, non raggiungono mai una velocità di 1 mm/s.

A causa del limitato livello raggiunto dalle velocità di vibrazione, difficilmente questa misurazione può rappresentare la presenza di un legame evidente tra le due grandezze fisiche

analizzate; nonostante ciò è riscontrabile come ad alcune vibrazioni del terreno più significative corrisponda anche un aumento repentino del rumore.

Per molti altri periodi invece il moto vibratorio resta inferiore agli 0,3 mm/s, eventi di così limitata entità non possono rappresentare una prova del legame presente.

Risulta senza alcun significato eseguire una verifica nei riguardi delle vibrazioni in quanto anche per frequenze ridotte tutte le normative considerano la possibilità di un eventuale danno strutturale a partire da una velocità di 2 mm/s.

Questo macchinario non produce mai tali vibrazioni e anche considerando una possibile risonanza con le strutture prossime al sito quasi sicuramente la vibrazione si dissiperebbero nel percorso compreso tra la lavorazione e la struttura.

Per nessuno degli eventi analizzati in questo paragrafo si è dunque eseguita una verifica di sicurezza nei riguardi del moto vibratorio indotto dalla lavorazione del Jet Grouting.

➤ Evento 2

| FISHE | |
|-------------------------|---------------------------|
| CANTIERE | Abreuvor |
| STRUMENTO | JET Grouting, in cantiere |
| DATA MISURA | 17/12/2018 |
| ORA | 15:39:11 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:07:01 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:07:01 |

Tabella 9: Fishe per la registrazione dell'evento

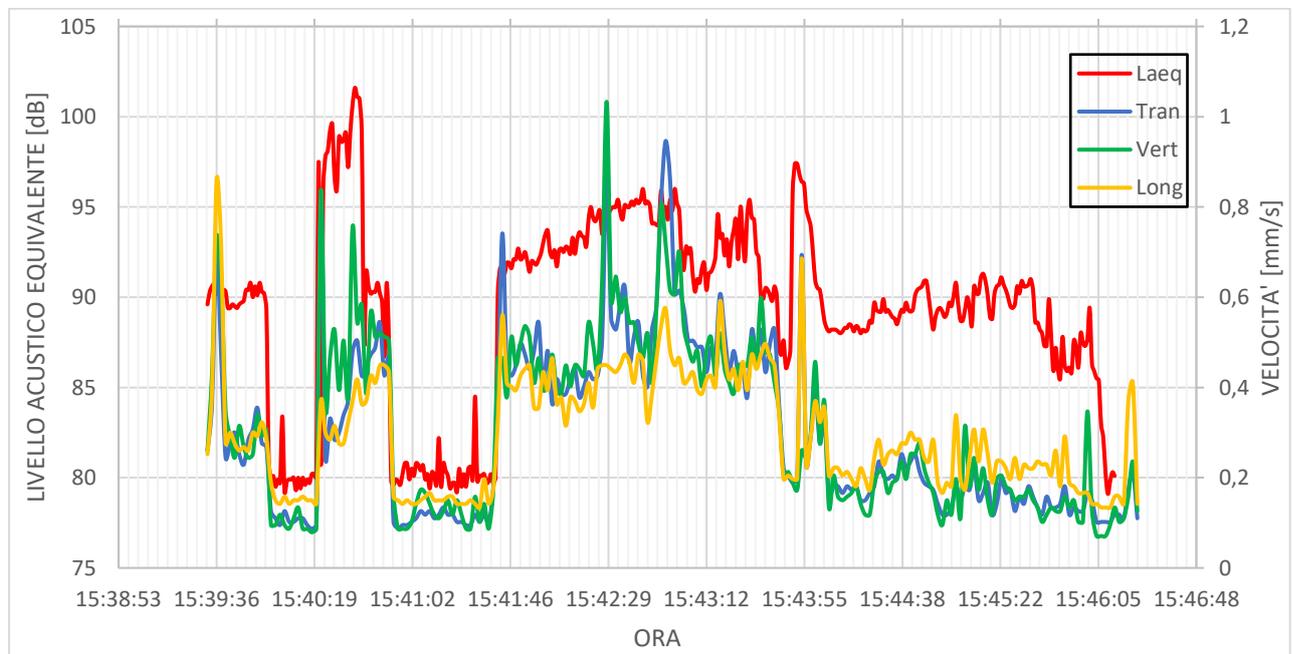


Figura 51: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

La misurazione mostrata in Figura 51 è stata registrata durante una lavorazione ancora nello strato superficiale del terreno e si può notare come oltre ad un livello sonoro ben più elevato

rispetto al precedente rilevamento (80-95 dB (A)) vi è una continua e ben marcata dipendenza tra il rumore e le vibrazioni.

Nonostante i livelli di velocità raggiunti siano ben al di sotto delle soglie imposte dalla normativa, l'ipotesi di una dipendenza del rumore dagli eventi vibratori può trovare un riscontro in questa registrazione infatti ad ogni aumento o diminuzioni di una delle due grandezze corrisponde sempre la medesima azione dell'altra.

Risulta interessante anche specificare come la componente verticale del moto vibratorio mostra i valori di picco massimo mentre a profondità maggiore, illustrata nel caso precedente, era stata la velocità trasversale a registrare i maggiori spostamenti.

➤ Evento 3

| FISHE | |
|-------------------------|---------------------------|
| CANTIERE | Abreuvoir |
| STRUMENTO | JET Grouting, in cantiere |
| DATA MISURA | 19/12/2018 |
| ORA | 11:06:35 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:09:40 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:09:40 |

Tabella 10: Fische per la registrazione dell'evento

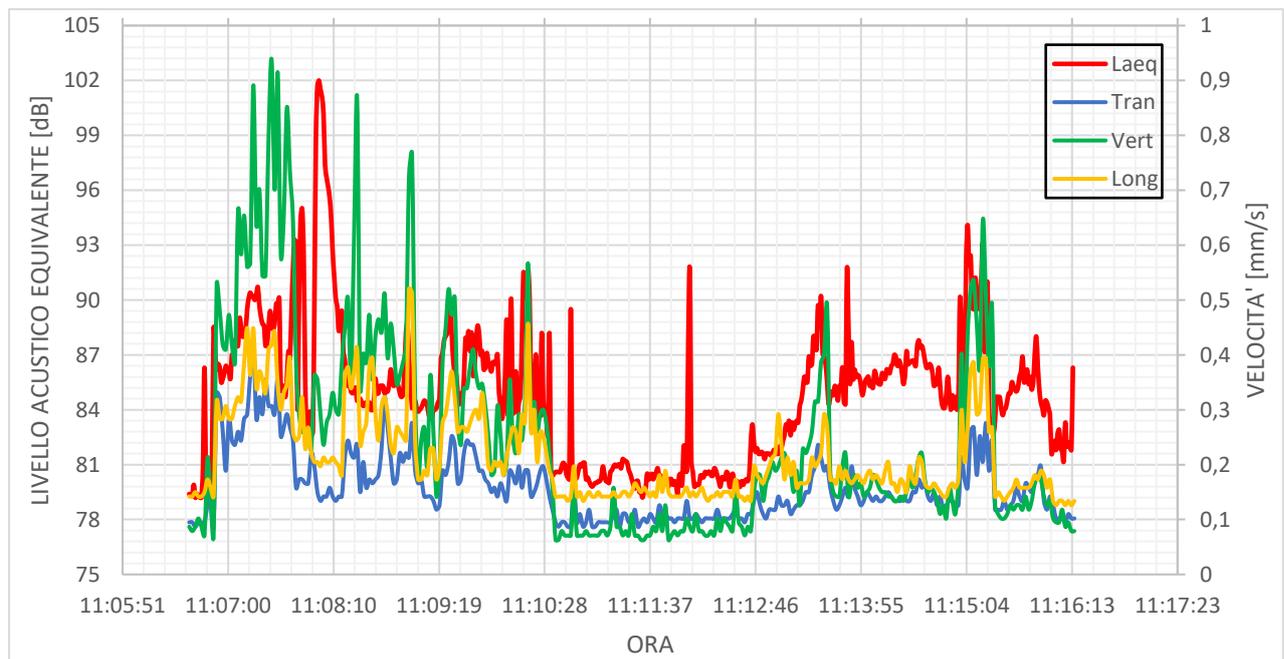


Figura 52: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

In mezz'ora del grafico mostrato in Figura 52 si può notare un periodo di tempo in cui il macchinario era temporaneamente fermo a causa del tempo impiegato per aggiungere un braccio meccanico infatti, le velocità e il livello acustico tra le 11:10:30 e le 11:12:40 sono pressochè costanti e di entità molto basse.

Il picco presente nella curva del rumore è molto probabilmente un suono meccanico e pertanto non ha un riscontro sulla curva delle velocità di vibrazione.

In questo caso la lavorazione è partita dal piano campagna per arrivare fino al fondo del foro a fine misurazione e si può osservare come soprattutto gli eventi vibratori risentano della profondità della fonte mostrando una netta riduzione del livello misurato.

Già attraverso le differenti vibrazioni ottenute dai due eventi precedentemente analizzati si poteva presupporre questa puntualizzazione e quest'ultima analisi conferma la precedente tesi in quanto il livello acustico risente meno rispetto a quello vibratorio della distanza dal punto di sollecitazione nel terreno.

Questo fatto può anche dipendere dalla natura del terreno attraversato, dalla presenza o meno di una falda superficiale o per la differente modalità di propagazione delle due tipologie di evento all'interno dello stesso materiale.

Di seguito viene riportato il grafico contenente un confronto tra gli spettri sonori delle tre misurazioni dove si può notare come l'evento 1, avvenuto a profondità maggiori, abbia dei livelli equivalenti inferiori per bande ad alta frequenza mentre a basse frequenze i tre eventi mostrano livelli sonori dello stesso ordine di grandezza.

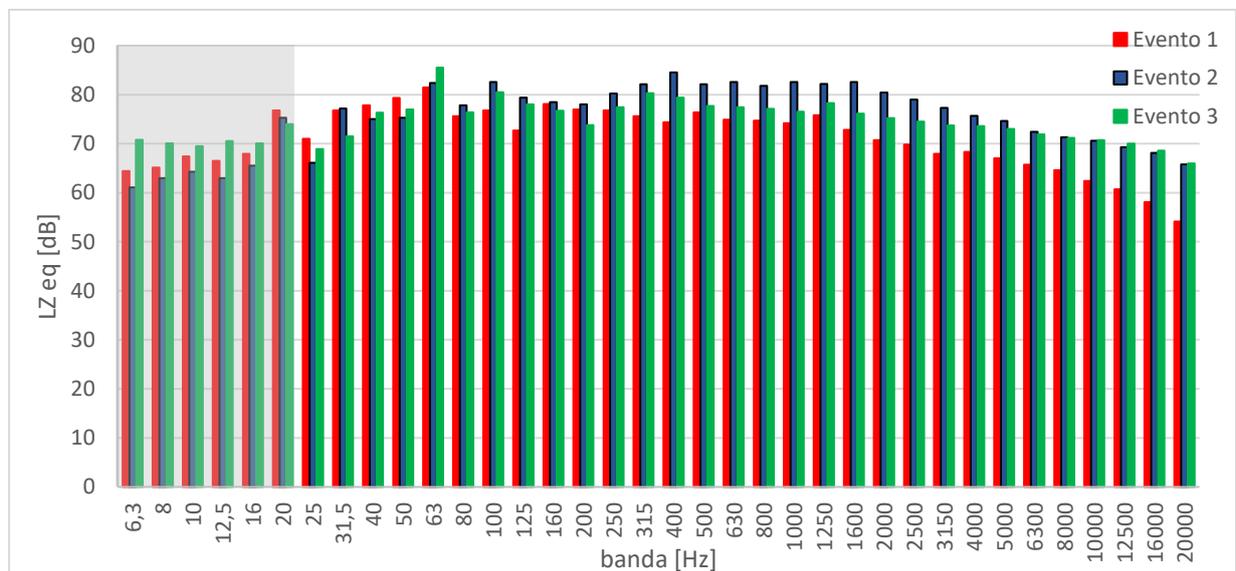


Figura 53: Confronto tra gli spettri sonori dei 3 eventi analizzati

9.2. Parois Moulées

Lo scavo dei diaframmi, come già citato in precedenza, nella fase iniziale provoca intense vibrazioni e livelli acustici molto elevati dovuti all'utilizzo di un escavatore a benna mordente di grandi dimensioni.

Esso agisce direttamente sul terreno per dare la forma allo scavo e iniziare a rimuovere del materiale prima di inserire la bentonite. L'operazione è raffigurata nelle due figure seguenti.

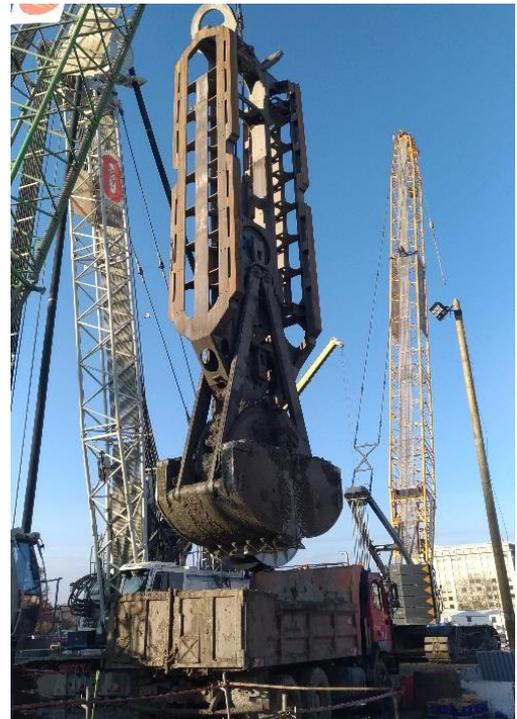


Figura 54: Pala a benna mordente in fase di scavo e rilascio materiale

Questo macchinario è stato monitorato mentre era in azione nel cantiere di GPM, più precisamente nella zona dedicata alla stazione a cielo aperto verso nord, pertanto ad una distanza elevata dalle abitazioni.

Per questo motivo non è stato utile effettuare delle misurazioni nei pressi degli edifici confinanti con il piazzale poiché sia le vibrazioni che il livello sonoro si dissipavano totalmente nel tragitto o si confondevano completamente con gli eventi derivanti dal traffico stradale.

È stato registrato un singolo evento di questa lavorazione, riportato in Figura 53, in quanto una volta scavato l'inizio del pozzetto e introdotta la bentonite mista ad acqua, sia il livello vibratorio che quello acustico perdono di significato.

L'introduzione della bentonite si rende necessaria per agevolare lo scavo infatti questo composto liquido disaggrega il terreno rammollendolo e consentendo una più facile rimozione del terreno mediante la pala a benna mordente.

Essendo questa fase della lavorazione molto più lunga non è stato possibile registrare altri eventi simili a quello riportato di seguito.

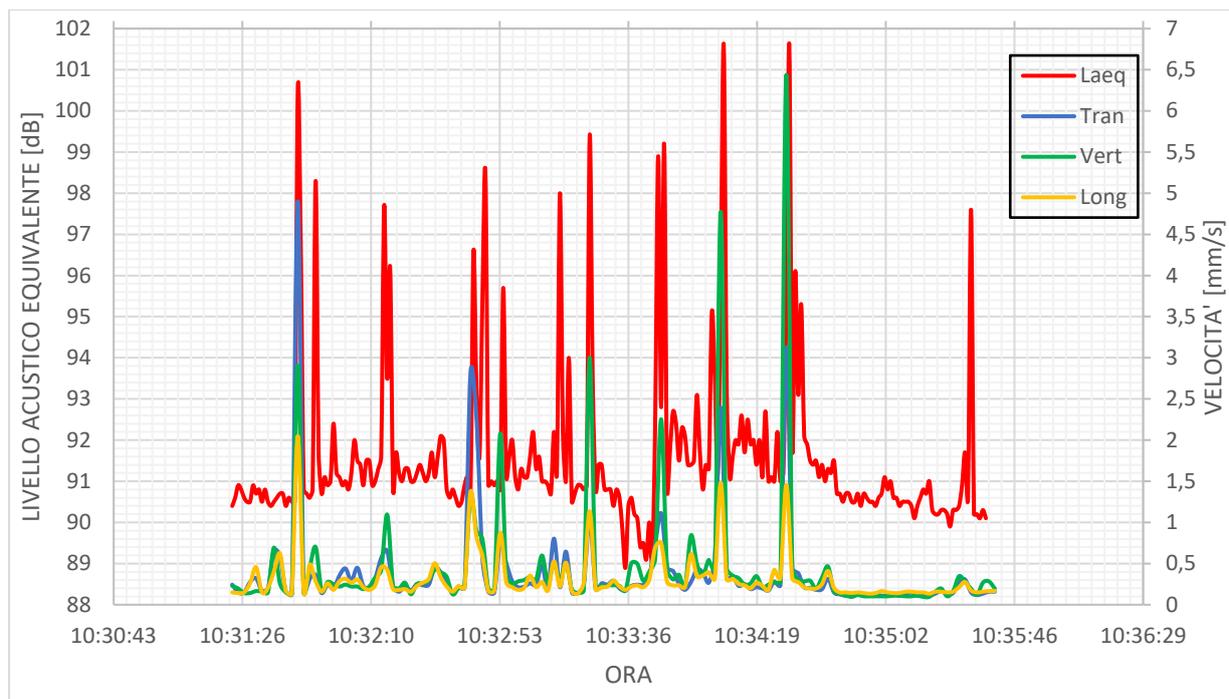


Figura 55: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

Si intuisce immediatamente come la lavorazione eseguita sia ben differente da quella del Jet Grouting infatti l'evento è simile ad un martellamento sul terreno rappresentato dai diversi picchi.

Le vibrazioni presenti nel grafico denotano un andamento abbastanza regolare e non elevato in generale con degli aumenti istantanei di velocità fino a 6,5 mm/s riconducibili all'impatto della benna con il terreno da scavare e compattare.

Essendo soprattutto delle vibrazioni superficiali l'asse maggiormente sollecitato è quello verticale come si era concluso anche durante l'analisi precedente.

Dall'analisi dei tempi risulta molto accurata la contemporaneità dei picchi di velocità vibratorie del terreno con quelli riferiti al rumore sia a causa della limitata distanza tra la fonte e i due strumenti installati per il monitoraggio sia per la tipologia di evento studiato.

Infatti, si tratta di eventi da impatto che quindi generano allo stesso istante sia rumore che vibrazioni nel terreno sollecitato.

Escludendo i massimi, il livello sonoro medio è di circa 91 dB (A) mentre il 95 percentile della registrazione è 88,2 dB (A), entrambi sono i valori più elevati che si sono riscontrati.

Questo rumore è derivato probabilmente dal motore del macchinario che quando acceso produce un livello acustico medio dannoso per l'uomo.

Allontanandosi di circa 40 metri dalla fonte si è riscontrato come le vibrazioni indotte sul terreno non sono più riconoscibili e si confondono con quelle provenienti dal traffico stradale o da altre sollecitazioni dovute a differenti lavorazioni mentre persistono in parte i rumori prodotti dal motore della gru e dall'impatto sul terreno come è riscontrabile in Figura 48.

Nonostante la presenza di parecchio disturbo dovuto al passaggio di autovetture il livello sonoro medio della registrazione e riferibile alla gru in azione e si attesta tra i 72 e i 74 dB (A) mentre il 95 percentile utile per una eventuale verifica è di 72,7 dB (A).

Sicuramente il livello sonoro si è notevolmente ridotto ma lo smorzamento presente non ha impedito di poter registrare l'evento anche a notevole distanza dalla fonte.

In ogni caso, nonostante la vastità del cantiere che occupa l'intera parte centrale del piazzale di Porte Maillot, effettuando una verifica rigorosa (rumore continuo per più di 8 ore) anche in questo caso si è superato il limite normativo di 67,7 dB per il cantiere in questione.

È però da sottolineare come sui marciapiedi che circoscrivono il piazzale il traffico, costantemente elevato nelle ore diurne, sovrasta spesso il rumore e le vibrazioni dovute al cantiere con dei picchi molto più alti del rumore ambientale medio quindi la scelta di considerare il 95 percentile risulta essere molto severa.

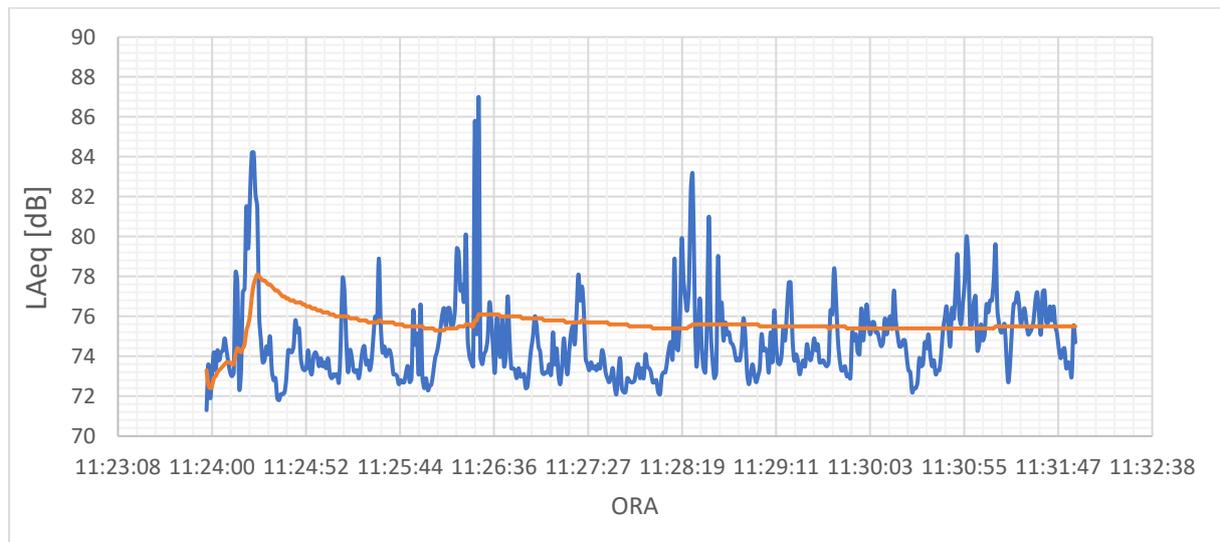


Figura 56: Grafico del livello acustico equivalente a distanza 40 metri dalla fonte

Essendo le velocità di vibrazione imposte dalla battitura della pala sul terreno ragguardevoli, si è immaginato di eseguire la misurazione in degli edifici adiacenti al sito per poter eseguire la verifica.

È stata scelta questa soluzione per mostrare la metodologia con la quale deve essere eseguito il riscontro con la normativa, infatti, nonostante i valori di picco raggiungano i 6 mm/s, le registrazioni al di fuori del confine del cantiere non hanno portato al rilevamento di alcuna vibrazione ben distinguibile.

In Figura 57 è riportato il grafico con la verifica eseguita secondo la normativa francese.

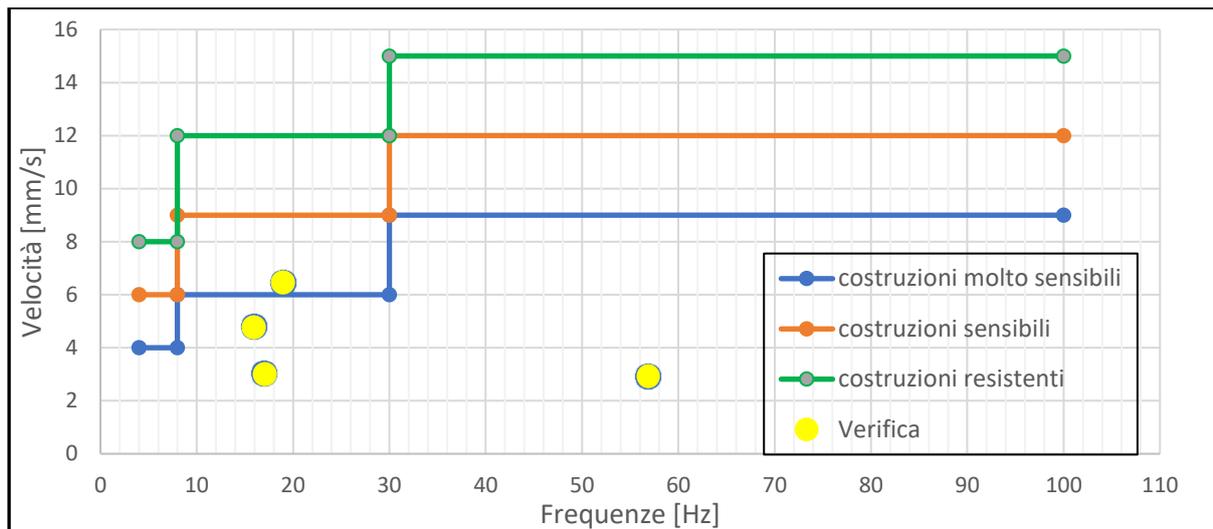


Figura 57: Verifica nei confronti delle vibrazioni per le costruzioni esistenti secondo la Circolare 1986

Tutte le misurazioni eseguite con il vibrometro Istantel riportano un valore della frequenza per ogni valore di velocità, questa misura è necessaria per la verifica da eseguire secondo qualsiasi norma europea.

Confrontando i valori di picco con il grafico delle soglie presente nella circolare del 1986 si evince come nonostante le frequenze siano ridotte la verifica è superata in quasi tutti i casi. Solo per costruzioni molto sensibili soggette a vibrazioni impulsive la restrizione è tale da non rispettare la soglia dei 6 mm/s infatti la registrazione mostra un picco di 6,5 mm/s con una frequenza di 19 Hz.

Se la verifica avesse fatto riferimento alla norma DIN 4051 il risultato sarebbe stato il medesimo come è riportato in Figura 58.

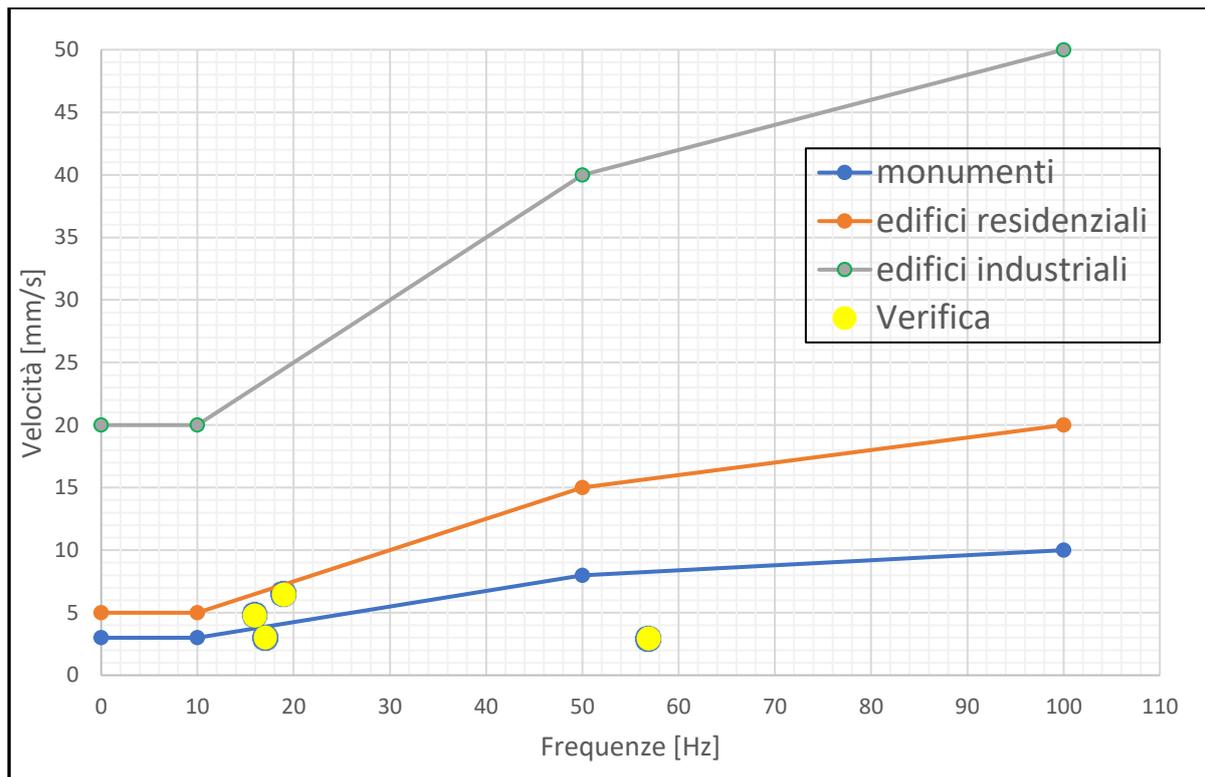


Figura 58: Verifica vibrazionale secondo la norma DIN 4150

Solo nel caso di monumenti storici o edifici particolarmente sensibili la verifica non sarebbe superata ma è necessario sempre rimarcare come queste due verifiche non possano essere considerate valide in quanto le misurazioni non sono state eseguite in corrispondenza delle fondazioni degli edifici bensì direttamente in cantiere a pochi metri dalla fonte.

9.3. Macchina perforatrice

La terza lavorazione osservata riguarda la creazione di scavi di forma rotonda ottenuti tramite una macchina perforatrice trivellante in grado sia di scavare il pozzetto e sia di raggruppare la terra accumulata (Figura 59).

I pozzetti poi saranno riempiti con il cemento per formare un rinforzo allo scavo finale della stazione a cielo aperto nella parte ovest del piazzale di Porte Maillot.

Il metodo di scavo prevede l'alternanza di due diverse trivelle la prima più adatta a scavare e la seconda a raggruppare il terreno e estrarlo dal pozzetto.

Le misure in questo caso, sono state effettuate ad una distanza molto ridotta dal pozzetto, di circa 4 metri, mentre le profondità raggiunte con lo scavo non superano i 5 metri dal piano campagna.

Rispetto ai precedenti metodi di scavo analizzati in questo caso è la rotazione del braccio che definisce il pozzetto e accumula terra quindi le sollecitazioni imposte al terreno sono soprattutto orizzontali e non verticali in quanto la discesa verso il basso è solo una conseguenza.

Come per i casi precedenti lo strumento è stato monitorato in diverse riprese e il terreno può essere considerato il medesimo per ogni misurazione in quanto la zona di scavo è sempre rimasta confinata nella parte ovest del cantiere a cielo aperto.



Figura 59: Macchina perforatrice

➤ Evento 1

| FISHE | |
|-------------------------|-----------------------|
| CANTIERE | PORTE MAILLOT |
| STRUMENTO | macchina perforatrice |
| DATA MISURA | 27/11/2018 |
| ORA | 10:54:51 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:06:34 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:06:34 |

Tabella 11: Fische per la registrazione dell'evento

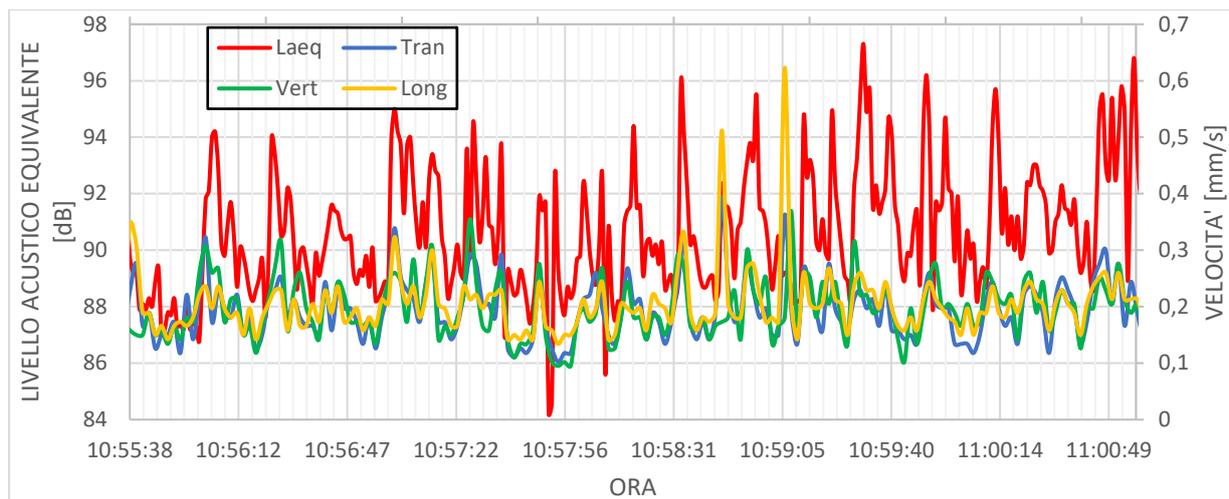


Figura 60: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

I risultati mostrano un andamento molto discontinuo e un alternarsi repentino di massimi e minimi sia per i valori di rumore che di vibrazione.

Osservando i valori ottenuti è evidente come le vibrazioni non hanno raggiunto velocità rilevante infatti sono comprese tra 0,1 e 0,4 mm/s eccetto due singoli eventi.

Al contrario il 95 percentile del livello sonoro si attesta sugli 87,5 dB (A) quindi valori più che ragguardevoli; anche questa curva è notevolmente discontinua e pertanto è molto difficile riscontrare dei legami tra le due grandezze fisiche nonostante la presenza delle medesime caratteristiche.

Come osservato nell'introduzione alla lavorazione lo scavo è superficiale ma la direzione della velocità maggiormente sollecitata non è quella verticale come nei casi precedenti bensì la longitudinale, questa caratteristica probabilmente non dipende dal tipo di terreno incontrato ma dalla spinta differente del macchinario che insiste molto orizzontalmente durante le svariate rotazioni della benna.

L'evento, in un secondo momento, è stato registrato anche ad una distanza più elevata di circa 20 metri come visibile in Figura 61.

Per quanto concerne il moto vibratorio, già limitato nei pressi della lavorazione, non è stato possibile rilevare dei movimenti chiaramente riconducibili allo scavo del pozzetto.

Infatti, escludendo le vibrazioni indotte dal passaggio dei veicoli sulla strada adiacente, le vibrazioni non superano gli 0,2 mm/s rendendo inutilizzabili i dati registrati.

Le misurazioni di livello sonoro invece, nonostante la presenza del disturbo del traffico stradale, hanno portato al riscontro del rumore derivante dalla lavorazione analizzata.

Sono presenti alcuni picchi più marcati ma, come già specificato, sono dovuti al passaggio delle autovetture.

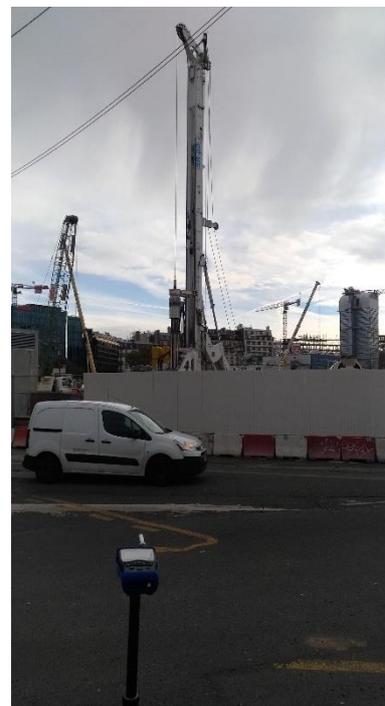


Figura 61: Posizione seconda misurazione

Il livello sonoro medio è passato dagli 87,5 dB (A) misurati precedentemente a 70,1 dB (A) (95 percentile) come verificabile in Figura 62.

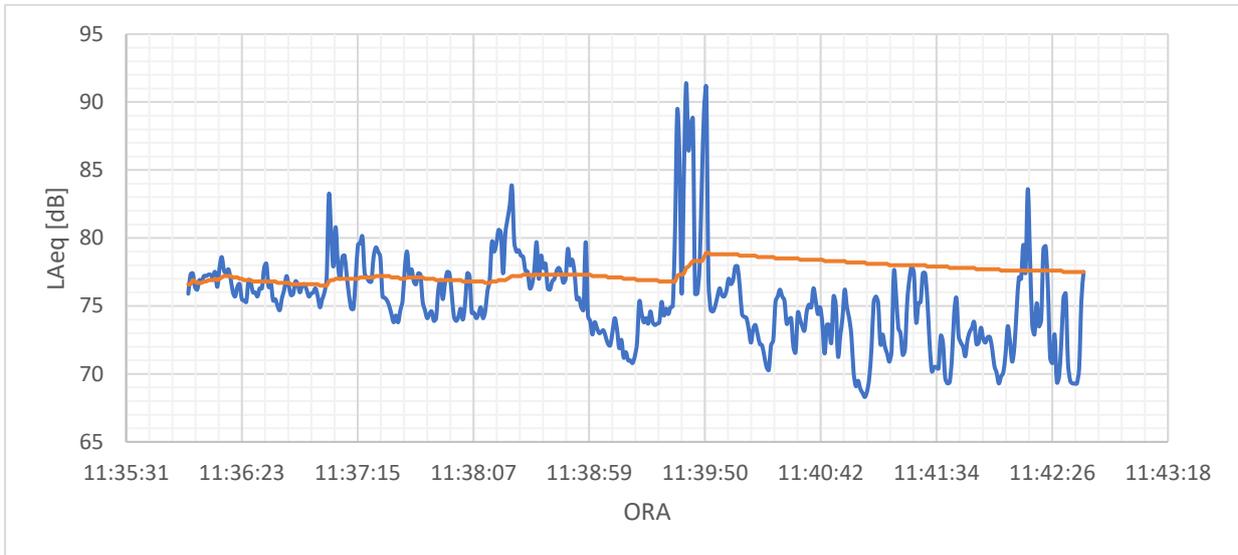


Figura 62: Grafico del livello acustico equivalente a distanza 20 metri dalla fonte

➤ Evento 2

| FISHE | |
|-------------------------|-----------------------|
| CANTIERE | PORTE MAILLOT |
| STRUMENTO | macchina perforatrice |
| DATA MISURA | 29/11/2018 |
| ORA | 14:35:03 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:05:54 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:05:54 |

Tabella 12: Fiche per la registrazione dell'evento

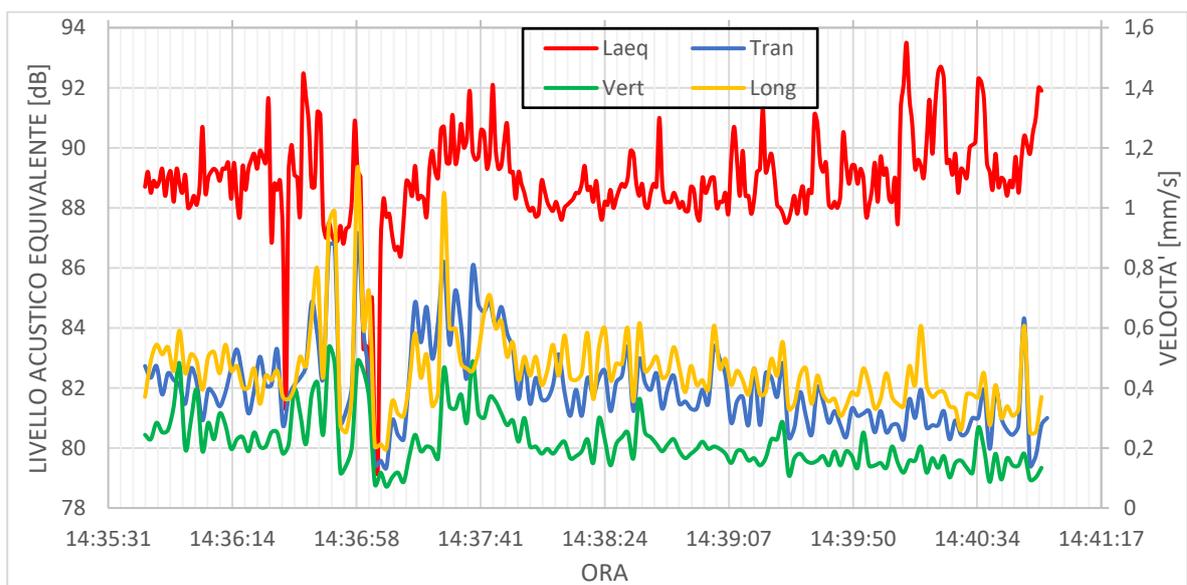


Figura 63: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

Anche questo secondo evento mostra le medesime caratteristiche di quello analizzato in precedenza con velocità di vibrazioni comprese tra 0,2 e 0,8 mm/s e con i picchi maggiori sulle componenti longitudinali e trasversali.

Il livello acustico equivalente è sempre molto elevato e compreso tra 87 e 92 dB (A) con una serie di massimi e minimi in sequenza che non consentono una facile analisi delle misurazioni effettuate e soprattutto una evidente relazione tra le due grandezze fisiche registrate.

➤ Evento 3

| FISHE | |
|-------------------------|-----------------------|
| CANTIERE | PORTE MAILLOT |
| STRUMENTO | macchina perforatrice |
| DATA MISURA | 06/12/2018 |
| ORA | 10:48:15 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:05:43 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:05:43 |

Tabella 13: Fische per la registrazione dell'evento

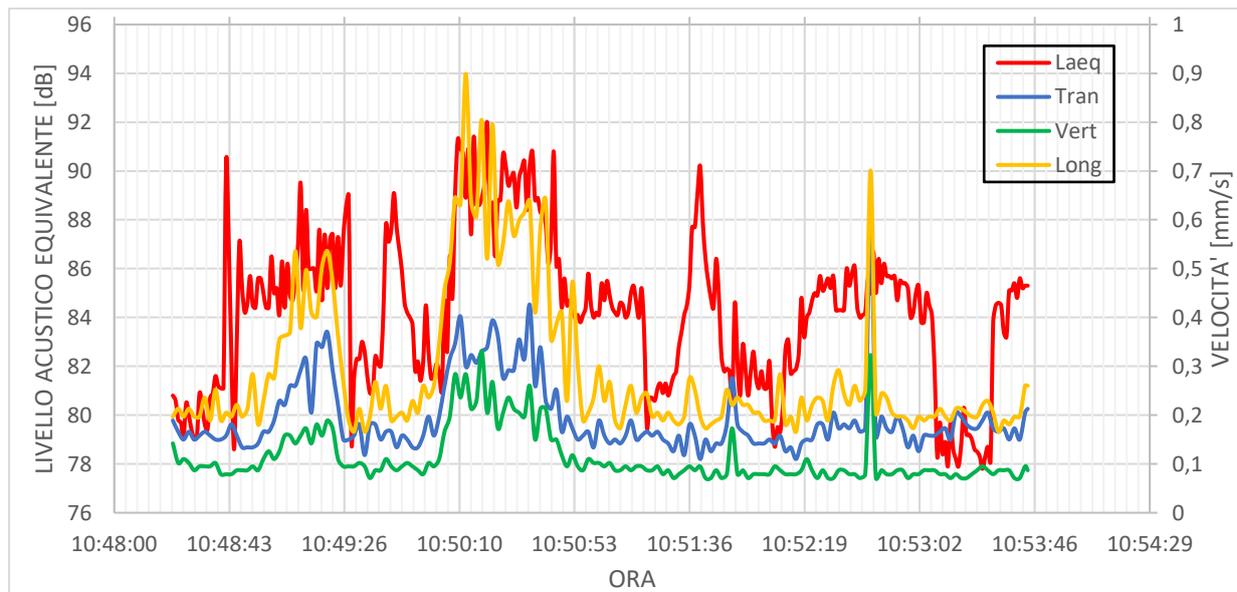


Figura 64: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

Questo preciso evento è stato registrato durante l'utilizzo del braccio meccanico adoperato con l'obiettivo di scavare ed è riportato per un confronto con l'evento 4 che è stato misurato nel successivo periodo in cui è stato inserito il braccio che rifinisce lo scavo e raggruppa il terreno estraendolo dal fosso.

I continui cambiamenti di velocità e livello acustico sono presenti anche in questo caso ma sono meno accentuati e si percepisce maggiormente un legame tra le due grandezze fisiche riportate.

Soprattutto la sequenza di picchi centrali è ben presente in entrambe le registrazioni anche se le velocità sull'asse verticale sono quasi nulle per tutta la durata della registrazione mentre più elevate risultano quelle sugli altri due assi.

➤ Evento 4

| FISHE | |
|-------------------------|-----------------------|
| CANTIERE | PORTE MAILLOT |
| STRUMENTO | macchina perforatrice |
| DATA MISURA | 06/12/2018 |
| ORA | 10:56:31 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:06:30 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:06:30 |

Tabella 14: Fishe per la registrazione dell'evento

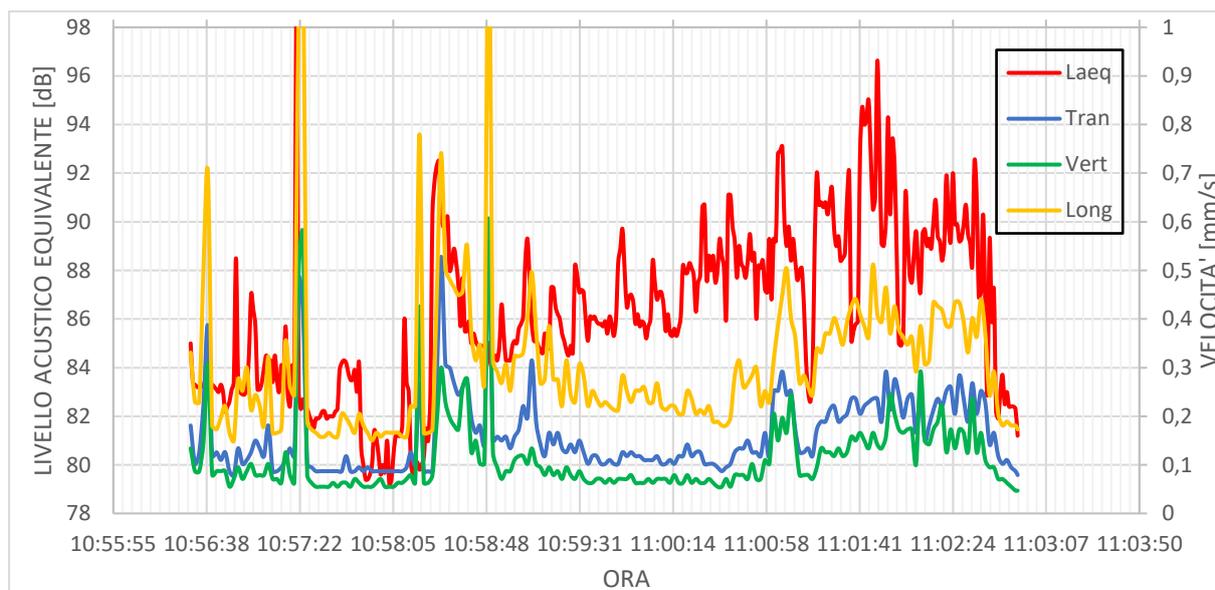


Figura 65: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

In questo caso il braccio utilizzato era quello che permette anche la raccolta e la rimozione del terreno scavato ma i risultati non sono molto differenti dalla precedente registrazione analizzata.

Sono presenti dei picchi di velocità fino a 1 mm/s ma sono sempre improvvisi e non duraturi mentre l'andamento generale segue abbastanza fedelmente quello del livello acustico equivalente che aumenta gradualmente nella fase finale della registrazione fino alla conclusione del ciclo di lavoro monitorato.

Il movimento del braccio in rotazione all'interno del terreno è il medesimo dell'evento 3 quindi, anche se il macchinario è differente, il risultato delle curve è simile e non è semplice riscontrare una differenza tra le due registrazioni.

Le vibrazioni verticali sono quasi nulle per la maggior parte del periodo analizzato a conferma del fatto che questa tipologia di scavo non insiste verticalmente sul fondo del pozzetto ma lateralmente e solo mediante la rotazione continua del braccio, riesce a scavare in profondità. Risulta senza alcun significato pratico eseguire una verifica del rispetto delle soglie massime di vibrazione in quanto, anche per frequenze ridotte, tutte le normative considerano la possibilità di un eventuale danno strutturale a partire da una velocità di 2 mm/s.

Questo macchinario, come quello utilizzato per il Jet Grouting, non produce mai tali livelli di vibrazione e anche considerando una possibile risonanza con le strutture prossime al sito, quasi sicuramente la vibrazione si dissiperebbe nel percorso compreso tra la lavorazione e la struttura.

Per nessuno degli eventi analizzati in questo paragrafo si è dunque eseguita una verifica di sicurezza nei riguardi del moto vibratorio indotto dalla lavorazione.

Infine, si è eseguito un paragone tra le 4 misurazioni acustiche effettuate su questo specifico macchinario inserendo in un unico grafico gli spettri acustici in bande di ottava tra le frequenze 6,3 e 20000 Hz.

In Figura 66 è riportato lo spettro sovrapposto dove si può effettuare un confronto tra gli eventi.

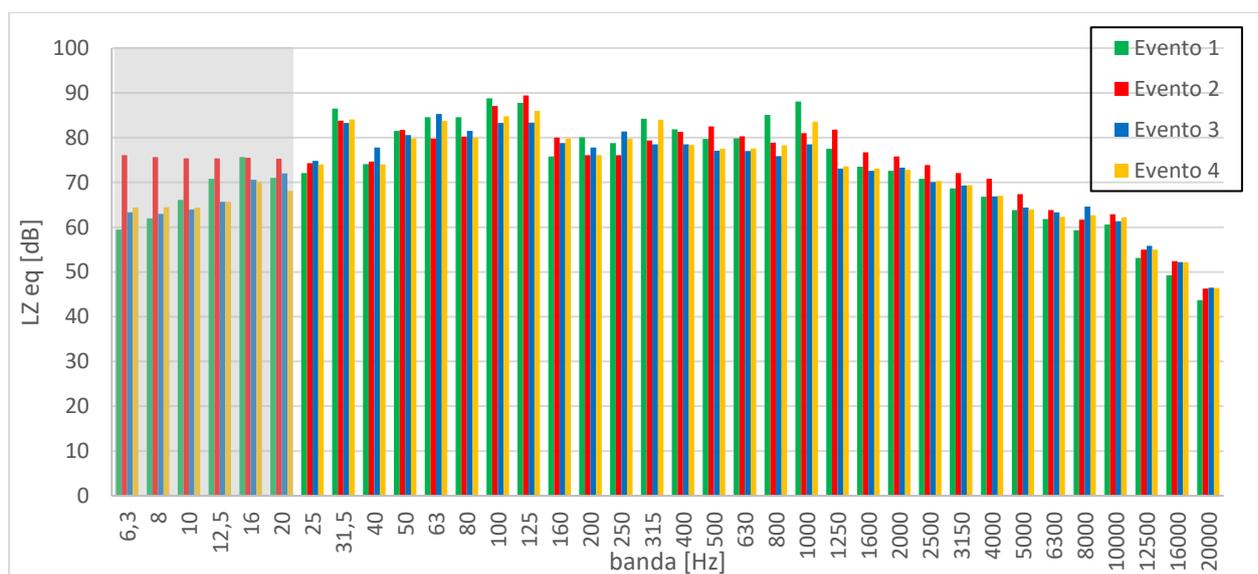


Figura 66: Confronto tra gli spettri acustici dei 4 eventi registrati

I 4 eventi risultano avere un andamento molto simile tra loro con le bande centrali in cui si accumulano i livelli più elevanti e una continua diminuzione del livello equivalente all'aumentare delle frequenze.

Anche i valori in dB risultano pressochè i medesimi nelle 4 misurazioni, ciò ribadisce la tesi per la quale la lavorazione analizzata produce sempre lo stesso inquinamento acustico e il cambio del braccio utilizzato tra l'evento 3 e il 4 non ha prodotto grandi differenze del livello sonoro registrato.

9.4. Parcheggio interrato Palais de Congrès

Un'ultima misurazione è stata registrata all'interno del parcheggio interrato del Palais de Congrès confinante con il cantiere della metropolitana.

In particolare, durante il periodo osservato si stavano costruendo dei pilastri supplementari lungo tutta la parte di confine tra parcheggio e il sito di lavoro fino alla rampa di uscita quindi sotto l'intero lato nord-ovest del piazzale.

È stata monitorata la creazione di fori nel solaio esistente per consentire l'inserimento, all'interno di esso, delle armature di rinforzo dei pilastri.

Questa procedura veniva ripetuta ogni 4 metri, come visibile in Figura 67, e produceva sollecitazioni su tutto il solaio sia di natura vibratoria che acustica.

Di seguito è riportato il risultato ottenuto per un ciclo di lavoro registrato ad una distanza molto ridotta dalla fonte (2 metri circa), quindi con estrema precisione.



Figura 67: Trapano meccanico

| FISHE | |
|-------------------------|-----------------------------|
| CANTIERE | PARCHEGGIO DI PORTE MAILLOT |
| STRUMENTO | Trapano meccanico |
| DATA MISURA | 10/12/2018 |
| ORA | 14:25:49 |
| DURATA RUMORE [min] | 00:05:00 |
| DURATA VIBRAZIONE [min] | 00:05:00 |

Tabella 15: Fishe per la registrazione dell'evento

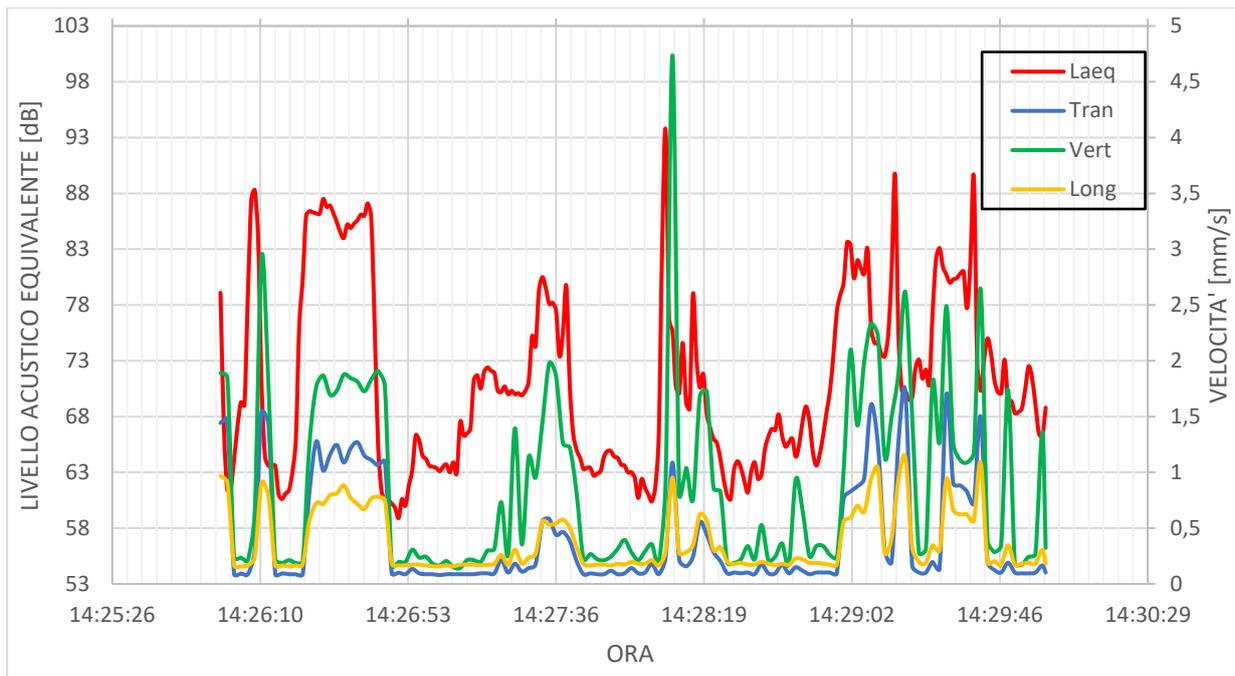


Figura 68: Grafico rappresentante contemporaneamente l'evento vibratorio e l'evento sonoro registrati

Le velocità di vibrazione riscontrate all'interno del parcheggio sono ragguardevoli e raggiungono anche i 4 mm/s durante alcuni picchi istantanei pertanto non possono essere trascurate.

In assenza della lavorazione il rumore registrato si assesta intorno ai 60 dB (A) come si evince anche dai minimi riportati in Figura 66, pertanto vi è una vistosa differenza di livello acustico durante il foraggio del solaio con picchi che raggiungono gli 88 dB (A).

L'andamento crescente e decrescente è sempre contemporaneo tra le due grandezze fisiche registrate, a conferma del fatto che vi sia una relazione tra esse.

La componente delle velocità maggiormente sollecitata è quella verticale essendo un evento di scavo diretto e superficiale.

Le misure effettuate al piano inferiore non hanno portato al rilevamento di un moto vibratorio distinguibile; l'ipotesi che ne deriva è che il movimento dei singoli solai non influenzi quello globale della struttura sotterranea.

Volendo effettuare la verifica nei riguardi delle vibrazioni percepite all'interno del parcheggio interrato si riporta di seguito il grafico conforme alla normativa francese.

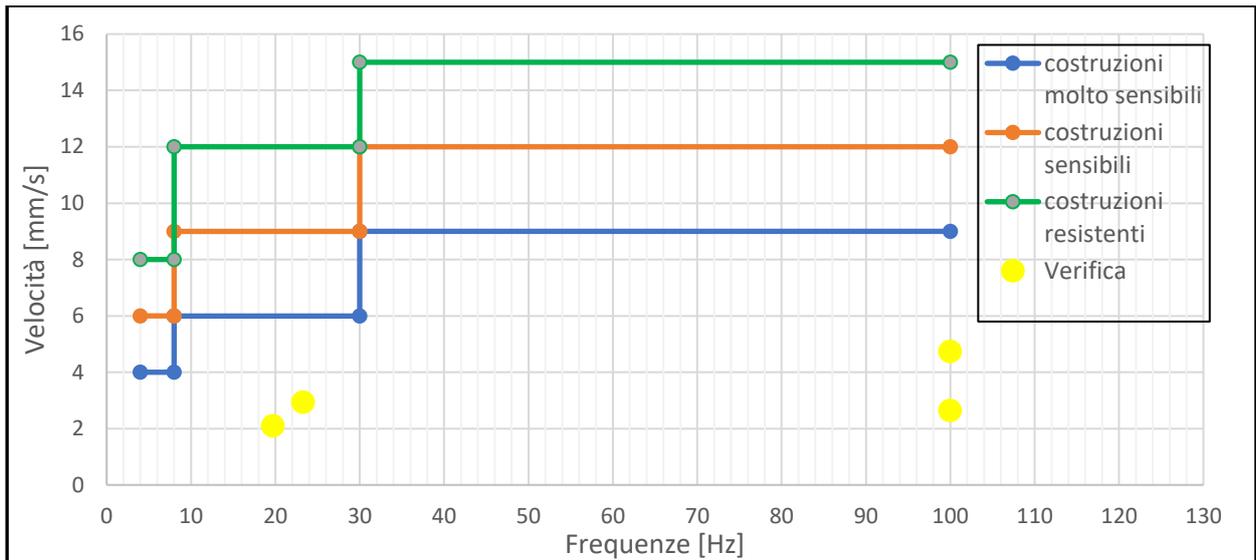


Figura 69: Verifica nei confronti delle vibrazioni registrate secondo la Circolare del 1986

Come per il caso delle paratie analizzato in precedenza non ci si avvicina in nessun caso neppure ai valori limite per le costruzioni molto sensibili pertanto si può affermare che la normativa è rispettata.

Volendo eseguire un confronto con la DIN 4160 si può constatare in Figura 70 che essendo i valori limite simili tra le due norme anche per quella vigente in Italia e Germania tutte le soglie vengono rispettate.

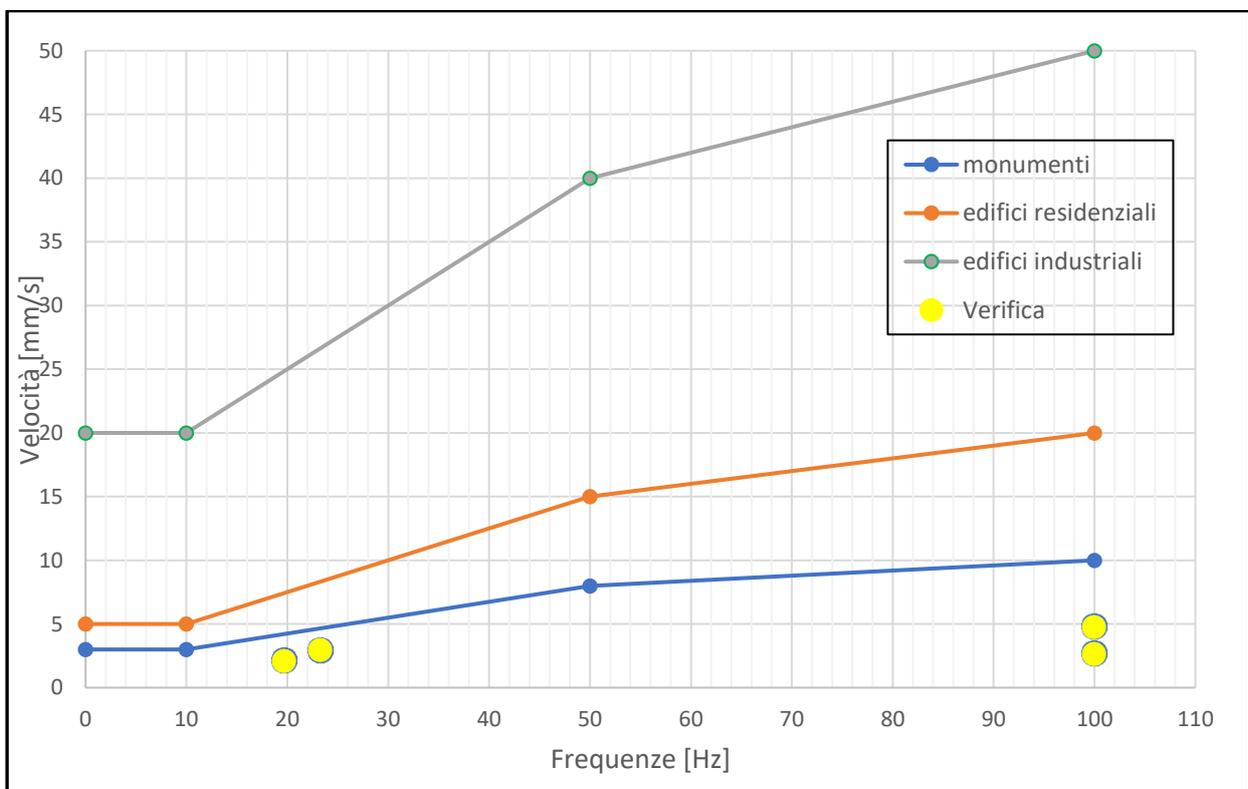


Figura 70: Verifica nei confronti delle vibrazioni registrate secondo la DIN 4160

10. CONCLUSIONE

Attraverso questo elaborato si è potuta affrontare la tematica, sempre più di attualità, del rumore provocato da lavorazioni edili e sono stati analizzati quei particolari eventi acustici che possono essere legati alla presenza di un moto vibratorio nel terreno indotto dalle medesime lavorazioni.

Inizialmente sono state riassunte e interpretate le legislazioni presenti sia in Francia, paese in cui sono state effettuate le misurazioni, e sia in Italia con l'intento di effettuare un paragone tra le diverse norme tecniche.

Da questa prima analisi è risultato che nonostante le normative siano differenti per titolo e limitazioni da rispettare, le grandezze fisiche da considerare nell'analisi dei fenomeni e nelle varie verifiche limite sono le medesime. In molti casi inoltre, le soglie da rispettare, seppur con qualche diversificazione, sono risultate molto simili sia nel campo acustico che in quello vibratorio.

I siti di scavo monitorati sono quelli corrispondenti ai pozzi e alle stazioni in costruzione lungo il tracciato per il prolungamento del RER E dalla stazione di Parigi- St. Lazare fino al quartiere della Défense nella periferia ovest di Parigi, questo lotto è stato denominato progetto EOLE.

Inizialmente sono stati studiati due casi distinti di rumore provocato dall'accensione di motori quindi, un inquinamento acustico praticamente costante per tutta la durata giornaliera delle lavorazioni ma, da queste fonti, difficilmente viene prodotto anche un moto vibratorio riscontrabile.

All'interno dei cantieri queste due fonti hanno mostrato dei livelli acustici equivalenti molto elevati, compresi tra gli 85 e i 90 dB (A) quindi ben al di fuori dei limiti normativi previsti nelle zone abitative.

I risultati ottenuti sui marciapiedi antistanti l'entrata degli edifici hanno confermato la bontà dell'utilizzo delle barriere anti-rumore infatti, nonostante l'influenza del traffico stradale, i valori corrispondenti al 95 percentile di queste nuove misurazioni sono stati ridotti fino a 72,8 dB (A), come anche lo spettro corrispondente alle alte frequenze (Figura 44).

Queste misure nello spazio del tempo sono risultate ancora leggermente al di sopra delle soglie per i siti presenti lungo il tracciato di EOLE ma è necessario ribadire come nell'effettuare le verifiche si sono utilizzati dei valori molto a favore di sicurezza derivati dal calcolo del 95 percentile del rumore ambientale come specificato nel capitolo 8.4.1.

In un secondo momento si sono quindi registrate e analizzate delle fonti di rumore che potessero avere un legame con le vibrazioni riscontrate nella medesima posizione di misura. La prima fonte che è stata monitorata a più riprese per periodi di pochi minuti consecutivi e a diverse distanze dalla fonte è la lavorazione del Jet Grouting (Capitolo 9.1.).

In generale ne è emerso che la profondità alla quale viene eseguita l'immissione di cemento allo stato liquido nel terreno è risultata essere molto influente per le registrazioni delle velocità di vibrazione. Infatti, queste ultime non hanno mai raggiunto valori molto elevati, neppure lungo la direzione verticale più sollecitata. Inoltre, esse si sono dissipate quasi

completamente quando l'iniezione è stata a profondità superiori a 10 metri dal piano campagna, probabilmente anche in relazione alla tipologia di terreno attraversato.

L'analisi degli eventi sonori è invece ben rimarcabile a tutte le profondità di lavorazione pertanto si è presupposto che la dissipazione nel percorso tra fonte e strumento sia stata di entità molto inferiore rispetto al caso vibratorio.

Nelle registrazioni corrispondenti al foraggio superficiale, come per esempio l'evento 2, è evidente un legame tra le due grandezze fisiche infatti ad ogni innalzamento o abbassamento della curva delle velocità ne è corrisposto un medesimo nella curva del livello acustico equivalente (Figura 51).

Ne consegue che questa particolare lavorazione presenta oltre ad un rumore di fondo dovuto al macchinario, un'aliquota fortemente dipendente dalle vibrazioni di scavo indotte sul terreno circostante.

Questo legame è ancora più marcato durante la fase iniziale della costruzione dei diaframmi (capitolo 9.2.) in cui un'escavatrice con pala a benna mordente ha scavato e compattato un'area delimitata che ospiterà in seguito una delle tante paratie perimetrali della stazione sotterranea.

Nella registrazione riportata in Figura 55 è evidente come ad ogni picco acustico è corrisposto un medesimo massimo di velocità che ha raggiunto, dei valori fino a 6 mm/s sull'asse verticale. Infine, risulta essere interessante l'analisi di un macchinario per la creazione di pozzetti poco profondi (capitolo 9.3.) poiché esso utilizza le continue rotazioni del braccio meccanico per scavare il terreno e quindi induce delle forze leggermente differenti nel suolo circostante.

Questa rotazione insiste sugli strati di terreno lungo le direzioni orizzontali e meno su quella verticale e ciò è confermato da tutte le registrazioni vibratorie riportate dove le direzioni maggiormente sollecitate sono state la longitudinale e la trasversale contrariamente alle altre misurazioni dove i picchi erano sulla direzione verticale.

Inoltre, in questa particolare lavorazione, nonostante la prossimità della misurazione dalla fonte e la limitata profondità di scavo è risultato più complicato identificare una dipendenza netta tra moto vibratorio e livello acustico prodotto.

Infatti, la presenza di molti picchi ravvicinati ha consentito esclusivamente di confrontare l'andamento generale simile delle curve ma non di ravvisare una dipendenza immediata ad ogni innalzamento e abbassamento delle due grandezze riportate.

Questa caratteristica potrebbe essere legata al diverso metodo di scavo infatti, il braccio, agendo orizzontalmente, provoca un numero molto maggiore di contatti con il terreno da cui derivano le vibrazioni che spesso si confondono tra loro.

L'analisi svolta ha dimostrato come spesso, a seconda delle condizioni di scavo, nei cantieri edili è possibile riscontrare del rumore che è direttamente dipendente dai movimenti di terreno, soprattutto se essi risultano essere superficiali.

Tuttavia, l'analisi di questa relazione tra moto vibratorio e rumore non è stata facilmente perseguibile in quanto vi sono diversi fattori da considerare per poter ipotizzare una legge di dipendenza diretta, come per esempio il terreno in cui le due grandezze si propagano, la

tipologia di lavorazione monitorata e la difficoltà di confrontare due grandezze molto diverse tra loro sia per modalità di misurazione che per unità di misura.

In questo elaborato non è stato possibile effettuare un'analisi che prevedesse la creazione di una equazione di legame per mancanza di dati sufficientemente dettagliati sulla stratificazione del terreno e per il rapido dissiparsi delle vibrazioni all'aumentare della distanza dalla fonte.

Bibliografia

BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS. (2015). Prescriptions générales. *CCTP Livret 0*. Paris, France.

BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS. (2016). Auscultation. *CCTP Livret 6*. Paris, France.

BS 7385. (1993). *Evaluation and measurement for vibration in buildings*. Regno Unito.

Circulaire . (1986). *Vibrations mécaniques émises*. Francia.

Comune di Torino. (2018). Regolamento comunale per la tutela dell'inquinamento acustico. Torino.

Decreto n°1099. (2006).

DIN 4160. (1999). *Erschütterungen im Bauwesen - Einwirkungen auf bauliche Anlagen*. Germania.

Instantel. (2018). *MicroMate*. Tratto da <https://www.instantel.com/products/micromater>

ISO 2631. (2018). *Mechanical vibration and shock*.

Ministero dell'ambiente. (1995). Legge Quadro. *Inquinamento acustico*. Italia.

NTi Audio. (2018). *XL2 Sound Level Meter*. Tratto da <https://www.nti-audio.com/en/>

SN 640213. (1992). *Effet des ébranlements sur les constructions*. Svizzera.

Société du Grand Paris. (2018). *Le Grand Paris Express en résumé*. Tratto da <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/le-grand-paris-express-en-resume>

UNI 9916. (2004). *Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato durante il mio percorso di studi ed in particolare coloro con cui ho condiviso la preparazione di relazioni ed esami.

Ringrazio i miei genitori, Ivano e Lucia e mia sorella Elisa che mi hanno permesso di perseguire ogni mio desiderio sia in campo universitario che privato e mi hanno supportato nei momenti difficili.

Un ringraziamento va anche al mio relatore, il prof. Marco Carlo Masoero che mi ha consigliato e indirizzato nella stesura della tesi con una disponibilità totale e immediata, all'ing. Fabrizio Bronuzzi e alla prof.ssa Louena Shtrepi che hanno collaborato attivamente.

Inoltre, devo ringraziare la ditta GD TEST che mi ha permesso di effettuare l'esperienza a Parigi ed in particolare l'ingegner Bovio Alessandro con il quale ho collaborato durante la permanenza in Francia.

Infine, ringrazio i miei coinquilini Luca e Flavio con cui ho condiviso buona parte del tempo trascorso a Torino inclusi momenti di agitazione e di divertimento.