



Metropolitano de Lisboa

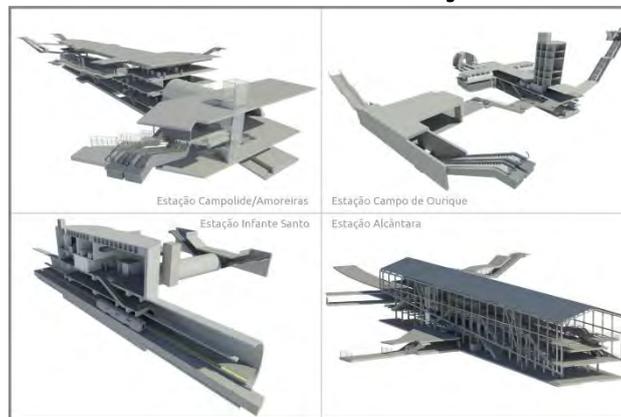


METRO DE LISBOA

PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA ENTRE SÃO SEBASTIÃO E ALCÂNTARA

EMPREITADA DE CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO

PROJETO DE EXECUÇÃO



TOMO I – VOLUME 8 – VIBRAÇÕES RUÍDO E CONDICIONAMENTO ACÚSTICO - ESTUDO DE VIBRAÇÃO PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO

MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

Documento SAP:	LVSSA MSA PE VIA 000 000 MD 031003 0
-----------------------	--------------------------------------

	Nome	Assinatura	Data
Elaborado	Vitor Rosão Alice Ramos Daniel Fernandes		2024-10-10
Revisto			
Verificado			
Coordenador Projeto	Rui Rodrigues		2024-10-10
Aprovado	Raúl Pistone		2024-10-10

	Nome	Assinatura	Data

Índice

1	OBJETIVO E ÂMBITO	4
2	PONTOS DA DIA.....	4
2.1	Ponto da DIA identificado como ID1.....	5
2.2	Ponto da DIA identificado como ID2.....	5
2.3	Ponto da DIA identificado como ID3.....	5
2.4	Ponto da DIA identificado como ID4.....	5
2.4.1	Elementos regulamentares ou de normalização no Parecer da Comissão de Avaliação.	6
2.5	Ponto da DIA identificado como ID5.....	7
2.6	Ponto da DIA identificado como ID6.....	8
2.7	Ponto da DIA identificado como ID7.....	8
2.8	Ponto da DIA identificado como ID8.....	8
2.9	Ponto da DIA identificado como ID9.....	8
2.10	Resumo dos Pontos da DIA e sua consideração no Estudo	9
3	ESTUDO ADICIONAL DE VIBRAÇÃO PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO	10
3.1	Enquadramento Legal e de boa prática	10
3.2	Caraterização da Situação Atual	12
3.3	Estimação da vibração e do ruído re-radiado (geral)	16
3.4	Estimação da vibração e do ruído re-radiado (Palácio das Necessidades e outras estruturas a proteger)	20
3.5	Dimensionamento de medidas	21
4	REAVALIAÇÃO DE IMPACTES.....	22
5	MEDIDAS	24
6	PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA FASE DE EXPLORAÇÃO E PRÉ-EXPLORAÇÃO	24
6.1	Pré-Exploração	24
6.1.1	Funções de transferência	25
6.1.2	Testes finais antes da entrada em exploração	33
6.2	Exploração.....	33
6.2.1	Generalidade	33
6.3	Identificação dos parâmetros a monitorizar.....	36
6.4	Locais e frequência de amostragem	37

Anexo I – Estudo de Vibrações.....	39
------------------------------------	----

1 OBJETIVO E ÂMBITO

O presente Relatório apresenta o Estudo de vibração, fase de Projeto de Execução, da fase de exploração.

2 PONTOS DA DIA

A Declaração de Impacte Ambiental (DIA) constante em https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA3462/tua_aia3462202282917951.pdf, possui os seguintes principais pontos com maior relevância para este Estudo:

Quadro 1: Resumo dos pontos da DIA com interesse para o presente Estudo

ID neste Estudo	Parte da DIA	N.º na parte na DIA	Transcrição parcial (transcrição mais completa nos subcapítulos seguintes)
1	Condicionantes	2	<i>2. No troço entre o Palácio das Necessidades ...</i> (ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).
2	Elementos a apresentar em RECAPE	11	<i>11. Levantamento detalhado do edificado ...</i> (ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).
3	Elementos a apresentar em RECAPE	12	<i>12. Avaliação da necessidade de complementar com novas sondagens ...</i> (ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).
4	Elementos a apresentar em RECAPE	13	<i>13. Estudo específico de vibrações ...</i> ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).
5	Medidas de Minimização Medidas para o projeto de execução	1	<i>1. Adotar como velocidade máxima de projeto 70 km/h ...</i> (ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).
6	Medidas de Minimização Medidas para o projeto de execução	7	<i>7. Incorporar soluções técnicas ...</i> (ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).
7	Medidas de Minimização Medidas para o projeto de execução	8	<i>8. Colocar separação elástica ...</i> (ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).

8	Medidas de Minimização Fase de Exploração	107	107. Controlar a velocidade de circulação dos veículos ... (ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).
9	Programas de monitorização	3.	3. Programa de Monitorização do Ambiente Sonoro ... ver texto mais completo no subcapítulo seguinte identificado pelo ID explicitado neste quadro).

2.1 Ponto da DIA identificado como ID1

No troço entre o Palácio das Necessidades - Vale de Alcântara, o projeto de execução deve garantir:

a. a não afetação dos corpos nascente e nordeste do Palácio das Necessidades, largo fronteiro e da fonte/chafariz localizado a sul (alimentado pelo ramal do Aqueduto das Águas Livres), aquando da realização da galeria subterrânea, ao nível das vibrações produzidas pelos trabalhos, mas também as decorrentes do funcionamento da linha do metro, devendo ser acautelado a integralidade de todos os bens imóveis classificados;

2.2 Ponto da DIA identificado como ID2

11. Levantamento detalhado do edificado sobrejacente e na envolvente do traçado, no que respeita às vibrações (nos domínios do dano patrimonial e da incomodidade às vibrações), atendendo ao tipo de ocupação e utilização e ao tipo de estrutura. Deste levantamento devem resultar peças escritas e desenhadas elucidativas dessa ocupação.

2.3 Ponto da DIA identificado como ID3

12. Avaliação da necessidade de complementar com novas sondagens a campanha dedicada de prospeção geológica/geotécnica recentemente feita, de modo a melhorar o conhecimento da zona de interesse do projeto, não só para uma adequada seleção de métodos de escavação, como para melhorar a qualidade das estimativas de propagação de vibrações entre as ações com componente vibrátil e os recetores sensíveis no edificado.

2.4 Ponto da DIA identificado como ID4

De notar que as partes não associadas à vibração na fase de exploração não são transcritas.

13. Estudo específico de vibrações, com o detalhe adequado à fase de projeto de execução, que inclua no mínimo:

a. Identificação dos elementos regulamentares ou de normalização considerados que, no mínimo devem incluir os identificados no parecer da Comissão de Avaliação, nomeadamente, em relação

ao dano patrimonial, à sensação de incomodidade às vibrações e ao ruído re-radiado – tanto para a fase de construção como de exploração.

b. Caracterização da situação atual nos recetores sensíveis identificados no levantamento, independentemente do estado atual vibratório, que deve ser mais extensivo e representativo da diversidade de situações em presença, tanto em termos territoriais como temporais, devendo ser apresentado um relatório de medições que inclua toda a informação necessária para reporte e eventual replicação da mesma.

c. Estimativas do nível de vibração no recetor e do ruído re-radiado no recetor, tanto para a fase de construção como de exploração. Igualmente devem ser indicadas as atividades geradoras de vibração, os parâmetros de dimensionamento, os modelos utilizados e a forma de validação dos mesmos, os pressupostos assumidos na modelação e não devem ser negligenciados eventuais efeitos de amplificação advindos de fenómenos de ressonância das lajes dos edifícios. As estimativas da fase de construção devem ser representativas dos meios que efetivamente serão utilizados na mesma e do planeamento da obra.

...

e. Dimensionamento específico das medidas de minimização de vibrações a adotar para a fase de exploração, considerando a velocidade máxima de circulação de 70 km/h, com indicação da eficácia esperada, das estimativas do nível de vibração e do ruído re-radiado, com e sem a adoção dessas medidas e das características técnicas específicas dos materiais a utilizar (independentemente de já constarem do projeto de execução e serem de implementação obrigatória, ou de constarem como possibilidade, no caso de serem necessárias medidas adicionais).

2.4.1 Elementos regulamentares ou de normalização no Parecer da Comissão de Avaliação

De notar que as partes não associadas à vibração na fase de exploração não são transcritas (excetua-se os “danos patrimoniais”, que apesar de referidos para a fase de construção, se consideram extensíveis à fase de exploração).

https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA3462/parecer_aia3462_ca2022829171025.pdf

Considera-se que o enquadramento legal e normativo, aqui apresentado, está incompleto e é redutor em relação à efetiva identificação e avaliação de impactes associados ao fator Vibrações, razão pela qual, em fases subsequentes, devera atender-se ao seguinte:

- Na vertente do dano patrimonial e para a fase de construção:
 - NP 2074: 2015

Valor limite	Vmax (pico)		
	$f \leq 10$ Hz	$10 \text{ Hz} < f \leq 40$ Hz	$f > 40$ Hz
Estruturas Sensíveis (edificações antigas ou com revestimentos cerâmicos colados com argamassa, chaminés, torres, monumentos, infraestruturas de transporte, escolas e hospitais ¹ , habitações ou escritórios com relação altura/menor dimensão da base >	1.5 mm/s	3	366

2) e, por opção do proponente, escolas e os hospitais			
<i>Estruturas correntes (habitações ou escritórios com relação altura/menor dimensão da base ≤ 2)</i>	3	6	12
<i>Estruturas reforçadas (edifícios industriais recentes, em betão armado ou com elementos estruturais de natureza metálica)</i>	6	12	40

- ...
- Fase de exploração
Critérios LNEC;

Sensação de incomodidade e perceção de vibração	(Valor limite) V_{ef} 1Hz $\leq f \leq$ 80Hz)
Afetação nula	≤ 0.11 mm/s
Perceptível, suportável para pequena duração]0.11; 0.28] mm/s
Perceção nítida, afetação humana incómoda, podendo afetar as condições de trabalho]0.28; 1.10] mm/s
Muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho	> 1.10 mm/s

Ruído re-radiado (Critérios LNEC);

Afetação humana devido ao ruído estrutural resultante da vibração induzida a cada passagem de composições de Metro	(Valor limite) 16Hz $\leq f \leq$ 250Hz)
Vibração no interior dos compartimentos sensíveis	$V_{ef} \leq 0.02$ a 0.03 mm/s
Ruído no interior dos compartimentos sensíveis	$L_{Aeq} \leq 22$ dB(A)

2.5 Ponto da DIA identificado como ID5

1. Adotar como velocidade máxima de projeto 70 km/h. Todos os estudos a desenvolver que tenham como base de dimensionamento a velocidade de circulação devem ser reformulados, assim como as medidas de minimização decorrentes.

2.6 Ponto da DIA identificado como ID6

7. Incorporar soluções técnicas que assegurem a eficaz redução da propagação de vibrações, as quais devem ser detalhadamente justificadas com estudos específicos ao nível do recetor, de forma a salvaguardar a qualidade de vida e comodidade da população e a integridade física do edificado sobrejacente e localizado na área de influência do projeto.

2.7 Ponto da DIA identificado como ID7

8. Colocar separação elástica entre a infraestrutura ferroviária e a ponte metálica através da introdução de palmilhas de travessa e/ou manta antivibrátil, que garanta uma perda de inserção mínima de 10 dB ou superior, se tal se revelar necessário como resultado do aumento da velocidade máxima de projeto para 70 km/h. Caso seja necessário implementar outro tipo de solução, deve a mesma ser explicitamente fundamentada e detalhada.

2.8 Ponto da DIA identificado como ID8

107. Controlar a velocidade de circulação dos veículos de modo a que não ultrapassem a proteção induzida pelas medidas de minimização adotadas para eliminação da incomodidade às vibrações e eliminação da ocorrência de ruído re-radiado, devidamente e detalhadamente dimensionadas no âmbito do Estudo de Vibrações a elaborar no contexto do Projeto de Execução, para uma velocidade máxima de projeto de 70 km/h.

2.9 Ponto da DIA identificado como ID9

De notar que as partes não associadas ao ruído na fase de exploração não são transcritas.

4. Programa de Monitorização das Vibrações

Este programa deve incluir todos os pontos que venham a ser identificados no âmbito do estudo específico de vibrações a elaborar para a fase de projeto de execução, como sendo sujeitos à influência das vibrações decorrentes desta infraestrutura, seja em fase de construção ou de exploração. Esse estudo deve incluir as peças desenhadas necessárias para classificar os edifícios em relação à sua suscetibilidade às vibrações, tanto em relação ao tipo de estrutura como em relação à sensibilidade da sua utilização. Igualmente deve contemplar o enquadramento legal e normativo em vigor e referido no parecer da Comissão de Avaliação.

Salienta-se que o Programa de Monitorização deve contemplar, pelo menos, a seguinte frequência de amostragem:

- ...
- Deve ser realizada uma campanha de monitorização, após a execução dos toscos e anterior à execução da empreitada seguinte de construção da solução de via-férrea para determinar se as funções de transferência estão validades e, conseqüentemente, para

averiguar se o dimensionamento das medidas de minimização a implementar é adequado.

O correspondente Relatório deve ser entregue à autoridade de AIA até 2 meses após a realização dessas medições e deve ser sempre anterior ao início da fase seguinte de execução deste troço de linha. Este relatório deve incluir uma comparação entre as estimativas constantes do RECAPE e que estiveram subjacentes ao dimensionamento das medidas de minimização e os valores efetivamente medidos em campo.

- *Em momento prévio à entrada em serviço, deve ser realizado um teste com as futuras composições que circularão nesta linha e para os diferentes regimes de velocidade previstos, para se determinar as funções de transferência finais (incluindo a ação das medidas de minimização implementadas) e a real eficácia das medidas de minimização adotadas.*

Os referidos relatórios devem ser entregues à autoridade de AIA no prazo de 2 meses, antes da entrada em serviço, que ficará condicionada à sua aprovação.

- *No ano de entrada em serviço, para o qual se deve considerar uma duração mínima de 1 semana, em contínuo e com a identificação dos eventos relevantes em termos de incomodidade à vibração. O proponente também refere que pretende realizar monitorização ao longo dos quatro seguintes anos de exploração. Adicionalmente, devem ser realizadas campanhas equivalentes nos anos 5, 10, 20 e 40, após a entrada em serviço.*

Os referidos relatórios devem ser entregues à autoridade de AIA no prazo de 2 meses.

2.10 Resumo dos Pontos da DIA e sua consideração no Estudo

Em seguida, os diferentes pontos da DIA explicitados nos subcapítulos anteriores são referenciados na forma de IDnDIA.

Por exemplo ID1DIA, significa o ponto identificado anteriormente como ID1.

- ID1DIA: A não afetação da zona do Palácio das Necessidades é analisada no capítulo “3 ESTUDO ADICIONAL DE VIBRAÇÃO PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO” seguinte.
- ID2DIA: O levantamento detalhado do edificado sobrejacente, é tratado noutro estudo, não no âmbito do presente estudo.
- ID3DIA: As sondagens complementares, são tratadas noutro estudo, não no âmbito do presente estudo.
- ID4DIA: O Estudo específico de vibrações é concretizado no capítulo “3 ESTUDO ADICIONAL DE VIBRAÇÃO PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO” seguinte, que se reporta também a estudo anexado “Anexo I – Estudo de Vibrações”.
- ID5DIA: É patente, tanto no capítulo “3 ESTUDO ADICIONAL DE VIBRAÇÃO PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO” como no “Anexo I – Estudo de Vibrações” seguintes, que foi considerada a velocidade de 70 km/h para análise.
- ID6DIA: É patente no capítulo “3 ESTUDO ADICIONAL DE VIBRAÇÃO PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO” “Anexo I – Estudo de Vibrações”, o estudo a nível do recetor e a incorporação de soluções que garantem o cumprimento dos limites estabelecidos.
- ID7DIA: É patente no “Anexo I – Estudo de Vibrações” a inclusão da zona do viaduto de Alcântara na análise.

- ID8DIA: Julga-se que a indicação do ID9DIA, relativa à realização de um teste, com as futuras composições, com os diferentes regimes de velocidade, previsto no Programa de Monitorização (capítulo “6 PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA FASE DE EXPLORAÇÃO E PRÉ-EXPLORAÇÃO” seguinte) permitirá verificar e garantir o cumprimento dos limites estabelecidos.
- ID9DIA: o capítulo “6 PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA FASE DE EXPLORAÇÃO E PRÉ-EXPLORAÇÃO” seguinte concretiza este ponto da DIA.

3 ESTUDO ADICIONAL DE VIBRAÇÃO PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO

Este capítulo concretiza assim o Estudo previsto no ID4DIA.

3.1 Enquadramento Legal e de boa prática

Este capítulo pretende concretizar e complementar o ID4DIA, alínea a).

De referir a inexistência, em Portugal, e em vários outros países, de um quadro legal e/ou normativo concreto para a limitação objetiva da vibração na fase de exploração, para além dos limites de danos cosméticos em estruturas, patente na Norma Portuguesa NP 2074:2015.

Contudo, dada a similitude entre o Fator Ruído e o Fator Vibração, julga-se legítimo ter em conta, no Fator Vibração, alguns dos princípios legais, para a fase de exploração, do Fator Ruído, nomeadamente:

- O Critério de Incomodidade, patente na alínea b) do n.º 1 do Artigo 13.º do Regulamento Geral do Ruído (RGR; DL 9/2007), e que possui limites para o ruído exterior e para o ruído interior dos edifícios, dada a articulação do n.º 5 do Artigo 13.º, não é aplicável, por força do Artigo 19.º, a infraestruturas de transporte. O legislador considerou assim dispensável, para infraestruturas de transporte, o cumprimento de limites de ruído ambiente interior, apenas o cumprimento de limites de ruído ambiente exterior, na forma do denominado Critério de Exposição Máxima, patente no Artigo 11.º do RGR. A razão desta dispensa está talvez associada ao caráter público e/ou coletivo das infraestruturas de transporte, relativamente à outras Atividades Ruidosas permanentes que têm de cumprir o Critério de Incomodidade.

Pese embora o referido, o ID4DIA, estabelece o seguinte, de forma resumida, onde se adicionam aqui algumas notas:

- Dano patrimonial: Limites da NP 2074: 2015.
 - Nota 1: Considera-se ser de esclarecer que a NP 2074, e normas congéneres, por exemplo a BS 5228-2, estabelecem limites de vibração seguros para que não ocorram danos cosméticos (definição na NP ISO 4886). Por exemplo a BS 5228-2 refere o seguinte, a seguir à sua Tabela B.2 limitativa: “*são possíveis danos cosméticos para magnitudes de vibração que sejam duas vezes superiores aos valores da Tabela B.2*”. Estamos assim a falar de limites que previnem, com alguma segurança, a possibilidade de ocorrência de “danos superficiais”,

portanto previnem, ainda com mais segurança, a possibilidade de ocorrência de “danos estruturais”.

- Nota 2: Uma vez que a NP 2074: 2015 pode ser, em alguns casos particulares, muito conservadora, julga-se que, em casos excecionais e devidamente fundamentados, se possa equacionar recorrer a requisitos que possam ser considerados, justificadamente, adequados mas menos conservadores, sem pôr em risco a prevenção de ocorrência de danos cosméticos nas estruturas, por exemplo recorrer ao quadro limitativo da Tabela B.2 e Figura B.1 da Norma Britânica BS 5228-2, tendo em conta, se aplicável, a consideração de metade dos valores limites expressos, caso possam ocorrer ressonâncias (1.º parágrafo da página 29 da norma).

Apresentam-se os limites de danos cosméticos da BS 5228-2 no Quadro 2 seguinte – com Notas Extra (NE) dos limites para hipótese de ressonância e de conversão de limites de deslocamento para velocidade de vibração, não constantes no quadro original – os quais podem assim ser comparados com os limites da NP 2074, apresentados no capítulo “2.4.1 Elementos regulamentares ou de normalização no Parecer da Comissão de Avaliação”.

- Fase de exploração, Critérios LNEC:
 - Sensação da vibração com tal:
 - $v_{ef} \leq 0.11$ mm/s.
 - Ruído re-radiado:
 - $v_{ef} \leq 0.02$ mm/s [$L_{Aeq,interior} \leq 22$ dB(A)].
 - Nota1: Considera-se ser de referir que o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE; DL96/2008) estabelece limites para o ruído apercibido no interior de quartos, devido ao ruído de funcionamento de equipamentos coletivos do edifício, por exemplo o ruído de funcionamento de elevadores e de portões de garagem os quais, considerados como funcionamento intermitente, não contínuo, possuem como valor limite: $L_{Ar,NT} \leq 32$ dB(A), que é, grosso modo, 10 dB menos exigente do que o limite do Critério LNEC para a passagem de composições do metropolitano.
 - Nota 2: O documento “União Internacional do Caminho de Ferro (UIC) – *Railway Induced Vibration: State of the art report. 2017*”¹ apresenta no seu *Graph 13* as seguintes recomendação para valores limite de ruído re-radiado [*Ground-Borne Noise (GBN)*] que são, grosso modo, menos exigentes do que o RRAE e ainda menos exigentes do que os Critérios LNEC:
 - Limite ideal (verde): Valor máximo: 38 dB(A); Média energética de 24h: 32 dB(A).
 - Limite intermédio (amarelo): Valor máximo: 48 dB(A); Média energética de 24h: 42 dB(A).

¹ <https://uic.org/IMG/pdf/uic-railway-induced-vibration-report-2017.pdf>.

Quadro 2: Limites de vibração para danos cosméticos da BS 5228-2

Tipo de edifício	Velocidade de pico na gama de frequência do pulso predominante	
	4 Hz a 15 Hz	15 Hz e superior
Estruturas reforçadas ou com “esqueleto” de estabilização. Edifícios industriais e comerciais de maior envergadura	50 mm/s (NE: se hipótese de ressonância: 25 mm/s)	50 mm/s (NE: se hipótese de ressonância: 25 mm/s)
Estruturas não reforçada ou com “esqueleto” ligeiro de estabilização. Edifícios residenciais e comerciais de pequena envergadura	15 a 20 mm/s (aumento gradual de 4 Hz a 15Hz) (NE: se hipótese de ressonância: 7.5 a 10 mm/s)	20 mm/s (NE: se hipótese de ressonância: 10 mm/s)

Nota 1: Os valores referem-se à base da edificação.
 Nota 2: Em frequências abaixo de 4 Hz, um deslocamento máximo de 0.6 mm (zero a pico) não deve ser ultrapassado.
 [NE: Dada a seguinte relação entre a amplitude D do deslocamento e a amplitude V da velocidade de vibração: $V=D \times 2\pi f$; o limite de 0.6 mm para o deslocamento, considerando uma frequência mínima de 2 Hz (NP 2074: 2015), significa o seguinte limite mais exigente entre 2 Hz e 4 Hz para a velocidade de pico: 7.5 mm/s (se hipótese de ressonância: 3.75 mm/s)].

3.2 Caracterização da Situação Atual

Este capítulo pretende responder ao ID4DIA, alínea b).

No Relatório do EIA, disponível em

<https://participa.pt/contents/consultationdocument/LVSSA%20EIA%20RS%20MD%20002%20A.pdf>, apresentava-se na Tabela 51, do seu capítulo “5.13.2.3 Medições de Vibrações”, os resultados das medições de vibração *in situ*.

A imagem da Tabela 51 referida é apresentada na Figura 1.

Tabela 51 - Implantação cartográfica e fotográfica dos Locais de Medição, fontes determinantes e valores dos níveis de vibração registados

PK/LADO DA VIA	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	FOTOGRAFIA	FONTES	VELOCIDADE [mm/s]
Local V1 0+520 descendente			T. Ferrov. (Elétrico)	0,02
Local V2 0+840 -			T. Ferrov. (Elétrico)	0,04
Local V3 1+820 -			T. Ferrov. (Elétrico)	0,05
Local V4 3+350 descendente			T. Ferrov. (comboio)	0,01

Figura 1: Excerto da Tabela 51 do Relatório de EIA com os resultados das medições de vibração *in situ*

Conforme ID4DIA (alínea b) foi efetuada nova caracterização *in situ*, nos dias 24 a 28 de junho de 2024, e 19 e 20 de agosto de 2024, cujos resultados obtidos se apresentam no Quadro 3.

Na Figura 2 apresenta-se a localização dos pontos de medição do EIA (LocalV1 a V4) e dos novos pontos de medição (PMV01 a PMV09).

Os valores obtidos no EIA variaram entre 0,01 mm/s e 0,05 mm/s, ainda que tenham sido caracterizadas zonas próximas de passagem de elétrico (Local V2 e LocalV3) o que revela a baixa emissão de vibração do elétrico.

Nas novas medições os valores variaram entre 0,033 mm/s e 0,056 mm/s, sendo o valor mínimo mais alto do que o caracterizado no EIA, o que é representativo de em todos os casos ter sido

sempre possível caracterizar, nas novas medições, alguma passagem ou movimentação de veículo rodoviário na proximidade.

Quadro 3 Velocidades de vibração medidas nos pontos de medição

Ponto	Coordenadas	Velocidade de vibração [mm/s; 1-80Hz]	Comentários	Apontamento fotográfico
PMV01	38°43'29.23"N 9° 9'36.29"W	0.056	Tráfego rodoviário intenso da Av. Conselheiro Fernando de Sousa e do Túnel o Marquês.	
PMV02	38°43'17.87"N 9° 9'34.22"W	0.038	Tráfego rodoviário ocasional da Travessa do Barbosa (sentido único). Tráfego aéreo.	
PMV03	38°43'5.97"N 9° 9'54.41"W	0.05	Tráfego rodoviário da Rua Infantaria 16 junto ao Jardim da Parada. Tráfego aéreo.	
PMV04	38°42'50.54"N 9° 9'55.92"W	0.033	Tráfego aéreo. Tráfego rodoviário limitado (rua sem saída) Ruído de vizinhança-	
PMV05	38°42'38.28"N 9° 9'57.75"W	0.037	Tráfego aéreo e ruído de vizinhança.	
PMV06	38°42'22.65"N 9°10'14.26"W	0.039	Tráfego rodoviário local da Rua as necessidade e distante d Ponte 25 de Abril. Tráfego Aéreo.	

Ponto	Coordenadas	Velocidade de vibração [mm/s; 1-80Hz]	Comentários	Apontamento fotográfico
PMV07	38°42'24.17"N 9°10'22.84"W	0.055	Tráfego rodoviário intenso a Av. de Ceuta - rua Maria Pia. Tráfego ferroviário. Tráfego aéreo	
PMV08	38°42'26.06"N 9°10'37.61"W	0.045	Tráfego rodoviário intenso o acesso à Ponte 25 de Abril. Tráfego ferroviário. Tráfego aéreo.	
PMV09	38°42'23.10"N 9°10'18.67"W	0.037	Tráfego rodoviário da ua Necessidades	

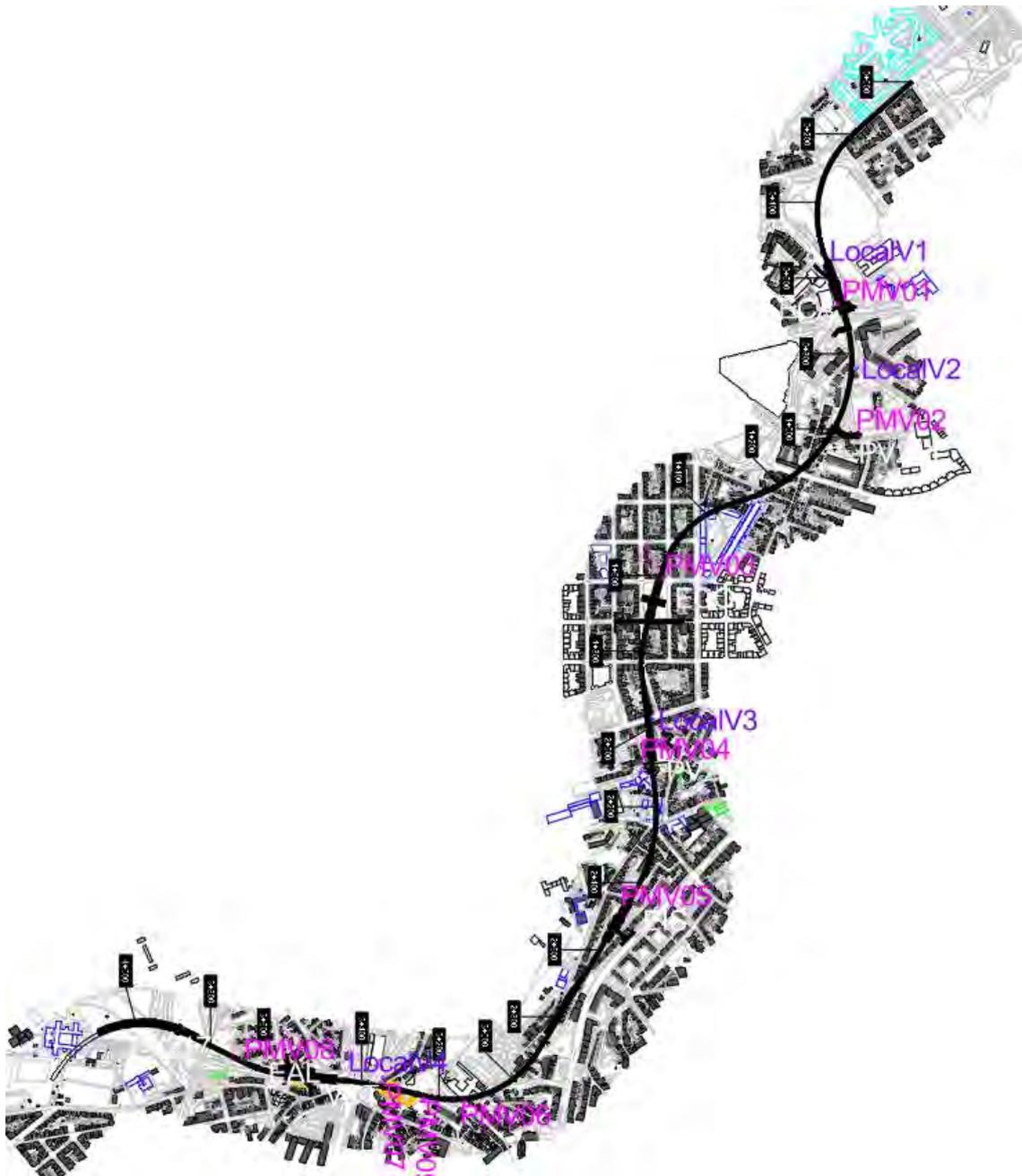


Figura 2: Localização dos pontos de medição de vibração *in situ*, no EIA (LocalV1 a V4) e no presente estudo (PM01 a PM09)

3.3 Estimação da vibração e do ruído re-radiado (geral)

Este capítulo pretende concretizar o ID4DIA, alínea c).

No Anexo I apresenta-se estudo detalhado de vibrações de onde se conclui, de forma resumida:

- Com os tipos de via considerados, conforme explicitado no Quadro 2 do documento do Anexo I, e informação anterior, e que aqui se repete, integrando, na Figura 3, prevêem-

se os seguintes edifícios com valores de vibração acima de 0.02 mm/s (limite mais exigente dos Critérios LNEC para cumprimento do limite de ruído re-radiado):

- Edifícios 1 a 8 (km 0+000 a km 0+200; ver Figura 4).
- Edifícios 14 a 17 (km 0+600 a km 0+800; ver Figura 4).
- Edifícios 19 a 32 (km 0+800 a km 1+100; ver Figura 5).
- Edifícios 39, 43, 49, 56, 60 (km 1+200 a km 1+350; ver Figura 5).
- Edifícios 84 a 87 e 89 (km 1+500 a km 1+600; ver Figura 5).
- Edifício 111 (km 1+725; ver Figura 6).
- Edifícios 220, 223, 226, 227, 229, 230, 232 e 234 (km 2+550 a km 2+700; ver Figura 6).
- Edifícios 235, 237 a 254 (km 2+700 a km 3+000; ver Figura 7).
- Edifícios 235, 237 a 254 (km 2+700 a km 3+000; ver Figura 7).
- Edifícios 296 a 304 (km 3+700; ver Figura 7).

Pontos quilométricos, (Pk)		Tipo de Via			
Início	Fim				
0+000	0+560	Tipo 1	2+723,743	2+865	Tipo 6
0+560	0+665	Tipo 2	2+865	3+020	Tipo 1
0+665	1+620	Tipo 1	3+020	3+240	Tipo 3
1+620	1+725	Tipo 2	3+240	3+310	Tipo 1
1+725	1+900	Tipo 1	3+310	3+465	Tipo 4
1+900	1+943,743	SEV 1/CO	3+465	3+585	Tipo 5
1+943,743	2+085	Tipo 6	3+585	3+735	Tipo 3
2+085	2+470	Tipo 1	3+735	3+765	SEV 1/AC
2+470	2+575	Tipo 2	3+765	3+808,743	SEV 3/AC
2+575	2+680	Tipo 1	3+808,743	4+097	Tipo 6
2+680	2+723,743	SEV 1/IS			

Via Tipo 1 – Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em túnel Via Dupla;
 Via Tipo 2 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Estação (Amoreiras/Campo de Ourique e Infante Santo);
 Via Tipo 3 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Túnel sobre manta antivibrática;
 Via Tipo 4 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Viaduto;
 Via Tipo 5 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA na estação Alcântara;
 Via Tipo 6 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Túnel Via Tripla;
 SEV - Secção Especial de Via constituída por Aparelhos de via isolados ou integrados numa mesma “secção” de via.

Figura 3: Tipos de via considerados da previsão de vibração, conforme quadro 2, e informação anterior, do Anexo I

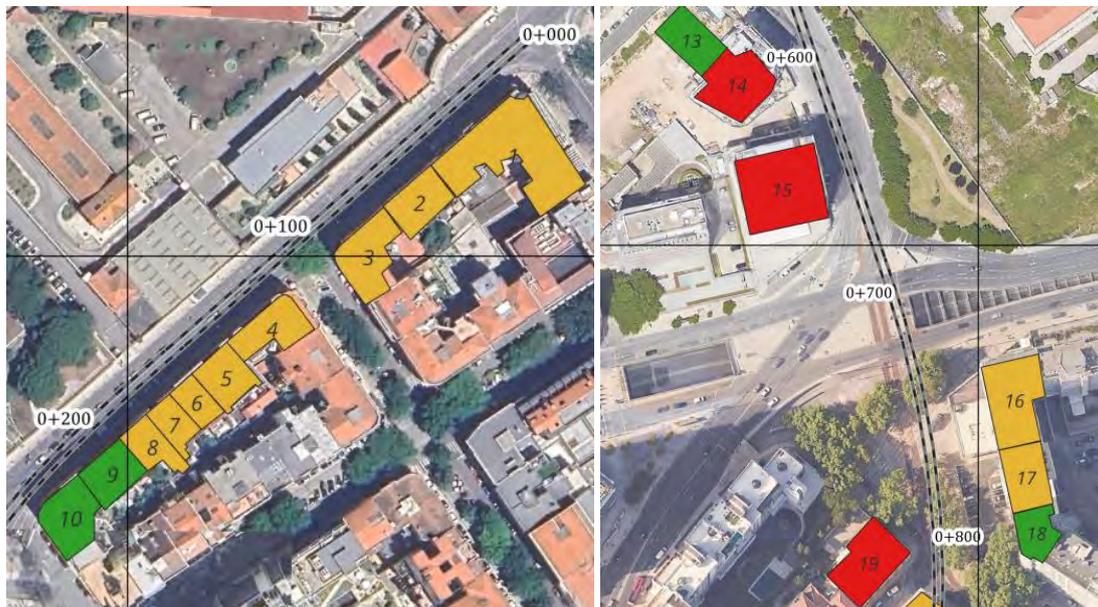


Figura 4: Destaque dos edifícios onde se prevê incumprimento dos limites de ruído re-radiado ($v_{ef} > 0.02$ mm/s; edifícios numerados não a verde; km 0+00 a km 0+800)



Figura 5: Destaque dos edifícios onde se prevê incumprimento dos limites de ruído re-radiado ($v_{ef} > 0.02$ mm/s; edifícios numerados não a verde; km 0+800 a km 1+600)



Figura 6: Destaque dos edifícios onde se prevê incumprimento dos limites de ruído re-radiado ($v_{ef} > 0.02$ mm/s; edifícios numerados não a verde; km 1+700 a km 1+800 e 2+500 a km 2+700)



Figura 7: Destaque dos edifícios onde se prevê incumprimento dos limites de ruído re-radiado ($v_{ef} > 0.02$ mm/s; edifícios numerados não a verde; km 2+700 a km 3+000 e 3+700 a km 3+800)

3.4 Estimação da vibração e do ruído re-radiado (Palácio das Necessidades e outras estruturas a proteger)

Este capítulo pretende concretizar o ID1DIA.

Na Figura 8 apresenta-se o destaque das previsões do documento no Anexo I, na zona do Palácio das Necessidades, onde se verifica uma previsão geral de valores eficazes de velocidade de vibração menores ou iguais a 0.02 mm/s.

Conforme patente no ID4DIA (subcapítulo “2.4.1 Elementos regulamentares ou de normalização no Parecer da Comissão de Avaliação”), em particular no quadro de limites da NP 2074, e no Quadro 2 anterior, com os limites da BS 5229-2, e tendo também em conta as conclusões do documento “Arne P. Johnson; W. Robert Hannen – *Vibration Limits for Historic Buildings and Art Collections*. *Journal of Preservation Technology*, 2015”², os limites mais exigentes para proteção de danos cosméticos, em termos de valor de pico, são:

- NP 2074: 1.5 mm/s.
- BS 5228-2: 3.75 mm/s.
- Arne P. Johnson; W. Robert Hannen: 0.12 in./s a 0.5 in./s (\approx 3mm/s a 12.7 mm/s).

A relação entre o valor de pico e o valor eficaz é denominado por Fator de Crista.

Conforme patente na nota de rodapé viii do documento FTA³, o mais usual, para o ruído re-radiado, é um fator de crista de 4 a 5.

Assim, uma vez que as previsões de valor eficaz são menores ou iguais a 0.02 mm/s, tal deverá significar, uma previsão em termos de valor de pico de valores menores ou iguais a :

- $5 \times 0.02 = 0.1$ mm/s.

Como o traçado está tipicamente a uma profundidade máxima de cerca de 20 m, valores de 0.1 mm/s a 20 m, significarão, pela equação 7.2 do documento FTA, o seguinte valor de pico, considerado seguro, a 2 m de distância do traçado:

- $0.1 \times (20/2)^{1.5} \approx 3$ mm/s

Tal valor cumpre ainda o limite mais exigente da BS 5228-2, mas faz recomendar, para eventuais estruturas a proteger, muito próximas do traçado, a efetiva definição dos valores limite de vibração para inexistência de danos cosméticos considerada mais adequada e a equação de consideração desses locais nas zonas de determinação da função de transferência e e/ou de consideração desses locais na monitorização de teste com a circulação normal do metropolitano, antes da entrada em exploração.

² https://www.apti.org/assets/docs/Johnson-HannenHiRes_SampleArt_46.2-3.pdf.

³ https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/research-innovation/118131/transit-noise-and-vibration-impact-assessment-manual-fta-report-no-0123_0.pdf.



Figura 8: Destaque das previsões do Anexo I na zona do Palácio das Necessidade (km 3+000 a km 3+300; $v_{ef} \leq 0.02$ mm/s)

3.5 Dimensionamento de medidas

Face ao explicitado atrás e no Anexo I do presente Estudo, considera-se necessária a implementação de sistemas anti vibráteis nos seguintes casos:

- VIA BETONADA COM PALMILHA CANELADA DE 9mm, BLOCOS DE BETÃO COM PANTUFA E PLACA MICROCELULAR COM LAJE SOBRE MANTA ANTI-VIBRÁTIL, GEOTEXIL DE PROTEÇÃO E PERFIL DE REMATE:
 - km 0+000 a km 0.250.
 - km 0+500 a km 1+350.
 - km 1+500 a km 1+800.
 - km 2+550 a km 3+240.
 - km 3+576.193 a km 3+650.
- TIPO APOIOS ANTIVIBRÁTICOS DISCRETOS SOB LAJE DE BETÃO (APOIOS PONTUAIS DO TIPO POT BEARINGS E MANTA LATERAL DE CONFINAMENTO EM DUAS LAJES INDEPENDENTES). OS APOIOS PONTUAIS CONSTITUÍDOS POR MATERIAL ELASTÓMERO EM POLIURETANO COM DIMENSÕES (PRELIMINARES) DE 475X475MM E ESPESSURA DE 87,5MM:

- Km 3+650 a km 3+750.

A necessidade de sistemas anti-vibráteis em mais zonas do que as previstas anteriormente, prende-se em grande medida com o facto, explicitado na fase de estudo prévio e de ante-projeto, de existirem dois documentos patenteados, provenientes do LNEC:

1. DOCUMENTO GUIA PARA A MINORAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE POTENCIAIS SITUAÇÕES DE INCOMODIDADE AO RUÍDO E VIBRAÇÃO NO INTERIOR DE RESIDÊNCIAS DECORRENTES DA CIRCULAÇÃO DO METROPOLITANO. 2018.
2. PLANO DE EXPANSÃO DO METROPOLITANO DE LISBOA – PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA: TRECHO S. SEBASTIÃO A ALCÂNTARA (PK 0+0 AO PK 3+230) - Previsão analítica dos níveis de incomodidade das vibrações induzidas nos pavimentos dos edifícios existentes devido à passagem de comboios do ML. 2022.

em que o documento mais recente, de 2022, e direcionado para o traçado em apreço, não considera os requisitos mais exigentes, associados ao ruído re-radiado, estabelecidos no documento mais geral de 2018.

Assumiu-se, na fase de estudo prévio e de ante-projeto, face à maior direção e atualidade (publicação mais recente) que seriam para considerar apenas os requisitos assumidos na publicação do LNEC de 2022.

Tendo sido cabalmente esclarecido na fase de projeto de execução a necessidade de cumprimento dos requisitos de ruído re-radiado do documento do LNEC de 2018, houve necessidade de redefinição em conformidade das medidas anti vibráteis, conduzindo a uma maior extensão do que a prevista anteriormente.

4 REAVALIAÇÃO DE IMPACTES

No Relatório Síntese do EIA, disponível em:

<https://participa.pt/contents/consultationdocument/LVSSA%20EIA%20RS%20MD%20002%20A.pdf>

consta o seguinte, considerado mais relevante, no seu capítulo “7 7.14.1.4.2 Avaliação de Impactes das Vibrações na Fase de Exploração”, de onde se explicita também as tabelas referidas e textos associados:

“Os recetores mais próximos situam-se a cerca de 10 m da via. Como tal, os mecanismos de transmissão de estímulos de vibrações assumirão importância. Poderia haver deste modo lugar a impactes negativos se não fossem adotadas em projeto medidas minimizadoras de vibrações na generalidade do traçado, conforme se pode verificar por comparação dos resultados apresentados da Tabela 133 com os critérios do LNEC. Os impactes previstos poderiam ser classificados, de acordo com a Tabela 130, nos níveis: i) 2 a 3 entre o PK inicial e o PK 2+320 e entre o PK 4+100 e o PK final e ii) 4 entre o PK 2+320 e o PK 3+750 A incorporação no projeto de medidas minimização, definidas e analisadas adiante na secção 10.2.3, pela não existência de impactes dignos de registo. Em fase de projeto de execução deverão ser reanalisados os impactes, com o conhecimento dos dados finais de projeto, através de método detalhado.”

Tabela 130 – Escala para a avaliação/quantificação da magnitude/significância ou significância global dos impactes para vibrações, de acordo com os critérios LNEC

NÍVEL	VELOCIDADE EFICAZ [mm/s]
0	$v_{ef} < 0,02$
1	$0,02 < v_{ef} < 0,03$
2	$0,03 < v_{ef} < 0,11$
3	$0,11 < v_{ef} < 0,28$
4	$0,28 < v_{ef} < 1,10$
5	$v_{ef} > 1,10$

Tabela 133 – Velocidades de Vibração previstas para as zonas de referência

ZONA	DISTÂNCIA [m]	DISTÂNCIA [ft]	L_v (sem correções) [VdB re 1×10^{-6} in/s]	L_v (corrigido) [VdB re 1×10^{-6} in/s]	L_v [VdB re 5×10^{-8} m/s]	VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO [mm/s]
0+000 / 0+300	20	65	71	79	73	0,22
0+500 / 0+700	43	141	64	72	66	0,10
0+750 / 1+150	16	52	73	80	74	0,26
1+150 / 1+400	24	79	70	77	71	0,18
1+440 / 2+080	26	85	69	76	71	0,17
2+100 / 2+320	44	144	64	72	66	0,10
2+320 / 2+920	9	31	76	84	78	0,39
2+920 / 3+200	10	33	76	83	78	0,38
3+250 / 3+750	10	33	76	83	78	0,38
4+100 / 4+250	34	112	67	74	68	0,13

Em fase de projeto de execução deverão ser revistas as previsões apresentadas, através de método mais detalhado, com base nos elementos finais de projeto.

De facto foram revistas as previsões, por recurso às técnicas mais avançadas do estado de arte atual, explicitadas no documento do Anexo I deste Estudo, tendo sido dimensionadas medidas de redução de vibração em conformidade, de forma que, sob o efeito dessas medidas, prevê-se a ocorrência de valores menores ou iguais a 0.02 mm/S em todos os Recetores Sensíveis, pelo que se prevêem assim Impactes negativos mas Pouco Significativos, que será devidamente controlados através do Programa de Monitorização estabelecido.

5 MEDIDAS

Todas as medidas contantes no capítulo “10.14.1.3 Fase de Exploração” e “10.14.2 Vibrações no edificado” do Relatório Síntese do EIA, disponível em:

<https://participa.pt/contents/consultationdocument/LVSSA%20EIA%20RS%20MD%20002%20A.pdf>

foram revistas conduzindo às seguintes medidas definidas no presente Estudo:

MM.VB.01 – Implementação do seguinte tio de via “anti vibrátil”:

“VIA BETONADA COM PALMILHA CANELADA DE 9mm, BLOCOS DE BETÃO COM PANTUFA E PLACA MICROCELULAR COM LAJE SOBRE MANTA ANTI-VIBRÁTIL, GEOTEXTIL DE PROTEÇÃO E PERFIL DE REMATE”

nos seguintes kms de traçado:

- km 0+000 a km 0.250.
- km 0+500 a km 1+350.
- km 1+500 a km 1+800.
- Km 2+550 a km 3+240.

MM.VB.02 – Implementação do seguinte tio de via:

“TIPO APOIOS ANTIVIBRÁTICOS DISCRETOS SOB LAJE DE BETÃO (APOIOS PONTUAIS DO TIPO POT BEARINGS E MANTA LATERAL DE CONFINAMENTO EM DUAS LAJES INDEPENDENTES). OS APOIOS PONTUAIS CONSTITUÍDOS POR MATERIAL ELASTÓMERO EM POLIURETANO COM DIMENSÕES (PRELIMINARES) DE 475X475MM E ESPESSURA DE 87,5MM”

nos seguintes kms de traçado:

- km 3+650 a km 3+750.

6 PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA FASE DE EXPLORAÇÃO E PRÉ-EXPLORAÇÃO

6.1 Pré-Exploração

Ainda que a monitorização prevista antes da fase de exploração ocorra, antes da fase de exploração e, em grande medida, durante A fase de construção, a direção deste tipo de monitorização para a fase de exploração, levou a que se considerasse adequado apresentar neste Estudo este tipo de monitorização.

São dois os tipos de monitorização (testes de medição) direcionados para a fase de exploração, que necessitam de ser efetuados antes da fase de exploração, em linha com o IDODIA, cujo tecto é aqui utilizado

- **Funções de transferência:**

Deve ser realizada uma campanha de monitorização, após a execução dos toscos e anterior à execução da empreitada seguinte de construção da solução de via-férrea para

determinar se as funções de transferência estão validades e, conseqüentemente, para averiguar se o dimensionamento das medidas de minimização a implementar é adequado.

O correspondente Relatório deve ser entregue à autoridade de AIA até 2 meses após a realização dessas medições e deve ser sempre anterior ao início da fase seguinte de execução deste troço de linha. Este relatório deve incluir uma comparação entre as estimativas constantes do RECAPE e que estiveram subjacentes ao dimensionamento das medidas de minimização e os valores efetivamente medidos em campo.

- **Testes finais antes da entrada em exploração:**

Em momento prévio à entrada em serviço, deve ser realizado um teste com as futuras composições que circularão nesta linha e para os diferentes regimes de velocidade previstos, para se determinar as funções de transferência finais (incluindo a ação das medidas de minimização implementadas) e a real eficácia das medidas de minimização adotadas.

Os referidos relatórios devem ser entregues à autoridade de AIA no prazo de 2 meses, antes da entrada em serviço, que ficará condicionada à sua aprovação.

Nos subcapítulos seguintes definem-se as zonas onde se recomenda a realização dos testes referidos, e algumas especificidades associadas.

Caso exista alguma estrutura muito próxima do traçado, não identificado em seguida, e que seja necessário proteger, nomeadamente ao nível do património, deverá equacionar-se estender a ponto próximo dessa estrutura, a necessidade de monitorização quer da função de transferência, quer do teste final antes da entrada em exploração, quer da própria exploração, como o objetivo de verificação de valores limites de danos cosméticos, ou outros, a definir caso a caso.

6.1.1 Funções de transferência

Para determinação das funções de transferência recomenda-se que se sigam as melhores práticas associadas, sendo de referir os seguintes casos particulares:

- Documento LNEC, de 2018:
 - “DOCUMENTO GUIA PARA A MINORAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE POTENCIAIS SITUAÇÕES DE INCOMODIDADE AO RUÍDO E VIBRAÇÃO NO INTERIOR DE RESIDÊNCIAS DECORRENTES DA CIRCULAÇÃO DO METROPOLITANO”.
 - capítulo “3 | Definição de metodologia de caracterização para estudos de acondicionamento na componente vibrações”.
- Documento FTA, de 2018⁴:
 - “Step 2a. Estimate force density”.
 - “Step 2b. Measure the point-source transfer mobility”.
 - “Step 2c. Estimate line-source transfer mobility”.
 - “Step 2d. Project ground-borne vibration and ground-borne noise”.
- Documento da Tese de Doutoramento de Vitor Rosão, de 2011⁵:

⁴ https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/research-innovation/118131/transit-noise-and-vibration-impact-assessment-manual-fta-report-no-0123_0.pdf.

⁵ <https://sapientia.ualg.pt/bitstreams/e10bdebf-67f8-4fcc-8799-d096048ba20f/download>.

- Dedução matemática da conversão de um fator de atenuação para excitação pontual numa excitação linear: “A1.4. RELAÇÃO ENTRE FACTOR DE ATENUAÇÃO PONTUAL E LINEAR PARA VIBRAÇÃO AMBIENTE”.

Face às previsões efetuadas, recomenda-se monitorização nos pontos PMVE-01 a PMVE-14, que se localização nas figuras seguintes (Figura 9 a Figura 15).



Figura 9: Localização em perfil longitudinal e em planta do Ponto de Monitorização de Vibração na Fase de Exploração PMVE-01



Figura 10: Localização em perfil longitudinal e em planta dos Pontos de Monitorização de Vibração na Fase de Exploração PMVE-02 a PMVE-04

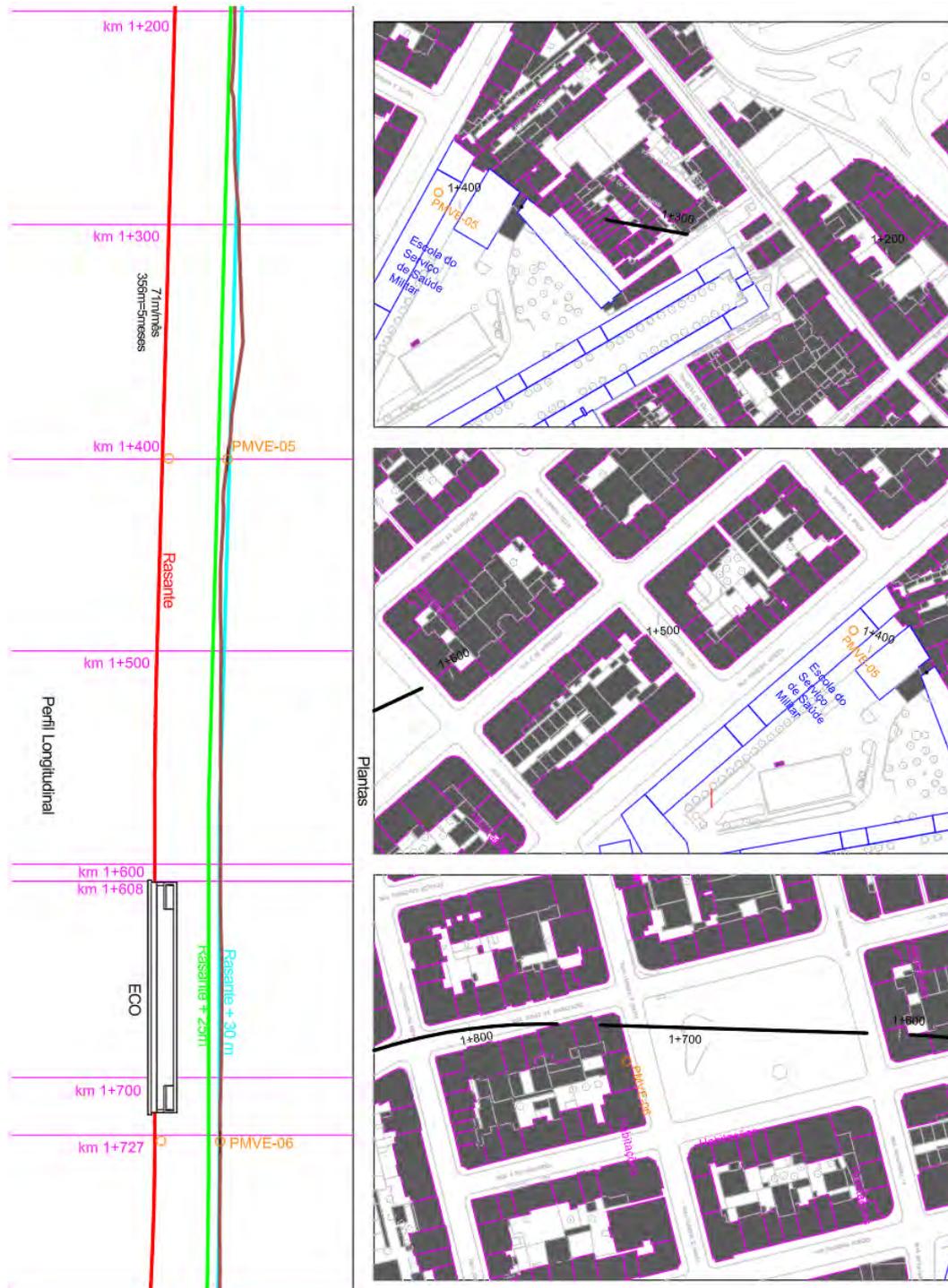


Figura 11: Localização em perfil longitudinal e em planta dos Pontos de Monitorização de Vibração na Fase de Exploração PMVE-05 e PMVE-06

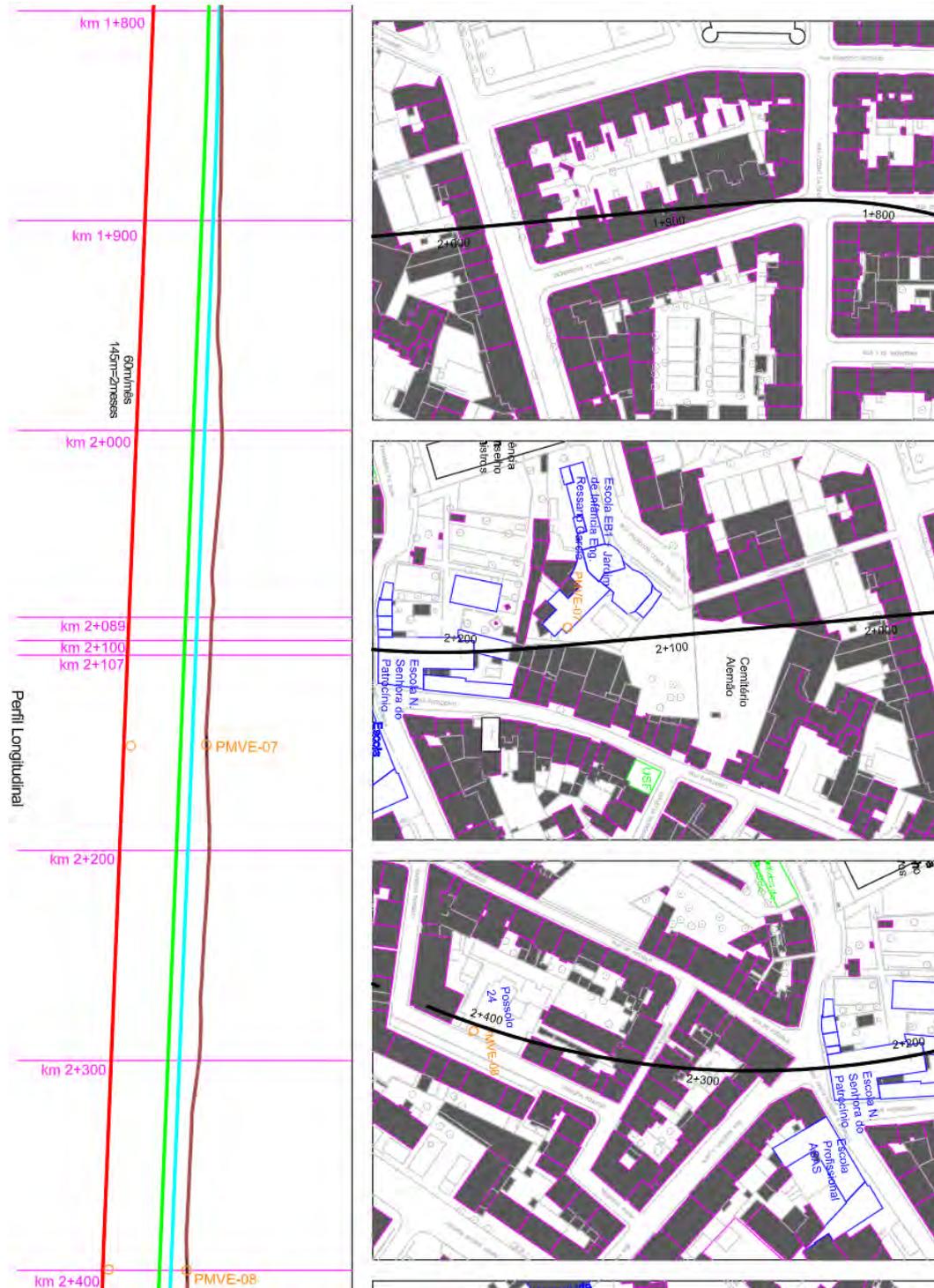


Figura 12: Localização em perfil longitudinal e em planta dos Pontos de Monitorização de Vibração na Fase de Exploração PMVE-07 a PMVE-08

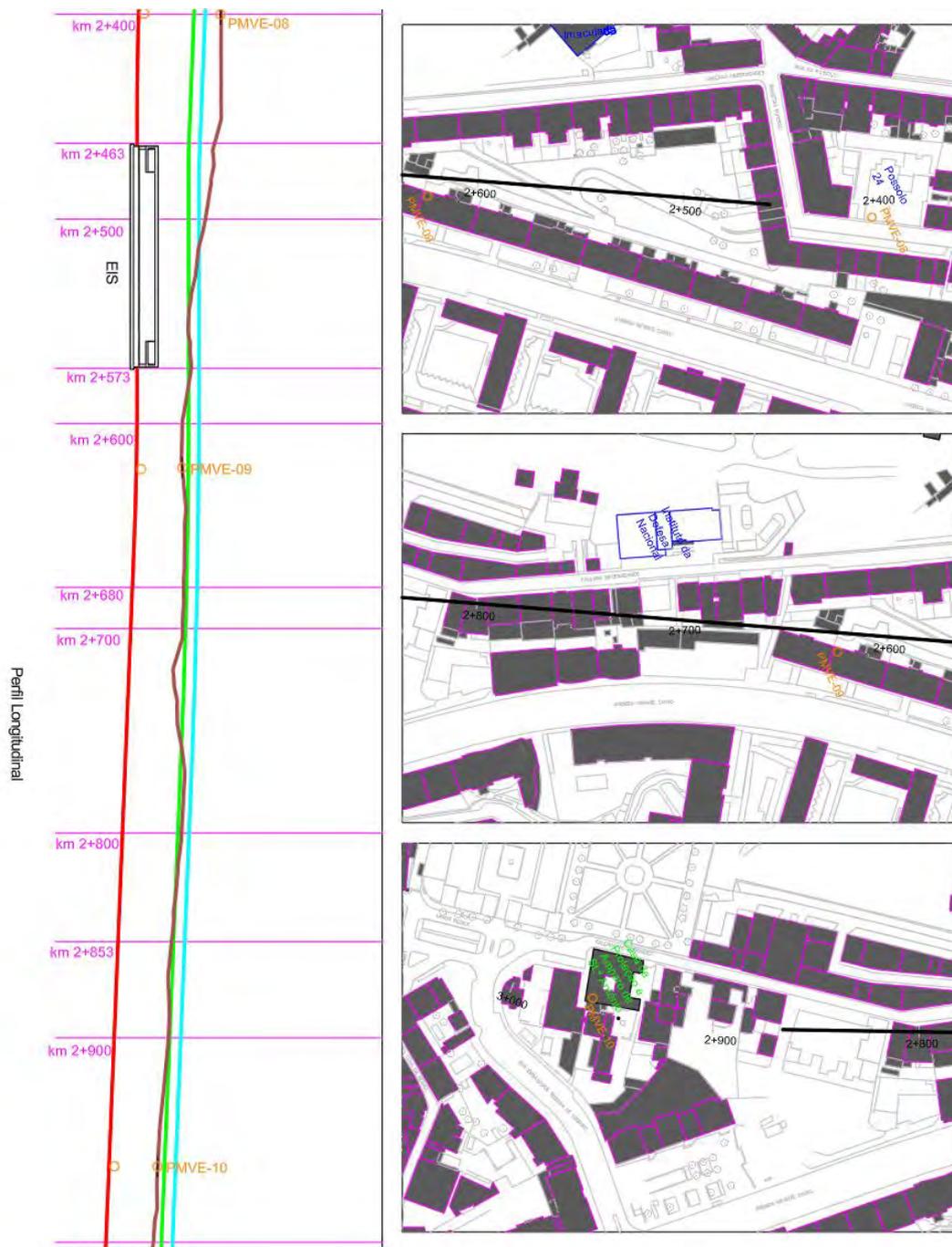


Figura 13: Localização em perfil longitudinal e em planta dos Pontos de Monitorização de Vibração na Fase de Exploração PMVE-08 a PMVE-10



Figura 14: Localização em perfil longitudinal e em planta dos Pontos de Monitorização de Vibração na Fase de Exploração PMVE-11 a PMVE-13

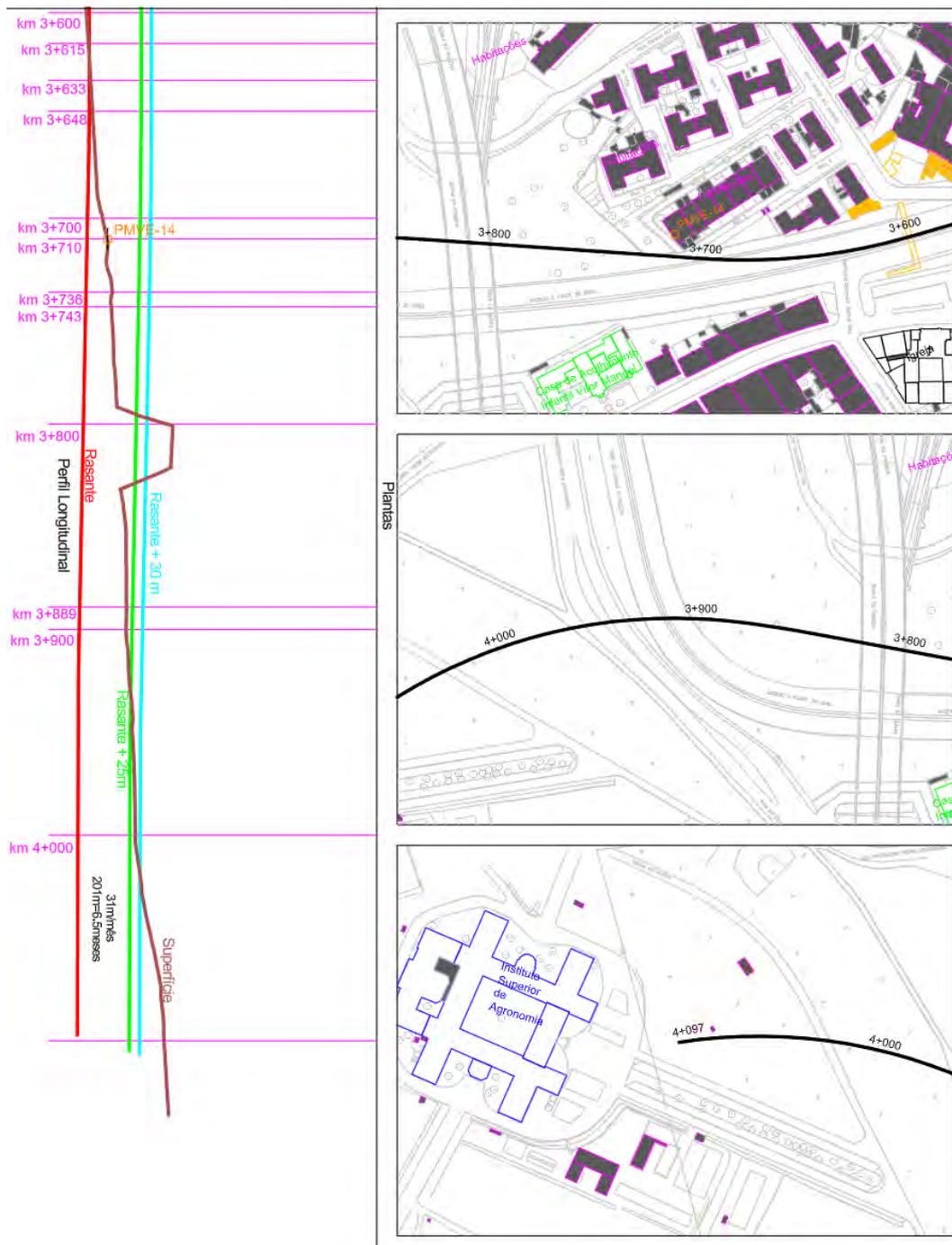


Figura 15: Localização em perfil longitudinal e em planta dos Ponto de Monitorização de Vibração na Fase de Exploração PMVE-14

6.1.2 Testes finais antes da entrada em exploração

Recomenda-se a efetivação de medições finais, antes da entrada em funcionamento em exploração, mas com condições de teste exatamente iguais às da exploração (pelo menos tipo de composição e velocidade), nos mesmos pontos referidos atrás, PMVE-01 a PMVE-14, que se localizam na Figura 9 a Figura 15 anteriores.

Recomenda-se que em cada ponto sejam caracterizadas pelo menos 3 passagens de comboio, pelo menos uma passagem em um sentido e outra em outro sentido.

Os resultados devem ser analisados à luz dos limites aplicáveis a cada caso, sendo necessário equipamentos de medição de vibração (vibrómetro) e de ruído (sonómetros) no interior. Apenas no caso especial de PMVE-12 e PMV-13 as medições devem ser exclusivas de ruído (sonómetro) no exterior (zona de viaduto) para verificação dos limites do Regulamento Geral do Ruído, em função de 3 passagens (ver NP ISO 1996: 2021, para determinação de valores de L_{Aeq} globais em função de medições à passagem, e tendo em conta o n.º de passagens total, para cada período de referência, previsto). Os limites a verificar serão assim:

- Generalidades dos casos: $v_{ef} \leq 0.02$ mm/s ($L_{Aeq,interior}$) em cada das composições.
- PMVE-12 e PMV-13: $L_{den} \leq 65$ dB(A); $L_n \leq 55$ dB(A), deduzida das medições associadas a 3 passagens.

6.2 Exploração

6.2.1 Generalidade

De forma genérica atentar ao seguinte:

- As periodicidades referidas em seguida deverão ser ajustadas em função dos resultados e informação obtidos ao longo da monitorização, e direcionar-se para os períodos, fases e pontos com maior probabilidade de afetação acústica, tendo também em conta o seguinte:
 - Caso a emissão vibrátil seja significativamente superior ao previsto e ocorra incumprimento dos limites acústicos legais (DL 9/2007) deverá ser equacionada a implementação de Medidas de Minimização de Vibração e a revisão do plano de monitorização incluindo a realização de novas campanhas após a concretização das medidas.
 - Caso ocorram modificações significativas das características de emissão, propagação ou receção vibrátil, da tipologia dos edifícios ou dos requisitos legais, deverá ser revisto o plano de monitorização, pelo menos em alguns pontos.
 - Caso ocorra manutenção continuada da emissão vibrátil, poderá ser equacionada uma periodicidade mais alargada ou mesmo a desnecessidade de novas campanhas, pelo menos em alguns pontos.

- Caso existam reclamações devido à vibração ou ao ruído re-radiado associado ao projeto – circulação do metropolitano – deverão ser efetuadas medições junto aos Recetores reclamantes, nas condições que deram azo à queixa, e equacionar a revisão do Plano de Monitorização em conformidade.
- Os pontos definidos deverão ser substituídos (caso se verifique ser mais pertinente outro ponto), acrescidos (caso se verifique a necessidade de mais pontos) ou eliminados (caso se demonstra a sua irrelevância), em função dos resultados obtidos ou outra informação que fundamente tal decisão.
- De notar que é necessário confirmar o efetivo uso, e/ou equiparação, dos Recetores Sensíveis em causa, devendo ser equacionado desconsiderar edifícios que não correspondam à definição de Recetor Sensível do DL 9/2007: *“o edifício habitacional, escolar, hospitalar ou similar ou espaço de lazer, com utilização humana”* (edifício desabitado não deve ser considerado Recetor Sensível, devendo a monitorização controlar a eventual alteração para estado habitado), ou equacionar desconsiderar compartimentos/fachadas que o legislador acústico não considerou proteger. De acordo com o DL 96/2008 são os seguintes compartimentos os que devem ser protegidos, em edifícios que se constituem como Recetores Sensíveis:
 - Habitacões: Quartos e zonas de estar.
 - Escolas: Salas de aula, incluindo salas de aula musical, de professores, administrativas, Bibliotecas e gabinetes médicos, Salas polivalentes e berçários.
 - Hospitais e similares: Blocos operatórios, gabinetes médicos, salas de consulta ou exame, enfermarias, salas de tratamento, administrativas e de convívio.

A obtenção dos parâmetros que vão ser referidos em seguida, deverá ser efetuada mediante os seguintes equipamentos principais:

- Vibrómetro, devidamente verificado em laboratório de referência, e/ou mediante os equipamentos complementares necessários ao cabal cumprimento do estabelecido na normalização e guias aplicáveis, nomeadamente:
 - NP 2074.
 - BS 5228-2.
 - União Internacional do Caminho de Ferro, 2017.
 - Critérios LNEC.
 - ISO14837-1.
 - ISO/TS14837-31.
- Sonómetro integrador de Classe 1, de modelo aprovado pelo Instituto Português da Qualidade e objeto de verificação periódica em laboratório acreditado para o efeito, e/ou mediante os equipamentos complementares necessários ao cabal cumprimento do estabelecido na normalização, legislação e guias aplicáveis, nomeadamente:
 - Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro.

- NP ISO 1996, de 2021 (Partes 1 e 2; Errata1 2022).
- NP 4476, de 2008 (ISO/TS 15666, de 2021).
- Agência Portuguesa do Ambiente – Guia prático para medições de ruído ambiente – no contexto do Regulamento Geral do Ruído tendo em conta a NP ISO 1996. 2020.
- Notas Técnicas para Relatórios de Monitorização de Ruído – Fase de Obra e Fase de Exploração, publicado pela APA em Novembro de 2009.
- Para monitorização contínua, é aceitável a utilização de Sonómetros de Classe 1, não homologados, mas calibrados de 3 em 3 meses por comparação “lado-a-lado” com Sonómetro integrador de Classe 1, de modelo aprovado pelo Instituto Português da Qualidade e objeto de verificação periódica em laboratório acreditado para o efeito.

De referir os seguintes documentos que poderão servir de base aos questionários a elaborar à população:

- NP 4476 – *Acústica. Avaliação da incomodidade devida ao ruído por meio de inquéritos sociais e sócio-acústicos. 2008*” (ISO/TS 15666: 2003).
- Annex D (*Questionnaire response scale*): International Standard Organization – ISO/TS 14837-31: Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising from rail systems — Part 31: Guideline on field measurements for the evaluation of human exposure in buildings. 2017.
- Maclachlan, Laura; Waye, Kerstin Persson; Pedersen, Eja – Exploring Perception of Vibrations from Rail: An Interview Study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017
- Ögren, Mikael; et. al. – *Comparison of Annoyance from Railway Noise and Railway Vibration*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017.

O programa de medições e os períodos de amostragens, em cada campanha, e outros aspetos, deverão ser os suficientes ao cumprimento inequívoco do estabelecido na normalização e legislação aplicáveis.

Os resultados das medições de vibração e de ruído re-radiado *in situ* deverão ser analisados no sentido do cumprimento ou incumprimento dos requisitos estabelecidos, ou seja:

- 24h:
 - Danos cosméticos:
 - Todos os edifícios e estruturas: Ver NP 2074, BS 5228-2 e documento “Arne P. Johnson; W. Robert Hannen – *Vibration Limits for Historic Buildings and Art Collections*. Journal of Preservation Technology, 2015”⁶).
 - $v_{pico} \leq 3$ mm/s tipicamente suficiente.
- Período de maior sensibilidade:
 - Incomodidade humana:

⁶ https://www.apti.org/assets/docs/Johnson-HannenHiRes_SampleArt_46.2-3.pdf.

- Habitações, escolas, hospitais e similares:
 - $v_{ef} \leq 0.02$ mm/s [$L_{Aeq,interior} \leq 22$ dB(A)].
- Habitações e equiparáveis:
- Eventuais equipamentos extremamente sensíveis às vibrações que possam ser identificados (atentar ao desenvolvimento dos contactos com a vizinhança na fase de construção):
 - Analisar caso a caso, tendo em conta a BS 5228-2 e o facto de tipicamente garantir manutenção dos valores de vibração de referência – sem a atividade construtiva – ser suficiente para não interferência.

Caso exista incumprimento deverão ser equacionadas Medidas de Minimização de Vibração e deverá ser revisto o Plano de Monitorização, incluindo, se necessário, a obtenção de valores de emissão/propagação sonora adequados a uma simulação mais rigorosa e um dimensionamento de medidas mais otimizado.

O tratamento dos dados deverá ser efetuado de forma rigorosa e explícita – tendo por base a normalização/guias aplicáveis – para que se obtenham resultados credíveis e correlacionáveis com as características intrínsecas e extrínsecas que se pretendem observar. Para além do referido, o tratamento dos dados deverá permitir tirar conclusões sustentadas e despoletar, fundamentadamente e se necessário, procedimentos corretivos e/ou complementares adequados. Nestas circunstâncias, as medições e o tratamento dos dados, assim como as eventuais revisões do Plano de Monitorização, deverão ser efetuados por técnicos de acústica habilitados para o efeito, preferencialmente com especialização em Engenharia Acústica da Ordem dos Engenheiros ou similar.

Deverá ser elaborado um Relatório de Monitorização por Campanha de Monitorização.

Os Relatórios de Monitorização a elaborar, para apresentação à Autoridade de A.I.A., deverão estar em conformidade com o estabelecido no anexo V da Portaria n.º 335/2015, e deverão dar conta das eventuais evoluções técnicas que possam ocorrer ao longo da monitorização – não só no que concerne aos equipamentos de medição e metodologias de análise, como também no que concerne às Medidas de Minimização – e dos benefícios que possam daí advir, para a população vizinha do empreendimento, assim como se adaptar às possíveis modificações dos requisitos a analisar, quer devido a alterações legislativas, quer devido a alterações vinculativas de outra natureza.

6.3 Identificação dos parâmetros a monitorizar

Os parâmetros essenciais a monitorizar são os seguintes:

- Danos cosméticos em edifícios e estruturas:
 - Verificação dos limites da NP2074 e/ou da BS5228-2:
 - Parâmetro $v_{max(pico)}$, que corresponde ao valor máximo dos valores de pico ocorridos durante a solicitação em causa. Para mais especificações, consultar as respetivas normas. De acordo com a NP 2074 o intervalo de frequências a considerar deverá ser 2Hz a 80 Hz. A BS5228-2 aponta para valores até aos 250Hz. Pese embora o referido, mas tendo em

conta o estabelecido na ISO 14837-1, recomenda-se, por segurança, caraterização até aos 500 Hz.

- Sensação da vibração como tal e do ruído re-radiado (incomodidade humana):
 - Ainda que a indicação da DIA seja v_{ef} , considera-se ser de equacionara registar e comparar, pelo menos numa primeira análise, por mais seguros, valores máximos dos valores eficazes de segundo a segundo ($v_{max,ef,1s}$). Para uma análise mais detalhada de valor eficaz de determinado tempo/evento, superior a 1s, terá de ser explicitado e justificado o tempo considerado para a análise.
 - Considera-se adequado recomendar o registo de $v_{max,ef,1s}$ em bandas de 1/3 de oitava entre 1Hz e 250 Hz, sendo tipicamente aconselhável a análise particular das seguinte bandas para os seguintes casos (ver ISO 14837-1 e ISO/TS 14837-31):
 - Sensação da vibração como tal: 1Hz a 80Hz.
 - Ruído re-radiado: 16Hz a 250Hz.
- Eventuais equipamentos e/ou atividades muito sensíveis à vibração:
 - verificar caso a caso (questionar aquando das reuniões com a vizinhança da obra).

Uma vez que um dos objetivos fundamentais do Plano de Monitorização é o conhecimento dos efeitos reais do projeto na população, deverão também, sempre que possível, efetuar-se auscultações às pessoas que residam ou permaneçam em locais suscetíveis de serem afetados acusticamente (vibração e ruído re-radiado).

6.4 Locais e frequência de amostragem

Deverão ser pelo menos monitorizados os 7 pontos que se identificam em seguida (apenas metade dos pontos localizados na Figura 9 a Figura 15 anteriores). Será conveniente compatibilizar as medições de vibração/ruído no interior, no âmbito deste Estudo, com as medições de ruído no exterior constantes no Estudo de Ruído fase de exploração.

- 1) PMVE-02 (Hotel D. Pedro), 2) PMVE-05 [Escola do Serviço de Saúde Militar; se desativado substituir pelo PMVE-06 (habitação)], 3) PMVE-07 (Escola Ressano Garcia), 4) PMVE-08 (Possolo 24; informação de uso similar a hospital), 5) PMVE-10 (Casa de Proteção e Amparo de St.º António), 6) PMVE-10 (Palácio das Necessidades), 7) PMVE-14 (habitações)-

Consideram-se as seguintes frequências de amostragem, em linha com o ID9DIA, “bullet” final:

- Campanha de monitorização em contínuo durante pelo menos 1 semana, com identificação dos eventos relevantes em termos de incomodidade à vibração/ruído re-radiado. Se utilização de equipamentos de monitorização contínua homologado e verificados, desnecessidade de adicionar uma campanha por amostragem. Se utilização de equipamentos de monitorização contínua com necessidade de calibração lado-a-lado, adicionar campanha de amostragem, de calibração lado-a-lado, de todos os

equipamentos de monitorização contínua, por comparação com sonómetro homologado e verificado em laboratório acreditado para o efeito,

- Em função dos resultados da primeira campanha da fase de exploração, correspondente a uma monitorização contínua durante pelo menos 1 semana, nos 7 pontos referidos atrás, no 1.º ano de exploração (ano 1), será definida a periodicidade das campanhas seguintes, apontando-se à partida para campanhas anuais nos seguintes 3 anos (portanto: ano 2, ano 3 e ano 4) e campanhas quinquenais nos anos seguintes até ao ano 20 (ano 5, 10, 15 e 20).

Anexo I – Estudo de Vibrações

Índice

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	ÂMBITO E OBJETIVO	4
1.2	ELEMENTOS ANALISADOS.....	4
2	ENQUADRAMENTO LEGAL E REGULAMENTAR.....	4
2.1	VIBRAÇÕES	4
2.2	RUÍDO RE-RADIADO	5
3	ESTUDO PRELIMINAR VIBRAÇÕES.....	6
3.1	DESCRIÇÃO METODOLÓGICA.....	6
3.2	CURVA BASE DE VIBRAÇÕES	6
3.3	FATORES CORRETIVOS	8
3.4	ANÁLISE.....	8
3.4.1	Considerações iniciais	8
3.4.2	Processo Metodológico	10
3.5	Pressupostos de Análise	10
3.6	CONCLUSÕES	11
4	ESTUDO NUMÉRICO DEDICADO.....	13
4.1	DESCRIÇÃO GERAL	13
4.1.1	Tipo de Via.....	13
4.1.2	Caraterização do Material Circulante.....	14
4.1.3	Caracterização Geológica e Geotécnica do Terreno	16
4.1.4	Seleção das Secções Transversais de Cálculo.....	16
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	17
4.2.1	Previsão de Vibrações	17
	Secção 1 (Pk 0+600)	18
4.2.1.1	Secção 2 (Pk 1+700)	22
4.2.1.2	Secção 3 (Pk 2+100)	25
4.2.1.3	Secção 4 (Pk 3+200)	28
4.2.2	Análise Global Interpolada	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	32

Anexo 1 - Método Analítico Determinação Vibrações.....	34
Anexo 2 – Pressupostos Análise do estudo preliminar vibrações.....	38
Anexo 3 – Listagem de Edifícios	42
Anexo 4 – Identificação das Zonas Potencialmente Críticas e dos Edifícios Afetados: Análise Preliminar.....	52
Anexo 5 - Método 2.5 FEM-BEM.....	58
Anexo 6 – Apresentação do Resultado de Avaliação das Vibrações Induzidas aos Edifícios.....	68
Anexo 7 – Apresentação do Resultado de Avaliação do Ruído Re-radiado nos edifícios	74
Bibliografia	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO E OBJETIVO

Neste documento avaliam-se as vibrações e ruído re-radiado nos recetores, localizados nas imediações da futura linha vermelha, devido à passagem de tráfego ferroviário ligeiro (metro) na futura via férrea que decorrerá do prolongamento da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa EPE - Prolongamento S. Sebastião II / Alcântara.

Tem como objetivo apresentar a análise prospetiva das vibrações e ruído re-radiado decorrentes da passagem do metro, avaliadas nos edifícios existentes na envolvente próxima ao novo traçado. Para tal, a análise efetuada considerou dois níveis distinto de pormenor, detalhe e precisão das previsões.

1.2 ELEMENTOS ANALISADOS

Para a elaboração do estudo foram fornecidos diversos elementos, peças desenhadas e escritas. Complementarmente, foram analisadas as documentações processuais e os estudos elaborados. Assinalam-se as referências dos documentos e respetivas datas de receção de informação:

- Traçado (CAD), 2024/07/11;
- CEJ-ANX_II.1-Doc-GuiaVibracoes_LNEC, 2024/07/11;
- CEJ-ANX_II.1-Doc-GuiaVibracoes_LNEC_errata, 2024/07/11;
- RT 1001_Via Férrea Retificado, 2024/07/11;
- Relatório 290/2022 – DE/NESDE, 2024/08/08;
- PD-20240902T080736Z-001, 2024/08/30.

2 ENQUADRAMENTO LEGAL E REGULAMENTAR

2.1 VIBRAÇÕES

O fenómeno associado a uma exposição continua às vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário pode ter consequências negativas na saúde dos ocupantes ou utilizadores dos edifícios afetados. Estes impactos podem acarretar elevados prejuízos económicos e sociais, sendo muito relevante o seu estudo. A sua perceção bem como a severidade das suas consequências está altamente dependente da gama de reposta em frequência.

A problemática das vibrações induzidas está normalmente associada a um intervalo de frequências compreendido entre 1 e 80 Hz, [1]. Para esta gama de frequências, as vibrações transmitidas aos edifícios, localizados nas imediações das infraestruturas ferroviárias, podem ser percecionadas pelos seus ocupantes sob a forma de uma vibração mecânica. Uma vez que a exposição prolongada pode causar incomodidade e, em última instância problemas de saúde, existe, a nível internacional, regulamentação e normalização concreta.

Em Portugal não existe atualmente legislação que limite o nível máximo de vibração, induzido às edificações pela passagem de tráfego ferroviário. Como critérios majorantes têm sido usadas as notas técnicas do LNEC que estabelecem os níveis máximos recomendáveis a que podem estar sujeitos os ocupantes das habitações, em função da resposta do ser humano. Deve referir-se a existência de uma norma portuguesa, [2], cujo seu propósito passa pela “Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas”, mas que não tem aplicabilidade no estudo de vibrações induzidas por tráfego ferroviário.

Os critérios de incomodidade propostos pelo LNEC consistem na limitação do valor eficaz de velocidade de vibração atendendo à perceção de vibrações no interior dos edifícios, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Incomodidade: Valores Limite da Velocidade Eficaz da Vibração no Local

V_{ef} [mm/s]	L_v [dB(V)] $V_{ref}=1 \times 10^{-8}$ [m/s]	Sensação
$V_{ef} \leq 0,11$	$L_v \leq 80,8$	Nenhuma
$0,11 < V_{ef} \leq 0,30$	$80,8 < L_v \leq 89,5$	Perceptível, suportável para curta duração
$0,30 < V_{ef} \leq 1,10$	$89,5 < L_v \leq 100,8$	Evidente, afetando as condições de trabalho
$V_{ef} > 1,10$	$L_v > 100,8$	Muito perceptível, dificultando ou impedindo o trabalho

Os valores eficazes de velocidade de vibração são válidos para as componentes vertical e horizontal, quando esta seja preponderante.

2.2 RUÍDO RE-RADIADO

O ruído re-radiado surge como consequência das vibrações transmitidas aos elementos dos edifícios, paredes, lajes e tetos. A vibração destes elementos, origina um ruído que pode ser percecionado pelos ocupantes do edifício, designado ruído re-radiado ou estrutural.

Foi estabelecido como critério de avaliação que o ruído no interior dos compartimentos, salas e quartos, devido a cada passagem de material circulante, fosse inferior ou igual a 22 dB(A). O critério baseia-se no valor eficaz da componente de vibração, entre os 16 e os 200 Hz:

$$0,30 < V_{ef} (16 \text{ Hz} \leq f \leq 200 \text{ Hz}) \leq 0,02 \text{ mm/s} \quad (1)$$

Este valor limite é considerado para as situações mais desfavoráveis, nas quais o índice de redução de propagação das vibrações às lajes e paredes circundantes é muito baixo e a transmissão entre elementos é elevada.

3 ESTUDO PRELIMINAR VIBRAÇÕES

3.1 DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

Nesta primeira fase é realizado um estudo preliminar das vibrações induzidas com o objetivo de caracterizar as grandes manchas e respetivas zonas críticas, com potencial de ocorrência de problemas de perceção das vibrações induzidas pela passagem do tráfego ferroviário.

O estudo preliminar de vibrações tem por base a metodologia generalizada proposta pela FRA [2] que sistematiza o Procedimento de Avaliação de Vibrações. Esta metodologia tem como base uma curva de vibração avaliada à superfície do solo, resultante da análise de um conjunto extenso de medições. A curva está normalizada para um determinado conjunto de considerações que podem ser adaptadas ao caso em estudo, através de fatores corretivos preconizados na metodologia.

A curva base de vibração, avaliada à superfície do solo, é função da distância à fonte de vibração. Os múltiplos fatores corretivos estão relacionados com o tipo de via, a velocidade de circulação do material circulante, as condições de manutenção da via e dos rodados (material circulante), o tipo de edificação existente e a sua posição da via relativamente ao terreno. Os fatores corretivos mencionados são apresentados no Anexo 1 do presente documento.

3.2 CURVA BASE DE VIBRAÇÕES

A curva base de vibração avaliada para metropolitano e corrigida da velocidade de circulação de 70 km/h é apresentada na Figura 1.

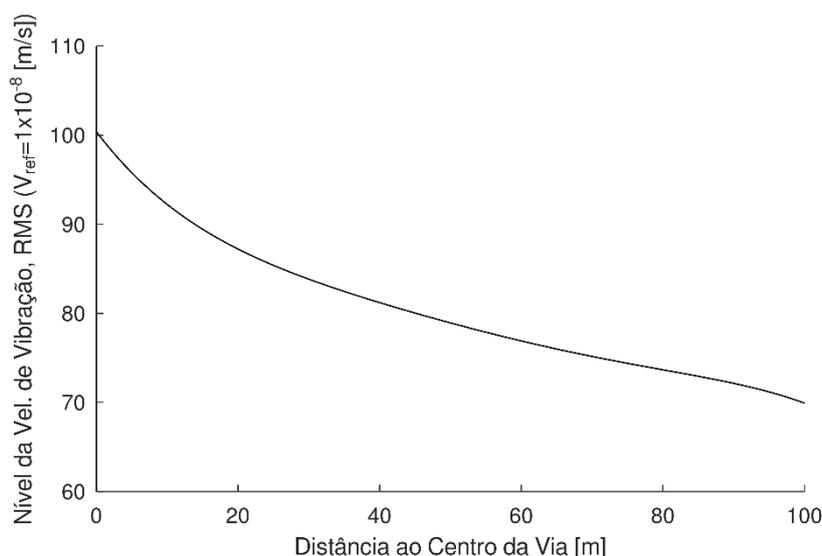


Figura 1 – Curva base de vibração, para uma velocidade de referência de 70 km/h

A curva mencionada representa os níveis típicos de vibração à superfície do solo considerando a passagem de um comboio ligeiro a 70 km/h bem como, boas condições de manutenção da via e dos rodados. Os níveis de vibração são ajustados para considerar, por exemplo, uma diferente

velocidade de circulação, existência de equipamentos e/ou condições geológicas distintas das condições de referência assumidas. A curva apresentada foi baseada em diversas medições realizadas e devidamente documentadas no manual da FRA.

Para além dos casos de via à superfície, esta metodologia é aplicável também para casos de via em viaduto ou em túnel. Deve ser sinalizado o facto de existir uma elevada ocorrência de queixas para situações de via em túnel, que podem dever-se ao seguinte conjunto de fatores:

- Os túneis podem estar mais próximos dos recetores, em diversas ocasiões diretamente sob estes;
- Existir um maior número de recetores próximos da via, designadamente em meios densamente urbanizados;
- O ruído aéreo, para vias à superfície, ser normalmente mais incomodativo do que as vibrações induzidas.

Deve, todavia, ser ressalvado que, apesar dos níveis gerais de vibração induzidos pelo tráfego ferroviário que circula em túnel ou à superfície serem semelhantes, existem diferenças nos respetivos espectros de vibração em frequência. A vibração transmitida aquando da circulação em túnel tende a ter um conteúdo em frequências mais altas do que quando é considerada a circulação à superfície. Este fenómeno deve-se ao facto da problemática do ruído re-radiado poder ser mais pronunciada no caso da circulação em túnel.

Dado o grau de incerteza e as limitações da metodologia, têm de ser consideradas algumas diretrizes:

- Sempre que o valor corrigido do nível de vibração estiver abaixo do limite de impacto preconizado é improvável que existam impactos decorrentes das vibrações induzidas avaliadas no recetor;
- Quando o nível de vibração avaliado no recetor for superior ao limite de referência / recomendado até um máximo de 5 dB, existe uma hipótese significativa (pelo menos 50 por cento) de que os níveis reais de vibração, perçecionados no local, estejam abaixo do limite considerado. Estes casos são assinalados e identificados, como casos que potencialmente excedem o limite preconizado e serão alvo de avaliação mais detalhada e pormenorizada numa fase subsequente de estudo de vibrações induzidas. Os estudos referidos permitem aferir com maior grau de certeza o cumprimento/incumprimento dos limites e para prever ou adequar as medidas mitigadoras em consonância;
- Para os valores de vibração previstos no recetor que excedam em mais de 5 dB o limite considerado, assume-se que existe uma elevada probabilidade de se verificar o incumprimento dos níveis de vibração máximos admissíveis, sendo necessário para esses casos, a especificação de medidas de mitigação adicionais no projeto em estudo.

Aquando da análise desta problemática pode atender-se à sua categorização em três subdomínios. Um dos subdomínios compreende a fonte, outro o caminho de propagação e por último o recetor. A metodologia da FRA apresenta uma série de fatores corretivos, para cada um dos subdomínios mencionados, por forma a atender às suas particularidades e especificidades e aproximar a previsão da metodologia analítica do valor real esperado. Os fatores corretivos são aplicados à curva base de vibração induzida na superfície do terreno.

Quanto à fonte, existe uma curva base para cada tipo de transporte e um fator corretivo para adequar a velocidade de projeto à velocidade de referência da curva base.

No que ao caminho de propagação diz respeito, podem existir condições geológico-geotécnicas que conduzam a fenómenos propagação eficiente de vibrações, havendo, por essa razão, um agravamento das vibrações percecionadas nos recetores. Nestes casos podem ser verificados elevados níveis de vibração a distâncias duas ou três vezes maiores que a distância em condições de normal propagação. Quando existe uma redução da profundidade da rocha-mãe, desencadeia-se um processo de aprisionamento da energia no estrato superior, evidenciando-se uma amplificação das vibrações nos recetores. Nestes casos, o estrato rochoso funciona como uma superfície refletora, redirecionando as ondas incidentes na interface para o estrato superior.

Por outro lado, no recetor, o tipo de solução estrutural do edificado, incluindo detalhes de dimensão e massa, e distância à via são alguns dos fatores que impactam significativamente os níveis de vibração percecionados em cada um deles.

3.3 FATORES CORRETIVOS

Dado que os níveis de vibração, determinados através da curva representada na Figura 1, partem de pressupostos iniciais, tais como a fonte e o caminho de propagação de referência, é necessário proceder à aplicação de fatores corretivos para ajustar os resultados a cada caso particular. A aplicabilidade destes pressupostos, permite determinar os níveis de vibração expectáveis, num determinado recetor, tendo em conta as características da fonte, do caminho de propagação e do recetor.

A avaliação do nível de vibração expectável em cada um dos recetores potencialmente afetados, decorre da soma algébrica de todos os fatores corretivos aplicáveis ao valor da curva base, correspondente à distância do edifício ao centro da via, de acordo com os valores apresentados no Anexo 1.

3.4 ANÁLISE

3.4.1 Considerações iniciais

O troço em estudo compreende os pontos quilométricos 0+000 e 4+098, com início na Rua Marquês de Fronteira e com ponto terminal junto ao Instituto Superior de Agronomia, na cidade de Lisboa. Na Figura 2 é apresentada a representação do eixo da via da futura linha sobre imagem de satélite.



Figura 2 – Localização em planta da diretriz da linha em projeto (Fonte: Google Earth, 13-08-2024)

Na primeira etapa do estudo foi feito um levantamento de todos os pontos de interesse onde se denotavam variações significativas com impacto nos valores de vibrações induzidas relativamente distintos. São exemplo destes pontos de interesse, os locais em que existia uma alteração do tipo de via (à superfície, em viaduto ou em profundidade) ou das condições geotécnicas, entre outras.

Na Figura 1 encontra-se representado o perfil longitudinal do projeto em análise entre os PK 0+000 e 4+098, bem como os pontos notáveis identificados (totalizando 22).

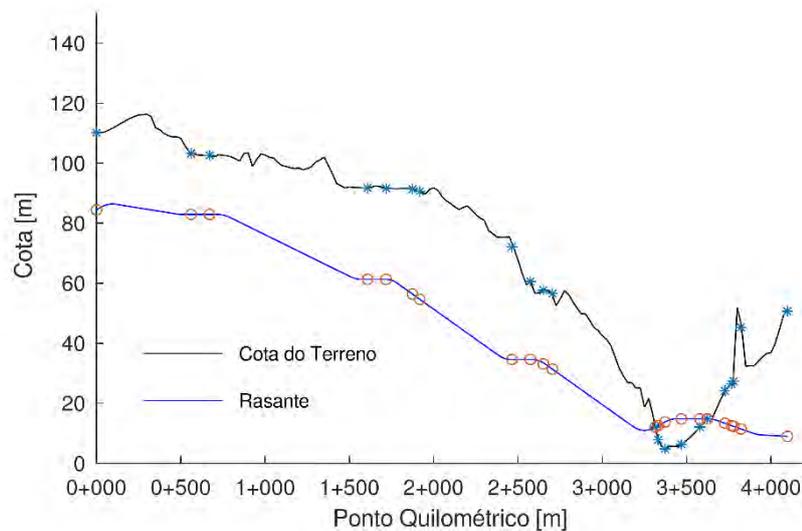


Figura 3 – Perfil Transversal do projeto com representação da rasante, do terreno e dos pontos notáveis com correspondência no terreno, *, e na rasante 'o'

3.4.2 Processo Metodológico

O primeiro passo para a aplicabilidade da metodologia passa pela identificação e levantamento de todos os pontos ao longo do eixo da via. De seguida, procede-se à análise dos níveis de vibração corrigidos na superfície do solo. Nesta fase é possível determinar o corredor de impacto de vibrações avaliado em condição de campo livre, na superfície do solo. O corredor de impacto é devidamente corrigido para atender às especificidades do projeto, nomeadamente da fonte e do caminho de propagação. A determinação do corredor de impacto permite-nos, de uma forma relativamente expedita, mas sistemática, identificar todos os recetores contidos no seu domínio e que são dessa forma identificados como potencialmente afetados.

O passo seguinte, passa pela identificação e catalogação de todos os recetores potencialmente impactados, pela circulação de tráfego no futuro prolongamento da linha vermelha e posterior previsão dos seus níveis de vibração. A avaliação do cumprimento ou incumprimento dos níveis máximos de vibração no recetor, permite-nos identificar as zonas críticas.

3.5 Pressupostos de Análise

Atendendo ao princípio da prudência foi considerado que existem condições de propagação eficiente de vibrações sempre que a estrutura ferroviária se encontra em túnel, dada a probabilidade de existência de um maior número de recetores na proximidade da linha. Desta forma, a definição dos níveis de vibração é realizada com um maior grau de segurança.

Os pressupostos de cálculo considerados, atendendo aos pontos notáveis do traçado são apresentados Quadro 11 do Anexo 2.

No Anexo 3 – Listagem de Edifícios é apresentado o conjunto de todos os edifícios localizados no corredor de impacto de vibrações que são potencialmente afetados, de acordo com o explicado anteriormente. Para cada edifício, foi feito o levantamento da sua localização relativamente ao ponto quilométrico da linha mais próximo, a sua distância horizontal ao eixo da linha e o número de pisos a cima do solo.

Foi considerada a informação das propriedades geológico-geotécnica constantes do documento 290/2022 – DE/NESDE, para identificar os edifícios que se localizavam em zonas com características rochosas, para os quais foi considerada uma condição de propagação eficiente. Para além das condições geotécnicas de fundação dos edifícios, considera-se também a sua tipologia de fundação e dimensão.

O critério de impacto recomendado pelo LNEC, não contempla o tipo de uso dos recetores, por essa razão esta informação não consta do processo de catalogação.

Os resultados obtidos, para a avaliação das vibrações nos recetores são apresentados nos anexos do presente relatório, designadamente no Anexo 4 – Identificação das Zonas Potencialmente Críticas e dos Edifícios Afetados: Análise Preliminar .

Para a análise e catalogação dos edifícios afetados foram considerados quatro grupos distintos, de acordo com os níveis de vibração. Enumeram-se os grupos considerados:

- $dB(V) \leq 80,8$ correspondente ao limite de referência preconizado pelo LNEC ($V_{ef} \leq 0,11$);
- $80,8 < dB(V) \leq 85,8$ valor superior ao limite de referência até 5 dB(V),
- $dB(V) > 85,8$ os que excedem em mais de 5 dB(V) o limite de referência;

- Edifícios previstos para demolição.

Os resultados obtidos, para a avaliação das vibrações em condições de superfície livre, são apresentados na Figura 4. Nas zonas assinaladas verifica-se a probabilidade de ocorrência de níveis de vibração superiores ao limite preconizado pelo LNEC, $V_{ef} \leq 0,11$ mm/s.



Figura 4 – Localização em planta da diretriz e das zonas potencialmente críticas identificadas (abordagem FRA)

Foram identificadas através da metodologia de análise generalizada as seguintes secções potencialmente críticas:

Vias principais:

- PK 0+550 ao PK 0+720;
- PK 1+600 ao PK 1+750;
- PK 1+820 ao PK 1+980;
- PK 2+500 ao PK 2+750;
- PK 3+050 ao PK 3+400;
- PK 3+650 ao PK 3+750.

3.6 CONCLUSÕES

A representação em planta das zonas potencialmente críticas e onde poderão existir problemas de vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário no futuro prolongamento da linha vermelha são identificadas no Anexo 4 – Identificação das Zonas Potencialmente Críticas e dos Edifícios Afetados: Análise Preliminar.

Os resultados são apresentados para cada edifício tendo em conta uma codificação específica e a representação por escala de cores do nível de vibração previsto (verde, amarelo, vermelho e cinzento).

A categorização dos edifícios é feita tendo em conta as diretrizes da metodologia proposta:

- Valor obtido inferior ao limite preconizado: improvável que existam impactos decorrentes das vibrações induzidas e avaliadas no recetor;
- valor superior ao limite preconizado, até um máximo de 5 dB: existe uma probabilidade significativa (pelo menos 50%) de que os níveis reais de vibração, perçecionados no local, estejam abaixo do limite considerado. Estes casos são assinalados e identificados e devem ser alvo de avaliação mais detalhada e pormenorizada;
- Valores excedem em mais de 5 dB o limite preconizado: elevada probabilidade de incumprimento dos níveis de vibração máximos admissíveis, sendo necessário para esses casos, a especificação de medidas de mitigação adicionais no projeto em estudo, sendo alvo de avaliação mais detalhada e pormenorizada.

Os edifícios identificados que excedem até 5 dB(V) ficam sujeitos a posterior avaliação e validação das conclusões, tirando partido do uso de metodologias mais avançadas que permitam determinar os níveis de vibração de forma mais precisa e com um maior grau de confiança.

Os edifícios onde o nível de vibração avaliado exceda em mais de 5 dB(V) carecem de preconização de medidas mitigadoras de vibrações induzidas.

Finalmente, importa referir que, representam-se por norma os edifícios que serão alvo de demolição. No entanto, não foi possível obter essa informação em tempo útil, aquando da realização da análise preliminar, estando por isso omissa.

4 ESTUDO NUMÉRICO DEDICADO

4.1 DESCRIÇÃO GERAL

Nesta secção é desenvolvido e apresentado o estudo numérico das vibrações e ruído re-radiado da linha de metro que resultará do prolongamento da linha vermelha entre S. Sebastião e Alcântara.

Ao longo dos pontos subsequentes são apresentados os pressupostos de cálculo, as considerações e parâmetros geométricos e mecânicos dos diferentes subsistemas do problema em análise.

4.1.1 Tipo de Via

No requisito técnico, RT 1001 [3] são preconizados sete tipos de via:

- Via Tipo 1 – Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em túnel Via Dupla;
- Via Tipo 2 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Estação (Amoreiras/Campo de Ourique e Infante Santo);
- Via Tipo 3 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Túnel sobre manta antivibrática;
- Via Tipo 4 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Viaduto;
- Via Tipo 5 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA na estação Alcântara;
- Via Tipo 6 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Túnel Via Tripla;
- SEV - Secção Especial de Via constituída por Aparelhos de via isolados ou integrados numa mesma “secção” de via.

Para as vias consideradas, a solução passa por utilizar uma via betonada sobre blocos de betão, corresponde a uma solução de bloco de betão com pantufa (tipo LVT *Sonneville*), espaçados de 0,75m. Atendendo ao tipo de sistema, referência e peças desenhadas, foi estimado um valor de massa correspondente a cada bloco de 105 kg.

Considera-se a existência de uma pantufa sob o bloco de betão e uma palmilha sob o carril. No documento RT1001 [3] é feita referência à rigidez estática estimada para o sistema de via (travessa e pantufa) de 25 kN/mm. Quanto à rigidez dinâmica da pantufa, foi considerado o valor de 31,2 kN/mm.

Devido à limitação imposta de deformação máxima do carril, considerou-se a palmilha sob o carril com um nível de rigidez mais elevado, correspondendo a uma rigidez estática de 150 kN/mm e dinâmica de 225 kN/mm.

O carril apresenta um perfil 50 E6, cujo peso linear é de 50kg/m. Na simulação numérica foi considerado um nível médio de manutenção do carril, correspondente à Classe 3, de acordo com a metodologia de categorização proposta pela FRA [4]. Apesar dos níveis de manutenção do Metro Lisboa limitarem a irregularidade vertical máxima a 0,3mm/m, correspondente a uma Classe 4, considerou-se, atendendo ao princípio da prudência, um perfil de irregularidades mais exigente.

Na Via Tipo 3 acresce, às características descritas anteriormente, a existência de uma manta antivibrática. No documento RT 1001 [3] é referido que o sistema global (manta + pantufa) deve

conferir uma atenuação de 25dB para a frequência de 50 Hz. Uma vez que a atenuação é altamente dependente das especificidades do sistema, procedeu-se ao estudo e avaliação das vibrações induzidas no recetor considerando uma solução tipo, tendo por base a sua rigidez. Considerou-se um módulo de rigidez estática de $0,0036 \text{ N/mm}^3$ e de rigidez dinâmica de $0,0095 \text{ N/mm}^3$ e uma espessura de 37,5mm.

As diferentes soluções de via estão distribuídas ao longo da via que se pretende construir, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Distribuição dos tipos de via ao longo dos pontos quilométricos

Pontos quilométricos, (Pk)		Tipo de Via
Início	Fim	
0+000	0+560	Tipo 1
0+560	0+665	Tipo 2
0+665	1+620	Tipo 1
1+620	1+725	Tipo 2
1+725	1+900	Tipo 1
1+900	1+943,743	SEV 1/CO
1+943,743	2+085	Tipo 6
2+085	2+470	Tipo 1
2+470	2+575	Tipo 2
2+575	2+680	Tipo 1
2+680	2+723,743	SEV 1/IS
2+723,743	2+865	Tipo 6
2+865	3+020	Tipo 1
3+020	3+240	Tipo 3
3+240	3+310	Tipo 1
3+310	3+465	Tipo 4
3+465	3+585	Tipo 5
3+585	3+735	Tipo 3
3+735	3+765	SEV 1/AC
3+765	3+808,743	SEV 3/AC
3+808,743	4+097	Tipo 6

4.1.2 Caraterização do Material Circulante

As composições do Metro Lisboa são constituídas por unidades motoras e de reboque, designadas ML90-Motora e ML90-Reboque, respetivamente. O material circulante é constituído

por duas composições alternadas, de acordo com a informação indicada como referência, LNEC [5].

A geometria do material circulante, bem como a distribuição de cargas por eixo é apresentada na Figura 5.

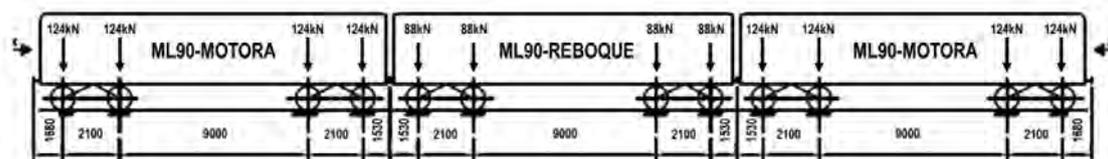


Figura 5 – Geometria e distribuição das cargas por eixo do material circulante da linha em estudo, distâncias em mm (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Atendendo ao facto do material circulante ser constituído por duas composições alternadas, cada veículo apresenta a seguinte configuração: (MT90+MR90+MT90) + (MT90+MR90+MT90). Para efeitos de estudo, considera-se uma velocidade constante de circulação em toda a linha correspondente a 70km/h.

As características geométricas e mecânicas do material circulante, indicadas pela entidade Metro Lisboa e que constam no documento do LNEC [5], são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Características geométricas e mecânicas das composições dos comboios ML90 fornecidas pelo ML (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Caraterísticas geométricas e mecânicas	MT90 Motora	ML90 Reboque	Descrição
$2L_c$ [m]	11,1	11,1	Distância entre pontos de apoio da caixa
$2L_b$ [m]	2,1	2,1	Distância entre pontos de apoio dos eixos as Bogies
M_c [10^3 kg]	16,9	15	Massa da caixa
M_b [10^3 kg]	13,7	7,9	Massa dos Bogies
M_r [10^3 kg]	1,3	1,1	Massa dos eixos c/ rodas
J_c [10^3 kg·m ²]	1159,3	822,8	Momento polar de inércia da caixa
J_b [10^3 kg·m ²]	5,5	3,4	Momento polar de inércia dos Bogies
K_s [kN/m]	192,5	192,5	Rigidez vertical do sistema de suspensão primário
C_s [kN·s/m]	10	10	Amortecimento viscoso do sistema das suspensões primário
K_p [kN/m]	1350	1350	Rigidez vertical do sistema de suspensão secundário
C_p [kN·s/m]	11,7	11,7	Amortecimento viscoso do sistema das suspensões secundário

4.1.3 Caracterização Geológica e Geotécnica do Terreno

A caracterização geológica do terreno ao longo da futura linha de metro consta no documento do LNEC [5], designadamente no Anexo I - Caracterização geológica do terreno de implantação da via e definição de perfis geotécnicos. Foram identificados sete perfis geológicos, Geo_01 a Geo_07, representados na Figura 6.

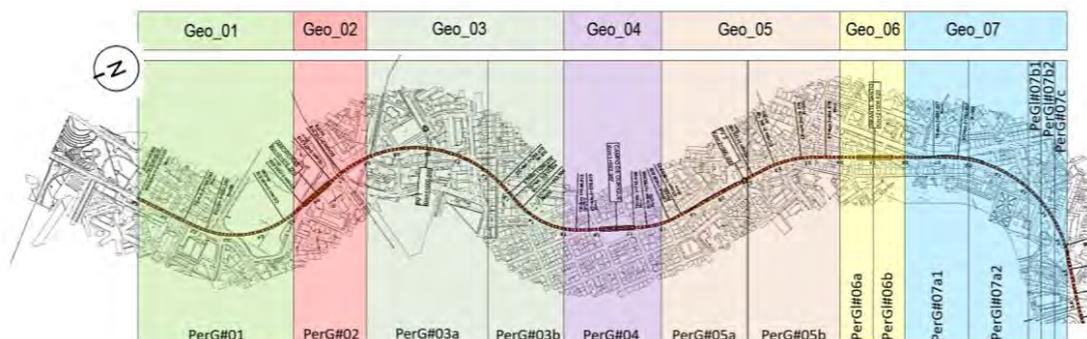


Figura 6 – Perfis geológicos característicos ao longo do traçado da linha (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

4.1.4 Seleção das Secções Transversais de Cálculo

O processo de seleção das diferentes secções de cálculo atendeu a um método de análise de escolha multicritério. Os fatores em consideração foram:

- Os resultados da análise preliminar, com a identificação das zonas potencialmente críticas e para as quais é recomendado, segundo proposta da FRA [4], a realização de estudos numéricos mais aprofundados;
- Os diferentes tipos de via;
- O diferente número de perfis geológicos;
- A variação da profundidade do túnel;
- O tempo disponível (Nota: uma vez que o tempo de cálculo destas metodologias é muito elevado, limitando o número de simulações atendendo possíveis atendendo à janela temporal disponível para a elaboração deste trabalho).

Atendendo aos fatores supramencionados, foram escolhidas 4 secções transversais de cálculo, que atendendo à sua localização e especificidade, se revelam mais significativas para a análise das vibrações e ruído re-radiado da linha de metro em estudo.

Foram consideradas as seguintes secções:

- Secção 1, PK 0+600;
- Secção 2, PK 1+700;
- Secção 3, PK 2+100;
- Secção 4, PK 3+200.

4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A indução de vibrações devido à passagem de tráfego ferroviário é um problema dinâmico bastante complexo. O sistema global pode ser segmentado, tal como fora mencionado anteriormente, em três subsistemas: a fonte, onde são geradas as vibrações; o caminho de propagação, meio onde se propagam as vibrações geradas, até serem transmitidas aos edifícios; e o recetor, onde serão percebidas as vibrações. O estudo deste fenómeno, pode ter por base uma abordagem:

- Acoplada, em que é considerada a influência mútua que cada um dos subsistemas tem na resposta do outro. Ou seja, o comportamento dinâmico do sistema é estudado de forma global;
- Desacoplada, a determinação das vibrações induzidas é tratada de forma separada para cada um dos subsistemas. Após a determinação das vibrações na fronteira de um dos modelos correspondente a um subdomínio, aplicam-se na fronteira do subdomínio adjacente, não tendo em conta a interação entre ambos.

Existem vantagens e desvantagens em ambas as abordagens, sendo a abordagem acoplada a mais realista e precisa, mas ao mesmo tempo a mais demorada e com maior esforço computacional. Enquanto que a abordagem desacoplada é mais rápida e simples, mas menos precisa e menos realista, por não considerar as interações dinâmicas entre os diferentes domínios.

A análise apresentada neste capítulo recorrendo a um modelo híbrido 2.5D FEM-BEM, descrito passo a passo no Anexo 5 - Método 2.5 FEM-BEM.

O modelo 2.5D tira partido da condição particular de invariância longitudinal da infraestrutura ferroviária, possibilitando dessa forma ter em conta a tridimensionalidade do problema de geração e propagação de vibrações considerando apenas a modelação bidimensional do problema para diferentes números de onda.

4.2.1 Previsão de Vibrações

Em seguida apresentam-se os resultados das previsões de vibrações induzidas à superfície do solo, tendo por base o modelo numérico 2.5D FEM-BEM. Após serem determinadas as curvas de vibração na superfície para as diferentes distâncias horizontais ao eixo do túnel, são calculados os níveis de vibração dentro de dois edifícios tipo, considerando a interação dinâmica solo-edifício.

Os resultados e pressupostos de cada uma das secções de cálculo são apresentados em seguida.

Secção 1 (Pk 0+600)

A secção 1, localizada no ponto quilométrico 0+600 apresenta uma estratificação de acordo com a Figura 7.

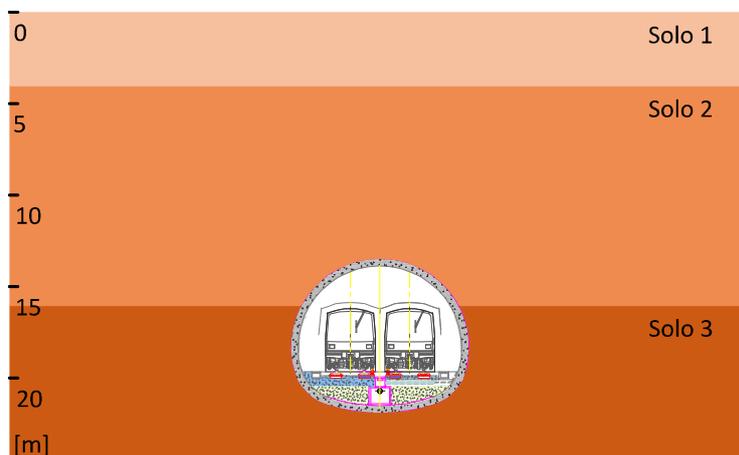


Figura 7 – Representação do perfil geológico da secção 1 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos constam do Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 1 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 1	710	290	1600	0,40
Solo 2	1396	570	2150	0,30
Solo 3	1960	800	2700	0,23

Na Figura 8 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

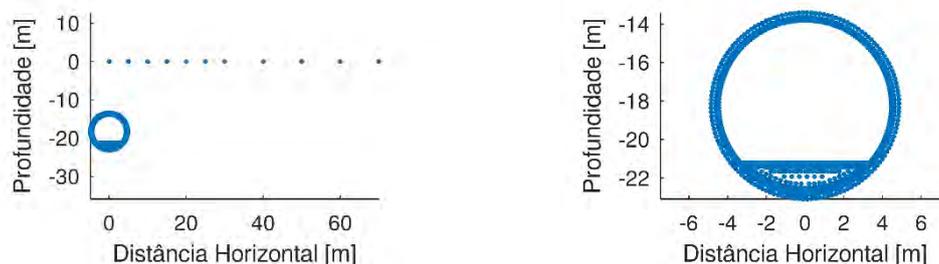


Figura 8 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A abordagem de cálculo permite determinar os níveis de vibração induzidos na superfície do solo, devido à passagem de tráfego ferroviário no túnel.

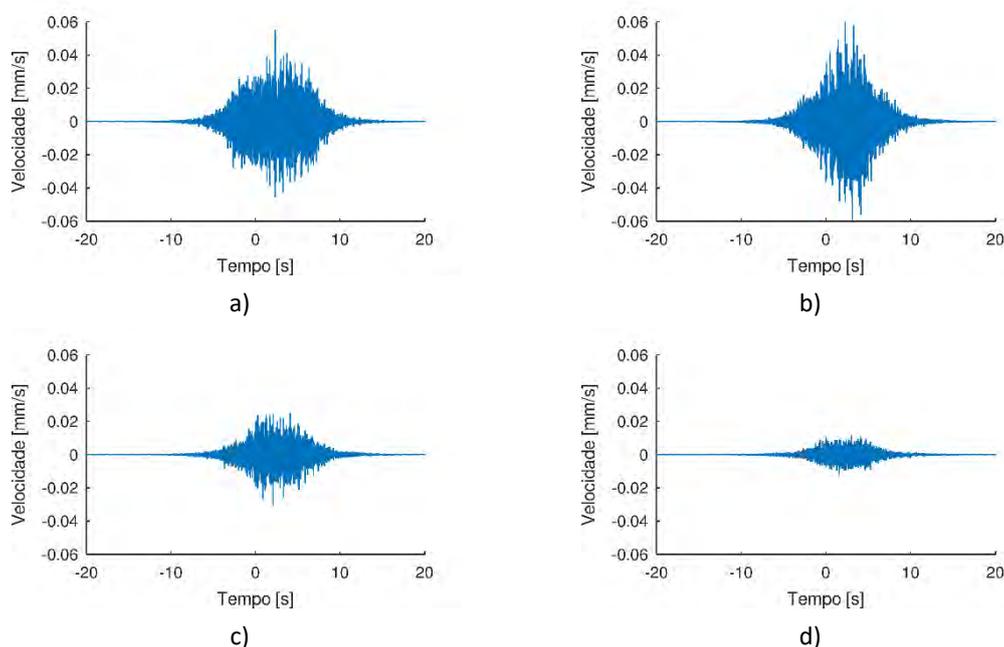


Figura 9 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 1 (Pk 0+600)

A transmissão de vibrações aos edifícios ocorre quando a energia de vibração que se transmite através do solo alcança as fundações dos edifícios. A interação dinâmica solo-edifício apresenta uma influência muito significativa nas vibrações transmitidas às edificações.

A interação dinâmica resulta da existência de uma interface entre os dois domínios, havendo uma alteração do campo de ondas incidente, onde parte da energia é transmitida ao edifício, através das suas fundações, e parte é refletida novamente para o domínio do solo. As vibrações transmitidas ao edifício propagam-se desde as fundações, através da estrutura até aos diferentes pisos e elementos estruturais, paredes, lajes e tetos. Aquando da transmissão de vibrações, piso a piso, ocorre uma atenuação das vibrações, resultante da dissipação e espalhamento das vibrações (amortecimento material e geométrico).

Deve, no entanto, salientar-se que existe normalmente uma amplificação dos níveis de vibração nas lajes, particularmente no centro, quando comparados com as extremidades. A menor vibração das lajes, junto dos contornos, deve-se essencialmente à proximidade aos apoios estruturais, existindo por isso uma maior rigidez local.

A modelação deste problema, de interação dinâmica, é exigente e bastante complexa, sendo por essa razão utilizada uma abordagem híbrida que resulta do uso de modelação numérica e de funções de transferência experimentais (Anexo 5 - Método 2.5 FEM-BEM), obtidas através de um elevado número de caracterizações experimentais de edifícios. São consideradas duas funções de transferência para dois tipos de edifícios, estrutura leve e pesada.

Na Figura 10 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel (Distância=0m).

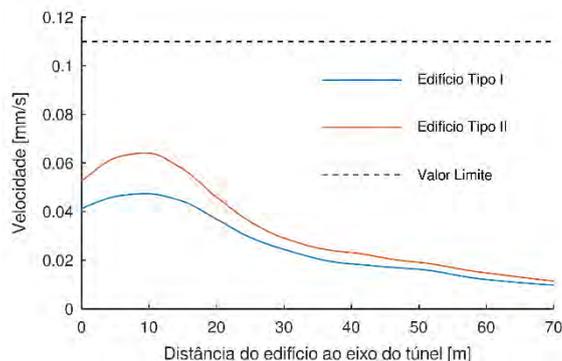


Figura 10 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 1 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

Da análise da Figura 10 é possível constatar o cumprimento do limite preconizado do nível global de vibração, avaliado para cada um dos tipos de edifícios posicionados a diferentes distâncias do eixo do túnel. Considera-se então não existir um problema de perceção de vibrações nos edifícios localizados nesta secção. Evidencia-se o facto de existir uma amplificação da resposta aquando do afastamento ao eixo do túnel, e não imediatamente sobre este. Este fenómeno encontra-se descrito na literatura [6], sendo totalmente expectável.

A análise das vibrações deve atender, para além do valor global de vibração eficaz, ao seu espectro de resposta em frequência. O espectro de resposta em frequência permite identificar as frequências para as quais ocorrem ressonâncias, ou seja, onde a vibração é amplificada significativamente, e as frequências para as quais a resposta da estrutura é atenuada.

Todas as estruturas possuem frequências naturais de vibração, nas quais a energia vibratória é amplificada. Se uma vibração, como a originada por tráfego ferroviário, apresentar um espectro de vibração induzida com frequências coincidentes com essas frequências naturais, podem ocorrer amplificações dos níveis de vibração para essas bandas de frequência, comprometendo o conforto dos ocupantes e em última instância a integridade estrutural dos edifícios.

A consideração do espectro em frequência é especialmente importante para salvaguardar a ocorrência de ruído re-radiado. A sua limitação para um dado intervalo, salvaguarda a emissão de ruído re-radiado, por garantir que a energia de vibração dos elementos não é suficiente para desencadear o fenómeno de forma a que este seja perceptível. Certas frequências podem ser particularmente desconfortáveis para os ocupantes dos edifícios.

Na Figura 11 são apresentados os espectros de resposta para quatro localizações do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{ef} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído re-radiado pelos elementos do edifício.

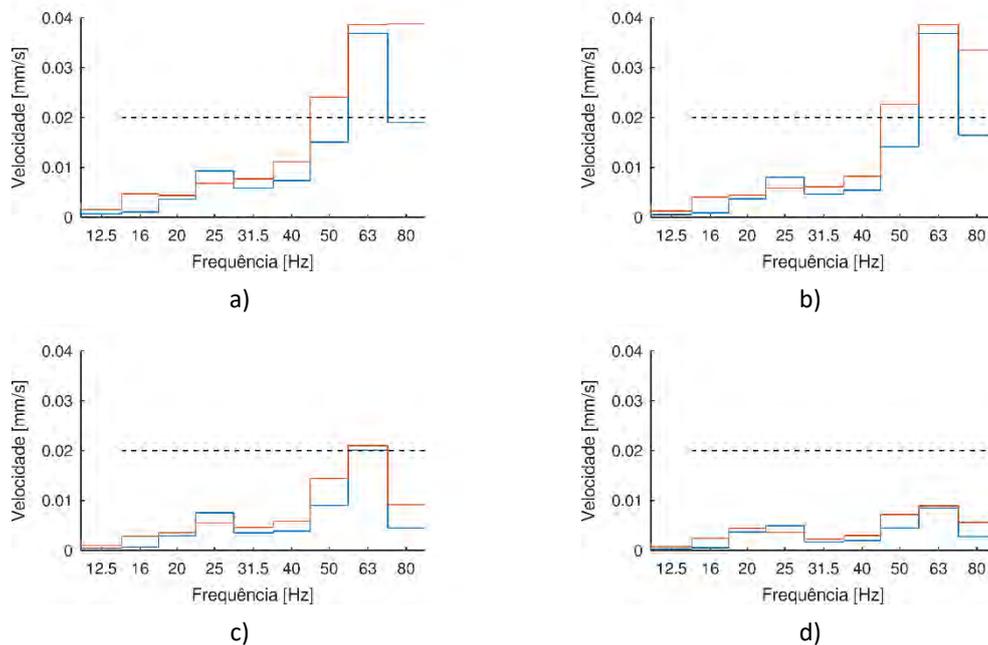


Figura 11 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 1 (Pk 0+600)

Da análise espectral da resposta dos dois edifícios tipo resulta o incumprimento do valor de vibração eficaz (que garante a não emissão de ruído re-radiado) para os casos a) e b). Para uma distância de 30 metros, verifica-se para a banda de 1/3 de oitava com a frequência central 63 Hz, um valor muito próximo do limite preconizado, estando, mesmo assim, em situação de incumprimento. No caso d) verifica-se o cumprimento do valor limite para todas as frequências analisadas.

4.2.1.1 Secção 2 (Pk 1+700)

A secção 2, localizada no ponto quilométrico 1+700 apresenta uma estratificação geotécnica de acordo com a Figura 12.



Figura 12 – Representação do perfil geológico da secção 2 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos do perfil de estratificação da secção 2 constam do Quadro 5.

Quadro 5 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 2 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 1	710	290	1600	0,40
Solo 3	1960	800	2700	0,23
Solo 4	955	390	2000	0,30
Solo 5	1531	625	2200	0,27
Solo 6	1923	785	2500	0,30

Na Figura 13 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

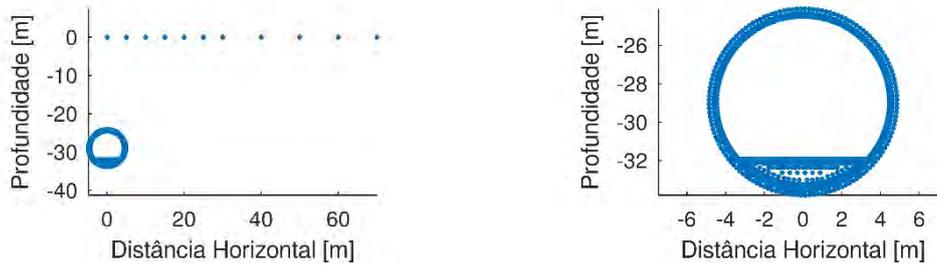


Figura 13 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A abordagem de cálculo permite determinar os níveis de vibração induzidos na superfície do solo, devido à passagem de tráfego ferroviário no túnel, para diferentes pontos de avaliação localizados na superfície do solo.

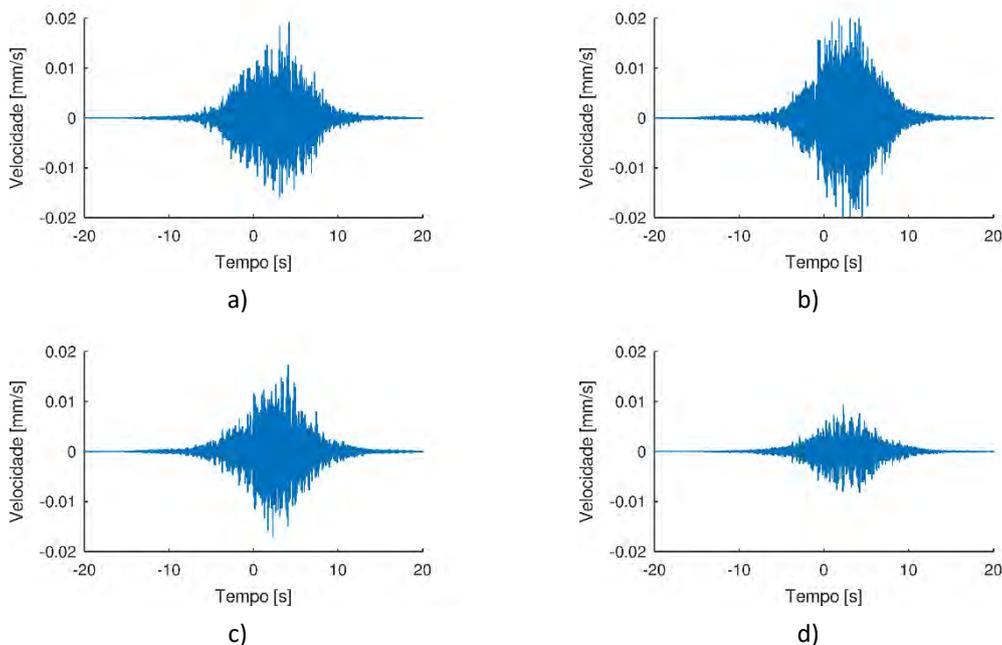


Figura 14 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 2 (Pk 1+700)

Na Figura 15 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel (Distância=0m).

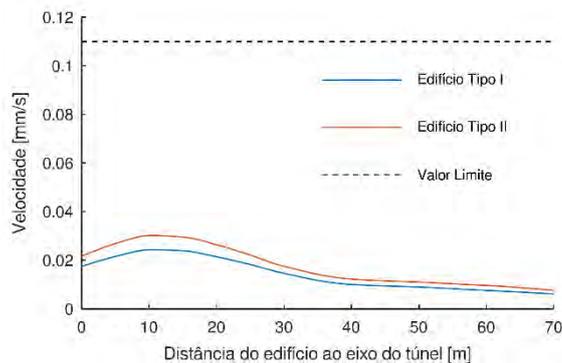


Figura 15 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 2 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

As curvas de velocidade de vibração eficaz avaliadas para os edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite das vibrações induzidas para as diferentes distâncias

Na Figura 16 são apresentados os espectros de resposta para quatro localizações do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{ef} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído radiado pelos elementos do edifício.

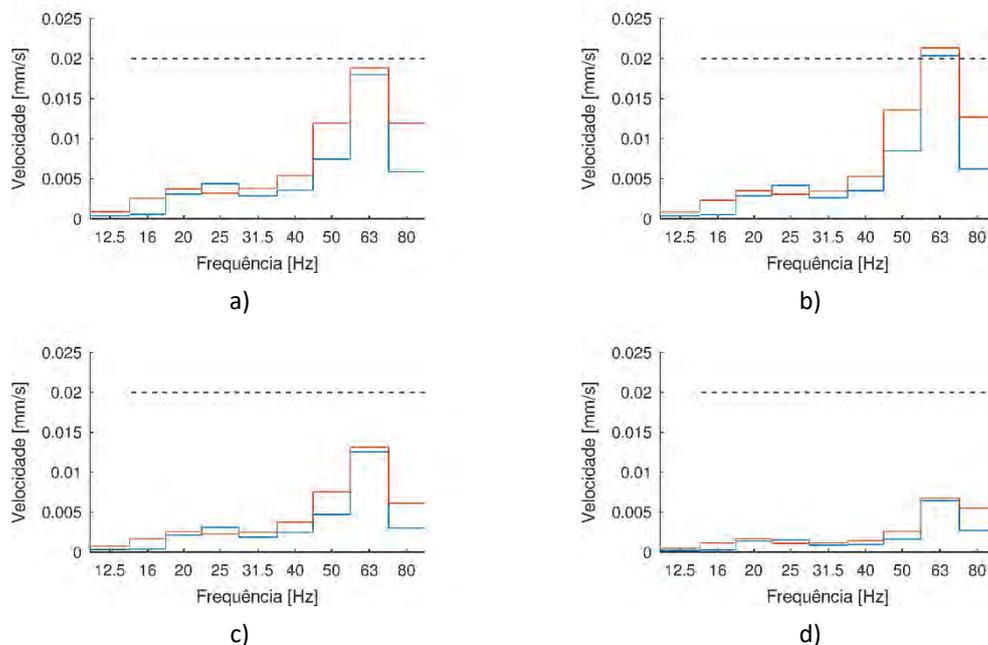


Figura 16 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 2 (Pk 1+700)

Da análise espectral dos quatro pontos, verifica-se o incumprimento do critério apenas quando o edifício-tipo se encontra a 15 metros de distância do eixo do túnel. Nos restantes pontos, não foi identificado qualquer incumprimento.

4.2.1.2 Secção 3 (Pk 2+100)

A secção 3, localizada no ponto quilométrico 2+100 apresenta uma estratificação geotécnica de acordo com Figura 17.

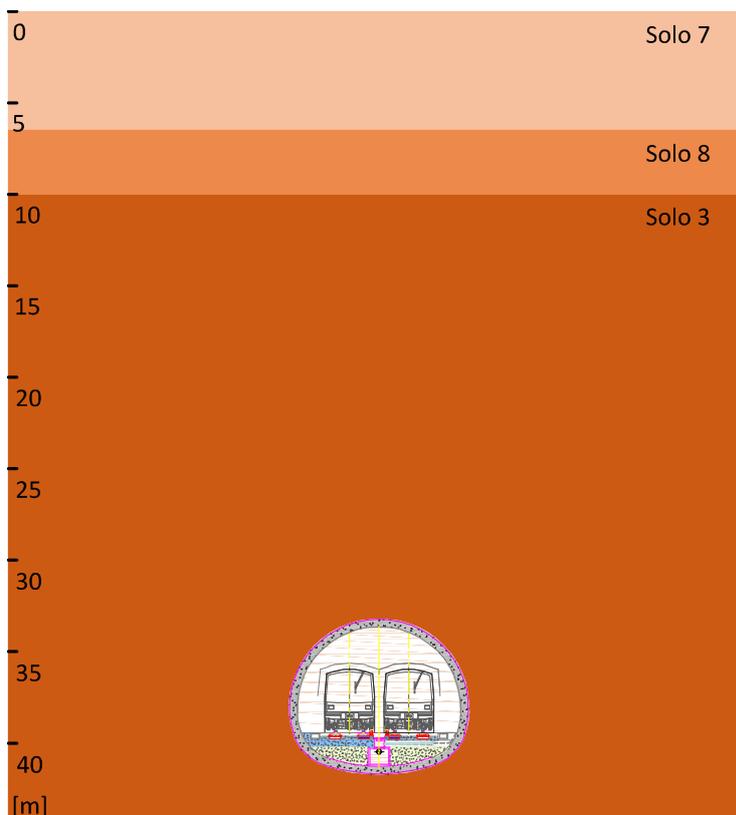


Figura 17 – Representação do perfil geológico da secção 3 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos do perfil de estratificação da secção 3 constam do Quadro 6.

Quadro 6 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 3 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 3	1960	800	2700	0,23
Solo 7	478	195	1600	0,40
Solo 8	1653	675	2300	0,30

Na Figura 18 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

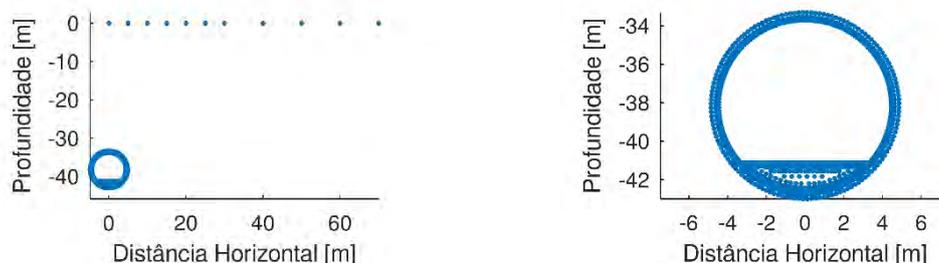


Figura 18 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A metodologia de cálculo possibilita a determinação dos níveis de vibração gerados à superfície do solo pela passagem do tráfego ferroviário em túnel, avaliada em diversos pontos situados na superfície.

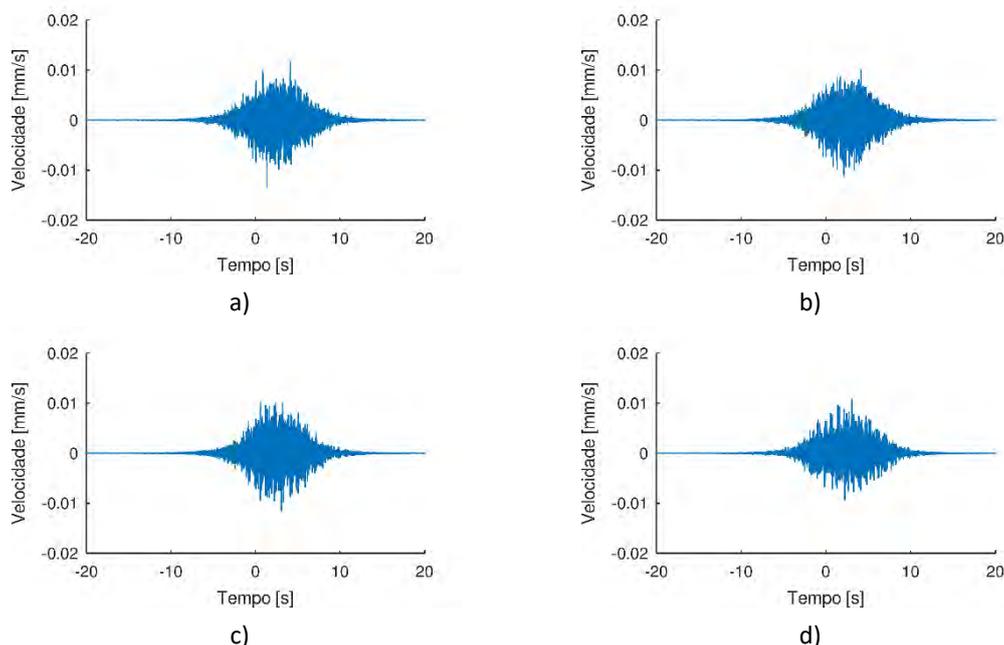


Figura 19 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 3 (Pk 2+100)

Na Figura 20 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios da secção 3, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel.

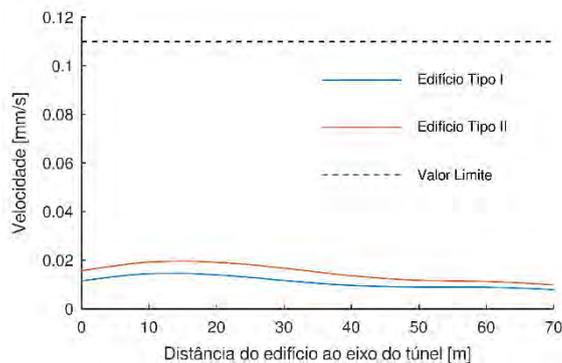


Figura 20 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 3 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

As curvas de velocidade de vibração eficaz avaliadas para os edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite das vibrações induzidas para as diferentes distâncias

Na Figura 21 são apresentados os espectros de resposta para quatro posições do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{er} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído re-radiado pelos elementos do edifício.

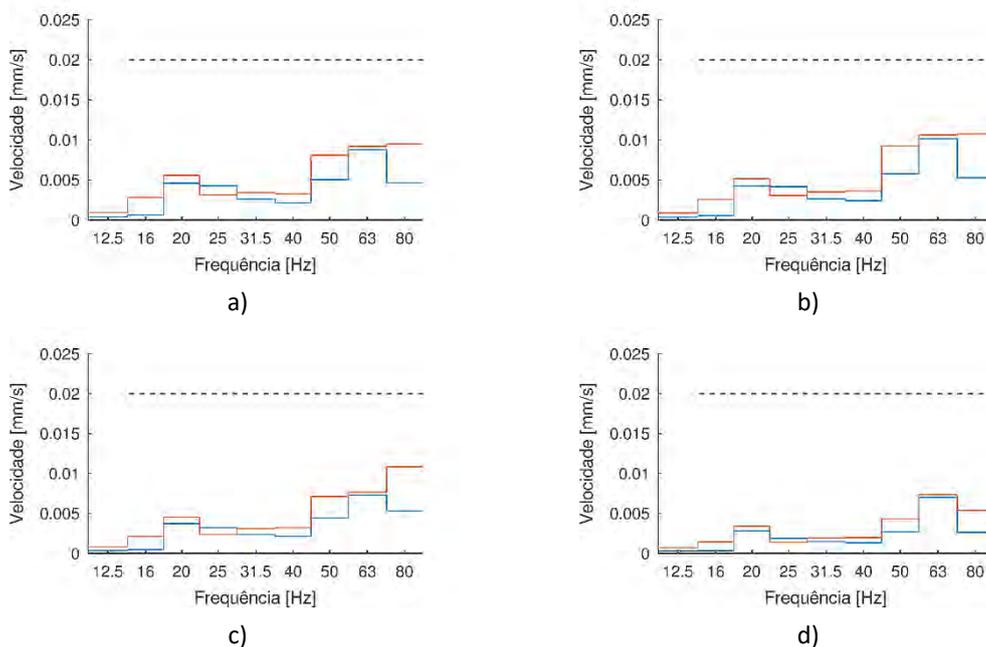


Figura 21 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 3 (Pk 2+100)

Os resultados obtidos para os níveis de vibração eficaz induzidos nos edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite preconizado, assegurando a não emissão de ruído re-radiado com níveis superiores a 22dB(A).

4.2.1.3 Secção 4 (Pk 3+200)

A secção 4, localizada no ponto quilométrico 3+200 apresenta uma estratificação de acordo com Figura 22.



Figura 22 – Representação do perfil geológico da secção 4 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos do perfil de estratificação da secção 4 constam do Quadro 7.

Quadro 7 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 4 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 1	710	290	1600	0,40
Solo 3	1960	800	2700	0,23

Na Figura 23 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

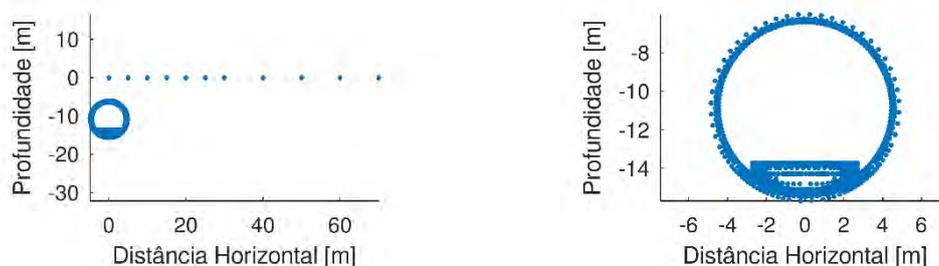


Figura 23 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A metodologia de cálculo possibilita a determinação dos níveis de vibração gerados à superfície do solo pela passagem do tráfego ferroviário em túnel, avaliada em diversos pontos situados na superfície.

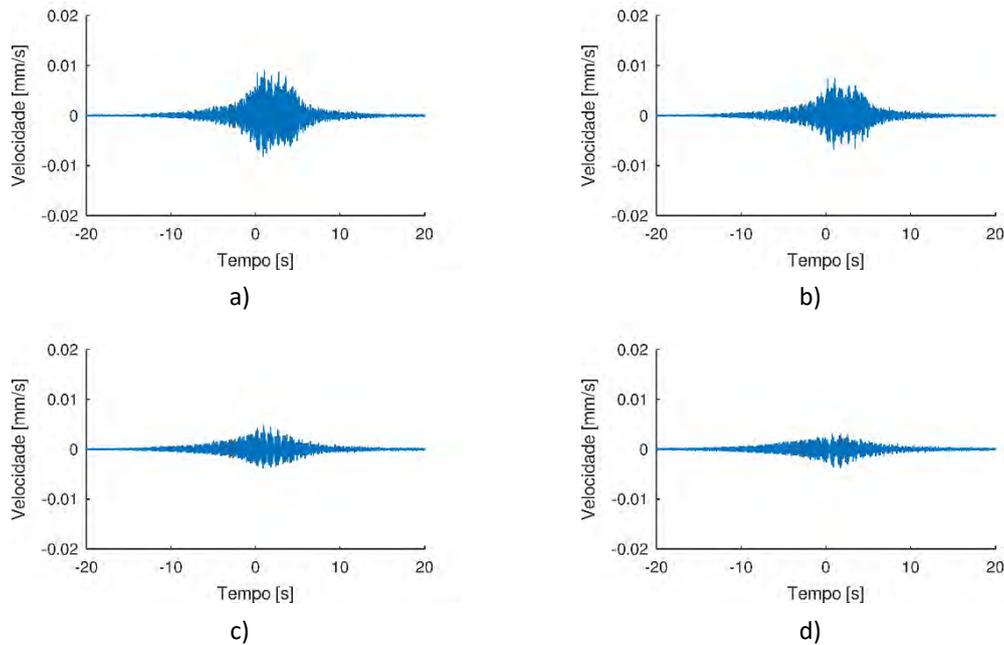


Figura 24 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 4 (Pk 3+200)

Na Figura 25 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios da secção 4, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel.

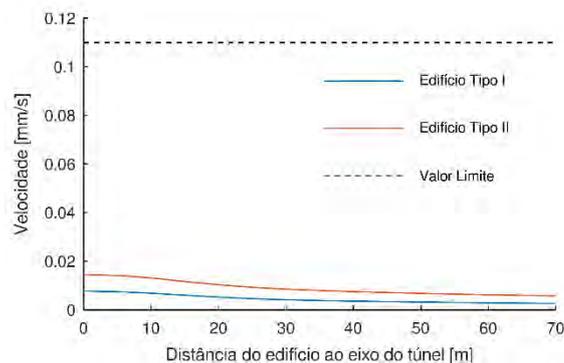


Figura 25 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 1 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

As curvas de velocidade de vibração eficaz avaliadas para os edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite das vibrações induzidas para as diferentes distâncias

Na Figura 26 são apresentados os espectros de resposta para quatro posições do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{ef} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído re-radiado pelos elementos do edifício.

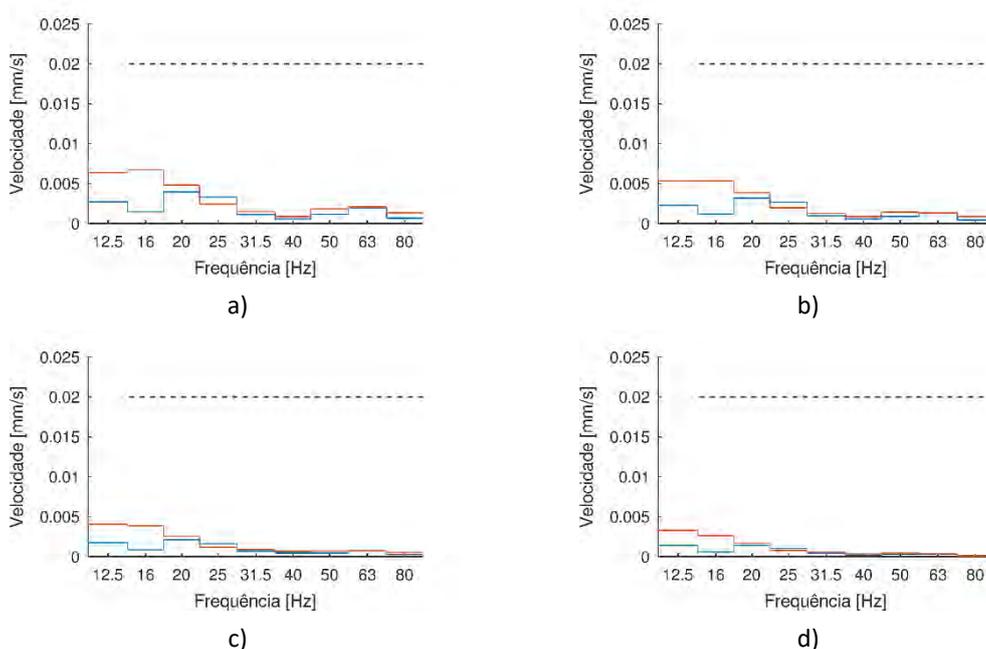


Figura 26 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 4 (Pk 3+200)

Os resultados obtidos para os níveis de vibração eficaz induzidos nos edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite preconizado, assegurando a não emissão de ruído re-radiado com níveis superiores a 22dB(A).

4.2.2 Análise Global Interpolada

A modelação numérica das secções transversais permite determinar para cada uma dessas a resposta de uma forma precisa. No entanto, foi pretensão dos intervenientes, a determinação e avaliação de toda a linha. Uma vez que a modelação numérica é computacionalmente é muito exigente e acarreta uma elevada disponibilidade temporal para o cálculo. O estudo integral das vibrações da linha com um elevado número de secções para além de fora do âmbito afigurava-se de difícil execução. Por essa razão, foi considerada uma análise global interpolada, tendo por base as curvas de vibração determinadas para as diferentes secções. Entre as secções foi considerada uma interpolação linear, que atende à distância entre o ponto de avaliação e as duas secções mais próximas.

A generalização das conclusões a toda a linha de metro, através da interpolação permite identificar de forma direta quais os recetores afetados. Possibilitando a identificação das zonas, onde serão necessárias medidas adicionais para mitigar as vibrações induzidas aos recetores, bem como o ruído re-radiado.

Procedeu-se à reanálise dos valores globais de vibração eficaz, avaliados em cada um dos recetores identificados na fase de análise preliminar e apresentados no Anexo 3 – Listagem de Edifícios. A referida reanálise e apresentação dos resultados da análise é feita no Anexo 6 – Apresentação do Resultado de Avaliação das Vibrações Induzidas aos Edifícios.

Para além da análise de vibrações atendendo ao seu valor global, avalia-se também o cumprimento da velocidade de vibração eficaz em frequência para garantir a emissão de níveis de ruído re-radiado inferiores a 22 dB(A). Segundo recomendação do LNEC e versado no documento *Tomo II - Geral* [7], para o caso de edifícios residenciais e hoteleiros, adota-se como máxima de vibração eficaz o valor de 0,02 mm/s.

A verificação do critério deve ser feita entre as frequências 16Hz e 200 Hz. No entanto, neste estudo, por restrição de tempo, não foi possível estender a avaliação da resposta para frequências superiores a 100 Hz. Contudo, entende-se que esta consequência tem riscos controlados, pelo facto dos picos de resposta em frequência avaliados no estudo do LNEC [5] para os edifícios em análise, se encontrarem sempre para frequências inferiores a 100 Hz. Os resultados desta análise são apresentados no Anexo 7 – Apresentação do Resultado de Avaliação do Ruído Re-radiado nos edifícios.

Face aos resultados obtidos nesta análise global interpolada e tendo em conta as situações de incumprimento verificadas preconizam-se as seguintes ações:

- Estender a manta preconizada para a secção junto ao palácio das necessidades, até ao PK2+550;
- Considerar adicionalmente manta na via entre os pontos quilométricos
 - PK0+000 a PK0+250;
 - PK0+500 a PK1+350;
 - PK1+500 a PK1+800.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

No presente relatório são apresentados os pressupostos e as conclusões dos estudos de avaliação das vibrações e ruído re-radiado induzidos nos múltiplos recetores localizados ao longo da futura linha de metro que resultará do prolongamento da linha vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, do Metropolitano de Lisboa E. P. E..

Neste estudo foram avaliados os níveis de vibração a que as edificações estarão sujeitas aquando da operação do metro na linha em estudo. Os limites recomendados, e que serviram de base à verificação do cumprimento nos recetores, refletem as opções e decisões anteriores que constituem a empreitada em preparação.

Foram elaboradas duas análises de vibrações. Uma preliminar, que permitiu identificar as principais zonas críticas e candidatas a estudo detalhado, e uma análise numérica detalhada. Para a análise detalhada foram consideradas 4 secções de cálculo (PK 0+600, PK 1+700, PK 2+100 e PK 3+200). A escolha destas secções atendeu aos resultados da análise preliminar, aos diferentes perfis geológicos, à variabilidade da profundidade do túnel e à limitação do tempo disponível. Nesta análise foi utilizado o perfil real de estratificação do solo, para cada uma das secções, bem como do respetivo tipo de via. Foi considerada numericamente a interação dinâmica veículo-via e de forma híbrida a interação dinâmica solo-estrutura, através de curvas experimentais. Ao nível da via foi considerado um perfil de irregularidades correspondente a uma classe de manutenção 3 e uma velocidade de circulação de 70 km/h.

A modelação das secções permitiu estudar, com elevado nível de certeza, as vibrações e ruído re-radiado em cada um dos potenciais recetores localizados em cada uma das secções em análise. No entanto, era objetivo do trabalho apresentar uma estimativa dos níveis de vibração e ruído re-radiado para todos os recetores, ao longo de toda a linha. Tendo em conta esse desígnio procedeu-se à determinação dos indicadores por interpolação linear entre as quatro secções de cálculo.

Os diferentes tipos de via, e as medidas mitigadoras consideradas foram as descritas na secção 4.1.1 do presente relatório.

Atendendo aos pressupostos de análise e aos condicionalismos previamente mencionados, os estudos agora realizados permitiram concluir que:

- O nível de vibrações induzido nos recetores analisados é para todos os casos, inferior ao limite estabelecido ($v_{ef} < 0.11 \text{ mm/s}$).
- No que ao ruído re-radiado diz respeito, verifica-se que existem alguns edifícios em incumprimento, do limite de vibração eficaz máxima dos elementos, analisada em frequência ($v_{ef} < 0.02 \text{ mm/s}$).
- Junto ao PK 3+700 verifica-se o incumprimento dos limites, mesmo tendo em conta a existência da solução de via c/ manta. É recomendada a adoção de uma medida mitigadora mais exigente devidamente suportada em estudo dedicado que inclua a caracterização geotécnica local;
- Estima-se a necessidade de estender a manta preconizada para a secção junto ao palácio das necessidades, até ao PK2+550;
- Estima-se a necessidade de considerar adicionalmente manta entre os pontos quilométricos
 - PK0+000 a PK0+250;

-
- PK0+500 a PK1+350;
 - PK1+500 a PK1+800.

A aplicação da mesma solução de medida mitigadora (via c/ manta), Via Tipo 3, pode para alguns dos troços adicionais agora mencionados ser excessiva, devido à maior profundidade do túnel e à redução da velocidade de circulação real nas estações. Para estes casos a solução mitigadora pode ser otimizada com estudo dedicado, salvaguardando o detalhe e a precisão que lhe é devido.

ANEXO 1 - MÉTODO ANALITICO DETERMINAÇÃO VIBRAÇÕES

1. Modelo de cálculo preditivo da situação futura

A metodologia da *Federal Railway Administration* (FRA) [4] consiste num conjunto de diretrizes e ferramentas analíticas que visam prever e avaliar os impactos de ruído e vibração decorrentes das operações ferroviárias. Esta metodologia é especialmente relevante para grandes infraestruturas ferroviárias, onde o ruído re-radiado ou direto e as vibrações induzidas podem ter efeitos adversos sobre a saúde pública e a qualidade de vida nas áreas circundantes a essas infraestruturas.

Esta metodologia permite determinar os níveis de vibração avaliados no recetor, tendo por base uma curva genérica de vibrações em função da distância à via. A curva pode ser corrigida através de um conjunto de fatores que permitem considerar diferentes elementos, tais como: i) o tipo de via; ii) a posição relativa da via à superfície; iii) os níveis de manutenção da via; iv) a velocidade de circulação do material circulante; v) o tipo de solo; vi) o tipo de recetor, entre outros.

1.1. Fatores corretivos método analítico (FRA)

1.1.1. Fonte de vibração

O primeiro fator relativo à fonte de vibração prende-se com a correção da velocidade de circulação do comboio, permitindo um ajuste da curva base à velocidade de projeto.

O fator corretivo da velocidade, F_{vel} , é determinado pela expressão (2).

$$F_{vel} = 20 \log_{10} \left(\frac{vel_{real}}{vel_{ref}} \right) \quad (2)$$

Em que vel_{real} corresponde à velocidade de circulação de projeto e vel_{ref} corresponde à velocidade de circulação de referência, $vel_{ref} = 80,47$ km/h (50 mph).

No Quadro 8 são apresentados os diferentes fatores corretivos a aplicar para adequação da fonte ao cenário de referência.

Quadro 8 - Fatores Corretivos Fonte de Vibração

Tipo de Correção	Ajuste à curva base	Comentário
Rodas Resilientes	0 dB	Não têm geralmente influência nas vibrações induzidas para frequências inferiores a 80 Hz.
Rodas irregulares	+ 10 dB	Podem causar elevados níveis de vibração.
Irregularidades do Carril	Selecionar apenas um dos fatores + 10 dB	As irregularidades do carril são um problema comum e estão intrinsecamente relacionadas com os níveis de manutenção. A esmerilagem dos carris remove as irregularidades e repõem a mesa de rolamento.
Aparelhos de Mudança de Via ou similares	+ 10 dB	Os impactos das rodas nos aparelhos de mudança de via aumentam significativamente os níveis de vibração.

Laje Flutuante		-15 dB	A redução alcançada com este tipo de soluções é muito dependente das características da fonte, em frequência e da massa do sistema.
Mantas sob Balastro		-10 dB	A redução é altamente dependente da frequência de vibração.
Fixações Resilientes do Carril	Selecionar o valor mais alto aplicável	-5 dB	Elementos de fixação resilientes em vias em laje, levam a uma redução das vibrações para frequências superiores a 40 Hz.
Travessas com Palmilha		-10 dB	Foi identificado que a sua aplicação em túneis permite controlar de forma eficaz as vibrações para frequências mais baixas.
Tipo de Estrutura de Via	Relativo a vias à superfície		
	Viaduto	-10 dB	
	Superfície/Trincheira	0 dB	Regra geral, quanto mais pesada for a estrutura, menores serão os níveis de vibração. Túneis em rocha deslocam o conteúdo em frequência das vibrações para frequências mais altas.
	Relativo a vias em profundidade:		
	Estação	-5 dB	
	Cut and Cover	-3 dB	
	Túnel	-15 dB	

1.1.2. Caminho de Propagação

No Quadro 9 são apresentados os diferentes fatores corretivos a aplicar para adequação do caminho de propagação.

Quadro 9 - Fatores Corretivos Caminho de Propagação

Tipo de Correção	Ajuste à curva base	Comentário	
Propagação Eficiente	+ 10 dB	Aplicável sempre que possa ser identificada a probabilidade de ocorrência de propagação eficiente de vibrações.	
Propagação	Profundidade	Ajuste	
	15,24 m	+2 dB	O ajuste positivo considera uma menor atenuação da vibração em rocha do que no solo.
	30,48 m	+4 dB	
	45,72 m	+6 dB	
	60,96 m	+9 dB	
Estrutura em Madeira	-5 dB		
Acoplamento do Edifício	Alvenaria (1-2 pisos)	-7 dB	Regra geral, quanto mais pesado for o edifício, maior será a perda por acoplamento.
	Alvenaria (2-4 pisos)	-10 dB	
	Alvenaria (>4 pisos):		
	Fundada em estacas	-10 dB	
	Fundações superficiais	-13 dB	
	Fundação em Rocha	0 dB	

1.1.3. Recetor

No Quadro 10 são apresentados os diferentes fatores corretivos a aplicar para consideração das especificidades do recetor, nomeadamente do fenómeno de interação dinâmica solo-estrutura.

Quadro 10 - Fatores Corretivos Recetor

Tipo de Correção	Ajuste à curva base		Comentário
Atenuação Piso a Piso	1-5 pisos acima do solo	-2 dB/piso	Este fator tem em conta a dispersão e atenuação da energia à medida que ela se propaga no edifício.
	5-10 pisos acima do solo	-1 dB/piso	
Amplificação devido às ressonâncias das lajes e paredes		+6 dB	A amplificação variará muito dependendo do tipo de estrutura e será menor junto às interseções paredes/pisos.

ANEXO 2 – PRESSUPOSTOS ANÁLISE DO ESTUDO PRELIMINAR VIBRAÇÕES

Os pressupostos de análise da metodologia preliminar FRA são apresentados no Quadro 11. São evidenciados os pontos notáveis do projeto em que se verifica uma variação das condições/caraterísticas que justifiquem uma consideração diferente entre as zonas delimitadas por esses pontos.

Quadro 11 - Identificação dos Pontos Notáveis

Ponto	PK	Cota Terreno (m)	Cota Rasante (m)	Velocidade (km/h)	Defeito	Tipo de Estrutura de Via	Geologia
P1	0	110.214905	84.433	70		Túnel	Propagação Eficiente
P2	561.001	103.2622	82.94	70		Estação	Propagação Eficiente
P3	671.001	102.6184	82.94	70		Túnel	Propagação Eficiente
P4	1607.469	91.7698	61.3	70		Estação	Propagação Eficiente
P5	1717.469	91.6158	61.3	70		Túnel	Propagação Eficiente
P6	1873.53	91.4157	56.4051	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P7	1917.244	90.6022	54.6565	70		Túnel	Propagação Eficiente
P8	2463.439	72.1029	34.6	70		Estação	Propagação Eficiente
P9	2573.439	68.812	34.6	70		Túnel	Propagação Eficiente
P10	2650	57.6818	33.1374	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P11	2703.758	56.5917	31.3871	70		Túnel	Propagação Eficiente
P12	3314.556	12.0838	12.0838	70		Viaduto	
P13	3331.226	7.8536	12.5797	70	Aparelho de Mudança de Via	Viaduto	
P14	3371.911	4.8327	13.79	70		Viaduto	
P15	3468.693	6.2898	14.8039	70		Viaduto	
P16	3578.693	12.0736	14.8039	70		Viaduto	
P17	3622.663	14.8039	14.8039	70		Túnel	Propagação Eficiente
P18	3727.257	24.1222	13.3543	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P19	3766.554	26.4202	12.5493	70		Túnel	Propagação Eficiente

P20	3778.657	27.36	12.3076	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P21	3822.157	52.2672	11.4386	70		Túnel	Propagação Eficiente
P22	4097.22372	50.6744552	8.98220809	70		Túnel	Propagação Eficiente

ANEXO 3 – LISTAGEM DE EDIFÍCIOS

Foi feito o levantamento de todos os edifícios localizados nas imediações da infraestrutura ferroviária que se pretende construir. A listagem de edifícios é apresentada no Quadro 12.

Quadro 12 – Listagem dos edifícios e da sua localização relativa

Designação	PK	Distância	Acoplamento do Edifício	Número de Pisos
1	54	10.850129	Alvenaria em Estacas	6
2	75	10.542308	Alvenaria em Estacas	6
3	96	10.901234	Alvenaria em Estacas	6
4	147	9.9184344	Alvenaria em Estacas	6
5	147	9.9290773	Alvenaria em Estacas	6
6	163	10.234064	Alvenaria em Estacas	6
7	184	10.185177	Alvenaria em Estacas	6
8	197	9.9697361	Alvenaria em Estacas	6
9	216	8.8195413	Alvenaria em Estacas	6
10	231	7.007878	Alvenaria em Estacas	7
11	302	29.614253	Alvenaria (2-4 pisos)	4
12	520	39.871779	Alvenaria em Estacas	16
13	583	31.088823	Alvenaria em Estacas	7
14	601	16.465688	Alvenaria em Estacas	18
15	630	10.428563	Alvenaria em Estacas	18
16	744	26.581552	Alvenaria em Estacas	14
17	765	27.641105	Alvenaria em Estacas	14
18	790	31.212611	Alvenaria em Estacas	14
19	803	10.769009	Alvenaria (1-2 pisos)	3
20	850	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
21	836	0	Alvenaria em Estacas	9
22	863	16.250166	Alvenaria (1-2 pisos)	3
23	930	11.395564	Alvenaria em Estacas	8
24	1002	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
25	1008	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
26	1023	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
27	1019	5.2670068	Alvenaria (1-2 pisos)	3
28	1036	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
29	1041	5.1242838	Alvenaria (1-2 pisos)	4
30	1047	11.090905	Alvenaria (2-4 pisos)	4
31	1063	18.371253	Alvenaria em Estacas	11
32	1078	6.6062974	Alvenaria (1-2 pisos)	3
33	1083	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
34	1098	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
35	1113	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
36	1121	1.8493379	Alvenaria (1-2 pisos)	3

37	1173	0	Alvenaria em Estacas	7
38	1187	4.3800862	Alvenaria em Estacas	9
39	1202	11.217403	Alvenaria (2-4 pisos)	4
40	1208	0.4352529	Alvenaria (2-4 pisos)	4
41	1219	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
42	1232	0.4330491	Alvenaria (2-4 pisos)	4
43	1239	8.4939622	Alvenaria (2-4 pisos)	4
44	1240	0.522674	Alvenaria (2-4 pisos)	2
45	1250	0	Alvenaria (2-4 pisos)	2
46	1266	2.5379802	Alvenaria (2-4 pisos)	2
47	1261	0	Alvenaria (2-4 pisos)	2
48	1291	3.8801725	Alvenaria (1-2 pisos)	1
49	1294	12.990611	Alvenaria (1-2 pisos)	1
50	1295	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
51	1301	5.5477293	Alvenaria (1-2 pisos)	1
52	1310	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
53	1312	2.0085056	Alvenaria (1-2 pisos)	1
54	1317	4.9742899	Alvenaria (1-2 pisos)	1
55	1310	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
56	1321	8.109715	Alvenaria (1-2 pisos)	1
57	1316	1.4721095	Alvenaria (1-2 pisos)	1
58	1320	5.7039736	Alvenaria (1-2 pisos)	1
59	1324	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
60	1324	10.078537	Alvenaria (1-2 pisos)	1
61	1341	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
62	1346	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
63	1356	1.571858	Alvenaria (1-2 pisos)	
64	1380	23.616222	Alvenaria (1-2 pisos)	1
65	1387	31.018166	Alvenaria (1-2 pisos)	1
66	1384	19.139971	Alvenaria (1-2 pisos)	2
67	1390	27.655737	Alvenaria (1-2 pisos)	1
68	1393	25.355234	Alvenaria (1-2 pisos)	1
69	1426	24.976577	Alvenaria (2-4 pisos)	4
70	1431	17.476812	Alvenaria (2-4 pisos)	4
71	1439	8.2074395	Alvenaria (2-4 pisos)	3
72	1443	3.2118526	Alvenaria (2-4 pisos)	3
73	1449	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
74	1459	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
75	1465	0	Alvenaria em Estacas	6
76	1471	7.0220716	Alvenaria em Estacas	6
77	1477	5.7269496	Alvenaria (2-4 pisos)	5

78	1484	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
79	1488	0	Alvenaria em Estacas	6
80	1506	5.0733807	Alvenaria em Estacas	5
81	1518	0	Alvenaria em Estacas	5
82	1529	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
83	1535	3.5470545	Alvenaria (2-4 pisos)	5
84	1533	15.078147	Alvenaria (1-2 pisos)	4
85	1543	7.6101665	Alvenaria (1-2 pisos)	5
86	1538	12.396779	Alvenaria (2-4 pisos)	4
87	1544	9.6770001	Alvenaria (2-4 pisos)	5
88	1552	5.0154814	Alvenaria (2-4 pisos)	5
89	1554	13.169531	Alvenaria (2-4 pisos)	6
90	1563	0	Alvenaria (2-4 pisos)	6
91	1575	20.953077	Alvenaria em Estacas	8
92	1578	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
93	1587	0	Alvenaria em Estacas	7
94	1616	33.829075	Alvenaria em Estacas	7
95	1606	1.561075	Alvenaria em Estacas	7
96	1630	37.750998	Alvenaria (1-2 pisos)	4
97	1646	42.12232	Alvenaria (1-2 pisos)	4
98	1659	46.003187	Alvenaria (1-2 pisos)	4
99	1664	47.386112	Alvenaria (1-2 pisos)	4
100	1671	49.015171	Alvenaria em Estacas	7
101	1682	50.420682	Alvenaria em Estacas	7
102	1650	44.838878	Alvenaria em Estacas	7
103	1659	42.351908	Alvenaria em Estacas	7
104	1670	38.922229	Alvenaria em Estacas	7
105	1682	35.688708	Alvenaria em Estacas	7
106	1721	28.630656	Alvenaria (1-2 pisos)	3
107	1694	32.383617	Alvenaria em Estacas	7
108	1733	44.062217	Alvenaria (2-4 pisos)	3
109	1704	29.433667	Alvenaria em Estacas	7
110	1739	36.156084	Alvenaria (2-4 pisos)	5
111	1726	9.3076626	Alvenaria (1-2 pisos)	3
112	1747	37.776375	Alvenaria (2-4 pisos)	5
113	1715	26.22203	Alvenaria em Estacas	7
114	1730	0	Alvenaria em Estacas	7
115	1745	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
116	1755	0	Alvenaria em Estacas	5
117	1752	16.382208	Alvenaria em Estacas	7
118	1765	2.7396177	Alvenaria em Estacas	5

119	1762	14.120347	Alvenaria em Estacas	5
120	1773	4.6668663	Alvenaria em Estacas	5
121	1769	12.276892	Alvenaria em Estacas	5
122	1783	6.7382288	Alvenaria em Estacas	5
123	1780	11.568407	Alvenaria em Estacas	5
124	1790	8.0000941	Alvenaria em Estacas	5
125	1805	9.5534989	Alvenaria (1-2 pisos)	2
126	1800	6.5709138	Alvenaria em Estacas	5
127	1817	5.219929	Alvenaria em Estacas	5
128	1836	11.778364	Alvenaria (2-4 pisos)	4
129	1855	16.369332	Alvenaria (1-2 pisos)	3
130	1844	2.0193758	Alvenaria (2-4 pisos)	6
131	1873	19.034753	Alvenaria (2-4 pisos)	5
132	1884	21.311038	Alvenaria (1-2 pisos)	3
133	1862	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
134	1898	23.909443	Alvenaria (2-4 pisos)	4
135	1868	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
136	1880	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
137	1895	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
138	1923	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
139	1940	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
140	1942	5.9032546	Alvenaria em Estacas	6
141	1950	0.7305841	Alvenaria em Estacas	6
142	1981	24.134477	Alvenaria (1-2 pisos)	2
143	1955	0	Alvenaria em Estacas	6
144	1982	16.952045	Alvenaria (1-2 pisos)	3
145	1983	10.296383	Alvenaria (1-2 pisos)	3
146	1984	3.6407215	Alvenaria em Estacas	6
147	1966	12.075768	Alvenaria em Estacas	6
148	1990	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
149	2043	18.140658	Alvenaria em Estacas	10
150	1998	6.7529531	Alvenaria (1-2 pisos)	3
151	2001	13.894563	Alvenaria (2-4 pisos)	4
152	2014	3.5054605	Alvenaria (1-2 pisos)	1
153	2026	1.2615482	Alvenaria (1-2 pisos)	1
154	2035	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
155	2104	38.342623	Alvenaria (2-4 pisos)	3
156	2108	37.886814	Alvenaria (2-4 pisos)	3
157	2046	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
158	2116	33.339971	Alvenaria (2-4 pisos)	4
159	2072	4.5029387	Alvenaria (2-4 pisos)	4

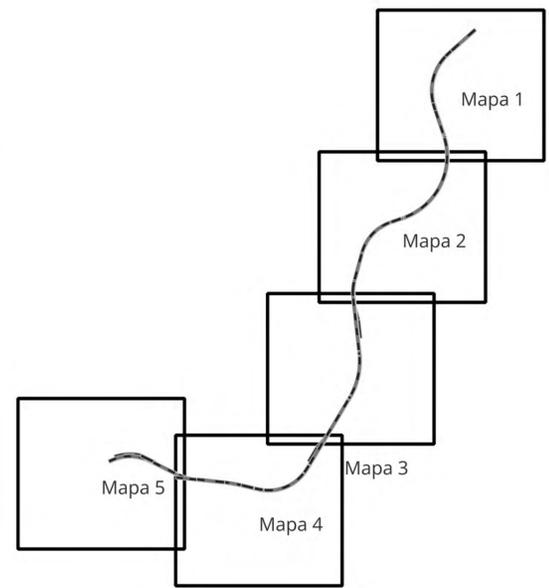
160	2123	26.772749	Alvenaria (2-4 pisos)	4
161	2139	18.388498	Alvenaria (1-2 pisos)	3
162	2152	11.889021	Alvenaria (2-4 pisos)	4
163	2159	13.280163	Alvenaria (1-2 pisos)	4
164	2165	10.53786	Alvenaria (1-2 pisos)	3
165	2171	8.0342469	Alvenaria (1-2 pisos)	3
166	2153	4.254224	Alvenaria (1-2 pisos)	3
167	2235	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
168	2249	7.9611097	Alvenaria (2-4 pisos)	5
169	2258	12.880259	Alvenaria (2-4 pisos)	4
170	2252	19.791971	Alvenaria (1-2 pisos)	2
171	2277	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
172	2262	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
173	2285	1.7875619	Alvenaria (2-4 pisos)	5
174	2292	11.052597	Alvenaria (2-4 pisos)	5
175	2259	20.742972	Alvenaria (2-4 pisos)	3
176	2299	21.052016	Alvenaria (2-4 pisos)	5
177	2269	26.690558	Alvenaria (2-4 pisos)	3
178	2307	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
179	2319	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
180	2323	4.6001405	Alvenaria (2-4 pisos)	5
181	2301	3.0350268	Alvenaria (2-4 pisos)	3
182	2327	14.354844	Alvenaria (2-4 pisos)	5
183	2304	16.140174	Alvenaria (2-4 pisos)	2
184	2338	4.1135409	Alvenaria (1-2 pisos)	3
185	2339	8.8962168	Alvenaria (1-2 pisos)	3
186	2338	0.7784216	Alvenaria (1-2 pisos)	3
187	2326	0.0378218	Alvenaria (1-2 pisos)	3
188	2339	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
189	2324	5.0119783	Alvenaria (1-2 pisos)	3
190	2345	6.0584958	Alvenaria (1-2 pisos)	1
191	2354	5.5480071	Alvenaria (1-2 pisos)	2
192	2363	2.6513249	Alvenaria (2-4 pisos)	4
193	2341	2.1421991	Alvenaria (1-2 pisos)	1
194	2369	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
195	2380	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
196	2409	19.694092	Alvenaria em Estacas	9
197	2403	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
198	2419	18.585214	Alvenaria em Estacas	9
199	2439	16.689288	Alvenaria em Estacas	9
200	2432	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5

201	2460	39.55152	Alvenaria em Estacas	8
202	2447	8.0666751	Alvenaria em Estacas	9
203	2459	0	Alvenaria em Estacas	6
204	2448	34.178933	Alvenaria (2-4 pisos)	4
205	2464	4.6305022	Alvenaria (2-4 pisos)	5
206	2467	17.436667	Alvenaria (2-4 pisos)	5
207	2470	28.245563	Alvenaria em Estacas	7
208	2491	33.730446	Alvenaria (2-4 pisos)	5
209	2472	33.612564	Alvenaria em Estacas	7
210	2468	41.459423	Alvenaria (2-4 pisos)	5
211	2484	40.398522	Alvenaria (2-4 pisos)	4
212	2514	28.416121	Alvenaria (2-4 pisos)	5
213	2495	38.855791	Alvenaria (2-4 pisos)	5
214	2504	37.087856	Alvenaria (2-4 pisos)	5
215	2514	35.244504	Alvenaria (2-4 pisos)	5
216	2541	23.778885	Alvenaria (2-4 pisos)	5
217	2525	32.395767	Alvenaria (2-4 pisos)	5
218	2534	29.800864	Alvenaria (2-4 pisos)	5
219	2543	26.90497	Alvenaria (2-4 pisos)	5
220	2570	19.590053	Alvenaria (2-4 pisos)	5
221	2548	26.89876	Alvenaria (2-4 pisos)	5
222	2565	23.218367	Alvenaria (2-4 pisos)	5
223	2598	13.407209	Alvenaria (2-4 pisos)	5
224	2579	20.888881	Alvenaria (2-4 pisos)	5
225	2606	22.342986	Alvenaria (2-4 pisos)	5
226	2626	7.8781324	Alvenaria (2-4 pisos)	5
227	2642	14.533797	Alvenaria (2-4 pisos)	5
228	2652	1.9598595	Alvenaria (2-4 pisos)	5
229	2656	8.1803688	Alvenaria em Estacas	5
230	2668	7.7195434	Alvenaria em Estacas	5
231	2687	0.7641029	Alvenaria em Estacas	6
232	2662	2.2548495	Alvenaria em Estacas	8
233	2681	47.556196	Alvenaria em Estacas	8
234	2700	5.8302725	Alvenaria (2-4 pisos)	4
235	2717	3.7262781	Alvenaria (2-4 pisos)	4
236	2730	28.312077	Alvenaria (2-4 pisos)	4
237	2725	11.709033	Alvenaria em Estacas	9
238	2729	1.2280902	Alvenaria (2-4 pisos)	4
239	2737	0.3901236	Alvenaria em Estacas	5
240	2739	14.661818	Alvenaria em Estacas	9
241	2742	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5

242	2757	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
243	2757	16.172418	Alvenaria em Estacas	9
244	2778	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
245	2787	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
246	2801	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
247	2803	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
248	2858	0	Alvenaria em Estacas	5
249	2874	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
250	2889	3.7458622	Alvenaria (1-2 pisos)	2
251	2917	9.6131333	Alvenaria (1-2 pisos)	3
252	2924	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
253	2963	5.8527554	Alvenaria (1-2 pisos)	3
254	2977	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
255	3051	20.449251	Alvenaria (1-2 pisos)	2
256	3010	24.697775	Alvenaria (1-2 pisos)	2
257	3017	20.374803	Alvenaria (1-2 pisos)	1
258	3033	8.3472468	Alvenaria (1-2 pisos)	3
259	3034	14.243329	Alvenaria (1-2 pisos)	3
260	3039	25.457221	Alvenaria (1-2 pisos)	3
261	3063	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
262	3055	12.766796	Alvenaria (1-2 pisos)	3
263	3079	16.42981	Alvenaria (2-4 pisos)	5
264	3135	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
265	3101	17.094072	Alvenaria (1-2 pisos)	2
266	3093	30.068905	Alvenaria (2-4 pisos)	4
267	3100	24.012948	Alvenaria (1-2 pisos)	3
268	3107	18.335761	Alvenaria (1-2 pisos)	2
269	3123	36.041042	Alvenaria (1-2 pisos)	2
270	3147	18.775851	Alvenaria (1-2 pisos)	3
271	3201	14.914814	Alvenaria (1-2 pisos)	1
272	3217	2.6281103	Alvenaria (1-2 pisos)	1
273	3229	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
274	3230	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
275	3209	11.043183	Alvenaria (1-2 pisos)	1
276	3329	26.467136	Alvenaria (1-2 pisos)	3
277	3316	17.408445	Alvenaria (1-2 pisos)	3
278	3333	21.39461	Alvenaria (1-2 pisos)	3
279	3318	9.0407855	Alvenaria (1-2 pisos)	3
280	3260	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
281	3327	6.8579525	Alvenaria (1-2 pisos)	3
282	3343	11.076585	Alvenaria (1-2 pisos)	3

283	3330	4.5863961	Alvenaria (1-2 pisos)	3
284	3333	2.5994993	Alvenaria (1-2 pisos)	3
285	3353	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
286	3331	4.4528821	Alvenaria (1-2 pisos)	3
287	3322	9.0296485	Alvenaria (1-2 pisos)	3
288	3318	13.879161	Alvenaria (1-2 pisos)	3
289	3313	18.274058	Alvenaria (1-2 pisos)	3
290	3335	23.3258	Alvenaria (2-4 pisos)	4
291	3360	9.6279545	Alvenaria (2-4 pisos)	5
292	3346	31.399161	Alvenaria (2-4 pisos)	4
293	3726	39.434153	Alvenaria (1-2 pisos)	3
294	3744	31.707953	Alvenaria (2-4 pisos)	3
295	3701	23.772928	Alvenaria (1-2 pisos)	1
296	3704	21.474141	Alvenaria (1-2 pisos)	2
297	3697	17.853443	Alvenaria (1-2 pisos)	1
298	3707	19.143188	Alvenaria (1-2 pisos)	2
299	3700	15.912562	Alvenaria (1-2 pisos)	2
300	3709	17.103095	Alvenaria (1-2 pisos)	1
301	3703	13.682174	Alvenaria (1-2 pisos)	2
302	3715	13.009536	Alvenaria (1-2 pisos)	1
303	3705	11.607205	Alvenaria (1-2 pisos)	1
304	3711	7.6765143	Alvenaria (1-2 pisos)	1
305	3646	17.163739	Alvenaria (1-2 pisos)	2
306	3666	22.10912	Alvenaria (2-4 pisos)	4
307	3688	33.427679	Alvenaria (2-4 pisos)	5
308	3696	41.398627	Alvenaria (1-2 pisos)	2
309	3712	43.555538	Alvenaria (1-2 pisos)	2
310	3736	35.19551	Alvenaria (1-2 pisos)	1

ANEXO 4 – IDENTIFICAÇÃO DAS ZONAS POTENCIALMENTE CRÍTICAS E DOS EDIFÍCIOS AFETADOS: ANÁLISE PRELIMINAR



Legenda:

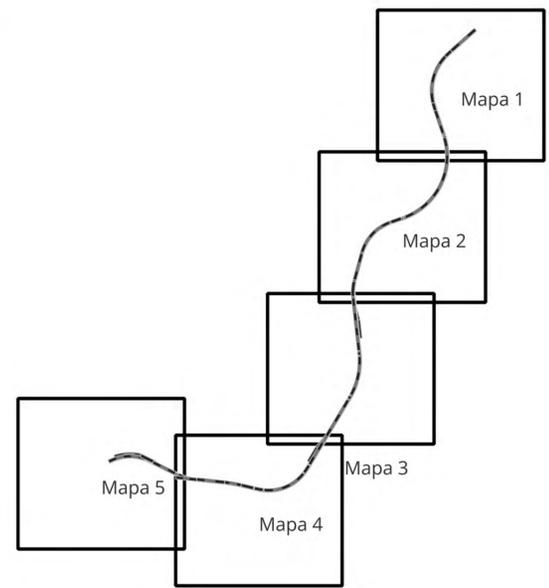
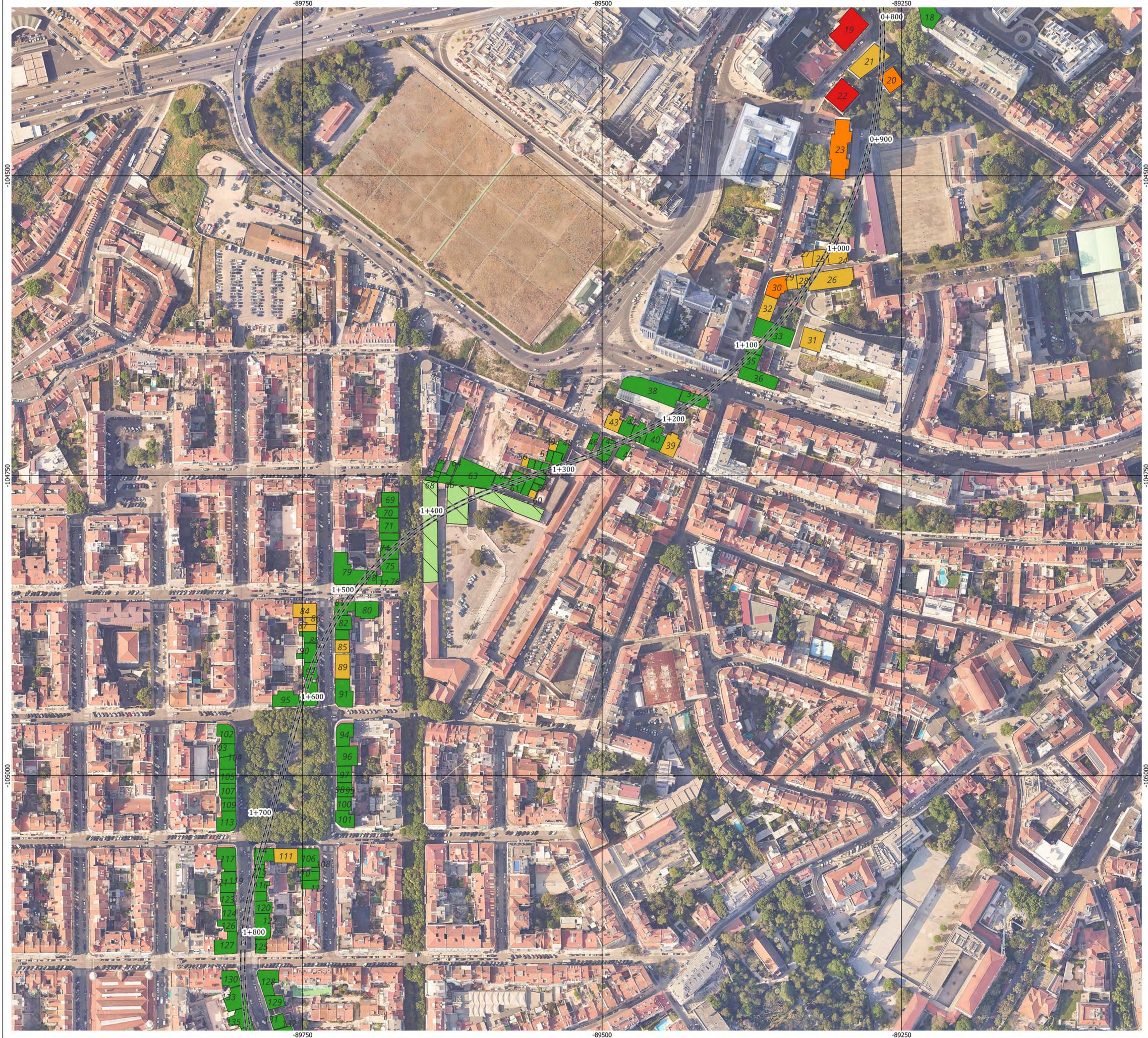
Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V_{eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V_{eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V_{eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V_{eficaz} \leq 0.04$	
$V_{eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p>
<p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p>	<p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>1/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 1</p>



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

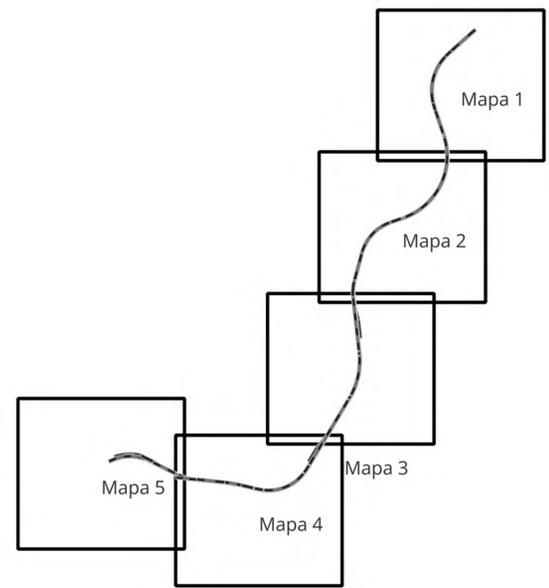
$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	---

27/09/2024	Folha	Desenho
	2/5	Mapa 2

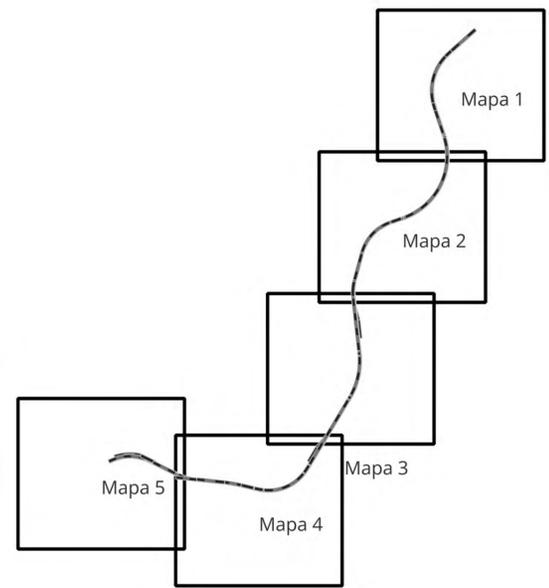
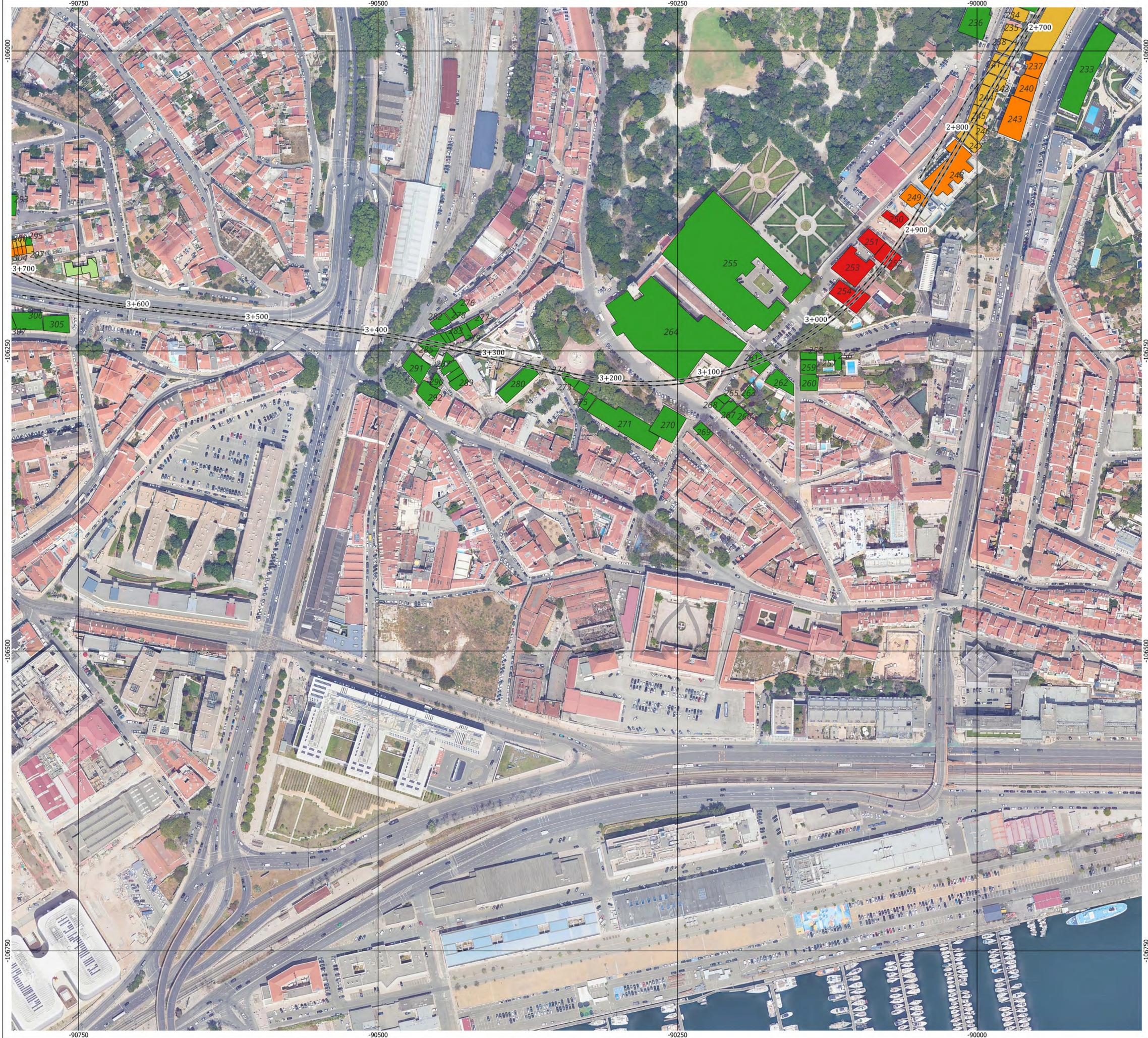


Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	Formato A1 (594x841)
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Título do Desenho Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m
Data 27/09/2024	Folha 3/5	Desenho Mapa 3

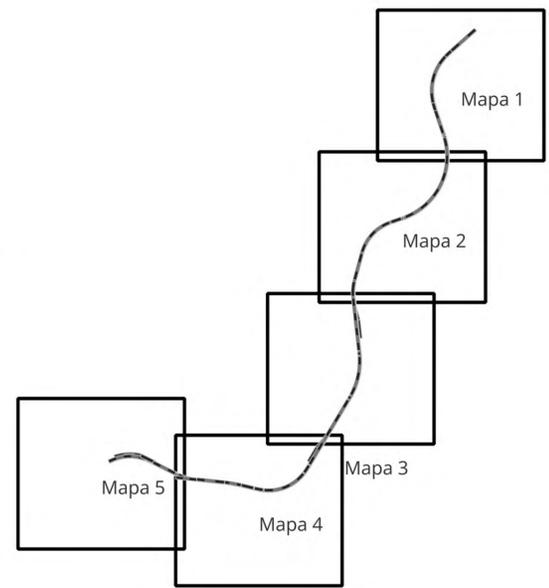


Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	■
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	■
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	■
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	■
$V \text{ eficaz} > 0.04$	■

Logótipos e informação complementar		
Projetistas 		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)	
Título do Desenho Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m	
27/09/2024	Folha 4/5	Desenho Mapa 4



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	■
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	■
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	■
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	■
$V \text{ eficaz} > 0.04$	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Logótipos e informação complementar</p> <p>Projetistas</p>	<p>Logótipos e informação complementar</p> <p>Projetistas</p>
<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p>
<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p>	<p>Formato</p> <p>A1 (99x641)</p>
<p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>5/5</p> <p>Desenho</p> <p>Mapa 5</p>

ANEXO 5 - MÉTODO 2.5 FEM-BEM

5. Modelo de cálculo preditivo da situação futura

5.1. Considerações iniciais

A metodologia de cálculo utilizada para alcançar o objetivo proposto baseia-se na modelação do sistema veículo-via-túnel-edifício a partir de um modelo híbrido, composto pelas seguintes partes:

- **Modelação do túnel e do terreno contíguo:** Para a modelação do troço em estudo, utiliza-se um modelo numérico de acordo com o método dos elementos finitos (FEM) e o método dos elementos de contorno (BEM) em duas dimensões e meia (habitualmente denominado 2.5D FEM-BEM). Neste modelo, o FEM é utilizado para modelar a estrutura do túnel e o BEM para modelar o terreno que o envolve localmente. A teoria associada encontra-se detalhada na secção 5.2.2.
- **Modelação da via:** Para modelar a via, foi utilizado um modelo semi-analítico composto por uma viga de Euler-Bernoulli, que simula o carril, e uma distribuição periódica de molas, que simulam as fixações da via à laje. Este modelo é acoplado ao modelo 2.5D FEM-BEM do túnel para obter um modelo via-túnel que simula a infraestrutura. A principal vantagem da utilização deste modelo semi-analítico prende-se com a possibilidade de permitir o cálculo da resposta do sistema para diferentes valores de fixação sem a necessidade de recalculer o modelo 2.5D FEM-BEM, o que torna viável o cálculo da otimização da via. A descrição desta metodologia é aprofundada na secção 5.3.
- **Modelação da passagem do comboio:** Para modelar o veículo, utiliza-se um modelo dinâmico rígido de 10 graus de liberdade, que recorre a uma série de molas, amortecedores e corpos rígidos para modelar os *bogies*, as rodas e o sistema de suspensão primário e secundário do material circulante. A secção 5.4 apresenta uma descrição mais detalhada do modelo semi-analítico do veículo.
- **Forças de interação roda-carril:** Existem dois mecanismos de excitação que contribuem maioritariamente para a vibração induzida pelo tráfego ferroviário:
 - I. A excitação quase-estática;
 - II. A excitação dinâmica.

O primeiro é induzido pela componente estática das cargas móveis aplicadas pelo comboio à via, tendo uma grande importância para comboios de alta velocidade, enquanto que a excitação dinâmica pode ser atribuída a diferentes mecanismos, como a rugosidade da roda, do carril e a variabilidade longitudinal dos parâmetros mecânicos da via.

Dado que o projeto se insere no contexto de uma infraestrutura ferroviária urbana, a excitação dinâmica vertical causada pela rugosidade roda-carril é considerada como a principal fonte de excitação. Assume-se que o desnivelamento dos carris não está correlacionado entre si. A secção 5.4 apresenta mais detalhes sobre a interação roda-carril e o acoplamento veículo-carril.

5.2. Método 2.5 FEM-BEM

Em muitas situações práticas, a geometria tridimensional (3D) do problema é invariante, ou pode ser aproximada como invariante, numa determinada direção do sistema. Aplicando a transformada de Fourier nessa direção, o problema transforma-se no que habitualmente se designa como um problema de duas dimensões e meia (2.5D), algo equivalente a resolver um grupo de problemas bidimensionais (2D) com diferentes números de onda. A vantagem obtida reside na possibilidade de utilizar uma malha bidimensional em problemas tridimensionais.

A solução para o campo tridimensional original pode ser obtida aplicando a transformada inversa de Fourier.

5.2.1. BEM 2.5D elastodinâmico

Utilizando os princípios do método dos elementos fronteira, ou de contorno (BEM), pode-se derivar a equação integral de contorno, *Boundary Element Integration* (BEI em inglês), para a elastodinâmica 2.5D. A representação integral para a elastodinâmica em domínios infinitos 2.5D é dada pela seguinte equação:

$$ku(x', k_y, z', \omega) = \int_{\partial\Omega} U_i^k(x', z', x, -k_y, z) t_i(x, k_y, z, \omega) dsy - \int_{\partial\Omega} T_i^k(x', z', x, -k_y, z) u_i^k(x, k_y, z, \omega) dSy \quad (3)$$

A BEI para domínios infinitos é dada por:

$$u(x', k_y, z') - \int_{\partial\Omega} U_i^k(x', z', x, -k_y, z) t_i(x, k_y, z, \omega) dSy - \int_{\partial\Omega} [T_i^k(x', 0, z', x, -k_y, z, \omega) u_i^k(x, k_y, z, \omega) - T_i^k(x', 0, z', x, k_y = 0, z, \omega = 0) u_i^k(x', k_y, z', \omega)] dSy = 0 \quad (4)$$

Forrest, JA et. al. [8] derivaram as equações mencionadas. Esta equação é normalmente discretizada com elementos de contorno de função de forma linear. Estes elementos têm dois nós associados e utilizam uma função de forma linear. Seja:

$$\{u(x, k_y, z)\}^j = [u_x^1, u_y^1, u_z^1, u_x^2, u_y^2, u_z^2]^T \quad (5)$$

$$\{t(x, k_y, z)\}^j = [t_x^1, t_y^1, t_z^1, t_x^2, t_y^2, t_z^2]^T \quad (6)$$

e dois vetores 6×1 de deslocamentos e tensões nodais para 2 nós no elemento j, e seja

$$\{x\}^j = [x_1, z_1, x_2, z_2]^T \quad (7)$$

um vetor 4×1 formado pelas coordenadas nodais dos elementos. Deste modo, os deslocamentos, as tensões e as coordenadas no elemento de fronteira podem ser aproximados para

$$\{u(x, k_y, z)\}^j = u(k_y, \xi) = \phi(\xi) \cdot \{u(k_y)\}^T \quad (8)$$

$$\{t(x, k_y, z)\}^j = t(k_y, \xi) = \phi(\xi) \cdot \{t(k_y)\}^T \quad (9)$$

$$(x, z)^j = \psi(\xi) \cdot y^T \quad (10)$$

Em que,

$$\phi(\xi) = [\phi_1(\xi)[I]_3 \quad \phi_2(\xi)[I]_3] \text{ and } \psi = [\phi_1(\xi)[I]_2 \quad \phi_2(\xi)[I]_2] \quad (11)$$

ϕ_1 e ϕ_2 são matrizes de funções de forma e $[I]_2$ e $[I]_3$ são matrizes de identidade 2x2 e 3x3, e

$$\phi_1(\xi) = \frac{1}{2} \times (1 - \xi), \quad \phi_2(\xi) = \frac{1}{2} \times (1 + \xi) \quad (12)$$

Inserindo a equação e deixando o ponto (x_0, z_0) seja o nó, isto leva a

$$\{u(k_y, \xi)\}^i + \sum_{j=1}^{NE} ([H(k_y, \xi)]_{ij}^T \cdot [\phi(\xi)] dS) \{u(k_y)\}^j = \sum_{j=1}^{NE} ([U(k_y, \xi)]_{ij}^T \cdot [\phi(\xi)] dS) \{t(k_y)\}^j \quad (13)$$

Onde $u(k_y)$ é o vetor de deslocamento do nó y , $[H]$ e $[U]$ são as matrizes de função de Green das tensões e deslocamentos, que consideram a fonte no nó i e o observador localizado pela equação (10).

Para um sistema com N nós, a equação (13) assume a forma:

$$\begin{pmatrix} u_x^i \\ u_{k_y}^i \\ u_z^i \\ \vdots \\ u_x^i \\ u_{k_y}^i \\ u_z^i \end{pmatrix} + [[H]^{i1} [H]^{i2} \dots [H]^{iN}] \begin{pmatrix} u_x^1 \\ u_{k_y}^1 \\ u_z^1 \\ \vdots \\ u_x^1 \\ u_{k_y}^1 \\ u_z^1 \end{pmatrix} = [[U]^{i1} [U]^{i2} \dots [U]^{iN}] \begin{pmatrix} t_x^1 \\ t_{k_y}^1 \\ t_z^1 \\ \vdots \\ t_x^1 \\ t_{k_y}^1 \\ t_z^1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Em que $i = 1, 2, \dots, N$. $[H]^{iN} y [U]^{ij}$ são matrizes de elementos 3x3. Estas matrizes são construídas concetualmente da mesma forma que as matrizes elementares do método dos elementos finitos. Para exemplificar, assume-se que o nó 2 é comum aos elementos Γ_1 e Γ_2 (os outros nós para o elemento $\partial\Omega_1$ e $\partial\Omega_2$ são 1 e 3, respetivamente).

$$\int_{\partial\Omega_1} [H(k_y, \xi)] [\phi(\xi)] dS y = \int_{\partial\Omega_1} [\phi_1(\xi) H(k_y, \xi)_{i1}^T \quad \phi_2(\xi) H(k_y, \xi)_{i2}^T] dS y = [[h]_1^{i1} [h]_1^{i2}] \quad (15)$$

$$\int_{\partial\Omega_2} [H(k_y, \xi)] [\phi(\xi)] dS y = \int_{\partial\Omega_2} [\phi_1(\xi) H(k_y, \xi)_{i2}^T \quad \phi_2(\xi) H(k_y, \xi)_{i2}^T] dS y = [[h]_2^{i2} [h]_2^{i3}] \quad (16)$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} [H]^{i1} &= [h]_1^{i1} \\ [H]^{i2} &= [h]_1^{i2} + [h]_2^{i2} \\ [H]^{i3} &= [h]_2^{i3} + [h]_3^{i1} \end{aligned} \quad (17)$$

A equação pode ser reescrita, de forma mais compacta,

$$[H] \{u(k_y)\} = [U] \{t(k_y)\} \quad (18)$$

Em que $[H]$ e $[H]$ são matrizes $3N \times 3N$.

5.2.2. Acoplamento FEM-BEM

Como foi mencionado anteriormente, o BEM trata a discretização dos contornos do sistema, enquanto o FEM trata da discretização de todo o domínio. Embora o método BEM seja muito eficiente na resolução de problemas em domínios infinitos, tem certas limitações. Neste sentido, os métodos BEM e FEM complementam-se, sendo por esse motivo conveniente combiná-los para certos tipos de problemas, de modo a se possam explorar as vantagens de cada um dos métodos. Apresenta-se de seguida um resumo a abordagem de acoplamento dos modelos:

A equação para os elementos finitos no domínio 2.5D pode ser escrita como:

$$[H]_{fe}\{u(k_y)\} = \{F(k_y)\} \quad (19)$$

Onde $[H]$ é a matriz de rigidez dinâmica e $F(k_y)$ é o vetor de forças nodais.

A equação dos elementos de contorno é:

$$[H]_{be}\{u(k_y)\} = [U]_{be}\{t(k_y)\} \quad (20)$$

em que $[H]$ e $[U]$ são as matrizes correspondentes às de tensões e deslocamentos de Green e $\{u(k_y)\}$ y $\{t(k_y)\}$ são os vetores de deslocamentos e tensões. Pode escrever-se as equações como:

$$[R]_{be}\{u(k_y)\} = \{t(k_y)\} \quad (21)$$

em que,

$$[R]_{be} = [U]_{be}^{-1}[H]_{be} \quad (22)$$

A continuidade de deslocamentos e equilíbrio das forças nas interfaces asseguram o acoplamento entre os elementos de fronteira e os subdomínios de elementos finitos.

Os deslocamentos, tensões e forças nodais nas interfaces entre os elementos finitos e os elementos de fronteira são representados por $\{u(k_y)\}_I$, $\{t(k_y)\}_I$, e $\{F(k_y)\}_I$. Da mesma forma, os deslocamentos, tensões e forças nos nós livres são representados por $\{u(k_y)\}_{beR}$, $\{t(k_y)\}_{beR}$ para o subdomínio BEM, e $\{u(k_y)\}_{feR}$ e $\{F(k_y)\}_{feR}$ para o subdomínio FEM. Assim, a equação do elemento de fronteira pode ser separada em:

$$\begin{bmatrix} [R]_{beRR} & [R]_{beRI} \\ [R]_{beIR} & [R]_{beII} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_{beR} \\ \{u(k_y)\}_I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{t(k_y)\}_{beR} \\ \{t(k_y)\}_I \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Enquanto a equação de elementos finitos pode ser separada em:

$$\begin{bmatrix} [K]_{beRR} & [K]_{beRI} \\ [K]_{beIR} & [K]_{beII} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_I \\ \{u(k_y)\}_{feR} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\{F(k_y)\}_I \\ \{F(k_y)\}_{feR} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

Pode ser construída uma matriz de transformação $[T]$ que converte as trações nodais $t(k_y)$ em forças nodais $\{F(k_y)\}_I$.

$$\{F(k_y)\}_I = [T]\{t(k_y)\}_I \quad (25)$$

Assim, se esta matriz de transformação for aplicada aos nós da interface entre os elementos de fronteira e os elementos finitos, obtém-se

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{R}]_{beRR} & [\mathbf{R}]_{beRI} \\ [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beIR} & [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beII} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_{beR} \\ \{u(k_y)\}_I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{t(k_y)\}_{beR} \\ \{F(k_y)\}_I \end{Bmatrix} \quad (26)$$

As trações são convertidas em forças nodais equivalentes. Se as equações para o domínio dos elementos finitos forem combinadas com as equações para o domínio dos elementos fronteira, obtém-se

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{R}]_{beRR} & [\mathbf{R}]_{beRI} & 0 \\ [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beIR} & [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beII} + [\mathbf{K}]_{feII} & [\mathbf{K}]_{feIR} \\ 0 & [\mathbf{K}]_{feRI} & [\mathbf{K}]_{feRR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_{beR} \\ \{u(k_y)\}_I \\ \{u(k_y)\}_{feR} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{t(k_y)\}_{beR} \\ 0 \\ \{F(k_y)\}_I \end{Bmatrix} \quad (27)$$

5.3. Modelo Semi-analítico da via

Esta secção explica sucintamente o modelo semi-analítico que foi utilizado para modelar a via. A equação diferencial de uma viga de Euler-Bernoulli com apoios discretos pode ser escrita através da expressão

$$E_r I_r \frac{\partial^4 z_r}{\partial x^4} + \rho_r S_r \frac{\partial^2 z_r}{\partial t^2} + \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\left(k_f + c_f \frac{\partial}{\partial t} \right) (z_{rn} - z_{tn}) \delta(x - x_n) \right] = e^{i\bar{\omega}t} \delta(x - v_t t) \quad (28)$$

em que E_r é o módulo de Young do carril, I_r é o momento de inércia do carril, ρ_r a densidade do carril, S_r a superfície do carril, z_r o deslocamento vertical do carril, z_{rn} o deslocamento do carril nas posições de fixação, z_{tn} o deslocamento do túnel nas posições de fixação, k_f a rigidez dos fixadores, c_f o amortecimento viscoso, v_t a velocidade do comboio.

Aplicando uma dupla transformada de Fourier à equação anterior, é possível obter a expressão

$$\begin{aligned} (E_r I_r k_x^4 + \rho_r S_r \omega^2) \bar{Z}_r \\ + \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} [(k_f + ic_f \omega)(Z_{rn} - Z_{tn}) e^{ik_x x_n}] = 2\pi \delta(\bar{\omega} - (\omega - k_x v_t)) \end{aligned} \quad (29)$$

que pode ser resolvida encontrando primeiro os deslocamentos nas posições dos dispositivos de fixação e adicionando-os depois à expressão como dados conhecidos. Uma vez feito isto, esta expressão é definida no domínio da frequência e do número de onda e, por conseguinte, o seu acoplamento com as funções de Green calculadas utilizando o modelo 2.5D FEM-BEM é concretizado.

5.4. Acoplamento veículo-via (forças de interação dinâmica roda-carril)

Os deslocamentos verticais dos dois carris no domínio da frequência devido às forças de contacto roda/carril podem ser representados por

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{Z}_{r1}^{\omega/r} \\ \mathbf{Z}_{r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{H}_{r1r1}^{\omega/r} & \mathbf{H}_{r1r2}^{\omega/r} \\ \mathbf{H}_{r2r1}^{\omega/r} & \mathbf{H}_{r2r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{r1}^{\omega/r} \\ \mathbf{F}_{r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

em que \mathbf{Z}_{r1} e \mathbf{Z}_{r2} são os deslocamentos verticais dos carris esquerdo e direito, respetivamente; \mathbf{H}_{r1r1} e \mathbf{H}_{r2r2} são as matrizes de recetividade direta dos carris esquerdo e direito, respetivamente; $\mathbf{H}_{r1r2} = \mathbf{H}_{r2r1}$ é a matriz de recetividade cruzada entre os carris esquerdo e direito; \mathbf{F}_{r1} e \mathbf{F}_{r2} são os vetores das forças de interação roda-carril associadas aos carris esquerdo e direito, respetivamente.

A resposta do veículo pode ser escrita como

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{Z}_{v1}^{\omega/r} \\ \mathbf{Z}_{v2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{H}_{v1}^{\omega/r} & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{v2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{r1}^{\omega/r} \\ \mathbf{F}_{r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

em que \mathbf{Z}_{v1} e \mathbf{Z}_{v2} são os deslocamentos verticais das rodas do veículo em contacto com as faixas da esquerda e da direita, respetivamente, \mathbf{H}_{v1} e \mathbf{H}_{v2} são as matrizes de recetividade de cada veículo em todas as posições dos eixos do veículo.

A matriz de recetividade do veículo é obtida através do modelo dinâmico do veículo, que neste estudo é considerado como sendo o modelo de corpo rígido bidimensional (2D), como mostra a Figura 27. Neste caso, a estrutura sobre a via tem dez graus de liberdade, ou seja, seis deslocamentos verticais e três movimentos de rotação. O modelo 3D de cada veículo é constituído por dois modelos 2D desacoplados, aplicados separadamente em cada carril.

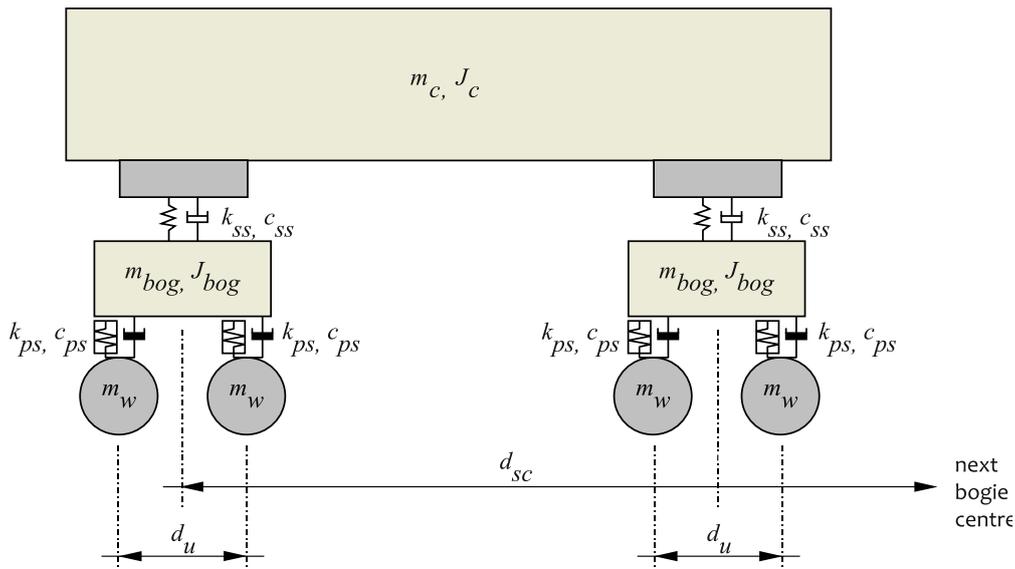


Figura 27 – Modelo teórico do veículo

A equação dinâmica do veículo no sistema de acoplamento pode ser descrita da seguinte forma:

$$[M]_u \{\ddot{a}\}_u + [C]_u \{\dot{a}\}_u + [K]_u \{a\}_u = \{Q\}_u \quad (32)$$

em que $[M]_u$, $[C]_u$ e $[K]_u$ são matrizes de massa, amortecimento e rigidez do veículo, respetivamente.

$$[M]_u = \text{diag}\{M_C J_C M_t J_t M_t J_t M_{w1} M_{w2} M_{w3} M_{w4}\} \quad (33)$$

$$[K]_u = \begin{bmatrix} 2K_{s2} & 0 & -K_{s2} & 0 & -K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2L_2^2 K_{s2} & -L_2 K_{s2} & 0 & L_2 K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2K_{s1} + K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} & -K_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & 2L_1^2 K_{s1} & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} L_1 & K_{s1} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2K_{s1} + K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} & -K_{s1} & 0 \\ & & & 2L_1^2 K_{s1} & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} L_1 & K_{s1} L_1 & 0 \\ & & & & & & & & & K_{s1} \\ & & & & & & & & & & K_{s1} \\ & & & & & & & & & & & K_{s1} \\ & & & & & & & & & & & & K_{s1} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$[C]_u = \begin{bmatrix} 2C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2L_2^2 C_{s2} & -L_2 C_{s2} & 0 & L_2 C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & C_{s1} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} & 0 \\ & & & 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & C_{s1} L_1 & 0 \\ & & & & & & & & & C_{s1} \\ & & & & & & & & & & C_{s1} \\ & & & & & & & & & & & C_{s1} \\ & & & & & & & & & & & & C_{s1} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Tirando partido das equações (33) a (35), pode obter-se as matrizes de recetância do veículo, H_{v1} e H_{v2} .

As equações (30) e (31) podem ser reescritas de forma mais compacta, de acordo com a expressão

$$\mathbf{Z}_r^{w/r} = \mathbf{H}_r^{w/r} \mathbf{F}^{w/r}, \quad \mathbf{Z}_v^{w/r} = -\mathbf{H}_v^{w/r} \mathbf{F}^{w/r} \quad (36)$$

Admitindo um contacto Hertziano linear, as forças de interação roda-carril podem obter-se no domínio da frequência através da expressão

$$\mathbf{F}^{w/r} = k_H (\mathbf{Z}_v^{w/r} - \mathbf{Z}_r^{w/r} + \mathbf{E}_r) \quad (37)$$

em que k_H é a rigidez da mola hertziana linear, considerada igual em todos os contactos roda-carril, e \mathbf{E}_r é o vetor de amplitudes complexas de irregularidades dos carris em todos os pontos de contacto roda-carril.

Combinando-se as equações (36) e (37), pode obter-se uma função de transferência no domínio da frequência entre a rugosidade dos carris e as forças de interação dinâmica roda-carril, que podem ser escritas como:

$$F^{w/r} = k_H \left(H_v^w - H_r^w + k_H^{-1} I \right)^{-1} E_r \quad (38)$$

em que I é a matriz de identidade.

5.5. Transmissão aos edifícios

Finalmente, a última parte do modelo considera a transmissão da energia vibratória do solo aos edifícios existentes nas imediações da infraestrutura ferroviária.

A transmissão de vibrações para o interior dos edifícios ocorre quando a energia vibratória proveniente do solo chega ao edifício e é transmitida através da fundação, perdendo parte da sua energia devido à alteração da impedância do meio, o que se designa por um primeiro estágio de atenuação devido ao acoplamento solo-estrutura. A partir da fundação, as vibrações propagam-se através da estrutura do edifício até aos diferentes pisos do edifício, o que provoca normalmente uma segunda fase de atenuação, e finalmente, em cada piso, a energia vibratória propaga-se através da laje, provocando normalmente uma amplificação dos níveis de vibração no centro da mesma em relação aos das extremidades, que pela configuração estrutural são os pontos mais próximos dos apoios da laje e, portanto, mais rígidos e com menor capacidade de mobilidade e vibração mais limitada.

A *Federal Transit Administration* [4] dos Estados Unidos estabelece valores para cada uma das duas fases de atenuação acima referidas, bem como valores para a amplificação devida à vibração transmitida laje de cada piso, apresentados no que são aqui apresentados nos Quadro 9 e Quadro 10.

Estes valores divergem dos publicados por outros investigadores ou determinados experimentalmente pela equipa técnica que redige este projeto. Além disso, estes valores não têm em conta o conteúdo em frequência da energia vibratória.

Por conseguinte, atendendo ao nível de detalhe, complexidade e precisão do modelo são considerados os espectros experimentais decorrentes de um vasto número de campanhas de caracterização experimentais no domínio da medição e modelação da propagação de vibrações de origem ferroviária para aos edifícios. Os valores de cada um dos fatores de ajuste são discutidos em seguida:

- Acoplamento solo-edifício

Os resultados estatísticos mostram uma diminuição global do nível de vibração no piso térreo do edifício em relação ao nível de vibração ao nível da rua.

- Atenuação vertical

Os resultados estatísticos mostram que o nível de vibração diminui com a altura do edifício, pelo que o piso mais expectável em que exista uma menor atenuação do nível de vibração é o primeiro piso. De qualquer modo, esta variação do nível de vibração do primeiro piso em relação ao nível de vibração do rés do chão é mínima, pelo que, seguindo um critério conservativo, e atendendo ao princípio da prudência se considera uma atenuação nula do nível de vibração entre o rés do chão e o primeiro piso, que será a considerada para a avaliação.

- Amplificação da laje de piso

As lajes dos edifícios (não térreas) têm um efeito de amplificação do nível de vibração. O comportamento do acoplamento solo-edifício e da amplificação da laje em cada piso, função da frequência será diferente consoante o tipo de edifício. Na área em estudo, a maioria dos edifícios pode ser dividida em duas tipologias principais, nomeadamente os que têm uma estrutura de betão e os que têm uma estrutura de paredes estruturais ou de alvenaria portante. Na Figura 28 apresentam-se as funções de resposta dinâmica destas duas tipologias, que incorporam o acoplamento dinâmico solo-edifício e a amplificação da resposta da laje, em que os valores negativos indicam atenuação e os valores positivos indicam amplificação do nível de vibração.

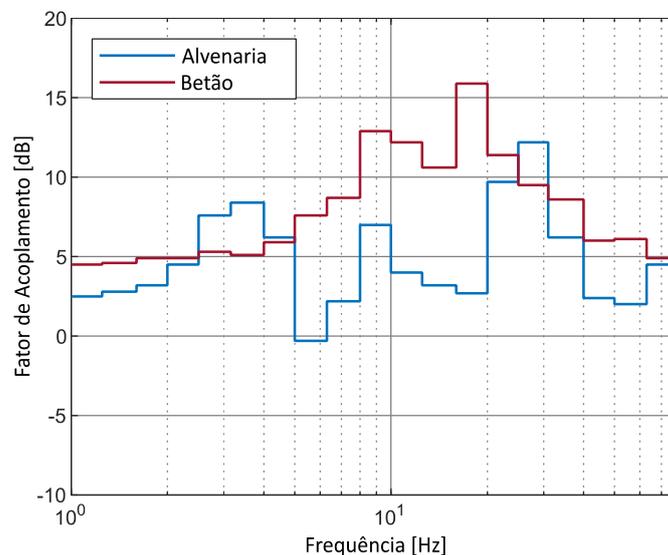
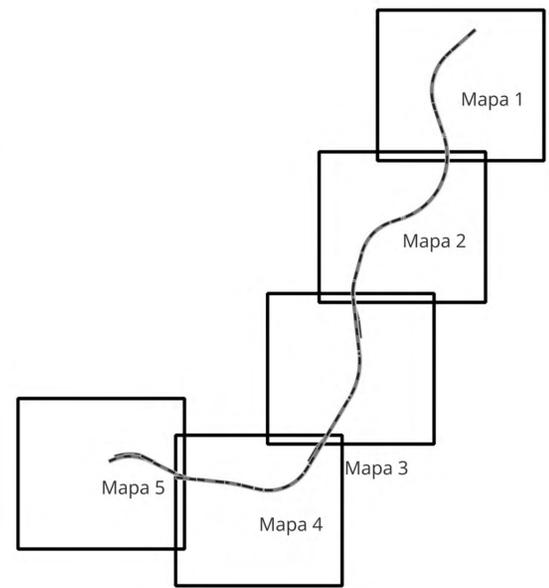


Figura 28 – Funções de resposta dinâmica das duas principais tipologias de edifícios

ANEXO 6 – APRESENTAÇÃO DO RESULTADO DE AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS AOS EDIFÍCIOS



Legenda:

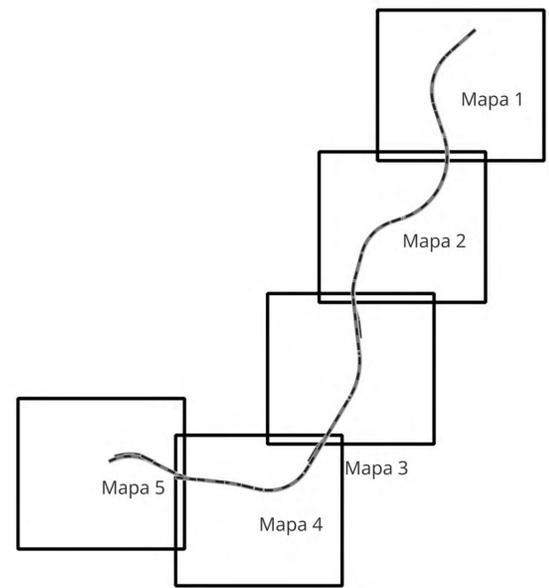
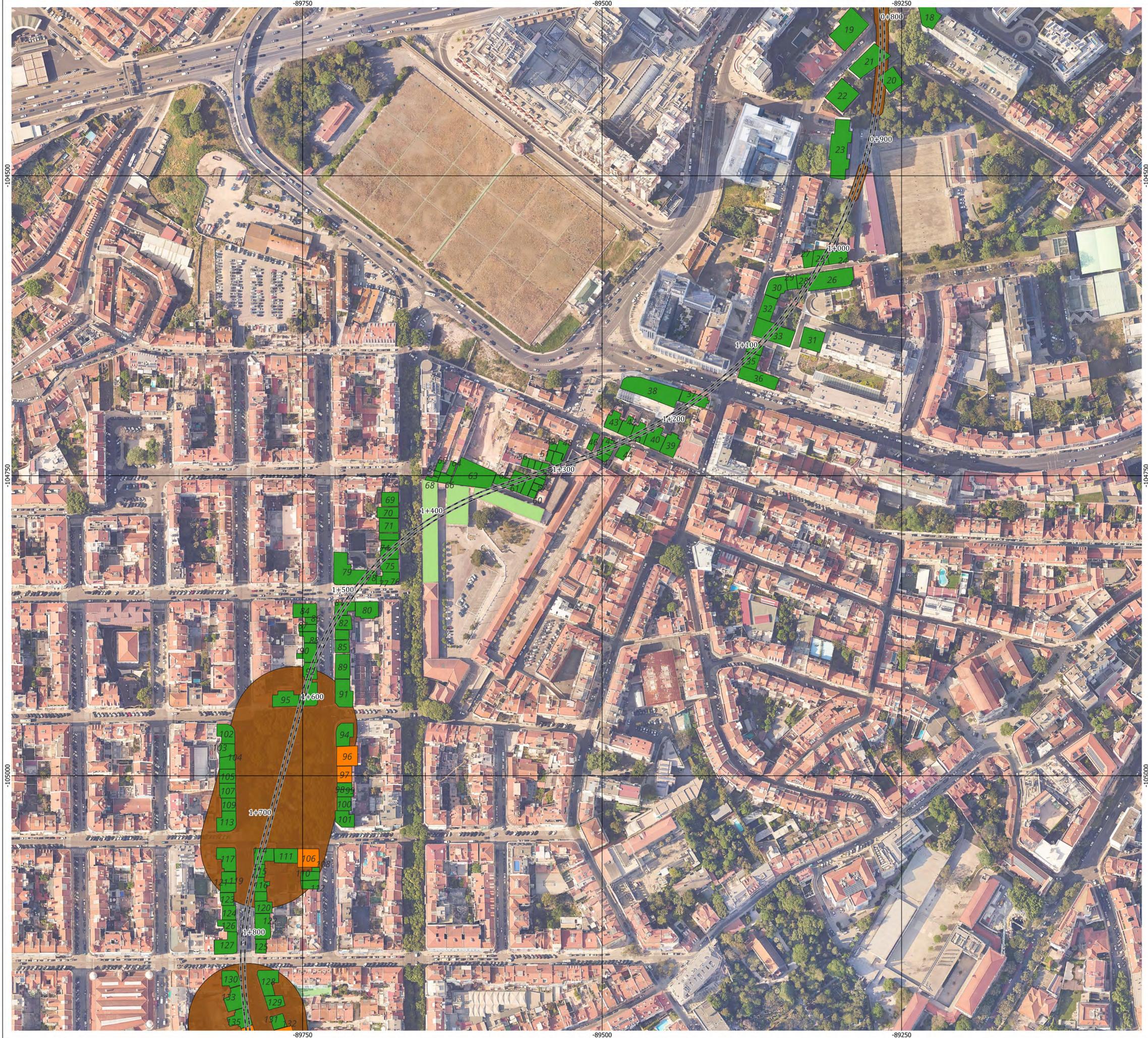
Eixo da Via	—
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
dB(V) < 80.8	■
80.8 < dB(V) < 85.8	■
dB(V) > 85.8	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha 1/5	Desenho Mapa 1
------------	-----------	----------------



Legenda:

Eixo da Via

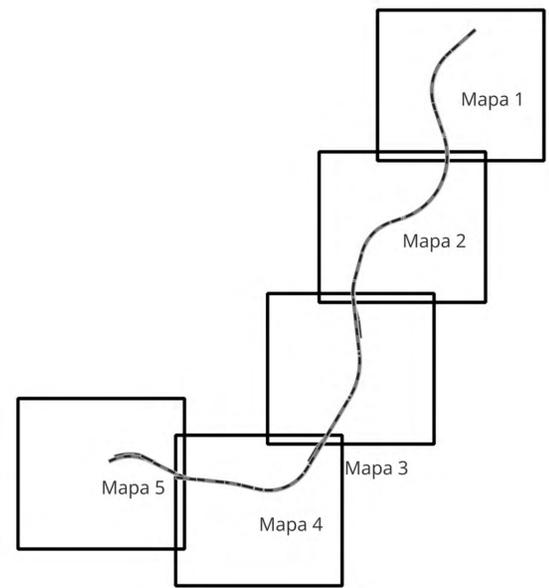
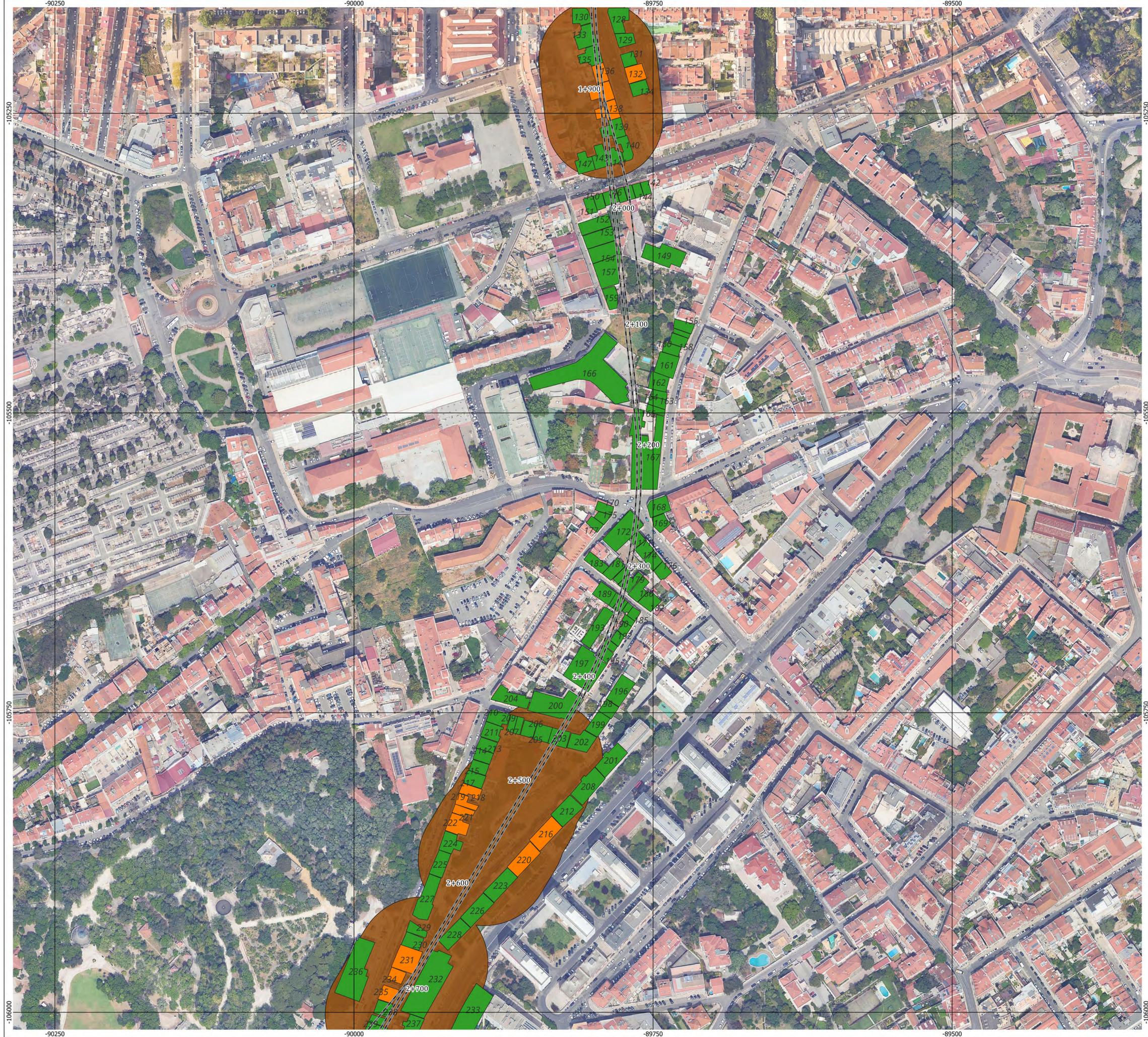
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

dB(V) > 85.8

Logótipos e informação complementar		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	Formato A1 (594x841)
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Escala 0 25 m	
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Folha 2/5	Desenho Mapa 2
27/09/2024		



Legenda:

Eixo da Via

Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios

$dB(V) < 80.8$

$80.8 < dB(V) < 85.8$

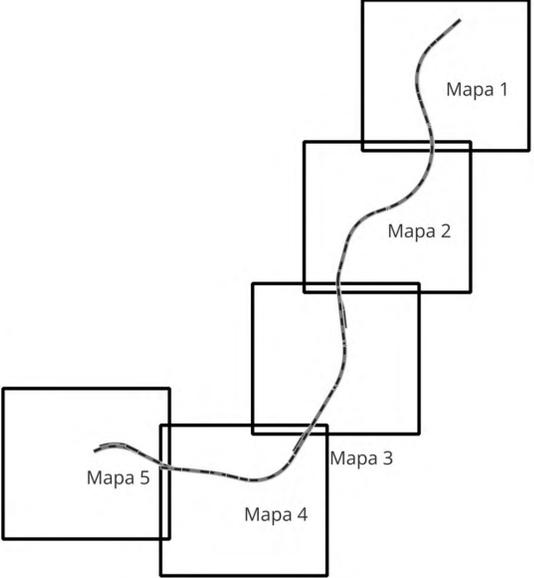
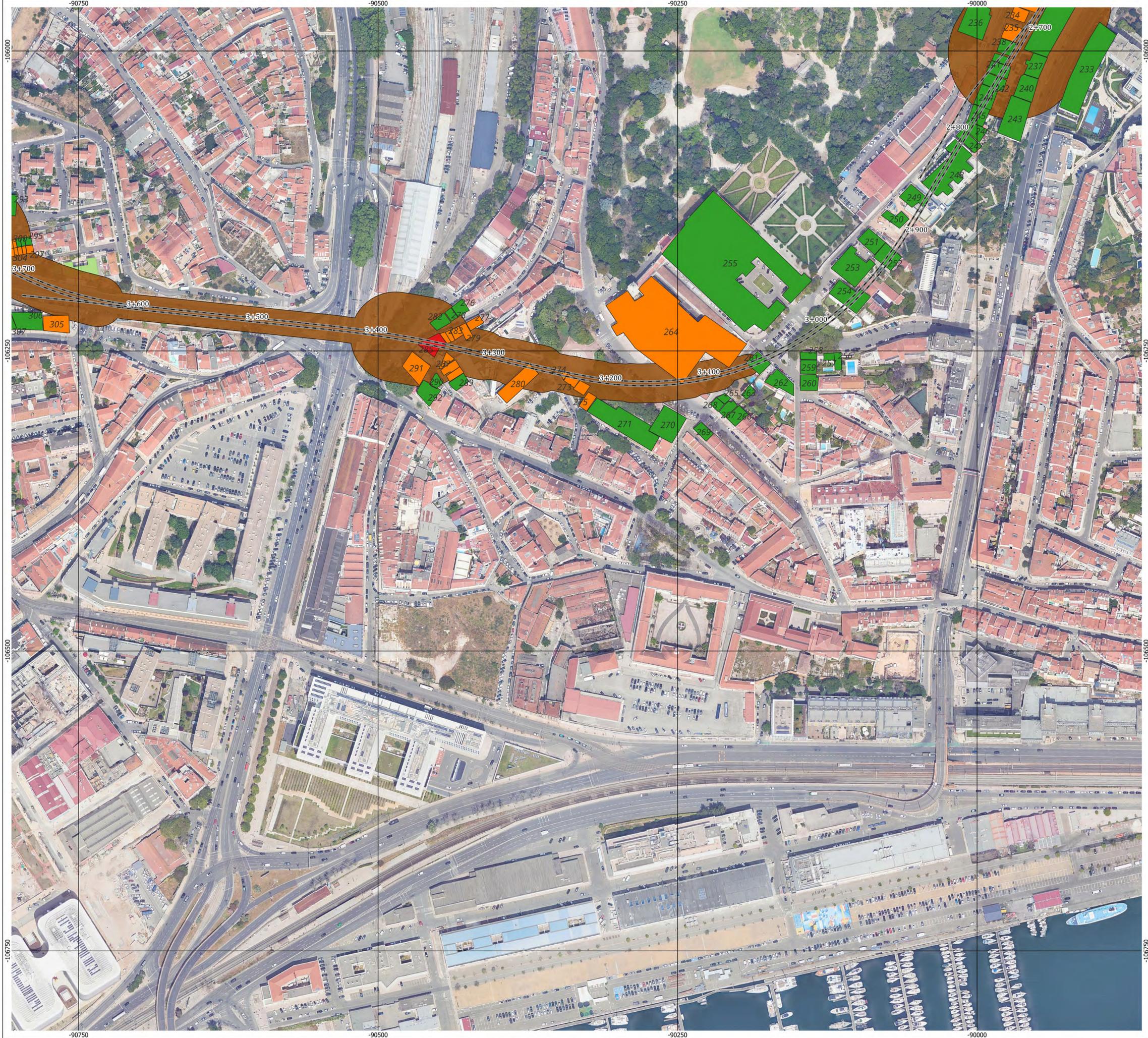
$dB(V) > 85.8$

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>3/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 3</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

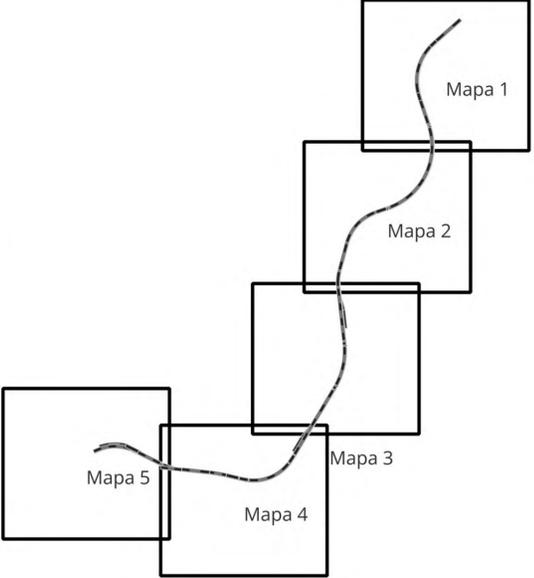
Eixo da Via	—
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
$dB(V) < 80.8$	■
$80.8 < dB(V) < 85.8$	■
$dB(V) > 85.8$	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPDG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (99x641)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	---

27/09/2024	Folha	4/5	Desenho	Mapa 4
------------	-------	-----	---------	--------

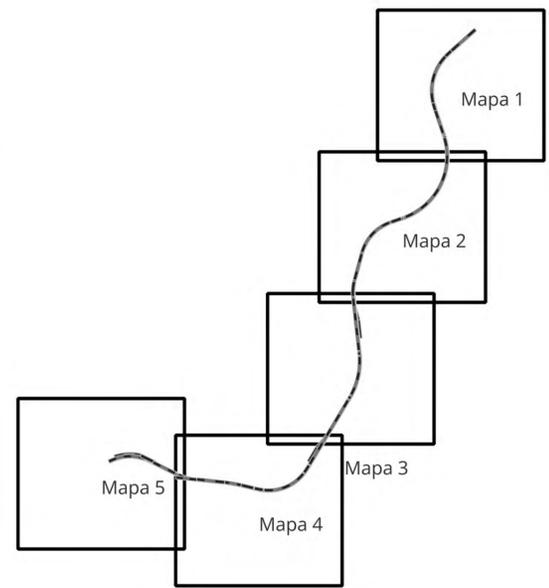


Legenda:

Eixo da Via	
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
dB(V) < 80.8	
80.8 < dB(V) < 85.8	
dB(V) > 85.8	

Logótipos e informação complementar Motoaengil Engenharia, efac, coba, JET, JLCM, SVA, Metropolitano de Lisboa	
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m
27/09/2024	Folha 5/5 Desenho Mapa 5

ANEXO 7 – APRESENTAÇÃO DO RESULTADO DE AVALIAÇÃO DO RUÍDO RE-RADIADO NOS EDIFÍCIOS



Legenda:

Eixo da Via

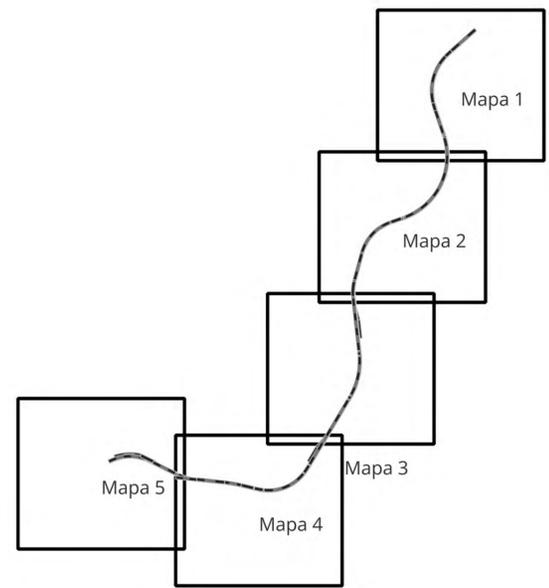
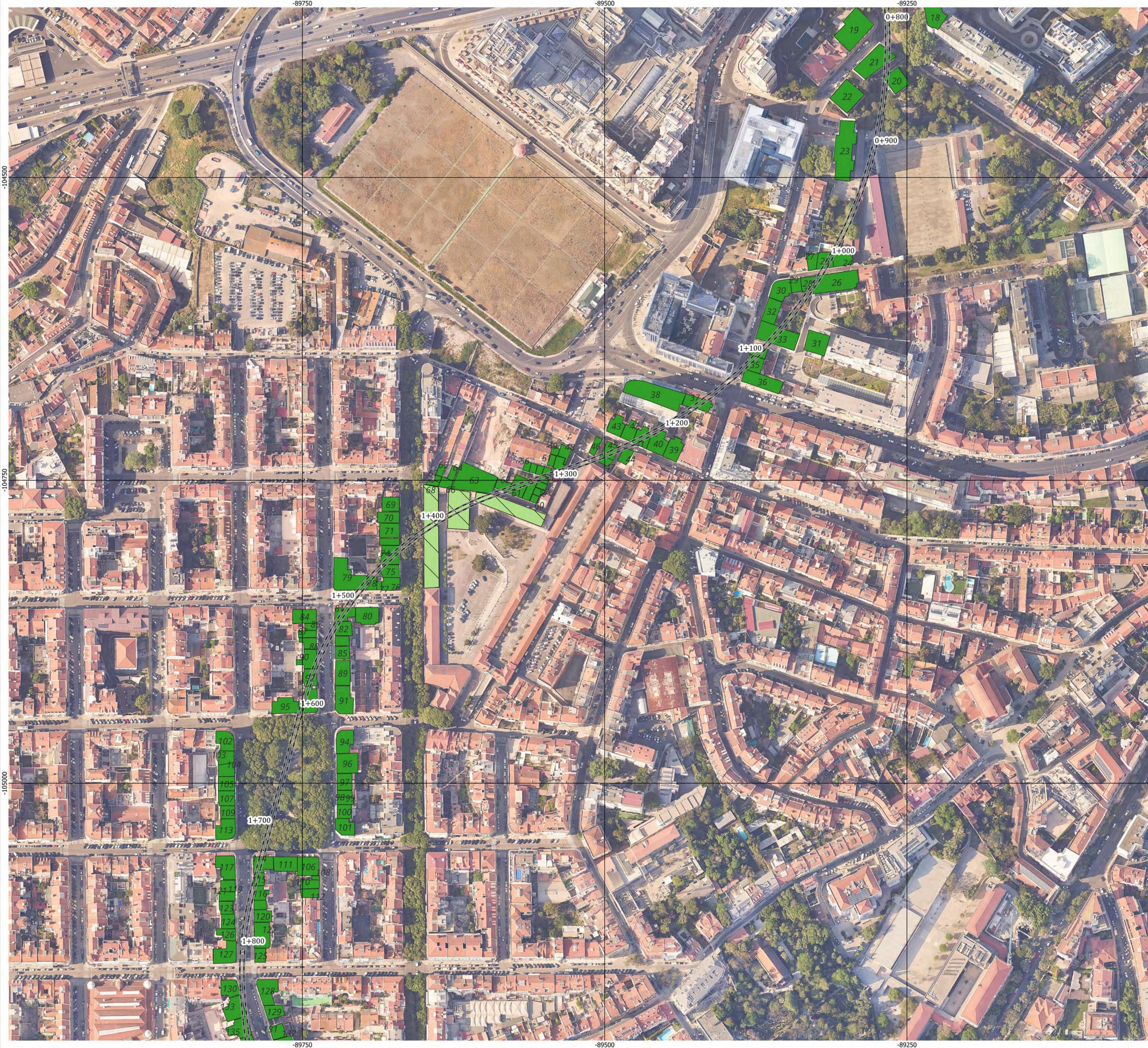
Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar			
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Formato A1 (99x641)	Escala 0 25 m	
27/09/2024	Folha 1/5	Desenho Mapa 1	



Legenda:

Eixo da Via

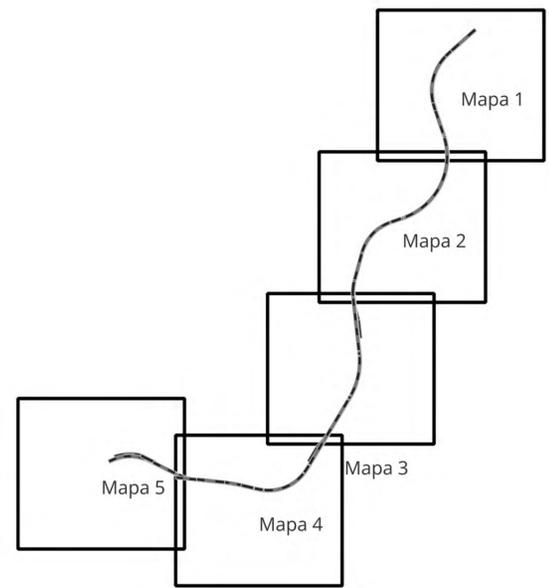
Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar Motoa Engil Engenharia, efcec, coba, JET, JLCM, SVA, Metropolitano de Lisboa		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (594x841)	
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m	
27/09/2024	Folha 2/5 Desenho Mapa 2	



Legenda:

Eixo da Via

Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

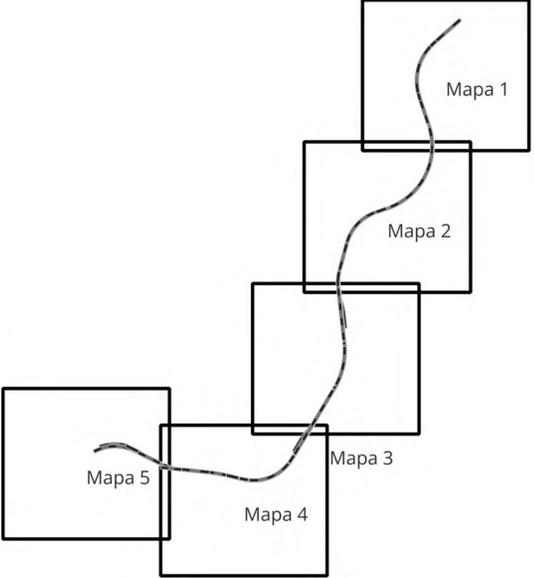
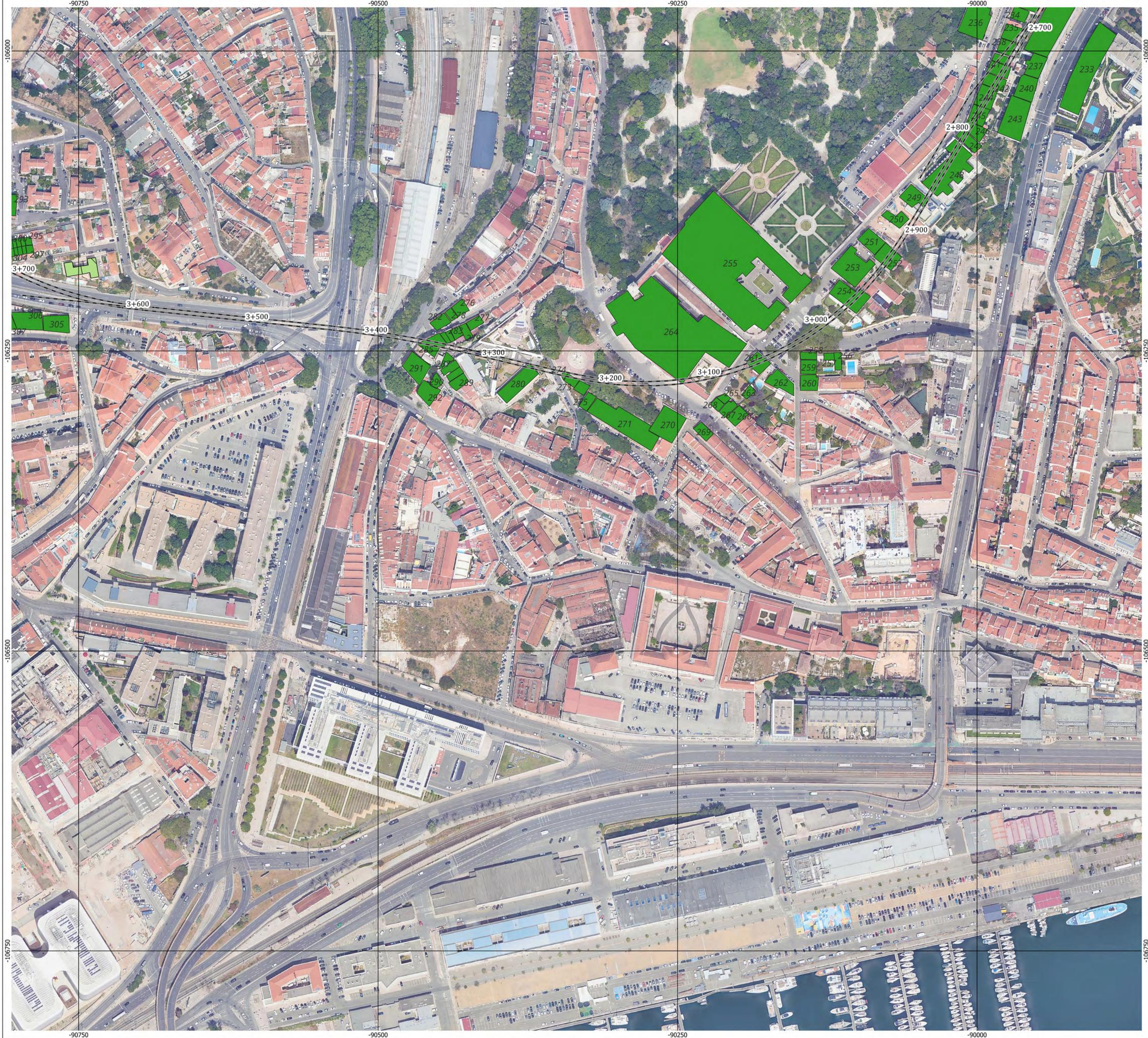
dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	--	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>3/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 3</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

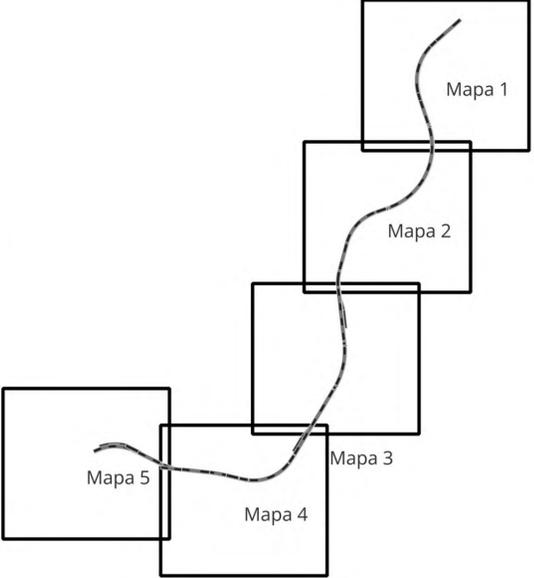
Eixo da Via	—
Avaliação do nível de vibração nos edifícios	
dB(V) < 80.8	■
80.8 < dB(V) < 85.8	■
dB(V) > 95.8	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha 4/5	Desenho Mapa 4
------------	-----------	----------------



Legenda:

Eixo da Via	—
Avaliação do nível de vibração nos edifícios dB(V) < 80.8	■
80.8 < dB(V) < 85.8	■
dB(V) > 95.8	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha 5/5	Desenho Mapa 5
------------	-----------	----------------

BIBLIOGRAFIA

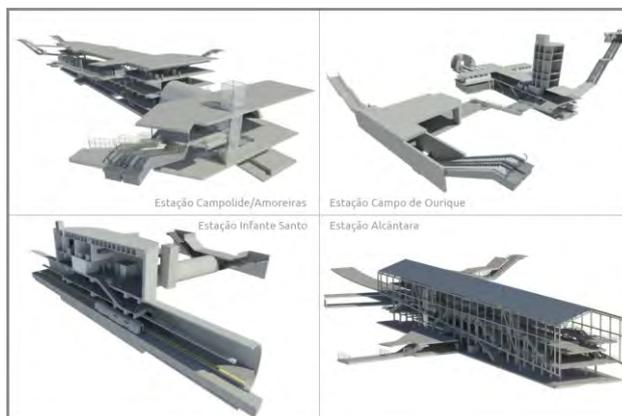
- [1] I. Standard, *ISO2631-2: Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure*, 2003.
- [2] I. P. d. Qualidade, *NP2074(2015) - Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas*, 2015.
- [3] “REQUISITO TÉCNICO RT 1001,” 2022.
- [4] A. a. A. M. a. B. E. a. R. C. a. M. L. a. S. H. Quagliata, “Transit noise and vibration impact assessment manual,” Federal Transit Administration , USA, 2018.
- [5] F. R. A. C. Paulo Candeias, “PLANO DE EXPANSÃO DO METROPOLITANO DE LISBOA – PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA: TRECHO S. SEBASTIÃO A ALCÂNTARA (PK 0+0 AO PK 3+230),” LISBOA, 2022.
- [6] P. C. P. F. M. C. R. & C. A. Lopes, “Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings.,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. 61, pp. 269-285, 2014.
- [7] O. Inácio, “TOMO II – GERAL, PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA ENTRE S. SEBASTIÃO E ALCÂNTARA, DO METROPOLITANO DE LISBOA E.P.E.,” 2022.
- [8] J. a. H. H. Forrest, “A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration,” *Journal of sound and vibration*, vol. 294, no. 4-5, pp. 678-705, 2006.
- [9] W. ZHAI, “Vehicle–Track Coupled Dynamics Theory and Applications,” *Science Press Beijing* , 2020.

METRO DE LISBOA

PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA ENTRE SÃO SEBASTIÃO E ALCÂNTARA

EMPREITADA DE CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO

PROJETO DE EXECUÇÃO



ESTUDO VIBRAÇÕES

MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

Documento SAP:	
-----------------------	--

	Nome	Assinatura	Data
Elaborado	Paulo Soares		2024-10-03
Revisto	Rui Ribeiro		2024-10-03
Verificado	Vitor Rosão		2024-10-03
Coordenador Projeto			
Aprovado			

	Nome	Assinatura	Data
			2024-10-03

Índice

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	ÂMBITO E OBJETIVO	4
1.2	ELEMENTOS ANALISADOS.....	4
2	ENQUADRAMENTO LEGAL E REGULAMENTAR.....	4
2.1	VIBRAÇÕES	4
2.2	RUÍDO RE-RADIADO	5
3	ESTUDO PRELIMINAR VIBRAÇÕES.....	6
3.1	DESCRIÇÃO METODOLÓGICA.....	6
3.2	CURVA BASE DE VIBRAÇÕES	6
3.3	FATORES CORRETIVOS	8
3.4	ANÁLISE.....	8
3.4.1	Considerações iniciais	8
3.4.2	Processo Metodológico	10
3.5	Pressupostos de Análise	10
3.6	CONCLUSÕES	11
4	ESTUDO NUMÉRICO DEDICADO.....	13
4.1	DESCRIÇÃO GERAL	13
4.1.1	Tipo de Via.....	13
4.1.2	Caraterização do Material Circulante.....	14
4.1.3	Caracterização Geológica e Geotécnica do Terreno	16
4.1.4	Seleção das Secções Transversais de Cálculo.....	16
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	17
4.2.1	Previsão de Vibrações	17
	Secção 1 (Pk 0+600)	18
4.2.1.1	Secção 2 (Pk 1+700)	22
4.2.1.2	Secção 3 (Pk 2+100)	25
4.2.1.3	Secção 4 (Pk 3+200)	28
4.2.2	Análise Global Interpolada	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	32

Anexo 1 - Método Analítico Determinação Vibrações.....	34
Anexo 2 – Pressupostos Análise do estudo preliminar vibrações.....	38
Anexo 3 – Listagem de Edifícios	42
Anexo 4 – Identificação das Zonas Potencialmente Críticas e dos Edifícios Afetados: Análise Preliminar	52
Anexo 5 - Método 2.5 FEM-BEM.....	58
Anexo 6 – Apresentação do Resultado de Avaliação das Vibrações Induzidas aos Edifícios.....	68
Anexo 7 – Apresentação do Resultado de Avaliação do Ruído Re-radiado nos edifícios	74
Bibliografia	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO E OBJETIVO

Neste documento avaliam-se as vibrações e ruído re-radiado nos recetores, localizados nas imediações da futura linha vermelha, devido à passagem de tráfego ferroviário ligeiro (metro) na futura via férrea que decorrerá do prolongamento da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa EPE - Prolongamento S. Sebastião II / Alcântara.

Tem como objetivo apresentar a análise prospetiva das vibrações e ruído re-radiado decorrentes da passagem do metro, avaliadas nos edifícios existentes na envolvente próxima ao novo traçado. Para tal, a análise efetuada considerou dois níveis distinto de pormenor, detalhe e precisão das previsões.

1.2 ELEMENTOS ANALISADOS

Para a elaboração do estudo foram fornecidos diversos elementos, peças desenhadas e escritas. Complementarmente, foram analisadas as documentações processuais e os estudos elaborados. Assinalam-se as referências dos documentos e respetivas datas de receção de informação:

- Traçado (CAD), 2024/07/11;
- CEJ-ANX_II.1-Doc-GuiaVibracoes_LNEC, 2024/07/11;
- CEJ-ANX_II.1-Doc-GuiaVibracoes_LNEC_errata, 2024/07/11;
- RT 1001_Via Férrea Retificado, 2024/07/11;
- Relatório 290/2022 – DE/NESDE, 2024/08/08;
- PD-20240902T080736Z-001, 2024/08/30.

2 ENQUADRAMENTO LEGAL E REGULAMENTAR

2.1 VIBRAÇÕES

O fenómeno associado a uma exposição continua às vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário pode ter consequências negativas na saúde dos ocupantes ou utilizadores dos edifícios afetados. Estes impactos podem acarretar elevados prejuízos económicos e sociais, sendo muito relevante o seu estudo. A sua perceção bem como a severidade das suas consequências está altamente dependente da gama de reposta em frequência.

A problemática das vibrações induzidas está normalmente associada a um intervalo de frequências compreendido entre 1 e 80 Hz, [1]. Para esta gama de frequências, as vibrações transmitidas aos edifícios, localizados nas imediações das infraestruturas ferroviárias, podem ser percecionadas pelos seus ocupantes sob a forma de uma vibração mecânica. Uma vez que a exposição prolongada pode causar incomodidade e, em última instância problemas de saúde, existe, a nível internacional, regulamentação e normalização concreta.

Em Portugal não existe atualmente legislação que limite o nível máximo de vibração, induzido às edificações pela passagem de tráfego ferroviário. Como critérios majorantes têm sido usadas as notas técnicas do LNEC que estabelecem os níveis máximos recomendáveis a que podem estar sujeitos os ocupantes das habitações, em função da resposta do ser humano. Deve referir-se a existência de uma norma portuguesa, [2], cujo seu propósito passa pela “Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas”, mas que não tem aplicabilidade no estudo de vibrações induzidas por tráfego ferroviário.

Os critérios de incomodidade propostos pelo LNEC consistem na limitação do valor eficaz de velocidade de vibração atendendo à perceção de vibrações no interior dos edifícios, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Incomodidade: Valores Limite da Velocidade Eficaz da Vibração no Local

V_{ef} [mm/s]	L_v [dB(V)] $V_{ref}=1 \times 10^{-8}$ [m/s]	Sensação
$V_{ef} \leq 0,11$	$L_v \leq 80,8$	Nenhuma
$0,11 < V_{ef} \leq 0,30$	$80,8 < L_v \leq 89,5$	Perceptível, suportável para curta duração
$0,30 < V_{ef} \leq 1,10$	$89,5 < L_v \leq 100,8$	Evidente, afetando as condições de trabalho
$V_{ef} > 1,10$	$L_v > 100,8$	Muito perceptível, dificultando ou impedindo o trabalho

Os valores eficazes de velocidade de vibração são válidos para as componentes vertical e horizontal, quando esta seja preponderante.

2.2 RUÍDO RE-RADIADO

O ruído re-radiado surge como consequência das vibrações transmitidas aos elementos dos edifícios, paredes, lajes e tetos. A vibração destes elementos, origina um ruído que pode ser percecionado pelos ocupantes do edifício, designado ruído re-radiado ou estrutural.

Foi estabelecido como critério de avaliação que o ruído no interior dos compartimentos, salas e quartos, devido a cada passagem de material circulante, fosse inferior ou igual a 22 dB(A). O critério baseia-se no valor eficaz da componente de vibração, entre os 16 e os 200 Hz:

$$0,30 < V_{ef} (16 \text{ Hz} \leq f \leq 200 \text{ Hz}) \leq 0,02 \text{ mm/s} \quad (1)$$

Este valor limite é considerado para as situações mais desfavoráveis, nas quais o índice de redução de propagação das vibrações às lajes e paredes circundantes é muito baixo e a transmissão entre elementos é elevada.

3 ESTUDO PRELIMINAR VIBRAÇÕES

3.1 DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

Nesta primeira fase é realizado um estudo preliminar das vibrações induzidas com o objetivo de caracterizar as grandes manchas e respetivas zonas críticas, com potencial de ocorrência de problemas de perceção das vibrações induzidas pela passagem do tráfego ferroviário.

O estudo preliminar de vibrações tem por base a metodologia generalizada proposta pela FRA [2] que sistematiza o Procedimento de Avaliação de Vibrações. Esta metodologia tem como base uma curva de vibração avaliada à superfície do solo, resultante da análise de um conjunto extenso de medições. A curva está normalizada para um determinado conjunto de considerações que podem ser adaptadas ao caso em estudo, através de fatores corretivos preconizados na metodologia.

A curva base de vibração, avaliada à superfície do solo, é função da distância à fonte de vibração. Os múltiplos fatores corretivos estão relacionados com o tipo de via, a velocidade de circulação do material circulante, as condições de manutenção da via e dos rodados (material circulante), o tipo de edificação existente e a sua posição da via relativamente ao terreno. Os fatores corretivos mencionados são apresentados no Anexo 1 do presente documento.

3.2 CURVA BASE DE VIBRAÇÕES

A curva base de vibração avaliada para metropolitano e corrigida da velocidade de circulação de 70 km/h é apresentada na Figura 1.

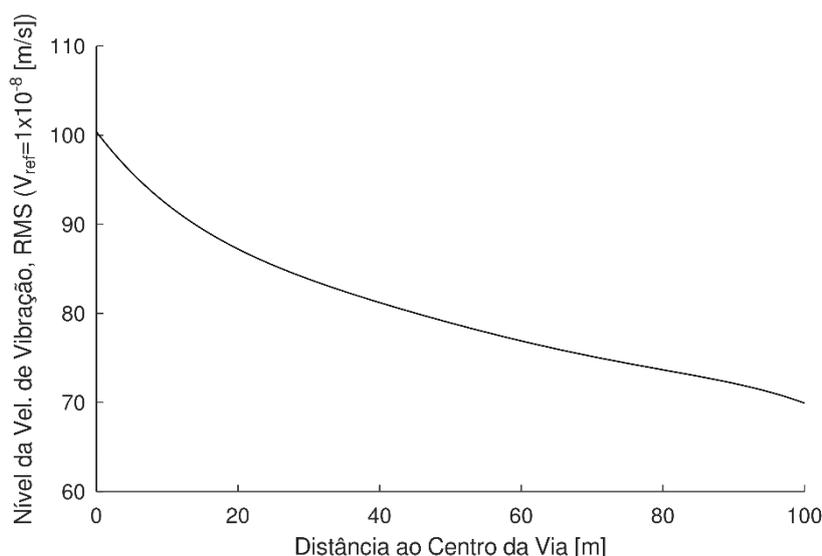


Figura 1 – Curva base de vibração, para uma velocidade de referência de 70 km/h

A curva mencionada representa os níveis típicos de vibração à superfície do solo considerando a passagem de um comboio ligeiro a 70 km/h bem como, boas condições de manutenção da via e dos rodados. Os níveis de vibração são ajustados para considerar, por exemplo, uma diferente

velocidade de circulação, existência de equipamentos e/ou condições geológicas distintas das condições de referência assumidas. A curva apresentada foi baseada em diversas medições realizadas e devidamente documentadas no manual da FRA.

Para além dos casos de via à superfície, esta metodologia é aplicável também para casos de via em viaduto ou em túnel. Deve ser sinalizado o facto de existir uma elevada ocorrência de queixas para situações de via em túnel, que podem dever-se ao seguinte conjunto de fatores:

- Os túneis podem estar mais próximos dos recetores, em diversas ocasiões diretamente sob estes;
- Existir um maior número de recetores próximos da via, designadamente em meios densamente urbanizados;
- O ruído aéreo, para vias à superfície, ser normalmente mais incomodativo do que as vibrações induzidas.

Deve, todavia, ser ressalvado que, apesar dos níveis gerais de vibração induzidos pelo tráfego ferroviário que circula em túnel ou à superfície serem semelhantes, existem diferenças nos respetivos espectros de vibração em frequência. A vibração transmitida aquando da circulação em túnel tende a ter um conteúdo em frequências mais altas do que quando é considerada a circulação à superfície. Este fenómeno deve-se ao facto da problemática do ruído re-radiado poder ser mais pronunciada no caso da circulação em túnel.

Dado o grau de incerteza e as limitações da metodologia, têm de ser consideradas algumas diretrizes:

- Sempre que o valor corrigido do nível de vibração estiver abaixo do limite de impacto preconizado é improvável que existam impactos decorrentes das vibrações induzidas avaliadas no recetor;
- Quando o nível de vibração avaliado no recetor for superior ao limite de referência / recomendado até um máximo de 5 dB, existe uma hipótese significativa (pelo menos 50 por cento) de que os níveis reais de vibração, percecionados no local, estejam abaixo do limite considerado. Estes casos são assinalados e identificados, como casos que potencialmente excedem o limite preconizado e serão alvo de avaliação mais detalhada e pormenorizada numa fase subsequente de estudo de vibrações induzidas. Os estudos referidos permitem aferir com maior grau de certeza o cumprimento/incumprimento dos limites e para prever ou adequar as medidas mitigadoras em consonância;
- Para os valores de vibração previstos no recetor que excedam em mais de 5 dB o limite considerado, assume-se que existe uma elevada probabilidade de se verificar o incumprimento dos níveis de vibração máximos admissíveis, sendo necessário para esses casos, a especificação de medidas de mitigação adicionais no projeto em estudo.

Aquando da análise desta problemática pode atender-se à sua categorização em três subdomínios. Um dos subdomínios compreende a fonte, outro o caminho de propagação e por último o recetor. A metodologia da FRA apresenta uma série de fatores corretivos, para cada um dos subdomínios mencionados, por forma a atender às suas particularidades e especificidades e aproximar a previsão da metodologia analítica do valor real esperado. Os fatores corretivos são aplicados à curva base de vibração induzida na superfície do terreno.

Quanto à fonte, existe uma curva base para cada tipo de transporte e um fator corretivo para adequar a velocidade de projeto à velocidade de referência da curva base.

No que ao caminho de propagação diz respeito, podem existir condições geológico-geotécnicas que conduzam a fenómenos propagação eficiente de vibrações, havendo, por essa razão, um agravamento das vibrações percecionadas nos recetores. Nestes casos podem ser verificados elevados níveis de vibração a distâncias duas ou três vezes maiores que a distância em condições de normal propagação. Quando existe uma redução da profundidade da rocha-mãe, desencadeia-se um processo de aprisionamento da energia no estrato superior, evidenciando-se uma amplificação das vibrações nos recetores. Nestes casos, o estrato rochoso funciona como uma superfície refletora, redirecionando as ondas incidentes na interface para o estrato superior.

Por outro lado, no recetor, o tipo de solução estrutural do edificado, incluindo detalhes de dimensão e massa, e distância à via são alguns dos fatores que impactam significativamente os níveis de vibração percecionados em cada um deles.

3.3 FATORES CORRETIVOS

Dado que os níveis de vibração, determinados através da curva representada na Figura 1, partem de pressupostos iniciais, tais como a fonte e o caminho de propagação de referência, é necessário proceder à aplicação de fatores corretivos para ajustar os resultados a cada caso particular. A aplicabilidade destes pressupostos, permite determinar os níveis de vibração expectáveis, num determinado recetor, tendo em conta as características da fonte, do caminho de propagação e do recetor.

A avaliação do nível de vibração expectável em cada um dos recetores potencialmente afetados, decorre da soma algébrica de todos os fatores corretivos aplicáveis ao valor da curva base, correspondente à distância do edifício ao centro da via, de acordo com os valores apresentados no Anexo 1.

3.4 ANÁLISE

3.4.1 Considerações iniciais

O troço em estudo compreende os pontos quilométricos 0+000 e 4+098, com início na Rua Marquês de Fronteira e com ponto terminal junto ao Instituto Superior de Agronomia, na cidade de Lisboa. Na Figura 2 é apresentada a representação do eixo da via da futura linha sobre imagem de satélite.



Figura 2 – Localização em planta da diretriz da linha em projeto (Fonte: Google Earth, 13-08-2024)

Na primeira etapa do estudo foi feito um levantamento de todos os pontos de interesse onde se denotavam variações significativas com impacto nos valores de vibrações induzidas relativamente distintos. São exemplo destes pontos de interesse, os locais em que existia uma alteração do tipo de via (à superfície, em viaduto ou em profundidade) ou das condições geotécnicas, entre outras.

Na Figura 1 encontra-se representado o perfil longitudinal do projeto em análise entre os PK 0+000 e 4+098, bem como os pontos notáveis identificados (totalizando 22).

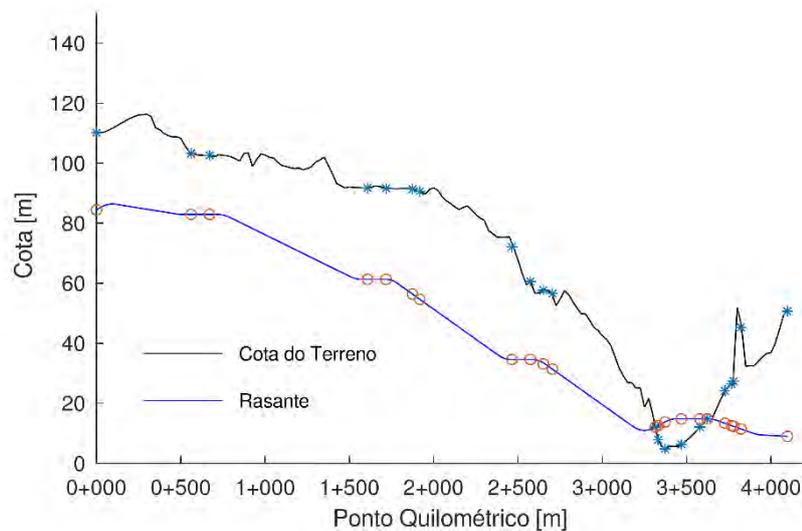


Figura 3 – Perfil Transversal do projeto com representação da rasante, do terreno e dos pontos notáveis com correspondência no terreno, *, e na rasante ‘o’

3.4.2 Processo Metodológico

O primeiro passo para a aplicabilidade da metodologia passa pela identificação e levantamento de todos os pontos ao longo do eixo da via. De seguida, procede-se à análise dos níveis de vibração corrigidos na superfície do solo. Nesta fase é possível determinar o corredor de impacto de vibrações avaliado em condição de campo livre, na superfície do solo. O corredor de impacto é devidamente corrigido para atender às especificidades do projeto, nomeadamente da fonte e do caminho de propagação. A determinação do corredor de impacto permite-nos, de uma forma relativamente expedita, mas sistemática, identificar todos os recetores contidos no seu domínio e que são dessa forma identificados como potencialmente afetados.

O passo seguinte, passa pela identificação e catalogação de todos os recetores potencialmente impactados, pela circulação de tráfego no futuro prolongamento da linha vermelha e posterior previsão dos seus níveis de vibração. A avaliação do cumprimento ou incumprimento dos níveis máximos de vibração no recetor, permite-nos identificar as zonas críticas.

3.5 Pressupostos de Análise

Atendendo ao princípio da prudência foi considerado que existem condições de propagação eficiente de vibrações sempre que a estrutura ferroviária se encontra em túnel, dada a probabilidade de existência de um maior número de recetores na proximidade da linha. Desta forma, a definição dos níveis de vibração é realizada com um maior grau de segurança.

Os pressupostos de cálculo considerados, atendendo aos pontos notáveis do traçado são apresentados Quadro 11 do Anexo 2.

No Anexo 3 – Listagem de Edifícios é apresentado o conjunto de todos os edifícios localizados no corredor de impacto de vibrações que são potencialmente afetados, de acordo com o explicado anteriormente. Para cada edifício, foi feito o levantamento da sua localização relativamente ao ponto quilométrico da linha mais próximo, a sua distância horizontal ao eixo da linha e o número de pisos a cima do solo.

Foi considerada a informação das propriedades geológico-geotécnica constantes do documento 290/2022 – DE/NESDE, para identificar os edifícios que se localizavam em zonas com características rochosas, para os quais foi considerada uma condição de propagação eficiente. Para além das condições geotécnicas de fundação dos edifícios, considera-se também a sua tipologia de fundação e dimensão.

O critério de impacto recomendado pelo LNEC, não contempla o tipo de uso dos recetores, por essa razão esta informação não consta do processo de catalogação.

Os resultados obtidos, para a avaliação das vibrações nos recetores são apresentados nos anexos do presente relatório, designadamente no Anexo 4 – Identificação das Zonas Potencialmente Críticas e dos Edifícios Afetados: Análise Preliminar .

Para a análise e catalogação dos edifícios afetados foram considerados quatro grupos distintos, de acordo com os níveis de vibração. Enumeram-se os grupos considerados:

- $dB(V) \leq 80,8$ correspondente ao limite de referência preconizado pelo LNEC ($V_{ef} \leq 0,11$);
- $80,8 < dB(V) \leq 85,8$ valor superior ao limite de referência até 5 dB(V),
- $dB(V) > 85,8$ os que excedem em mais de 5 dB(V) o limite de referência;

- Edifícios previstos para demolição.

Os resultados obtidos, para a avaliação das vibrações em condições de superfície livre, são apresentados na Figura 4. Nas zonas assinaladas verifica-se a probabilidade de ocorrência de níveis de vibração superiores ao limite preconizado pelo LNEC, $V_{ef} \leq 0,11$ mm/s.

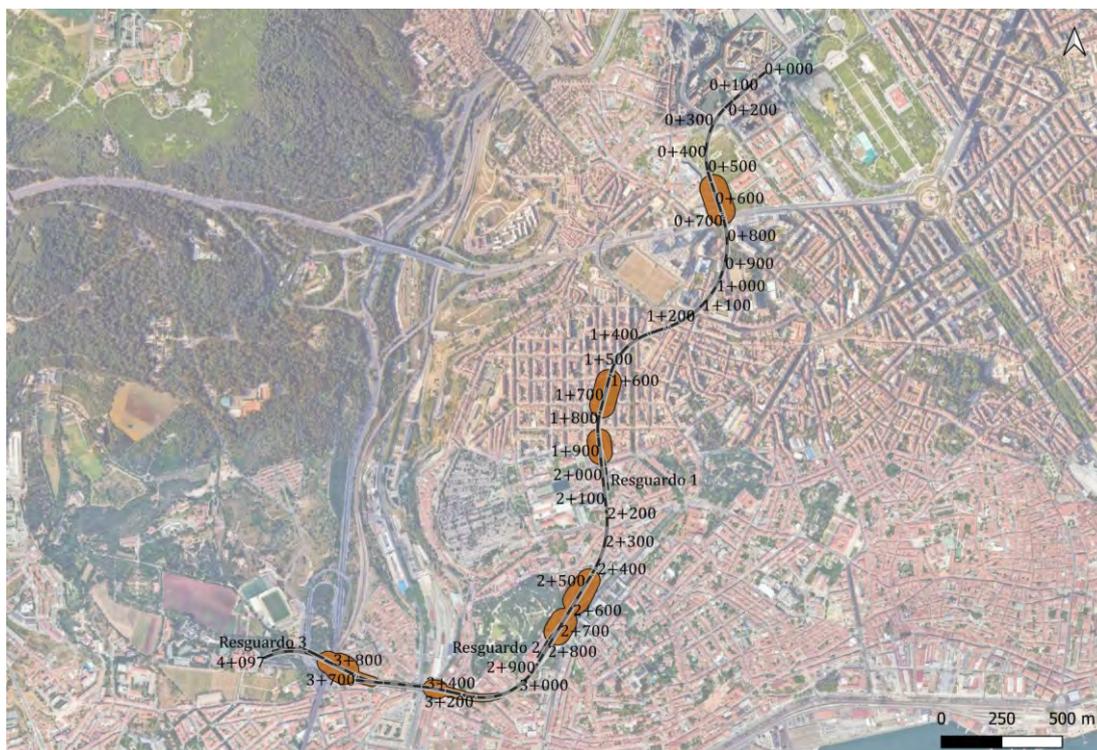


Figura 4 – Localização em planta da diretriz e das zonas potencialmente críticas identificadas (abordagem FRA)

Foram identificadas através da metodologia de análise generalizada as seguintes secções potencialmente críticas:

Vias principais:

- PK 0+550 ao PK 0+720;
- PK 1+600 ao PK 1+750;
- PK 1+820 ao PK 1+980;
- PK 2+500 ao PK 2+750;
- PK 3+050 ao PK 3+400;
- PK 3+650 ao PK 3+750.

3.6 CONCLUSÕES

A representação em planta das zonas potencialmente críticas e onde poderão existir problemas de vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário no futuro prolongamento da linha vermelha são identificadas no Anexo 4 – Identificação das Zonas Potencialmente Críticas e dos Edifícios Afetados: Análise Preliminar.

Os resultados são apresentados para cada edifício tendo em conta uma codificação específica e a representação por escala de cores do nível de vibração previsto (verde, amarelo, vermelho e cinzento).

A categorização dos edifícios é feita tendo em conta as diretrizes da metodologia proposta:

- Valor obtido inferior ao limite preconizado: improvável que existam impactos decorrentes das vibrações induzidas e avaliadas no recetor;
- valor superior ao limite preconizado, até um máximo de 5 dB: existe uma probabilidade significativa (pelo menos 50%) de que os níveis reais de vibração, perçecionados no local, estejam abaixo do limite considerado. Estes casos são assinalados e identificados e devem ser alvo de avaliação mais detalhada e pormenorizada;
- Valores excedem em mais de 5 dB o limite preconizado: elevada probabilidade de incumprimento dos níveis de vibração máximos admissíveis, sendo necessário para esses casos, a especificação de medidas de mitigação adicionais no projeto em estudo, sendo alvo de avaliação mais detalhada e pormenorizada.

Os edifícios identificados que excedem até 5 dB(V) ficam sujeitos a posterior avaliação e validação das conclusões, tirando partido do uso de metodologias mais avançadas que permitam determinar os níveis de vibração de forma mais precisa e com um maior grau de confiança.

Os edifícios onde o nível de vibração avaliado exceda em mais de 5 dB(V) carecem de preconização de medidas mitigadoras de vibrações induzidas.

Finalmente, importa referir que, representam-se por norma os edifícios que serão alvo de demolição. No entanto, não foi possível obter essa informação em tempo útil, aquando da realização da análise preliminar, estando por isso omissa.

4 ESTUDO NUMÉRICO DEDICADO

4.1 DESCRIÇÃO GERAL

Nesta secção é desenvolvido e apresentado o estudo numérico das vibrações e ruído re-radiado da linha de metro que resultará do prolongamento da linha vermelha entre S. Sebastião e Alcântara.

Ao longo dos pontos subsequentes são apresentados os pressupostos de cálculo, as considerações e parâmetros geométricos e mecânicos dos diferentes subsistemas do problema em análise.

4.1.1 Tipo de Via

No requisito técnico, RT 1001 [3] são preconizados sete tipos de via:

- Via Tipo 1 – Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em túnel Via Dupla;
- Via Tipo 2 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Estação (Amoreiras/Campo de Ourique e Infante Santo);
- Via Tipo 3 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Túnel sobre manta antivibrática;
- Via Tipo 4 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Viaduto;
- Via Tipo 5 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA na estação Alcântara;
- Via Tipo 6 - Via betonada sobre blocos de betão e fixação NABLA em Túnel Via Tripla;
- SEV - Secção Especial de Via constituída por Aparelhos de via isolados ou integrados numa mesma “secção” de via.

Para as vias consideradas, a solução passa por utilizar uma via betonada sobre blocos de betão, corresponde a uma solução de bloco de betão com pantufa (tipo LVT *Sonneville*), espaçados de 0,75m. Atendendo ao tipo de sistema, referência e peças desenhadas, foi estimado um valor de massa correspondente a cada bloco de 105 kg.

Considera-se a existência de uma pantufa sob o bloco de betão e uma palmilha sob o carril. No documento RT1001 [3] é feita referência à rigidez estática estimada para o sistema de via (travessa e pantufa) de 25 kN/mm. Quanto à rigidez dinâmica da pantufa, foi considerado o valor de 31,2 kN/mm.

Devido à limitação imposta de deformação máxima do carril, considerou-se a palmilha sob o carril com um nível de rigidez mais elevado, correspondendo a uma rigidez estática de 150 kN/mm e dinâmica de 225 kN/mm.

O carril apresenta um perfil 50 E6, cujo peso linear é de 50kg/m. Na simulação numérica foi considerado um nível médio de manutenção do carril, correspondente à Classe 3, de acordo com a metodologia de categorização proposta pela FRA [4]. Apesar dos níveis de manutenção do Metro Lisboa limitarem a irregularidade vertical máxima a 0,3mm/m, correspondente a uma Classe 4, considerou-se, atendendo ao princípio da prudência, um perfil de irregularidades mais exigente.

Na Via Tipo 3 acresce, às características descritas anteriormente, a existência de uma manta antivibrática. No documento RT 1001 [3] é referido que o sistema global (manta + pantufa) deve

conferir uma atenuação de 25dB para a frequência de 50 Hz. Uma vez que a atenuação é altamente dependente das especificidades do sistema, procedeu-se ao estudo e avaliação das vibrações induzidas no recetor considerando uma solução tipo, tendo por base a sua rigidez. Considerou-se um módulo de rigidez estática de $0,0036 \text{ N/mm}^3$ e de rigidez dinâmica de $0,0095 \text{ N/mm}^3$ e uma espessura de 37,5mm.

As diferentes soluções de via estão distribuídas ao longo da via que se pretende construir, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Distribuição dos tipos de via ao longo dos pontos quilométricos

Pontos quilométricos, (Pk)		Tipo de Via
Início	Fim	
0+000	0+560	Tipo 1
0+560	0+665	Tipo 2
0+665	1+620	Tipo 1
1+620	1+725	Tipo 2
1+725	1+900	Tipo 1
1+900	1+943,743	SEV 1/CO
1+943,743	2+085	Tipo 6
2+085	2+470	Tipo 1
2+470	2+575	Tipo 2
2+575	2+680	Tipo 1
2+680	2+723,743	SEV 1/IS
2+723,743	2+865	Tipo 6
2+865	3+020	Tipo 1
3+020	3+240	Tipo 3
3+240	3+310	Tipo 1
3+310	3+465	Tipo 4
3+465	3+585	Tipo 5
3+585	3+735	Tipo 3
3+735	3+765	SEV 1/AC
3+765	3+808,743	SEV 3/AC
3+808,743	4+097	Tipo 6

4.1.2 Caraterização do Material Circulante

As composições do Metro Lisboa são constituídas por unidades motoras e de reboque, designadas ML90-Motora e ML90-Reboque, respetivamente. O material circulante é constituído

por duas composições alternadas, de acordo com a informação indicada como referência, LNEC [5].

A geometria do material circulante, bem como a distribuição de cargas por eixo é apresentada na Figura 5.

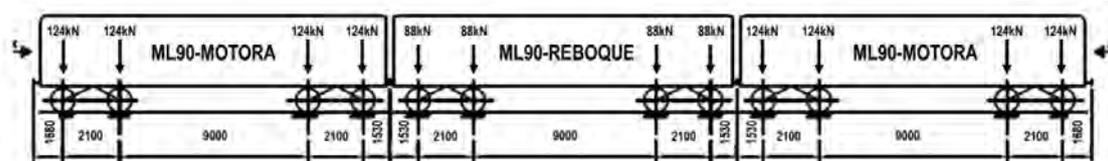


Figura 5 – Geometria e distribuição das cargas por eixo do material circulante da linha em estudo, distâncias em mm (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Atendendo ao facto do material circulante ser constituído por duas composições alternadas, cada veículo apresenta a seguinte configuração: (MT90+MR90+MT90) + (MT90+MR90+MT90). Para efeitos de estudo, considera-se uma velocidade constante de circulação em toda a linha correspondente a 70km/h.

As características geométricas e mecânicas do material circulante, indicadas pela entidade Metro Lisboa e que constam no documento do LNEC [5], são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Características geométricas e mecânicas das composições dos comboios ML90 fornecidas pelo ML (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Caraterísticas geométricas e mecânicas	MT90 Motora	ML90 Reboque	Descrição
$2L_c$ [m]	11,1	11,1	Distância entre pontos de apoio da caixa
$2L_b$ [m]	2,1	2,1	Distância entre pontos de apoio dos eixos as Bogies
M_c [10^3 kg]	16,9	15	Massa da caixa
M_b [10^3 kg]	13,7	7,9	Massa dos Bogies
M_r [10^3 kg]	1,3	1,1	Massa dos eixos c/ rodas
J_c [10^3 kg·m ²]	1159,3	822,8	Momento polar de inércia da caixa
J_b [10^3 kg·m ²]	5,5	3,4	Momento polar de inércia dos Bogies
K_s [kN/m]	192,5	192,5	Rigidez vertical do sistema de suspensão primário
C_s [kN·s/m]	10	10	Amortecimento viscoso do sistema das suspensões primário
K_p [kN/m]	1350	1350	Rigidez vertical do sistema de suspensão secundário
C_p [kN·s/m]	11,7	11,7	Amortecimento viscoso do sistema das suspensões secundário

4.1.3 Caracterização Geológica e Geotécnica do Terreno

A caracterização geológica do terreno ao longo da futura linha de metro consta no documento do LNEC [5], designadamente no Anexo I - Caracterização geológica do terreno de implantação da via e definição de perfis geotécnicos. Foram identificados sete perfis geológicos, Geo_01 a Geo_07, representados na Figura 6.

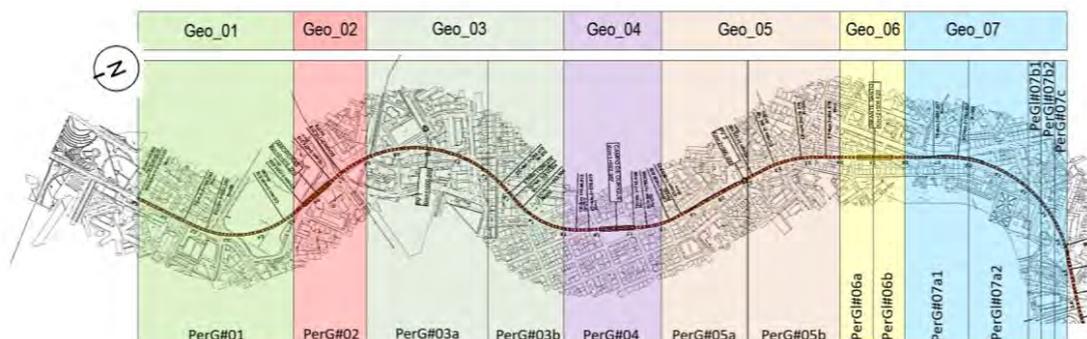


Figura 6 – Perfis geológicos característicos ao longo do traçado da linha (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

4.1.4 Seleção das Secções Transversais de Cálculo

O processo de seleção das diferentes secções de cálculo atendeu a um método de análise de escolha multicritério. Os fatores em consideração foram:

- Os resultados da análise preliminar, com a identificação das zonas potencialmente críticas e para as quais é recomendado, segundo proposta da FRA [4], a realização de estudos numéricos mais aprofundados;
- Os diferentes tipos de via;
- O diferente número de perfis geológicos;
- A variação da profundidade do túnel;
- O tempo disponível (Nota: uma vez que o tempo de cálculo destas metodologias é muito elevado, limitando o número de simulações atendendo possíveis atendendo à janela temporal disponível para a elaboração deste trabalho).

Atendendo aos fatores supramencionados, foram escolhidas 4 secções transversais de cálculo, que atendendo à sua localização e especificidade, se revelam mais significativas para a análise das vibrações e ruído re-radiado da linha de metro em estudo.

Foram consideradas as seguintes secções:

- Secção 1, PK 0+600;
- Secção 2, PK 1+700;
- Secção 3, PK 2+100;
- Secção 4, PK 3+200.

4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A indução de vibrações devido à passagem de tráfego ferroviário é um problema dinâmico bastante complexo. O sistema global pode ser segmentado, tal como fora mencionado anteriormente, em três subsistemas: a fonte, onde são geradas as vibrações; o caminho de propagação, meio onde se propagam as vibrações geradas, até serem transmitidas aos edifícios; e o recetor, onde serão percecionadas as vibrações. O estudo deste fenómeno, pode ter por base uma abordagem:

- Acoplada, em que é considerada a influência mútua que cada um dos subsistemas tem na resposta do outro. Ou seja, o comportamento dinâmico do sistema é estudado de forma global;
- Desacoplada, a determinação das vibrações induzidas é tratada de forma separada para cada um dos subsistemas. Após a determinação das vibrações na fronteira de um dos modelos correspondente a um subdomínio, aplicam-se na fronteira do subdomínio adjacente, não tendo em conta a interação entre ambos.

Existem vantagens e desvantagens em ambas as abordagens, sendo a abordagem acoplada a mais realista e precisa, mas ao mesmo tempo a mais demorada e com maior esforço computacional. Enquanto que a abordagem desacoplada é mais rápida e simples, mas menos precisa e menos realista, por não considerar as interações dinâmicas entre os diferentes domínios.

A análise apresentada neste capítulo recorrendo a um modelo híbrido 2.5D FEM-BEM, descrito passo a passo no Anexo 5 - Método 2.5 FEM-BEM.

O modelo 2.5D tira partido da condição particular de invariância longitudinal da infraestrutura ferroviária, possibilitando dessa forma ter em conta a tridimensionalidade do problema de geração e propagação de vibrações considerando apenas a modelação bidimensional do problema para diferentes números de onda.

4.2.1 Previsão de Vibrações

Em seguida apresentam-se os resultados das previsões de vibrações induzidas à superfície do solo, tendo por base o modelo numérico 2.5D FEM-BEM. Após serem determinadas as curvas de vibração na superfície para as diferentes distâncias horizontais ao eixo do túnel, são calculados os níveis de vibração dentro de dois edifícios tipo, considerando a interação dinâmica solo-edifício.

Os resultados e pressupostos de cada uma das secções de cálculo são apresentados em seguida.

Secção 1 (Pk 0+600)

A secção 1, localizada no ponto quilométrico 0+600 apresenta uma estratificação de acordo com a Figura 7.

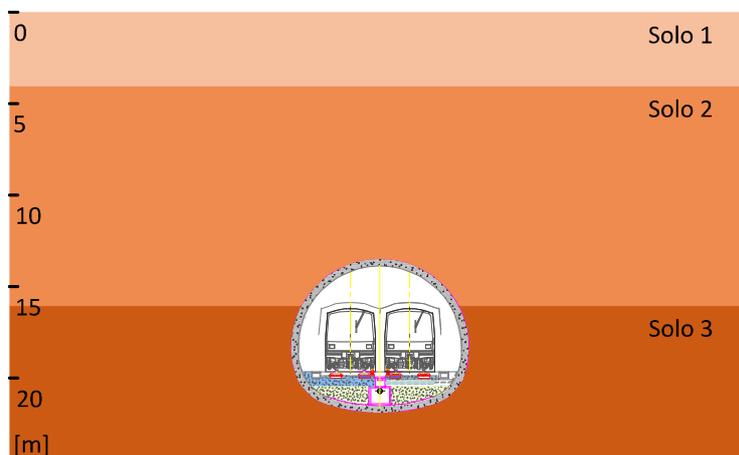


Figura 7 – Representação do perfil geológico da secção 1 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos constam do Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 1 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 1	710	290	1600	0,40
Solo 2	1396	570	2150	0,30
Solo 3	1960	800	2700	0,23

Na Figura 8 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

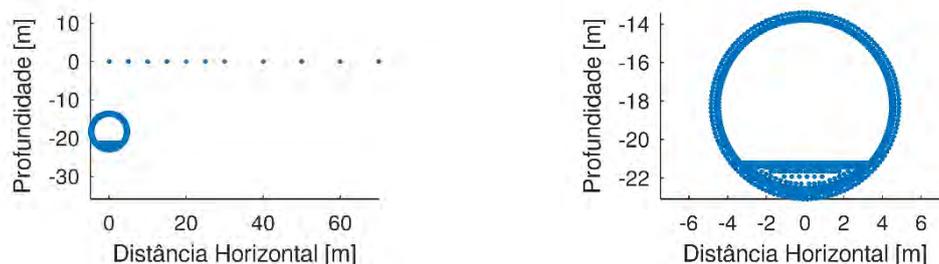


Figura 8 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A abordagem de cálculo permite determinar os níveis de vibração induzidos na superfície do solo, devido à passagem de tráfego ferroviário no túnel.

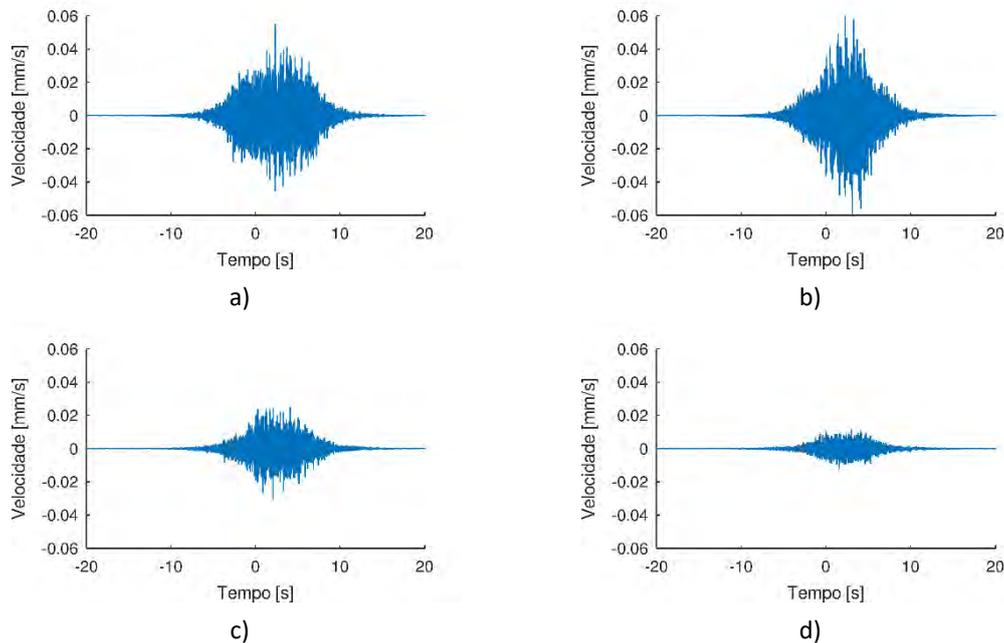


Figura 9 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 1 (Pk 0+600)

A transmissão de vibrações aos edifícios ocorre quando a energia de vibração que se transmite através do solo alcança as fundações dos edifícios. A interação dinâmica solo-edifício apresenta uma influência muito significativa nas vibrações transmitidas às edificações.

A interação dinâmica resulta da existência de uma interface entre os dois domínios, havendo uma alteração do campo de ondas incidente, onde parte da energia é transmitida ao edifício, através das suas fundações, e parte é refletida novamente para o domínio do solo. As vibrações transmitidas ao edifício propagam-se desde as fundações, através da estrutura até aos diferentes pisos e elementos estruturais, paredes, lajes e tetos. Aquando da transmissão de vibrações, piso a piso, ocorre uma atenuação das vibrações, resultante da dissipação e espalhamento das vibrações (amortecimento material e geométrico).

Deve, no entanto, salientar-se que existe normalmente uma amplificação dos níveis de vibração nas lajes, particularmente no centro, quando comparados com as extremidades. A menor vibração das lajes, junto dos contornos, deve-se essencialmente à proximidade aos apoios estruturais, existindo por isso uma maior rigidez local.

A modelação deste problema, de interação dinâmica, é exigente e bastante complexa, sendo por essa razão utilizada uma abordagem híbrida que resulta do uso de modelação numérica e de funções de transferência experimentais (Anexo 5 - Método 2.5 FEM-BEM), obtidas através de um elevado número de caracterizações experimentais de edifícios. São consideradas duas funções de transferência para dois tipos de edifícios, estrutura leve e pesada.

Na Figura 10 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel (Distância=0m).

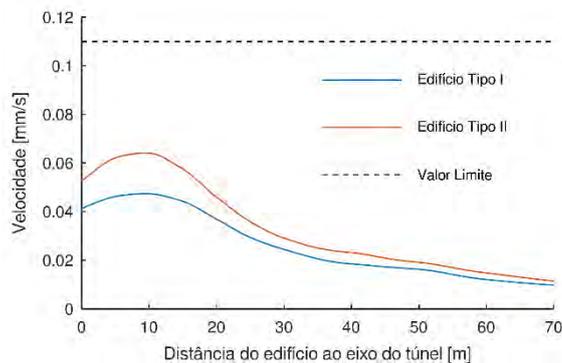


Figura 10 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 1 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

Da análise da Figura 10 é possível constatar o cumprimento do limite preconizado do nível global de vibração, avaliado para cada um dos tipos de edifícios posicionados a diferentes distâncias do eixo do túnel. Considera-se então não existir um problema de perceção de vibrações nos edifícios localizados nesta secção. Evidencia-se o facto de existir uma amplificação da resposta aquando do afastamento ao eixo do túnel, e não imediatamente sobre este. Este fenómeno encontra-se descrito na literatura [6], sendo totalmente expectável.

A análise das vibrações deve atender, para além do valor global de vibração eficaz, ao seu espectro de resposta em frequência. O espectro de resposta em frequência permite identificar as frequências para as quais ocorrem ressonâncias, ou seja, onde a vibração é amplificada significativamente, e as frequências para as quais a resposta da estrutura é atenuada.

Todas as estruturas possuem frequências naturais de vibração, nas quais a energia vibratória é amplificada. Se uma vibração, como a originada por tráfego ferroviário, apresentar um espectro de vibração induzida com frequências coincidentes com essas frequências naturais, podem ocorrer amplificações dos níveis de vibração para essas bandas de frequência, comprometendo o conforto dos ocupantes e em última instância a integridade estrutural dos edifícios.

A consideração do espectro em frequência é especialmente importante para salvaguardar a ocorrência de ruído re-radiado. A sua limitação para um dado intervalo, salvaguarda a emissão de ruído re-radiado, por garantir que a energia de vibração dos elementos não é suficiente para desencadear o fenómeno de forma a que este seja perceptível. Certas frequências podem ser particularmente desconfortáveis para os ocupantes dos edifícios.

Na Figura 11 são apresentados os espectros de resposta para quatro localizações do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{ef} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído re-radiado pelos elementos do edifício.

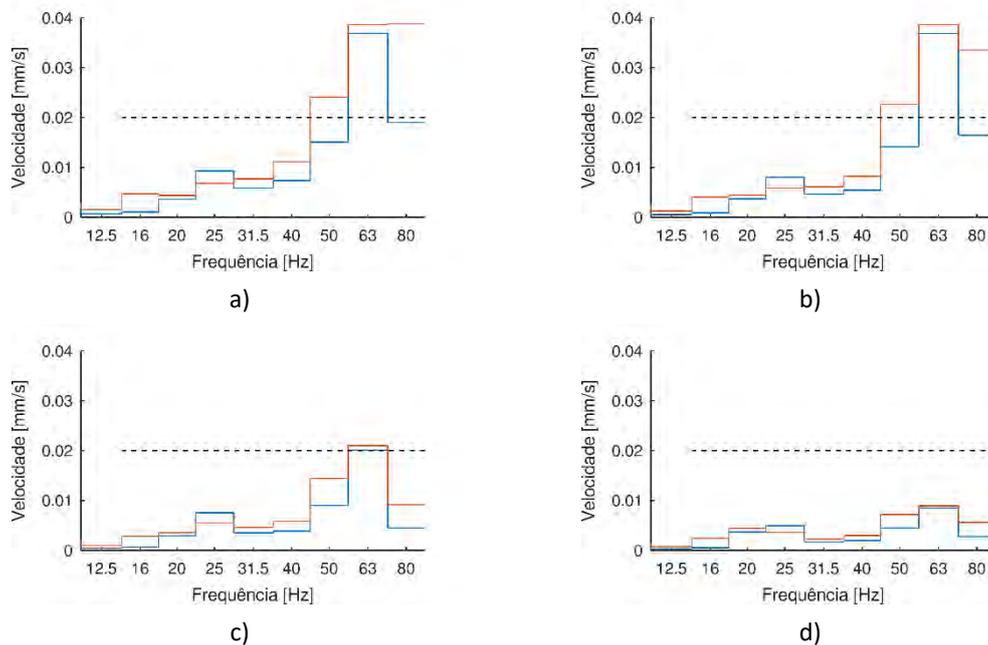


Figura 11 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 1 (Pk 0+600)

Da análise espectral da resposta dos dois edifícios tipo resulta o incumprimento do valor de vibração eficaz (que garante a não emissão de ruído re-radiado) para os casos a) e b). Para uma distância de 30 metros, verifica-se para a banda de 1/3 de oitava com a frequência central 63 Hz, um valor muito próximo do limite preconizado, estando, mesmo assim, em situação de incumprimento. No caso d) verifica-se o cumprimento do valor limite para todas as frequências analisadas.

4.2.1.1 Secção 2 (Pk 1+700)

A secção 2, localizada no ponto quilométrico 1+700 apresenta uma estratificação geotécnica de acordo com a Figura 12.

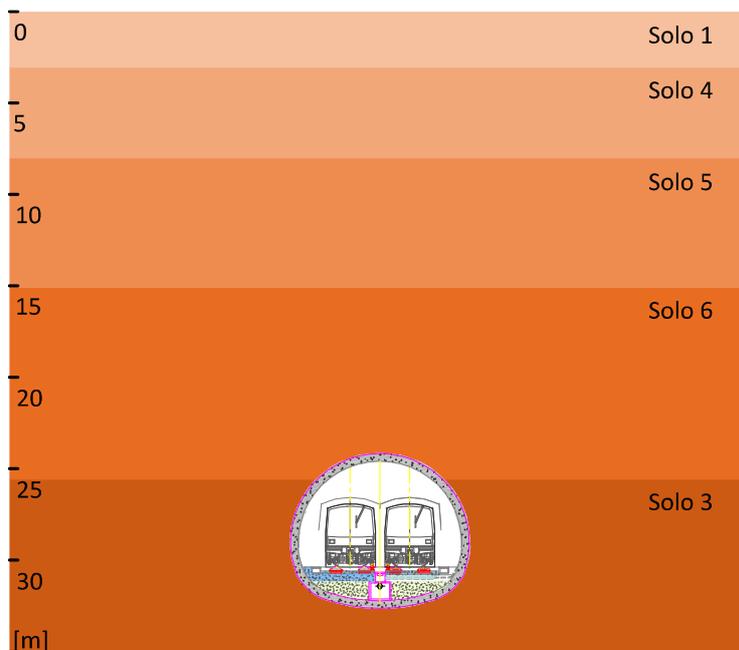


Figura 12 – Representação do perfil geológico da secção 2 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos do perfil de estratificação da secção 2 constam do Quadro 5.

Quadro 5 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 2 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 1	710	290	1600	0,40
Solo 3	1960	800	2700	0,23
Solo 4	955	390	2000	0,30
Solo 5	1531	625	2200	0,27
Solo 6	1923	785	2500	0,30

Na Figura 13 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

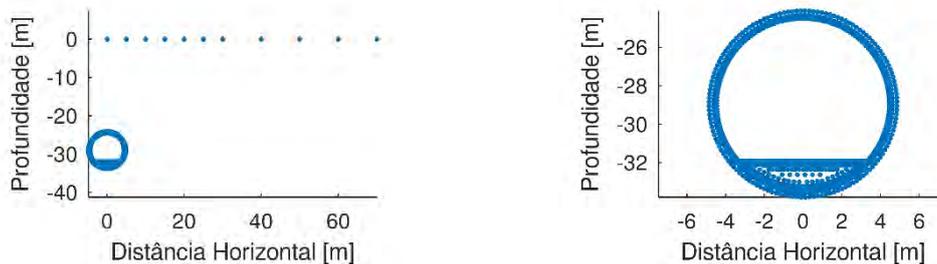


Figura 13 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A abordagem de cálculo permite determinar os níveis de vibração induzidos na superfície do solo, devido à passagem de tráfego ferroviário no túnel, para diferentes pontos de avaliação localizados na superfície do solo.

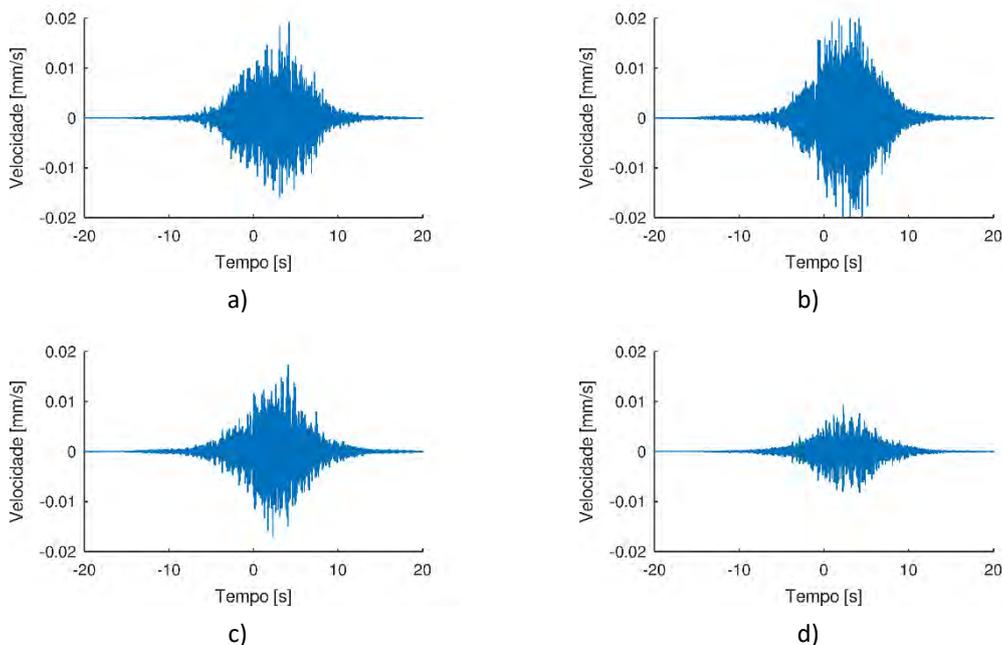


Figura 14 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 2 (Pk 1+700)

Na Figura 15 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel (Distância=0m).

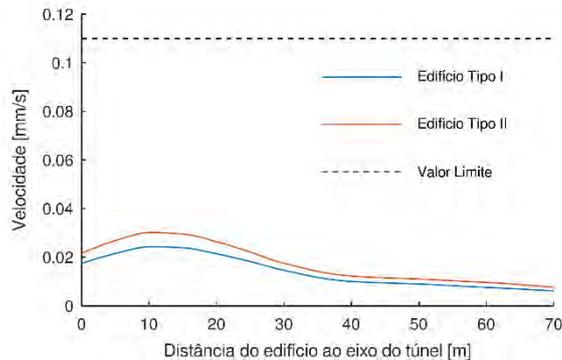


Figura 15 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 2 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

As curvas de velocidade de vibração eficaz avaliadas para os edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite das vibrações induzidas para as diferentes distâncias

Na Figura 16 são apresentados os espectros de resposta para quatro localizações do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{er} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído radiado pelos elementos do edifício.

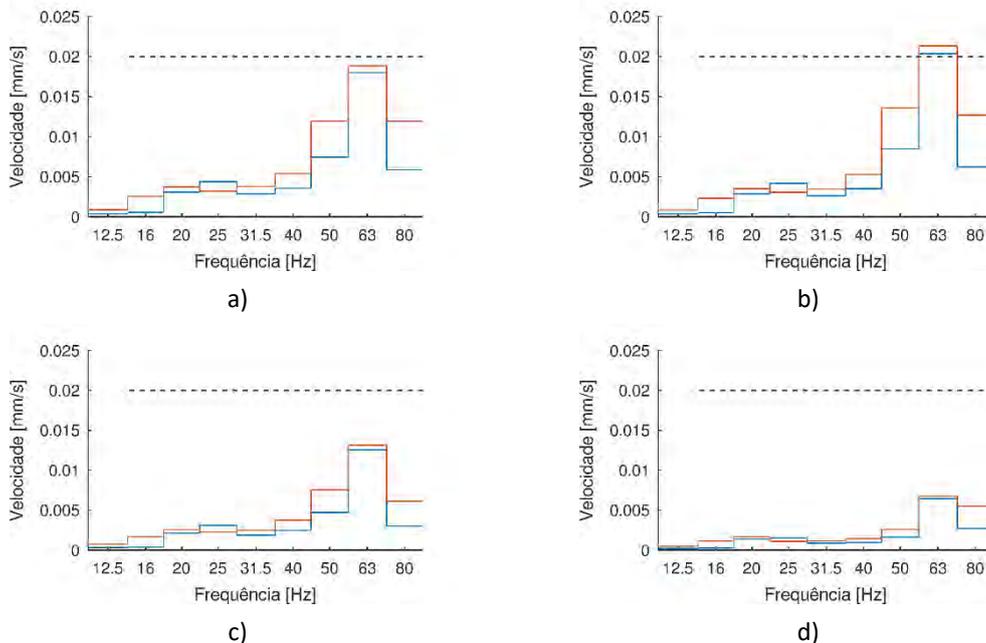


Figura 16 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 2 (Pk 1+700)

Da análise espectral dos quatro pontos, verifica-se o incumprimento do critério apenas quando o edifício-tipo se encontra a 15 metros de distância do eixo do túnel. Nos restantes pontos, não foi identificado qualquer incumprimento.

4.2.1.2 Secção 3 (Pk 2+100)

A secção 3, localizada no ponto quilométrico 2+100 apresenta uma estratificação geotécnica de acordo com Figura 17.

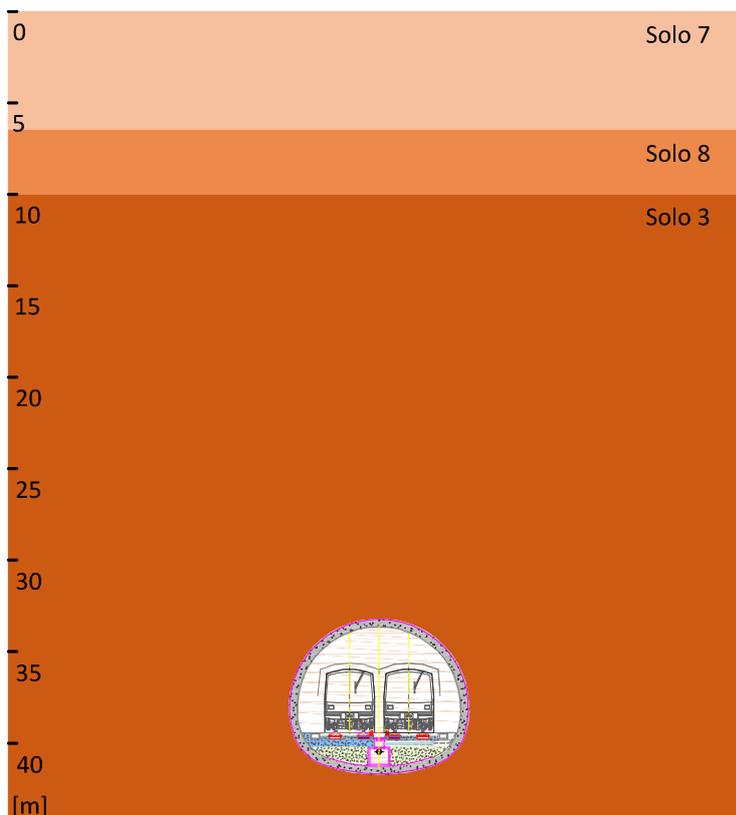


Figura 17 – Representação do perfil geológico da secção 3 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos do perfil de estratificação da secção 3 constam do Quadro 6.

Quadro 6 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 3 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 3	1960	800	2700	0,23
Solo 7	478	195	1600	0,40
Solo 8	1653	675	2300	0,30

Na Figura 18 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

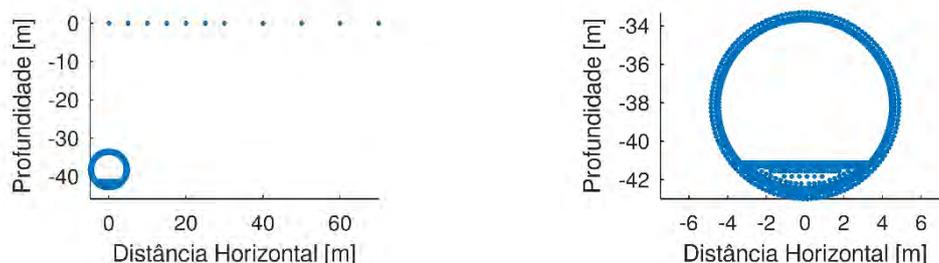


Figura 18 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A metodologia de cálculo possibilita a determinação dos níveis de vibração gerados à superfície do solo pela passagem do tráfego ferroviário em túnel, avaliada em diversos pontos situados na superfície.

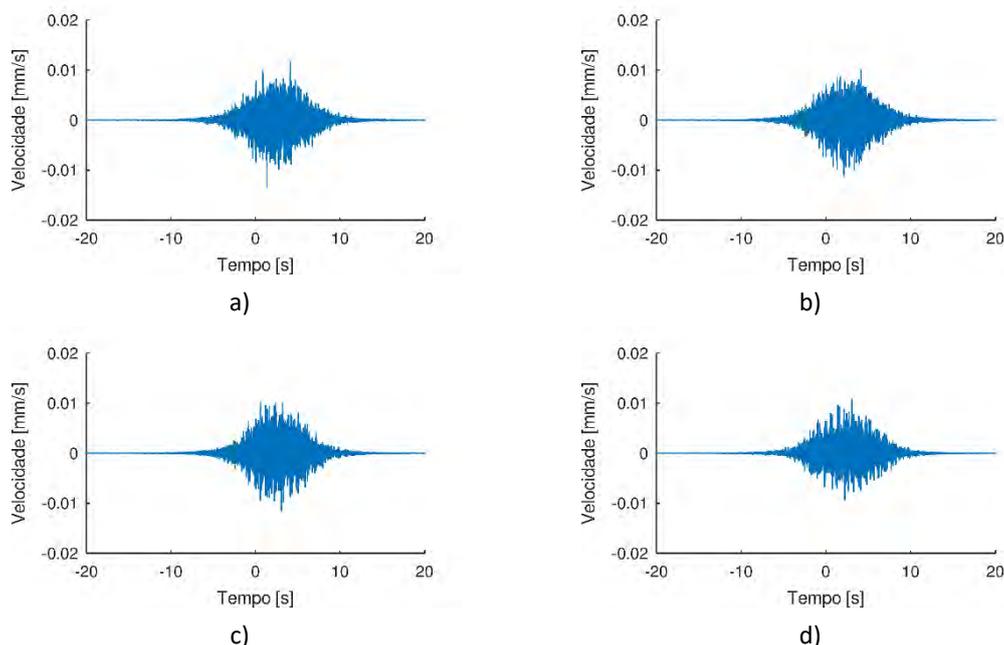


Figura 19 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 3 (Pk 2+100)

Na Figura 20 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios da secção 3, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel.

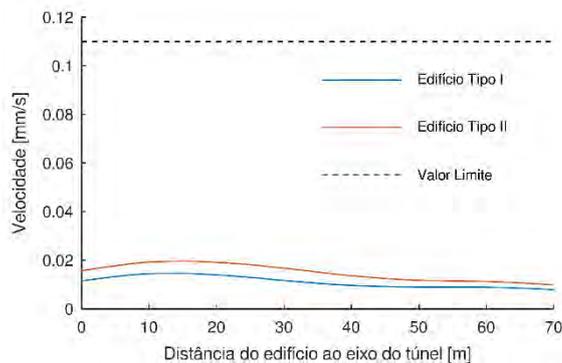


Figura 20 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 3 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

As curvas de velocidade de vibração eficaz avaliadas para os edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite das vibrações induzidas para as diferentes distâncias

Na Figura 21 são apresentados os espectros de resposta para quatro posições do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{ef} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído re-radiado pelos elementos do edifício.

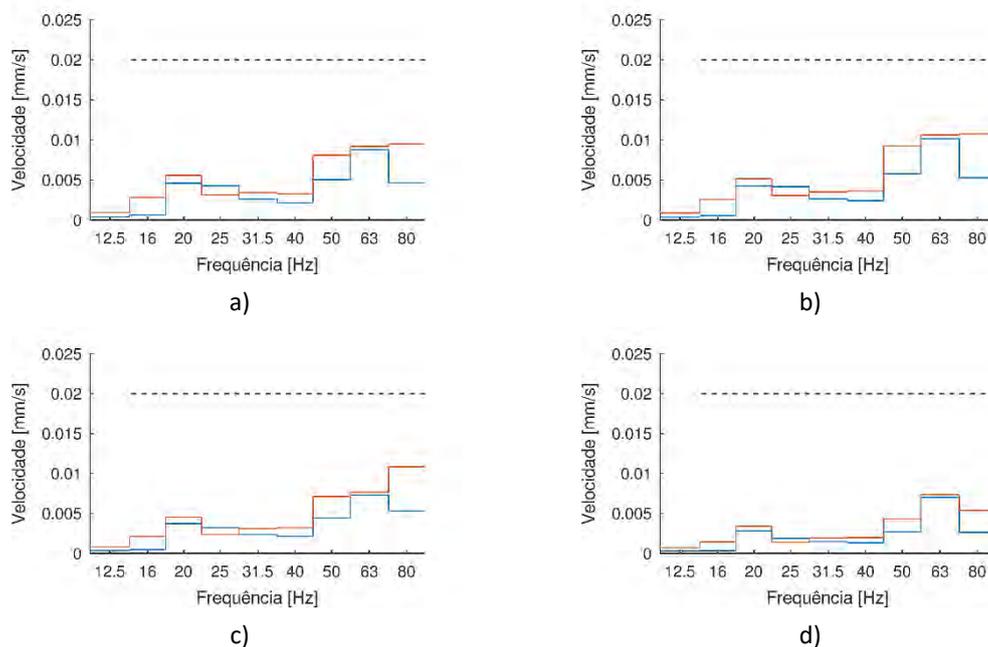


Figura 21 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 3 (Pk 2+100)

Os resultados obtidos para os níveis de vibração eficaz induzidos nos edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite preconizado, assegurando a não emissão de ruído re-radiado com níveis superiores a 22dB(A).

4.2.1.3 Secção 4 (Pk 3+200)

A secção 4, localizada no ponto quilométrico 3+200 apresenta uma estratificação de acordo com Figura 22.

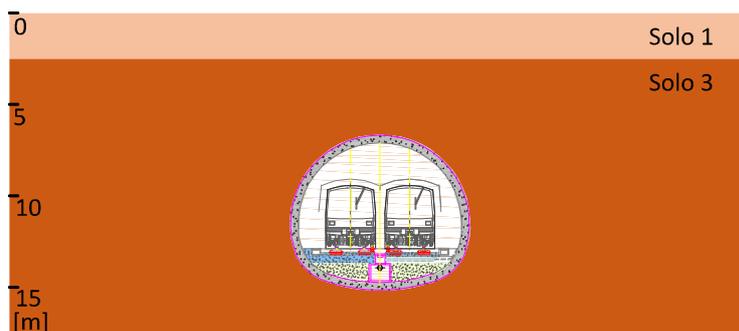


Figura 22 – Representação do perfil geológico da secção 4 e da posição relativa do túnel

As propriedades geotécnicas dos solos do perfil de estratificação da secção 4 constam do Quadro 7.

Quadro 7 – Propriedades geotécnicas dos solos, secção 4 (Fonte: Relatório 290/2022 [5])

Designação	C_p [m/s]	C_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Solo 1	710	290	1600	0,40
Solo 3	1960	800	2700	0,23

Na Figura 23 estão representados os nós do sistema, referentes aos elementos finitos (FEM) que descrevem e modelam o túnel, os pontos de avaliação da resposta à superfície do solo e dos elementos fronteira (BEM) que descrevem as condições fronteira do problema.

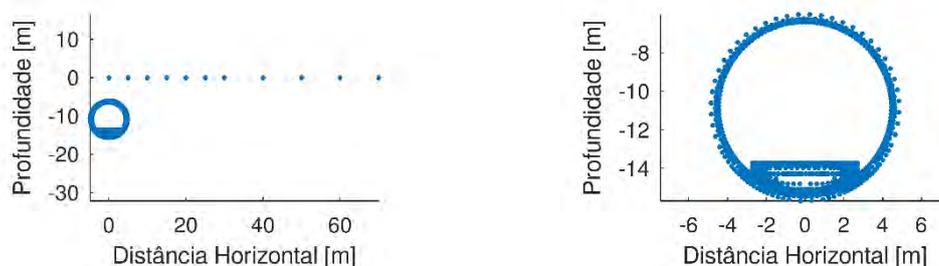


Figura 23 – Representação dos nós do modelo numérico referentes à secção 1, vista global e vista em pormenor dos pontos do túnel

A metodologia de cálculo possibilita a determinação dos níveis de vibração gerados à superfície do solo pela passagem do tráfego ferroviário em túnel, avaliada em diversos pontos situados na superfície.

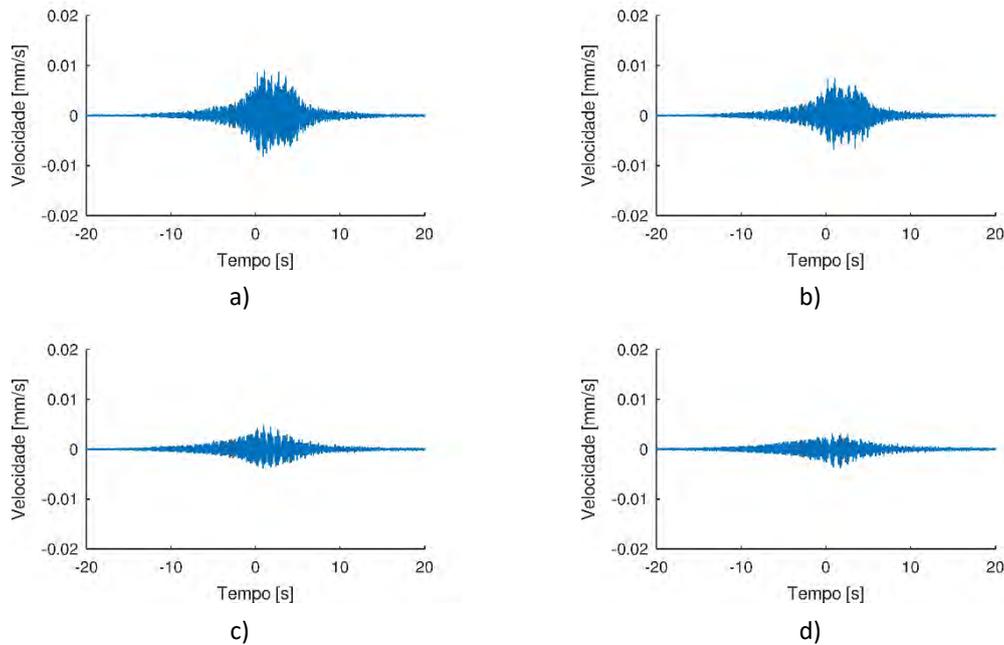


Figura 24 – Registo temporal da velocidade de vibração vertical avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 4 (Pk 3+200)

Na Figura 25 é apresentado o valor de vibração eficaz avaliado para cada uma das tipologias de edifícios da secção 4, considerando o edifício posicionado a diferentes distâncias horizontais do eixo do túnel.

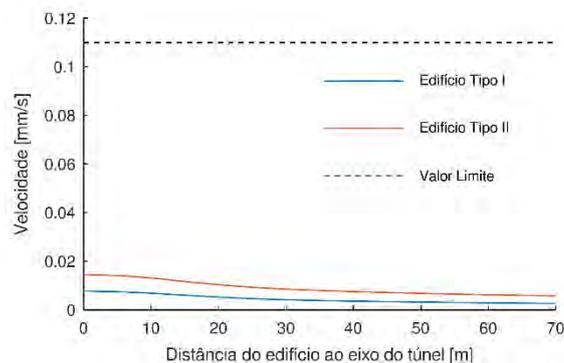


Figura 25 – Valor da velocidade de vibração eficaz relativo à secção 1 em função da distância horizontal de posicionamento do edifício relativamente ao eixo de simetria do túnel, avaliada no piso térreo dos edifícios tipo: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja

As curvas de velocidade de vibração eficaz avaliadas para os edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite das vibrações induzidas para as diferentes distâncias

Na Figura 26 são apresentados os espectros de resposta para quatro posições do edifício, a 5, 15, 30 e 60 metros do eixo do túnel. Nos gráficos está representado a traço interrompido o limite de vibração eficaz ($v_{ef} < 0.02$ mm/s) que garante a salvaguarda de não emissão de ruído re-radiado pelos elementos do edifício.

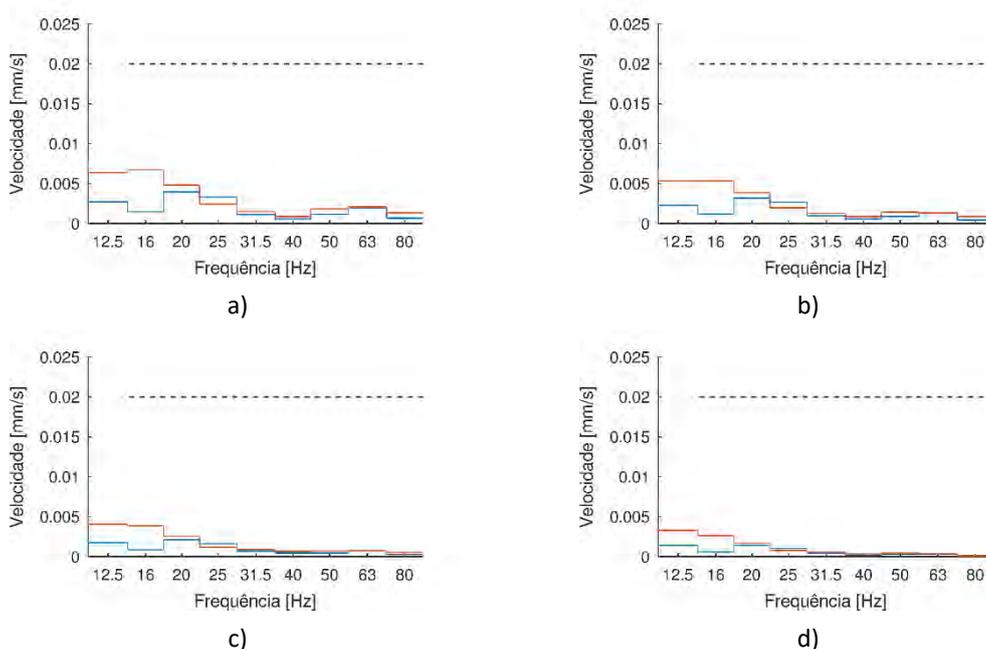


Figura 26 – Valor da velocidade eficaz de vibração segundo o tipo de edifício: Tipo I – edifício em estrutura de betão, representados a azul; Tipo II – edifícios com estrutura de alvenaria portante, representados a laranja. Avaliada nos pontos P1 a P4, localizados a 5, 15, 30 e 60 do eixo do túnel (a), b), c) e d), respetivamente) da secção 4 (Pk 3+200)

Os resultados obtidos para os níveis de vibração eficaz induzidos nos edifícios tipo evidenciam o cumprimento do limite preconizado, assegurando a não emissão de ruído re-radiado com níveis superiores a 22dB(A).

4.2.2 Análise Global Interpolada

A modelação numérica das secções transversais permite determinar para cada uma dessas a resposta de uma forma precisa. No entanto, foi pretensão dos intervenientes, a determinação e avaliação de toda a linha. Uma vez que a modelação numérica é computacionalmente é muito exigente e acarreta uma elevada disponibilidade temporal para o cálculo. O estudo integral das vibrações da linha com um elevado número de secções para além de fora do âmbito afigurava-se de difícil execução. Por essa razão, foi considerada uma análise global interpolada, tendo por base as curvas de vibração determinadas para as diferentes secções. Entre as secções foi considerada uma interpolação linear, que atende à distância entre o ponto de avaliação e as duas secções mais próximas.

A generalização das conclusões a toda a linha de metro, através da interpolação permite identificar de forma direta quais os recetores afetados. Possibilitando a identificação das zonas, onde serão necessárias medidas adicionais para mitigar as vibrações induzidas aos recetores, bem como o ruído re-radiado.

Procedeu-se à reanálise dos valores globais de vibração eficaz, avaliados em cada um dos recetores identificados na fase de análise preliminar e apresentados no Anexo 3 – Listagem de Edifícios. A referida reanálise e apresentação dos resultados da análise é feita no Anexo 6 – Apresentação do Resultado de Avaliação das Vibrações Induzidas aos Edifícios.

Para além da análise de vibrações atendendo ao seu valor global, avalia-se também o cumprimento da velocidade de vibração eficaz em frequência para garantir a emissão de níveis de ruído re-radiado inferiores a 22 dB(A). Segundo recomendação do LNEC e versado no documento *Tomo II - Geral* [7], para o caso de edifícios residenciais e hoteleiros, adota-se como máxima de vibração eficaz o valor de 0,02 mm/s.

A verificação do critério deve ser feita entre as frequências 16Hz e 200 Hz. No entanto, neste estudo, por restrição de tempo, não foi possível estender a avaliação da resposta para frequências superiores a 100 Hz. Contudo, entende-se que esta consequência tem riscos controlados, pelo facto dos picos de resposta em frequência avaliados no estudo do LNEC [5] para os edifícios em análise, se encontrarem sempre para frequências inferiores a 100 Hz. Os resultados desta análise são apresentados no Anexo 7 – Apresentação do Resultado de Avaliação do Ruído Re-radiado nos edifícios.

Face aos resultados obtidos nesta análise global interpolada e tendo em conta as situações de incumprimento verificadas preconizam-se as seguintes ações:

- Estender a manta preconizada para a secção junto ao palácio das necessidades, até ao PK2+550;
- Considerar adicionalmente manta na via entre os pontos quilométricos
 - PK0+000 a PK0+250;
 - PK0+500 a PK1+350;
 - PK1+500 a PK1+800.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

No presente relatório são apresentados os pressupostos e as conclusões dos estudos de avaliação das vibrações e ruído re-radiado induzidos nos múltiplos recetores localizados ao longo da futura linha de metro que resultará do prolongamento da linha vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, do Metropolitano de Lisboa E. P. E..

Neste estudo foram avaliados os níveis de vibração a que as edificações estarão sujeitas aquando da operação do metro na linha em estudo. Os limites recomendados, e que serviram de base à verificação do cumprimento nos recetores, refletem as opções e decisões anteriores que constituem a empreitada em preparação.

Foram elaboradas duas análises de vibrações. Uma preliminar, que permitiu identificar as principais zonas críticas e candidatas a estudo detalhado, e uma análise numérica detalhada. Para a análise detalhada foram consideradas 4 secções de cálculo (PK 0+600, PK 1+700, PK 2+100 e PK 3+200). A escolha destas secções atendeu aos resultados da análise preliminar, aos diferentes perfis geológicos, à variabilidade da profundidade do túnel e à limitação do tempo disponível. Nesta análise foi utilizado o perfil real de estratificação do solo, para cada uma das secções, bem como do respetivo tipo de via. Foi considerada numericamente a interação dinâmica veículo-via e de forma híbrida a interação dinâmica solo-estrutura, através de curvas experimentais. Ao nível da via foi considerado um perfil de irregularidades correspondente a uma classe de manutenção 3 e uma velocidade de circulação de 70 km/h.

A modelação das secções permitiu estudar, com elevado nível de certeza, as vibrações e ruído re-radiado em cada um dos potenciais recetores localizados em cada uma das secções em análise. No entanto, era objetivo do trabalho apresentar uma estimativa dos níveis de vibração e ruído re-radiado para todos os recetores, ao longo de toda a linha. Tendo em conta esse desígnio procedeu-se à determinação dos indicadores por interpolação linear entre as quatro secções de cálculo.

Os diferentes tipos de via, e as medidas mitigadoras consideradas foram as descritas na secção 4.1.1 do presente relatório.

Atendendo aos pressupostos de análise e aos condicionalismos previamente mencionados, os estudos agora realizados permitiram concluir que:

- O nível de vibrações induzido nos recetores analisados é para todos os casos, inferior ao limite estabelecido ($v_{ef} < 0.11 \text{ mm/s}$).
- No que ao ruído re-radiado diz respeito, verifica-se que existem alguns edifícios em incumprimento, do limite de vibração eficaz máxima dos elementos, analisada em frequência ($v_{ef} < 0.02 \text{ mm/s}$).
- Junto ao PK 3+700 verifica-se o incumprimento dos limites, mesmo tendo em conta a existência da solução de via c/ manta. É recomendada a adoção de uma medida mitigadora mais exigente devidamente suportada em estudo dedicado que inclua a caracterização geotécnica local;
- Estima-se a necessidade de estender a manta preconizada para a secção junto ao palácio das necessidades, até ao PK2+550;
- Estima-se a necessidade de considerar adicionalmente manta entre os pontos quilométricos
 - PK0+000 a PK0+250;

-
- PK0+500 a PK1+350;
 - PK1+500 a PK1+800.

A aplicação da mesma solução de medida mitigadora (via c/ manta), Via Tipo 3, pode para alguns dos troços adicionais agora mencionados ser excessiva, devido à maior profundidade do túnel e à redução da velocidade de circulação real nas estações. Para estes casos a solução mitigadora pode ser otimizada com estudo dedicado, salvaguardando o detalhe e a precisão que lhe é devido.

ANEXO 1 - MÉTODO ANALÍTICO DETERMINAÇÃO VIBRAÇÕES

1. Modelo de cálculo preditivo da situação futura

A metodologia da *Federal Railway Administration (FRA)* [4] consiste num conjunto de diretrizes e ferramentas analíticas que visam prever e avaliar os impactos de ruído e vibração decorrentes das operações ferroviárias. Esta metodologia é especialmente relevante para grandes infraestruturas ferroviárias, onde o ruído re-radiado ou direto e as vibrações induzidas podem ter efeitos adversos sobre a saúde pública e a qualidade de vida nas áreas circundantes a essas infraestruturas.

Esta metodologia permite determinar os níveis de vibração avaliados no recetor, tendo por base uma curva genérica de vibrações em função da distância à via. A curva pode ser corrigida através de um conjunto de fatores que permitem considerar diferentes elementos, tais como: i) o tipo de via; ii) a posição relativa da via à superfície; iii) os níveis de manutenção da via; iv) a velocidade de circulação do material circulante; v) o tipo de solo; vi) o tipo de recetor, entre outros.

1.1. Fatores corretivos método analítico (FRA)

1.1.1. Fonte de vibração

O primeiro fator relativo à fonte de vibração prende-se com a correção da velocidade de circulação do comboio, permitindo um ajuste da curva base à velocidade de projeto.

O fator corretivo da velocidade, F_{vel} , é determinado pela expressão (2).

$$F_{vel} = 20 \log_{10} \left(\frac{vel_{real}}{vel_{ref}} \right) \quad (2)$$

Em que vel_{real} corresponde à velocidade de circulação de projeto e vel_{ref} corresponde à velocidade de circulação de referência, $vel_{ref} = 80,47$ km/h (50 mph).

No Quadro 8 são apresentados os diferentes fatores corretivos a aplicar para adequação da fonte ao cenário de referência.

Quadro 8 - Fatores Corretivos Fonte de Vibração

Tipo de Correção	Ajuste à curva base	Comentário
Rodas Resilientes	0 dB	Não têm geralmente influência nas vibrações induzidas para frequências inferiores a 80 Hz.
Rodas irregulares	+ 10 dB	Podem causar elevados níveis de vibração.
Irregularidades do Carril	Selecionar apenas um dos fatores + 10 dB	As irregularidades do carril são um problema comum e estão intrinsecamente relacionadas com os níveis de manutenção. A esmerilagem dos carris remove as irregularidades e repõem a mesa de rolamento.
Aparelhos de Mudança de Via ou similares	+ 10 dB	Os impactos das rodas nos aparelhos de mudança de via aumentam significativamente os níveis de vibração.

Laje Flutuante		-15 dB	A redução alcançada com este tipo de soluções é muito dependente das características da fonte, em frequência e da massa do sistema.
Mantas sob Balastro		-10 dB	A redução é altamente dependente da frequência de vibração.
Fixações Resilientes do Carril	Selecionar o valor mais alto aplicável	-5 dB	Elementos de fixação resilientes em vias em laje, levam a uma redução das vibrações para frequências superiores a 40 Hz.
Travessas com Palmilha		-10 dB	Foi identificado que a sua aplicação em túneis permite controlar de forma eficaz as vibrações para frequências mais baixas.
Tipo de Estrutura de Via	Relativo a vias à superfície		
	Viaduto	-10 dB	
	Superfície/Trincheira	0 dB	Regra geral, quanto mais pesada for a estrutura, menores serão os níveis de vibração. Túneis em rocha deslocam o conteúdo em frequência das vibrações para frequências mais altas.
	Relativo a vias em profundidade:		
	Estação	-5 dB	
	Cut and Cover	-3 dB	
	Túnel	-15 dB	

1.1.2. Caminho de Propagação

No Quadro 9 são apresentados os diferentes fatores corretivos a aplicar para adequação do caminho de propagação.

Quadro 9 - Fatores Corretivos Caminho de Propagação

Tipo de Correção	Ajuste à curva base	Comentário	
Propagação Eficiente	+ 10 dB	Aplicável sempre que possa ser identificada a probabilidade de ocorrência de propagação eficiente de vibrações.	
Propagação	Profundidade	Ajuste	
	15,24 m	+2 dB	O ajuste positivo considera uma menor atenuação da vibração em rocha do que no solo.
	30,48 m	+4 dB	
	45,72 m	+6 dB	
	60,96 m	+9 dB	
Estrutura em Madeira	-5 dB		
Acoplamento do Edifício	Alvenaria (1-2 pisos)	-7 dB	Regra geral, quanto mais pesado for o edifício, maior será a perda por acoplamento.
	Alvenaria (2-4 pisos)	-10 dB	
	Alvenaria (>4 pisos):		
	Fundada em estacas	-10 dB	
	Fundações superficiais	-13 dB	
	Fundação em Rocha	0 dB	

1.1.3. Recetor

No Quadro 10 são apresentados os diferentes fatores corretivos a aplicar para consideração das especificidades do recetor, nomeadamente do fenómeno de interação dinâmica solo-estrutura.

Quadro 10 - Fatores Corretivos Recetor

Tipo de Correção	Ajuste à curva base		Comentário
Atenuação Piso a Piso	1-5 pisos acima do solo	-2 dB/piso	Este fator tem em conta a dispersão e atenuação da energia à medida que ela se propaga no edifício.
	5-10 pisos acima do solo	-1 dB/piso	
Amplificação devido às ressonâncias das lajes e paredes		+6 dB	A amplificação variará muito dependendo do tipo de estrutura e será menor junto às interseções paredes/pisos.

ANEXO 2 – PRESSUPOSTOS ANÁLISE DO ESTUDO PRELIMINAR VIBRAÇÕES

Os pressupostos de análise da metodologia preliminar FRA são apresentados no Quadro 11. São evidenciados os pontos notáveis do projeto em que se verifica uma variação das condições/caraterísticas que justifiquem uma consideração diferente entre as zonas delimitadas por esses pontos.

Quadro 11 - Identificação dos Pontos Notáveis

Ponto	PK	Cota Terreno (m)	Cota Rasante (m)	Velocidade (km/h)	Defeito	Tipo de Estrutura de Via	Geologia
P1	0	110.214905	84.433	70		Túnel	Propagação Eficiente
P2	561.001	103.2622	82.94	70		Estação	Propagação Eficiente
P3	671.001	102.6184	82.94	70		Túnel	Propagação Eficiente
P4	1607.469	91.7698	61.3	70		Estação	Propagação Eficiente
P5	1717.469	91.6158	61.3	70		Túnel	Propagação Eficiente
P6	1873.53	91.4157	56.4051	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P7	1917.244	90.6022	54.6565	70		Túnel	Propagação Eficiente
P8	2463.439	72.1029	34.6	70		Estação	Propagação Eficiente
P9	2573.439	68.812	34.6	70		Túnel	Propagação Eficiente
P10	2650	57.6818	33.1374	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P11	2703.758	56.5917	31.3871	70		Túnel	Propagação Eficiente
P12	3314.556	12.0838	12.0838	70		Viaduto	
P13	3331.226	7.8536	12.5797	70	Aparelho de Mudança de Via	Viaduto	
P14	3371.911	4.8327	13.79	70		Viaduto	
P15	3468.693	6.2898	14.8039	70		Viaduto	
P16	3578.693	12.0736	14.8039	70		Viaduto	
P17	3622.663	14.8039	14.8039	70		Túnel	Propagação Eficiente
P18	3727.257	24.1222	13.3543	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P19	3766.554	26.4202	12.5493	70		Túnel	Propagação Eficiente

P20	3778.657	27.36	12.3076	70	Aparelho de Mudança de Via	Túnel	Propagação Eficiente
P21	3822.157	52.2672	11.4386	70		Túnel	Propagação Eficiente
P22	4097.22372	50.6744552	8.98220809	70		Túnel	Propagação Eficiente

ANEXO 3 – LISTAGEM DE EDIFÍCIOS

Foi feito o levantamento de todos os edifícios localizados nas imediações da infraestrutura ferroviária que se pretende construir. A listagem de edifícios é apresentada no Quadro 12.

Quadro 12 – Listagem dos edifícios e da sua localização relativa

Designação	PK	Distância	Acoplamento do Edifício	Número de Pisos
1	54	10.850129	Alvenaria em Estacas	6
2	75	10.542308	Alvenaria em Estacas	6
3	96	10.901234	Alvenaria em Estacas	6
4	147	9.9184344	Alvenaria em Estacas	6
5	147	9.9290773	Alvenaria em Estacas	6
6	163	10.234064	Alvenaria em Estacas	6
7	184	10.185177	Alvenaria em Estacas	6
8	197	9.9697361	Alvenaria em Estacas	6
9	216	8.8195413	Alvenaria em Estacas	6
10	231	7.007878	Alvenaria em Estacas	7
11	302	29.614253	Alvenaria (2-4 pisos)	4
12	520	39.871779	Alvenaria em Estacas	16
13	583	31.088823	Alvenaria em Estacas	7
14	601	16.465688	Alvenaria em Estacas	18
15	630	10.428563	Alvenaria em Estacas	18
16	744	26.581552	Alvenaria em Estacas	14
17	765	27.641105	Alvenaria em Estacas	14
18	790	31.212611	Alvenaria em Estacas	14
19	803	10.769009	Alvenaria (1-2 pisos)	3
20	850	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
21	836	0	Alvenaria em Estacas	9
22	863	16.250166	Alvenaria (1-2 pisos)	3
23	930	11.395564	Alvenaria em Estacas	8
24	1002	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
25	1008	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
26	1023	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
27	1019	5.2670068	Alvenaria (1-2 pisos)	3
28	1036	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
29	1041	5.1242838	Alvenaria (1-2 pisos)	4
30	1047	11.090905	Alvenaria (2-4 pisos)	4
31	1063	18.371253	Alvenaria em Estacas	11
32	1078	6.6062974	Alvenaria (1-2 pisos)	3
33	1083	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
34	1098	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
35	1113	0	Alvenaria (1-2 pisos)	4
36	1121	1.8493379	Alvenaria (1-2 pisos)	3

37	1173	0	Alvenaria em Estacas	7
38	1187	4.3800862	Alvenaria em Estacas	9
39	1202	11.217403	Alvenaria (2-4 pisos)	4
40	1208	0.4352529	Alvenaria (2-4 pisos)	4
41	1219	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
42	1232	0.4330491	Alvenaria (2-4 pisos)	4
43	1239	8.4939622	Alvenaria (2-4 pisos)	4
44	1240	0.522674	Alvenaria (2-4 pisos)	2
45	1250	0	Alvenaria (2-4 pisos)	2
46	1266	2.5379802	Alvenaria (2-4 pisos)	2
47	1261	0	Alvenaria (2-4 pisos)	2
48	1291	3.8801725	Alvenaria (1-2 pisos)	1
49	1294	12.990611	Alvenaria (1-2 pisos)	1
50	1295	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
51	1301	5.5477293	Alvenaria (1-2 pisos)	1
52	1310	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
53	1312	2.0085056	Alvenaria (1-2 pisos)	1
54	1317	4.9742899	Alvenaria (1-2 pisos)	1
55	1310	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
56	1321	8.109715	Alvenaria (1-2 pisos)	1
57	1316	1.4721095	Alvenaria (1-2 pisos)	1
58	1320	5.7039736	Alvenaria (1-2 pisos)	1
59	1324	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
60	1324	10.078537	Alvenaria (1-2 pisos)	1
61	1341	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
62	1346	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
63	1356	1.571858	Alvenaria (1-2 pisos)	
64	1380	23.616222	Alvenaria (1-2 pisos)	1
65	1387	31.018166	Alvenaria (1-2 pisos)	1
66	1384	19.139971	Alvenaria (1-2 pisos)	2
67	1390	27.655737	Alvenaria (1-2 pisos)	1
68	1393	25.355234	Alvenaria (1-2 pisos)	1
69	1426	24.976577	Alvenaria (2-4 pisos)	4
70	1431	17.476812	Alvenaria (2-4 pisos)	4
71	1439	8.2074395	Alvenaria (2-4 pisos)	3
72	1443	3.2118526	Alvenaria (2-4 pisos)	3
73	1449	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
74	1459	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
75	1465	0	Alvenaria em Estacas	6
76	1471	7.0220716	Alvenaria em Estacas	6
77	1477	5.7269496	Alvenaria (2-4 pisos)	5

78	1484	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
79	1488	0	Alvenaria em Estacas	6
80	1506	5.0733807	Alvenaria em Estacas	5
81	1518	0	Alvenaria em Estacas	5
82	1529	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
83	1535	3.5470545	Alvenaria (2-4 pisos)	5
84	1533	15.078147	Alvenaria (1-2 pisos)	4
85	1543	7.6101665	Alvenaria (1-2 pisos)	5
86	1538	12.396779	Alvenaria (2-4 pisos)	4
87	1544	9.6770001	Alvenaria (2-4 pisos)	5
88	1552	5.0154814	Alvenaria (2-4 pisos)	5
89	1554	13.169531	Alvenaria (2-4 pisos)	6
90	1563	0	Alvenaria (2-4 pisos)	6
91	1575	20.953077	Alvenaria em Estacas	8
92	1578	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
93	1587	0	Alvenaria em Estacas	7
94	1616	33.829075	Alvenaria em Estacas	7
95	1606	1.561075	Alvenaria em Estacas	7
96	1630	37.750998	Alvenaria (1-2 pisos)	4
97	1646	42.12232	Alvenaria (1-2 pisos)	4
98	1659	46.003187	Alvenaria (1-2 pisos)	4
99	1664	47.386112	Alvenaria (1-2 pisos)	4
100	1671	49.015171	Alvenaria em Estacas	7
101	1682	50.420682	Alvenaria em Estacas	7
102	1650	44.838878	Alvenaria em Estacas	7
103	1659	42.351908	Alvenaria em Estacas	7
104	1670	38.922229	Alvenaria em Estacas	7
105	1682	35.688708	Alvenaria em Estacas	7
106	1721	28.630656	Alvenaria (1-2 pisos)	3
107	1694	32.383617	Alvenaria em Estacas	7
108	1733	44.062217	Alvenaria (2-4 pisos)	3
109	1704	29.433667	Alvenaria em Estacas	7
110	1739	36.156084	Alvenaria (2-4 pisos)	5
111	1726	9.3076626	Alvenaria (1-2 pisos)	3
112	1747	37.776375	Alvenaria (2-4 pisos)	5
113	1715	26.22203	Alvenaria em Estacas	7
114	1730	0	Alvenaria em Estacas	7
115	1745	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
116	1755	0	Alvenaria em Estacas	5
117	1752	16.382208	Alvenaria em Estacas	7
118	1765	2.7396177	Alvenaria em Estacas	5

119	1762	14.120347	Alvenaria em Estacas	5
120	1773	4.6668663	Alvenaria em Estacas	5
121	1769	12.276892	Alvenaria em Estacas	5
122	1783	6.7382288	Alvenaria em Estacas	5
123	1780	11.568407	Alvenaria em Estacas	5
124	1790	8.0000941	Alvenaria em Estacas	5
125	1805	9.5534989	Alvenaria (1-2 pisos)	2
126	1800	6.5709138	Alvenaria em Estacas	5
127	1817	5.219929	Alvenaria em Estacas	5
128	1836	11.778364	Alvenaria (2-4 pisos)	4
129	1855	16.369332	Alvenaria (1-2 pisos)	3
130	1844	2.0193758	Alvenaria (2-4 pisos)	6
131	1873	19.034753	Alvenaria (2-4 pisos)	5
132	1884	21.311038	Alvenaria (1-2 pisos)	3
133	1862	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
134	1898	23.909443	Alvenaria (2-4 pisos)	4
135	1868	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
136	1880	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
137	1895	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
138	1923	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
139	1940	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
140	1942	5.9032546	Alvenaria em Estacas	6
141	1950	0.7305841	Alvenaria em Estacas	6
142	1981	24.134477	Alvenaria (1-2 pisos)	2
143	1955	0	Alvenaria em Estacas	6
144	1982	16.952045	Alvenaria (1-2 pisos)	3
145	1983	10.296383	Alvenaria (1-2 pisos)	3
146	1984	3.6407215	Alvenaria em Estacas	6
147	1966	12.075768	Alvenaria em Estacas	6
148	1990	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
149	2043	18.140658	Alvenaria em Estacas	10
150	1998	6.7529531	Alvenaria (1-2 pisos)	3
151	2001	13.894563	Alvenaria (2-4 pisos)	4
152	2014	3.5054605	Alvenaria (1-2 pisos)	1
153	2026	1.2615482	Alvenaria (1-2 pisos)	1
154	2035	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
155	2104	38.342623	Alvenaria (2-4 pisos)	3
156	2108	37.886814	Alvenaria (2-4 pisos)	3
157	2046	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
158	2116	33.339971	Alvenaria (2-4 pisos)	4
159	2072	4.5029387	Alvenaria (2-4 pisos)	4

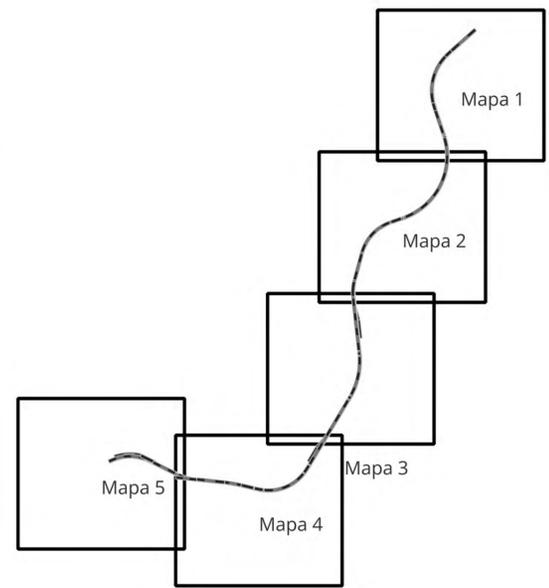
160	2123	26.772749	Alvenaria (2-4 pisos)	4
161	2139	18.388498	Alvenaria (1-2 pisos)	3
162	2152	11.889021	Alvenaria (2-4 pisos)	4
163	2159	13.280163	Alvenaria (1-2 pisos)	4
164	2165	10.53786	Alvenaria (1-2 pisos)	3
165	2171	8.0342469	Alvenaria (1-2 pisos)	3
166	2153	4.254224	Alvenaria (1-2 pisos)	3
167	2235	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
168	2249	7.9611097	Alvenaria (2-4 pisos)	5
169	2258	12.880259	Alvenaria (2-4 pisos)	4
170	2252	19.791971	Alvenaria (1-2 pisos)	2
171	2277	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
172	2262	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
173	2285	1.7875619	Alvenaria (2-4 pisos)	5
174	2292	11.052597	Alvenaria (2-4 pisos)	5
175	2259	20.742972	Alvenaria (2-4 pisos)	3
176	2299	21.052016	Alvenaria (2-4 pisos)	5
177	2269	26.690558	Alvenaria (2-4 pisos)	3
178	2307	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
179	2319	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
180	2323	4.6001405	Alvenaria (2-4 pisos)	5
181	2301	3.0350268	Alvenaria (2-4 pisos)	3
182	2327	14.354844	Alvenaria (2-4 pisos)	5
183	2304	16.140174	Alvenaria (2-4 pisos)	2
184	2338	4.1135409	Alvenaria (1-2 pisos)	3
185	2339	8.8962168	Alvenaria (1-2 pisos)	3
186	2338	0.7784216	Alvenaria (1-2 pisos)	3
187	2326	0.0378218	Alvenaria (1-2 pisos)	3
188	2339	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
189	2324	5.0119783	Alvenaria (1-2 pisos)	3
190	2345	6.0584958	Alvenaria (1-2 pisos)	1
191	2354	5.5480071	Alvenaria (1-2 pisos)	2
192	2363	2.6513249	Alvenaria (2-4 pisos)	4
193	2341	2.1421991	Alvenaria (1-2 pisos)	1
194	2369	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
195	2380	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
196	2409	19.694092	Alvenaria em Estacas	9
197	2403	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
198	2419	18.585214	Alvenaria em Estacas	9
199	2439	16.689288	Alvenaria em Estacas	9
200	2432	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5

201	2460	39.55152	Alvenaria em Estacas	8
202	2447	8.0666751	Alvenaria em Estacas	9
203	2459	0	Alvenaria em Estacas	6
204	2448	34.178933	Alvenaria (2-4 pisos)	4
205	2464	4.6305022	Alvenaria (2-4 pisos)	5
206	2467	17.436667	Alvenaria (2-4 pisos)	5
207	2470	28.245563	Alvenaria em Estacas	7
208	2491	33.730446	Alvenaria (2-4 pisos)	5
209	2472	33.612564	Alvenaria em Estacas	7
210	2468	41.459423	Alvenaria (2-4 pisos)	5
211	2484	40.398522	Alvenaria (2-4 pisos)	4
212	2514	28.416121	Alvenaria (2-4 pisos)	5
213	2495	38.855791	Alvenaria (2-4 pisos)	5
214	2504	37.087856	Alvenaria (2-4 pisos)	5
215	2514	35.244504	Alvenaria (2-4 pisos)	5
216	2541	23.778885	Alvenaria (2-4 pisos)	5
217	2525	32.395767	Alvenaria (2-4 pisos)	5
218	2534	29.800864	Alvenaria (2-4 pisos)	5
219	2543	26.90497	Alvenaria (2-4 pisos)	5
220	2570	19.590053	Alvenaria (2-4 pisos)	5
221	2548	26.89876	Alvenaria (2-4 pisos)	5
222	2565	23.218367	Alvenaria (2-4 pisos)	5
223	2598	13.407209	Alvenaria (2-4 pisos)	5
224	2579	20.888881	Alvenaria (2-4 pisos)	5
225	2606	22.342986	Alvenaria (2-4 pisos)	5
226	2626	7.8781324	Alvenaria (2-4 pisos)	5
227	2642	14.533797	Alvenaria (2-4 pisos)	5
228	2652	1.9598595	Alvenaria (2-4 pisos)	5
229	2656	8.1803688	Alvenaria em Estacas	5
230	2668	7.7195434	Alvenaria em Estacas	5
231	2687	0.7641029	Alvenaria em Estacas	6
232	2662	2.2548495	Alvenaria em Estacas	8
233	2681	47.556196	Alvenaria em Estacas	8
234	2700	5.8302725	Alvenaria (2-4 pisos)	4
235	2717	3.7262781	Alvenaria (2-4 pisos)	4
236	2730	28.312077	Alvenaria (2-4 pisos)	4
237	2725	11.709033	Alvenaria em Estacas	9
238	2729	1.2280902	Alvenaria (2-4 pisos)	4
239	2737	0.3901236	Alvenaria em Estacas	5
240	2739	14.661818	Alvenaria em Estacas	9
241	2742	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5

242	2757	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
243	2757	16.172418	Alvenaria em Estacas	9
244	2778	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
245	2787	0	Alvenaria (2-4 pisos)	5
246	2801	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
247	2803	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
248	2858	0	Alvenaria em Estacas	5
249	2874	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
250	2889	3.7458622	Alvenaria (1-2 pisos)	2
251	2917	9.6131333	Alvenaria (1-2 pisos)	3
252	2924	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
253	2963	5.8527554	Alvenaria (1-2 pisos)	3
254	2977	0	Alvenaria (1-2 pisos)	3
255	3051	20.449251	Alvenaria (1-2 pisos)	2
256	3010	24.697775	Alvenaria (1-2 pisos)	2
257	3017	20.374803	Alvenaria (1-2 pisos)	1
258	3033	8.3472468	Alvenaria (1-2 pisos)	3
259	3034	14.243329	Alvenaria (1-2 pisos)	3
260	3039	25.457221	Alvenaria (1-2 pisos)	3
261	3063	0	Alvenaria (2-4 pisos)	3
262	3055	12.766796	Alvenaria (1-2 pisos)	3
263	3079	16.42981	Alvenaria (2-4 pisos)	5
264	3135	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
265	3101	17.094072	Alvenaria (1-2 pisos)	2
266	3093	30.068905	Alvenaria (2-4 pisos)	4
267	3100	24.012948	Alvenaria (1-2 pisos)	3
268	3107	18.335761	Alvenaria (1-2 pisos)	2
269	3123	36.041042	Alvenaria (1-2 pisos)	2
270	3147	18.775851	Alvenaria (1-2 pisos)	3
271	3201	14.914814	Alvenaria (1-2 pisos)	1
272	3217	2.6281103	Alvenaria (1-2 pisos)	1
273	3229	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
274	3230	0	Alvenaria (1-2 pisos)	1
275	3209	11.043183	Alvenaria (1-2 pisos)	1
276	3329	26.467136	Alvenaria (1-2 pisos)	3
277	3316	17.408445	Alvenaria (1-2 pisos)	3
278	3333	21.39461	Alvenaria (1-2 pisos)	3
279	3318	9.0407855	Alvenaria (1-2 pisos)	3
280	3260	0	Alvenaria (1-2 pisos)	2
281	3327	6.8579525	Alvenaria (1-2 pisos)	3
282	3343	11.076585	Alvenaria (1-2 pisos)	3

283	3330	4.5863961	Alvenaria (1-2 pisos)	3
284	3333	2.5994993	Alvenaria (1-2 pisos)	3
285	3353	0	Alvenaria (2-4 pisos)	4
286	3331	4.4528821	Alvenaria (1-2 pisos)	3
287	3322	9.0296485	Alvenaria (1-2 pisos)	3
288	3318	13.879161	Alvenaria (1-2 pisos)	3
289	3313	18.274058	Alvenaria (1-2 pisos)	3
290	3335	23.3258	Alvenaria (2-4 pisos)	4
291	3360	9.6279545	Alvenaria (2-4 pisos)	5
292	3346	31.399161	Alvenaria (2-4 pisos)	4
293	3726	39.434153	Alvenaria (1-2 pisos)	3
294	3744	31.707953	Alvenaria (2-4 pisos)	3
295	3701	23.772928	Alvenaria (1-2 pisos)	1
296	3704	21.474141	Alvenaria (1-2 pisos)	2
297	3697	17.853443	Alvenaria (1-2 pisos)	1
298	3707	19.143188	Alvenaria (1-2 pisos)	2
299	3700	15.912562	Alvenaria (1-2 pisos)	2
300	3709	17.103095	Alvenaria (1-2 pisos)	1
301	3703	13.682174	Alvenaria (1-2 pisos)	2
302	3715	13.009536	Alvenaria (1-2 pisos)	1
303	3705	11.607205	Alvenaria (1-2 pisos)	1
304	3711	7.6765143	Alvenaria (1-2 pisos)	1
305	3646	17.163739	Alvenaria (1-2 pisos)	2
306	3666	22.10912	Alvenaria (2-4 pisos)	4
307	3688	33.427679	Alvenaria (2-4 pisos)	5
308	3696	41.398627	Alvenaria (1-2 pisos)	2
309	3712	43.555538	Alvenaria (1-2 pisos)	2
310	3736	35.19551	Alvenaria (1-2 pisos)	1

ANEXO 4 – IDENTIFICAÇÃO DAS ZONAS POTENCIALMENTE CRÍTICAS E DOS EDIFÍCIOS AFETADOS: ANÁLISE PRELIMINAR

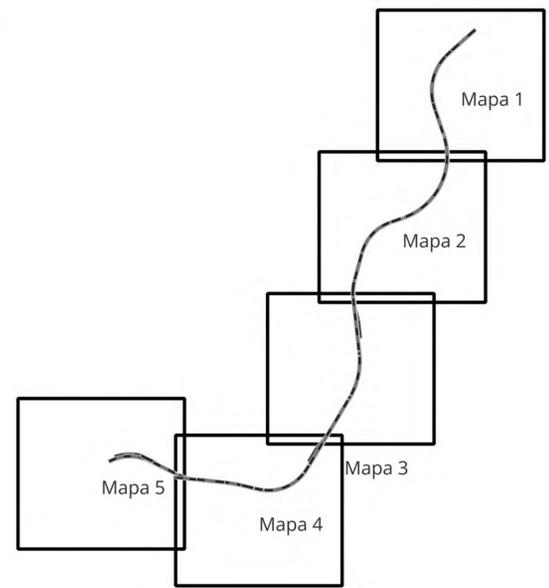
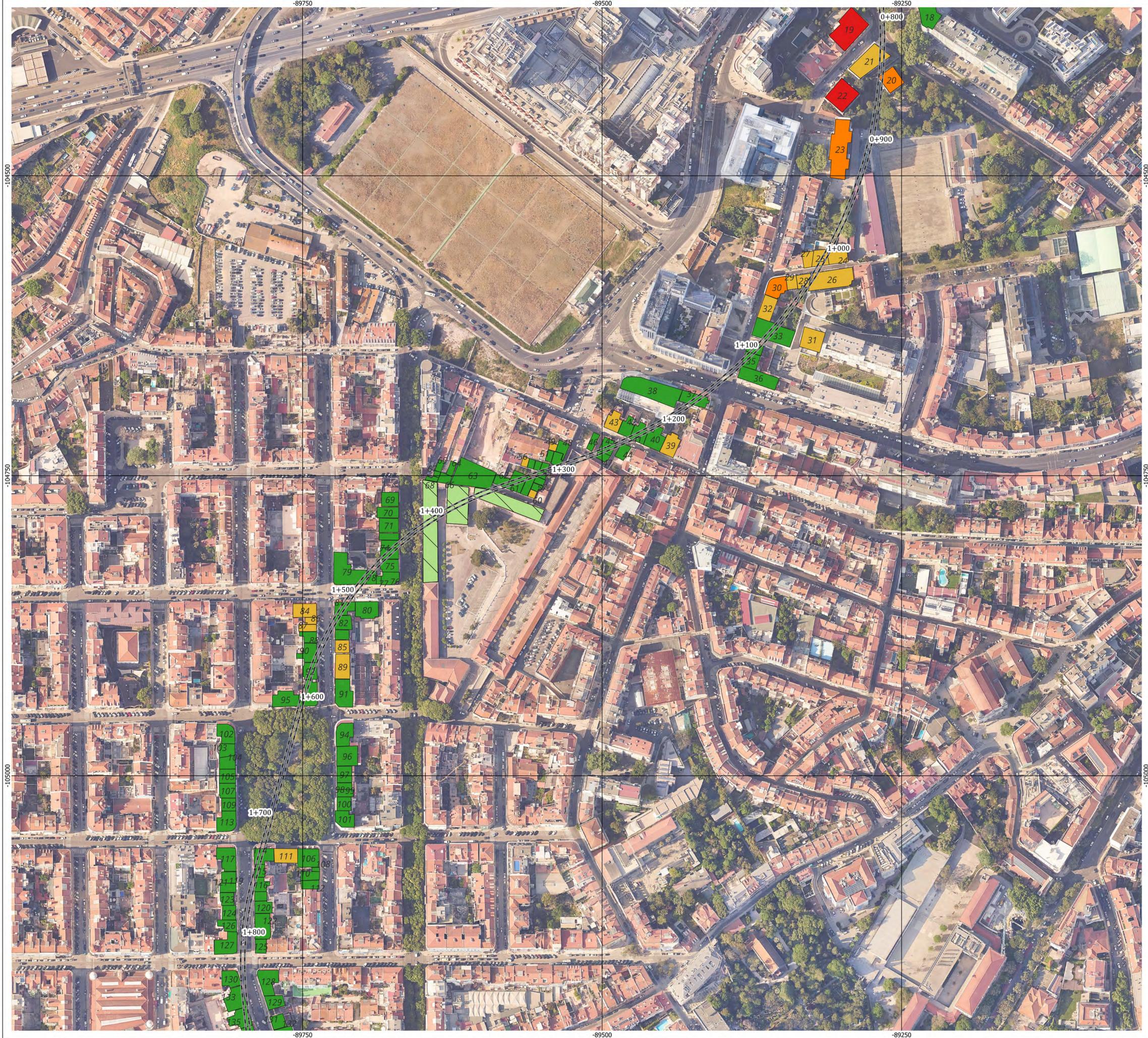


Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)	
Título do Desenho Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m	
Data 27/09/2024	Folha 1/5	
Desenho Mapa 1		



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

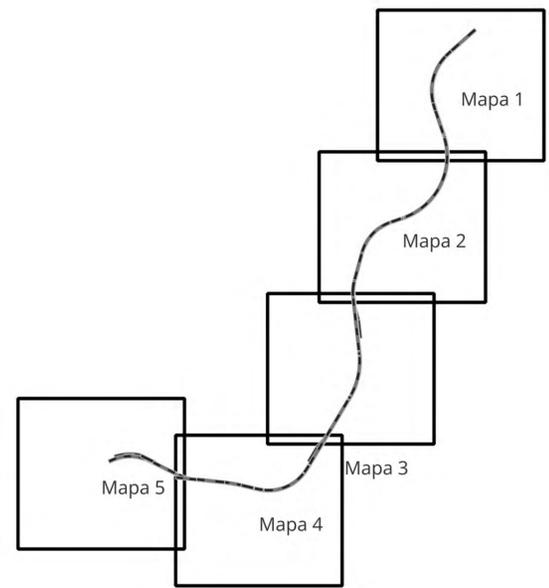
$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Logótipos e informação complementar</p> <p>Projetistas</p>	<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (99x641)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>2/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 2</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

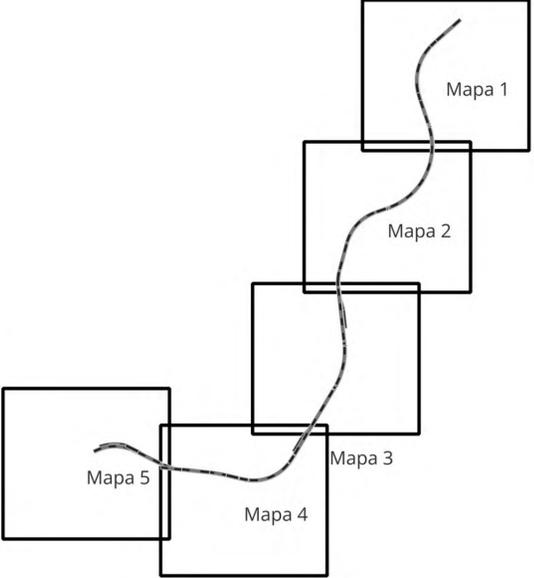
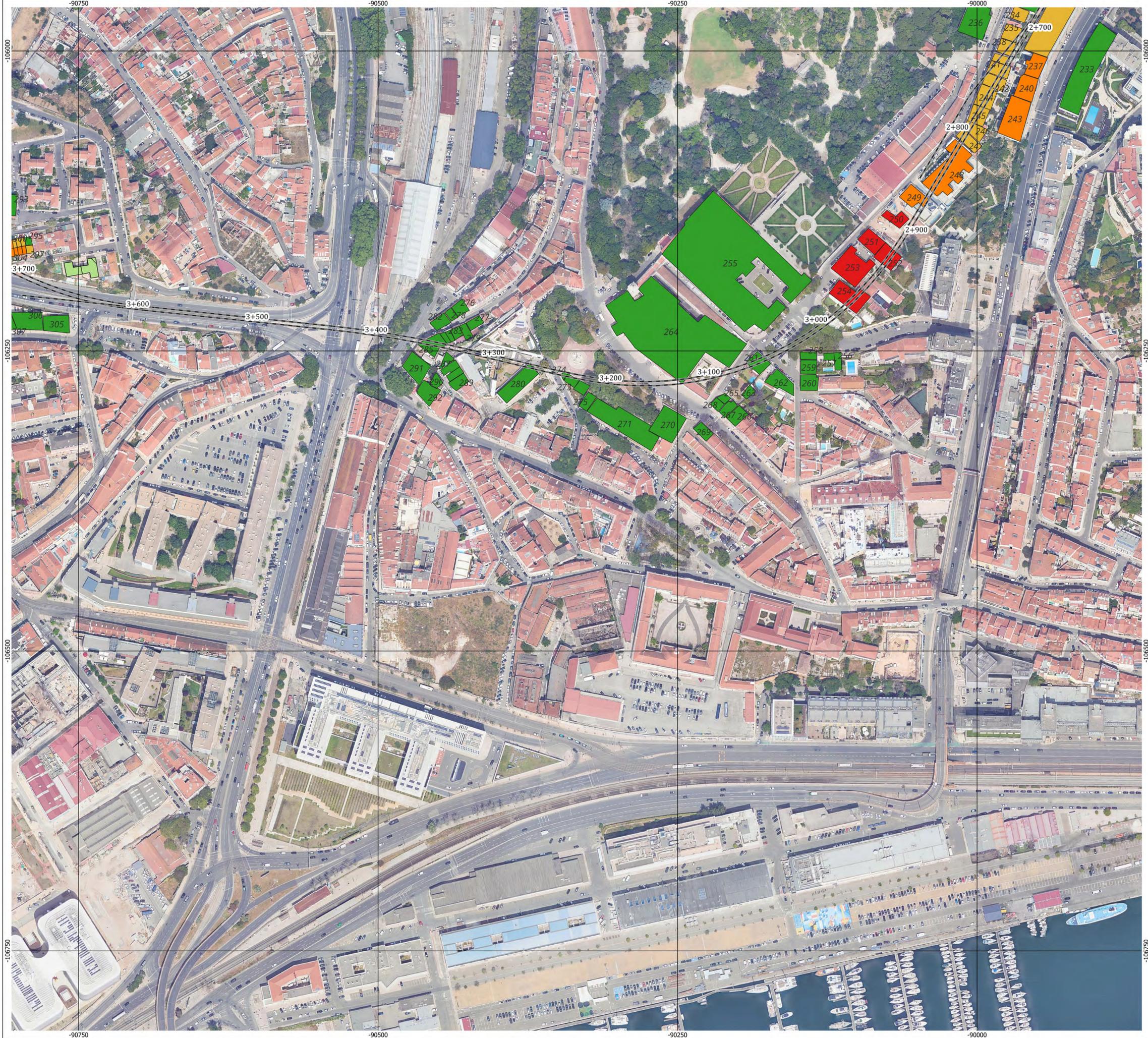
$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica	Vibrações	Sistema de Referência	EPBG 3763
Nome do Empreendimento	Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato	A1 (594x841)
Título do Desenho	Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala	0 25 m

27/09/2024	Folha	3/5	Desenho	Mapa 3
------------	-------	-----	---------	--------



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

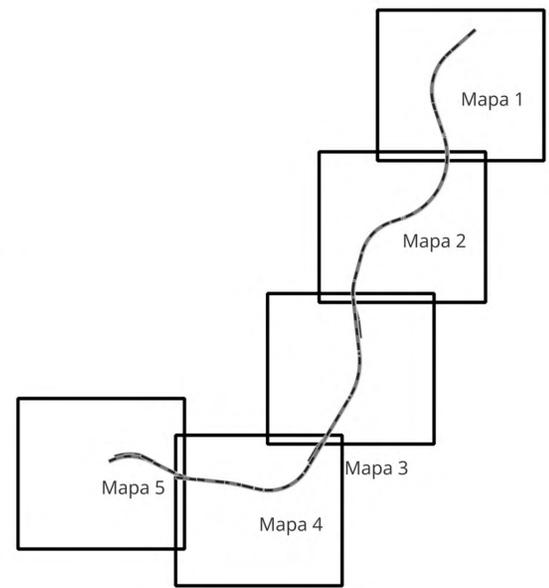
$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (99x641)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	---

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>4/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 4</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha	Desenho
	5/5	Mapa 5

ANEXO 5 - MÉTODO 2.5 FEM-BEM

5. Modelo de cálculo preditivo da situação futura

5.1. Considerações iniciais

A metodologia de cálculo utilizada para alcançar o objetivo proposto baseia-se na modelação do sistema veículo-via-túnel-edifício a partir de um modelo híbrido, composto pelas seguintes partes:

- **Modelação do túnel e do terreno contíguo:** Para a modelação do troço em estudo, utiliza-se um modelo numérico de acordo com o método dos elementos finitos (FEM) e o método dos elementos de contorno (BEM) em duas dimensões e meia (habitualmente denominado 2.5D FEM-BEM). Neste modelo, o FEM é utilizado para modelar a estrutura do túnel e o BEM para modelar o terreno que o envolve localmente. A teoria associada encontra-se detalhada na secção 5.2.2.
- **Modelação da via:** Para modelar a via, foi utilizado um modelo semi-analítico composto por uma viga de Euler-Bernoulli, que simula o carril, e uma distribuição periódica de molas, que simulam as fixações da via à laje. Este modelo é acoplado ao modelo 2.5D FEM-BEM do túnel para obter um modelo via-túnel que simula a infraestrutura. A principal vantagem da utilização deste modelo semi-analítico prende-se com a possibilidade de permitir o cálculo da resposta do sistema para diferentes valores de fixação sem a necessidade de recalculer o modelo 2.5D FEM-BEM, o que torna viável o cálculo da otimização da via. A descrição desta metodologia é aprofundada na secção 5.3.
- **Modelação da passagem do comboio:** Para modelar o veículo, utiliza-se um modelo dinâmico rígido de 10 graus de liberdade, que recorre a uma série de molas, amortecedores e corpos rígidos para modelar os *bogies*, as rodas e o sistema de suspensão primário e secundário do material circulante. A secção 5.4 apresenta uma descrição mais detalhada do modelo semi-analítico do veículo.
- **Forças de interação roda-carril:** Existem dois mecanismos de excitação que contribuem maioritariamente para a vibração induzida pelo tráfego ferroviário:
 - I. A excitação quase-estática;
 - II. A excitação dinâmica.

O primeiro é induzido pela componente estática das cargas móveis aplicadas pelo comboio à via, tendo uma grande importância para comboios de alta velocidade, enquanto que a excitação dinâmica pode ser atribuída a diferentes mecanismos, como a rugosidade da roda, do carril e a variabilidade longitudinal dos parâmetros mecânicos da via.

Dado que o projeto se insere no contexto de uma infraestrutura ferroviária urbana, a excitação dinâmica vertical causada pela rugosidade roda-carril é considerada como a principal fonte de excitação. Assume-se que o desnivelamento dos carris não está correlacionado entre si. A secção 5.4 apresenta mais detalhes sobre a interação roda-carril e o acoplamento veículo-carril.

5.2. Método 2.5 FEM-BEM

Em muitas situações práticas, a geometria tridimensional (3D) do problema é invariante, ou pode ser aproximada como invariante, numa determinada direção do sistema. Aplicando a transformada de Fourier nessa direção, o problema transforma-se no que habitualmente se designa como um problema de duas dimensões e meia (2.5D), algo equivalente a resolver um grupo de problemas bidimensionais (2D) com diferentes números de onda. A vantagem obtida reside na possibilidade de utilizar uma malha bidimensional em problemas tridimensionais.

A solução para o campo tridimensional original pode ser obtida aplicando a transformada inversa de Fourier.

5.2.1. BEM 2.5D elastodinâmico

Utilizando os princípios do método dos elementos fronteira, ou de contorno (BEM), pode-se derivar a equação integral de contorno, *Boundary Element Integration* (BEI em inglês), para a elastodinâmica 2.5D. A representação integral para a elastodinâmica em domínios infinitos 2.5D é dada pela seguinte equação:

$$ku(x', k_y, z', \omega) = \int_{\partial\Omega} U_i^k(x', z', x, -k_y, z) t_i(x, k_y, z, \omega) dsy - \int_{\partial\Omega} T_i^k(x', z', x, -k_y, z) u_i^k(x, k_y, z, \omega) dSy \quad (3)$$

A BEI para domínios infinitos é dada por:

$$u(x', k_y, z') - \int_{\partial\Omega} U_i^k(x', z', x, -k_y, z) t_i(x, k_y, z, \omega) dSy - \int_{\partial\Omega} [T_i^k(x', 0, z', x, -k_y, z, \omega) u_i^k(x, k_y, z, \omega) - T_i^k(x', 0, z', x, k_y = 0, z, \omega = 0) u_i^k(x', k_y, z', \omega)] dSy = 0 \quad (4)$$

Forrest, JA et. al. [8] derivaram as equações mencionadas. Esta equação é normalmente discretizada com elementos de contorno de função de forma linear. Estes elementos têm dois nós associados e utilizam uma função de forma linear. Seja:

$$\{u(x, k_y, z)\}^j = [u_x^1, u_y^1, u_z^1, u_x^2, u_y^2, u_z^2]^T \quad (5)$$

$$\{t(x, k_y, z)\}^j = [t_x^1, t_y^1, t_z^1, t_x^2, t_y^2, t_z^2]^T \quad (6)$$

e dois vetores 6×1 de deslocamentos e tensões nodais para 2 nós no elemento j, e seja

$$\{x\}^j = [x_1, z_1, x_2, z_2]^T \quad (7)$$

um vetor 4×1 formado pelas coordenadas nodais dos elementos. Deste modo, os deslocamentos, as tensões e as coordenadas no elemento de fronteira podem ser aproximados para

$$\{u(x, k_y, z)\}^j = u(k_y, \xi) = \phi(\xi) \cdot \{u(k_y)\}^T \quad (8)$$

$$\{t(x, k_y, z)\}^j = t(k_y, \xi) = \phi(\xi) \cdot \{t(k_y)\}^T \quad (9)$$

$$(x, z)^j = \psi(\xi) \cdot y^T \quad (10)$$

Em que,

$$\phi(\xi) = [\phi_1(\xi)[I]_3 \quad \phi_2(\xi)[I]_3] \text{ and } \psi = [\phi_1(\xi)[I]_2 \quad \phi_2(\xi)[I]_2] \quad (11)$$

ϕ_1 e ϕ_2 são matrizes de funções de forma e $[I]_2$ e $[I]_3$ são matrizes de identidade 2x2 e 3x3, e

$$\phi_1(\xi) = \frac{1}{2} \times (1 - \xi), \quad \phi_2(\xi) = \frac{1}{2} \times (1 + \xi) \quad (12)$$

Inserindo a equação e deixando o ponto (x_0, z_0) seja o nó, isto leva a

$$\{u(k_y, \xi)\}^i + \sum_{j=1}^{NE} ([H(k_y, \xi)]_{ij}^T \cdot [\phi(\xi)] dS) \{u(k_y)\}^j = \sum_{j=1}^{NE} ([U(k_y, \xi)]_{ij}^T \cdot [\phi(\xi)] dS) \{t(k_y)\}^j \quad (13)$$

Onde $u(k_y)$ é o vetor de deslocamento do nó y , $[H]$ e $[U]$ são as matrizes de função de Green das tensões e deslocamentos, que consideram a fonte no nó i e o observador localizado pela equação (10).

Para um sistema com N nós, a equação (13) assume a forma:

$$\begin{pmatrix} u_x^i \\ u_{k_y}^i \\ u_z^i \\ \vdots \\ u_x^i \\ u_{k_y}^i \\ u_z^i \end{pmatrix} + [[H]^{i1} [H]^{i2} \dots [H]^{iN}] \begin{pmatrix} u_x^i \\ u_{k_y}^i \\ u_z^i \\ \vdots \\ u_x^i \\ u_{k_y}^i \\ u_z^i \end{pmatrix} = [[U]^{i1} [U]^{i2} \dots [U]^{iN}] \begin{pmatrix} t_x^i \\ t_{k_y}^i \\ t_z^i \\ \vdots \\ t_x^i \\ t_{k_y}^i \\ t_z^i \end{pmatrix} \quad (14)$$

Em que $i = 1, 2, \dots, N$. $[H]^{iN} y [U]^{ij}$ são matrizes de elementos 3x3. Estas matrizes são construídas concetualmente da mesma forma que as matrizes elementares do método dos elementos finitos. Para exemplificar, assume-se que o nó 2 é comum aos elementos Γ_1 e Γ_2 (os outros nós para o elemento $\partial\Omega_1$ e $\partial\Omega_2$ são 1 e 3, respetivamente).

$$\int_{\partial\Omega_1} [H(k_y, \xi)] [\phi(\xi)] dS y = \int_{\partial\Omega_1} [\phi_1(\xi) H(k_y, \xi)_{i1}^T \quad \phi_2(\xi) H(k_y, \xi)_{i2}^T] dS y = [[h]_1^{i1} [h]_1^{i2}] \quad (15)$$

$$\int_{\partial\Omega_2} [H(k_y, \xi)] [\phi(\xi)] dS y = \int_{\partial\Omega_2} [\phi_1(\xi) H(k_y, \xi)_{i2}^T \quad \phi_2(\xi) H(k_y, \xi)_{i2}^T] dS y = [[h]_2^{i2} [h]_2^{i3}] \quad (16)$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} [H]^{i1} &= [h]_1^{i1} \\ [H]^{i2} &= [h]_1^{i2} + [h]_2^{i2} \\ [H]^{i3} &= [h]_2^{i3} + [h]_3^{i1} \end{aligned} \quad (17)$$

A equação pode ser reescrita, de forma mais compacta,

$$[H] \{u(k_y)\} = [U] \{t(k_y)\} \quad (18)$$

Em que $[H]$ e $[H]$ são matrizes $3N \times 3N$.

5.2.2. Acoplamento FEM-BEM

Como foi mencionado anteriormente, o BEM trata a discretização dos contornos do sistema, enquanto o FEM trata da discretização de todo o domínio. Embora o método BEM seja muito eficiente na resolução de problemas em domínios infinitos, tem certas limitações. Neste sentido, os métodos BEM e FEM complementam-se, sendo por esse motivo conveniente combiná-los para certos tipos de problemas, de modo a se possam explorar as vantagens de cada um dos métodos. Apresenta-se de seguida um resumo a abordagem de acoplamento dos modelos:

A equação para os elementos finitos no domínio 2.5D pode ser escrita como:

$$[H]_{fe}\{u(k_y)\} = \{F(k_y)\} \quad (19)$$

Onde $[H]$ é a matriz de rigidez dinâmica e $F(k_y)$ é o vetor de forças nodais.

A equação dos elementos de contorno é:

$$[H]_{be}\{u(k_y)\} = [U]_{be}\{t(k_y)\} \quad (20)$$

em que $[H]$ e $[U]$ são as matrizes correspondentes às de tensões e deslocamentos de Green e $\{u(k_y)\}$ y $\{t(k_y)\}$ são os vetores de deslocamentos e tensões. Pode escrever-se as equações como:

$$[R]_{be}\{u(k_y)\} = \{t(k_y)\} \quad (21)$$

em que,

$$[R]_{be} = [U]_{be}^{-1}[H]_{be} \quad (22)$$

A continuidade de deslocamentos e equilíbrio das forças nas interfaces asseguram o acoplamento entre os elementos de fronteira e os subdomínios de elementos finitos.

Os deslocamentos, tensões e forças nodais nas interfaces entre os elementos finitos e os elementos de fronteira são representados por $\{u(k_y)\}_I$, $\{t(k_y)\}_I$, e $\{F(k_y)\}_I$. Da mesma forma, os deslocamentos, tensões e forças nos nós livres são representados por $\{u(k_y)\}_{beR}$, $\{t(k_y)\}_{beR}$ para o subdomínio BEM, e $\{u(k_y)\}_{feR}$ e $\{F(k_y)\}_{feR}$ para o subdomínio FEM. Assim, a equação do elemento de fronteira pode ser separada em:

$$\begin{bmatrix} [R]_{beRR} & [R]_{beRI} \\ [R]_{beIR} & [R]_{beII} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_{beR} \\ \{u(k_y)\}_I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{t(k_y)\}_{beR} \\ \{t(k_y)\}_I \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Enquanto a equação de elementos finitos pode ser separada em:

$$\begin{bmatrix} [K]_{beRR} & [K]_{beRI} \\ [K]_{beIR} & [K]_{beII} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_I \\ \{u(k_y)\}_{feR} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\{F(k_y)\}_I \\ \{F(k_y)\}_{feR} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

Pode ser construída uma matriz de transformação $[T]$ que converte as trações nodais $t(k_y)$ em forças nodais $\{F(k_y)\}_I$.

$$\{F(k_y)\}_I = [T]\{t(k_y)\}_I \quad (25)$$

Assim, se esta matriz de transformação for aplicada aos nós da interface entre os elementos de fronteira e os elementos finitos, obtém-se

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{R}]_{beRR} & [\mathbf{R}]_{beRI} \\ [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beIR} & [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beII} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_{beR} \\ \{u(k_y)\}_I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{t(k_y)\}_{beR} \\ \{F(k_y)\}_I \end{Bmatrix} \quad (26)$$

As trações são convertidas em forças nodais equivalentes. Se as equações para o domínio dos elementos finitos forem combinadas com as equações para o domínio dos elementos fronteira, obtém-se

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{R}]_{beRR} & [\mathbf{R}]_{beRI} & 0 \\ [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beIR} & [\mathbf{T}][\mathbf{R}]_{beII} + [\mathbf{K}]_{feII} & [\mathbf{K}]_{feIR} \\ 0 & [\mathbf{K}]_{feRI} & [\mathbf{K}]_{feRR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u(k_y)\}_{beR} \\ \{u(k_y)\}_I \\ \{u(k_y)\}_{feR} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{t(k_y)\}_{beR} \\ 0 \\ \{F(k_y)\}_I \end{Bmatrix} \quad (27)$$

5.3. Modelo Semi-analítico da via

Esta secção explica sucintamente o modelo semi-analítico que foi utilizado para modelar a via. A equação diferencial de uma viga de Euler-Bernoulli com apoios discretos pode ser escrita através da expressão

$$E_r I_r \frac{\partial^4 z_r}{\partial x^4} + \rho_r S_r \frac{\partial^2 z_r}{\partial t^2} + \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\left(k_f + c_f \frac{\partial}{\partial t} \right) (z_{rn} - z_{tn}) \delta(x - x_n) \right] = e^{i\bar{\omega}t} \delta(x - v_t t) \quad (28)$$

em que E_r é o módulo de Young do carril, I_r é o momento de inércia do carril, ρ_r a densidade do carril, S_r a superfície do carril, z_r o deslocamento vertical do carril, z_{rn} o deslocamento do carril nas posições de fixação, z_{tn} o deslocamento do túnel nas posições de fixação, k_f a rigidez dos fixadores, c_f o amortecimento viscoso, v_t a velocidade do comboio.

Aplicando uma dupla transformada de Fourier à equação anterior, é possível obter a expressão

$$\begin{aligned} (E_r I_r k_x^4 + \rho_r S_r \omega^2) \bar{Z}_r \\ + \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} [(k_f + ic_f \omega)(Z_{rn} - Z_{tn}) e^{ik_x x_n}] = 2\pi \delta(\bar{\omega} - (\omega - k_x v_t)) \end{aligned} \quad (29)$$

que pode ser resolvida encontrando primeiro os deslocamentos nas posições dos dispositivos de fixação e adicionando-os depois à expressão como dados conhecidos. Uma vez feito isto, esta expressão é definida no domínio da frequência e do número de onda e, por conseguinte, o seu acoplamento com as funções de Green calculadas utilizando o modelo 2.5D FEM-BEM é concretizado.

5.4. Acoplamento veículo-via (forças de interação dinâmica roda-carril)

Os deslocamentos verticais dos dois carris no domínio da frequência devido às forças de contacto roda/carril podem ser representados por

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{Z}_{r1}^{\omega/r} \\ \mathbf{Z}_{r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{H}_{r1r1}^{\omega/r} & \mathbf{H}_{r1r2}^{\omega/r} \\ \mathbf{H}_{r2r1}^{\omega/r} & \mathbf{H}_{r2r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{r1}^{\omega/r} \\ \mathbf{F}_{r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

em que \mathbf{Z}_{r1} e \mathbf{Z}_{r2} são os deslocamentos verticais dos carris esquerdo e direito, respetivamente; \mathbf{H}_{r1r1} e \mathbf{H}_{r2r2} são as matrizes de recetividade direta dos carris esquerdo e direito, respetivamente; $\mathbf{H}_{r1r2} = \mathbf{H}_{r2r1}$ é a matriz de recetividade cruzada entre os carris esquerdo e direito; \mathbf{F}_{r1} e \mathbf{F}_{r2} são os vetores das forças de interação roda-carril associadas aos carris esquerdo e direito, respetivamente.

A resposta do veículo pode ser escrita como

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{Z}_{v1}^{\omega/r} \\ \mathbf{Z}_{v2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{H}_{v1}^{\omega/r} & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{v2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{r1}^{\omega/r} \\ \mathbf{F}_{r2}^{\omega/r} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

em que \mathbf{Z}_{v1} e \mathbf{Z}_{v2} são os deslocamentos verticais das rodas do veículo em contacto com as faixas da esquerda e da direita, respetivamente, \mathbf{H}_{v1} e \mathbf{H}_{v2} são as matrizes de recetividade de cada veículo em todas as posições dos eixos do veículo.

A matriz de recetividade do veículo é obtida através do modelo dinâmico do veículo, que neste estudo é considerado como sendo o modelo de corpo rígido bidimensional (2D), como mostra a Figura 27. Neste caso, a estrutura sobre a via tem dez graus de liberdade, ou seja, seis deslocamentos verticais e três movimentos de rotação. O modelo 3D de cada veículo é constituído por dois modelos 2D desacoplados, aplicados separadamente em cada carril.

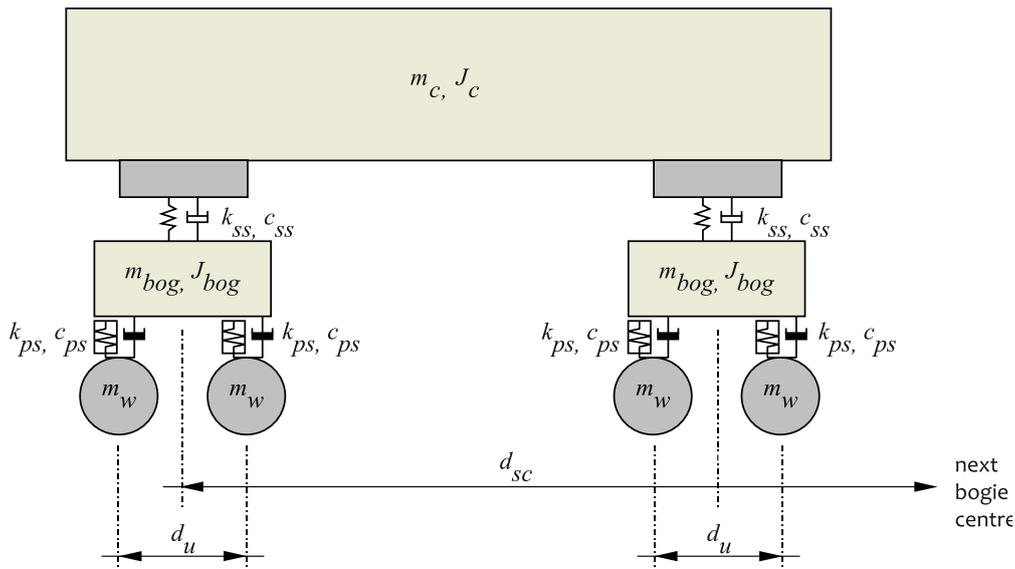


Figura 27 – Modelo teórico do veículo

A equação dinâmica do veículo no sistema de acoplamento pode ser descrita da seguinte forma:

$$[M]_u \{\ddot{a}\}_u + [C]_u \{\dot{a}\}_u + [K]_u \{a\}_u = \{Q\}_u \quad (32)$$

em que $[M]_u$, $[C]_u$ e $[K]_u$ são matrizes de massa, amortecimento e rigidez do veículo, respetivamente.

$$[M]_u = \text{diag}\{M_C J_C M_t J_t M_t J_t M_{w1} M_{w2} M_{w3} M_{w4}\} \quad (33)$$

$$[K]_u = \begin{bmatrix} 2K_{s2} & 0 & -K_{s2} & 0 & -K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2L_2^2 K_{s2} & -L_2 K_{s2} & 0 & L_2 K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2K_{s1} + K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} & -K_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & 2L_1^2 K_{s1} & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} L_1 & K_{s1} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2K_{s1} + K_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} & -K_{s1} & 0 \\ & & & 2L_1^2 K_{s1} & 0 & 0 & 0 & -K_{s1} L_1 & K_{s1} L_1 & 0 \\ & & & & & & & & & & K_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & K_{s1} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & K_{s1} & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & K_{s1} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$[C]_u = \begin{bmatrix} 2C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2L_2^2 C_{s2} & -L_2 C_{s2} & 0 & L_2 C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & C_{s1} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} & 0 \\ & & & 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & C_{s1} L_1 & 0 \\ & & & & & & & & & & C_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & C_{s1} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & C_{s1} & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & C_{s1} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Tirando partido das equações (33) a (35), pode obter-se as matrizes de recetância do veículo, H_{v1} e H_{v2} .

As equações (30) e (31) podem ser reescritas de forma mais compacta, de acordo com a expressão

$$\mathbf{Z}_r^{w/r} = \mathbf{H}_r^{w/r} \mathbf{F}^{w/r}, \quad \mathbf{Z}_v^{w/r} = -\mathbf{H}_v^{w/r} \mathbf{F}^{w/r} \quad (36)$$

Admitindo um contacto Hertziano linear, as forças de interação roda-carril podem obter-se no domínio da frequência através da expressão

$$\mathbf{F}^{w/r} = k_H (\mathbf{Z}_v^{w/r} - \mathbf{Z}_r^{w/r} + \mathbf{E}_r) \quad (37)$$

em que k_H é a rigidez da mola hertziana linear, considerada igual em todos os contactos roda-carril, e \mathbf{E}_r é o vetor de amplitudes complexas de irregularidades dos carris em todos os pontos de contacto roda-carril.

Combinando-se as equações (36) e (37), pode obter-se uma função de transferência no domínio da frequência entre a rugosidade dos carris e as forças de interação dinâmica roda-carril, que podem ser escritas como:

$$F^{w/r} = k_H \left(H_v^w - H_r^w + k_H^{-1} I \right)^{-1} E_r \quad (38)$$

em que I é a matriz de identidade.

5.5. Transmissão aos edifícios

Finalmente, a última parte do modelo considera a transmissão da energia vibratória do solo aos edifícios existentes nas imediações da infraestrutura ferroviária.

A transmissão de vibrações para o interior dos edifícios ocorre quando a energia vibratória proveniente do solo chega ao edifício e é transmitida através da fundação, perdendo parte da sua energia devido à alteração da impedância do meio, o que se designa por um primeiro estágio de atenuação devido ao acoplamento solo-estrutura. A partir da fundação, as vibrações propagam-se através da estrutura do edifício até aos diferentes pisos do edifício, o que provoca normalmente uma segunda fase de atenuação, e finalmente, em cada piso, a energia vibratória propaga-se através da laje, provocando normalmente uma amplificação dos níveis de vibração no centro da mesma em relação aos das extremidades, que pela configuração estrutural são os pontos mais próximos dos apoios da laje e, portanto, mais rígidos e com menor capacidade de mobilidade e vibração mais limitada.

A *Federal Transit Administration* [4] dos Estados Unidos estabelece valores para cada uma das duas fases de atenuação acima referidas, bem como valores para a amplificação devida à vibração transmitida laje de cada piso, apresentados no que são aqui apresentados nos Quadro 9 e Quadro 10.

Estes valores divergem dos publicados por outros investigadores ou determinados experimentalmente pela equipa técnica que redige este projeto. Além disso, estes valores não têm em conta o conteúdo em frequência da energia vibratória.

Por conseguinte, atendendo ao nível de detalhe, complexidade e precisão do modelo são considerados os espectros experimentais decorrentes de um vasto número de campanhas de caracterização experimentais no domínio da medição e modelação da propagação de vibrações de origem ferroviária para aos edifícios. Os valores de cada um dos fatores de ajuste são discutidos em seguida:

- Acoplamento solo-edifício

Os resultados estatísticos mostram uma diminuição global do nível de vibração no piso térreo do edifício em relação ao nível de vibração ao nível da rua.

- Atenuação vertical

Os resultados estatísticos mostram que o nível de vibração diminui com a altura do edifício, pelo que o piso mais expectável em que exista uma menor atenuação do nível de vibração é o primeiro piso. De qualquer modo, esta variação do nível de vibração do primeiro piso em relação ao nível de vibração do rés do chão é mínima, pelo que, seguindo um critério conservativo, e atendendo ao princípio da prudência se considera uma atenuação nula do nível de vibração entre o rés do chão e o primeiro piso, que será a considerada para a avaliação.

- Amplificação da laje de piso

As lajes dos edifícios (não térreas) têm um efeito de amplificação do nível de vibração. O comportamento do acoplamento solo-edifício e da amplificação da laje em cada piso, função da frequência será diferente consoante o tipo de edifício. Na área em estudo, a maioria dos edifícios pode ser dividida em duas tipologias principais, nomeadamente os que têm uma estrutura de betão e os que têm uma estrutura de paredes estruturais ou de alvenaria portante. Na Figura 28 apresentam-se as funções de resposta dinâmica destas duas tipologias, que incorporam o acoplamento dinâmico solo-edifício e a amplificação da resposta da laje, em que os valores negativos indicam atenuação e os valores positivos indicam amplificação do nível de vibração.

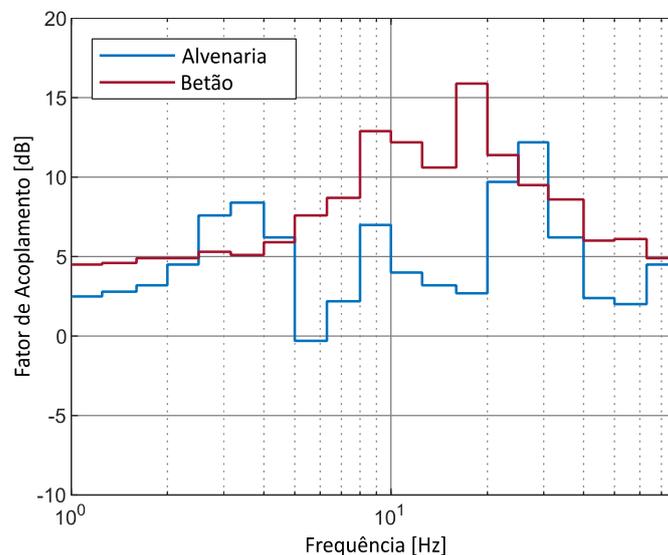
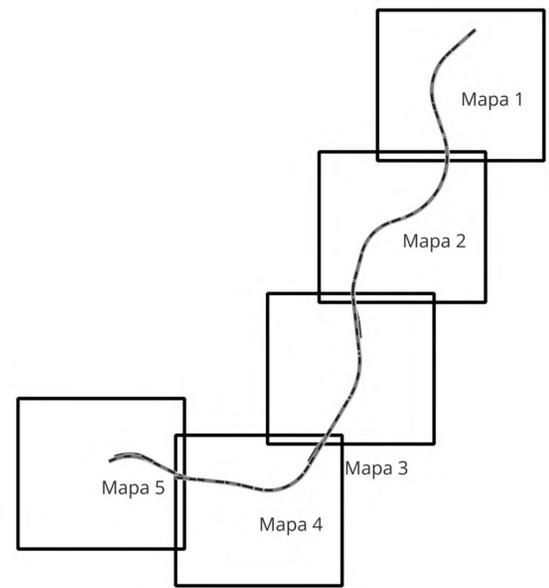
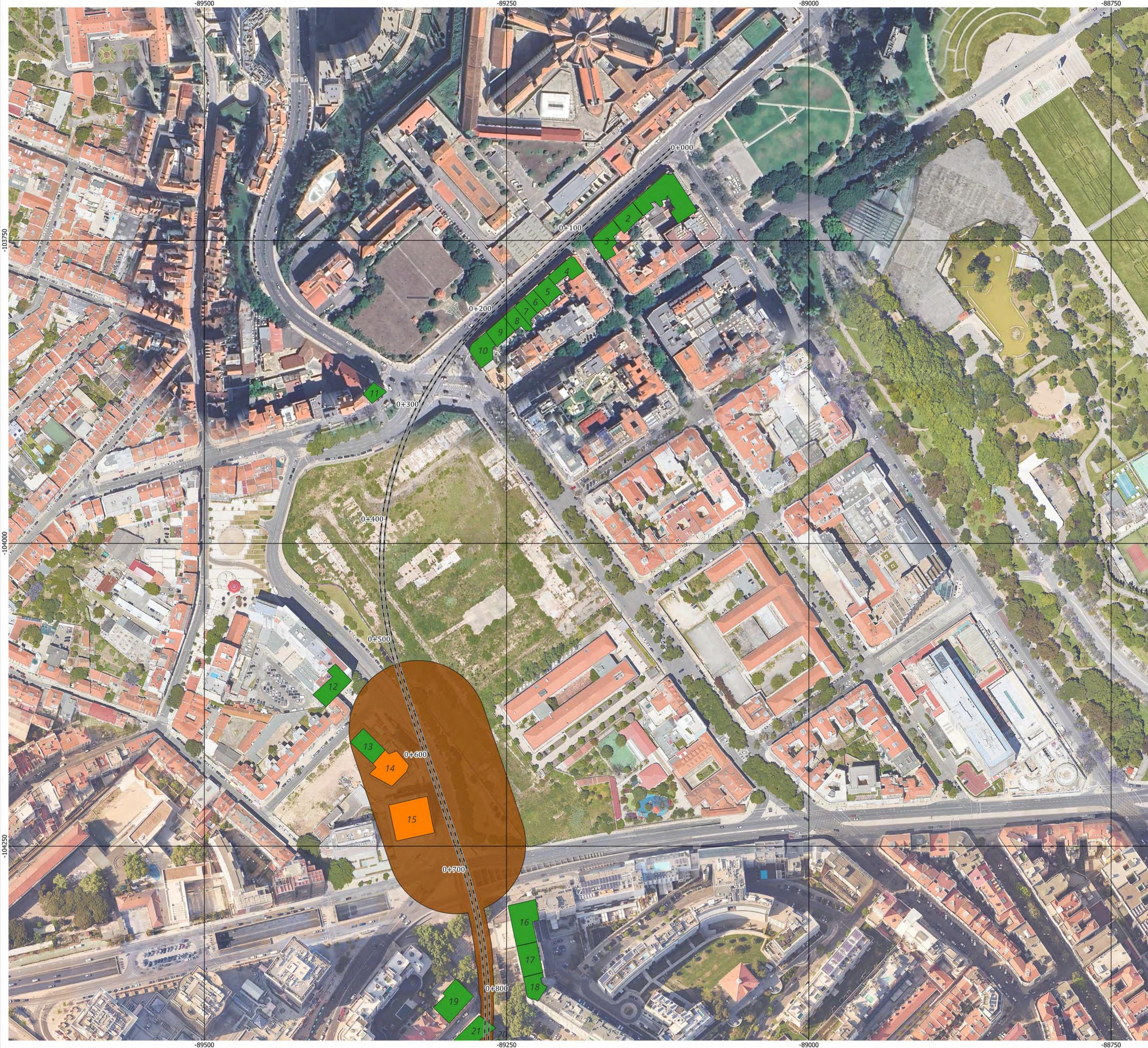


Figura 28 – Funções de resposta dinâmica das duas principais tipologias de edifícios

ANEXO 6 – APRESENTAÇÃO DO RESULTADO DE AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS AOS EDIFÍCIOS



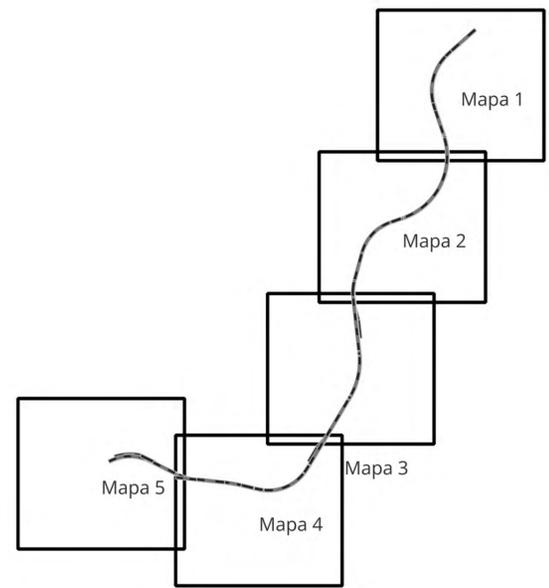
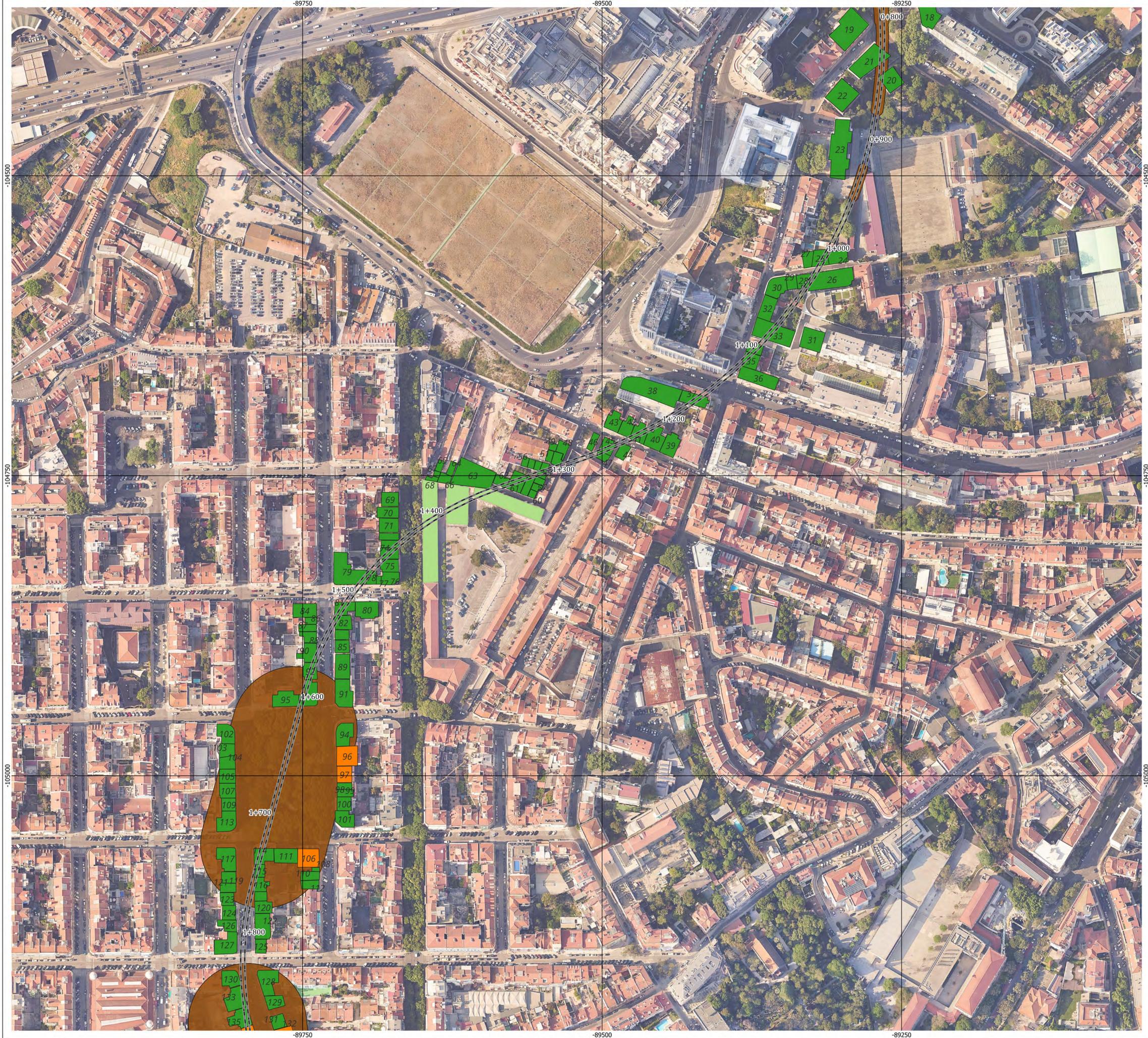
Legenda:

Eixo da Via	
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
$dB(V) < 80.8$	
$80.8 < dB(V) < 85.8$	
$dB(V) > 85.8$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

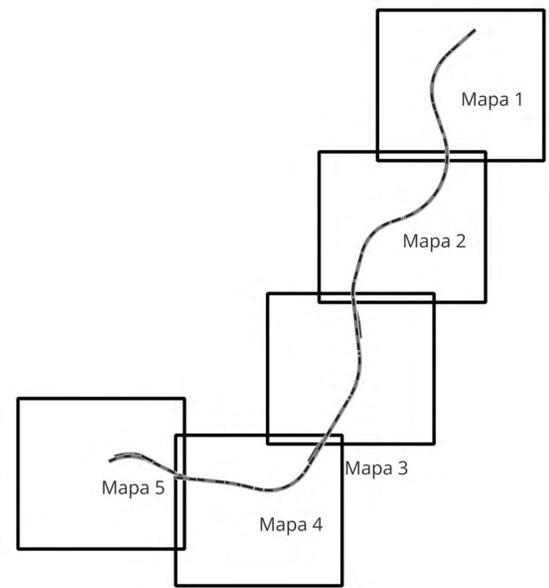
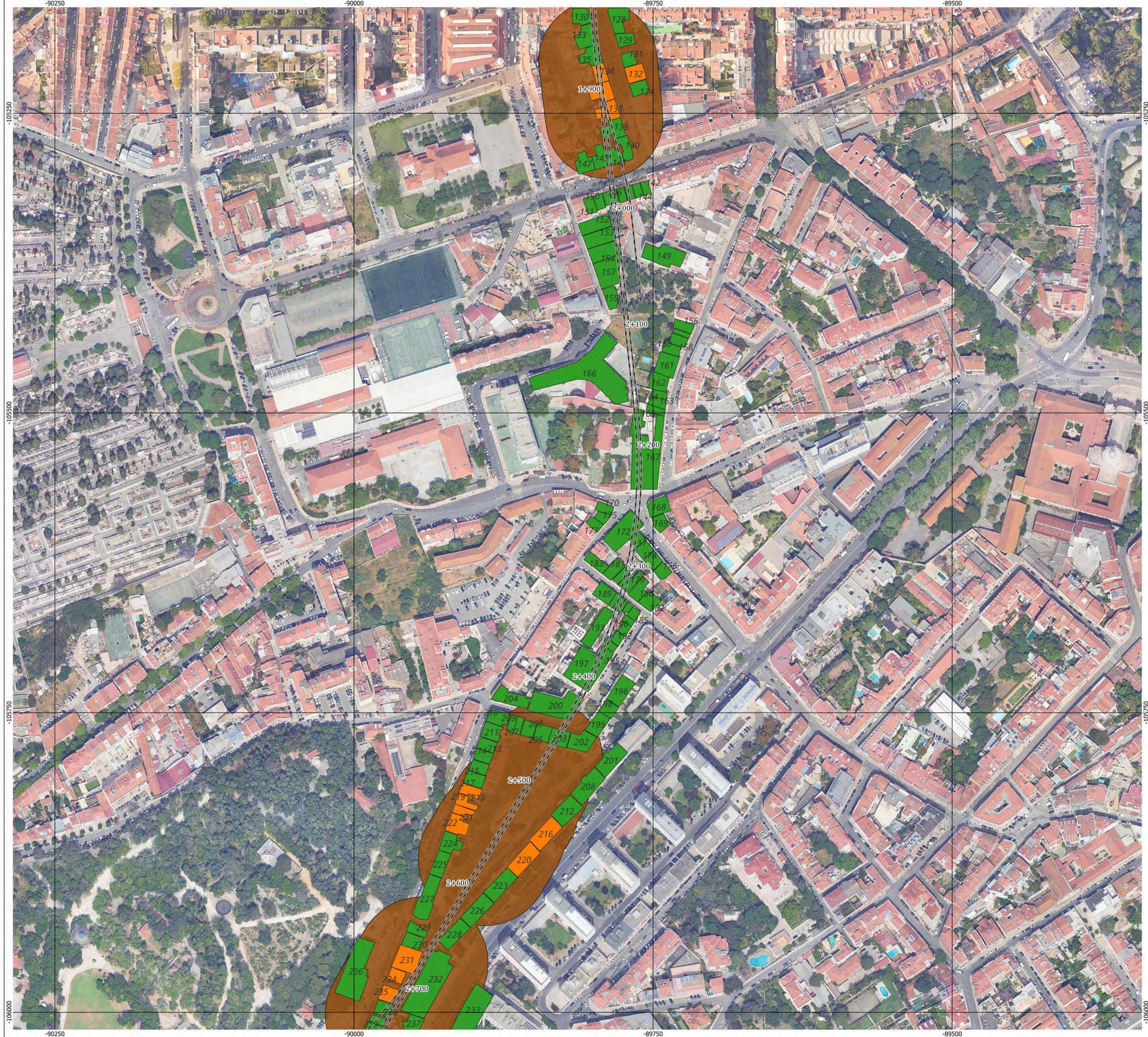
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m
Data 27/09/2024	Folha 1/5
	Desenho Mapa 1



Legenda:

Eixo da Via	—
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
dB(V) < 80.8	■
80.8 < dB(V) < 85.8	■
dB(V) > 85.8	■

Logótipos e informação complementar		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	Formato A1 (594x841)
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m
27/09/2024	Folha 2/5	Desenho Mapa 2



Legenda:

Eixo da Via

Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios

$dB(V) < 80.8$

$80.8 < dB(V) < 85.8$

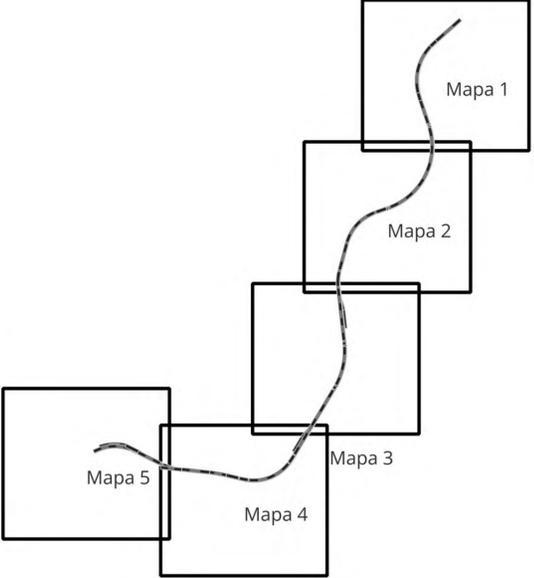
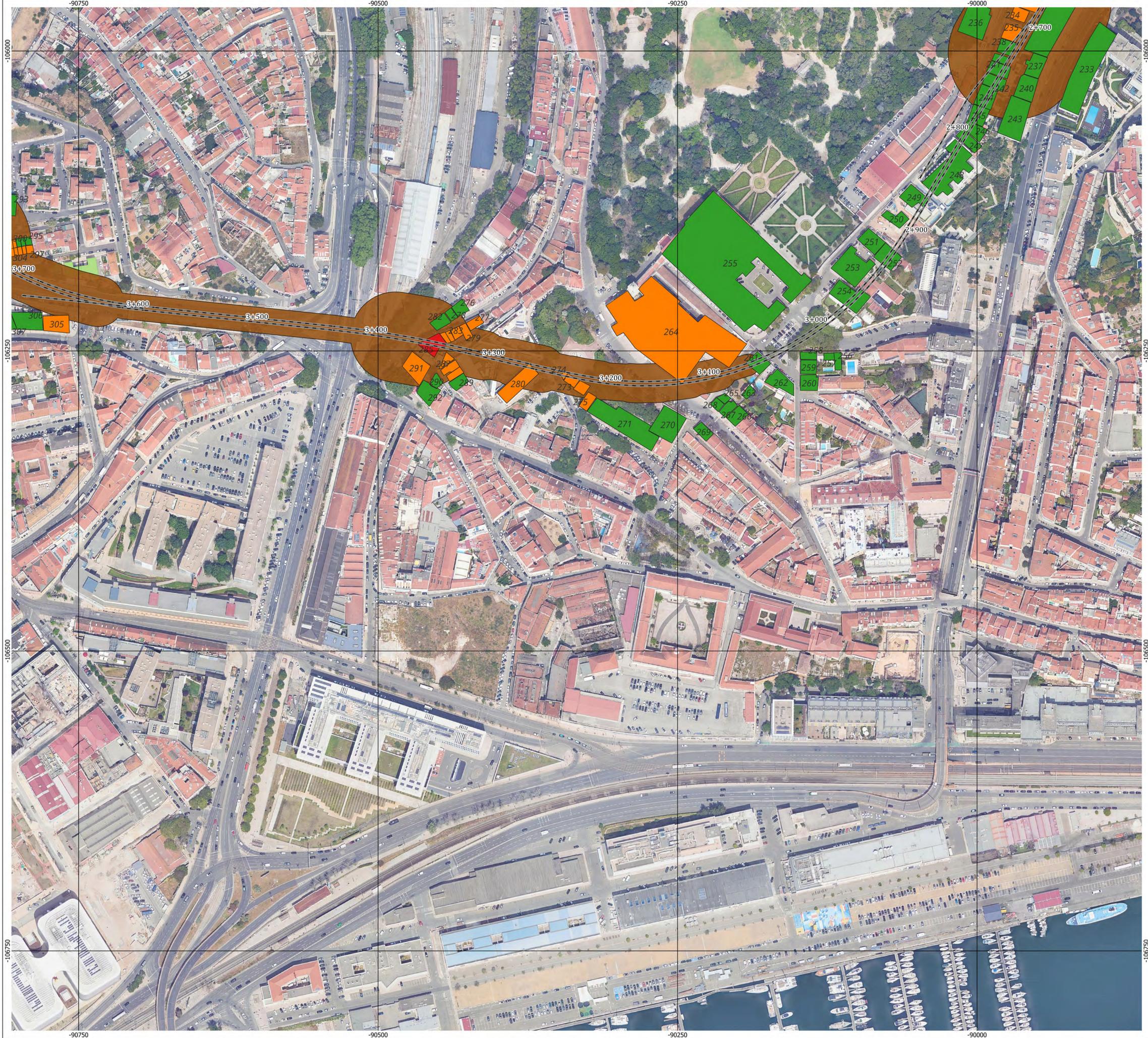
$dB(V) > 85.8$

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>3/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 3</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

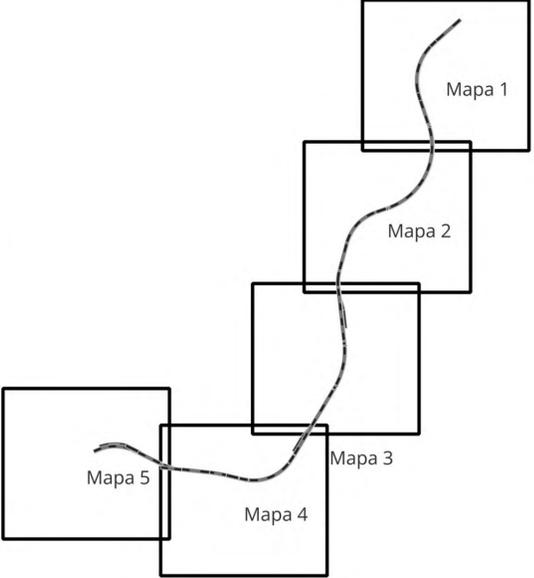
Eixo da Via	—
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
$dB(V) < 80.8$	■
$80.8 < dB(V) < 85.8$	■
$dB(V) > 85.8$	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha 4/5	Desenho Mapa 4
------------	-----------	----------------



Legenda:

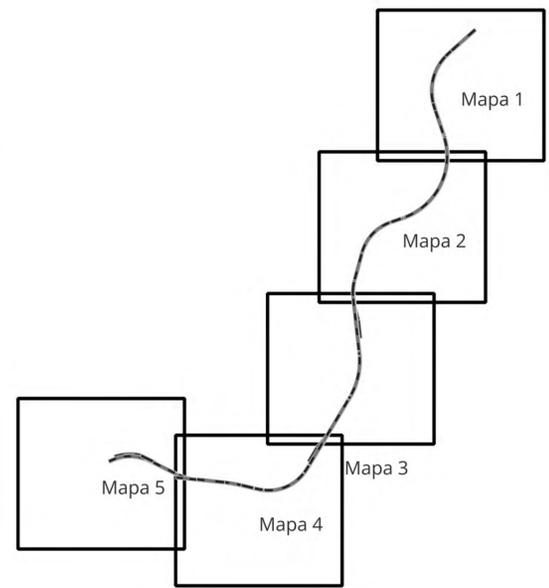
Eixo da Via	—
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
dB(V) < 80.8	■ (Green)
80.8 < dB(V) < 85.8	■ (Orange)
dB(V) > 85.8	■ (Red)

Logótipos e informação complementar

Projetistas:

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (594x841)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m
27/09/2024	Folha 5/5 Desenho Mapa 5

ANEXO 7 – APRESENTAÇÃO DO RESULTADO DE AVALIAÇÃO DO RUÍDO RE-RADIADO NOS EDIFÍCIOS



Legenda:

Eixo da Via

Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

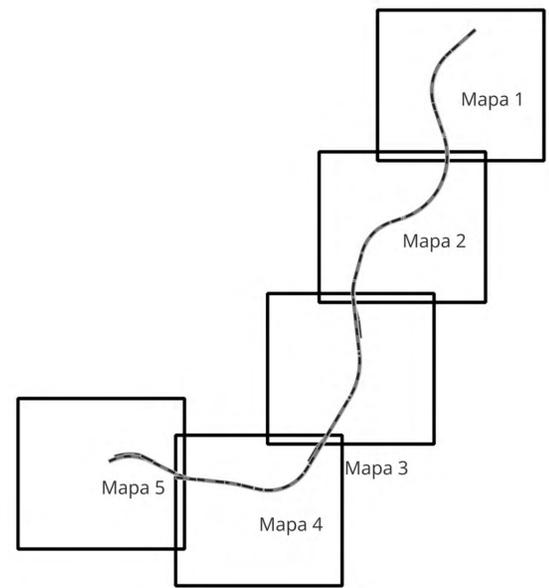
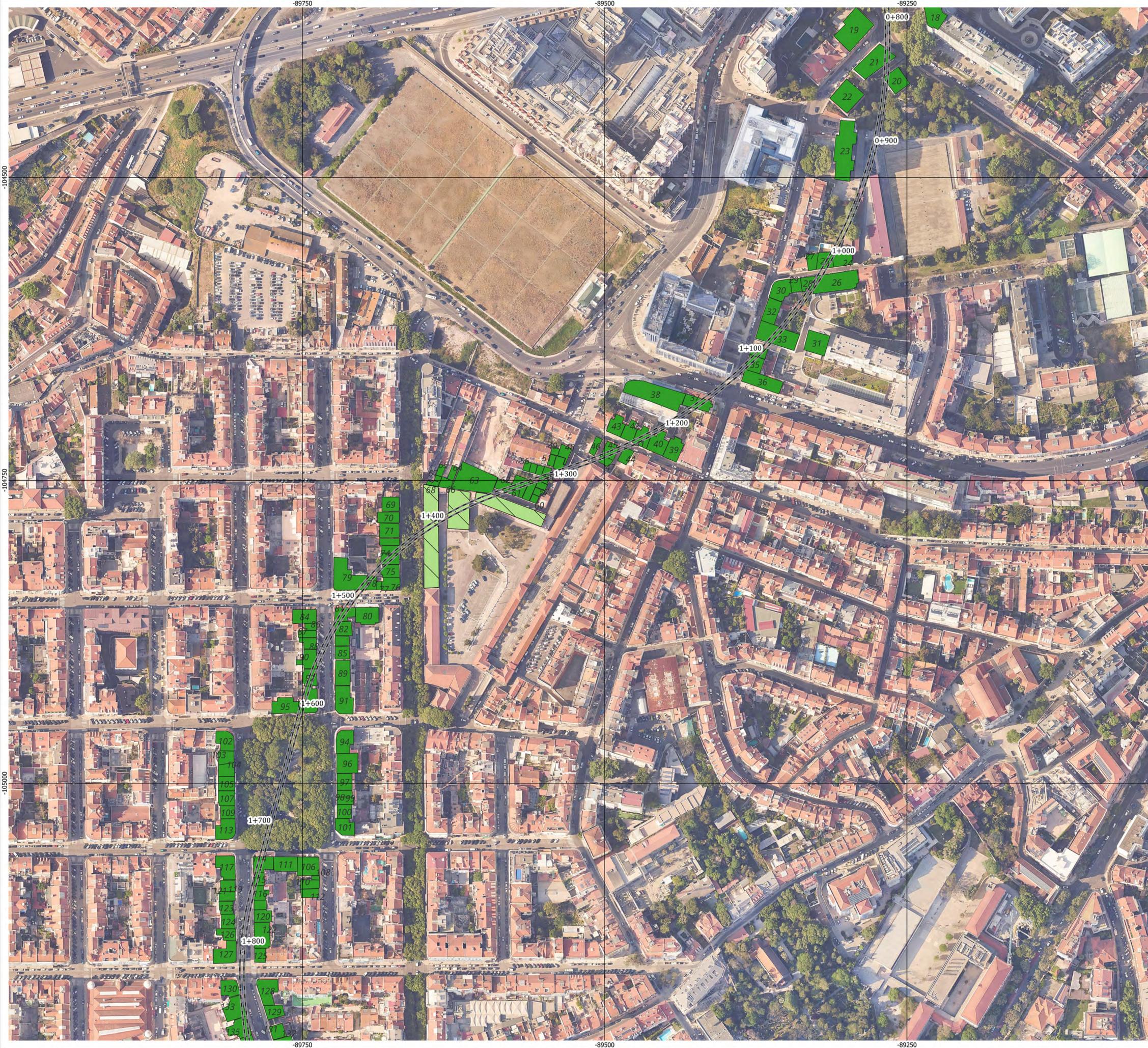
80.8 < dB(V) < 85.8

dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>1/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 1</p>



Legenda:

Eixo da Via

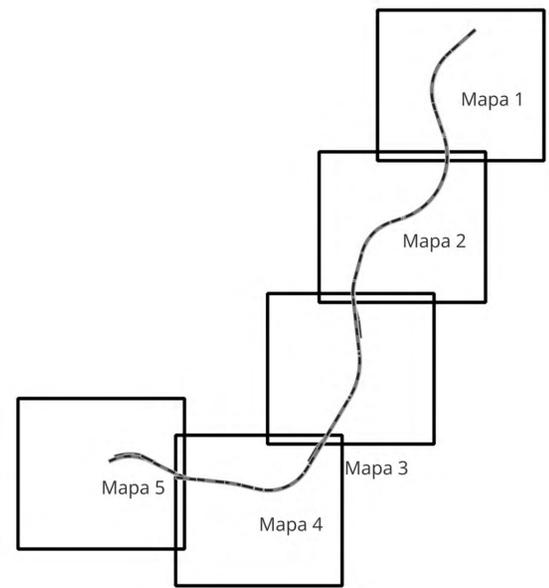
Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar Motoa Engil Engenharia, efcec, coba, JET, JLCM, SVA, Metropolitano de Lisboa		Sistema de Referência EPSG 3763
Especialidade Técnica Vibrações	Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (594x841)
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m	Folha 2/5
Data 27/09/2024	Desenho Mapa 2	



Legenda:

Eixo da Via

Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

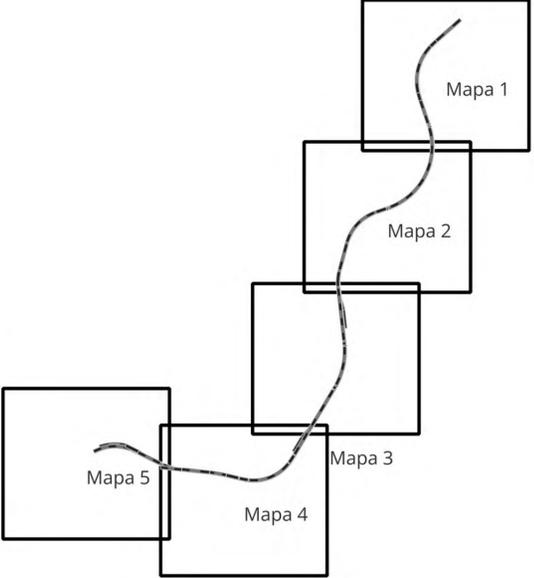
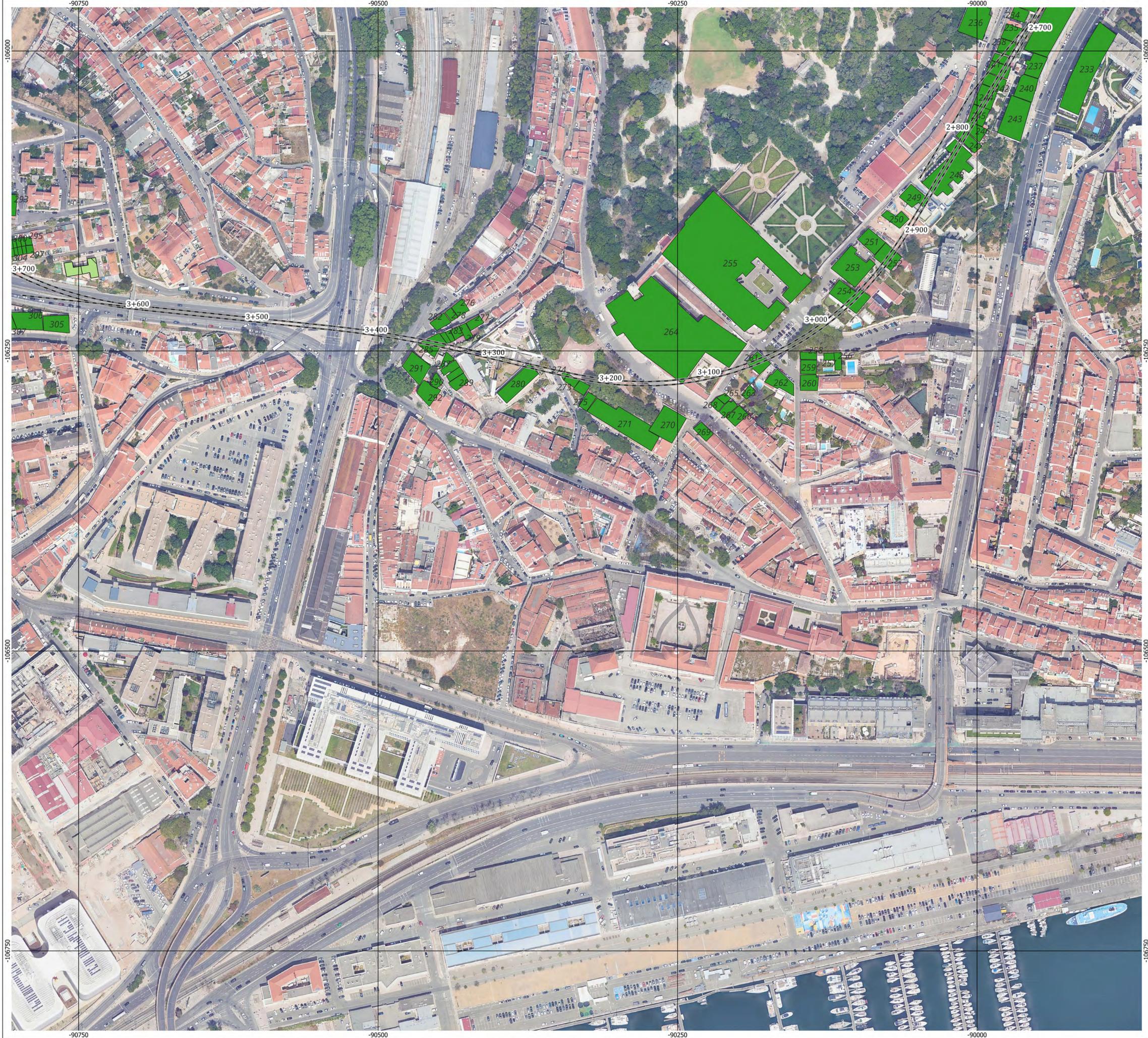
dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	--	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>3/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 3</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

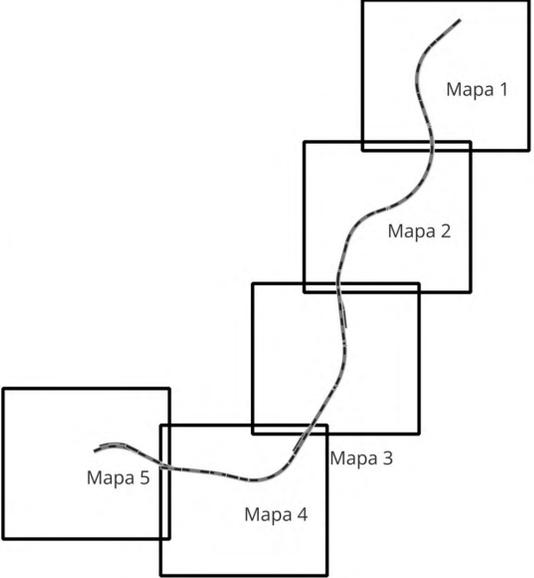
Eixo da Via	—
Avaliação do nível de vibração nos edifícios	
dB(V) < 80.8	■
80.8 < dB(V) < 85.8	■
dB(V) > 95.8	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha 4/5	Desenho Mapa 4
------------	-----------	----------------



Legenda:

Eixo da Via	
Avaliação do nível de vibração nos edifícios dB(V) < 80.8	
80.8 < dB(V) < 85.8	
dB(V) > 95.8	

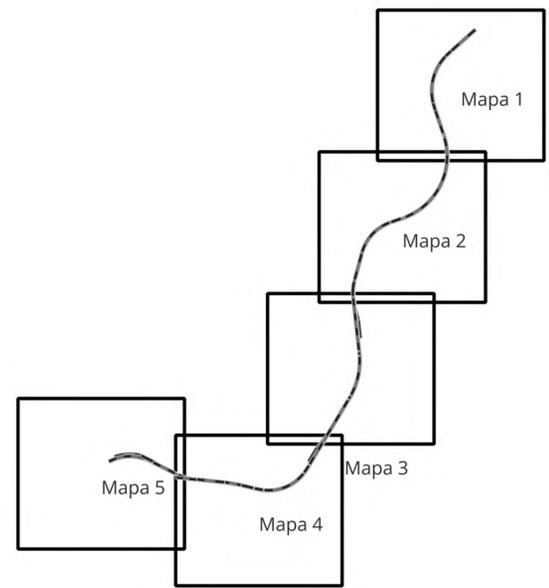
Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m
27/09/2024	Folha 5/5 Desenho Mapa 5

BIBLIOGRAFIA

- [1] I. Standard, *ISO2631-2: Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure*, 2003.
- [2] I. P. d. Qualidade, *NP2074(2015) - Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas*, 2015.
- [3] “REQUISITO TÉCNICO RT 1001,” 2022.
- [4] A. a. A. M. a. B. E. a. R. C. a. M. L. a. S. H. Quagliata, “Transit noise and vibration impact assessment manual,” Federal Transit Administration , USA, 2018.
- [5] F. R. A. C. Paulo Candeias, “PLANO DE EXPANSÃO DO METROPOLITANO DE LISBOA – PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA: TRECHO S. SEBASTIÃO A ALCÂNTARA (PK 0+0 AO PK 3+230),” LISBOA, 2022.
- [6] P. C. P. F. M. C. R. & C. A. Lopes, “Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings.,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. 61, pp. 269-285, 2014.
- [7] O. Inácio, “TOMO II – GERAL, PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA ENTRE S. SEBASTIÃO E ALCÂNTARA, DO METROPOLITANO DE LISBOA E.P.E.,” 2022.
- [8] J. a. H. H. Forrest, “A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration,” *Journal of sound and vibration*, vol. 294, no. 4-5, pp. 678-705, 2006.
- [9] W. ZHAI, “Vehicle–Track Coupled Dynamics Theory and Applications,” *Science Press Beijing* , 2020.



Legenda:

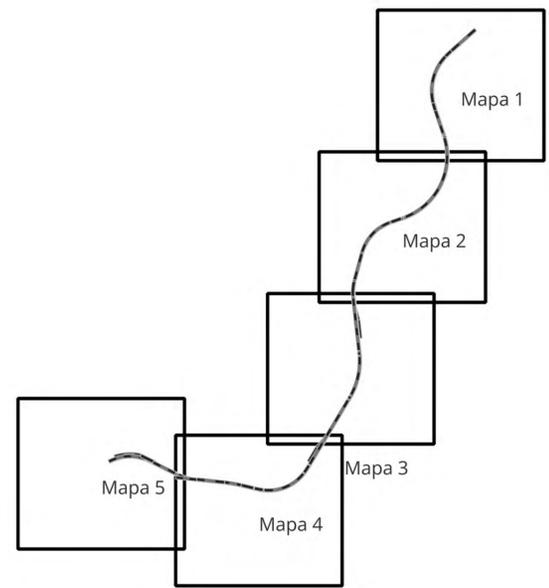
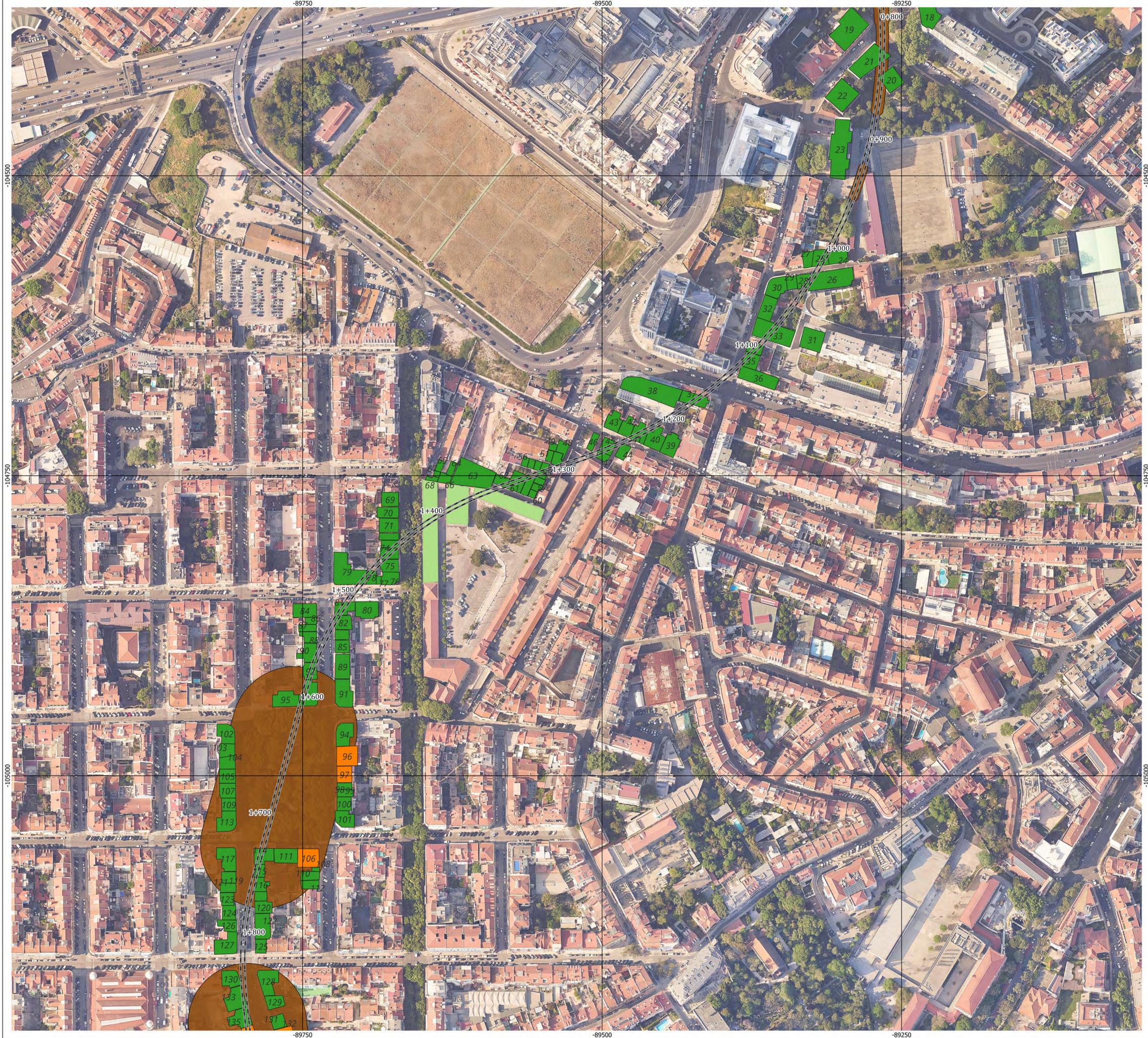
Eixo da Via	
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
$dB(V) < 80.8$	
$80.8 < dB(V) < 85.8$	
$dB(V) > 85.8$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha 1/5	Desenho Mapa 1
------------	--------------	-------------------



Legenda:

Eixo da Via

Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

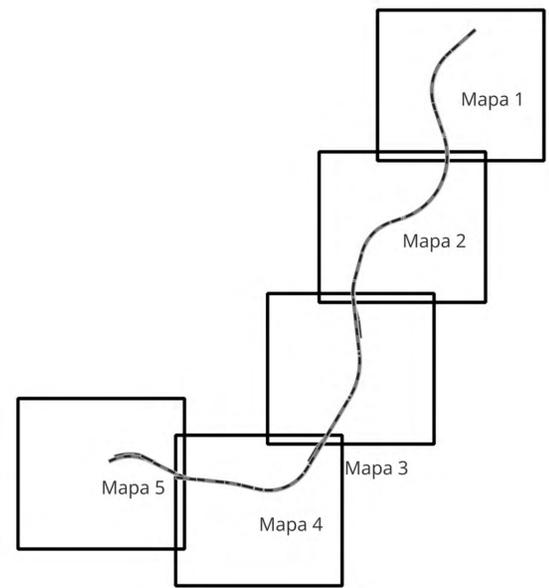
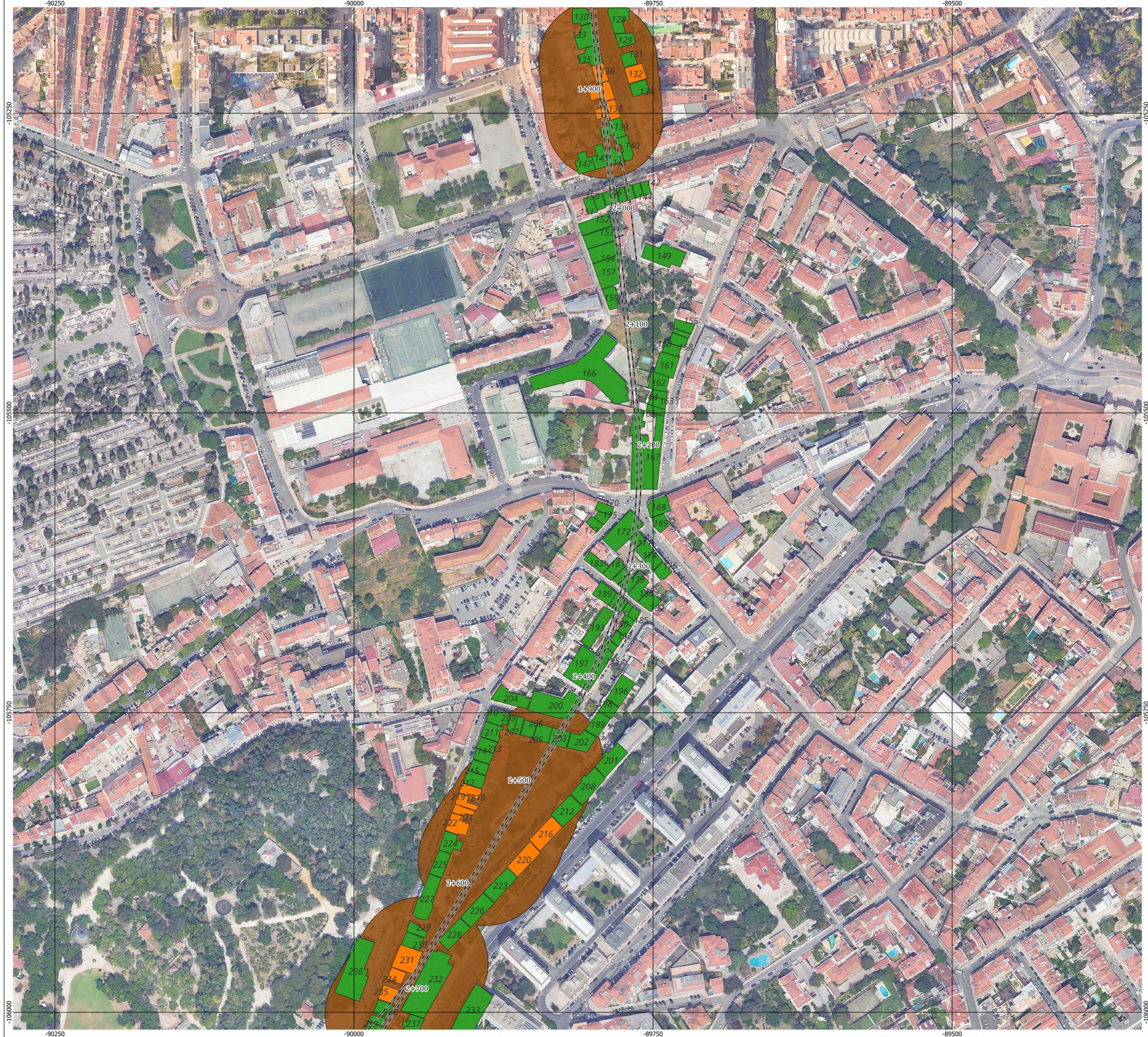
dB(V) > 85.8

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	---

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>2/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 2</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

Eixo da Via

Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

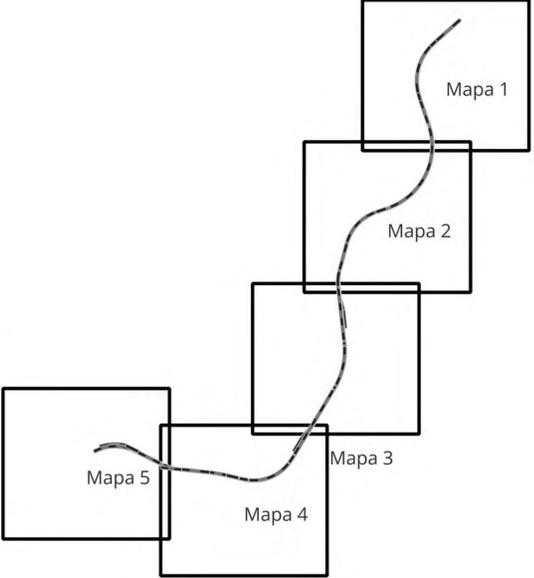
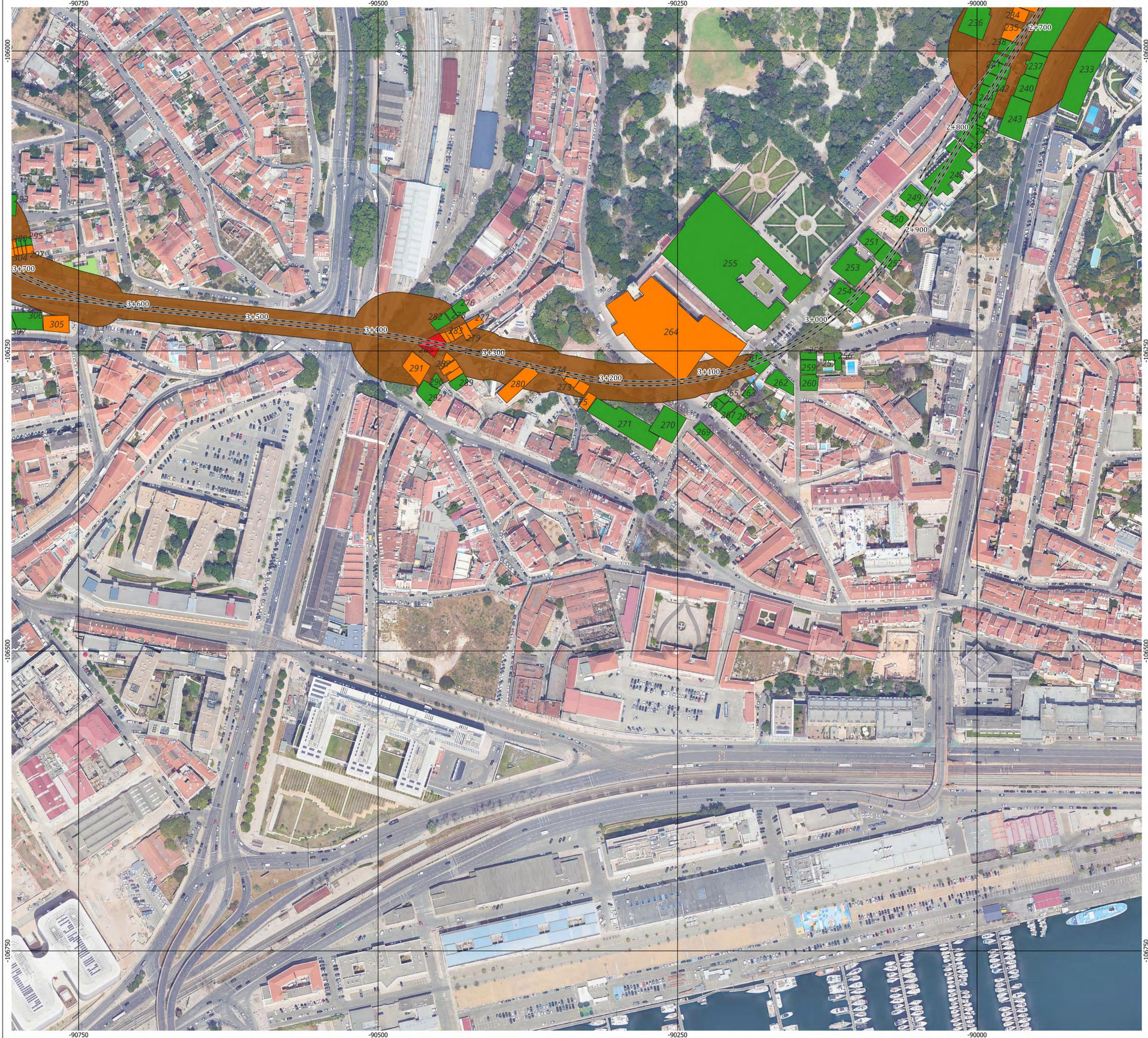
dB(V) > 85.8

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>3/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 3</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

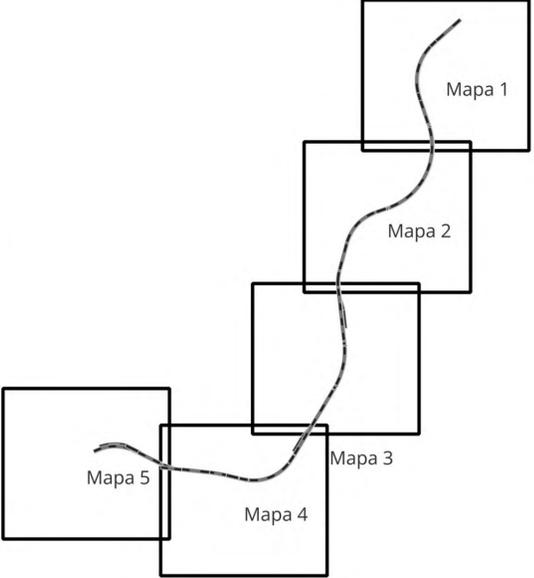
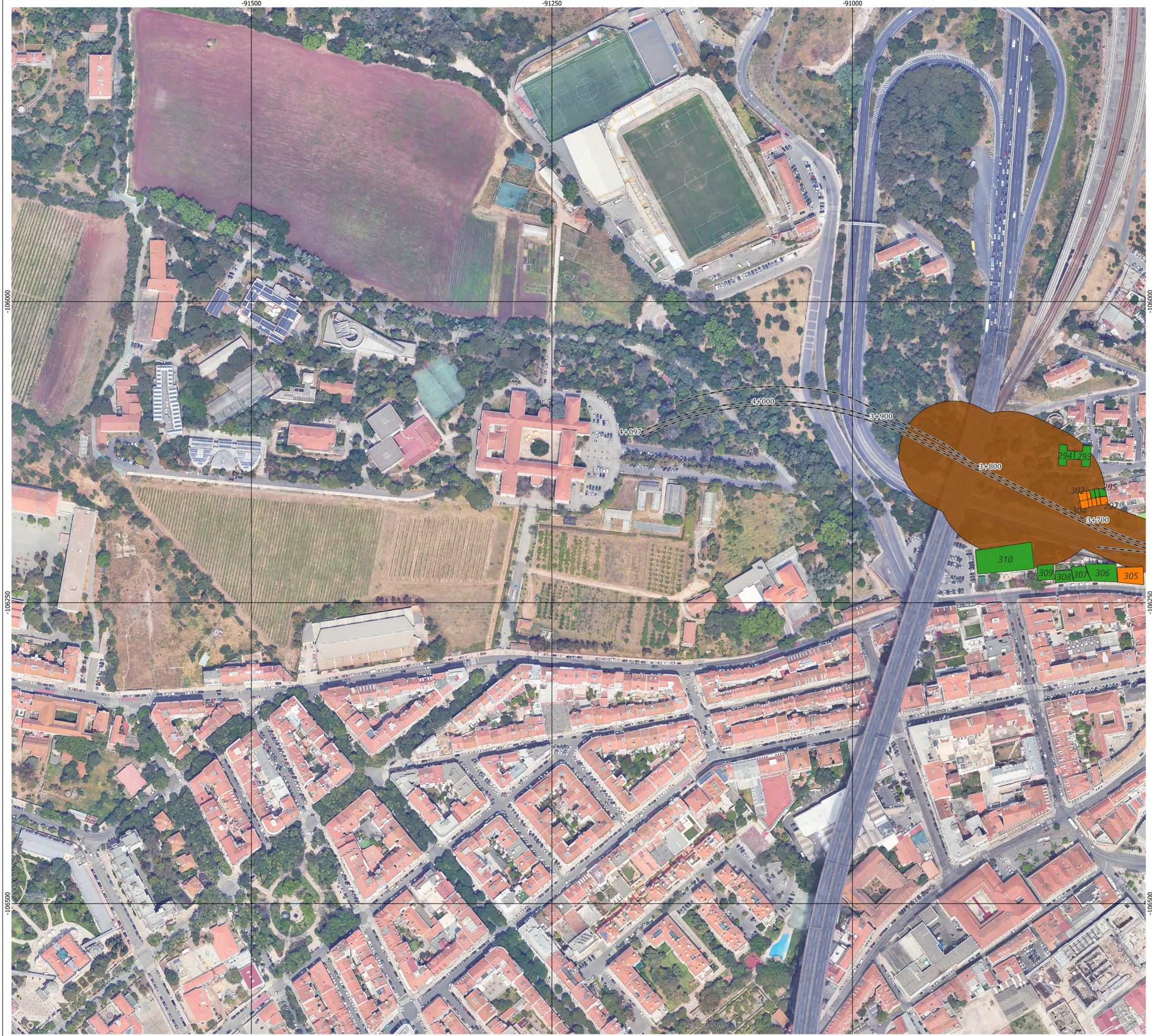
Eixo da Via	—
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
$dB(V) < 80.8$	■
$80.8 < dB(V) < 85.8$	■
$dB(V) > 85.8$	■

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m

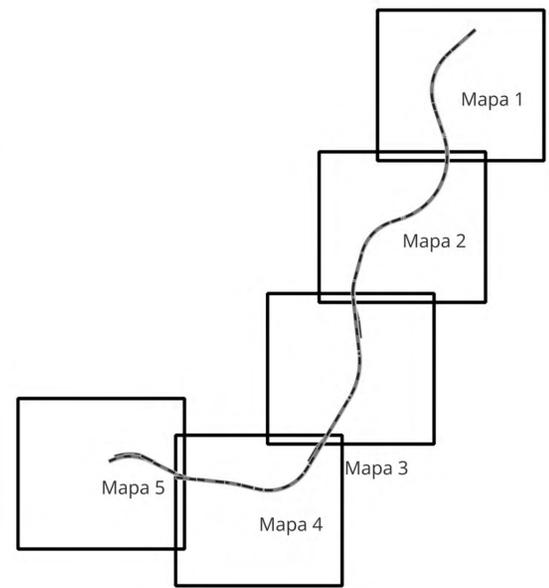
27/09/2024	Folha 4/5	Desenho Mapa 4
------------	-----------	----------------



Legenda:

Eixo da Via	—
Níveis de Vibração Avaliados nos Edifícios	
dB(V) < 80.8	■
80.8 < dB(V) < 85.8	■
dB(V) > 85.8	■

Logótipos e informação complementar Motoaengil Engenharia, efac, coba, JET, JLCM, SVA, Metropolitano de Lisboa	
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das vibrações induzidas nos edifícios - Resultado Global Análise Preliminar	Escala 0 25 m
27/09/2024	Folha 5/5 Desenho Mapa 5



Legenda:

Eixo da Via

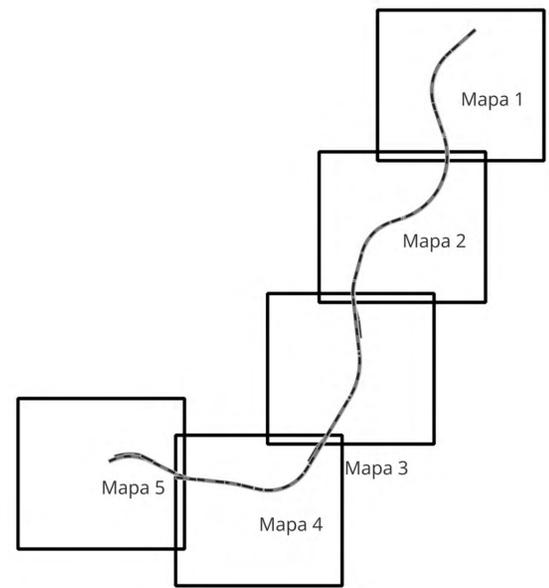
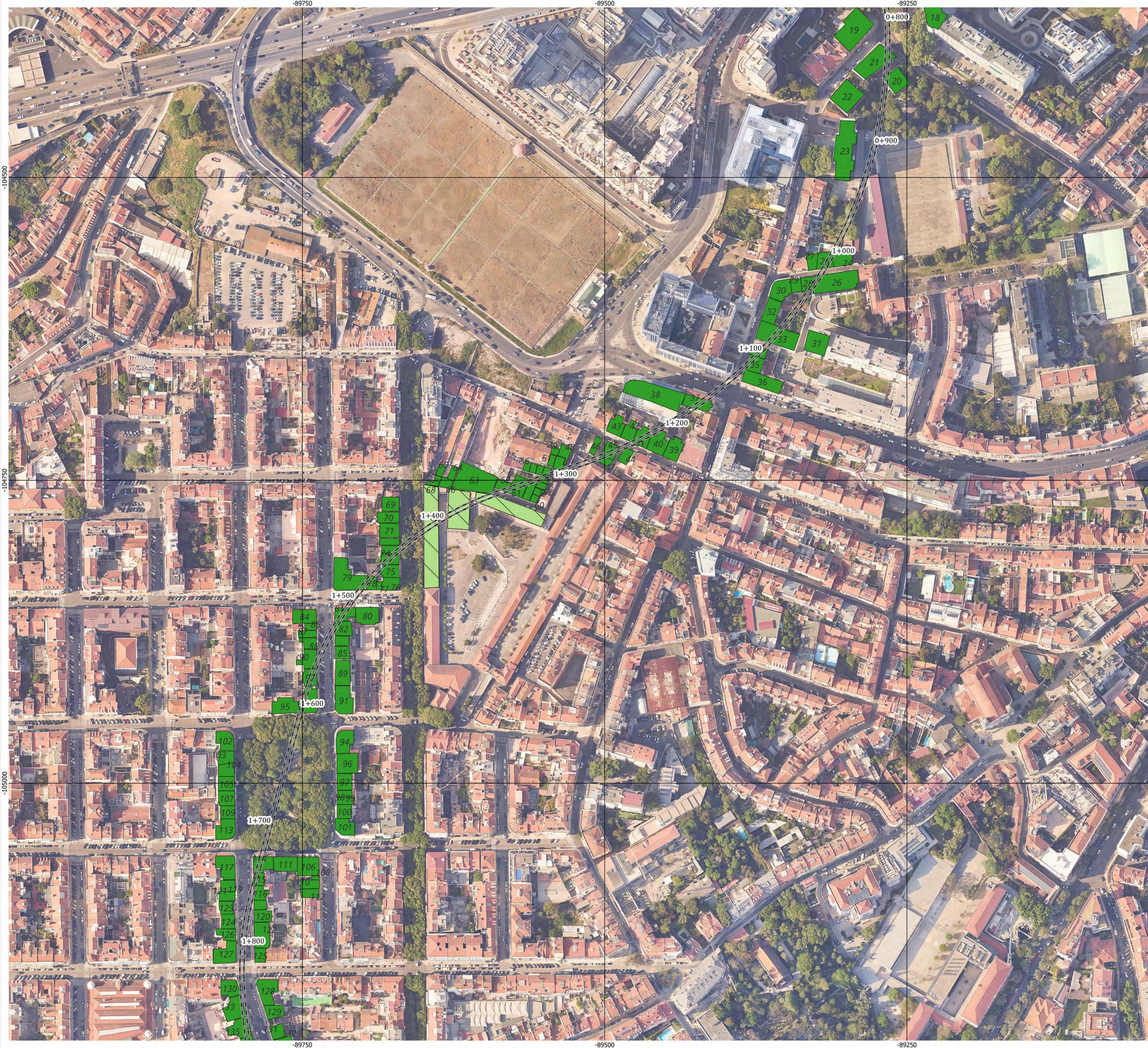
Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar			
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Formato A1 (99x641)	Escala 0 25 m	
27/09/2024	Folha 1/5	Desenho Mapa 1	



Legenda:

Eixo da Via

Avaliação do nível de vibração nos edifícios

dB(V) < 80.8

80.8 < dB(V) < 85.8

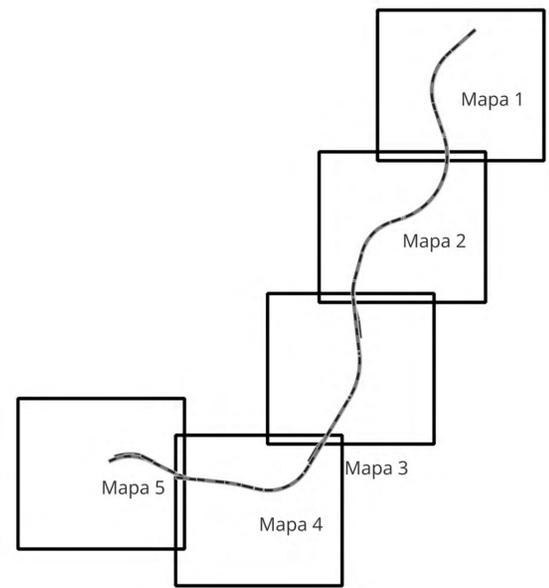
dB(V) > 95.8

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (99x641)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>2/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 2</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

Eixo da Via

Avaliação do nível de vibração nos edifícios

$dB(V) < 80.8$

$80.8 < dB(V) < 85.8$

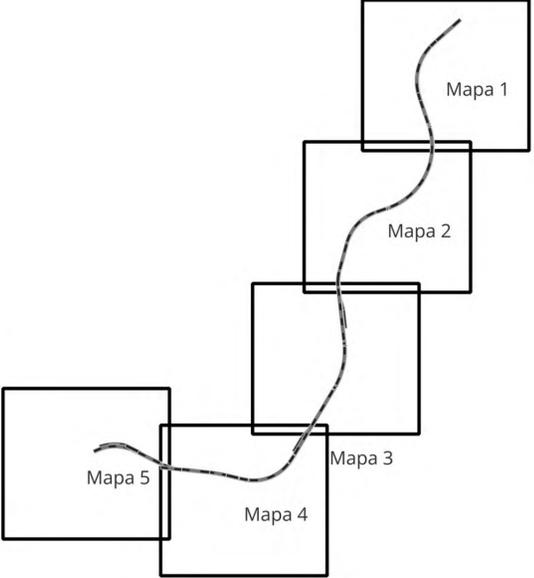
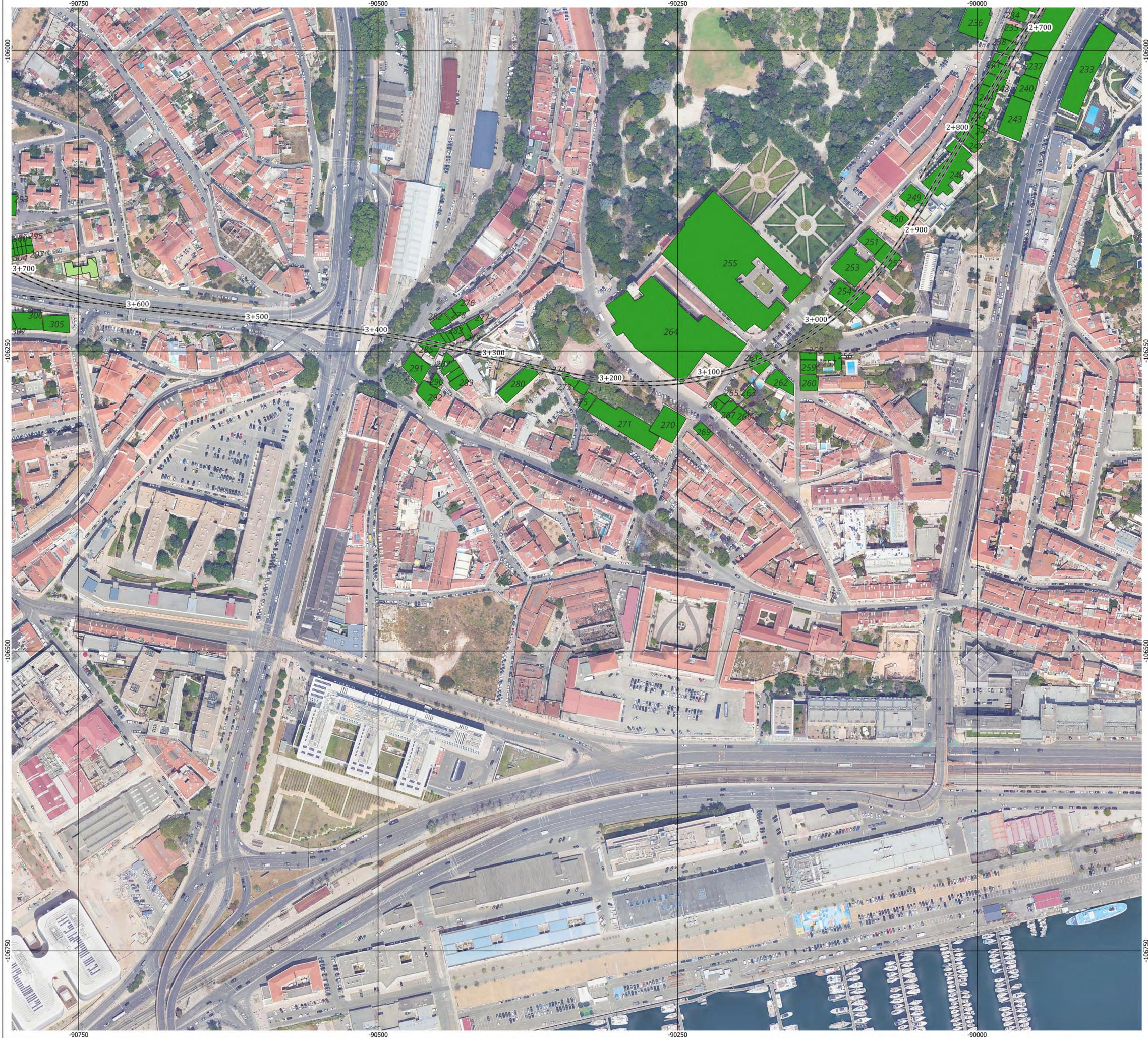
$dB(V) > 95.8$

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	--	--

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>3/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 3</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------



Legenda:

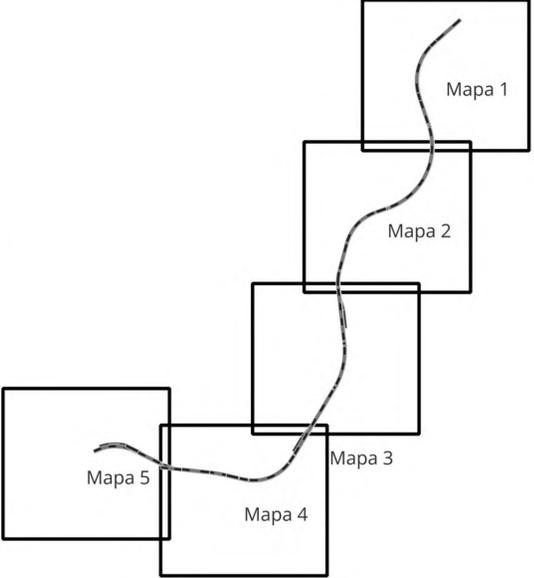
Eixo da Via	
Avaliação do nível de vibração nos edifícios	
dB(V) < 80.8	
80.8 < dB(V) < 85.8	
dB(V) > 95.8	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m

27/09/2024	Folha 4/5	Desenho Mapa 4
------------	-----------	----------------



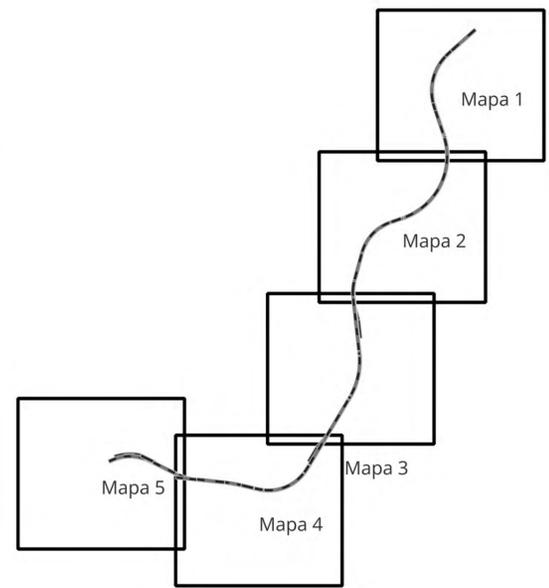
Legenda:

Eixo da Via	
Avaliação do nível de vibração nos edifícios dB(V) < 80.8	
80.8 < dB(V) < 85.8	
dB(V) > 95.8	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)
Título do Desenho Avaliação das Vibrações Induzidas nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m
27/09/2024	Folha 5/5 Desenho Mapa 5

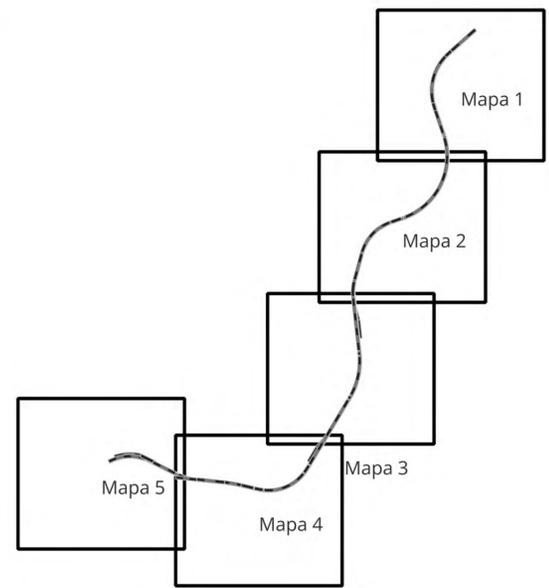
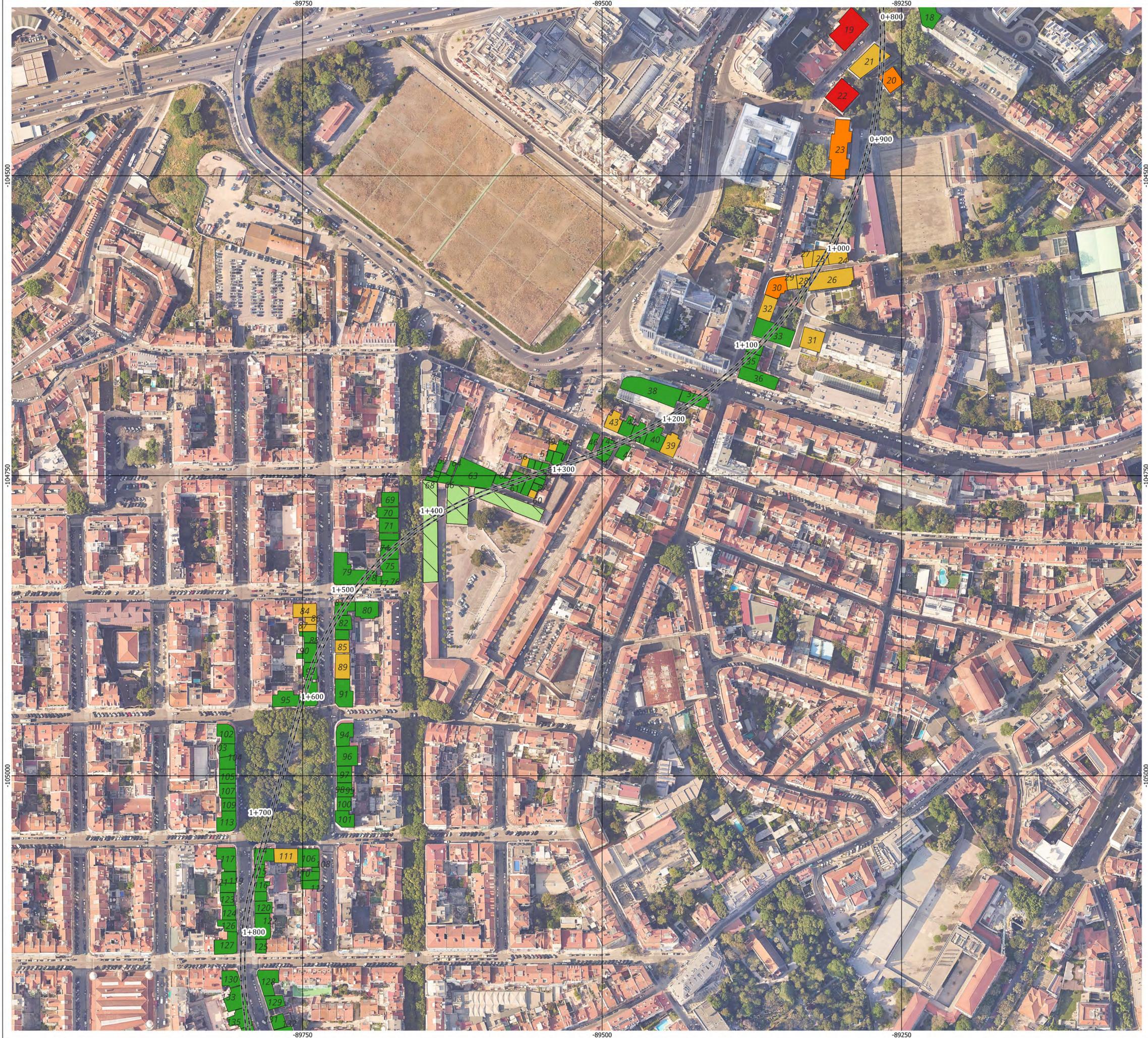


Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V_{eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V_{eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V_{eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V_{eficaz} \leq 0.04$	
$V_{eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (594x841)	
Título do Desenho Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m	
Data 27/09/2024	Folha 1/5	Desenho Mapa 1



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

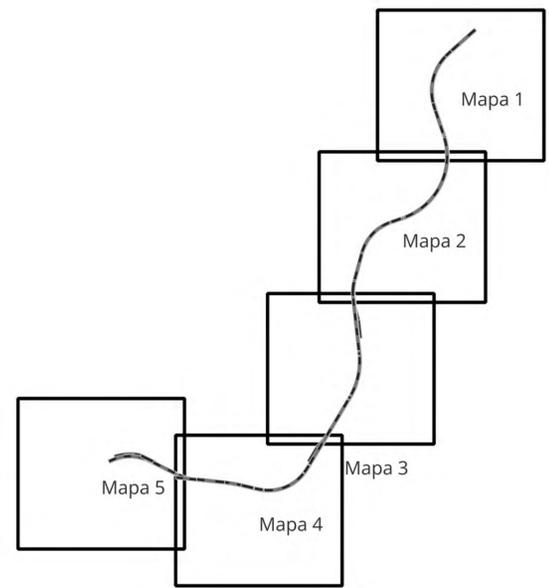
$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas

<p>Logótipos e informação complementar</p> <p>Projetistas</p>	<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p> <p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPG 3763</p> <p>Formato</p> <p>A1 (594x841)</p> <p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
---	---	---

<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>2/5</p>	<p>Desenho</p> <p>Mapa 2</p>
-------------------	-------------------------	------------------------------

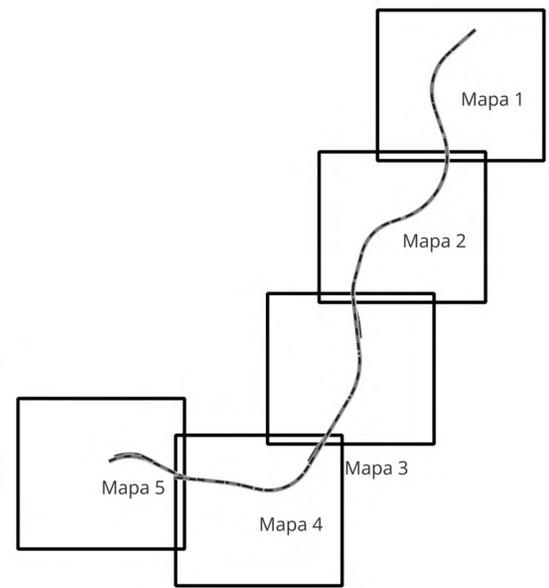
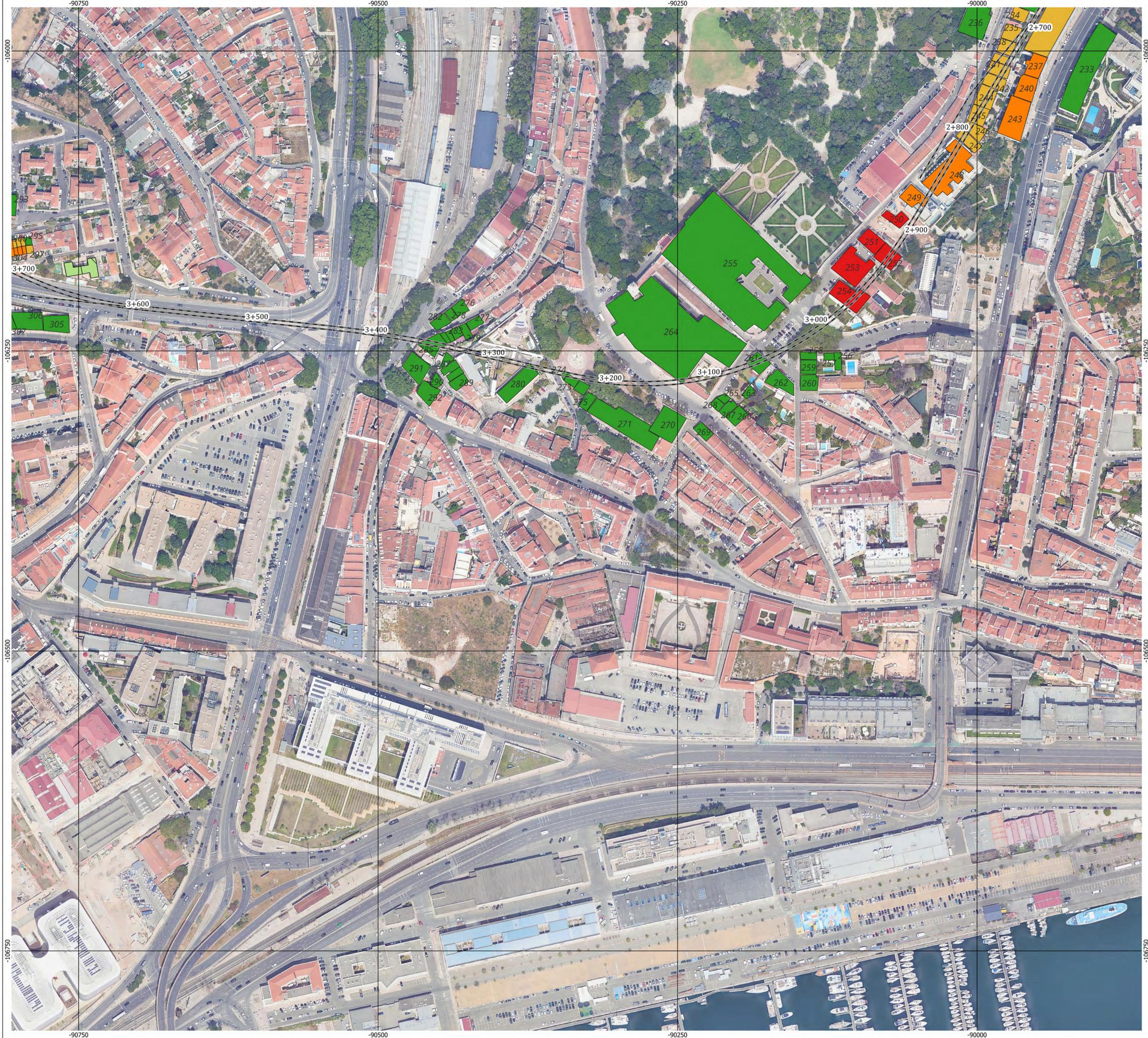


Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	Formato A1 (594x841)
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.		Escala 0 25 m
Título do Desenho Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica		Folha 3/5
Data 27/09/2024		Desenho Mapa 3

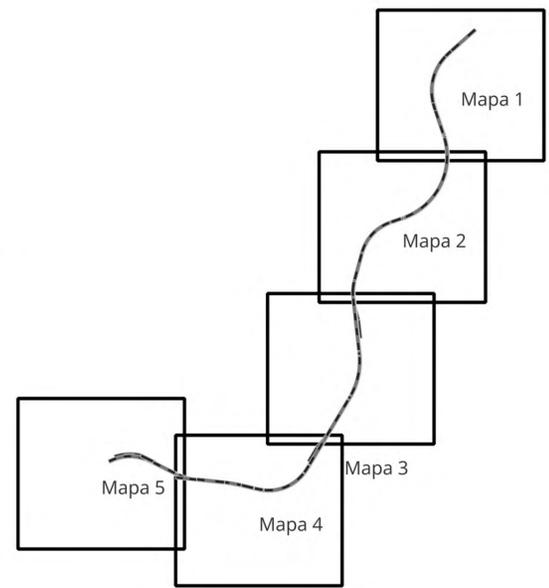


Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	■
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	■
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	■
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	■
$V \text{ eficaz} > 0.04$	■

Logótipos e informação complementar		
Projetistas 		
Especialidade Técnica Vibrações	Sistema de Referência EPSG 3763	
Nome do Empreendimento Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.	Formato A1 (99x641)	
Título do Desenho Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica	Escala 0 25 m	
27/09/2024	Folha 4/5	Desenho Mapa 4



Legenda:

Avaliação do nível do Ruído Re-radiado, atendendo à vibração eficaz

$V \text{ eficaz} \leq 0.02$	
$0.02 < V \text{ eficaz} \leq 0.025$	
$0.025 < V \text{ eficaz} \leq 0.03$	
$0.03 < V \text{ eficaz} \leq 0.04$	
$V \text{ eficaz} > 0.04$	

Logótipos e informação complementar

Projetistas:

<p>Especialidade Técnica</p> <p>Vibrações</p>	<p>Sistema de Referência</p> <p>EPBG 3763</p>
<p>Nome do Empreendimento</p> <p>Prolongamento da Linha Vermelha entre S. Sebastião e Alcântara, Metropolitano de Lisboa E.P.E.</p>	<p>Formato</p> <p>A1 (99x641)</p>
<p>Título do Desenho</p> <p>Avaliação do Ruído Re-radiado por Limitação da Velocidade de Vibração Eficaz Avaliada nos Edifícios - Resultado Global Análise Numérica</p>	<p>Escala</p> <p>0 25 m</p>
<p>27/09/2024</p>	<p>Folha</p> <p>5/5</p> <p>Desenho</p> <p>Mapa 5</p>