

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO

GUILHERME VALLE LOURES BRANDÃO

**LINHAS FERROVIÁRIAS E CIDADE:  
AVALIAÇÃO ACÚSTICA PARA REDUÇÃO DE RUÍDOS EM ÁREAS URBANAS**

Juiz de Fora  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO

GUILHERME VALLE LOURES BRANDÃO

**LINHAS FERROVIÁRIAS E CIDADE:  
AVALIAÇÃO ACÚSTICA PARA REDUÇÃO DE RUÍDOS EM ÁREAS URBANAS**

Juiz de Fora  
2018

GUILHERME VALLE LOURES BRANDÃO

**Linhas Ferroviárias e Cidade:  
Avaliação Acústica para Redução de Ruídos em Áreas Urbanas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Orientador: Prof. D.Sc. José Alberto Barroso Castañon  
Coorientador: Prof. D.Sc. Ernani Simplicio Machado

Juiz de Fora  
2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Brandão, Guilherme Valle Loures.

Linhas Ferroviárias e Cidade : Avaliação Acústica para Redução de Ruídos em Áreas Urbanas / Guilherme Valle Loures Brandão. -- 2018.

177 p. : il.

Orientador: José Alberto Barroso Castañon

Coorientador: Ernani Simplício Machado

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído, 2018.

1. Acústica Ambiental. 2. Ruído Ferroviário. 3. Acústica Urbana. 4. Ambiente Acústico. 5. Paisagem Sonora. I. Castañon, José Alberto Barroso, orient. II. Machado, Ernani Simplício, coorient. III. Título.

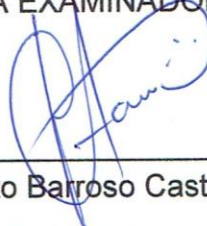
**Guilherme Valle Loures Brandão**

**Linhas Ferroviárias e Cidade:  
Avaliação Acústica para Redução de Ruídos em Áreas Urbanas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Aprovada em 28 de maio de 2018

**BANCA EXAMINADORA**



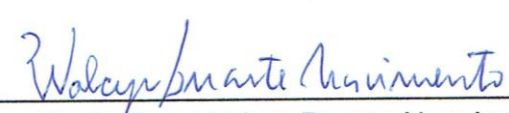
\_\_\_\_\_  
Prof. Dsc. José Alberto Barroso Castañon - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora



\_\_\_\_\_  
Prof. Dsc. Ernani Simplicio Machado - Coorientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora



\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dsc. Maria Teresa Gomes Barbosa  
Universidade Federal de Juiz de Fora



\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dsc. Walcyr Duarte Nascimento  
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador Castañon e coorientador Ernani, pelo incentivo e contribuição constantes no desenvolvimento do trabalho, direcionando todos os esforços possíveis para possibilitar estes primeiros passos da minha formação enquanto pesquisador.

Aos secretários Fabiano e Lília e ao Coordenador Klaus, pelo suporte constante em todas as minhas necessidades discentes junto ao PROAC.

À Daniela e Raphael, pelo companheirismo e apoio no desenvolvimento de nossas atividades como representantes do corpo discente. Não foi fácil, mas conseguimos.

À Professora Letícia Zambrano que desde a graduação sempre me acolheu e me proporcionou, ao acompanhá-la em sala de aula, a possibilidade de aprender um pouco mais sobre o docente que eu quero me tornar.

À Miriam, que sempre disponibilizou seu tempo para me ajudar e ao Laboratório ECOS, da Faculdade de Arquitetura da UFJF, que forneceu os instrumentos necessários à realização das medições.

À Universidade Federal de Juiz de Fora e à CAPES pelo auxílio concedido, fundamental para o bom desenvolvimento e permanência no mestrado.

Aos meus pais e madrinha, pelo suporte e apoio para que eu pudesse me dedicar integralmente a este trabalho.

Aos amigos Wilian e Ludmila que, além de partilhar o mesmo orientador, passaram a partilhar minha vida.

Às queridas Beatriz, Cláudia, Jéssica, Juliana, Karliane e Sayhane, que tornaram esse nosso tempo juntos mais leve.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma possibilitaram a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

“Lá vai o trem sem destino  
Pro dia novo encontrar  
Correndo vai pela terra  
Vai pela serra  
Vai pelo mar”

(VILLA-LOBOS, 1933. *Bachianas Brasileiras*, op. 2)

## RESUMO

A ambiência acústica dos lugares é fator preponderante para o adequado desempenho laboral, intelectual ou simplesmente vivencial do ser humano. O local de vivência, se possuir fatores que potencializam a percepção da ambiência acústica, tais como ruído de tráfego, pode causar estresse fisiológico, contribuindo para uma avaliação qualitativa desfavorável do espaço urbano. O objeto de estudo desta pesquisa é o conjunto de características acústicas inerentes às linhas ferroviárias, que se materializam no espaço segundo esses preceitos e os irradiam ao entorno. A presença dessas linhas na malha urbana da cidade de Juiz de Fora – MG – influi diretamente na produção do espaço e direciona vetores de crescimento e valoração do solo, representando um importante aspecto a ser considerado nas políticas de produção da cidade. Este trabalho tem por objetivo identificar as características acústicas ao longo das linhas ferroviárias e suas especificidades, propondo alternativas para mitigação dos problemas verificados nas áreas adjacentes. O recorte desta pesquisa, que se insere no campo da acústica ambiental, se dá pela delimitação de estudo das características acústicas das linhas férreas, focando nas características sonoras das áreas habitadas lindeiras à faixa de domínio na malha urbana de Juiz de Fora. Com relação à metodologia de desenvolvimento, utiliza-se a Revisão Sistemática de Literatura – RSL – para definição do arcabouço teórico referencial e, para realização do estudo de caso, utiliza-se a metodologia proposta pelos referenciais normativos, através de medições *in loco*. O trabalho se desenvolve em seis capítulos que englobam os conhecimentos necessários à sua realização, focando na aplicação dos conceitos ao ambiente ferroviário. As análises realizadas demonstram que o ambiente acústico ao longo da linha ferroviária é drasticamente impactado pela passagem das composições, provocando o aumento do nível de ruído equivalente para além dos parâmetros normativos de conforto. A partir da situação existente, propõe-se a implantação de um misto de dispositivos convencionais e não convencionais para a redução do ruído, focando em soluções que mantenham permeabilidade visual e busquem reduzir a segregação espacial, gerando resultados que podem ser replicados em outras áreas urbanas, tanto na cidade de Juiz de Fora quanto em outras cidades. Conclui-se que a utilização dos dispositivos de proteção auxilia consideravelmente na redução do nível de pressão sonora equivalente nas áreas lindeiras, entretanto, percebe-se que é necessário o atendimento das edificações do entorno às normas construtivas para mitigação mais eficaz do problema.

**Palavras-chave:** Acústica Ambiental. Ruído Ferroviário. Acústica Urbana. Ambiente Acústico. Paisagem Sonora.



## ABSTRACT

Acoustic ambience is a predominant factor for adequate performance levels of work, intellect or simply experiential tasks for human beings. The vivency place itself, when possessing factors that enhance the acoustic ambience perception such as traffic noise can cause physiological stress, contributing to an unfavorable qualitative assessment of the urban space. This research's object of study is the set of acoustic characteristics inherent to the railway lines, which materialize in space according to these precepts and radiate towards the surroundings. The presence of these railways in the Juiz de Fora city – MG – urban network directly influences the spatial production and directs land growth and valuation vectors, representing an important aspect to be considered in the city's production policies. This work aims to identify the acoustic characteristics along the railway lines and their specificities, proposing alternatives to mitigate problems observed its adjacent areas. The research clipping, which is inserted in the environmental acoustics' field, is given by binding the study to the railway lines acoustic characteristics, focusing on the inhabited areas neighboring to the railway's domain range sound characteristics in the Juiz de Fora city's urban mesh. Regarding the development methodology, the systematic revision of literature method– RSL – is used to define the reference theoretical framework and, to carry out the case study, the methodology proposed by the current normative references is used, through on-the-spot measurements. The work develops in six chapters that encompass the knowledge necessary for its realization, focusing on the concept application to the railway environment. The analyses performed shows that the acoustic environment along the railway line is drastically impacted by the rail compositions passages, causing an increase in the equivalent noise level beyond the normative comfort parameters. From the existing situation, it is proposed to implement a mixture of conventional and non-conventional devices for noise reduction, focusing on solutions that maintain visual permeability and seek to reduce spatial segregation, generating results that can be replicated in other urban areas, both in Juiz de Fora and other cities. It is concluded that using protection devices greatly assists in reducing the equivalent sound pressure levels in the railway's neighboring areas. However, it is understood that it is necessary for the surrounding buildings to meet the constructive norms for a more effective problem mitigation.

Keywords: Environmental Acoustics. Railway Noise. Urban Acoustics. Sonic Environment. Soundscape.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Frente Esférica e Frente Plana .....	22
Figura 2 – Reflexão .....	23
Figura 3 – Refração da onda sonora para $C_1 > C_2$ .....	24
Figura 4 – Refração da onda sonora para $C_1 < C_2$ .....	25
Figura 5 – Reflexão total .....	25
Figura 6 – Propagação sonora para fontes lineares.....	27
Figura 7 – Período e Amplitude de Onda .....	28
Figura 8 – Amplitude de Onda.....	30
Figura 9 – Escala linear e escala logarítmica .....	31
Figura 10 – Espectro de frequências.....	34
Figura 11 – Superposição de tons puros.....	35
Figura 12 – Bandas de frequência .....	36
Figura 13 – Efeito da temperatura na trajetória das ondas sonoras.....	37
Figura 14 – Trajetória das ondas sonoras influenciadas pela temperatura .....	38
Figura 15 – Influência das camadas térmicas na onda sonora .....	38
Figura 16 – Porcentagens de pessoas altamente incomodadas por modal .....	41
Figura 17 – Categorização das Fontes Sonoras .....	46
Figura 18 – Diagrama de construção da paisagem sonora.....	48
Figura 19 – Modelo conceitual de contextos .....	50
Figura 20 – Componentes da paisagem sonora em relação à reação individual ao ambiente sonoro.....	53
Figura 21 – Diagrama para determinar fatores $10^{-0,1 R_i}$ .....	64
Figura 22 – Diagrama para determinar o coeficiente de isolamento sonoro $\Delta_{L_{A,R,RT}}$ .....	66
Figura 23 – Geometria das Fontes.....	70
Figura 24 – Espectro Sonoro típico do Ruído Ferroviário .....	71
Figura 25 – Efeito do Solo .....	72
Figura 26 – Gênese do ruído no contato trilho-rodas. ....	73
Figura 27 – Efeito de rotação das rodas .....	73
Figura 28 – Barreiras de gabião e terra.....	76
Figura 29 – Barreiras para ruído de tração somente no trilho (a) e dupla (b).....	77
Figura 30 – Coeficientes de absorção para solo com e sem vegetação .....	77
Figura 31 – Dispersão do som sem vegetação (a) e com vegetação (b) .....	78
Figura 32 – Redução do NPS por inserção de elemento rugoso .....	78

Figura 33 – Caracterização da pesquisa.....	81
Figura 34 – Percurso metodológico.....	82
Figura 35 – Percurso metodológico da Revisão Sistemática de Literatura .....	83
Figura 36 – Ponto 1 – Área Urbana de Uso Industrial.....	90
Figura 37 – Ponto 2 – Área urbana com características rurais.....	91
Figura 38 – Ponto 3 – Área urbana de uso residencial .....	92
Figura 39 – Ponto 4 – Área urbana de uso misto .....	92
Figura 40 – Localização dos pontos de medição na malha urbana de juiz de fora ...	93
Figura 41 – Localização da cidade de Juiz de Fora e indicação do núcleo urbano inicial .....	95
Figura 42 – Mancha Urbana da cidade de Juiz de Fora.....	96
Figura 43 – Vista área a cidade de Juiz de Fora a partir da Praça da Estação, mostrando a ocupação das margens esquerda e direita do rio Paraibuna, respectivamente. ....	97
Figura 44 – Localização dos principais estabelecimentos industriais de Juiz de Fora na década de 1920.....	98
Figura 45 – Mancha urbana de juiz de fora em 1990 (esquerda) e em 2011(direita)	99
Figura 46 – Marcação das visadas para o Ponto 1 .....	102
Figura 47 – Visadas do ponto 1.....	102
Figura 48 – Marcação das visadas para o Ponto 2 .....	104
Figura 49 – Visadas do ponto 2.....	104
Figura 50 – Marcação das visadas para o Ponto 3 .....	106
Figura 51 – Visadas do ponto 3.....	106
Figura 52 – Marcação das visadas para o Ponto 4 .....	108
Figura 53 – Visadas do ponto 4.....	108
Figura 54 - Mapa de intervenções no ponto 1 .....	115
Figura 55 - Corte esquemático intervenção ponto 1 .....	116
Figura 56 - Ampliação área de intervenção ponto 1 .....	116
Figura 57 - Sombra acústica no ponto 1 .....	117
Figura 58 - Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 1.....	117
Figura 59 - Mapa de intervenções no ponto 2 .....	123
Figura 60 - Corte esquemático intervenção ponto 2.....	124
Figura 61 - Ampliação faixa de domínio ponto 2 .....	124
Figura 62 - Sombra acústica no ponto 2 .....	125
Figura 63 - Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 2.....	125

Figura 64 – Mapa de intervenções propostas ponto 3 .....	131
Figura 65 – Corte esquemático intervenção ponto 3.....	132
Figura 66 – Ampliação faixa de domínio ponto 3 .....	133
Figura 67 - Sombra acústica no ponto 3 .....	134
Figura 68- Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 3.....	134
Figura 69- Mapa de intervenções propostas ponto 3 .....	142
Figura 70 - Corte esquemático intervenção ponto 2.....	143
Figura 71 - Ampliação faixa de domínio ponto 4 .....	144
Figura 72 - Sombra acústica no ponto 2 .....	145
Figura 73 - Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 2.....	145

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da pesquisa por termos .....	15
Tabela 2 - Ângulos críticos para o ar .....	26
Tabela 3 - Definições NBR 10151:2000 .....	55
Tabela 4 - Parâmetros de medição para ambientes externos .....	56
Tabela 5 - Correções para ruídos com características especiais .....	56
Tabela 6 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A) .	56
Tabela 7 - Conjunto normativo NBR 16425:2016 .....	58
Tabela 8 - NBR 16425-1:2016 – Termos e Definições .....	58
Tabela 9 - Posição do ponto de medição .....	60
Tabela 10 - Descritores de Níveis Sonoros .....	60
Tabela 11 - NBR 14313:1999 – Termos e Definições .....	62
Tabela 12 - Espessura mínima dos materiais de barreiras .....	63
Tabela 13 - Valores de $R_i$ .....	64
Tabela 14 - – Esquema de cálculo para o valor de $\Delta L_{A,R,RT}$ .....	65
Tabela 15 – Componentes da pergunta de pesquisa para RSL .....	83
Tabela 16 - Referências selecionadas por descritor .....	84
Tabela 17 - Bases de pesquisa e referências legais e normativas utilizadas .....	86
Tabela 18 - Exemplo de Tabela de coleta de dados para o estudo de caso .....	87
Tabela 19 - Resultados de medição para o Ponto 1 .....	101
Tabela 20 - Resultados de medição para o ponto 2 .....	103
Tabela 21 – Resultados de medição para o ponto 3 .....	105
Tabela 22 – Resultados de medição para o ponto 4 .....	107
Tabela 23 - Número de Fresnel para o ponto 1 com barreiras de trilho .....	118
Tabela 24 - Perda por inserção para o ponto 1 com barreiras de trilho .....	118
Tabela 25 - Número de Fresnel para o ponto 1 com barreiras de divisa .....	119
Tabela 26 - Perda por inserção para o ponto 1 com barreiras de divisa .....	120
Tabela 27 - Número de Fresnel para o ponto 2 com barreiras de trilho .....	126
Tabela 28 - Perda por inserção para o ponto 2 com barreiras de trilho .....	126
Tabela 29 - Número de Fresnel para o ponto 2 com barreiras de divisa .....	128
Tabela 30 - Perda por inserção para o ponto 2 com barreiras de divisa .....	128
Tabela 31 - Número de Fresnel para o ponto 3 com barreiras de trilho .....	135
Tabela 32 - Perda por inserção para o ponto 3 com barreiras de trilho .....	135

Tabela 33 - Número de Fresnel para a segunda atenuação do ponto 3 – ruídos de tração .....	136
Tabela 34 - Perda por inserção para a segunda atenuação do ponto 3 – ruídos de tração .....	137
Tabela 35 - Número de Fresnel para o ponto 3 com barreiras de divisa.....	138
Tabela 36 - Perda por inserção para o ponto 3 com barreiras de divisa .....	139
Tabela 37 - Número de Fresnel para o ponto 4 com barreiras de trilho .....	146
Tabela 38 - Perda por inserção para o ponto 4 com barreiras de trilho .....	146
Tabela 39 - Número de Fresnel para a segunda atenuação do ponto 4 – ruídos de tração .....	147
Tabela 40 - Perda por inserção para a segunda atenuação do ponto 4 – ruídos de tração .....	148
Tabela 41 - Número de Fresnel para o ponto 4 com barreiras de divisa.....	149
Tabela 42 - Perda por inserção para o ponto 4 com barreiras de divisa .....	150
Tabela 43 – Estratégias para redução do ruído equivalente .....	155

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Amplitude de Variação da pressão ambiente .....	28
Equação 2 – Intensidade de uma onda sonora .....	29
Equação 3 – Somatório de nível de pressão sonora .....	32
Equação 4 – Atenuação do nível de pressão sonora em função da distância para fonte pontual.....	32
Equação 5 – Atenuação do nível de pressão sonora em função da distância para fonte cilíndrica .....	33
Equação 6 – Frequência .....	33
Equação 7 – Nível de Perturbação Sonora .....	43
Equação 8 – Determinação manual do $L_{Aeq}$ .....	57
Equação 9 – Nível de pressão sonora equivalente .....	61
Equação 10 – Índice de redução sonora .....	63
Equação 11 – Perda por inserção da barreira .....	66
Equação 12 – Número de Fresnel.....	66
Equação 13 – Cálculo do coeficiente $\delta$ .....	67
Equação 14 – Atenuação da barreira .....	67
Equação 15 – Comprimento de onda das vibrações no trilho .....	75

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior
CBTU	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ECOS	Laboratório de Estudos em Conforto Ambiental e Sustentabilidade
FIA	Federal Railway Administration
IMBEL <sup>®</sup>	Indústria de Material Bélico do Brasil
ISO	International Organization for Standardization
MHS	Movimento Harmônico Simples
MRS	MRS Logística AS
NCA	Nível de Critério de Avaliação
NPS	Nível de Pressão Sonora
OMS	Organização Mundial da Saúde
PJF	Prefeitura Municipal de Juiz de Fora
PROAC	Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
RPC	Receptores Potencialmente Críticos
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
WHO	World Health Organization



## LISTA DE SÍMBOLOS

sen	Seno
Pa	Paschal
$\mu\text{Pa}$	Micro Paschal
$p_{\text{ambiente}}$	Pressão ambiente
$p_{\text{máx}}$	Pressão ambiente máxima
$p_{\text{mín}}$	Pressão ambiente mínima
A	Variação da pressão ambiente
I	Intensidade de uma onda sonora
$\Delta P$	Amplitude de pressão
$\rho$	Densidade do ar
c	Velocidade da onda sonora
y	Amplitude de onda
Bar	Unidade de pressão equivalente a $10^5\text{Pa}$
B	Bel
log	Logaritmo
dB	Decibel
$L_R$	Pressão sonora resultante
f	Frequência
Hz	Hertz
T	Período
KHz	Kilo Hertz
$L_{\text{AEQ}}$	Nível de Pressão Sonora Equivalente
$L_{10}$	Nível de pressão sonora ultrapassado em 10% do tempo de medição
$L_{90}$	Nível de pressão sonora ultrapassado em 90% do tempo de medição
$L_{\text{ps}}$	Nível de perturbação sonora
$L_{\text{máx}}$	Nível de pressão sonora máximo
$L_{\text{mín}}$	Nível de pressão sonora mínimo
$L_{\text{ra}}$	Nível de ruído ambiente
$L_c$	Nível de pressão sonora corrigido
$L_{\text{DN}}$	Nível de pressão sonora dia-noite
K	Fator de ponderação
$\Delta L_{\text{A,R,RT}}$	Índice de redução sonora aéreo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. Definição da pertinência do tema de estudos.....	15
1.2. Objeto de estudo e justificativa .....	16
1.3. Objetivo geral e objetivos específicos .....	18
1.4. Delimitações da pesquisa .....	19
1.5. Estrutura da dissertação .....	19
<b>2. ACÚSTICA AMBIENTAL, AMBIENTE ACÚSTICO E PAISAGEM SONORA</b> .....	<b>21</b>
2.1. Fundamentos da acústica ambiental.....	21
2.2. Fundamentos do controle de ruído .....	39
2.3. Ambiente acústico .....	44
2.4. Paisagem Sonora.....	47
2.5. Legislação e normalização acústicas.....	54
2.5.1. NBR 10151:2000.....	54
2.5.2. NBR 16425-1:2016.....	57
2.5.3. NBR 14313:1999 .....	61
<b>3. ACÚSTICA AMBIENTAL E FERROVIAS</b> .....	<b>68</b>
3.1. Impacto acústico das ferrovias.....	68
3.2. Características do ambiente acústico em áreas ferroviárias.....	69
3.3. Sistemas ambientais para redução do ruído de tráfego .....	75
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>81</b>
4.1. Caracterização da pesquisa .....	81
4.2. Revisão Sistemática de Literatura .....	82
4.3. Metodologia de coleta de dados .....	87
<b>5. ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>95</b>
5.1. Desenvolvimento urbano e da infraestrutura ferroviária de Juiz de Fora .....	95
5.2. Ponto 1 – Área urbana com características industriais .....	100
5.3. Ponto 2 – Área urbana com características rurais .....	103
5.4. Ponto 3 – Área urbana de uso residencial .....	105
5.5. Ponto 4 – Área urbana de uso misto .....	107
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>110</b>
6.1. Proposta de intervenção ponto 1.....	113
6.2. Proposta de intervenção ponto 2.....	121
6.3. Proposta de intervenção ponto 3.....	129
6.4. Proposta de intervenção ponto 4.....	140
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	<b>152</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>156</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>158</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>164</b>
<b>ANEXO A – RELAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS</b> .....	<b>164</b>
<b>ANEXO B – MODELO DE RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL</b> .....	<b>165</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Para Schmid (2005, p.17), “a acústica é provavelmente o aspecto físico de maior complexidade do ambiente construído”, a poluição sonora é um dos principais problemas ambientais atualmente enfrentados em aglomerações urbanas e seus efeitos são cada vez mais evidentes no cotidiano da vida moderna (PADUIN, 1999). Arruda et al. (2000) consideram como fatores contribuintes para o avanço da poluição sonora, as atividades ruidosas – como as indústrias – que no passado se realizavam em regiões mais afastadas por conta dos seus incômodos e aos poucos foram sendo incorporadas ao perímetro urbano diante do rápido avanço dos limites das cidades.

Ao falar sobre poluição sonora, é preciso distinguir os conceitos de som e ruído. Som é qualquer variação de pressão que o ouvido humano possa captar, enquanto ruído é o som ou conjunto de sons indesejáveis, desagradáveis e/ou perturbadores (BISTAFA, 2011). De acordo com a Organização Mundial de Saúde, o ruído ambiental – também chamado de ruído residencial, ruído doméstico ou ruído comunitário – é definido como o ruído emitido por todos tipos de fontes, com exceção do ruído dentro de locais industriais (WHO, 1999). Dentre as principais fontes de ruído ambiental estão o ruído proveniente de construções, do trabalho público, da vizinhança (restaurantes, cafeterias, boates, estacionamentos, parques, entre outros) e dos tráfegos aéreo, rodoviário e ferroviário.

Especialistas em saúde pública concordam que os fatores e riscos ambientais constituem 24% da taxa de manifestação de doenças no mundo (WHO, 2011) e a ampliação da exposição ao ruído ambiental de vias de automóveis, linhas férreas, aeroportos e parques industriais contribuem significativamente para o aumento da taxa de doenças relacionadas a estes fatores. O ruído ambiental influi diretamente na redução da qualidade do sono e na elevação da pressão arterial, contribuindo para o aparecimento de doenças cardiovasculares.

Existe uma relação direta entre a qualidade dos espaços urbanos e a qualidade de vida de seus cidadãos que influencia nas atividades desempenhadas (VALQUES, 2016). O local de vivência, se possuir fatores que potencializam a percepção da ambiência acústica, tais como ruído de tráfego, pode causar estresse fisiológico,

contribuindo para uma avaliação qualitativa desfavorável do espaço urbano. A ambiência acústica dos lugares é, então, fator preponderante para o adequado desempenho laboral, intelectual ou simplesmente vivencial do ser humano.

A cidade de Juiz de Fora convive com a poluição sonora causada pela presença de um ramal ferroviário de carga em operação. Localizada no sudeste mineiro, a cidade tem seu histórico de desenvolvimento diretamente ligado ao ciclo cafeeiro e à implantação da ferrovia no início da década de 1870, então Estrada de Ferro D. Pedro II, para escoamento da produção (LESSA, 1985).

Ao longo do tempo, o ramal ferroviário teve seu uso compartilhado entre transporte de carga e de passageiros até que, em 1996, como a extinção da Rede Ferroviária Federal – RFFSA, passa a operar apenas veículos de carga para a MRS Logística. O vetor de desenvolvimento direcionado pela linha férrea faz com que a poluição sonora proveniente da operação do ramal ferroviário esteja presente ao longo de grande parte da malha urbana, impactando diretamente na qualidade de vida da população exposta ao problema.

### 1.1. Definição da pertinência do tema de estudos

Para definição da pertinência de estudo do tema e de sua recorrência nos programas de pós-graduação brasileiros foi realizada, em maio de 2016, pesquisa no Repositório de Teses e Dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior – CAPES e no portal de Periódicos CAPES, utilizando-se os termos de busca apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Resultados da pesquisa por termos

Plataforma	Termos de pesquisa	Resultados encontrados	Resultados pertinentes	Resultados compatíveis
Portal Periódicos CAPES	Acústica Ferroviária	12	9	3
	Railway Noise	34.714	373	8
	Noise Barriers	31.202	275	17
Repositório de Teses e Dissertações CAPES	Acústica Ferroviária	76	16	2
	Barreiras Acústicas	208	12	2

Fonte: Elaborada pelo autor

O Repositório de Teses e Dissertações CAPES foi escolhido como plataforma de pesquisa por corresponder à sistematização do conhecimento gerado pelos diversos programas de pós-graduação brasileiros reconhecidos pela instituição, permitindo uma visão integrada da produção dos programas. A plataforma Periódicos CAPES foi escolhida por apresentar amplo banco de dados com trabalhos científicos qualificados publicados nas mais diversas áreas de conhecimento, ampliando o escopo da pesquisa para além das bases próprias de editoras ao mesmo tempo em que se mantém a presunção de qualificação dos resultados encontrados.

A definição dos termos a serem pesquisados nas plataformas foi realizada de acordo com sua pertinência ao tema desta dissertação, primando-se pela utilização do mínimo possível de descritores que correspondessem à necessidade, e os resultados foram categorizados como exposto: a) os “resultados encontrados” correspondem ao número de entradas que cada plataforma retornou para o termo pesquisado; b) os “resultados pertinentes” correspondem às entradas que possuem o termo pesquisado em seu título ou como palavra-chave; e c) os “resultados compatíveis” correspondem às entradas em que o resumo apresenta um estudo com aderência ao tema de pesquisa proposto.

Para a realização da pesquisa foram utilizados os operadores lógicos booleanos “*and*” e “*or*”, que permitiram a união dos descritores escolhidos, revelando resultados mais relevantes e direcionados ao contexto de pesquisa. Os resultados da pesquisa por termos descritores indicam que, embora não seja inédito, o tema é pouco explorado academicamente e seu desenvolvimento pode se traduzir em uma contribuição efetiva para o campo.

## **1.2. Objeto de estudo e justificativa**

O objeto de estudo desta pesquisa é o conjunto de características acústicas inerentes às linhas ferroviárias, que se materializam no espaço segundo esses preceitos e os irradiam ao entorno. A presença dessas linhas na malha urbana influi diretamente na produção do espaço e direciona vetores de crescimento e valoração do solo, representando um importante aspecto a ser considerado nas políticas de gestão da cidade.

Esta importância relativa se dá, principalmente, por dois fatores: no caso de grandes cidades que possuem transporte de alta capacidade sobre trilhos, a presença das linhas indica também a proximidade com terminais de acesso, valorizando a área no entorno devido à proximidade ao modal de transporte. No caso de cidades que não contam com este modal direcionado ao transporte de passageiros, geralmente a presença das linhas enseja a passagem de composições para transporte de carga.

Em ambos os casos, a presença da linha férrea – sem tratamento especial – delimita uma situação de relativa degradação ambiental e constante incômodo acústico. Nota-se, entretanto, que nos casos em que esta presença indica a possibilidade de transporte rápido e de fácil acesso, a degradação tem menor influência na redução do preço da terra urbana.

Devido à estas questões, comumente, a ocupação das áreas lindeiras às ferrovias com transporte de carga ocorre informalmente e por população de baixo poder aquisitivo o que, somado às características construtivas das residências e ao ambiente acústico desfavorável, acarreta diversos prejuízos de ordem física e psicológica à estas populações. O problema gerado pela poluição sonora também acarreta perdas para a sociedade e a economia, ocasionadas pela desvalorização imobiliária e degradação da qualidade ambiental no entorno das fontes geradoras de ruído (SANDEMBERG, 2001).

Nesse contexto, encontra-se o transporte ferroviário, de suma importância para o desenvolvimento econômico de um país ao permitir o escoamento da produção em larga escala e representar um modal de transporte de mercadorias e pessoas em longas e médias distâncias, com maior eficiência e melhor custo benefício, se comparado ao transporte rodoviário, predominante na matriz de transportes brasileira. Todavia, o transporte ferroviário também é alvo de críticas assertivas devido à poluição sonora e periculosidade das passagens em nível, principalmente em áreas urbanas.

A poluição sonora causada pelo transporte ferroviário é decorrente de diversos fatores relacionados à operação do sistema, e pode ser gerada a partir do ruído do motor da locomotiva, do atrito entre roda e trilho quando da passagem dos trens, do acionamento da buzina para fins de alerta aos motoristas e pedestres e, em alguns casos, pelos dispositivos sonoros quando do acionamento das cancelas em passagens em nível com sinalização ativa (MENDONÇA, 2014).

Diariamente, passam pelo perímetro urbano de Juiz de Fora de 25 a 30 composições, segundo dados da MRS (2016), com um intervalo médio de 38 minutos, podendo chegar a 25 minutos nos horários de pico. A dificuldade de comunicação provocada pela passagem sistemática de composições ferroviárias durante o dia e a interferência no sono durante o período noturno trazem vários transtornos para a vida cotidiana das pessoas expostas ao problema, provocando a redução da qualidade de vida, da capacidade produtiva e contribuindo para o desenvolvimento de problemas de saúde.

Os prejuízos decorrentes da passagem sistemática de composições vão além dos meramente físicos, devido à degradação ambiental das áreas no entorno da linha férrea e dos financeiros, decorrentes da interrupção do tráfego e da permeabilidade urbana por quase duas horas diárias<sup>1</sup>. Refletem-se, principalmente, na redução da qualidade de vida da população diretamente exposta ao ruído de tráfego ferroviário de forma intermitente, com alto nível de pressão sonora.

Embora a transposição da linha férrea através da construção de um anel ferroviário que contorne a cidade de Juiz de Fora seja a solução mais indicada à resolução do problema de forma definitiva, devido a seu alto custo – cerca de 600 milhões de reais, com orçamento em 2012, segundo o gerente geral de regulação da MRS, Sérgio Carrato<sup>1</sup> – é importante verificar se a utilização de instrumentos como barreiras acústicas constitui uma ferramenta mitigadora no controle do ruído ferroviário e se esta solução não ocasiona prejuízos à região e nem ao transporte em si, além de reduzir o nível de ruído a que a população situada ao lado da faixa de domínio da linha férrea está exposta.

### **1.3. Objetivo geral e objetivos específicos**

Este trabalho tem por objetivo identificar as características acústicas ao longo das linhas ferroviárias e suas especificidades, propondo alternativas para mitigação dos problemas verificados.

---

<sup>1</sup> Entrevista disponível em <http://www.tribunademinas.com.br/trens-param-a-cidade-por-duas-horas/>, acessada em 07/12/2016.

Por objetivos específicos, têm-se:

- a) verificar as possíveis inter-relações entre acústica ambiental, ambiente acústico e paisagem sonora, aplicadas ao controle de ruído no transporte ferroviário;
- b) identificar a relação sonora entre a ferrovia e a dinâmica urbana do entorno na cidade de Juiz de Fora - MG,
- c) delinear o procedimento de inserção de dispositivos de atenuação de ruído tendo por base os dados ambientais obtidos no estudo de caso.

#### **1.4. Delimitações da pesquisa**

O recorte desta pesquisa, que se insere no campo da acústica ambiental, se dá pela delimitação de estudo das características acústicas das linhas férreas, focando nas características sonoras das áreas habitadas lindeiras à faixa de domínio na malha urbana de Juiz de Fora. Tal recorte se desenvolve devido às características peculiares destas áreas e do potencial desconforto causado pela proximidade à via.

#### **1.5. Estrutura da dissertação**

Este trabalho se desenvolve em seis capítulos, que englobam a introdução, percurso de desenvolvimento, conceitos gerais de acústica, o tema aplicado diretamente ao espaço construído das ferrovias, o estudo de caso, a discussão dos dados obtidos no estudo e a conclusão.

No primeiro capítulo serão apresentados a introdução ao assunto abordado, o objeto de pesquisa, a justificativa de escolha do presente tema, os seus objetivos e delimitação.

No segundo capítulo serão apresentados os fundamentos de acústica ambiental e de controle de ruído, os conceitos de ambiente acústico e paisagem sonora, bem como a legislação e normalização acústicas relativas ao tema de pesquisa.



No terceiro capítulo serão apresentadas as peculiaridades da acústica ambiental em ferrovias, as características do ambiente acústico em áreas ferroviárias, o impacto acústico das mesmas e sistemas para redução de ruído de tráfego.

No quarto capítulo é apresentado o percurso metodológico construído para a realização do estudo de caso e obtenção dos dados necessários ao seu desenvolvimento. Apresenta-se também o percurso definido para realização da Revisão Sistemática de Literatura, responsável pelo arcabouço teórico que será desenvolvido nos próximos capítulos, bem como as fragilidades identificadas.

No quinto capítulo apresenta-se o estudo de caso, delineando a relação entre ferrovia e urbe em Juiz de Fora, bem como as medições e situações encontradas nos pontos definidos para medição.

No sexto capítulo são apresentadas as aplicações dos dados obtidos a partir dos procedimentos propostos e os resultados e discussões gerados a partir de sua interpretação, bem como as possibilidades identificadas para mitigação dos problemas eventualmente identificados.

Por fim, têm-se as considerações finais apresentando-se o panorama dos assuntos tratados e suas potencialidades, através da síntese do desenvolvimento do trabalho e das análises realizadas.

## **2. ACÚSTICA AMBIENTAL, AMBIENTE ACÚSTICO E PAISAGEM SONORA**

A qualidade do ambiente acústico interfere na capacidade de percepção dos fenômenos sonoros pelos indivíduos e altera essencialmente a relação entre os sons percebidos e sua identificação e interpretação sociais e culturais. Estes conceitos e a relação entre eles serão apresentados a seguir, buscando uma compreensão ampla sobre o assunto e suas diversas nuances.

### **2.1. Fundamentos da acústica ambiental**

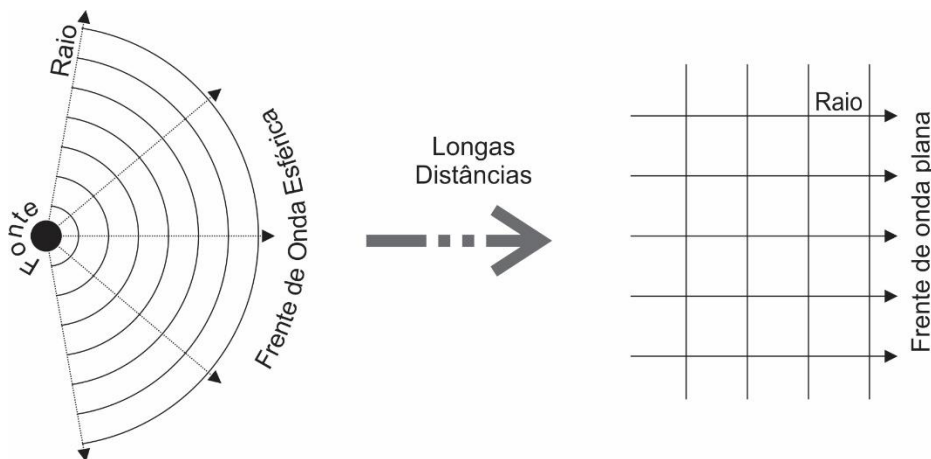
O som pode ser definido como qualquer variação de pressão que possa ser captada pelo sistema auditivo, que se propaga por ondas através do meio físico. Essa propagação, gradualmente, se difunde pelas partículas a partir da fonte sonora e, dependendo do meio utilizado para propagação – meios gasosos, líquidos ou sólidos – ocorre em diferentes velocidades. No ar, o som se propaga a uma velocidade aproximada de 340m/s, enquanto que em meios líquidos e sólidos esta velocidade pode ser bem maior – 1500 m/s na água e 5000m/s no aço, por exemplo (ANSELMET, MATTEI, 2006).

Por definição, uma onda sonora é uma variação de pressão que se propaga no ar ou em qualquer meio físico. Tomando como exemplo o ar, tem-se que a pressão, num ponto, eleva-se momentaneamente acima da pressão atmosférica e, em seguida, torna-se menor que esta, após, volta a aumentar, assim por diante. A oscilação de pressão em um ponto faz com que a pressão nos pontos vizinhos também oscile e, por sua vez, força a variação de pressão nos pontos das regiões seguintes, resultando na propagação desta variação de pressão, formando a onda sonora (ACIOLI, 1994).

Num meio homogêneo e para uma fonte pontual, esta propagação é esférica e se dá a partir de ondas concêntricas que vão se distanciando da fonte – como, por exemplo, os círculos perfeitos que vão se distanciando do ponto de impacto quando um projétil é atirado em um lago – logo, os conceitos da física que regem a acústica são similares aos que regem os demais fenômenos vibratórios, observando-se a diferença que apenas a frequência de vibração que pode ser percebida pelo ouvido humano é considerada som. A medida que se afastam da fonte, as pequenas seções da frente de

onda vão se aproximando da forma de um plano até que, a uma distância muito grande da fonte sonora, estas pequenas seções podem ser consideradas planas e os raios, paralelos entre si (FAHY; WALKER, 2006). Nesta situação, temos a frente de onda plana, conforme figura 1.

Figura 1 – Frente Esférica e Frente Plana

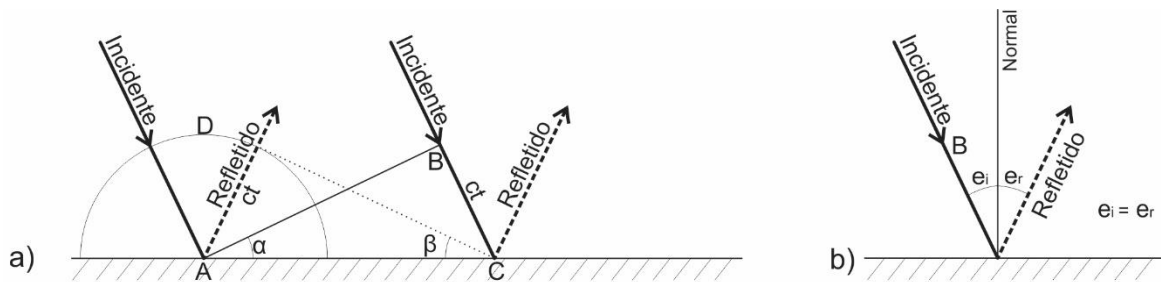


Fonte: Elaborada pelo autor

A energia gerada pelas fontes sonoras sofre variações, sendo atenuada durante sua propagação ao ar livre, devido a alguns fatores tais como: distância percorrida, obstáculos (muros ou edifícios), tipo de solo, vegetação, absorção atmosférica, efeitos da temperatura, do vento, da umidade e precipitações. Para explicar de que maneira ocorrem estas alterações é necessário considerar como o som é emitido pela fonte, como se propaga pelo ar e ainda como chega até o receptor (BISTAFA, 2011).

De acordo com Acioli (1994), durante sua propagação pelo meio, as ondas sonoras podem ser refletidas, refratadas, difratadas ou absorvidas quando atingem um meio diferente, considerando-se o princípio de Huygens, utilizado pela ótica, para tratar estas questões. O fenômeno da reflexão ocorre de diferentes formas em superfícies planas ou curvas, em superfícies lisas ou rugosas. A figura 2 apresenta o processo de reflexão de uma onda em uma superfície plana lisa.

Figura 2 – Reflexão



Fonte: Elaborada pelo autor

Consideramos a figura 2a, que demonstra a reflexão de uma onda sonora plana na seção de superfície AC de um sólido, também plano, em que a frente de onda plana incidente é representada pelo segmento AB. A reflexão desse segmento de frente de onda leva  $t$  segundos para ocorrer, o que corresponde ao intervalo de tempo entre os instantes em que os pontos A e B da frente de onda atingem a superfície AC de separação.

A incógnita  $ct$  (vide figura 2) corresponde ao tempo necessário para o ponto B da frente de onda atingir o ponto C da superfície do sólido: nesse intervalo de tempo, as ondas secundárias originadas na reflexão da frente de onda (segmento AB) propagam-se até D, onde  $AD = BC = ct$ , sendo  $c$  a velocidade do som no meio de propagação da onda incidente. Quando a onda secundária atingir D, uma onda secundária refletida estará prestes a se formar em C, logo, a frente de onda refletida é dada pelo segmento CD, tangente à onda secundária no ponto D. Como  $AD = BC$ , os triângulos ADC e CBA são iguais.

Desse modo, pode-se afirmar que, neste caso, a frente de onda incidente e a frente de onda refletida têm o mesmo ângulo em relação à superfície de separação dos meios de propagação ( $\alpha = \beta$ ). No que tange aos raios de incidência da onda sonora (figura 2b), tem-se que o raio incidente e o raio refletido fazem o mesmo ângulo com a linha normal à superfície de incidência, o que nos dá que  $\theta_i = \theta_r$ , o que significa que o ângulo de incidência do raio é o mesmo que o de reflexão do raio, tendo-se por base a referida linha normal.

O processo de difração ocorre devido à vibração superficial causada no processo de reflexão: os pontos da superfície de separação dos meios vibram, dando origem a uma propagação para o interior do próprio sólido. A difração pode ocorrer

também devido à passagem de uma onda pela borda de uma barreira ou através de uma abertura provocando, em geral, um alargamento do comprimento de onda e interferência das frentes de onda que criam regiões de maior ou menor intensidade (ACIOLI, 1994).

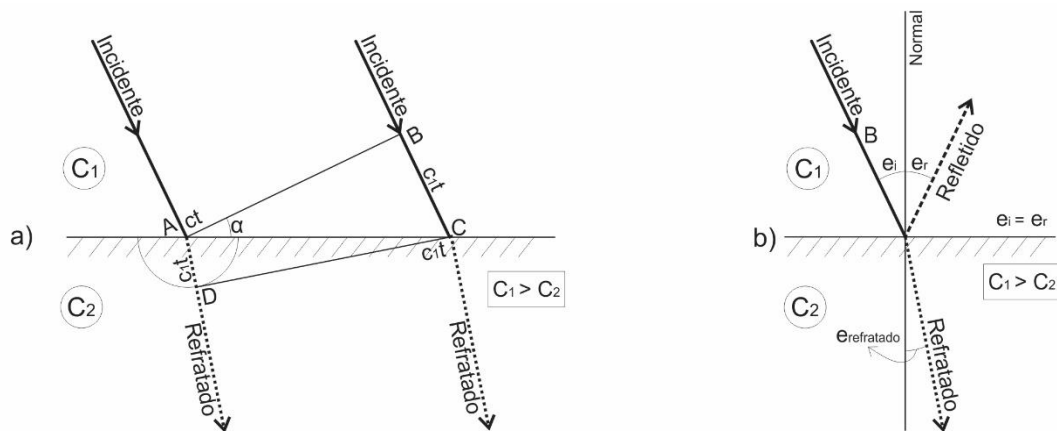
O processo de refração de uma onda de frente plana será distinto de acordo com a relação entre a velocidade do som entre os meios:

a) se a velocidade do som for maior no meio de incidência ( $C_1$ ) que no meio de transição ( $C_2$ ), os raios serão desviados em direção de aproximação à linha normal da superfície de incidência;

b) se a velocidade do som for maior no meio de transição ( $C_2$ ) que no meio de incidência ( $C_1$ ), os raios serão desviados em direção de afastamento em relação à linha normal da superfície de incidência.

Considerando que a frente de onda plana  $AB$  (vide figura 6) incidente na superfície de separação entre os meios, que se propaga com velocidade  $C_1$  no meio da onda incidente e  $C_2$  no meio da onda refratada percebe-se que, ao lado do fenômeno de reflexão já apresentado, têm-se a propagação do som no meio 2. Em  $t$  segundos, no intervalo que o ponto  $B$  da frente de onda leva para atingir o ponto  $C$  da superfície do sólido, uma onda secundária com origem em  $A$  atinge o ponto  $D$  (sendo  $AD = c_2t$  menor que  $BC = c_1t$ , pois supõe-se que devido à posição aparente do raio refratado,  $C_1 > C_2$ ) e a frente de onda no meio 2 é refratada como  $CD$ , como mostrado na figura 3.

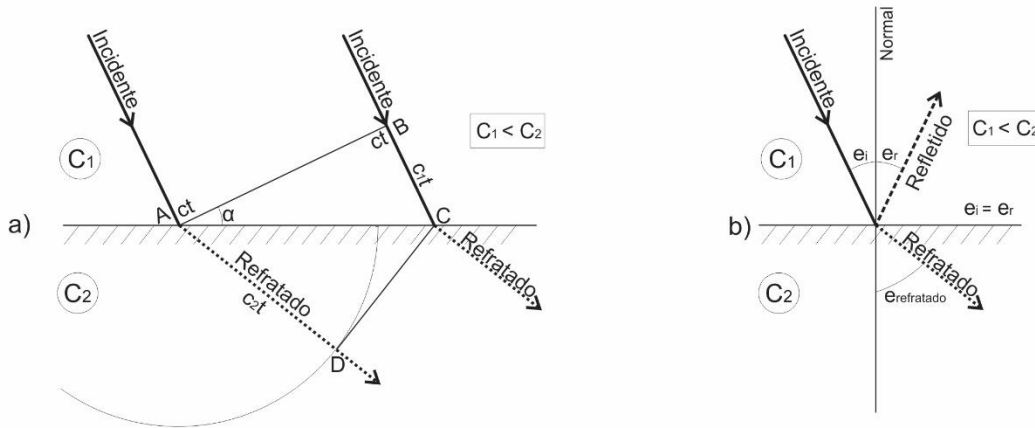
Figura 3 – Refração da onda sonora para  $C_1 > C_2$



Fonte: Elaborada pelo autor

No caso em que  $C_1 < C_2$ , o fenômeno ocorre da mesma forma como foi descrito anteriormente, entretanto os raios tendem a se afastar da linha normal à superfície de separação, gerando a frente de onda CD como mostrado na figura 4.

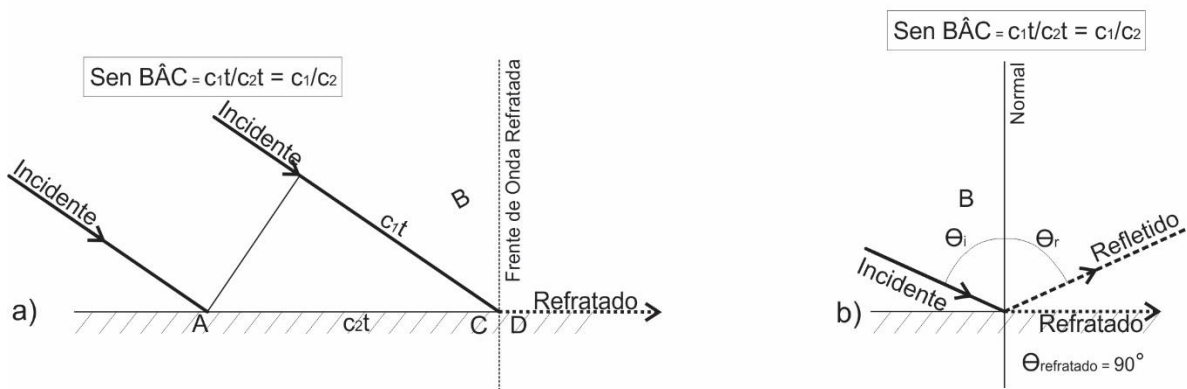
Figura 4 – Refração da onda sonora para  $C_1 < C_2$



Fonte: Elaborada pelo autor

Note-se ainda que, devido a características particulares entre os meios de propagação e ângulo incidente, pode ocorrer o fenômeno denominado reflexão total, que consiste em uma situação na qual o ângulo de incidência da onda sonora em relação à normal da superfície de transição e o ângulo de refração calculado são tais que o raio refratado está no intervalo entre o raio refletido e a superfície da separação de transição (ACIOLI, 1994). Sendo assim, todo o incidente é “devolvido” ao meio anterior, em forma de reflexão como pode ser observado na figura 5.

Figura 5 – Reflexão total



Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se dizer que, se  $AD > AC$ , as construções anteriores não podem ser realizadas. De fato, só seriam possíveis com o limite de  $AC = AD$ , caso em que o raio

refratado seria paralelo à superfície de transição como demonstrado anteriormente na figura 8, cuja frente de onda refratada é coplanar à linha normal da superfície de transição. Para que este fenômeno seja possível, é necessário que o ângulo  $B\hat{A}C$  seja tal que:

$$\text{sen } B\hat{A}C = \frac{c_1 t}{c_2 t} = \frac{c_1}{c_2}$$

O ângulo  $B\hat{A}C$  é denominado, neste caso limite, ângulo crítico. Neste caso, a refração não existe, ou seja, toda a energia sonora incidente estará contida na onda refletida, não haverá nenhuma propagação no meio 2 para o ângulo de incidência maior ou igual ao ângulo crítico. Como a velocidade do som no ar ( $C_1$ ) e normalmente muito menor que a velocidade em sólidos ou na água ( $C_2$ ), normalmente o ângulo crítico é muito pequeno, como pode ser observado na tabela 2.

Tabela 2 - Ângulos críticos para o ar

Meio de Transição	Velocidade do som ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\frac{V_{ar}}{V_{material}}$	Ângulo crítico (aproximado)
Ar	330	-----	-----
Aço	5000	0,066	4°
Madeiras duras	5000	0,066	4°
Madeiras moles	3300	0,10	6°
Água	1400	0,025	14°

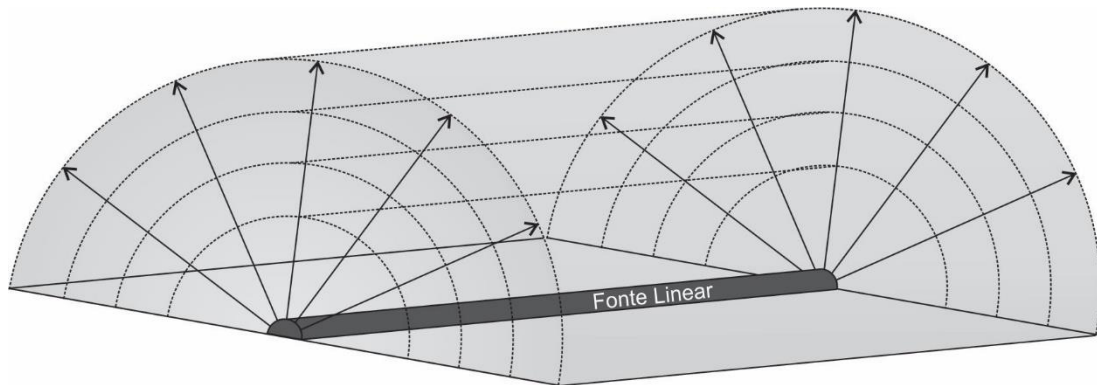
Fonte: Elaborada pelo autor

Murgel (2007) destaca que, considerando que o ar não é um meio de propagação perfeitamente elástico, como seria em uma condição ideal, há uma perda de energia sonora durante a propagação aérea do som. Ocorre que esta perda é relativamente complicada de se estimar com precisão, pois varia de acordo com as características da onda sonora e as condições meteorológicas de medição.

As fontes lineares, nos transportes, são compostas pela união de várias fontes pontuais ao longo de um eixo, com dimensão longitudinal consideravelmente superior a transversal, sem que seja possível distingui-las individualmente e, por isso, estão sujeitas às mesmas interferências ambientais apresentadas. A diferença principal reside no fato que o decaimento do nível de pressão sonora devido à distância é reduzido pela metade

em uma fonte linear – ou cilíndrica – em relação à uma fonte pontual (GERGES, 1992). A propagação de uma onda de fonte cilíndrica pode ser observada na figura 06.

Figura 6 – Propagação sonora para fontes lineares



Fonte: Elaborada pelo autor

Retomando a questão da pressão sonora, a variação de pressão pode ser descrita localmente, em um ponto, através de uma equação de Movimento Harmônico Simples (MHS), causando a vibração das partículas do ar no canal auditivo, chegando ao tímpano e causando a sensação odo som. Neste caso, a frequência do MHS de variação de pressão no tímpano corresponde à mesma vibração do ar no ponto imediatamente inferior. A diferença máxima entre a pressão atmosférica e a pressão do ar no ponto é denominada amplitude de pressão, sendo que a amplitude de pressão e de deslocamento das partículas vibratórias do ar são proporcionais entre si (TEMPLETON, 1997).

Comparada à pressão estática do ar, na ordem de 105Pa, a variação de pressão sonora audível pelo ouvido humano é de ordem relativamente pequena, da ordem de 20 $\mu$ Pa – que corresponde a  $(20 * 10^{-6} \text{ Pa})$  – até 100Pa, o que significa que mínimas variações são captadas pelo ouvido. A primeira corresponde à pressão sonora mínima que o ouvido do ser humano médio é capaz de captar, sendo denominada limiar de audição, enquanto a segunda – 100 Pa – corresponde à pressão sonora máxima, causando extremo desconforto, denominada limiar da dor (BUCUR, 2006).

O conceito de pressão sonora pode ser visualmente entendido usando-se, novamente, a analogia do projétil lançado em um lago. Dependendo da massa e do tamanho do projétil, as ondas formadas serão mais ou menos fortes. O que se percebe é, então, a vibração das ondas que se propagam pelo ar, causando variações de pressão,



interpretadas pelo sistema auditivo. A pressão sonora corresponde à intensidade percebida nos sons, refletindo diretamente a quantidade de energia sonora emitida pela fonte, que pode ser maior ou menor e impacta em sons mais ou menos potentes (MURGEL, 2007).

A figura 7 apresenta o comportamento da pressão ambiente ( $p_{ambiente}$ ) variando entre um valor máximo ( $p_{máx}$ ) e um valor mínimo ( $p_{mín}$ ) por conta da existência de um som no ambiente. As situações apresentadas na figura ilustram o conceito de período, que pode ser definido como o tempo decorrido para um ciclo completo na curva de variação de pressão ambiente em função do tempo; e de amplitude de variação da pressão ambiente ( $A$ ), que pode ser obtida pela expressão:

$$A = p_{máx} - p_{ambiente} = p_{ambiente} - p_{mín} \quad (1)$$

Onde:

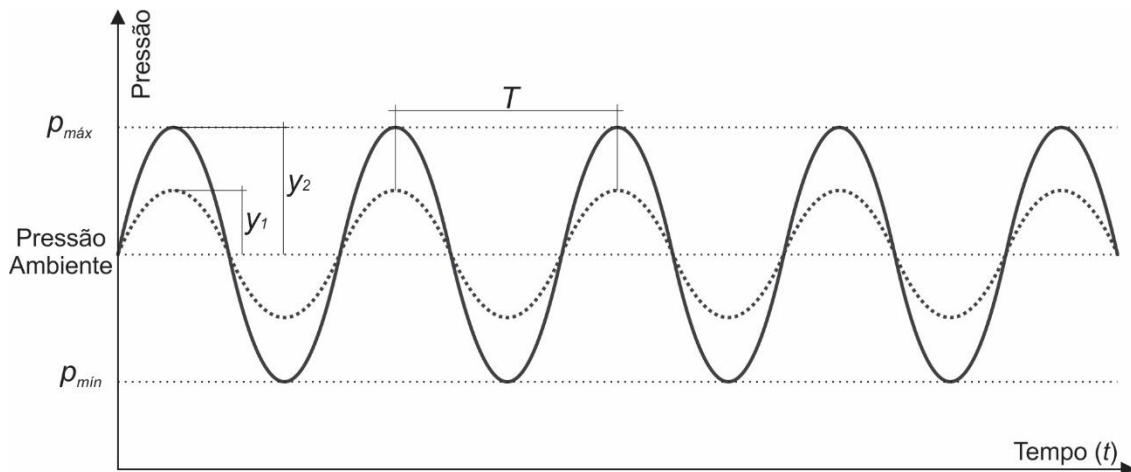
$A$  é a amplitude variação da pressão ambiente;

$p_{máx}$  é a pressão ambiente máxima;

$p_{ambiente}$  é a pressão ambiente;

$p_{mín}$  é a pressão ambiente mínima.

Figura 7 – Período e Amplitude de Onda



Fonte: Elaborada pelo autor

Bistafa (2011) destaca que, quando a variação de pressão ambiente for cíclica, para o período ( $T$ ) compreendido entre 50 ms e 50  $\mu$ s, e quando a amplitude ( $A$ ) for maior que o limiar de audição, o sistema auditivo detectará o som. Atendidos estes

critérios, a variação da pressão no ambiente passa a ser denominada pressão sonora ou pressão acústica, indicada por "p".

Ainda para Bistafa (2011, p.25) a intensidade sonora pode ser definida como "a quantidade média de energia, na unidade de tempo, que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda". Acioli (1994, p. 293), traz que a intensidade de uma onda que se propaga pode ser definida como a

"média no tempo da quantidade de energia transportada pela onda por unidade de área e por unidade de tempo através de uma superfície perpendicular à direção de propagação. Como energia por unidade de tempo é potência, pode-se também definir intensidade como a potência média transportada pela onda por unidade de área."

Em termos de sistematização matemática considera-se, para efeitos de cálculo, que a energia de uma onda sonora se distribui esfericamente, com raio R e área  $2\pi R^2$ , onde R é a distância entre a frente de onda e a fonte emissora. A partir disso, tem-se que a energia contida na unidade de área diminui com o quadrado da distância à fonte, considerando também a redução devido à absorção parcial pelo meio de propagação (HARISSON, 2004). A expressão que descreve este fenômeno é dada por:

$$I = \frac{(\Delta P)^2}{2\rho c} \quad (2)$$

Onde:

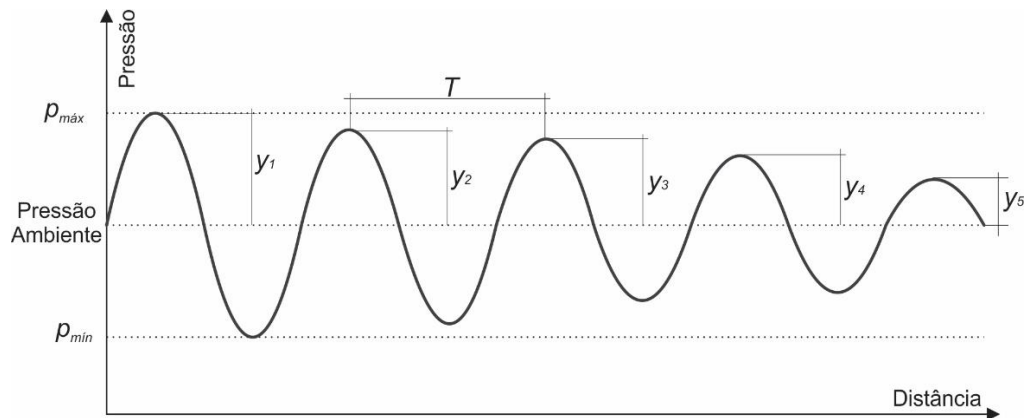
$\Delta P$  é a amplitude de pressão (valor da pressão acima ou abaixo da pressão do meio em que a onda se propaga);

P é a densidade do ar em  $\text{Kg.m}^{-3}$ ;

c é a velocidade de propagação da onda sonora em m/s.

Fahy e Walker (2006) destacam que, nesta questão, o conceito de amplitude da onda é fundamental. A amplitude da onda é a característica que permite distinguir um som fraco de um som forte e está relacionada com a quantidade de energia transportada pela onda sonora, medida em dB. Como apresentado na figura 8, a amplitude – representada pela letra y - é maior em um som considerado forte ( $y_1$ ) e menor em um som considerado fraco ( $y_5$ ), mesmo mantendo-se o mesmo período, como mostrado.

Figura 8 – Amplitude de Onda



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao ouvir os sons representados pela onda do exemplo, em separado, percebe-se que são idênticos em suas outras componentes, diferenciando-se apenas no “volume” percebido. As ondas de maior amplitude possuem mais energia sonora, sendo percebidas como de maior volume, enquanto as de menor amplitude de onda possuem menos energia sonora, sendo percebidas como de menor volume.

A razão entre a pressão sonora audível mínima e máxima é de mais de 1 para 1 milhão, o que, na aplicação direta dessa escala linear, leva a valores excessivamente grandes para serem trabalhados. O ouvido humano é sensível a variações de pressão da ordem de  $2 * 10^{-10}$  Bar, que representa uma mudança da ordem de 1/5.000.000.000 da pressão atmosférica que, em condições normais de temperatura e pressão e ao nível do mar é de 1 Bar – uma unidade barométrica (BISTAFA, 2011).

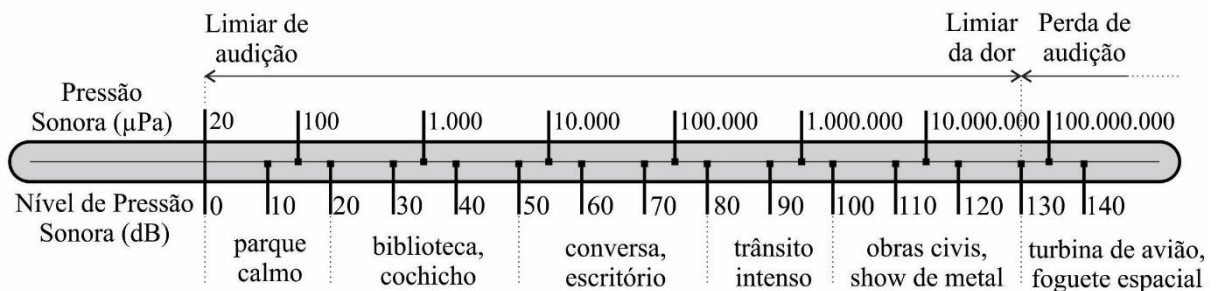
A diferença de pressão entre o mínimo som capaz de ser percebido pelo ouvido humano médio e a intensidade máxima suportável varia na ordem de  $10^{14}$  vezes, o que faz com que seja inviável a medição da intensidade sonora a partir de uma escala linear. Como o sistema auditivo não responde aos estímulos sonoros em escala linear, mas sim em escala logarítmica, usa-se a representação numérica da pressão sonora através de uma razão logarítmica entre a medida realizada e um valor de referência (HARRISON, 2004).

Esta escala logarítmica representa o nível de pressão sonora (NPS) e é denominada Bel (B), assim 1 bel corresponde a  $\log 10$ , 2 bel correspondem a  $\log 100$  e assim por diante até 14 bel ( $\log 100.000.000.000.000$ ). Ocorre que, como o bel é uma

unidade escala muito grande, e as variações de pressão perceptíveis pelo ouvido humano são de escala muito pequena, geralmente usa-se o decibel (dB), que é a décima parte do bel. Dessa forma, converte-se esta escala de milhões de unidades em uma escala que vai de 0 decibel, considerado o limiar de audição, passa por 130 decibels, considerado o limiar da dor, e chega até 140 decibels, a pressão sonora máxima que o ouvido humano consegue perceber (TEMPLETON et al, 1997).

A vantagem manifesta da utilização da escala decibel na medição do nível de pressão sonora decorre que, não obstante simplificar os cálculos, a variação logarítmica da escala corresponde aproximadamente à resposta do ouvido humano à percepção sonora: 1 dB corresponde à mesma variação relativa, considerando qualquer ponto da escala (MURGEL, 2007). A figura 9 apresenta a escala linear em  $\mu\text{Pa}$  e a escala logarítmica em dB.

Figura 9 – Escala linear e escala logarítmica



Fonte: Elaborada pelo autor

Em termos de nível de pressão sonora, o espectro audível do som para o ser humano médio varia entre o limiar de audição, em 0dB, e o limiar de dor, em 130dB, já que sons acima dos 130 dB podem provocar surdez instantânea e, embora perceptíveis, o serão uma única vez devido à surdez temporária ou permanente provocada em indivíduos expostos à tal pressão. Como tratamos de operações logarítmicas, embora um aumento de 6dB represente o dobro de pressão sonora, é necessário um acréscimo de 8 a 10 dB para que o indivíduo subjetivamente perceba aumento considerável no som escutado. De forma similar, a menor variação perceptível pelo ouvido humano gira em torno de 1 dB (BUCUR, 2006).

Deve-se ressaltar que, devido à natureza logarítmica das operações, o nível de pressão sonora obtido a partir da emissão por duas fontes distintas não pode ser

caracterizado por soma aritmética. O cálculo da resultante deve considerar a soma logarítmica, sendo obtido pela seguinte expressão:

$$L_R = 10 \log\left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}\right) \quad (3)$$

Onde:

$L_R$  é o nível de pressão sonora resultante, em dB;

$L_1$  é o nível de pressão sonora medido na fonte 1, em dB;

$L_2$  é o nível de pressão sonora medido na fonte 2, em dB;

Realizando-se o cálculo apresentado anteriormente para duas fontes sonoras de mesma intensidade, é possível verificar que o acréscimo resultante é da ordem de 3dB (A). Esse raciocínio permite a conclusão que, se a exclusão hipotética de uma das fontes reduz o nível de pressão sonora em mais de 3dB (A), pode-se considerar esta fonte como a predominante (MURGEL, 2007). Isso significa que tal fonte possui um nível de pressão sonora de ordem superior à outra, de forma que sua presença “mascara” o nível de pressão sonora da menor.

A atenuação do nível de pressão sonora, logicamente, segue o mesmo princípio logarítmico e também não pode ser realizada aritmeticamente. Bistafa (2011) destaca que, emitido o estímulo sonoro por uma fonte pontual, este se propaga esfericamente em todas as direções até encontrar obstáculos à sua trajetória. Percebe-se, entretanto, que à medida em que a onda sonora se afasta da fonte, a frente de onda ocupa uma área maior. Uma vez que o nível de energia na frente de onda é constante, o aumento da área provoca uma redução da intensidade sonora. Esta redução pode ser calculada pela expressão:

$$L_2 = L_1 - 20 \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \quad (4)$$

Onde:

$d_1$  é a distância entre o ponto 1 e a fonte, em m;

$d_2$  é a distância entre o ponto 2 e a fonte, em m;

$L_1$  é o nível de pressão sonora medido na distância 1, em dB;

$L_2$  é o nível de pressão sonora resultante na distância 2, em dB;

A expressão indica que, no caso das fontes pontuais, cada vez que for duplicada a distância da fonte sonora, o nível de pressão sonora sofrerá uma perda de 6 dB (A).

No caso das fontes lineares, devido à sua natureza de continuidade espacial linear, a propagação do som ocorre de forma cilíndrica, ao longo do eixo da fonte. Por conta disso, a redução do nível de pressão sonora em função da distância pode ser calculada pela expressão:

$$L_2 = L_1 - 10 \log \left( \frac{d_2}{d_1} \right) \quad (5)$$

Onde:

$d_1$  é a distância entre o ponto 1 e a fonte, em m;

$d_2$  é a distância entre o ponto 2 e a fonte, em m;

$L_1$  é o nível de pressão sonora medido na distância 1, em dB;

$L_2$  é o nível de pressão sonora resultante na distância 2, em dB.

Os fenômenos vibratórios são avaliados em relação à sua frequência, ou seja, ao número de vezes que a onda oscila em função do tempo, cuja unidade de medida usual é o hertz (Hz), que indica a quantidade de oscilações que ocorrem no período temporal de um segundo. Acioli (1994) traz que a frequência ( $f$ ) é obtida a partir do inverso do período ( $T$ ), ou seja:

$$f = \frac{1}{T} \quad (6)$$

Onde:

$f$  é a frequência, em Hz;

$T$  é o período, em segundos.

São perceptíveis, para o ouvido humano, somente as frequências compreendidas no intervalo de 20Hz a 20KHz, ou seja, entre 20 e 20.000 vibrações por segundo. As frequências de vibração inferiores a 20Hz são denominadas infrassons e as superiores a 20.000Hz, ultrassons (MURGEL, 2007).

Bistafa (2011) expõe que, embora capaz de perceber os sons com frequência entre 20Hz e 20.000Hz, a audição humana não possui a mesma sensibilidade a todo este

intervalo. Os sons muito graves (de frequência muito baixa) e os sons muito agudos (de alta frequência), são percebidos em menor intensidade que os de média frequência. A figura 10 apresenta o espectro audível de frequências e sua classificação usual.

Figura 10 – Espectro de frequências



Fonte: Elaborada pelo autor

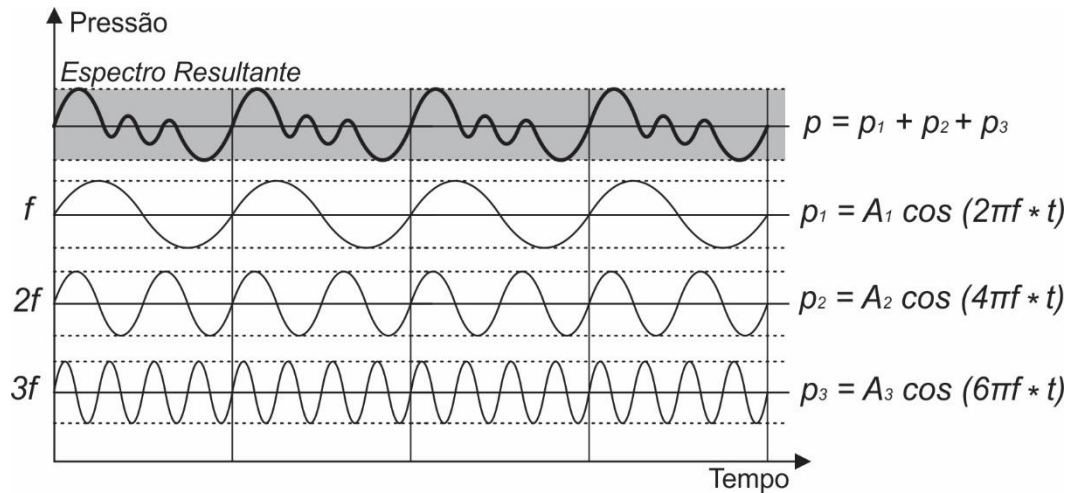
Embora não captadas e, portanto, não audíveis pelo ouvido humano, é importante considerar que as frequências de infra e ultrassons são, normalmente, captadas por uma grande quantidade de animais, razão pela qual podem causar grandes incômodos devido, principalmente, aos ultrassons. Alguns animais possuem, ainda, sistemas de orientação sonora com funcionamento similar aos sonares e radares utilizados pelos humanos – São capazes de identificar posição, escala e distância de barreiras através do tempo de demora entre a emissão de um sinal sonoro e a reflexão deste sinal ao encontrar o obstáculo (FAHY; WALKER, 2006).

Como já dissemos, o número de variações de pressão que ocorre em 1 segundo é denominado frequência do som e medido em hertz (Hz) e o ouvido médio humano detecta sons compreendidos no intervalo de 20Hz – sons graves, de grande período – a 20.000Hz sons agudos, de pequeno período. À essa característica do som, dá-se o nome de altura. A altura do som depende diretamente da frequência, quanto maior a frequência, mais “alto” é o som. A recíproca também é verdadeira: quanto menos a frequência, mais “baixo” é o som (BISTAFA, 2011).

Com relação à propagação aérea do som, a frequência assume papel importante na atenuação devido à propagação. Murgel (2007, p.29) traz que “quanto mais alta a frequência do som, maior será a atenuação do som no ar, motivo pelo qual, em grande distância da fonte sonora, praticamente só são audíveis os sons de baixa frequência (sons graves)”.

Sons em uma única frequência são denominados “tons puros”, entretanto os sons ouvidos normalmente quase nunca se tratam de sons deste tipo. Comumente, o que escutamos são combinações de tons puros em várias frequências. A figura 11 apresenta a sobreposição de tons puros, com sua onda resultante que mostra a superposição em três frequências distintas.

Figura 11 – Superposição de tons puros



Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber a peculiaridade de que a frequência mais baixa ( $f$ ) é um divisor comum das mais elevadas ( $2f$ ) e ( $3f$ ), sendo a primeira denominada frequência fundamental dos sons superpostos e as demais, sobretons. À frequência mais baixa dá-se o nome de frequência fundamental ou fundamental, enquanto os sobretons são denominados harmônicos do fundamental ou apenas harmônicos.

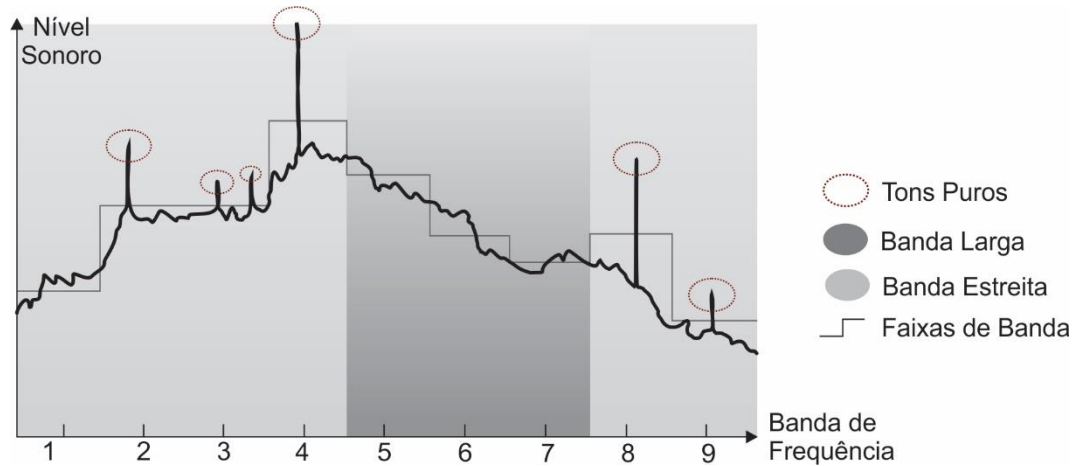
Sons com pouca duração temporal, como marteladas, tiros ou uma batida de automóveis apresentam formas de ondas discretas e são denominados impulsivos ou de impacto. O espectro sonoro de sons impulsivos cobre uma faixa de frequências mais ampla que os sons contínuos de longa duração (BISTAFSA, 2011).

Bistafa (2011), indica que, normalmente, os instrumentos de medição acústica fornecem o espectro sonoro em bandas – ou faixas – de frequências. A divisão em bandas se dá em estreitas e largas: o espectro de banda estreita pode ser obtido com larguras próximas de 1Hz, enquanto o espectro de banda larga, geralmente, é obtido em bandas de largura constante ou variável, como é o caso das bandas de oitava, bastante



utilizado, em que a largura de cada banda é, aproximadamente, 70% da frequência central, como mostrado na figura 12.

Figura 12 – Bandas de frequência



Fonte: Adaptada de Bistafa (2011)

Ao se analisar o espectro de um mesmo som em relação às bandas largas e estreitas, percebe-se que o espectro de banda estreita fornece mais detalhadamente a distribuição do som em função da frequência que o espectro de banda larga. Na verdade, chega até a ser possível detectar a presença de tons puros sobrepostos ao espectro contínuo na análise do espectro de banda estreita. O espectro de banda larga não consegue revelar a existência destes tons puros contidos no som.

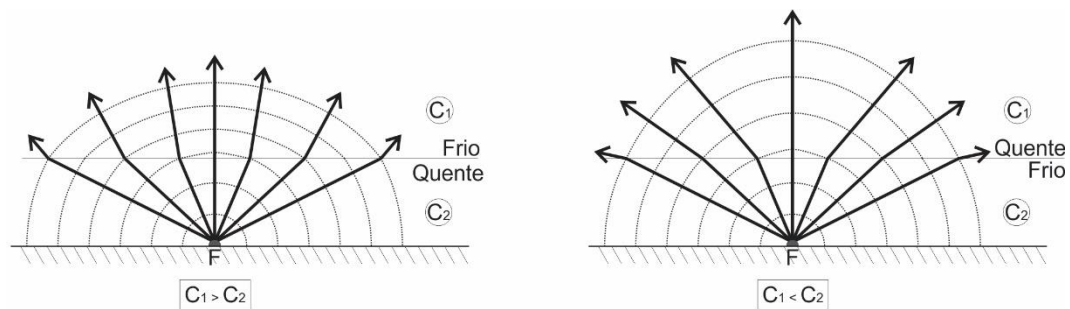
As fontes sonoras variam de acordo com as características de emissão do som, sendo as principais fontes denominadas pontuais e lineares. A fonte sonora esférica geradora de ondas concêntricas, para a qual a pressão sonora decai à metade a cada vez que se dobra a distância fonte-receptor (6dB cada vez que se dobra a distância), é denominada fonte pontual. As fontes de ruído não provenientes do tráfego de veículos ou de equipamentos de amplificação sonora são, geralmente, modeladas como fontes pontuais (TEMPLETON et al, 1997).

Fontes sonoras lineares correspondem àquelas em que não é possível identificar uma única fonte, como no caso de tubulações para fluidos ou vias de tráfego rápido de alto fluxo. A característica de inerente linearidade desses sistemas faz com que o som se espalhe linearmente a partir de uma frente de onda cilíndrica. Neste caso, ao se dobrar a distância da fonte, o nível de pressão sonora decai 3dB (BISTAFA, 2011).

Existem ainda as fontes de ondas planas, entretanto seu uso é especializado na criação de um equipamento denominado tubo de impedância. Este equipamento é montado de forma que a espessura e material do tubo, acoplado a um alto falante, propiciem a criação de ondas planas no interior, de forma que não há perda de pressão sonora na propagação do som devido à distância. Tal equipamento demonstra-se particularmente eficiente na determinação em laboratório do coeficiente de absorção sonora de materiais, que são inseridos na extremidade oposta ao alto falante (TEMPLETON et al, 1997).

Murgel (2007) demonstra que os fatores climáticos têm grande importância na propagação aérea do som, influenciando também na atenuação. À mesma temperatura, a atenuação é maior em situação de baixa umidade relativa do ar em relação à situação de umidade relativa elevada. O efeito da variação de temperatura na atenuação do som é ainda mais complexo, sendo maior a atenuação em temperaturas intermediárias (dependendo da umidade relativa do ar) e menor em baixas ou altas temperaturas, como pode ser verificado na figura 13. Considerando que a temperatura do ar varia de acordo com a altura em relação ao solo, a trajetória da onda sonora é modificada ponto a ponto, interferindo no modo como a onda é atenuada e desviada, o que leva a um comportamento de difícil previsão.

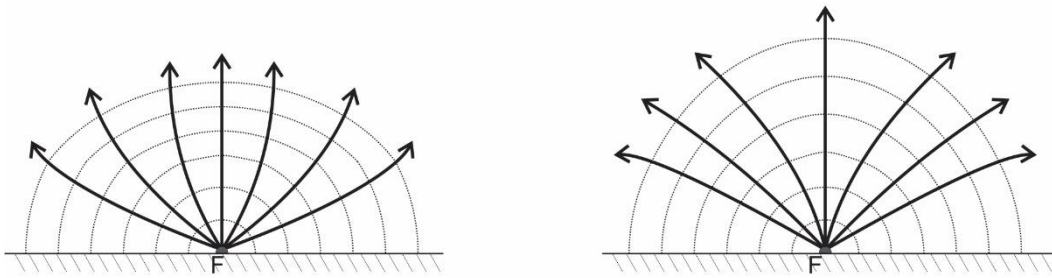
Figura 13 – Efeito da temperatura na trajetória das ondas sonoras



Fonte: Elaborada pelo autor

Logicamente, na atmosfera, a temperatura não muda abruptamente, mas vai se modificando gradualmente, o que faz com que a situação representada na figura 14 seja mais próxima da realidade, com o desvio também gradual, resultando em ondas de trajetórias parabólicas (ACIOLI, 1994).

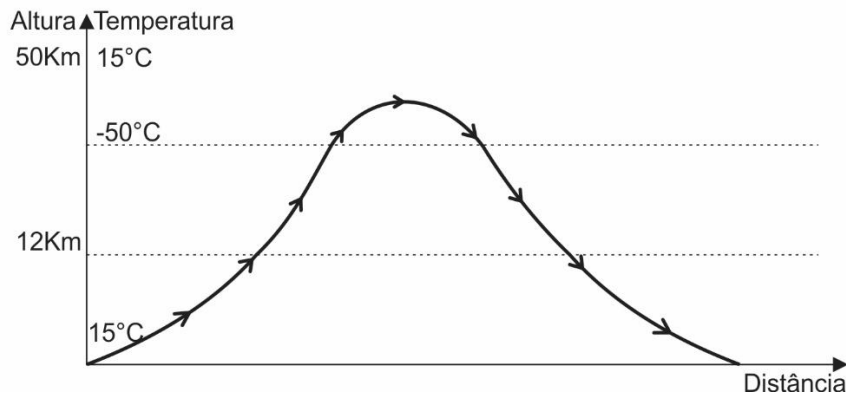
Figura 14 – Trajetória das ondas sonoras influenciadas pela temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor

Por último, Acioli (1994) demonstra que há situações em que a atmosfera vai esfriando gradualmente até atingir determinada altura e, a partir daí, inverte e volta a se aquecer. Neste caso, a sequência mais quente / mais frio / mais quente desvia as ondas sonoras, seguindo-se os mesmos preceitos explicitados, e retorna o som para o solo. Nesta situação, se o som for suficientemente intenso, poderá ser ouvido a grandes distâncias de sua fonte, como é o caso de uma explosão, por exemplo, como indicado na figura 15.

Figura 15 – Influência das camadas térmicas na onda sonora



Fonte: Adaptada de Acioli (1994)

Assim como os fatores climáticos, o vento também interfere na propagação som, de forma direta e indireta. Diretamente, tem-se que as ondas sonoras se deslocam quando a massa de ar se move, na mesma proporção, já que o ar é o meio de propagação das ondas sonoras. Se a onda sonora se desloca na mesma direção e sentido que a massa de ar, a sensação do receptor será de aumento do nível sonoro, já que as ondas sonoras tiveram de atravessar uma massa de ar menor e, por isso, teve menos perdas.

Logicamente, se a onda sonora se desloca na mesma direção que a massa de ar, mas em sentido inverso, o nível sonoro percebido será menor, uma vez que a onda

sonora teve de atravessar uma massa de ar maior, gerando mais perdas. Indiretamente, a ação do vento se dá pela alteração do gradiente térmico, contribuindo para as situações já descritas em relação à temperatura do ar (MURGEL, 2007).

## **2.2. Fundamentos do controle de ruído**

O ruído ambiental é o resultado da combinação do ruído de todas as fontes sonoras presentes em determinado ambiente. As fontes sonoras, ou de ruído, podem ser classificadas como fixas (indústrias, discotecas, clubes, obras de construção civil) ou móveis, que é o caso do tráfego de veículos (aviões, trens, ônibus, automóveis, motocicletas). Pode-se também classificá-las com base em suas características geométricas, comparando suas dimensões e distâncias relativas entre fonte e receptor. Deste modo, as diversas fontes sonoras podem ser vistas como fontes pontuais, lineares ou de superfície (NIEMEYER; SLAMA, 1998).

Uma fonte pontual apresenta dimensões bem menores do que a sua distância ao receptor (ouvinte). Neste caso, a energia sonora se dissipa, esfericamente, de modo que o nível de pressão sonora é o mesmo para todos os pontos de mesma distância. Segundo essas condições, as indústrias, discotecas e áreas de lazer podem ser vistas como exemplos de fontes pontuais.

Já as fontes lineares se caracterizam por possuir uma de suas dimensões bem maior em relação à distância entre fonte e receptor. O som sofre dissipação de forma cilíndrica e o nível sonoro se apresenta, igualmente, para todos os pontos de mesma distância à linha de eixo da fonte. Assim, uma via de circulação de veículos e uma linha ferroviária podem ser modeladas como fontes lineares de grande comprimento.

Por fim, uma fonte de superfície apresenta duas de suas dimensões comparáveis ao distanciamento entre a fonte e o receptor. A transmissão do ruído através de portas, janelas ou paredes de uma edificação representa, claramente, esse tipo de situação.

Niemeyer e Slama (1998) indicam que essa forma de classificação se mostra um tanto flexível, dependendo, na maioria das vezes, do contexto em análise. Assim, não seria errado entender uma indústria como fonte de superfície dentro da dimensão de um bairro, e nem tampouco considerá-la como fonte pontual numa escala maior como, por exemplo, a cidade.

Conforme visto anteriormente, uma grande variedade de fontes de ruído está presente no meio urbano, sendo o tráfego de veículos automotores apontado por muitas pesquisas nacionais e internacionais, como principal responsável pelos elevados níveis de poluição sonora. Souza (2006) ressalta o transporte como a principal fonte de poluição sonora nas cidades por ser de caráter bastante difuso. Segundo ele, a qualidade sonora das áreas próximas a aeroportos, rodovias e estradas de ferro é profundamente degradada em vista do ruído emitido por essas fontes que, em geral, se apresenta de maneira intermitente.

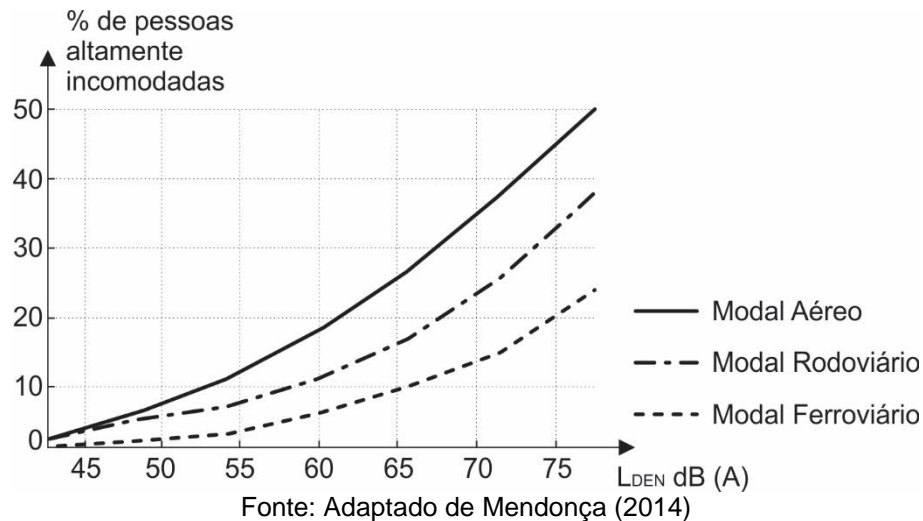
O ruído das indústrias, embora afete, relativamente, poucas pessoas, se faz presente na comunidade por um longo período de tempo. Nesta questão, considera-se, também, os ruídos decorrentes do comércio e serviço, das atividades militares e das atividades de lazer. Particularmente no Brasil, por conta das características climáticas mais amenas, são cada vez mais comuns as atividades ruidosas de lazer e convivência social no período noturno.

Quanto ao ruído proveniente das atividades da construção civil, Krumhansl e Kessler (1982) consideram que, mesmo se apresentando em altos níveis, na maioria das vezes é aceito sem maiores incômodos pelas pessoas por ser de curta duração. Os autores ainda destacam a presença dos ruídos domésticos como aqueles gerados na própria residência, através do uso de aparelhos domésticos, tais como, ar condicionado, aspirador de pó, liquidificador, televisão, rádios, etc.

Nesse sentido, os estudos de Mendonça (2014), Bistafa (2011), Templeton (1997), concluíram que níveis sonoros equivalentes de diferentes tipos de fontes de ruído podem conduzir às variadas sensações de incômodo em grupos de pessoas expostas a essas emissões. Para iguais valores de nível sonoro médio dia-noite (Ldn),

que consiste no nível de pressão sonora equivalente com uma penalidade de 10 dB para a exposição noturna (entre as 22h00min e 07h00min), pode haver resposta individual diferenciada. Um exemplo disso encontra-se ilustrado na figura 16, que apresenta um comparativo entre porcentagens de pessoas altamente incomodadas pelos tráfegos aéreo, rodoviário e ferroviário, dada a mesma situação sonora.

Figura 16 – Porcentagens de pessoas altamente incomodadas por modal



O ruído ambiental não é constante e, por isso, faz-se necessário que as medições realizadas sejam capazes de obter um demonstrativo do ruído característico do local de análise indicando, além de um valor médio, alguns outros parâmetros que permitam caracterizar as oscilações sonora incidentes e a magnitude do impacto causado por eles. Por conta dessas necessidades, geralmente, são utilizados o nível equivalente contínuo ( $L_{eq}$ ) e os níveis estatísticos  $L_{10}$ , que corresponde ao nível de ruído ultrapassado em 10% do tempo de medição e  $L_{90}$ , que corresponde ao nível de ruído ultrapassado durante 90 % do tempo de medição, parâmetros estatísticos que facilitam a interpretação dos valores medidos (MURGEL, 2007).

“O  $L_{eq}$  constitui a integração do nível sonoro medido a cada fração de segundo, representando o ruído médio, ou seja, o nível sonoro que, se fosse contínuo, equivaleria ao ruído de fato medido, que sofre grandes oscilações. É também chamado de “dose de ruído”, pois em seu cálculo considera-se não somente o nível sonoro como também o tempo de exposição, que na verdade é o melhor parâmetro de indicação do grau de danos causados por determinada fonte sonora. Por exemplo, um pico sonoro de curta duração de 90 dB (A) causa muito menos danos que um nível sonoro constante de 80 dB (A) por uma hora.” (MURGEL, 2007. p.25)

Essa definição nos permite perceber que o nível equivalente contínuo permite perceber os níveis médio de exposição ao qual se está sujeito em determinado ambiente, uma vez que a pressão sonora pode variar em uma amplitude relativamente grande, com picos de ruído – provocados por um ruído de impacto por exemplo. Esse parâmetro, ao permitir a verificação do ruído médio, permite também identificar se o ambiente possui características sonoras tais que venham a causar problemas a longo prazo devido à exposição à um nível de ruído contínuo elevado (BISTAFA, 2011).

Com relação aos demais parâmetros estatísticos citados, têm-se que

“O  $L_{10}$  é o nível sonoro que foi ultrapassado em 10% do tempo de medição, e pode ser considerado como o ruído máximo no período, excluídos os picos sonoros que ocorreram somente em 10% do tempo. Finalmente, o  $L_{90}$  é o nível sonoro que foi ultrapassado em 90% do tempo de medição, correspondendo, por definição, ao ruído de fundo. É assim chamado, pois, ao cessarem as principais fontes sonoras (por exemplo quando silenciam simultaneamente todas as vozes em um ambiente repleto de pessoas), resta um nível sonoro “de fundo”, oriundo de fontes dispersas e distantes, que não cessam, como, por exemplo, o ruído do ar condicionado em um escritório ou o som grave (causado por vias de tráfego e outras fontes fixas dispersas) que os habitantes das grandes cidades escutam sempre que não estão sujeitos a fontes sonoras próximas.” (MURGEL, 2007. p.26)

A partir do exposto por Murgel (2007), é possível perceber que o  $L_{10}$  se torna útil na análise dos ruídos de elevada pressão sonora que incidem no ambiente analisado, possibilitando a verificação de sua natureza e direcionamento para mitigação. Já o  $L_{90}$ , ao permitir verificar o “ruído de fundo” característico do ambiente, direciona a análise do espaço tanto para as atividades ideais quanto para as necessidades de mitigação deste ruído em caso de incompatibilidade entre o nível de  $L_{90}$  encontrado e a atividade proposta para o espaço – por exemplo, se o  $L_{90}$  apresentar um nível elevado, resultando em um ruído de fundo também elevado, a comunicação pode ser dificultada ou mesmo não ser efetiva no ambiente, mascarando a fala e as informações que se deseja passar através dela.

Devido à sua característica de representação do ruído médio, considera-se o  $L_{eq}$  como o mais versátil dos parâmetros de medição, sendo geralmente utilizado como parâmetro legal e normativo na avaliação ambiental.  $L_{10}$  e  $L_{90}$ , por sua vez, dão uma

indicação aproximada da amplitude de variação da pressão sonora, auxiliando na avaliação do grau de incômodo do ruído verificado.

O que determina mais precisamente o grau de incômodo verificado é, na realidade, mais que o valor médio, a existência de grandes variações do nível de ruído, por serem altamente incômodas, uma vez que sons de alta intensidade, isolados, possuem maior potencial de percepção e perturbação. O nível de perturbação sonora ( $L_{ps}$ ) pode ser calculado tendo-se por base os parâmetros anteriores, através da equação apresentada a seguir:

$$L_{ps} = L_{eq} + (L_{10} - L_{90}) \quad (7)$$

Onde:

$L_{ps}$  é o nível de perturbação sonora;

$L_{eq}$  é o ruído equivalente;

$L_{10}$  é nível de ruído que é ultrapassado em 10% do tempo total de medição;

$L_{90}$  é o nível de ruído que é ultrapassado em 90% do tempo total de medição.

Existem, ainda, os parâmetros nível máximo ( $L_{máx}$ ) e nível mínimo ( $L_{mín}$ ), que podem ser medidos diretamente e correspondem ao maior e menor níveis de pressão sonora detectados durante a medição. Ressalta-se, entretanto, que devido à sua característica, em se tratando da medição do ruído ambiental, esses parâmetros não são expressivos, visto que um pico sonoro que represente o  $L_{máx}$ , como o provocado por uma buzina esporádica ou o latido de um cachorro, não são representativos do ruído característico do ambiente avaliado (MURGEL, 2007).

Murgel (2007) destaca que, de modo geral, uma rodovia pode ser considerada uma fonte linear ou cilíndrica, mas com algumas ressalvas. O ruído, na realidade, não é contínuo ou constante em toda sua extensão, uma vez que é gerado por emissores (veículos) de diferentes características que se movem em uma mesma linha (rodovia). Devido à essa característica, têm-se que:

“[...]o ruído máximo de tráfego em uma rodovia, causado por um veículo isolado que passou em determinado momento, tem o comportamento de fonte pontual, devendo, portanto, ser aplicada a fórmula específica para este caso. Já o ruído residual de tráfego, que



se apresenta constante ao longo da via, tem o comportamento puro de uma fonte linear. Assim, conforme nos distanciamos de uma rodovia, o ruído proveniente dela se torna cada vez mais contínuo, pois o decaimento do  $L_{10}$  é mais intenso que o do  $L_{90}$ , o que, a maiores distâncias, equipara as intensidades nos diferentes níveis estatísticos ( $L_{10}$ ,  $L_{90}$  e  $L_{eq}$ ), caracterizando uma fonte sonora contínua.” (MURGEL, 2007. p.28)

Isto posto, percebe-se que, em se tratando de vias de tráfego, os parâmetros estatísticos geralmente aplicados nos estudos de acústica apresentam comportamentos particulares. O parâmetro  $L_{10}$  se aproxima das características de uma fonte pontual, uma vez que reflete as altas intensidades provocadas isoladamente por veículos específicos dentro do conjunto de veículos em movimento. O parâmetro  $L_{90}$  assemelha-se mais a uma fonte linear, uma vez que responde pelo ruído médio dos veículos em movimento, constituindo o “ruído de fundo”, reforçando a unidade e continuidade, características da fonte linear ou cilíndrica. Por fim,  $L_{eq}$  tem comportamento intermediário entre uma fonte pontual e uma fonte linear, justamente devido à interpolação entre  $L_{10}$  e  $L_{90}$ .

### **2.3. Ambiente acústico**

Os sons estão presentes em espaços interiores ou exteriores, em áreas urbanas ou rurais, quaisquer sejam as atividades. Nós ouvimos vozes, veículos, animais, máquinas e, algumas vezes, o som do nosso próprio sangue em circulação. Nosso sistema auditivo está sempre em funcionamento, mesmo enquanto dormimos, e ao dividirmos um espaço com outras pessoas, seja interno ou externo, dividimos também um ambiente acústico (BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, 2016).

O ambiente acústico, enquanto ambiente sonoro de base neutra, é composto pela energia sonora e pela informação percebidas, o que requer uma abordagem da capacidade cognitiva dos receptores em converter esta energia sonora em informação. Por conta disso, o ambiente sonoro pode ser descrito, em geral, por três níveis de complexidade crescente: O primeiro nível é caracterizado pelas propriedades físicas do som, indo das frequências de infrassons a ultrassons. O segundo nível é o da capacidade fisiológica de percepção de cada espécie: por exemplo, neste nível a capacidade de percepção humana é restrita a frequências entre 20-20.000Hz, enquanto baleias podem ouvir infrassons entre 0.001Hz e 20Hz e morcegos podem ouvir frequências ultrassônicas

de até 210kHz. O terceiro nível consiste na interpretação dos sons de acordo com a decodificação genética ou a decodificação sociocultural dos sinais sonoros. Neste último nível, a experiência pessoal e as características do som são consideradas simultaneamente (FARINA, 2014).

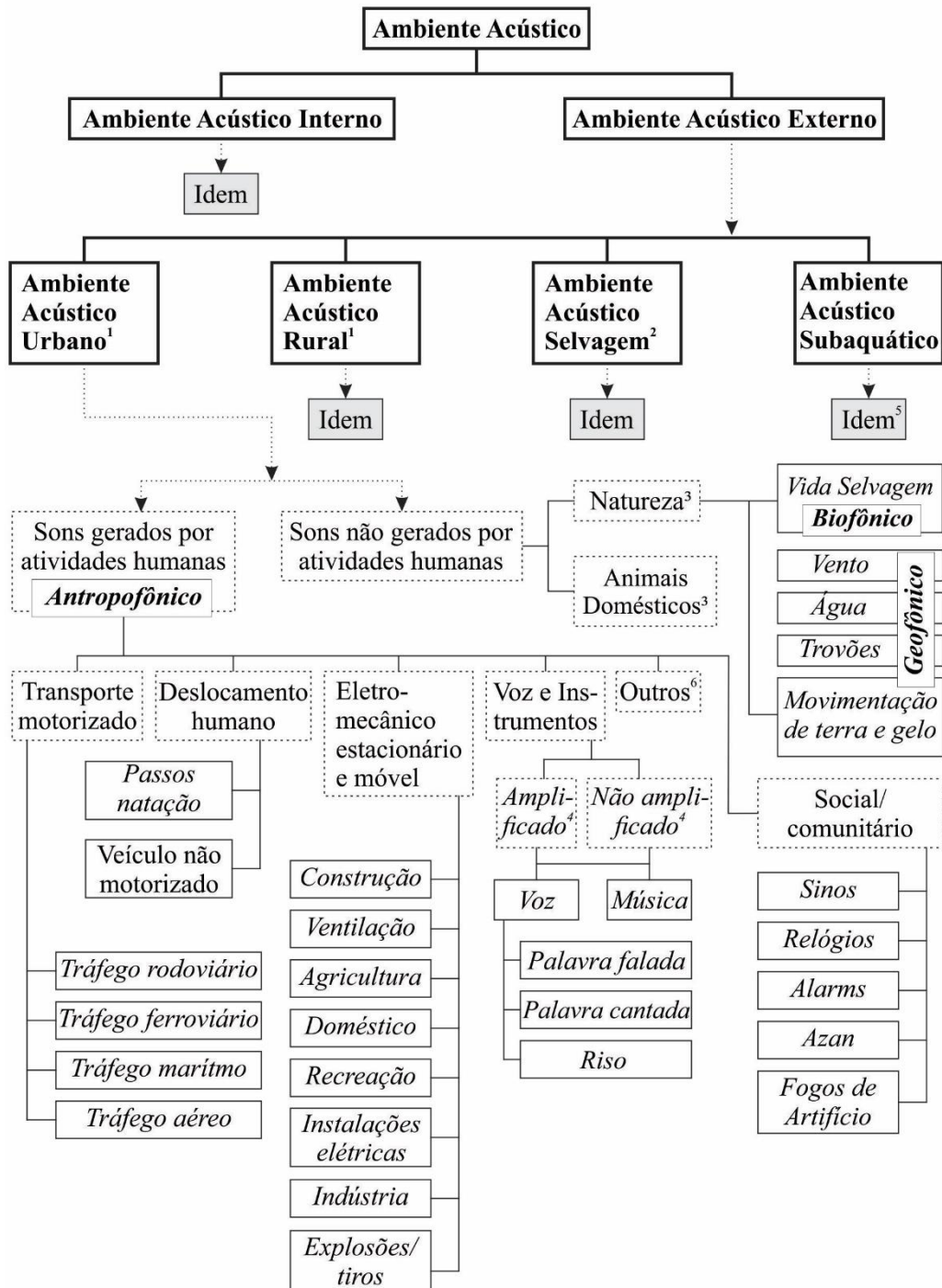
O ambiente acústico de um local é caracterizado pela totalidade dos diferentes sons percebidos diretamente ou através das modificações enquanto estes se propagam entre as fontes sonoras e os receptores. Estas modificações incluem reflexão e absorção do som pelos materiais e propriedades físicas do espaço (BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, 2016).

Em áreas externas campestres ou de pouca ocupação, geralmente tem-se apenas uma superfície refletiva – o chão – com múltiplas reflexões no caminho percorrido pelo som entre a fonte e o receptor. Em áreas externas urbanas tem-se, adicionalmente, a reflexão do som por barreiras e edifícios e, em áreas urbanas densamente povoadas, o ambiente acústico externo será bem semelhante ao experienciado em espaços internos, com múltiplas reflexões sonoras. O Ambiente acústico de espaços externos é moldado, principalmente, pela absorção do som pela atmosfera e pela refração do som entre fonte e receptor (BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, 2016).

O ambiente acústico de qualquer espaço – seja interno ou externo – depende, então, da combinação entre as fontes sonoras, a localização do receptor em relação às fontes e as condições de propagação do som no caminho entre fonte e receptor. Cada uma destas características pode variar devido a condições como natureza da fonte, período do dia ou época do ano (SCHAFER, 1997).

Diversos autores buscaram caracterizar o ambiente acústico e a natureza das fontes sonoras (SCHAFER, 1997; GAGE et al, 2004 apud BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS,, 2016; MAEKAWA, RINDEL, LORD, 2011; BROWN et al, 2011 apud BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, 2016). Brown, Gjestland e Dubois (2016) realizaram a integração das categorias levantadas pelos estudos anteriores, possibilitando a criação de um modelo integrado que permite a avaliação holística das características do ambiente sonoro a partir de suas fontes, conforme pode ser visto na figura 17.

Figura 17 – Categorização das Fontes Sonoras



1. A divisão entre urbano e rural nem sempre será clara;

2. A categoria “selvagem” inclui reservas de biosfera, áreas naturais não ocupadas, zonas costeiras, e parques recreativos de grandes dimensões. Da mesma forma, a divisão entre rural e selvagem nem sempre será clara;

3. Enquanto as fontes “natureza” e “animais domésticos” figuram como não geradas por fontes humanas, existem várias áreas de sobreposição – por exemplo, os sons de água corrente em parques aquáticos e fontes ou o som do vento em edifícios. Os sons gerados por animais domésticos geralmente estão associados a alguma atividade humana;

4. Gravação, execução e amplificação podem ocorrer com qualquer tipo de som;

5. Por conta das diferentes propriedades do ar e da água, muitos dos sons terrestres não são normalmente observados em meio aquático, mas, no geral, o mesmo sistema de classificação é aplicável;

6. Tossir, por exemplo.

Fonte: Adaptada de Brown, Gjestland e Dubois, 2016

## 2.4. Paisagem Sonora

O estudo da paisagem sonora a partir da perspectiva dos humanos requer uma abordagem comportamental que possibilite a síntese entre os estímulos visuais e sonoros. A associação entre ambiente acústico e características físicas dos ambientes é importante para o bem-estar do indivíduo, inserido em uma sociedade com crescente nível de ruído antropogênico, em sua busca por áreas calmas e restaurativas (FARINA, 2014).

Ainda para Farina (2014), a percepção do contexto acústico em que se está inserido depende de relações e habilidades específicas que são originadas tanto em fatores genéticos como culturais, ou seja, a interpretação de estímulos sonoros requer capacidades específicas de cada agente (humanos e outros animais) que são desenvolvidas devido ao contexto sociocultural.

A paisagem sonora pode ser definida como a construção da percepção individual sobre o ambiente acústico de um determinado espaço que contemple algumas características físicas e visuais resultantes do ambiente construído ou natural, no qual ocorram interações mútuas entre indivíduos ou entre o indivíduo e o ambiente. O indivíduo, ao desenvolver atividades nestes locais, recebe estímulos auditivos do ambiente acústico e os interpreta em sensações auditivas (BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, 2016).

Essa paisagem forma-se a partir de um contexto moldado pelos estímulos sensoriais e pelas informações acumuladas pelo indivíduo sobre o espaço como seu uso, propostas, significância cultural, motivações próprias e de terceiros, atividades associadas e etc. A paisagem sonora nasce a partir do ambiente acústico, mas seus conceitos não são iguais e, por isso, não pode ser medida apenas através dos equipamentos especializados como no caso do ambiente acústico (BOTTELDOOREN et al, 2016).

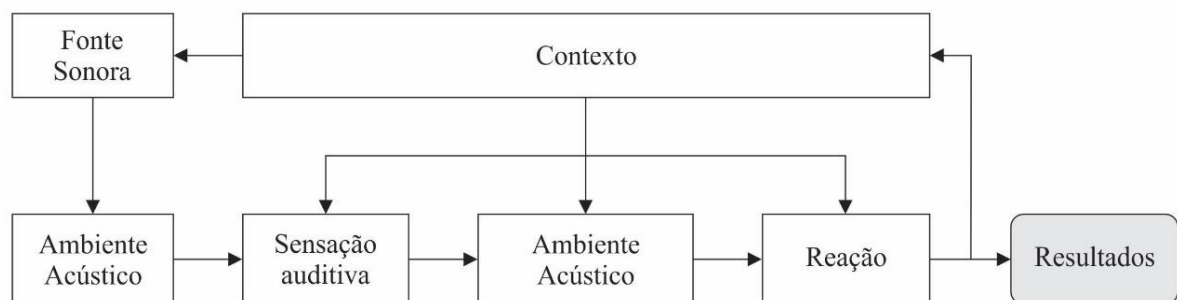
Para a identificação da paisagem sonora, são aplicados instrumentos como entrevistas, mapas comportamentais, mentais e de seleção visual, observação dos usuários, entre outros. A aplicação desses instrumentos, somada às medições

ambientais, permite a definição das características da paisagem sonora, fornecendo dados quanti-qualitativos (FARINA, 2014).

Através da interpretação da paisagem sonora o indivíduo consegue distinguir diversas características não visuais no qual está inserido como, por exemplo, se está em uma área industrial, no centro de uma grande cidade ou em um parque recreativo. O conceito de paisagem sonora tende a ser mais aplicado em áreas abertas externas, podendo também ser aplicado no estudo de espaços interiores, principalmente os públicos, sempre envolvido no senso de espacialidade dos indivíduos (JARVILUOMA; VIKMAN, 2015).

Na figura 18 é possível observarmos a rede de relações e interpretações realizadas entre a recepção do estímulo auditivo e a construção da paisagem sonora pelo indivíduo a partir do ambiente acústico.

Figura 18 – Diagrama de construção da paisagem sonora.



Fonte: Adaptada de Brown, Gjestland e Dubois, 2016.

Algumas das diversas “reações” individuais possíveis ao ambiente acústico podem ser exemplificadas por sensações como prazer, conforto acústico, excitação ou medo. Já como exemplos de “resultados” pode-se incluir a sensação de pertencimento, senso de harmonia, restauração (geralmente associada a locais verdes e natureza) e apreciação de elementos naturais através de seus sons característicos. Em diferentes espaços e contextos, as respostas individuais em relação ao ambiente acústico podem variar significativamente ou serem multidimensionais, levando em conta os fatores e características almejadas para desenvolvimento de atividades distintas (BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, 2016).

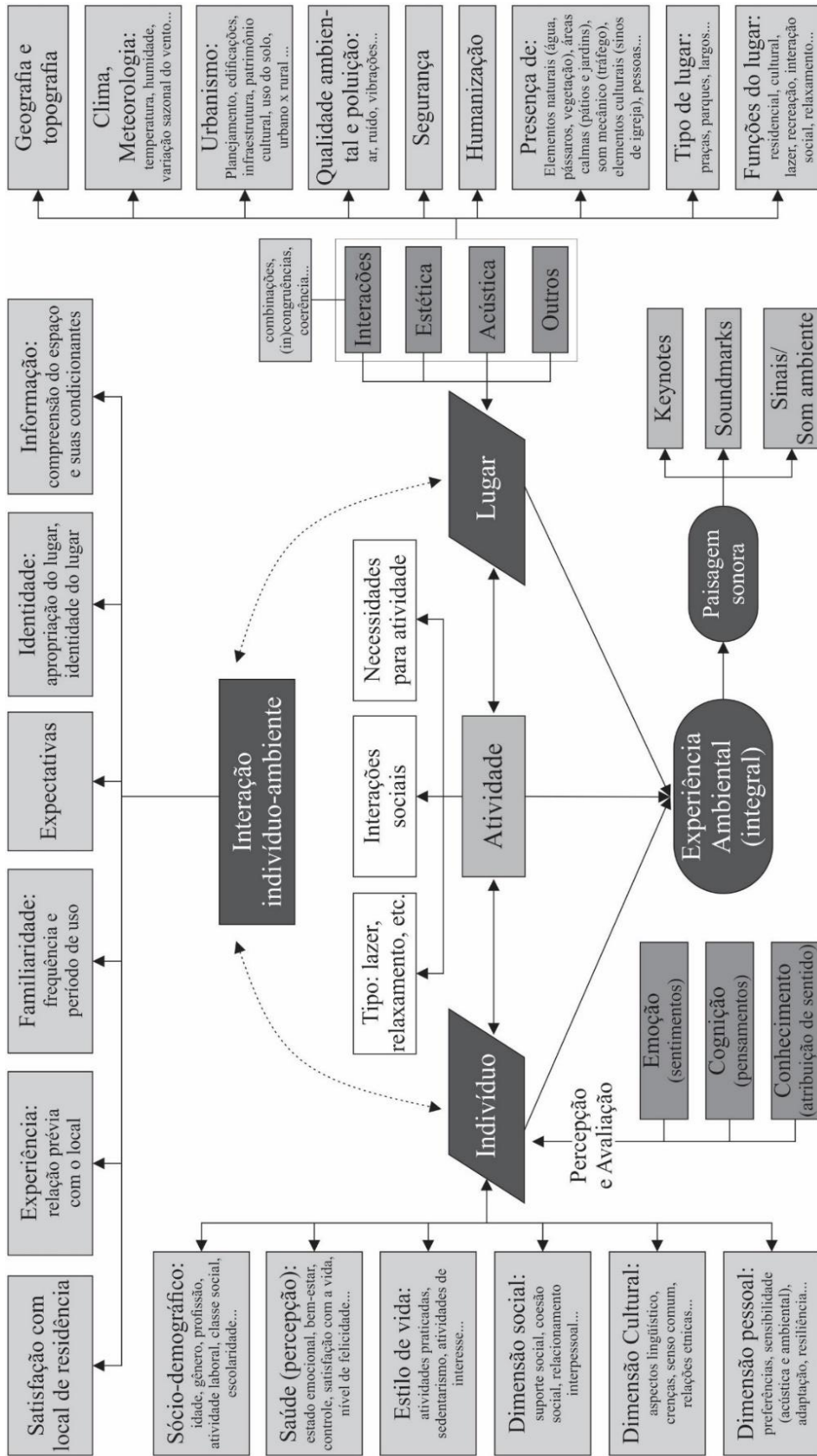
Os resultados exemplificados podem ser considerados como “resultados diretos” que dependem, em larga escala, do conhecimento do ambiente acústico pelos indivíduos e da atribuição consciente de resultados a partir da percepção direta da paisagem sonora. No entanto, o ambiente acústico de um local também possibilita reações e resultados sem que o indivíduo tenha a consciência total de todas as características que tornam a área adequada ou agradável ao desenvolvimento de determinada atividade. Existem fatores que são processados de forma inconsciente e possibilitam, em conjunto com os fatores conscientes, o reconhecimento de determinadas paisagens sonoras como apropriadas a determinada função (BOTTELDOOREN et al, 2016).

O diagrama apresentado anteriormente (figura 18) sugere que o “contexto” – que inclui todos os fatores não acústicos do espaço, físicos ou psicológicos – tem proeminência sobre os demais fatores na percepção e construção da paisagem sonora pelo indivíduo. Ocorre que o diagrama é simplificado e as relações de contexto serão relevantes em quatro variáveis do espaço: indivíduo, lugar, interação indivíduo-lugar, e atividade. Cada uma destas variáveis possui grande potencial de influência na experimentação individual do ambiente acústico.

Cada lugar tem seu próprio panorama e forma construída; estética; atributos físicos, sociais e culturais; que se modificam ao longo das horas do dia, estação do ano ou clima. Cada indivíduo traz consigo a construção social de ocupação do espaço, estilo de vida, cultura, redes comunitárias e preferências em termos de questões imediatas – como motivação para estar em um lugar ou desenvolver uma atividade – e em questões de longo prazo (BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, 2016).

O indivíduo pode desenvolver atividades ativa ou passivamente nos lugares, sozinho ou interagindo socialmente com outros indivíduos, o que gera diferentes necessidades e oportunidades. Ao modificar um dos elementos do sistema, mesmo que os demais se mantenham constantes, a experiência ambiental do indivíduo será significativamente alterada para dado local em dado período temporal e, conseqüentemente, será alterada a percepção e construção da paisagem sonora daquele local (SCHAFER, 1997). A figura 19 traz um modelo conceitual dos vários contextos relativos.

Figura 19 – Modelo conceitual de contextos



Fonte: Adaptada Brown, Gjestland e Dubois, 2016

Para um mesmo nível de ruído ambiental as respostas podem ser completamente diferentes, dependendo do significado e da apropriação pelo ouvinte. O ruído ferroviário, por exemplo, pode apresentar diferentes apreensões se avaliado um ambiente com transporte de carga e outro com uma maria fumaça ou trem de passageiros, embora muito semelhante no nível de pressão sonora e no nível de ruído equivalente, indicando diretamente o componente subjetivo da paisagem sonora.

Estas informações nos mostram que o estudo da paisagem sonora precisa reconhecer o papel do contexto e levar em consideração a grande variabilidade nas preferências e resultados no caso de qualquer mudança, por mínima que seja. As variações são usuais e não se tratam de caprichos humanos: têm relação com as diferenças entre grupos e são desejáveis enquanto contornáveis, como forma de uso de um local por diferentes grupos simultaneamente, mantendo-se a vitalidade dos espaços (JARVILUOMA; VIKMAN, 2015).

Para realizar a análise da paisagem sonora é necessário levar em conta tanto as características sonoras do ambiente como seus componentes físicos e visuais. Os estímulos bimodais mostram-se importantes na caracterização de espaços tranquilos e, de fato, Watts et al. (2009, apud FARINA, 2014) observaram que “o córtex medial pré-frontal recebe contribuições significativamente maiores do córtex auditivo em situações de condições visuais agradáveis comparadas a condições visuais desagradáveis”. Isto demonstra que, quando a paisagem sonora é construída desta forma, a percepção auditiva é definitivamente modificada.

Quando se trabalha com a medição de variáveis inerentes ao comportamento ou reação humanos, busca-se a mínima interferência em relação aos indivíduos inseridos no estudo e a observação é, principalmente, externa, podendo ser complementada com aparelhos que permitam o monitoramento de variáveis biológicas do grupo de estudos como nível de pressão sonora próximo ao ouvido e batimentos cardíacos. A observação visa captar variáveis como efeitos predominantes, apreciação, senso de restauração e comportamento manifesto para avaliar a paisagem sonora de forma holística em determinado contexto (BOTTELDOOREN et al, 2016).

No caso da paisagem sonora, o desafio da quantificação reside no fato de que esta se apresenta como um fenômeno de múltiplas variáveis e naturezas e, portanto, não



pode ser medida a partir de um único valor ou aparelho, como o nível de pressão sonora aferido por decibelímetros, por exemplo. O comportamento manifesto associado ao ambiente acústico é sugerido como uma forma de avaliação da paisagem sonora e está presente em diversos estudos da área (AXELSSÖN et al., 2010, apud BOTTELDOOREN et al., 2016; CAIN et al., 2013 apud BOTTELDOOREN et al., 2016).

Fatores psicológicos e informações visuais também são percebidos como importantes, uma vez que suas associações aos sons estão estritamente conectadas à percepção humana do ambiente que o cerca. Por exemplo, Watts et al. (apud FARINA, 2014) argumentam que presença de vegetação em áreas ruidosas faz com que o ruído percebido pelo indivíduo seja menor em relação a áreas que não contam com vegetação, mesmo sabendo que sua contribuição efetiva como barreira acústica não é considerável. Isso demonstra que, embora os valores diretamente medidos em situação com e sem vegetação sejam absolutamente equivalentes, o fator psicológico desencadeado pela presença de vegetação altera o resultado da percepção que forma a paisagem sonora.

O nível de incômodo gerado por estímulos sonoros é relativo ao grupo analisado uma vez que o que é caracterizado como ruído por determinado grupo pode não o ser por outro. A percepção de um estímulo sonoro está inserida em um processo de grande complexidade no qual a fonte sonora é identificada, sua direção e distância avaliadas, a identificação prévia de estímulos semelhantes é realizada e comparada com as situações em que este som foi ouvido anteriormente (KANG; SCHULTE-FORTKAMP, 2016).

Este resgate da memória sonora resgata, também, sensações e paisagens observadas anteriormente. Para a avaliação do incômodo é necessário separar analiticamente a estrutura do estímulo sonoro de características subjetivas individuais como percepção de altura e prazer, uma vez que diferentes grupos de indivíduos – residentes e visitantes, por exemplo – possivelmente expressarão diferentes julgamentos sobre um mesmo estímulo (FARINA, 2014).

Dependendo da abordagem adotada, as dimensões principais de avaliação estarão no campo do “prazer” (*pleasantness*) e “agitação” (*eventfulness, uneventfulness*), que podem ainda ser combinados, resultando nos conceitos de “vitalidade” (*vibrancy*) –

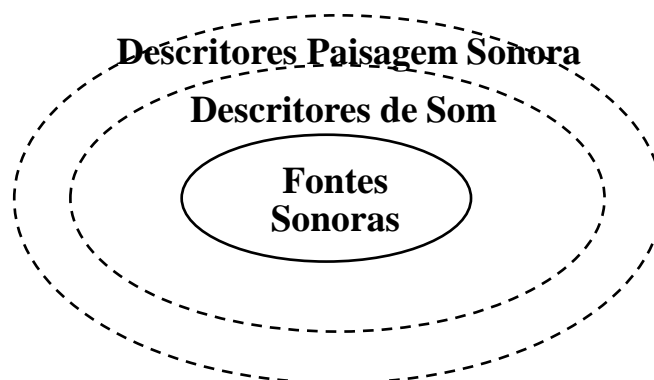
que une *pleasantness* e *eventfulness*, e “calma” (*calmness*) – que une *pleasantness* e *uneventfulness*.

A dimensão vitalidade pode ser representada em uma escala que vá de monótona a excitante, e a dimensão calma pode ser interpretada em uma escala que vá de sossegado a caótico. Pode-se argumentar que essas dimensões do comportamento manifesto são mais relacionadas ao indivíduo que ao ambiente acústico propriamente dito, entretanto, sendo a paisagem sonora proveniente da interpretação pessoal, isto não é considerado um problema (BOTTELDOOREN et al., 2016).

Para a abordagem holística da matéria, como viu-se necessária, geralmente são realizadas entrevistas ou aplicados questionários estruturados aos usuários como ferramenta de obtenção de dados. As etapas geralmente realizadas com os participantes implicam que estes estarão mais atentos aos sons ambientais e, portanto, conseguirão perceber com mais clareza estes sons. Esta abordagem qualitativa descreve como o som é percebido pelo ouvinte, permitindo conectar as sensações pessoais ou de grupo com uma semântica do campo que possibilita considerar a paisagem sonora como um fenômeno de natureza da percepção emocional do espaço e que, como consequência direta, indica que a diferença entre ruído e som, neste campo, é determinada pela sensação pessoal (KANG; SCHULTE-FORTKAMP, 2016).

Davies et al. (apud FARINA, 2014) propõem uma abordagem multidisciplinar para a construção de uma semântica da paisagem sonora que reconhece três níveis principais, como demonstrado na figura 20.

Figura 20 – Componentes da paisagem sonora em relação à reação individual ao ambiente sonoro



Fonte: Adaptado de Farina, 2014

Esses três níveis correspondem à: a) fontes sonoras, que se referem às entidades físicas que podem ser geradas por múltiplos agentes ou componentes; b) descritores do som, que se referem à identificação dos sons por substantivos – como rugido, batida, buzina; e c) descritores de paisagem sonora, que se referem aos sons de procedência por agentes indistintos, divididos em 4 categorias e caracterizados como cacofonia, burburinho, constância e temporalidade.

Na classificação proposta, tem-se que: a) a categoria “cacofonia” descreve uma paisagem sonora percebida de forma negativa e/ou, por isso, associada a uma experiência auditiva também negativa; b) a categoria “burburinho” descreve um misto de sons percebidos positivamente e/ou associados a uma experiência auditiva positiva; c) a categoria “constância” se refere a um som contínuo que mascara outros sons ambientais e pode ser identificada como positiva tanto como negativa, dependendo da atividade que se realiza na presença de sons desta natureza; d) a categoria “temporalidade” conforma os sons que são repetidos de forma intermitentes com intervalos que variam de segundos a minutos.

As quatro categorias podem ser organizadas em duplas: cacofonia-burburinho e constante-temporal. A primeira descreve como os sons são misturados, produzindo conforto ou desconforto. A segunda descreve ritmo e nível de monotonia da paisagem sonora (FARINA, 2014).

## **2.5. Legislação e normalização acústicas**

### **2.5.1. NBR 10151:2000**

A NBR10151 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento, é válida desde 31 de junho de 2000, tendo sido alterada em junho de 2003, e “fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independente da existência de reclamações” e “especifica um método para a medição de ruído, a aplicação de correções nos níveis medidos se o ruído apresentar características especiais e uma comparação dos níveis corrigidos com um critério que leva em conta vários fatores” (ABNT, 2000). Considera-se, para aplicação da norma, as definições apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Definições NBR 10151:2000

Critério	Definição
Nível de Pressão Sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ), em decibels ponderados em "A" [dB (A)]	Nível obtido a partir do valor médio quadrático da pressão sonora (com a ponderação A) referente a todo o intervalo de medição.
Ruído com caráter impulsivo	Ruído que contém impulsos, que são picos de energia acústica com duração menor do que 1 s e que se repetem a intervalos maiores do que 1 s (por exemplo martelagens, bate-estacas, tiros e explosões).
Ruído com componentes tonais	Ruído que contém tons puros, como o som de apitos ou zumbidos
Nível de ruído ambiente ( $L_{ra}$ )	Nível de pressão sonora equivalente ponderado em "A", no local e horário considerados, na ausência do ruído gerado pela fonte sonora em questão.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2000

O equipamento para medição do nível de pressão sonora deve atender às especificações da IEC 60651 (International Electrotechnical Commission 60651), substituída pela IEC 61672 no ano de 2002, para os tipos 0, 1 e 2. Recomenda-se, ainda, que o equipamento utilizado seja capaz de medir o nível de pressão sonora ponderado em "A" ( $L_{Aeq}$ ). O calibrador acústico deve atender à mesma norma IEC, devendo ser de classe 2 ou superior.

As medições devem ser realizadas por aparelhos com certificado de calibração emitido por laboratórios da Rede Brasileira de Calibração – RBC – ou do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) emitido há no máximo dois anos da data de medição. Adicionalmente, deve ser realizada verificação da acuidade dos medidores, através do calibrador acústico, imediatamente antes e após a realização das medições relativas a um mesmo evento.

As condições gerais de medição preveem que esta deve ser executada externamente aos limites da propriedade que contém a fonte, podendo ser realizadas em amostra única ou conjunto de medições, desde que o tempo de medição permita a caracterização do ruído em questão. Na existência de fenômenos climáticos que possam interferir nas medições, como trovões, as medições devem ser interrompidas e descartadas. As medições realizadas em ambiente externo devem prevenir o efeito do vento sobre o microfone do medidos através da utilização de protetores e realizadas

conforme as especificações apresentadas na tabela 4. Na impossibilidade de atendimento, as condições de medição devem ser registradas em relatório.

Tabela 4 - Parâmetros de medição para ambientes externos

Critério	Parâmetro
Altura do medidor em relação ao solo ou piso	1,20m
Distância mínima ao limite da propriedade	2,00m
Distância mínima a superfícies refletoras	2,00m

Fonte: Adaptado de ABNT, 2000

São previstas correções para ruídos de caráter especial, como ruídos impulsivos ou de impacto, conforme tabela 5.

Tabela 5 - Correções para ruídos com características especiais

Tipo de Ruído	Correção ( $L_c$ )
Sem caráter impulsivo e sem componentes tonais	Determinado pelo nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ )
Com características impulsivas ou de impacto	Determinado pelo valor máximo medido com o medidor de nível de pressão sonora ajustado para resposta rápida ( <i>fast</i> ), acrescido de 5 dB(A).
Com componentes tonais	Determinado pelo nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ) acrescido de 5 dB(A)
Com características impulsivas e componentes tonais	Realizar os procedimentos previstos para a determinação das situações “Com características impulsivas ou de impacto” e “Com componentes tonais”, tomando-se como resultado o maior valor obtido.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2000

A avaliação do ruído para áreas externas deve ser realizada através de comparação entre o nível de pressão sonora corrigido ( $L_c$ ) e o nível de critério de avaliação (NCA) estabelecido, apresentado na tabela 9. Se o nível de ruído ambiente ( $L_{ra}$ ) for superior ao estabelecido na tabela 6 para a área e horário em questão, o NCA assume o valor de  $L_{ra}$ .

Tabela 6 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A)

Tipo de Área	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: ABNT, 2000

A faixa de horário que compreende o período noturno e diurno pode ser definida pelas autoridades levando em conta os hábitos da população local, entretanto o período noturno não pode começar após as 22h00min e não pode terminar antes das 07h00min do dia seguinte, de segunda a sábado, ou às 09h00min, em domingos e feriados.

Deve-se registrar os dados de medição em relatório técnico que contenha, no mínimo, as seguintes informações:

- “a) marca, tipo ou classe e número de série de todos os equipamentos de medição utilizados;
- b) data e número do último certificado de calibração de cada equipamento de medição;
- c) desenho esquemático e/ou descrição detalhada dos pontos da medição;
- d) horário e duração das medições do ruído;
- e) nível de pressão sonora corrigido  $L_c$ , indicando as correções aplicadas;
- f) nível de ruído ambiente;
- g) valor do nível de critério de avaliação (NCA) aplicado para a área e o horário da medição;
- h) referência a esta Norma.” (ABNT, 2000. p.3)

O cálculo do nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ), caso o equipamento de medição não forneça automaticamente este valor, deve ser realizado através da expressão:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (8)$$

Onde:

$L_i$  é o nível e pressão sonora, em dB(A), lido em resposta rápida (fast) a cada 5 s, durante o tempo de medição do ruído;

$n$  é o número total de leituras.

### 2.5.2. NBR 16425-1:2016

A NBR 16425-1:2016 – Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes – Parte 1: Aspectos gerais, estabelece

a “instrumentação eletroacústica a ser utilizada em medições de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes”, os procedimentos para “calibração e ajuste em campo da instrumentação eletroacústica”, as “condições gerais de medição” e os “descritores sonoros para análise de sons provenientes de sistemas de transportes” (ABNT, 2016).

Esta norma faz parte de um conjunto normativo para aplicação na avaliação do ruído gerado por sistemas de transportes relativos aos mais diversos modais conforme mostrado na tabela 7, a seguir.

Tabela 7 - Conjunto normativo NBR 16425:2016

NBR 16425:2016	Situação
Parte 1: Aspectos gerais	Em vigor (07/04/2016)
Parte 2: Sistema aeroviário	Prevista
Parte 3: Sistema aquaviário	Prevista
Parte 4: Sistema ferroviário	Prevista
Parte 5: Sistema metroviário	Prevista
Parte 6: Sistema rodoviário	Prevista

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 2016

Para a aplicação da norma, deve-se considerar a terminologia e as definições da NBR16313:2014 – Acústica – Terminologia, além das apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - NBR 16425-1:2016 – Termos e Definições

Termo	Definição
Área não edificável	Área contígua à faixa de domínio, conforme legislação vigente, em que se proíbem edificações
Condição normal do sistema	Condição usual predominante de operação do sistema de transporte
Faixa de domínio	Área contígua reservada para a construção do sistema viário, compreendida entre os limites que o separam das propriedades limediras
Ocupação regular	Área ocupada por edificações e atividades em conformidade com a legislação de uso e ocupação do solo e outras regulamentações vigentes, fora da faixa de domínio, da área não edificável e das zonas de proteção
Ponto de medição	Local onde está posicionado o microfone para realização da medição ou monitoramento sonoro
Receptor potencialmente crítico (RPC)	Receptor sensível ao impacto ambiental sonoro, localizado em área regularmente ocupada, como por exemplo áreas residenciais, unidades educacionais e de saúde

Sonômetro	Medidor integrador de nível sonoro
Zona de proteção	Áreas vizinhas a aeródromos onde são previstas restrições ao uso do solo, conforme legislação vigente

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 2016

As medições devem ser realizadas por conjunto de instrumentos (sonômetro, microfone e calibrador acústico) que atenda aos requisitos definidos na IEC 61672-1. Para a medição e caracterização de sons tonais, o sonômetro deve contar com filtros de 1/3 de oitava, para classe 0 ou classe 1 e as medições devem ser realizadas com protetor de vento acoplado ao microfone do sonômetro. Deve-se, ainda, executar a correção da influência dos efeitos do protetor de vento na resposta em frequência do microfone, conforme as instruções do fabricante (ABNT, 2016).

Para conferência da conformidade dos equipamentos utilizados, estabelece-se que

“o conjunto de instrumentos referidos na Seção 4 deve ser calibrado por laboratório acreditado, membro da Rede Brasileira de Calibração (RBC), ou pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), ou por laboratório de calibração, em outros países, acreditado em rede reconhecida por acordo oficial brasileiro de reconhecimento mútuo (ILAC).” (ABNT, 2016, p.3)

Deve-se estabelecer a periodicidade das calibrações segundo as especificações do fabricante dos aparelhos utilizados, sendo o prazo máximo de 24 meses entre calibrações certificadas. Após qualquer evento que possa interferir na acuidade de medição dos instrumentos, como quedas ou manutenção corretiva, deve-se realizar calibração certificada.

As características gerais de medição indicam que as medições de níveis de pressão sonora devem ser realizadas seguindo os seguintes parâmetros: a) em ambientes externos às edificações, de ocupação regular, preferencialmente junto a receptores potencialmente críticos – RPC; b) com utilização de protetor de vento no microfone do sonômetro; c) com o microfone do sonômetro direcionado ao sistema de transporte sob avaliação; d) nos períodos de operação e na condição normal do sistema de transporte; por fim, e) medições em áreas próximas a escolas ou áreas de lazer não



podem ser realizadas nos períodos de grande atividade nesses locais, evitando interferência sonora.

Ajustes em campo devem ser realizados para garantir o funcionamento satisfatório do conjunto de aparelhos de medição, imediatamente antes e após cada série de medições, nas condições ambientais do local de medição. Ao final de uma série de medições, ainda no ambiente em avaliação, “deve ser lido o nível de pressão sonora com o calibrador sonoro ligado e acoplado ao microfone. Se a diferença entre a leitura e o valor ajustado inicialmente for superior a +0,5 dB ou inferior a -0,5 dB, os resultados devem ser descartados e novas medições devem ser realizadas” (ABNT, 2016).

As medições não devem ser realizadas sob condições ambientais e climáticas adversas, como ventos fortes, precipitações e trovoadas. Caso seja necessário realizar medições sob essas condições, os parâmetros climáticos e ambientais devem ser aferidos e registrados em relatório. No caso de monitoramento sonoro de longa duração, as condições ambientais devem ser registradas e consideradas para tratamento e análise dos dados. A locação dos pontos de medição deve obedecer ao especificado na tabela 9.

Tabela 9 - Posição do ponto de medição

Critério	Parâmetro
Altura do medidor, para medições ao nível do solo	Microfone posicionado de 1,20m a 1,50m do solo
Altura do medidor, para medições superiores a 1,50m do solo	Microfone posicionado de 1,20m a 1,50m do piso do pavimento + registro a altura do pavimento até o solo.
Monitoramento contínuo de longa duração ou de período completo	Microfone posicionado a no mínimo a 4m do solo

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 2016

A norma apresenta os seguintes descritores sonoros, com os requisitos mínimos de medição para cada um deles conforme tabela 10.

Tabela 10 - Descritores de Níveis Sonoros

Descritor	Parâmetro
Tempo de medição	O tempo de medição em cada ponto deve ser definido de modo a abranger as variações sonoras significativas ao ambiente sob avaliação

Tempo de integração	O tempo de integração (T) pode variar de 1 s até o próprio tempo de medição
Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A ( $L_{Aeq,T}$ )	O nível de pressão sonora contínuo equivalente, no espectro amplo ponderado em A, pode ser obtido diretamente por integração no tempo T ( $L_{Aeq,T}$ ) ou pela média logarítmica de resultados de $L_{Aeq,1s}$ , e o resultado deve ser expresso através do descritor $L_{Aeq,T}$ , em decibels (dB)
Nível de pressão sonora contínuo equivalente nas bandas de 1/3 de oitava ( $L_{eq(f\ Hz)}$ )	As medições nas bandas de 1/3 de oitava devem ser executadas pelo menos nas bandas de frequências centrais nominais de: 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1 kHz, 1,25 kHz, 1,6 kHz, 2 kHz, 2,5 kHz, 3,15 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 6,3 kHz, 8 kHz e 10 kHz
Níveis de pressão sonora representativos de períodos completos ( $L_d$ , $L_n$ e $L_{dn}$ )	$L_d$ e $L_n$ são determinados pelos resultados de medições do $L_{Aeq,T}$ , medidos ao longo dos períodos diurno e noturno, respectivamente, ou medidos em intervalos de tempo em condições sonoras representativas desses períodos

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 2016

O  $L_{dn}$  é determinado pela média logarítmica ponderada dos resultados de  $L_d$  e  $L_n$ , segundo a expressão:

$$L_{dn} = 10 * \log_{10} \left( \frac{d}{24} * 10^{\frac{L_d}{10}} + \frac{n}{24} * 10^{\frac{L_n+k}{10}} \right) \quad (9)$$

Onde:

$L_{dn}$  é o nível de pressão sonora equivalente, ponderado em A, para um período de 24 h, expresso em decibels (dB);

$d$  é o número de horas do período diurno;

$L_d$  é o nível de pressão sonora equivalente, ponderado em A ( $L_{Aeq}$ ), para o período diurno, expresso em decibels (dB);

$n$  é o número de horas do período noturno;

$L_n$  é o nível de pressão sonora equivalente, ponderado em A ( $L_{Aeq}$ ), para o período noturno, expresso em decibels (dB);

$k$  é o fator de ponderação a ser definido em cada Parte da ABNT NBR 16425;

### 2.5.3. NBR 14313:1999

A NBR14313:1999 – Barreiras acústicas para vias de tráfego – Características construtivas, “estabelece as condições exigíveis para os materiais e para a instalação de

barreiras acústicas em vias de tráfego” (ABNT, 1999). A norma foi válida entre 30/06/1999 e 25/05/2016, quando foi cancelada, sem substituição, devido a “não ser mais utilizada pelo setor”.

O cancelamento da norma foi proposto pelo edital nº 02/2016, com prazo limite de manifestações contrárias até 04/03/2016, como não houve posicionamento contrário, o cancelamento foi efetivado<sup>2</sup> e, sem sua devida substituição, gerou discussões no meio técnico<sup>3</sup>. Embora cancelada e, por isso, não mais exigível, o conteúdo técnico da norma não perde seu valor científico, razão pela qual seu conteúdo será apresentado, já que não há norma vigente que a substitua.

A norma define que as barreiras são aplicáveis ao longo das vias de tráfego existentes ou a serem construídas, nos casos em que: a) o espaço disponível for insuficiente para aplicação de outros métodos de controle do ruído ambiental; b) a barreira acústica existente for insuficiente para reduzir o ruído e c) a altura da proteção em talude de terra tiver que ser aumentada. A tabela 11 traz os termos e definições apresentados.

Tabela 11 - NBR 14313:1999 – Termos e Definições

Termo	Definição
Barreira acústica de via de tráfego	Barreiras de proteção contra ruído ao longo de vias de tráfego construídas à semelhança de paredes, levantadas entre a via de tráfego e as áreas a serem protegidas.
Estanqueidade sonora	Significa que, nas condições de ensaio, o ruído de tráfego é atenuado em pelo menos 25 dB(A), quando da passagem através do material da barreira acústica
Condições de Projeto	As barreiras acústicas são projetadas para impedir que o ruído da via de tráfego alcance, de forma não reduzida, uma área a ser protegida.
Materiais Absorventes	Os revestimentos que absorvem o ruído, colocados em construções ou em parte de construções, a fim de reduzir as reflexões sonoras, são vistos como barreiras acústicas dentro do significado desta norma.

<sup>2</sup> Conforme edital 02/2016, disponível em <http://www.abnt.org.br/normalizacao/consulta-nacional/editais/category/166-edital-02-2016-01-02-2016-a-29-02-2016?download=451:201602-projeto-cancelamento>. Acesso em 03/04/2018.

<sup>3</sup> Conforme matéria disponível em [http://blogs.pini.com.br/posts/normas-tecnicas-pericias/\[33\]-abnt-continua-a-cancelar-importantes-normas-sem-substituicao-333873-1.aspx](http://blogs.pini.com.br/posts/normas-tecnicas-pericias/[33]-abnt-continua-a-cancelar-importantes-normas-sem-substituicao-333873-1.aspx), que cita o cancelamento de diversas normas técnicas do setor de construção. Acesso em 04/04/2018.

Elemento	Um elemento é uma seção de parede compreendida por duas colunas, ou suportada por uma coluna.
----------	---

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 1999

As barreiras acústicas devem atender aos requisitos acústicos, levar em conta as condições de segurança de tráfego, serem estruturalmente estáveis e manterem sua forma, serem resistentes e protegidas de corrosão e envelhecimento, serem dimensionalmente precisas, serem resistentes ao fogo e impactos e, por fim, de fácil manutenção.

Com relação aos materiais utilizados, a densidade do material deve ser de, no mínimo, 40kg/m<sup>2</sup> e as espessuras mínimas devem ser previstas de forma a garantir que a barreira não funcione como uma membrana vibratória e, para isso, são definidas as espessuras apresentadas na tabela 12.

Tabela 12 - Espessura mínima dos materiais de barreiras

Material	Espessura mínima (mm)
Concreto	90,00
Vidro	12,00
Madeira	8,00
Material plástico	6,00
Metal leve	1,00
Aço	1,00

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 1999

O cálculo do índice de redução sonora aéreo ( $\Delta L_{A,R,RT}$ ) determina o coeficiente de isolamento sonoro aéreo de barreiras acústicas ao longo de estradas baseado nos valores individuais dos índices de isolamento sonoro  $R_i$  calculados para as terças de oitava com frequências centrais de 100Hz a 3150Hz.

$$\Delta L_{A,R,RT} = 10 * \log_{10} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{16} K_i}{\sum_{n=1}^{16} (K_i * 10^{-0,1R_i})} \right] \quad (10)$$

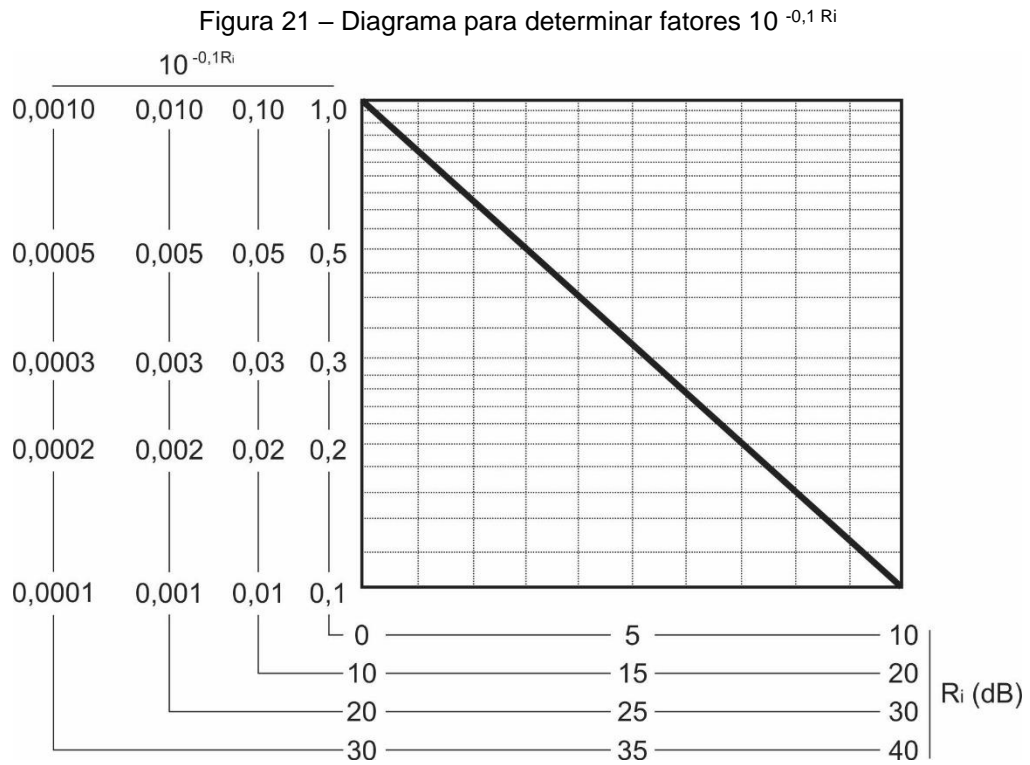
Onde:

$\Delta L_{A,R,RT}$  é o índice de redução sonora aéreo, expresso em dB;

$K_i$  é o fator de ponderação do espectro de um ruído médio de tráfego;

$R_i$  é o valor individual do índice de isolamento sonoro.

Os valores necessários ao cálculo do  $\Delta L_{A,R,RT}$  podem ser obtidos através da tabela 13 e do diagrama representado na figura 21, apresentadas a seguir. Após a obtenção dos valores, estes podem ser organizados no esquema de cálculo apresentado na tabela 14, de forma a facilitar os cálculos de  $\Delta L_{A,R,RT}$ .



Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 1999

Os valores de  $R_i$  podem ser obtidos na tabela 13:

Tabela 13 - Valores de  $R_i$

Frequência (Hz)	$R_i$ (dB)
100	9
125	8,5
160	6
200	5,5
250	5,5
315	4,5
400	4,5
500	4
630	3,5
800	3
1000	2,5
1250	3
1600	3,5
2000	3,5
2500	3,5

3150	3,5
Fonte: Tabela A.2, ISO 140-3:1995	

A tabela 14 apresenta o esquema de cálculo para as variáveis necessárias à aplicação da equação 10.

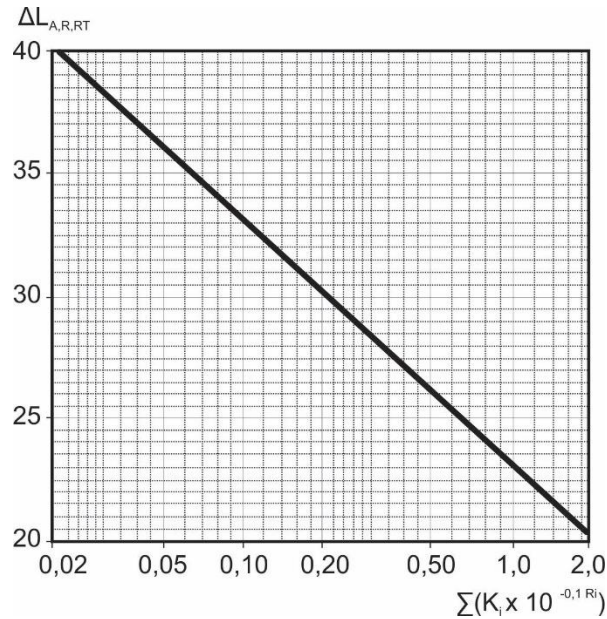
Tabela 14 – Esquema de cálculo para o valor de  $\Delta L_{A,R,RT}$

Frequência (Hz)	$K_i$	$R_i$	$10^{-0,1 R_i}$	$K_i \times 10^{-0,1 R_i}$
100	1			
125	2			
160	3			
200	4			
250	5			
315	7			
400	9			
500	11			
630	15			
800	21			
1000	29			
1250	32			
1600	26			
2000	20			
2500	15			
3150	10			
	$\sum K_i = 210$			$\sum (K_i \times 10^{-0,1 R_i})$

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 1999

É possível, ainda, determinar a  $\Delta L_{A,R,RT}$  aproximada, em função de  $\sum (K_i \times 10^{-0,1 R_i})$ , através do diagrama apresentado na figura 24.

Figura 22 – Diagrama para determinar o coeficiente de isolamento sonoro  $\Delta L_{A,R,RT}$



Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 1999

A perda por inserção pode ser mais facilmente calculada através da expressão:

$$IL = L_{psb} - L_{pcb} \quad (11)$$

Onde:

IL é a perda por inserção da barreira acústica, expressa em dB;

$L_{psb}$  é o nível de pressão sonora sem a presença da barreira, expresso em dB;

$L_{pcb}$  é o nível de pressão sonora com a presença da barreira, expresso em dB.

O valor de  $L_{pcb}$  pode ser calculado através do número de Fresnel (N), que pode ser obtido pela expressão:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (12)$$

Onde:

N é o número de Fresnel;

$\delta$  é a diferença entre o trajeto da onda sonora direto e o desviado pela barreira, expresso em metros;

$\lambda$  é o comprimento de onda, expresso em metros.

O valor de  $\delta$  pode ser calculado pela expressão:

$$\delta = a + b - c \quad (13)$$

Onde:

$\delta$  é a diferença entre o trajeto da onda sonora direto e o desviado pela barreira, expresso em metros;

$a$  é a distância entre a fonte e a borda superior da barreira, expressa em metros;

$b$  é a distância entre a borda superior da barreira e o receptor, expressa em metros;

$c$  é a distância direta entre a fonte e o receptor, expressa em metros;

Após o cálculo do número de Fresnel ( $N$ ) a atenuação ( $A$ ) pode ser obtida através da expressão apresentada a seguir, possibilitando o cálculo do valor de  $L_{pcb}$  que, por sua vez, possibilita a determinação da perda por inserção da barreira (IL

$$A = 10\log(20 * N) \quad (14)$$

Onde:

$A$  é a atenuação, expressa em dB;

$N$  é o número de Fresnel;



### **3. ACÚSTICA AMBIENTAL E FERROVIAS**

Desde a implantação das primeiras ferrovias a passagem das composições é tida como um incômodo ambiental, ligado principalmente a questões estéticas e sonoras. A partir dos anos 1960, o ruído ambiental tornou-se questão de importância crescente, com a oposição às linhas ferroviárias direcionadas principalmente ao seu potencial de impacto devido ao ruído. Essa importância crescente tem sua fonte no fato de que o ruído é quantificável, sendo foco das reclamações das comunidades afetadas (THOMPSON, 2009).

Os demais modais de transporte rodoviário e aeroviário contam com programas de redução de ruídos que datam do início dos anos 1970, com regulamentação estrita que chegou a reduzir o ruído aeroviário em 20-30 dB até os dias atuais. No caso do modal ferroviário, embora seja o que mantenha suas operações há mais tempo entre os citados, a regulamentação para redução da emissão de ruído pelos veículos data de fins da década de 1990 (THOMPSON, 2009).

O ruído ferroviário apresenta a dificuldade de separação da influência da via férrea e da composição na produção de ruído, além da presença dos dispositivos de alerta, sendo difícil definir uma única fonte. Neste capítulo serão apresentados os conceitos relativos à acústica ambiental direcionados às ferrovias.

#### **3.1. Impacto acústico das ferrovias**

A exposição ao ruído proveniente de vias de tráfego é difundida por toda a área urbana e, atualmente, é um problema crescente em consequência da urbanização contínua e do desenvolvimento do setor de transportes. O ruído proveniente do tráfego de veículos causa incômodos e perturbação do sono, interferindo no descanso, concentração, comunicação falada e aprendizagem (NILSON; BENGTSSON; KLABOE; 2015).

A forma mais efetiva de controle do ruído ambiental consiste em reduzir sua emissão na fonte através de, por exemplo, regulamentação que demande a utilização de motores menos ruidosos, limitação do volume de tráfego ou redução de velocidade no

trecho. Por diversas questões como a inexistência de planejamento urbano voltado para o problema, temas econômicos ou políticos, esses métodos são de relativa dificuldade de aplicação (NILSON; BENGTTSSON; KLABOE; 2015).

Para estimar os impactos do ruído ambiental no bem-estar e as diversas possibilidades de redução desse ruído, é preciso manter em mente que apenas a medição do nível de pressão sonora é um indicador com validade limitada. Dois ambientes sonoros distintos, como por exemplo o ruído de tráfego e o funcionamento distante de uma máquina, podem conter o mesmo nível de pressão sonora e, no entanto, corresponderem a reações distintas (FORSSSEN; KROPP; KIHLMAN, 2015).

Diferentes padrões temporais também desempenham um papel importante, assim como as características espectrais do ruído, como por exemplo um som percebido diretamente ou com preponderância das baixas frequências na sombra de uma barreira acústica. Ao examinar o incômodo percebido, é necessário considerar holisticamente os sons diretos conjuntamente aos de fundo, que podem inclusive ser considerados positivos, como o som de uma queda d'água ou de animais silvestres (FORSSSEN; KROPP; KIHLMAN, 2015).

Os efeitos do ruído proveniente do transporte ferroviário nos seres humanos podem ser divididos em três principais áreas: incômodo geral, perturbação do sono e efeitos cardiovasculares. O "incômodo geral" se refere ao incômodo percebido na realização de tarefas corriqueiras, como conversar, ler ou assistir televisão e geralmente responde a padrões individuais, sendo avaliado através de questionários. A perturbação do sono diz respeito à interrupção de ciclos REM provocados pelo alto nível de ruído durante a passagem das composições e, por fim, os efeitos cardiovasculares se referem ao estado de constante alerta causado pela longa exposição aos dois efeitos anteriores (ÖGREN, 2006).

### **3.2. Características do ambiente acústico em áreas ferroviárias**

O nível de ruído que alcança um espaço é determinado por dois fatores principais: a quantidade de pressão sonora emitida e as condições de propagação do ruído entre a fonte e o receptor. Para caracterizar o ambiente acústico das ferrovias é

necessário identificar ambos os fatores, tratando-os como determinantes na qualidade acústica dos ambientes (FORSSSEN; KROPP; KIHLMAN, 2015).

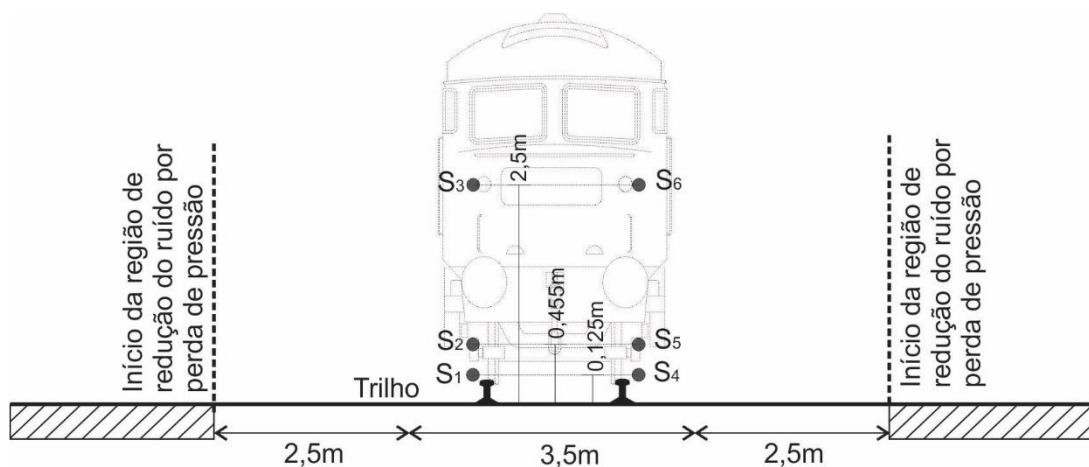
O tráfego ferroviário gera ruídos devido à, principalmente, dois fatores: os ruídos provocados pela operação do motor e sistemas auxiliares e as vibrações induzidas por pequenas rugosidades nos trilhos e rodas. Essas vibrações irradiam som das rodas e do trilho, e também de outras superfícies vibratórias, como partes da suspensão. O som se propaga, então, através da atmosfera e chega aos ouvintes, que são os que determinam se o som é indesejado ou não (ÖGREN, 2006).

Para veículos ferroviários, as fontes de ruído são, principalmente, de três naturezas:

- a) ruídos de tração, originados pelo contato entre trilho e rodas;
- b) ruídos de propulsão, originados pelo motor e sistemas de transmissão;
- c) ruídos de arrefecimento, para motores a combustão, gerados pelos sistemas de ventilação do motor, podendo ser incluídos na categoria ruídos de propulsão.

Para o tráfego em altas velocidades, uma quarta fonte passa a ser relevante: a de ruído aerodinâmico (FORSSSEN; KROPP; KIHLMAN, 2015). A figura 23 mostra a geometria das fontes.

Figura 23 – Geometria das Fontes

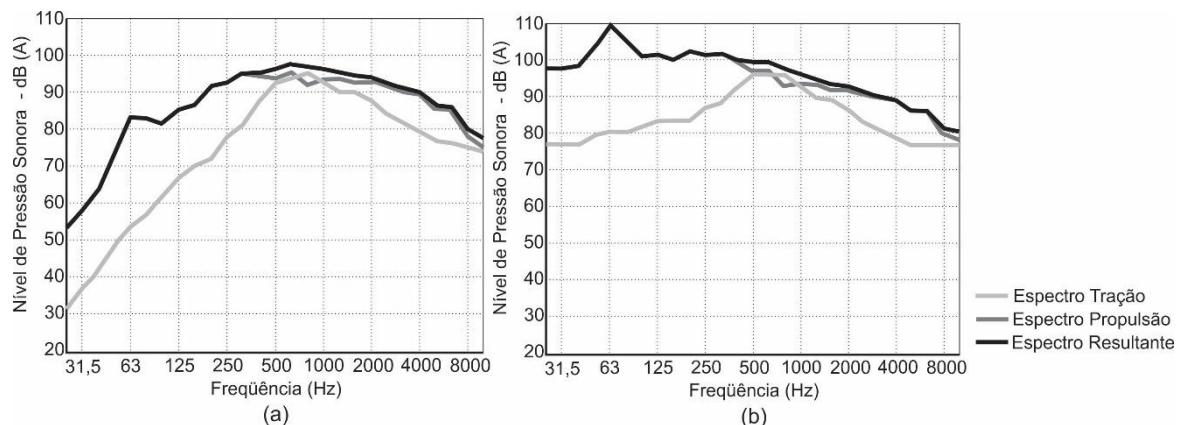


Fonte: adaptado de Nilson; Bengtsson; Klaboe (2015)

As fontes S<sub>1</sub> e S<sub>4</sub> indicam os ruídos de tração provocados pelo contato entre roda e trilho; as fontes S<sub>2</sub> e S<sub>5</sub> indicam os ruídos de tração provocados pelo eixo; e as fontes S<sub>3</sub> e S<sub>6</sub> indicam os ruídos de propulsão e arrefecimento gerados pelos motores das locomotivas.

Os ruídos de Tração e propulsão se desenvolvem simultaneamente durante a operação do sistema e cada um apresenta seu espectro sonoro distinto, embora estejam presentes em todas as faixas de frequência. Os ruídos de tração com potencial de incômodo estão compreendidos principalmente na faixa a partir de 125 Hz (125 – 8000 Hz), apresentando menor nível de pressão sonora que os ruídos de propulsão para a mesma faixa. Os ruídos de propulsão com potencial de incômodo estão presentes na faixa a partir de 31,5 Hz (31,5 – 8000 Hz). O espectro sonoro decorrente da combinação dos ruídos de tração e propulsão em veículos carregados (a) e descarregados (b) podem ser observados na figura 24.

Figura 24 – Espectro Sonoro típico do Ruído Ferroviário

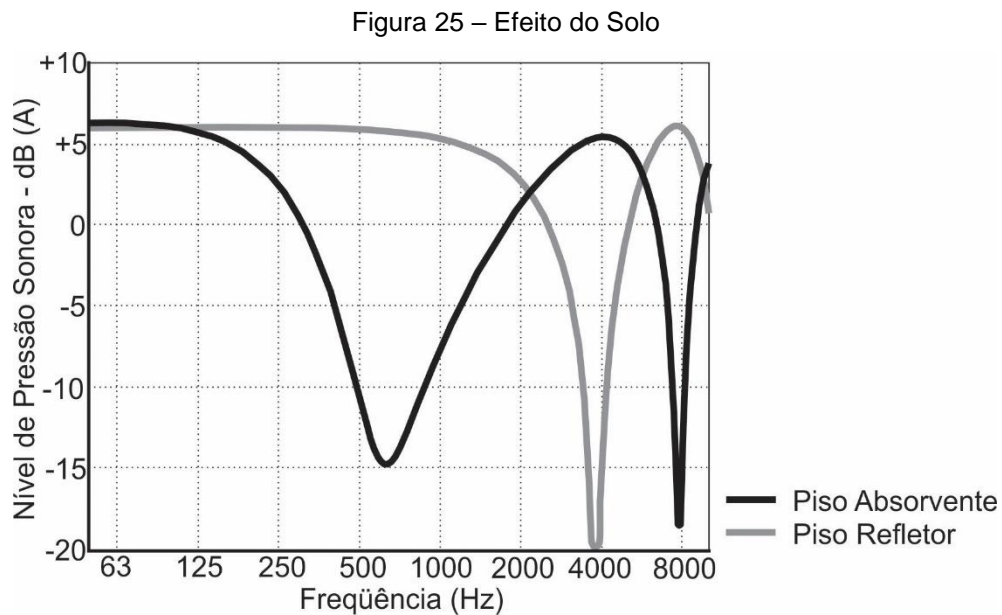


Fonte: Adaptado de Nilson; Bengtsson; Klaboe (2015)

A figura 24 mostra que, em ambas situações, o ruído de propulsão – relacionado ao motor – predomina sobre o de tração – relacionado ao contato entre rodas e trilho, à exceção da faixa de frequência entre 500 e 1000 Hz, na qual estão compreendidos os ruídos de média frequência.

Tanto o som emitido diretamente pela fonte quanto o refletido pelo solo podem atingir o receptor a partir do efeito da interação entre som direto e som refletido – efeito do solo. Para a propagação do ruído de tráfego sobre um pavimento com características

acústicas de absorção como a base da linha férrea, somando-se a vegetação (grama, vegetação selvagem) geralmente presentes na faixa de domínio, a soma do som direto e do refletido resulta em um nível de ruído menor do que se não houvesse o efeito do solo (FORSSSEN; KROPP; KIHLMAN, 2015). Essa característica permite a redução mais rápida de parte do ruído emitido, conforme figura 25.



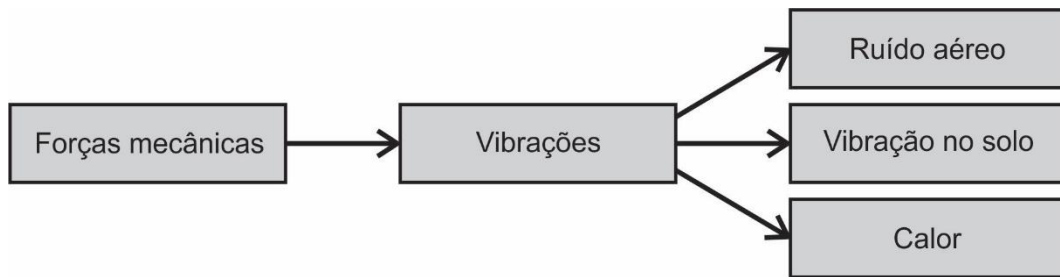
Efeito do solo plotado como nível de pressão sonora relativa para campo livre em função da frequência, para piso absorvente e piso refletor, como fonte pontual localizada a 0,75m de altura e receptor localizado a 1,5m de altura, distando 50 m da fonte sonora.

Fonte: adaptado de Forssen; Kropp; Kihlman (2015)

O principal processo físico responsável pelas vibrações que se irradiam como ruído é o contato entre as rodas e o trilho. O sulco da roda se apoia sobre a cabeça do trilho e o contato mecânico corresponde a uma faixa de aproximadamente 10 a 15mm, tanto no comprimento como na largura. Durante a rolagem, pequenas imperfeições tanto na roda como nos trilhos causam vibrações por todo o sistema, que resultam em som irradiado. Este ruído é caracterizado como o ruído de rolagem (ÖGREN, 2006).

As forças resultantes da superfície de contato são propagadas a partir das rodas, trilhos e dormentes, podendo ser irradiadas como ruído aéreo, vibração no solo ou dissipadas como calor. As forças mecânicas contidas no sistema podem ser descritas no fluxograma da figura 26.

Figura 26 – Gênese do ruído no contato trilho-rodas.

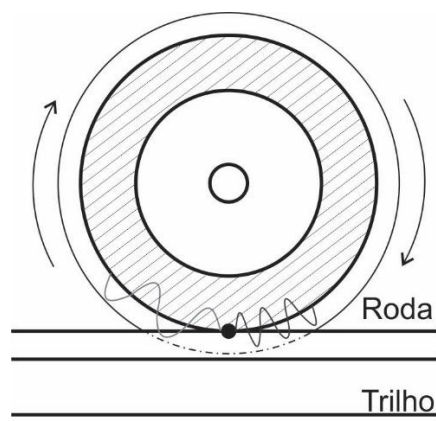


Fonte: Elaborado pelo autor

As rodas são estruturas com um formato relativamente propenso à ressonância, tendo uma das dimensões (raio) bem maior que a outra (espessura). Para a roda, o contato com o trilho pode ser visto como um amortecimento adicional, já que a energia da vibração pode ser transmitida para o trilho, de onde continua se propagando e não retorna à roda, ampliando o fator de perda de  $10^{-4}$ , considerando-se a roda suspensa, para  $10^{-3}$ , para a mesma roda apoiada no trilho (ÖGREN, 2006).

A rotação da roda diferencia suas características de vibração em relação à uma estrutura em repouso. Em vez de uma única forma ou padrão de vibração, correspondendo a uma frequência de ressonância, alguns padrões são comprimidos. Isso se dá devido às diferentes velocidades de propagação das ondas antes e após o ponto de contato entre a roda e o trilho. Uma onda propagando-se antes do ponto de contato tem o comprimento de onda menor que uma onda que se propaga após o ponto, conforme figura 27.

Figura 27 – Efeito de rotação das rodas



Fonte: Elaborado pelo autor

Os trilhos podem ser considerados estruturas em feixe linear infinitas. As forças geradas na superfície de contato entre roda e trilho movem-se ao logo do trilho na direção de movimento das rodas, levando a um efeito similar de encurtamento das ondas. O trilho é fixado aos dormentes com inserção de suporte resiliente entre os dois, e os dormentes são inseridos espaçadamente ao longo da linha (THOMPSON, 2009).

Os trilhos são, geralmente, apoiados em lastro formado por base e sub-base que favoreçam a percolação da água pelo sistema e garanta boa resistência à compressão. Essa característica confere ao sistema relativa capacidade de absorção do ruído gerado devido à rugosidade e porosidade do meio (ÖGREN, 2006).

Para ruídos de frequências muito baixas, a pista é muito rígida na direção vertical. A primeira ressonância depende da massa de todo o sistema de rolagem e da rigidez do lastro. A segunda ressonância é levemente mais alta em frequência e envolve a rigidez dos suportes resilientes e a massa do trilho e dos dormentes, onde o trilho e os dormentes se movem em sentido contrário ao de movimento das rodas (ÖGREN, 2006).

As frequências de ressonância podem, logicamente, variar bastante em relação à massa dos trilhos, rigidez dos suportes entre outros fatores, mas valores típicos para o sistema trilho-suporte-dormente-de-concreto-lastro giram em torno de 100Hz para a primeira ressonância e 500Hz para a segunda. Para frequências superiores à segunda, o trilho é essencialmente desacoplado dos dormentes pelo suporte resiliente (THOMPSON, 2009).

As ondas de flexão e as longitudinais que se propagam pelo comprimento do trilho são filtradas pela complexa estrutura dos dormentes periodicamente espaçados. Ondas de algumas frequências são rapidamente absorvidas, enquanto outras se propagam livremente pelo sistema. O fator importante para o som irradiado é a absorção relativa à uma determinada banda de frequência, expressa como a razão da absorção por metro (dB/m) (ÖGREN, 2006).

Para baixas frequências, trilho e dormentes em conjunto podem ser considerados as principais fontes sonoras. Na faixa de frequência média, os dormentes tornam-se desacoplados do trilho e o trilho é a fonte dominante. Em altas frequências, a roda é a fonte dominante, já que o amortecimento é menor do que no trilho. Como

mencionado, a absorção na roda é determinada pelo balanço introduzido pelo contato com o trilho (THOMPSON, 2009).

As pequenas imperfeições e rugosidades das superfícies da roda e do trilho são a estrutura física por trás das forças de contato que causam vibração e, portanto, a irradiação do som. A mecânica de contato – que consiste no estudo das forças e deformações devido ao contato mecânico entre corpos – aplicada ao caso do contato entre a roda da locomotiva e o trilho, pode explicar o processo de gênese do ruído através das forças de contato e fornece a compreensão necessária à modelagem das interações (ÖGREN, 2006).

Para determinada velocidade da composição, determinado comprimento de onda causará vibrações de diferentes frequências, de acordo com a expressão:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (15)$$

Onde:

$f$  é a frequência em hertz;

$v$  é a velocidade da composição em m/s;

$\lambda$  é o comprimento de onda em metros;

Cada par de rodas dos vagões possui eixos fixos de forma a garantir a mesma rotação em ambos os trilhos e, por conta dessa característica, é comum a emissão de ruídos tonais quando o vagão realiza uma curva. O processo começa com um deslizamento lateral na área de contato entre o trilho e a roda ou o atrito da superfície da roda contra o trilho. Na prática, a lubrificação do trilho é capaz de reduzir os ruídos tonais de deslizamento ao reduzir a fricção entre os agentes (ÖGREN, 2006).

### 3.3. Sistemas ambientais para redução do ruído de tráfego

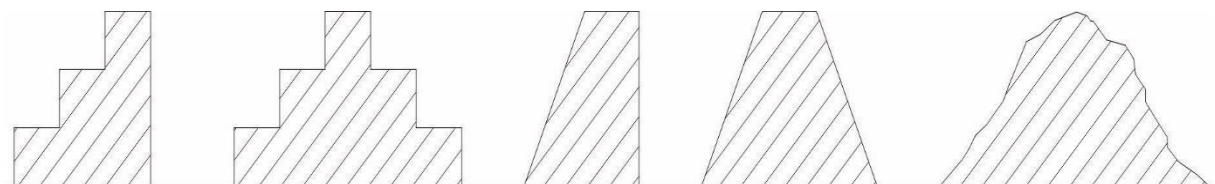
A solução convencional para controle do ruído é a construção de barreiras acústicas, entretanto, há alternativas que visam a possibilidade de combinação de elementos naturais e artificiais para possibilitar a redução do nível de pressão sonora sem que, no entanto, sejam criadas barreiras físicas de característica sectária ao longo de todo o trecho (NILSON; BENGTTSSON; KLAEBOE, 2015).



Estudos com vistas à utilização de barreiras alternativas aos tradicionais “muros” (DEFRANCE et al, 2015; FORSSEN; KROPP; KIHLMAN, 2015; HOROSHENKOV et al, 2015; VAN RENTERGHEM et al, 2015; ATTENBOROUGH et al, 2015; KANG et al, 2015) trazem a possibilidade de utilização de barreiras alternativas, vegetação, cinturões arbóreos, porosidade do piso e rugosidade dos revestimentos, por exemplo, integradas como forma de atenuação do ruído, mesmo que, em alguns casos, sejam integradas às barreiras convencionais.

Defrance et al (2015) propõem a utilização de barreiras baixas com aproximadamente 1,0m de altura medidos do nível do greide da linha férrea, que consistem em montes de terra revestidos por grama, implantados na faixa de domínio a 1,0 m do trilho, como apresentado na figura 28. A proximidade entre trilho e barreira possibilita a redução do ruído de tração. Nos ensaios realizados, a redução foi de 4-8 dB (A) para a faixa de recepção de 1,5m de altura, 5-9 dB(A) para a faixa de recepção de 3,0m de altura.

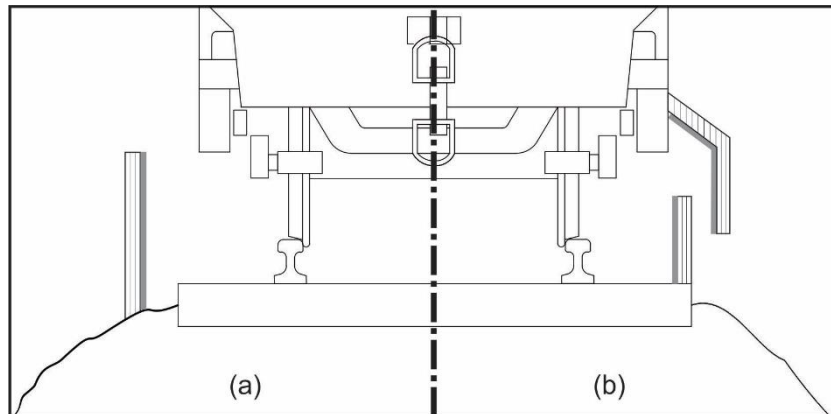
Figura 28 – Barreiras de gabião e terra



Fonte: Adaptado de Defrance et al (2015)

Forssen, Kropp e Kihlman (2015) propõem a implantação de pequenas barreiras fixas ao longo da linha férrea, próximas ao trilho, de modo a barrar próximo à fonte o ruído de tração. Essas barreiras podem ser acopladas, também, nas locomotivas e vagões, como apresentado na figura 29, aumentando a eficiência do dispositivo. A face interior das barreiras pode ser revestida com material de alta absorção nas frequências principais de ruído emitidas pelo sistema (100 Hz a 500 Hz), com redução média de 10 dB (A).

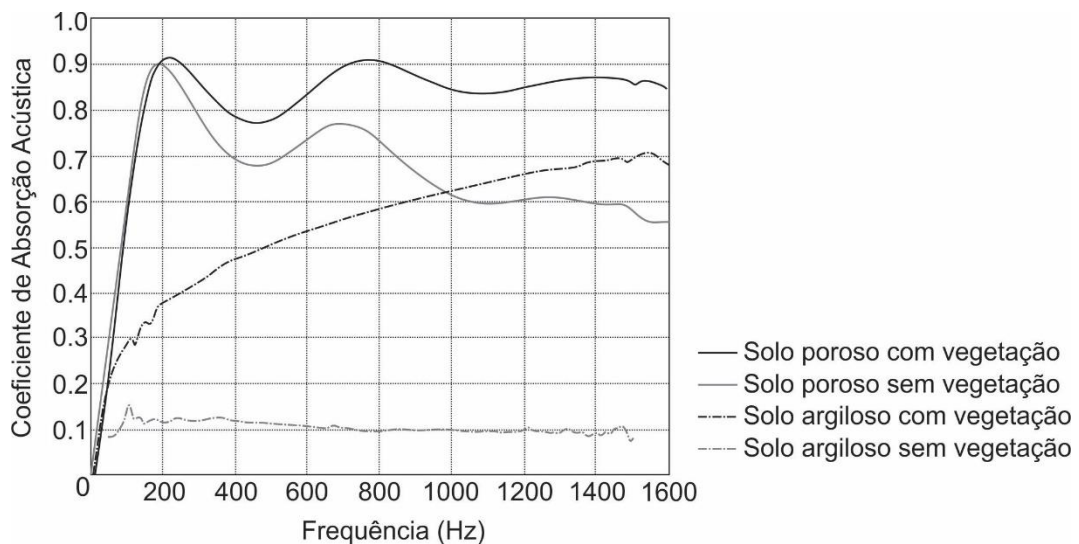
Figura 29 – Barreiras para ruído de tração somente no trilho (a) e dupla (b)



Fonte: Adaptado de Forssen, Kropp e Kihlman (2015)

Horoshenkov et al (2015) focam na performance acústica da vegetação e substrato do solo em ambientes urbanos. A capacidade do solo em absorver o som está diretamente ligada à porosidade e humidade, enquanto a capacidade de absorção da vegetação está ligada à altura, densidade e orientação das folhas. Fica demonstrado que a vegetação pode aumentar significativamente a absorção em solos argilosos e que, em solos porosos, aumenta a absorção em baixas e altas frequências, conforme figura 30.

Figura 30 – Coeficientes de absorção para solo com e sem vegetação

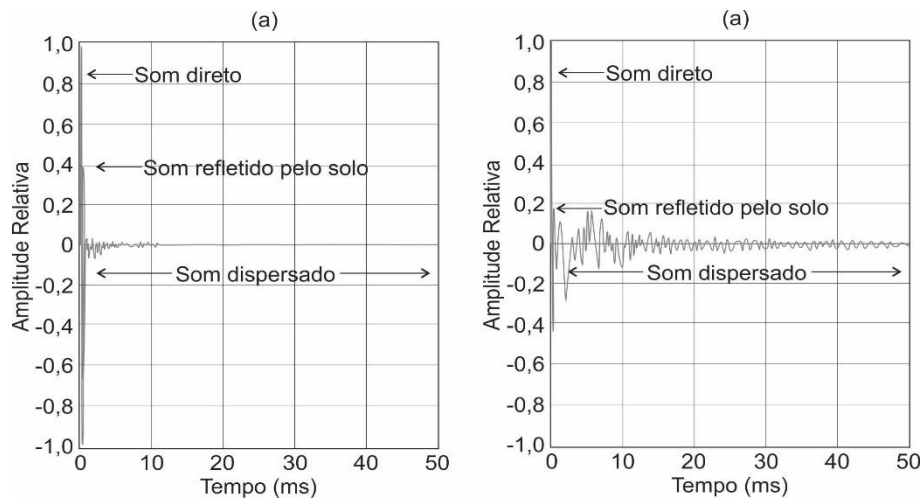


Fonte: Adaptado de Horoshenkov et al (2015)

Van Renterghem et al (2015) discutem as interações básicas entre ondas sonoras e vegetação, identificando que apenas a absorção sonora pelas partes da planta causa redução relevante de energia em uma onda sonora. A dispersão sonora, devido à interrupção do caminho direto fonte-receptor, pode ser considerada um fator importante

na redução do nível de pressão sonora se considerado para um único receptor, como apresentado na figura 31. A reflexão e a difração do som devido à presença da vegetação são consideradas efeitos de menor importância quando considerado o ruído típico de uma via de tráfego.

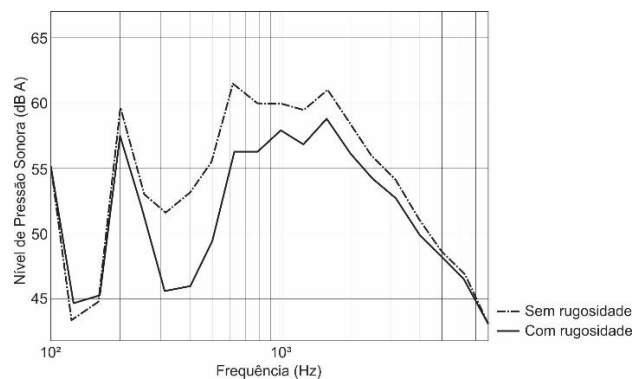
Figura 31 – Dispersão do som sem vegetação (a) e com vegetação (b)



Fonte: Adaptado de Van Renterghem et al (2015)

Attenborough et al (2015) discutem a redução do ruído ambiental a partir da inserção de materiais rugosos. A partir das análises, define-se que a inserção de elementos rugosos a até 30cm do piso tem o potencial de redução do ruído refletido em uma ampla faixa de frequência, levando à uma redução de até 8dB para frequências médias, conforme figura 32. Define-se, ainda, que a distribuição randômica das faces rugosas apresenta benefícios na redução da quantidade de ruído refletido em relação à implantação regular.

Figura 32 – Redução do NPS por inserção de elemento rugoso



Fonte: Adaptado de Attenborough et al (2015)

KANG et al (2015) apresentam os benefícios que a inserção de vegetação urbana traz para o ambiente acústico. São apresentados os resultados de simulações computacionais na avaliação da efetividade de jardins verticais e telhados verdes na redução do ruído de tráfego, a partir da redução da energia da onda sonora por absorção e a interferência na propagação da onda por reflexão e difração. A partir da aplicação dos elementos na modelagem computacional, chega-se a uma redução de 4,4 - 8,2 dB (A) para espaços urbanos reverberantes.

Ao se examinar o incômodo provocado pelo ruído, diferentes padrões temporais desempenham papel tão importante quanto as características espectrais do som. É necessário considerar estes aspectos junto ao ruído ambiental de fundo ( $L_{ri}$ ), que pode inclusive ser considerado positivo, como por exemplo o som proveniente de um curso d'água. O padrão temporal influencia também na perturbação do sono, estando diretamente ligado ao número de eventos durante a noite (NILSON; BENGTTSSON; KLAEBOE, 2015).

O efeito de sucessivas reduções na quantidade de ruído propiciado pela utilização combinada de dispositivos no espectro sonoro deve ser considerado. No caso de fachadas, por exemplo, o ruído bloqueado por uma barreira não será reduzido em tantos dB (A) quanto será o bloqueado por uma janela, devido à mudança espectral para baixa-frequência causada pela barreira. Se diversos dispositivos forem utilizados conjuntamente, novamente devido à mudança espectral, a redução de ruído resultante não pode ser sempre calculada pela soma das reduções individuais em dB (A) de cada dispositivo (FORSSÉN; KROPP; KIHLMAN, 2015).

Isso decorre do fato que o ouvido humano é mais sensível a algumas faixas de frequência. Embora haja redução do nível de pressão sonora com a inserção dos dispositivos, caso o espectro não seja substancialmente reduzido nas frequências de maior sensibilidade, a percepção de redução não corresponderá exatamente à queda absoluta em dB (A) (NILSON; BENGTTSSON; KLAEBOE, 2015).

Por fim, é preciso estar atento ao fato que, devido as sucessivas reduções causadas pela utilização combinada de dispositivos, a medição apenas do nível de pressão sonora é um indicador limitado. Dois ambientes acústicos diferentes podem

apresentar o mesmo nível de pressão sonora e, ainda assim, serem percebidos de forma diferente (FORSSÉN; KROPP; KIHLMAN, 2015).

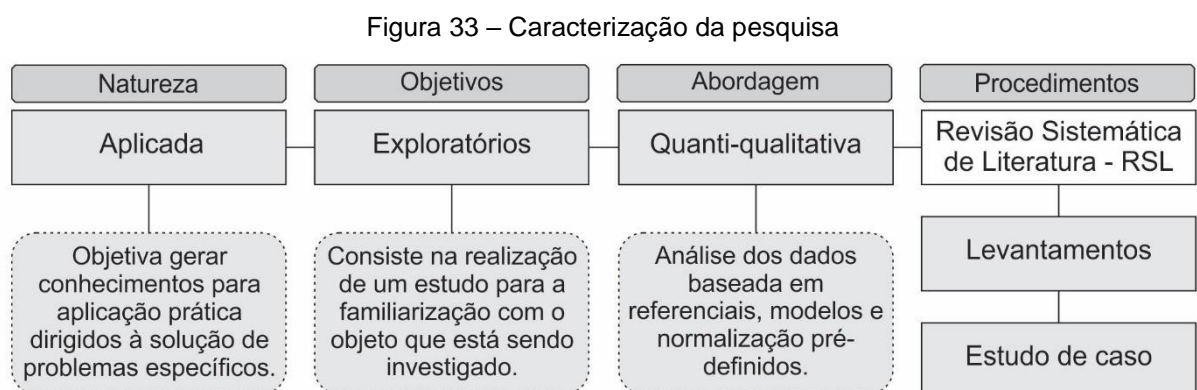
## 4.METODOLOGIA

Este capítulo define a metodologia utilizada no desenvolvimento dessa dissertação, explicitando suas características e as ferramentas aplicadas na condução e apreciação dos resultados, buscando a análise do tema de pesquisa de forma holística e integrada.

### 4.1. Caracterização da pesquisa

Esta pesquisa, ao gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de um problema específico, caracteriza-se como de natureza aplicada. Com relação à abordagem, pode ser considerada quanti-qualitativa, uma vez que analisa os dados tanto a partir de referenciais normativos quanto insere padrões de percepção individual. Seus objetivos podem ser considerados exploratórios, visando identificar e proporcionar maior familiaridade com as variáveis envolvidas no problema de pesquisa.

Por fim, utiliza-se como procedimentos a Revisão Sistemática de Literatura – RSL (Pesquisa Bibliográfica), elaborada a partir de referenciais teóricos e normativos; Levantamentos físicos e de qualidade ambiental perceptível; e Estudo de Caso de áreas urbanas e rurais localizadas na cidade de Juiz de Fora. O fluxograma de caracterização da pesquisa pode ser observado na figura 33.

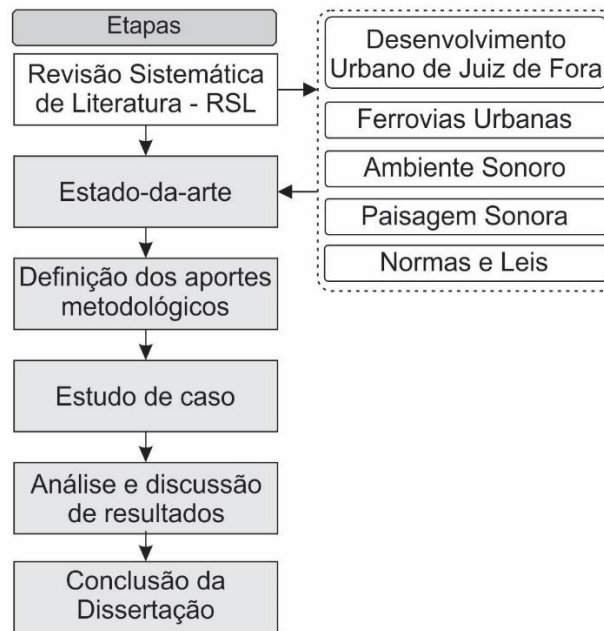


Fonte: Elaborada pelo Autor a partir de Marconi e Lakatos (2017).

Inicialmente, foi definido um percurso metodológico simplificado no qual constam as etapas: a) Revisão de referências; b) Metodologia de trabalho; c) Estudo de caso; d) Resultados e discussão; e) Conclusão.

A partir desta estrutura de trabalho básica, escolheu-se a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) como aporte metodológico para realização da etapa “a”, e após a definição do estado-da-arte teórico e normativo, as demais etapas foram remodeladas e redefinidas, de forma a atender às necessidades observadas durante a execução da RSL, como pode ser observado na figura 34.

Figura 34 – Percurso metodológico



Fonte: Elaborada pelo Autor

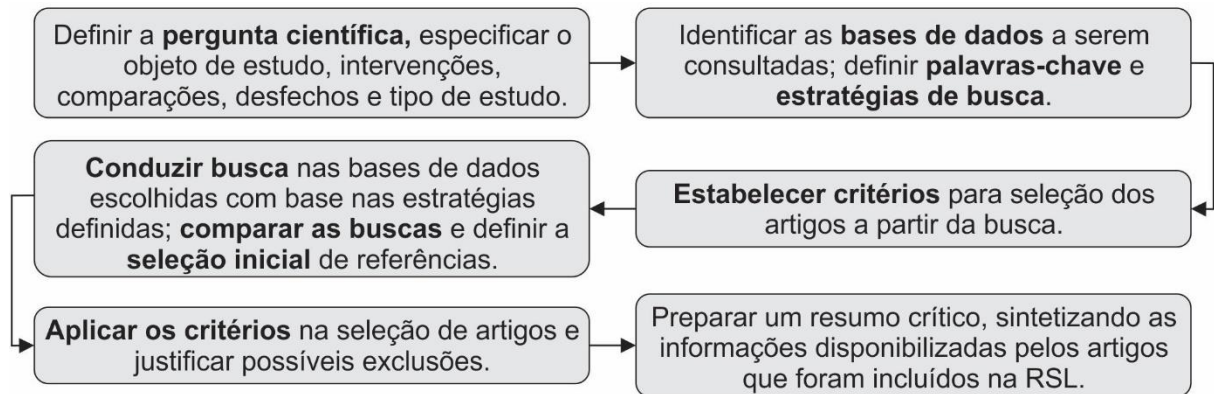
## 4.2. Revisão Sistemática de Literatura

A Revisão Sistemática de Literatura – RSL – pode ser entendida como uma investigação que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema, disponibilizando um resumo das evidências relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, mediante apreciação crítica e síntese da informação selecionada através da aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca (SAMPAIO, MANCINI, 2007). O resultado de uma RSL é uma síntese que consolida e agrega os resultados dos estudos primários analisados apresentando novos conhecimentos.

Para realização da Revisão Sistemática de Literatura foi utilizada uma versão híbrida baseada nos métodos propostos por Sampaio e Mancini (2007) e Galvão e Pereira (2014), que consiste em: a) elaboração de uma pergunta de pesquisa; b)

definição das bases de dados; c) busca na literatura; d) seleção dos artigos; e) extração dos dados; e f) síntese dos dados (metanálise). O percurso e as definições de cada etapa são apresentados na figura 35.

Figura 35 – Percurso metodológico da Revisão Sistemática de Literatura



Fonte: Adaptado de Sampaio e Mancini (2007) e Galvão e Pereira (2014)

Para a etapa de elaboração da pergunta de pesquisa, definiu-se como objeto de estudo os ambientes acústico e físico das linhas ferroviárias; como intervenções a utilização de barreiras acústicas; no campo da comparação a situação com barreira em relação à situação existente (sem barreira); e como tipo de estudo uma abordagem exploratória. Isto feito, definiu-se que o objetivo da RSL através da pergunta de pesquisa é verificar a pertinência da inserção de barreiras acústicas, determinando e levando em conta as características peculiares do ambiente acústico e físico de linhas ferroviárias, através da comparação entre a situação sem e com barreira. Essas definições podem ser melhor visualizadas na tabela 15, apresentada a seguir.

Tabela 15 – Componentes da pergunta de pesquisa para RSL

Item	Definição
Objeto de estudo	Ambientes acústico e físico das linhas ferroviárias
Intervenções	Utilização de barreiras acústicas
Comparação	Situação com barreira em relação à situação existente
Tipo de estudo	Abordagem exploratória

Fonte: Elaborada pelo autor

Na definição das bases de dados, optou-se por utilizar artigos de periódicos indexados nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, *Science Direct*, *SciELO* e Periódicos Capes. Em adição às bases de periódicos, utilizou-se como referencial livros



de editoras reconhecidas (Elsevier, Wiley, Springer, Taylor & Francis, CRC Press, Spon Press, Architectural Press). No campo da normalização e legislação foram consultadas as bases da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, da *International Organization for Standardization* – ISO, do organismo governamental norte-americano *Federal Railway Administration* – FIA, e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT.

A definição de descritores deu-se a partir da escolha dos termos “acústica ambiental”, “ambiente acústico”, “paisagem acústica” e “transporte ferroviário”, também pesquisados em inglês como “*environmental acoustics*”, “*sonic environment*”, “*soundscape*” e “*rail transport*”. A partir dos resultados encontrados, partiu-se para a seleção dos mais relevantes aos objetivos desta pesquisa através da observação de atendimento à pergunta previamente elaborada, escolhendo-se como referências principais as apresentadas na tabela 16. Vale destacar que foram aplicadas diversas referências complementares na elaboração da RSL, sendo que as indicadas constituem a base de conhecimentos na qual as demais referências se apoiam na construção deste trabalho.

Tabela 16 - Referências selecionadas por descritor

Acústica Ambiental <i>Environmental acoustics</i>	Ambiente Acústico <i>Sonic environment</i>	Paisagem Acústica <i>Soundscape</i>	Transporte Ferroviário <i>Rail transport</i>
Bistafa (2011)	Brown; Gjestland; Dubois (2016)	Kang, Schulte-Fortkamp (2016)	Nilson et al. (2015)
Murgel (2007)	Farina (2014)	Brown; Gjestland; Dubois (2016)	Nielsen et al. (2013)
Fahy, Walker (2006)	Voegelin (2014)	Botteldooren et al (2016)	Maeda et al. (2010)
Bucur (2006)	Jacobsen et al. (2007)	Jarviluoma, Vikman (2015)	Thompson (2009)
Harrison (2004)	Bruneau (2006)	Farina (2014)	Bruinsma et al. (2008)
Templeton (1997)	Fahy, Walker (2006)	Schafer (1997)	Schulte-Werning et al. (2008)
Acioli (1994)	Schafer (1997)		Ögren (2006)

Fonte: Elaborada pelo autor

Dentre os autores apresentados, esta pesquisa usa como referências temáticas principais no descritor “acústica ambiental” os autores Acioli (1994), Murgel (2007) e Bistafa (2011). No descritor “ambiente acústico”, destacam-se Farina (2014) e

Brown; Gjestland; Dubois (2016). No descritor “paisagem acústica” as referências principais são Schafer (1997), Kang e Schulte-Fortkamp (2016), Brown; Gjestland; Dubois (2016) e Botteldooren et al (2016). Por fim, no descritor “transporte ferroviário” destacam-se Ögren (2006), Thompson (2009) e Nilson et al. (2015).

A utilização destes autores como base da discussão se dá pela profundidade de tratamento do tema em cada uma dessas referências, possibilitando uma visão holística à qual é possível incorporar as contribuições dos demais. Algumas das referências escolhidas são, ainda, emblemáticas em sua área de conhecimento, sendo responsáveis pela definição teórica inicial do campo de pesquisa.

Juntamente com as referências principais, apresentadas anteriormente na tabela 3, que se tratam de livros publicados por editoras nacionais e internacionais de reconhecida qualidade, foram trabalhados como referências complementares artigos e trabalhos publicados em periódicos editados pelas editoras previamente indicadas e nos principais congressos das áreas do ambiente construído e da acústica, ampliando a abordagem do tema e permitindo atualizações importantes, devido ao caráter temporal dessas publicações.

Após a definição das referências base, a elaboração dos capítulos de revisão teórica se deu tendo-as como cerne da discussão, ao qual são agregados os posicionamentos e informações derivadas das demais fontes. A partir disto, definiu-se que o desenho desses capítulos englobaria a definição e desenvolvimento dos temas principais relativos à acústica ambiental, ambiente sonoro e paisagem sonora que se diferem substancialmente uns dos outros.

Por fim, define-se a contribuição desses temas ao campo do transporte ferroviário e suas possíveis aplicações em análises que visem a garantia de padrões mínimos de conforto às áreas habitadas em que as linhas férreas estão presentes, tanto na conceituação de suas características físico-ambientais quanto na possibilidade de mitigação de possíveis incompatibilidades.

No que se refere à revisão das normativas pertinentes ao caráter acústico das linhas férreas e das áreas habitadas ao redor, foi realizada pesquisa direta nos bancos de dados dos órgãos normalizadores Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT

e *International Organization for Standardization* – ISO, do organismo governamental norte-americano *Federal Railway Administration* – FIA, e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. A busca em cada uma dessas bases retornou as referências apresentadas na tabela 17, apresentada a seguir.

Tabela 17 - Bases de pesquisa e referências legais e normativas utilizadas

Organismo/Base de dados	Norma/Lei
Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT	NBR 10151:2000 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento
	NBR 10152:2017 – Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações
	NBR 14313:1999 – Barreiras acústicas para vias de tráfego – Características construtivas
	NBR 16425-1:2016 – Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes – Parte 1: Aspectos gerais
	NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho – Partes 1 a 6
	NBR 16313:2014 – Acústica – Terminologia
<i>International Organization for Standardization</i> - ISO	ISO 1996-1 – Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures
	ISO 1996-2 – Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels
	ISO 12913-1:2014 – Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual framework
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT	Norma DNIT 076/2006 – ES – Tratamento ambiental acústico de áreas lindeiras da faixa de domínio – Especificação de serviço
	Diretoria de Infraestrutura Ferroviária – Produto 8 – Parâmetros Indicadores de Intervenções em Áreas Urbanas
<i>Federal Railway Administration</i> - FIA	Urban rail noise abatement program
	Control of Wheel/Rail Noise and Vibration
	Determination of a Sound Level for Railroad Horn Regulatory Compliance

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da sistematização das referências normativas e legais obtidas nessa etapa da revisão sistemática, elaborou-se a metodologia híbrida para coleta de dados

fomentadores do estudo de caso realizado neste trabalho. Por fim, procedeu-se à sistematização dos dados levantados em todas as etapas da RSL em capítulos de discussão teórica que sustentam o desenvolvimento e análise do tema de pesquisa proposto.

### 4.3. Metodologia de coleta de dados

Para realização da coleta dos dados foram observadas as definições normativas da NBR10.151:2000 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento e da NBR 16425-1:2016 – Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes – Parte 1: Aspectos gerais.

A coleta dos dados foi realizada em relatório técnico de medições, como solicitam as normas, e contemplou o levantamento das seguintes variáveis, que foi realizado por instrumentos técnicos apropriados e registrados em tabelas como a seguir:

Tabela 18 - Exemplo de Tabela de coleta de dados para o estudo de caso

Ponto de medição 01 – Área Urbana de Uso Industrial	
Coordenadas	21°42'8.96"S - 43°25'12.24"O
Distância Ferrovia-ponto	Aproximadamente XX m
Velocidade do vento	XX m/s – NO-SE
Temperatura	XX°C
Umidade relativa	XX%
Horário inicial	XX:XX
Horário final	XX:XX
Passagem do trem	XX:XX – XX:XX
L <sub>Aeq</sub> (5 minutos)	XX dB
L <sub>Aeq</sub> (10 minutos)	XX dB
L <sub>Aeq</sub> (15 minutos)	XX dB
L <sub>AE</sub>	XX dB
L <sub>Amáx</sub>	XX dB
L <sub>Amín</sub>	XX dB

Fonte: Elaborada pelo autor

Os procedimentos delineados para a realização das medições de níveis de ruído no sistema linear de transporte ferroviário foram os seguintes:

- a) As medições de níveis de ruído foram realizadas fora da faixa de domínio do sistema objeto de avaliação;

- b) As medições de níveis de ruído foram realizadas em condições climáticas favoráveis, com ausência de chuva ou rajadas de vento;
- c) As medições de níveis de ruído foram realizadas em ambiente externo às edificações;
- d) O medidor de Nível de pressão Sonora estava provido de protetor de vento (Paravento);
- e) O microfone do medidor de Nível de Pressão Sonora foi direcionado para o sistema objeto de avaliação;
- f) O medidor de Nível de Pressão Sonora foi posicionado a 1,20m do piso e a pelo menos 2,00m de quaisquer superfícies refletoras de som, tais como muros, paredes, etc. Na impossibilidade de atender alguma destas recomendações, a descrição da situação medida consta no relatório com as devidas justificativas;
- g) As avaliações de níveis de ruído foram ser realizadas nos períodos em que a atividade represente a condição normal de operação do sistema;
- h) As interferências transitórias que ocorreram durante as medições foram desprezadas e não compõe os níveis de ruído medidos. Este critério foi utilizado tanto na avaliação de nível de ruído ambiente (Lra) quanto em outras medições;
- i) Nas avaliações, as interferências transitórias foram descartadas das medições com o uso do recurso de “pausa” do sonômetro. Nos casos em que não foi possível paralisar a medição antes da integração da interferência aos níveis de ruído medidos, a medição em andamento foi descartada e uma nova medição foi iniciada;
- j) No relatório de medição foram relatados todos os eventos ocorridos, descrevendo os episódios que foram excluídos e os que foram considerados.

- k) Para caracterização dos níveis de ruído foi adotado o tempo de medição de 15 minutos para cada ponto de medição, entretanto não foi considerado o referencial de que a variação do  $L_{Aeq}$  acumulado seja igual ou menor a 0,5 dB(A) a cada 5 minutos, já que as características do sistema de medido não permitem tal resultado;
- l) No relatório foram apresentados os níveis de ruído medidos ( $L_{Aeq}$ ) do 5º, 10º, e 15º minuto, para comparação da evolução do ruído no período avaliado;
- m) As avaliações nas áreas próximas às escolas não foram realizadas nos horários de recreios, intervalos, entrada e saída de alunos.

Observadas as referências de medição e as variáveis a serem aferidas, definiu-se que seriam realizadas em quatro pontos de características de ocupação distintas:

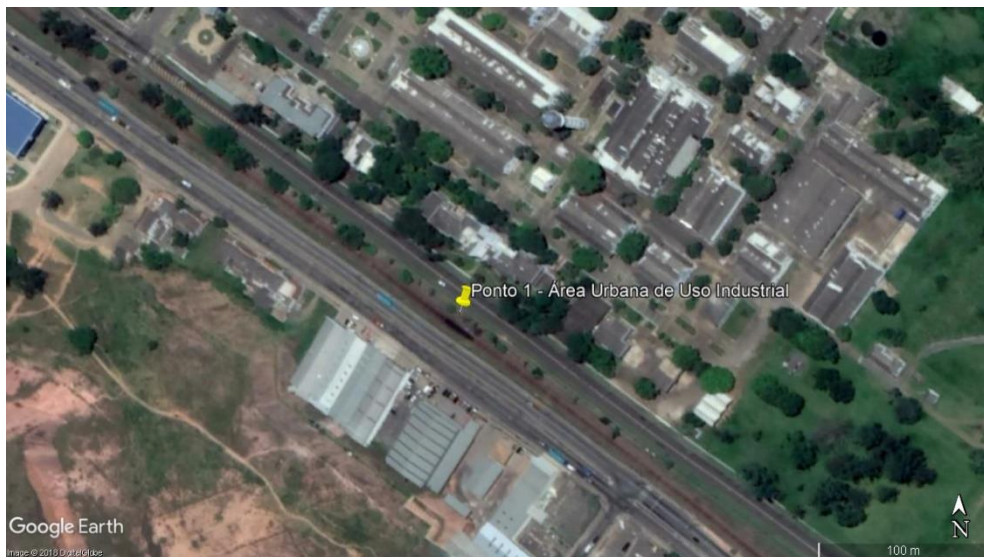
- a) Ponto 1 – Área urbana com características industriais, com predominância de edificações industriais e galpões preferencialmente em ambos os lados da via férrea;
- b) Ponto 2 – Área urbana com características rurais, com predominância de grandes espaços livres, presença abundante de vegetação e edificações baixas e espaçadas, quando existentes, preferencialmente em ambos os lados da via férrea;
- c) Ponto 3 – Área urbana de uso residencial, com predominância de edificações de uso residencial e baixo adensamento da ocupação do solo, preferencialmente em ambos os lados da via férrea;
- d) Ponto 4 – Área urbana de uso misto, em que coexistam o uso residencial, comercial e, se possível, industrial, preferencialmente em ambos os lados da via férrea.

A partir da definição das características esperadas para cada ponto de medição, foi realizado reconhecimento, através da plataforma Google® Street View, ao

longo de toda a extensão da linha férrea que corta a cidade de Juiz de Fora, separando-se os potenciais locais de medição, levando-se em conta também a acessibilidade para realização das medições bem como a segurança na utilização dos aparelhos.

Para o Ponto 1 – Área urbana com características industriais, foi delimitada uma área situada na Zona Norte da cidade, no bairro Araújo, em frente à Indústria de Material Bélico do Brasil - IMBEL<sup>®</sup>, que reúne as premissas para o ponto de medição. Neste ponto, a via férrea é ladeada, de um lado, pela Avenida Juscelino Kubistchek e, de outro, pela Avenida Garcia Rodrigues Paes, ao longo das quais estão implantadas as edificações industriais e galpões, conforme figura 36.

Figura 36 – Ponto 1 – Área Urbana de Uso Industrial



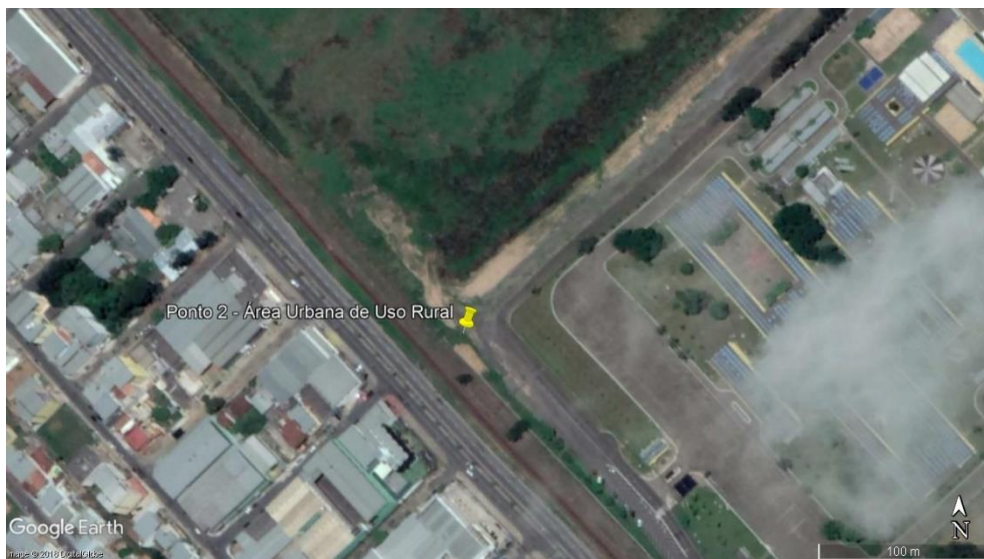
Fonte: Adaptado de Google Earth

Para o ponto 2 – Área urbana com características rurais, foram identificadas duas áreas possíveis. A primeira, na altura do bairro Retiro, zona sudeste da cidade, fica ao longo da rodovia BR-267, próxima à usina hidrelétrica de Marmelos. Esta área foi desconsiderada devido à possibilidade de intervenção no nível de pressão sonora pela passagem sistemática de veículos em média e alta velocidade bem como a interferência da queda d'água da barragem da usina hidrelétrica.

A segunda área (figura 37), situada na Zona Norte, no bairro Nova Era, em frente ao Colégio Militar de Juiz de Fora, apresenta grande área predominantemente desocupada na margem direita da ferrovia. Embora ao longo da Avenida Juscelino

Kubistchek, à esquerda da ferrovia, haja ocupação com predominância de edificações de uso misto com até dois andares, devido às características topográficas do trecho (a Avenida encontra-se em cota relativamente superior à linha férrea e o ponto de medição, por sua vez, em cota inferior em relação à linha férrea), o ponto de medição foi escolhido. Outro ponto determinante para a escolha da área foi a inexistência de vias de tráfego próximas ao ponto de medição, reduzindo a interferência do ruído rodoviário nas medições.

Figura 37 – Ponto 2 – Área urbana com características rurais.



Fonte: Adaptado de Google Earth

Para o ponto 3 – Área urbana de uso residencial, foi escolhida área situada no início da Zona Norte da cidade, no bairro Industrial. Essa área (figura 38) apresenta a predominância de edificações de uso residencial em ambos os lados da ferrovia, com passagem em nível próxima ao ponto de medição, permitindo também a medição da contribuição dos ruídos de alerta (buzina da locomotiva e sinal sonoro de alerta da passagem em nível). Por fim, a existência de vias de tráfego leve na área escolhida reduz a intervenção do ruído rodoviário nas medições realizadas.



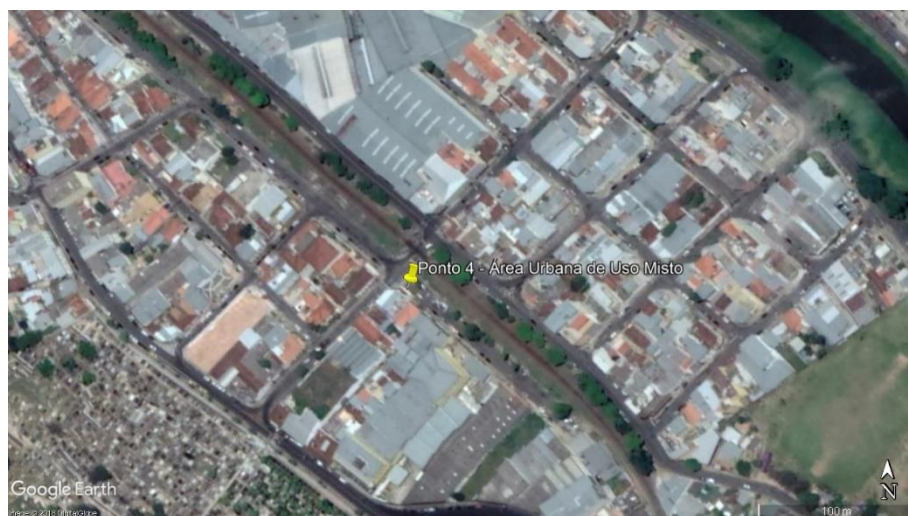
Figura 38 – Ponto 3 – Área urbana de uso residencial



Fonte: Adaptado de Google Earth

Para o ponto 4 – Área urbana de uso misto, foram consideradas diversas áreas ao longo da Avenida Francisco Bernardino e da Rua da Bahia, sendo escolhida uma área nessa última por conta do melhor atendimento às características espaciais preconizadas, com presença de comércio, residências e indústrias. O ponto localizado na confluência das ruas Pinto de Moura e da Bahia (figura 39) foi escolhido por contar também com passagem em nível para veículos, permitindo a medição da contribuição dos sinais sonoros de alerta (buzina da locomotiva e sinal sonoro de alerta da passagem em nível).

Figura 39 – Ponto 4 – Área urbana de uso misto



Fonte: Adaptado de Google Earth

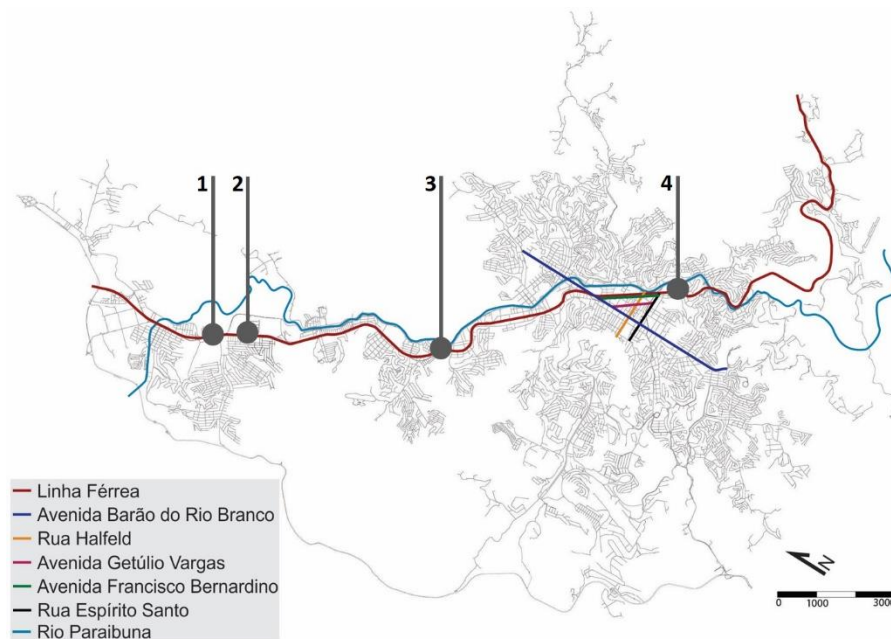
As coordenadas aproximadas de cada ponto de medição foram definidas pela demarcação em Google® Earth. A temperatura e a umidade relativa foram obtidas pela utilização de termo higrômetro digital. A velocidade do vento através de termo anemômetro digital (anemômetro de fio quente). As medições acústicas foram realizadas por sonômetro, em modo *fast*, após conferência in loco da calibração – antes e após a realização das medições – por calibrador acústico.

A relação completa de equipamentos utilizados na coleta dos dados, contando marca, modelo e classe, pode ser consultada nos anexos deste trabalho, bem como a forma dos relatórios de medição para cada um dos pontos de análise propostos.

Para a coleta dos dados foi determinado posicionamento do sonômetro a 1,20m em relação ao solo, sendo as distâncias relativas entre fonte e medidor diferentes e expressas para cada ponto, devido às diferentes características das faixas lindeiras à faixa de domínio.

Decidiu-se, também, estender todas as medições acústicas pelo período de 15 minutos, de forma a garantir o registro de uma amostra maior do ambiente acústico de cada ponto de medição. A localização dos pontos na malha urbana de Juiz de Fora é apresentada na figura 40.

Figura 40 – Localização dos pontos de medição na malha urbana de juiz de fora



Fonte: Elaborado pelo Autor

Durante a realização das medições nos pontos de interesse foi realizado levantamento fotográfico do local e foram registrados os eventos que ocorreram durante as medições, de forma a atender ao referencial normativo, gerando subsídios para as análises.

Por fim, procedeu-se à sistematização dos dados levantados e ao desenho dos perfis transversais dos pontos de medição através do levantamento cadastral da cidade de Juiz de Fora realizado no ano de 2007 e disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Juiz de Fora em Plataforma CAD, possibilitando a análise dos dados como demonstrada a seguir.

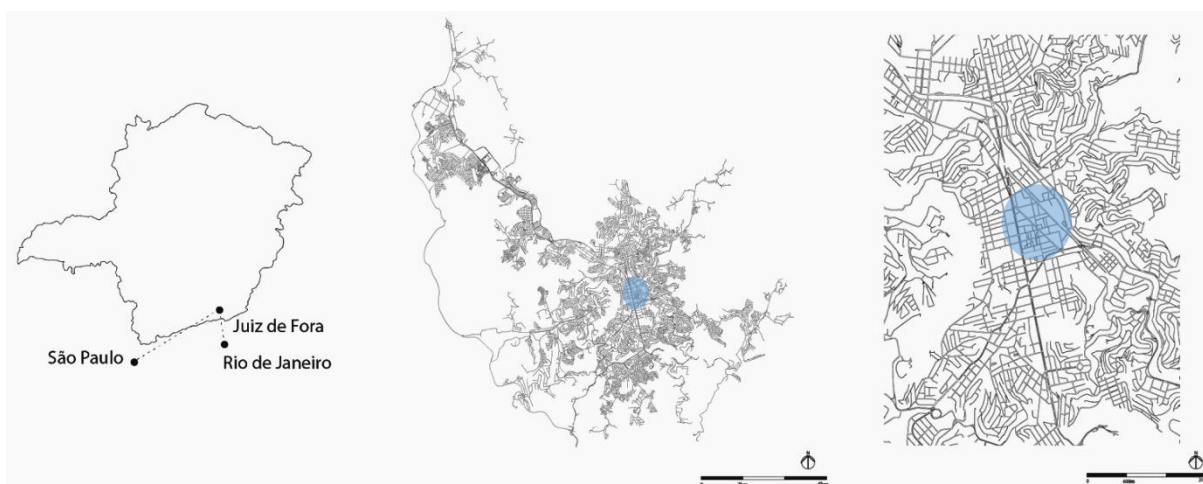
## 5. ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta o estudo de caso realizado e os dados obtidos durante seu desenvolvimento na cidade de Juiz de Fora, nos quatro pontos delimitados na metodologia, gerando subsídios para a proposição de intervenção nas áreas analisadas visando à melhoria ambiental e promoção do conforto acústico.

### 5.1. Desenvolvimento urbano e da infraestrutura ferroviária de Juiz de Fora

Juiz de Fora é uma cidade do sudeste mineiro (figura 41) que tem seu histórico de desenvolvimento diretamente ligado ao ciclo cafeeiro e à implantação da ferrovia no início da década de 1870, então Estrada de Ferro D. Pedro II, para escoamento da produção. A queda da produção aurífera em minas gerais, seguida da valorização internacional da produção cafeeira, na qual a cidade de Juiz de Fora chegou a ser a segunda maior produtora do estado e, por fim, a chegada da Estrada de Ferro D. Pedro II, propiciaram o acúmulo de capital e as condições para o desenvolvimento da cidade (SAMPAIO, 2015).

Figura 41 – Localização da cidade de Juiz de Fora e indicação do núcleo urbano inicial

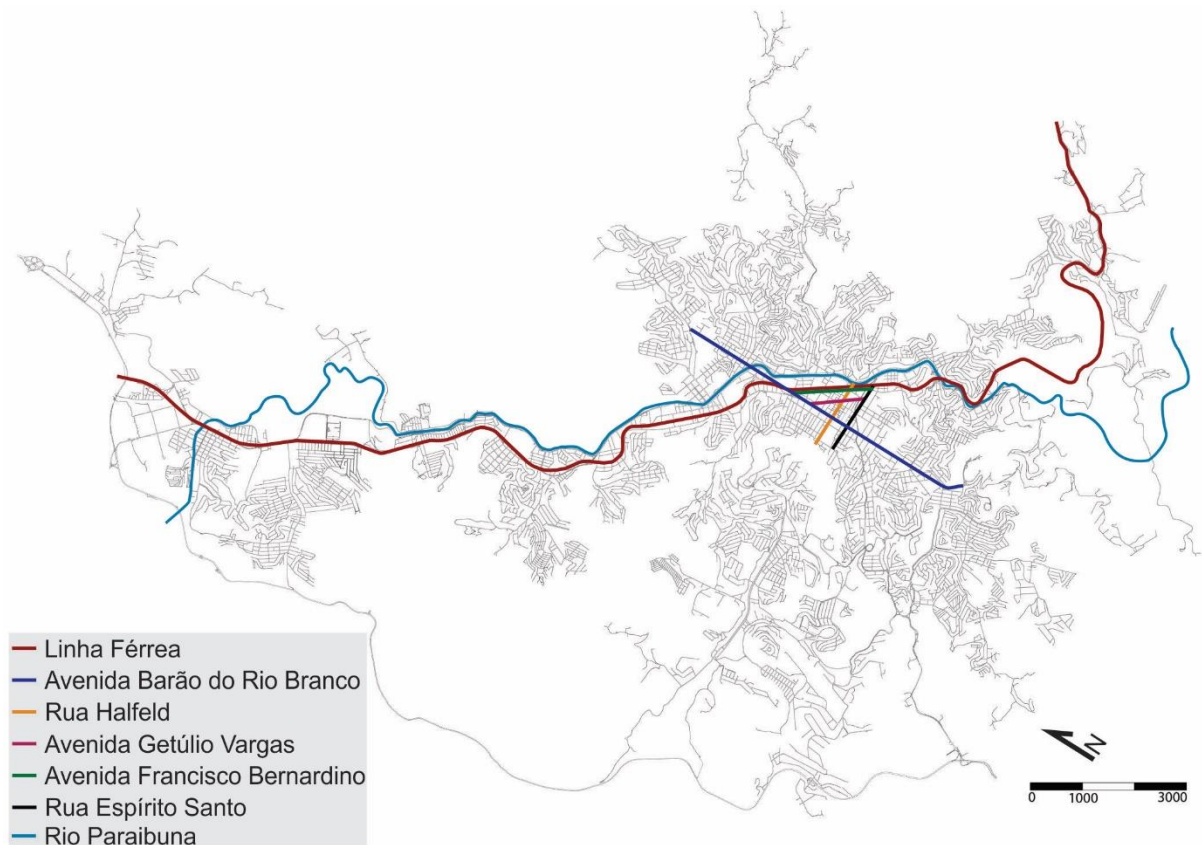


Fonte: Arquivo pessoal de Julia Paglis

Em pouco mais de meio século, entre os anos de 1810 e 1880, a cidade passa de um espaço quase vazio, predominantemente ocupado ao longo do caminho novo da Estrada Real por fazendas e paragens, na margem esquerda do Rio Paraibuna, para

uma cidade referência na então província de Minas Gerais. Seu núcleo urbano inicial desenvolve-se à margem direita do Rio Paraibuna, ao longo da Estrada União e Indústria, construída por Mariano Procópio Ferreira Lage para ligar a cidade à capital do império, passando por Petrópolis, esboçando-se as linhas básicas de desenvolvimento da cidade (figura 42) que permanecem até os dias atuais (MIRANDA, 1990).

Figura 42 – Mancha Urbana da cidade de Juiz de Fora



Fonte: Elaborada pelo Autor

A longa avenida principal, atual Avenida Barão do Rio Branco, cortava a cidade no sentido norte-sul; interceptada pela Estrada União e Indústria, atual Avenida Getúlio Vargas e, por fim, limitada pela Rua da Califórnia, atual Rua Halfeld, configurando o triângulo central que, posteriormente, seria expandido. Essa conformação inicial serviria de parâmetro para a implantação da estrada de ferro, como demonstra Sampaio (2015, p.12):

“A União Indústria, atual Avenida Getúlio Vargas, serviu de parâmetro físico para a construção da Estrada de Ferro D. Pedro II que chegaria na região na década de 1870. O leito da ferrovia foi implantado

paralelamente a antiga via de Mariano Procópio e ao Rio Paraibuna. Esta, por sua vez, determinou o traçado da atual Avenida Francisco Bernardino, o lado leste do triângulo. Desta maneira, definia-se o núcleo histórico da cidade através dos seus principais eixos norteadores, as Avenidas Rio Branco e Getúlio Vargas”.

Foi após a implantação da Estrada de Ferro D. Pedro II, nas duas últimas décadas do século XIX, que Juiz de Fora se consolidou como principal centro comercial, industrial e de distribuição da produção cafeeira de Minas Gerais em um dos mais importantes do país. No início do século XX, a cidade já tinha as características de um importante centro econômico devido à industrialização gerada pelo excedente econômico da produção cafeeira e pelos vetores de desenvolvimento propiciados pela presença da ferrovia (SAMPAIO, 2015).

O parque fabril então em desenvolvimento instala-se, principalmente, ao longo da ferrovia, especialmente na direção norte, dando início ao vetor de desenvolvimento da cidade que se mantém até os dias atuais. Os fatores técnicos e financeiros trazidos pela industrialização trazem consigo o aumento demográfico e a necessidade da produção do espaço urbano de forma mais estruturada, que se traduz na ampliação da área urbana e na divisão social da cidade (BARBOSA, 2013).

A ocupação do solo em ambas as áreas, virtualmente chamadas de alta, à margem direita e baixa, à margem esquerda divergem profundamente, como pode ser observado na figura 43. A presença da linha ferroviária e o rio Paraibuna, além de delimitar o eixo principal de expansão da cidade – norte-sul, ao longo do vale do Paraibuna – configura uma linha de divisão física da malha urbana.

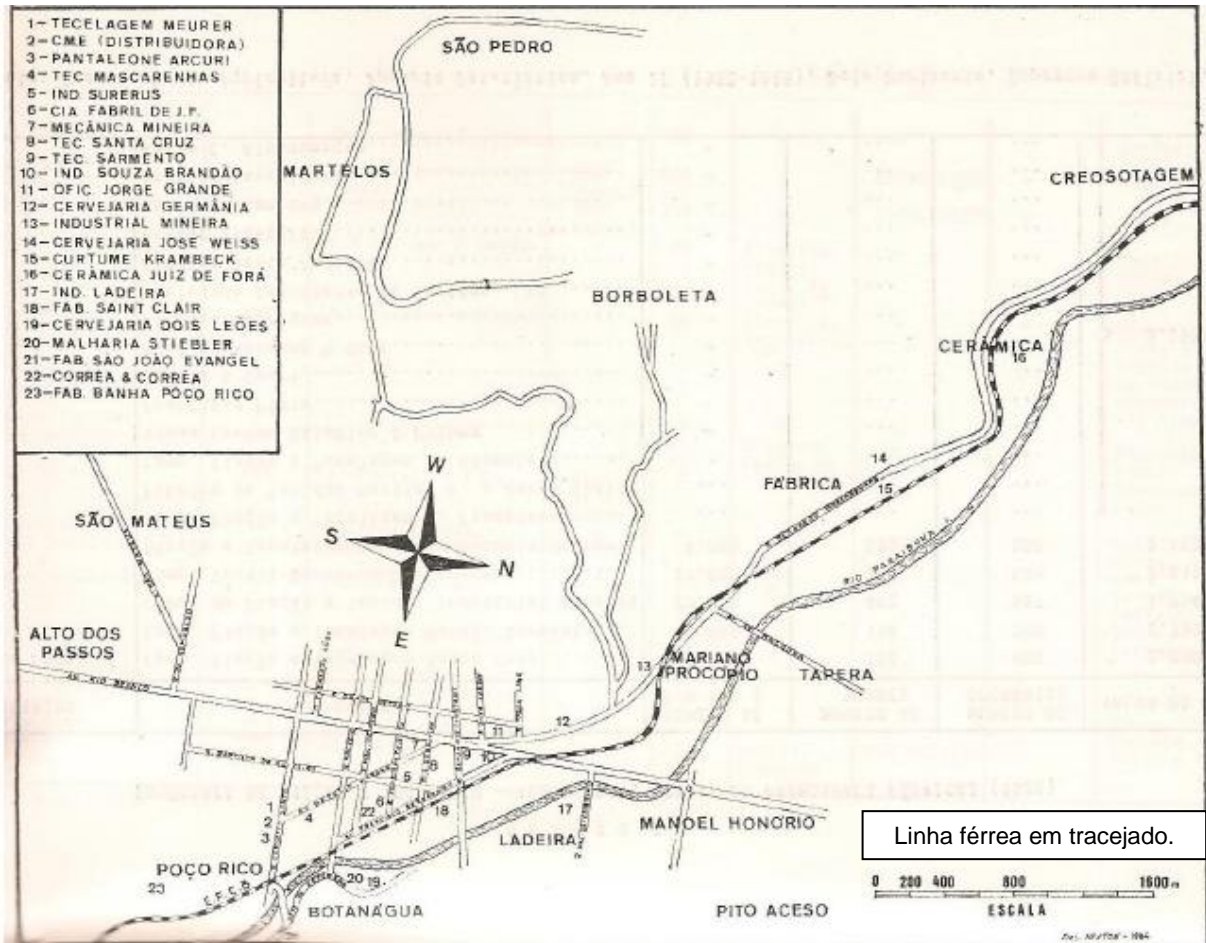
Figura 43 – Vista aérea da cidade de Juiz de Fora a partir da Praça da Estação, mostrando a ocupação das margens esquerda e direita do rio Paraibuna, respectivamente.



Fonte: Fotografia panorâmica de Dimas Stephan, 2018.

Na década de 1920, a malha urbana de juiz de fora já havia se desenvolvido consideravelmente, com a implantação dos principais estabelecimentos industriais da cidade ao longo do eixo da ferrovia, como podemos observar na figura 44.

Figura 44 – Localização dos principais estabelecimentos industriais de Juiz de Fora na década de 1920.



Fonte: Andrade, 1987.

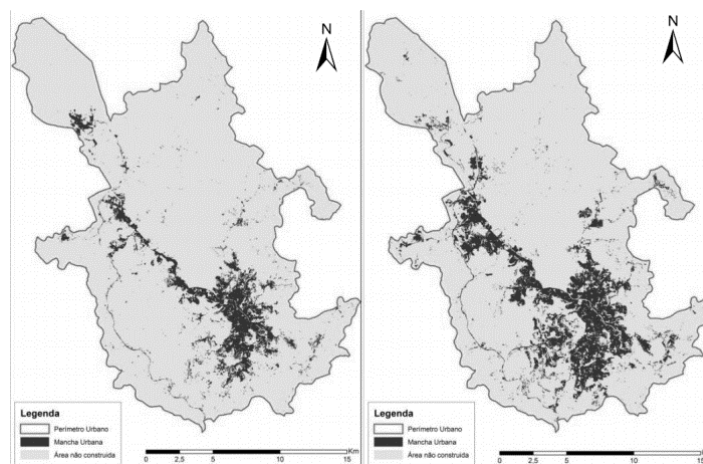
Em 1922, devido à comemoração do centenário da independência do Brasil, complementa-se o ramal ferroviário entre Matias Barbosa, então distrito de Juiz de Fora, e Benfica, integrando finalmente as áreas urbanas em desenvolvimento. A partir de 1930, como resultado do direcionamento de políticas públicas ao desenvolvimento da nova capital Mineira – Belo Horizonte, da Crise de 1929 e da implantação do Estado Novo no Brasil, a cidade de Juiz de Fora, diretamente ligada às oligarquias cafeeiras, passa por um processo de redução do crescimento, até então vertiginoso, e de desaceleração do desenvolvimento industrial (BARBOSA, 2013).

Paula (2008) aponta que, nesse período, o pouco investimento em infraestrutura, devido ao abarcamento dessas responsabilidades pelo poder público, nas três esferas de governo, desempenha papel importante na redução do desenvolvimento urbano. Transportes, energia, comunicação e serviços urbanos, até então os principais agentes que fomentaram o desenvolvimento urbano e industrial de Juiz de Fora, não se modernizaram de forma satisfatória, direcionando os vetores de investimentos para outras cidades mais atrativas.

A partir de 1930, a cidade de Juiz de Fora passa a se desenvolver seguindo as taxas de crescimento nacional, sem destacar-se como polo de atração de investimentos como no período entre 1870 e 1920, mantendo principalmente as atividades produtivas que já desenvolvia, embora o crescimento populacional tenha chegado a 100% entre 1920 e 1940, enquanto a população ocupada no setor secundário cresceu apenas 24%. Essa população excedente se direciona à ocupação de áreas periféricas e com pouca ou nenhuma infraestrutura, principalmente ao longo da ferrovia e do eixo de ocupação norte-sul já delimitado (BARBOSA, 2013).

Com o passar do tempo, novas linhas de evolução da cidade foram se estabelecendo – direcionadas principalmente pelos eixos da ferrovia e do rio Paraibuna – e, aos poucos, consolidaram a ligação entre áreas até então espacialmente separadas, conformando o atual tecido urbano da cidade, alongado no sentido norte-sul, quase completamente conectado, como mostra figura 45. (LESSA, 1985).

Figura 45 – Mancha urbana de Juiz de Fora em 1990 (esquerda) e em 2011 (direita)



Fonte: Moura et al, 2013



Na década de 1950, confirmado o contingente populacional necessário, passa a operar em Juiz de Fora uma linha de trem urbano de passageiros no ramal entre Matias Barbosa, já um município autônomo, e Benfica. A linha urbana, mais conhecida como Trem Xangai, percorria um trecho de aproximadamente 36Km em via singela de calibre de 1600mm, contando com 7 estações e 4 paradas e chegou a transportar 1200 passageiros/dia. Com a desativação em 1996, devido à privatização da RFFSA, foi uma das únicas linhas de trens urbanos que não passou ao controle da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU porque, apesar da alta demanda, havia déficit operacional (LESSA, 1985).

Desde a desativação do Trem Xangai, o ramal RF3, operado pela concessionária MRS Logística S.A., transporta apenas cargas, sendo a maioria dos trens que passam pela cidade destinados à carga de produtos minerais extraídos no quadrilátero ferrífero na região central do estado de Minas Gerais, passando pela cidade descarregados.

Excetuando-se a arrecadação fiscal decorrente da presença da sede operacional da MRS Logística e do Centro de Controle Operacional – CCO na cidade de Juiz de Fora e o abastecimento de algumas unidades fabris no distrito industrial, atualmente, a passagem das composições pela cidade acarretam mais transtornos que benefícios.

A passagem sistemática das composições acarreta prejuízos à mobilidade devido ao fechamento de vias importantes da cidade, como as Ruas Benjamin Constant e Teresa Cristina e a Avenida dos Andradas, ligações entre o centro e as zonas leste e norte da cidade, respectivamente. Somados aos problemas de mobilidade, temos os elevados níveis de ruído conforme será demonstrado nas medições dos pontos de estudo apresentados a seguir, configurando a presença da linha férrea no núcleo urbano como excessivamente prejudicial, mantidas as características de operação atuais.

## **5.2. Ponto 1 – Área urbana com características industriais**

Os resultados das medições realizadas no ponto são apresentados na tabela 19, a seguir.

Tabela 19 - Resultados de medição para o Ponto 1

Ponto 1 – Área urbana com características industriais	
Coordenadas	21°41'49.87"S - 43°25'34.05"O
Distância Ferrovia-ponto	Aproximadamente 18 m
Velocidade do vento	0,8 m/s – NO-SE
Temperatura	26,7°C
Umidade relativa	53%
Horário inicial	14:35
Horário final	14:50
Passagem do trem	14:43– 14:46
L <sub>Aeq</sub> (5 minutos)	62,3 dB
L <sub>Aeq</sub> (10 minutos)	73,0 dB
L <sub>Aeq</sub> (15 minutos)	72,6 dB
L <sub>E</sub>	102,1 dB
L <sub>Amáx</sub>	96,0 dB
L <sub>Amín</sub>	51,3 dB

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir da análise da tabela 19 é possível perceber o aumento considerável do nível de pressão sonora equivalente entre 5 e 10 minutos, ocasionado pela passagem da composição. O valor de L<sub>Aeq</sub> 5 minutos, antes da passagem, atende à referência normativa do máximo de 70 dB (A) em período diurno para áreas de uso predominantemente industrial.

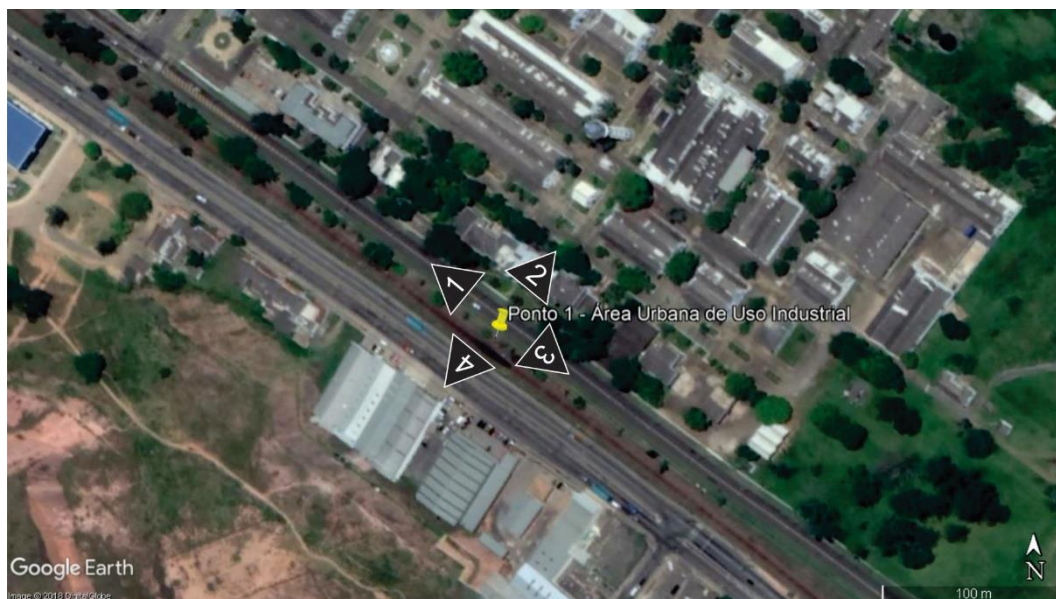
Durante a medição, foram observadas as seguintes questões:

- Trem em baixa velocidade, com vagões carregados de minério de ferro;
- Composição com 129 vagões e 3 locomotivas, sendo duas puxando a composição e uma empurrando;
- Trem buzinou devido a passagem em nível de pedestres próxima.

A baixa velocidade da composição, somada ao carregamento dos vagões, reduz a emissão de ruídos decorrentes das fontes de tração. O acionamento da buzina de alerta devido à passagem em nível corresponde ao nível L<sub>Amáx</sub> de 96,0 dB observado. O valor de L<sub>E</sub> corresponde ao nível de pressão sonora absoluto máximo medido, de 102,1 dB, também proveniente do acionamento da buzina de alerta da locomotiva.

A figura 46 apresenta a seguir a marcação das visadas do ponto de medição para apreensão das características ambientais da área.

Figura 46 – Marcação das visadas para o Ponto 1



Fonte: Adaptado de Google Earth

As imagens a seguir correspondem às visadas demarcadas na figura 46.

Figura 47 – Visadas do ponto 1



Fonte: Arquivo do Autor

Devido à proximidade entre o  $L_{Aeq}$  máximo medido aos 10 minutos, de 73 dB, em relação ao referencial normativo estabelecido pela NBR10151:2000 de 70 dB (A) em período diurno, definiu-se que, para esta área de medição, por tratar-se de uma área de

passagem, a inserção de dispositivos de atenuação sonora não traria grandes benefícios, sendo desconsiderada.

### 5.3. Ponto 2 – Área urbana com características rurais

A tabela 20 apresenta o valor de  $L_{Aeq}$  5 minutos elevado, devido à passagem da composição, com queda acentuada nos períodos seguintes (10 e 15 minutos). O valor referencial da NBR 10151:2000 para áreas rurais, durante o dia, é de 40 dB (A), entretanto, de forma a aproximar-se da realidade, será considerado o referencial para “área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas”, de 50 dB (A) diurnos, devido à presença do Colégio Militar nas proximidades do ponto de medição.

Tabela 20 - Resultados de medição para o ponto 2

Ponto de medição	
Coordenadas	21°42'8.96"S - 43°25'12.24"O
Distância Ferrovia-ponto	Aproximadamente 25 m
Velocidade do vento	0,3 m/s – NO-SE
Temperatura	27,1°C
Umidade relativa	53%
Horário inicial	13:46
Horário final	14:01
Passagem do trem	13:47 – 13:49
$L_{Aeq}$ (5 minutos)	72,9 dB
$L_{Aeq}$ (10 minutos)	66,5 dB
$L_{Aeq}$ (15 minutos)	65,8 dB
$L_E$	95,4dB
$L_{Amáx}$	87,7dB
$L_{Amín}$	40,5dB

Fonte: Elaborado pelo Autor

Durante a medição, foram observadas as seguintes questões:

- Trem em baixa velocidade, com vagões vazios;
- Composição com 130 vagões e 2 locomotivas;
- Trem não buzinou devido a inexistência de passagem em nível no trecho.

A baixa velocidade da composição favorece a redução da emissão de ruídos na fonte de tração, entretanto os vagões vazios aumentam a ressonância e a reverberação do ruído no interior dos vagões de carga, transformando-os em estruturas ressonantes, à semelhança de um sino. Uma vez que a buzina de alerta da locomotiva não foi acionada devido à inexistência da passagem em nível nas proximidades, é

possível verificar a redução do  $L_{Amáx}$  para 87,7 dB e do  $L_E$  para 95,4 dB em relação aos valores de medição obtidos no ponto 1.

A figura 48 apresenta a seguir a demarcação das visadas do ponto de medição, possibilitando a compreensão das características ambientais da área.

Figura 48 – Marcação das visadas para o Ponto 2



Fonte: Adaptado de Google Earth

As imagens a seguir correspondem às visadas demarcadas na figura 48.

Figura 49 – Visadas do ponto 2



Fonte: Arquivo do autor

Considerando o valor de referência do  $L_{Aeq}$  com o máximo de 50 dB (A) percebe-se que o valor de 72,9 dB (A), ocasionado pela passagem da composição, e dos períodos posteriores, estão muito além dos níveis de conforto normalizados, demandando a intervenção com dispositivos de atenuação de ruído ambiental.

#### 5.4. Ponto 3 – Área urbana de uso residencial

A tabela 21 apresenta o  $L_{Aeq}$  5 minutos bem elevado em relação ao medido nos períodos posteriores (10 e 15 minutos) devido à passagem da composição. O valor referencial delimitado na NBR 10151:2000 para áreas predominantemente residenciais, durante o dia, é de 55 dB (A).

Tabela 21 – Resultados de medição para o ponto 3

Ponto 3 – Área urbana de uso residencial	
Coordenadas	21°45'50.08"S - 43°20'17.66"O
Distância Ferrovia-ponto	Aproximadamente 12 m
Velocidade do vento	1,1 m/s – NO-SE
Temperatura	26,7°C
Umidade relativa	53%
Horário inicial	15:26
Horário final	15:41
Passagem do trem	15:28-15:31
$L_{Aeq}$ (5 minutos)	76,3 dB
$L_{Aeq}$ (10 minutos)	71,1 dB
$L_{Aeq}$ (15 minutos)	70,7 dB
$L_E$	101,2 dB
$L_{Amáx}$	96,2 dB
$L_{Amín}$	56,1 dB

Fonte: Elaborada pelo autor

O valor de  $L_{Amín}$ , de 56,1 dB, certamente obtido sem a presença da composição ferroviária, permite inferir que a operação da linha férrea é a principal responsável pelo nível excedente de ruído ambiental detectado.

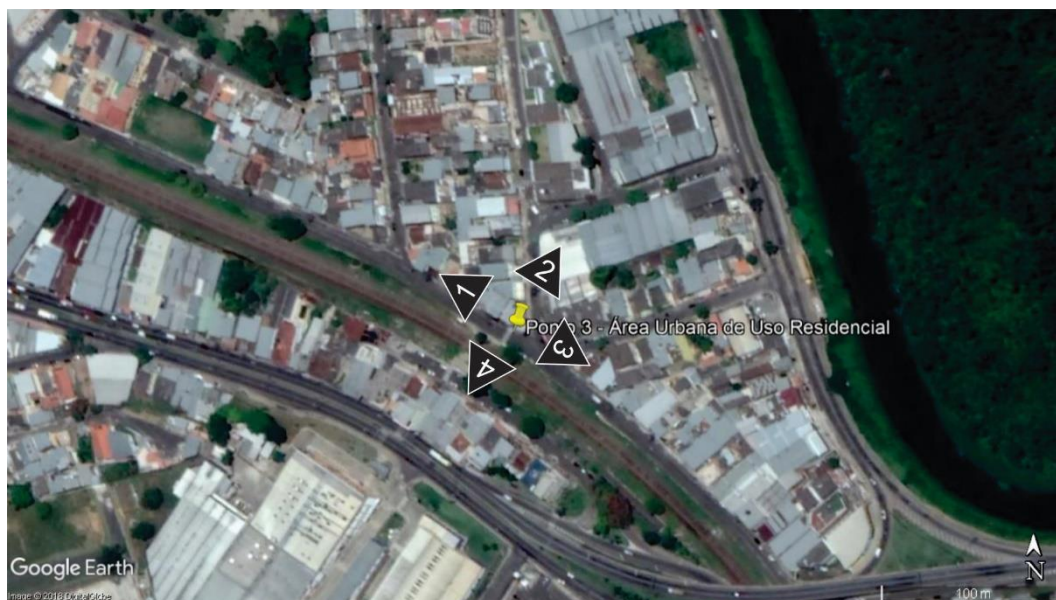
Durante a medição, foram observadas as seguintes questões:

- Trem em média velocidade, com vagões vazios;
- Composição com 131 vagões e 2 locomotivas;
- Trem buzinou devido à passagem em nível próxima.

A média velocidade do trem aumenta a produção de ruídos pela fonte de tração, enquanto os vagões vazios aumentam a ressonância do sistema e a reverberação

do ruído no interior dos vagões de carga, contribuindo para um nível de ruído equivalente maior que o observado no ponto 2. O acionamento do sinal de alerta sonoro da locomotiva responde pelo valor de  $L_E$  e  $L_{Amáx}$ .

Figura 50 – Marcação das visadas para o Ponto 3



Fonte: Adaptado de Google Earth

As imagens a seguir correspondem às visadas demarcadas na figura 50.

Figura 51 – Visadas do ponto 3



Fonte: Arquivo do autor

Considerando o valor de referência do  $L_{Aeq}$  com o máximo de 55 dB (A) percebe-se que o valor de 76,3 dB (A), ocasionado pela passagem da composição, e o

dos períodos posteriores, estão muito além dos níveis de conforto normalizados, demandando a intervenção com dispositivos de atenuação de ruído ambiental.

### 5.5. Ponto 4 – Área urbana de uso misto

Os resultados das medições relativas ao ponto de medição 4 são apresentadas a seguir na tabela 22.

Tabela 22 – Resultados de medição para o ponto 4

Ponto 4 – Área urbana de uso misto	
Coordenadas	21°45'50.69"S - 43°20'16.93"O
Distância Ferrovia-ponto	Aproximadamente 24 m
Velocidade do vento	1,2 m/s – NO-SE
Temperatura	25,7°C
Umidade relativa	60%
Horário inicial	16:17
Horário final	16:32
Passagem do trem	16:17– 16:19
L <sub>Aeq</sub> (5 minutos)	74,5 dB
L <sub>Aeq</sub> (10 minutos)	72,1 dB
L <sub>Aeq</sub> (15 minutos)	70,9 dB
L <sub>E</sub>	97,9 dB
L <sub>Amáx</sub>	92,2 dB
L <sub>Amín</sub>	59,1 dB

Fonte: Elaborada pelo autor

A medição no ponto 4 foi iniciada assim que o sinal luminoso que indica a proximidade da composição ficou verde, razão pela qual a medição se inicia no mesmo momento da passagem. Devido às características ambientais predominantes no entorno imediato do ponto de medição, será adotado o valor de referência para “área mista com vocação comercial e administrativa”, de 60 dB (A) para o período diurno.

Durante a medição, foram observadas as seguintes questões:

- Trem em média velocidade, com vagões vazios;
- Composição com 136 vagões e 2 locomotivas;
- Trem buzinou devido à passagem em nível próxima;
- Tráfego rodoviário intenso nas proximidades.

O valor do L<sub>AEQ</sub> 5 minutos, que compreende o período de passagem da composição, é superior ao preconizado pela norma, bem como as medidas dos períodos posteriores (10 e 15 minutos). O acionamento do sinal de alerta sonoro da locomotiva e



dos alertas da passagem em nível, de carros e pedestres, responde pelo valor de  $L_E$  e  $L_{Amáx}$ .

Figura 52 – Marcação das visadas para o Ponto 4



Fonte: Adaptado de Google Earth

As imagens a seguir correspondem às visadas demarcadas na figura 52.

Figura 53 – Visadas do ponto 4



Fonte: Arquivo do autor (1,2 e 3); Google Street View (4)

Considerando o valor de referência do  $L_{AEQ}$  com o máximo de 60 dB percebe-se que o valor de 74,5 dB, ocasionado pela passagem da composição, e o dos períodos

posteriores, estão muito além dos níveis de conforto normalizados, demandando a intervenção com dispositivos de atenuação de ruído ambiental.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização das medições e sistematização dos dados obtidos, este capítulo apresentará a análise dos resultados de forma geral. Os valores de nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ) encontrados em algumas medições são muito superiores aos definidos pela NBR10151:2000 (tabela 9) para manutenção dos níveis de conforto, demonstrando a necessidade de intervenção para garantia dos padrões acústicos mínimos de conforto.

Em todas as medições realizadas os parâmetros umidade relativa do ar e temperatura estavam compreendidos no intervalo definido pelo fabricante para operação do sonômetro. As medições de velocidade e direção do vento foram desconsideradas como fator de interferência na propagação sonora, uma vez que os valores de velocidade do vento encontrados foram relativamente baixos, não interferindo de forma significativa na propagação das ondas sonoras.

Três das composições ferroviárias tinham estrutura semelhante, com duas locomotivas e aproximadamente 130 vagões vazios. A quarta contava com duas locomotivas na parte frontal, uma na parte posterior da composição e 129 vagões carregados com minério. As locomotivas eram, provavelmente, da marca GE, modelo GE AC44i, a mais numerosas na frota da operadora do sistema, que geralmente é utilizada nas composições de transporte de minério (MRS, 2016).

Em alguns casos, a diferença entre os valores de nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ) realizados aos 5, 10 e 15 minutos é superior a 0,5 dB (A). Seguindo-se à metodologia, essas medições deveriam ser descartadas, entretanto, essa diferença ocorre devido à grande disparidade entre o  $L_{máx}$  e  $L_{mín}$  provocada pela passagem da composição. Neste caso, devido à particularidade do ambiente acústico avaliado, as diferenças serão sempre superiores no período de passagem da composição em relação ao imediatamente posterior, não ensejando o descarte da medição.

Para determinação da geometria das fontes sonoras como propõem Nilson, Bengtsson e Klaboe (2015) foram utilizadas como referência as dimensões da locomotiva GE AC44i, a mais numerosa na frota da MRS (235 locomotivas), além de terem como função a tração dos comboios de transporte de minério de ferro, o que as fazem as

potenciais locomotivas que trafegam por Juiz de Fora (MRS, 2016). As alturas de fonte encontradas foram similares às propostas pelos autores na figura 23.

A redução do ruído proporcionada pela inserção dos elementos foi estimada de acordo com os parâmetros fornecidos nas referências teóricas deste trabalho, enquanto a perda por inserção da barreira acústica implantada no trecho da passagem em nível foi efetivamente calculada através do método apresentado na NBR 14.313. Para o cálculo do número de Fresnel (equação 12), foram utilizadas as frequências sugeridas pela NBR 16425-1:2016.

Na definição dos níveis de ruído equivalente ( $L_{AEQ}$ ) utilizados para o cálculo da perda por inserção de cada tipo de barreira, foi observado o seguinte: a) nas barreiras de trilho, utilizou-se o ruído equivalente encontrado antes da passagem da locomotiva, considerado o representante mais próximo dos parâmetros acústicos devido à influência dos ruídos de natureza de tração; b) nas barreiras de divisa, utilizou-se o ruído equivalente observado imediatamente após a passagem da locomotiva, considerado o representante mais próximo dos parâmetros acústicos devido à influência dos ruídos de natureza de natureza de propulsão.

Como premissa das proposições, tem-se a implantação do mínimo possível de barreiras visuais e físicas de maior escala, uma vez que a própria linha férrea já constitui uma barreira física no tecido urbano. Deseja-se ainda a utilização conjunta de elementos técnicos convencionais e elementos não usuais, aumentando a variabilidade de elementos ambientais.

As proposições levam em conta, também, as instruções normativas do DNIT para implantação de barreiras acústicas para redução de ruído de tráfego, bem como indicações da FRA, órgão norte-americano de fiscalização de ferrovias, nos requisitos de implantação. Devido à observância dessas instruções, as barreiras de maior dimensão são implantadas sempre na divisa entre a faixa de domínio federal e as áreas municipais, já que não se considera adequada a utilização da faixa para implantação de elementos de grandes dimensões.

De maneira geral, propõe-se a instalação de barreira de trilho executada em concreto, com aplicação nas faces interiores de material com alto coeficiente de absorção

nas frequências de faixa 100 a 500 Hz. A implantação das barreiras de trilho deve ser observada em todo o ramal, uma vez que os ruídos de tração estão presentes durante a todo o tempo de passagem da composição, enquanto os ruídos de propulsão apenas na passagem da locomotiva.

A utilização das barreiras de trilho em concreto visa manter a permeabilidade visual uma vez que, por sua altura reduzida, de 65cm, não configuram elemento de interrupção dos ângulos visuais ao mesmo tempo em que reduzem, próxima à fonte, a propagação dos ruídos de tração. Em todos os casos, foram realizadas as análises também para a situação de implantação apenas das barreiras de trilho, que abrange a proposta para a maior parte do trecho urbano.

Com relação aos ruídos de propulsão, a redução na fonte depende do projeto de locomotivas com melhor desempenho acústico nos sistemas e arrefecimento e motor. As ações possíveis nesta proposição, sem que se tenha uma alta barreira ao longo de todo o ramal, se apresentam no sentido de tratar o ruído dos dispositivos de alerta (buzina da locomotiva e sinal da passagem em nível) próximo à passagem em nível através da implantação de barreiras mais altas. No restante do ramal o ruído de propulsão será tratado como ruído intermitente e sua presença será considerada parte do ambiente sonoro destes espaços.

Para o tratamento pontual desse tipo de ruído, propõe-se a implantação de espécies vegetais arbóreas e arbustivas de alta densidade foliar ao longo das divisas, juntamente com barreiras acústicas de policarbonato cristal transparente – em alguns casos – com estrutura metálica perfilada sob base de concreto e borda superior com ressoadores para evitar os efeitos da difração da onda sonora na borda. As barreiras de policarbonato são propostas apenas nos locais próximos às passagens em nível, visando à atenuação do ruído provocado pela buzina.

A extensão dessas barreiras segue as determinações da ANTT para o acionamento de buzinas de alerta pelos maquinistas, que deve ocorrer entre 15 e 20 segundos antes da composição ocupar a passagem em nível, a uma velocidade máxima de 25 km/h, no caso das passagens em nível e de 50 km/h em perímetro urbano. Fazendo-se as conversões, para a situação de velocidade a 25 km/h e acionamento a 20 segundos da passagem em nível, a barreira deve ter aproximadamente 138 metros de

extensão. As barreiras de divisa serão padronizadas, então, com início de implantação a 140 metros da passagem em nível.

No caso de passagens em nível consecutivas com distância inferior a 250 metros entre cada uma, deve-se realizar um acionamento longo antes da primeira e acionamentos curtos antes das seguintes. Nesse caso, as barreiras de divisas serão estendidas de forma a cobrir todo o percurso entre as passagens em nível. Durante toda a extensão da ferrovia, pretende-se utilizar o lastro em pedra britada e a vegetação rasteira e arbustiva como um elemento de absorção sonora.

Para a realização dos cortes esquemáticos apresentados nas proposições foi utilizado o levantamento cadastral da cidade de Juiz de Fora realizado no ano de 2007, fornecido pela Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, seguindo-se o parcelamento e as curvas de nível apresentadas nos arquivos, que retratam de forma satisfatória a realidade física dos pontos de medição escolhidos para uma análise abrangente.

### **6.1. Proposta de intervenção ponto 1**

A área tem ocupação predominantemente industrial, com edificações de até três pavimentos e galpões, de padrão construtivo regular a bom. Para o ponto de medição 1 propõe-se a adequação com o mínimo possível de modificações ao longo da faixa de domínio. Devido às características ambientais do ponto – ocupado em sua maioria por edificações industriais e galpões – optou-se por manter algumas das estruturas já existentes na divisa com a área de domínio da ferrovia.

A manutenção dos muros em alvenaria existentes e sua adequação visam, principalmente, dois fatores: a) redução da geração de resíduos sólidos na implantação do sistema de redução de ruídos e b) redução dos custos de implantação do sistema através do reaproveitamento de estruturas previamente existentes quando possível.

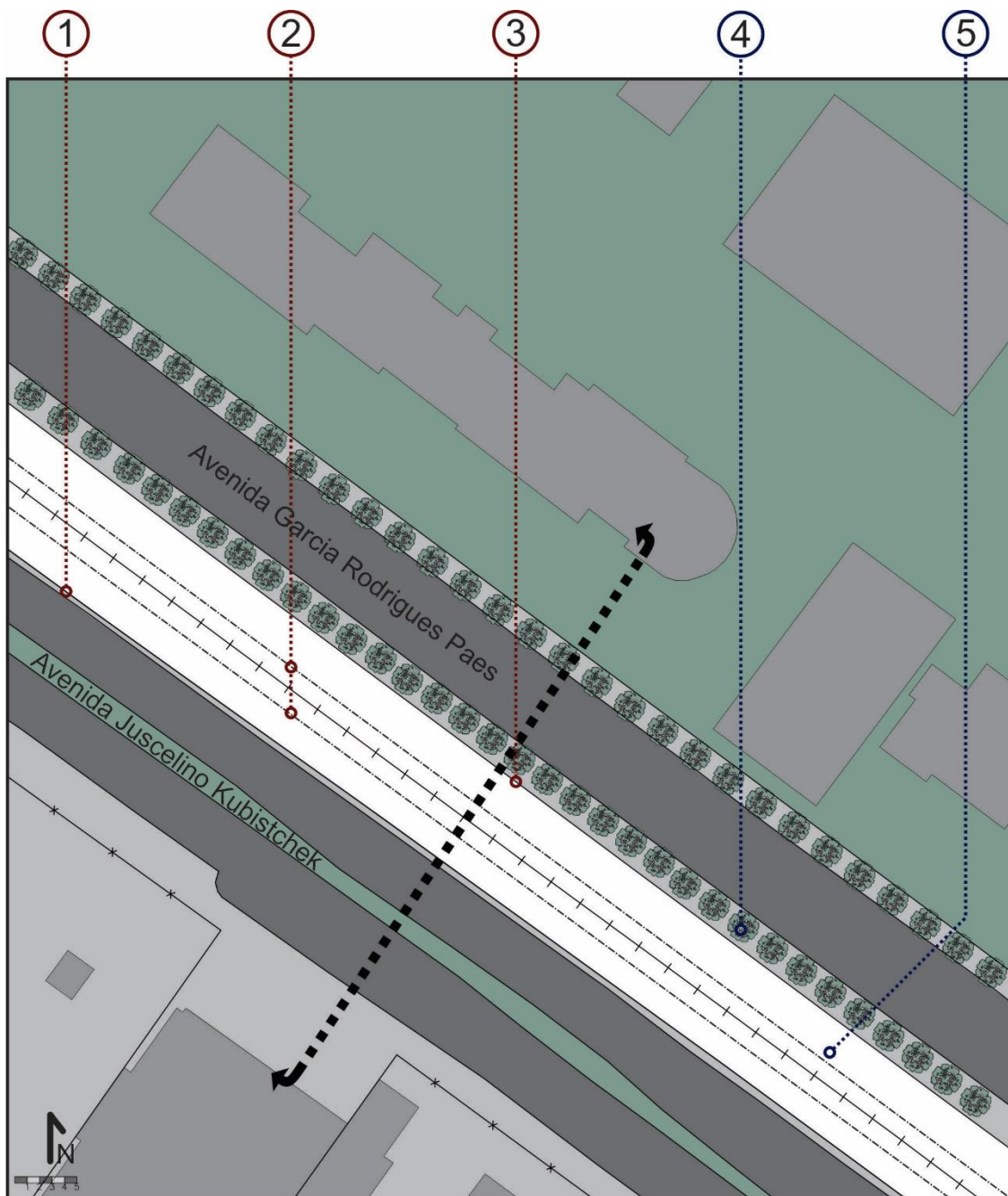
Na divisa entre a faixa de domínio avenida Juscelino Kubistchek, que se encontra em cota elevada em relação à via férrea, propõe-se a manutenção da mureta divisória em concreto com adição de barreira em policarbonato cristal transparente e

estrutura metálica perfilada, também com ressoadores na borda, como pode ser observado nas figuras a seguir.

Na divisa entre a faixa de domínio e a avenida Garcia Rodrigues Paes, que se encontra em cota menor em relação à via férrea, propõe-se a manutenção e aumento da altura dos muros em alvenaria de blocos cerâmicos já existentes, com a implantação de ressoadores na borda superior, aumentando a eficiência da barreira e reduzindo os efeitos indesejados da difração na borda.

As barreiras vegetais foram implantadas ao longo das calçadas da avenida Garcia Rodrigues Paes e, ao mesmo tempo em que cumprem a função de redução integrada dos níveis de ruído, se apresentam como elementos de melhoria ambiental, proporcionando sombra aos passantes bem como contribuindo enquanto elemento natural no ambiente urbano. As intervenções propostas são apresentadas nas figuras 54 a 56.

Figura 54 - Mapa de intervenções no ponto 1



## Elementos convencionais

- ① Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica sobre base de concreto e ressoador na borda superior;
- ② Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa;

- ③ Barreira Acústica em alvenaria chapiscada, com implantação de ressoador na borda superior.

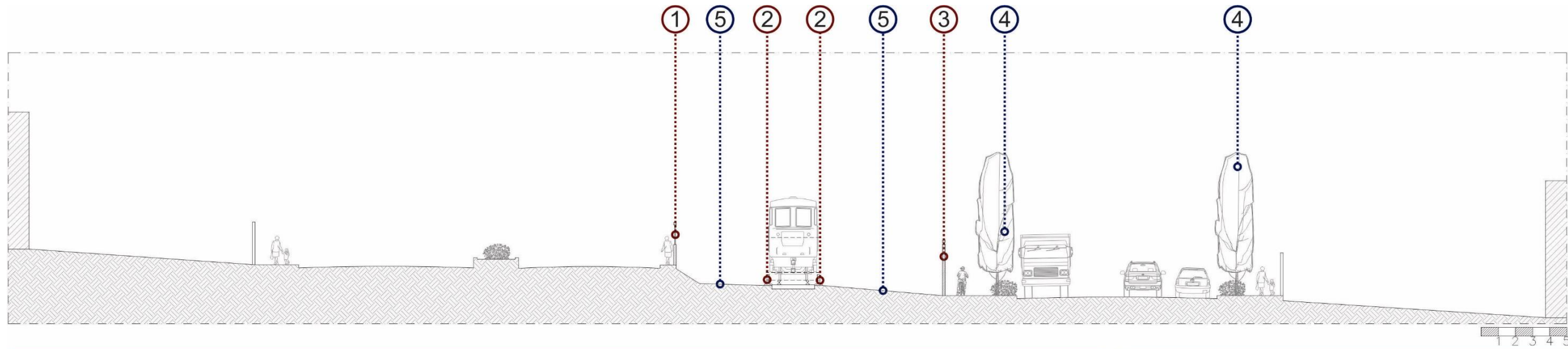
## Elementos não convencionais

- ④ Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar;
- ⑤ Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira.

Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 55 - Corte esquemático intervenção ponto 1



Elementos convencionais

① Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica sobre base de concreto e ressoador na borda superior;

② Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa;

③ Barreira Acústica em alvenaria chapiscada, com implantação de ressoador na borda superior.

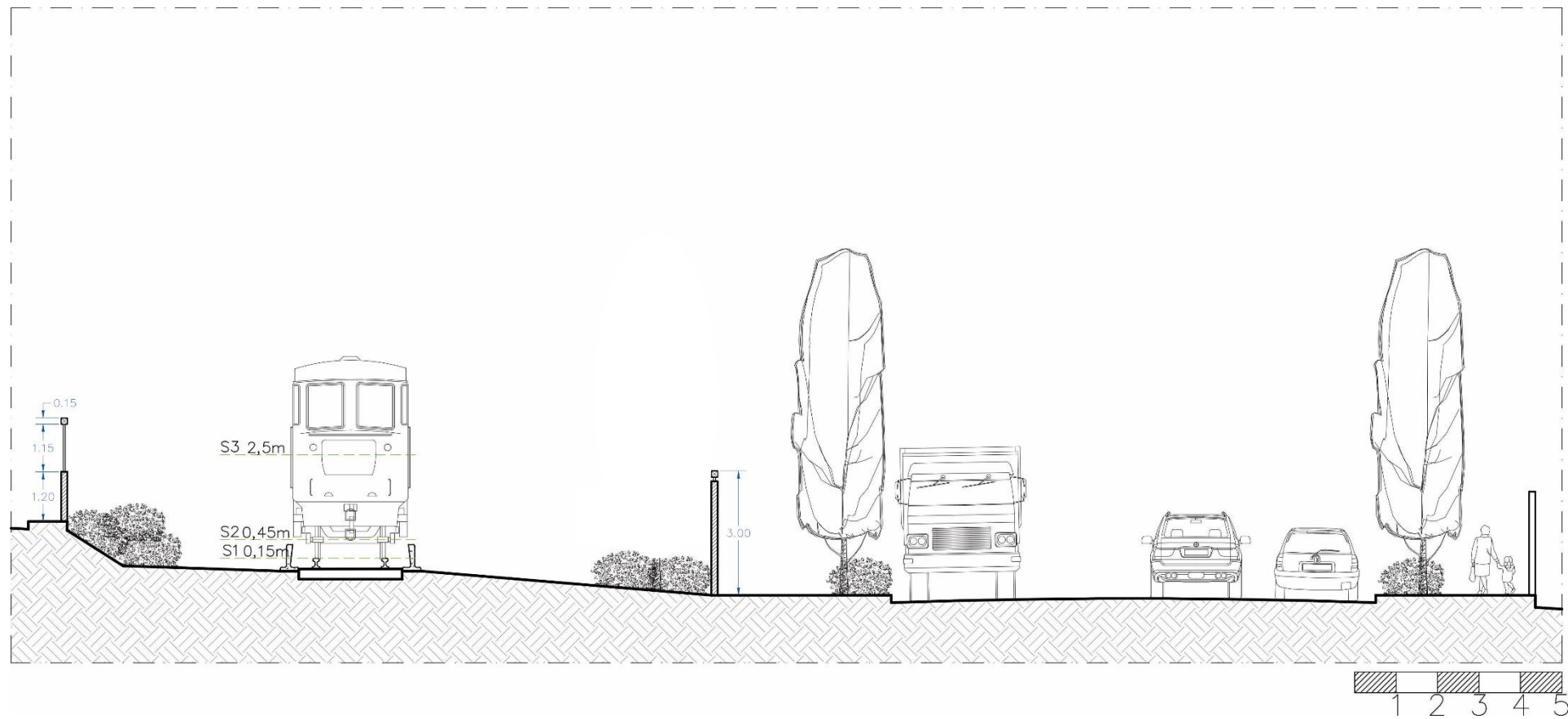
Elementos não convencionais

④ Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar;

⑤ Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira.

Fonte: Elaborada pelo autor

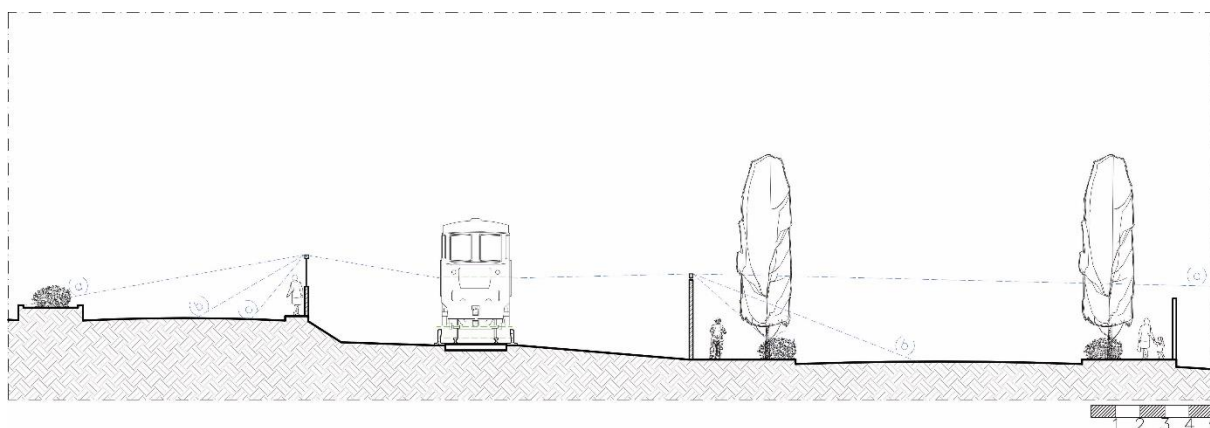
Figura 56 - Ampliação área de intervenção ponto 1



Fonte: Elaborada pelo autor

A implantação das barreiras propostas gera uma área de sombra acústica que varia de acordo com a frequência do ruído que se pretende barrar. Para os ruídos de alta (a) e média frequência (b), predominantes no espectro sonoro do ruído ferroviário, a barreira mostra-se mais eficiente que para os ruídos de baixa frequência (c), como pode ser observado na figura 57.

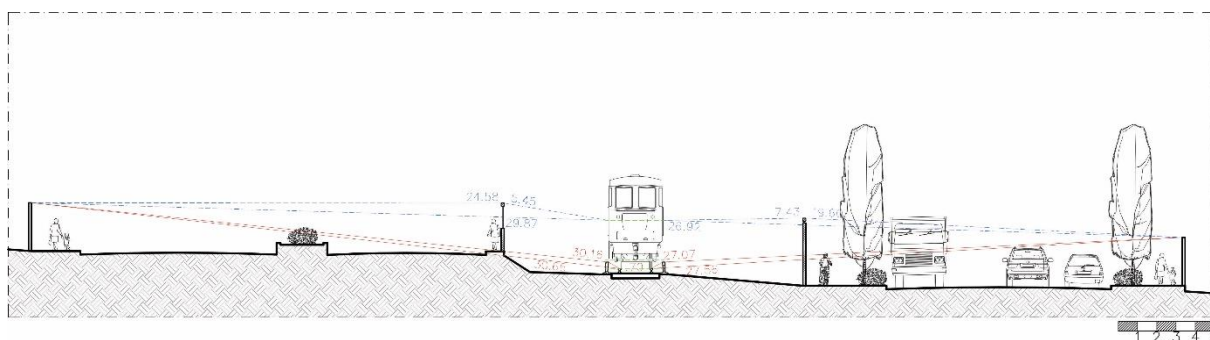
Figura 57 - Sombra acústica no ponto 1



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 58 apresenta as distâncias consideradas para o cálculo do número de Fresnel (N), sistematizado na tabela 23, que apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação (perda por inserção) das barreiras de trilho, enquanto a tabela 24 traz a redução verificada para as barreiras. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 2,50m.

Figura 58 - Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 1



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 23 - Número de Fresnel para o ponto 1 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,2	0,21	0,06	0,06
63	5,40	0,2	0,21	0,07	0,08
80	4,25	0,2	0,21	0,09	0,10
100	3,40	0,2	0,21	0,12	0,12
125	2,72	0,2	0,21	0,15	0,15
160	2,13	0,2	0,21	0,19	0,20
200	1,70	0,2	0,21	0,24	0,25
250	1,36	0,2	0,21	0,29	0,31
315	1,08	0,2	0,21	0,37	0,39
400	0,85	0,2	0,21	0,47	0,49
500	0,68	0,2	0,21	0,59	0,62
630	0,54	0,2	0,21	0,74	0,78
800	0,43	0,2	0,21	0,94	0,99
1000	0,34	0,2	0,21	1,18	1,24
1250	0,27	0,2	0,21	1,47	1,54
1600	0,21	0,2	0,21	1,88	1,98
2000	0,17	0,2	0,21	2,35	2,47
2500	0,14	0,2	0,21	2,94	3,09
3150	0,11	0,2	0,21	3,71	3,89
4000	0,09	0,2	0,21	4,71	4,94
5000	0,07	0,2	0,21	5,88	6,18
6300	0,05	0,2	0,21	7,41	7,78
8000	0,04	0,2	0,21	9,41	9,88
10000	0,03	0,2	0,21	11,76	12,35

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 24 - Perda por inserção para o ponto 1 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	0,71	0,92	61,59	61,38	57,51	57,36
63	1,71	1,92	60,59	60,38	56,81	56,66
80	2,75	2,96	59,55	59,34	56,11	55,97
100	3,72	3,93	58,58	58,37	55,47	55,34
125	4,69	4,90	57,61	57,40	54,86	54,72
160	5,76	5,97	56,54	56,33	54,20	54,07
200	6,73	6,94	55,57	55,36	53,62	53,50
250	7,70	7,91	54,60	54,39	53,06	52,94

315	8,70	8,91	53,60	53,39	52,50	52,39
400	9,74	9,95	52,56	52,35	51,95	51,84
500	10,71	10,92	51,59	51,38	51,45	51,34
630	11,71	11,92	50,59	50,38	50,95	50,85
800	12,75	12,96	49,55	49,34	50,46	50,36
1000	13,72	13,93	48,58	48,37	50,02	49,92
1250	14,69	14,90	47,61	47,40	49,59	49,50
1600	15,76	15,97	46,54	46,33	49,15	49,06
2000	16,73	16,94	45,57	45,36	48,76	48,68
2500	17,70	17,91	44,60	44,39	48,40	48,32
3150	18,70	18,91	43,60	43,39	48,04	47,97
4000	19,74	19,95	42,56	42,35	47,69	47,63
5000	20,71	20,92	41,59	41,38	47,39	47,32
6300	21,71	21,92	40,59	40,38	47,09	47,03
8000	22,75	22,96	39,55	39,34	46,81	46,75
10000	23,72	23,93	38,58	38,37	46,56	46,51

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando que a NBR 10.151:2000 preconiza que para áreas predominantemente industriais os níveis de ruído equivalente devem estar compreendidos abaixo de 70 dB no período diurno e de 60 dB no período noturno, é possível afirmar que a implantação das barreiras de trilho soluciona o problema do ruído ferroviário de tração, mesmo se considerado o valor noturno, mais restritivo. Mesmo para as baixas frequências, com ondas de difícil contenção, as barreiras de trilhos demonstram-se eficientes.

A tabela 25 apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação (perda por inserção) das barreiras de divisa, enquanto a tabela 26 traz a redução verificada para as barreiras. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 2,50m.

Tabela 25 - Número de Fresnel para o ponto 1 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,16	0,11	0,05	0,03
63	5,40	0,16	0,11	0,06	0,04
80	4,25	0,16	0,11	0,08	0,05

100	3,40	0,16	0,11	0,09	0,06
125	2,72	0,16	0,11	0,12	0,08
160	2,13	0,16	0,11	0,15	0,10
200	1,70	0,16	0,11	0,19	0,13
250	1,36	0,16	0,11	0,24	0,16
315	1,08	0,16	0,11	0,30	0,20
400	0,85	0,16	0,11	0,38	0,26
500	0,68	0,16	0,11	0,47	0,32
630	0,54	0,16	0,11	0,59	0,41
800	0,43	0,16	0,11	0,75	0,52
1000	0,34	0,16	0,11	0,94	0,65
1250	0,27	0,16	0,11	1,18	0,81
1600	0,21	0,16	0,11	1,51	1,04
2000	0,17	0,16	0,11	1,88	1,29
2500	0,14	0,16	0,11	2,35	1,62
3150	0,11	0,16	0,11	2,96	2,04
4000	0,09	0,16	0,11	3,76	2,59
5000	0,07	0,16	0,11	4,71	3,24
6300	0,05	0,16	0,11	5,93	4,08
8000	0,04	0,16	0,11	7,53	5,18
10000	0,03	0,16	0,11	9,41	6,47

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 26 - Perda por inserção para o ponto 1 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	0,26	1,89	72,74	71,11	66,61	65,13
63	0,74	0,89	72,26	72,11	66,17	66,04
80	1,78	0,15	71,22	72,85	65,23	66,72
100	2,75	1,12	70,25	71,88	64,37	65,83
125	3,72	2,09	69,28	70,91	63,53	64,95
160	4,79	3,16	68,21	69,84	62,62	64,01
200	5,76	4,13	67,24	68,87	61,81	63,17
250	6,73	5,10	66,27	67,90	61,03	62,36
315	7,73	6,10	65,27	66,90	60,24	61,53
400	8,77	7,14	64,23	65,86	59,44	60,70
500	9,74	8,11	63,26	64,89	58,71	59,94
630	10,74	9,11	62,26	63,89	57,98	59,18
800	11,78	10,15	61,22	62,85	57,25	58,41
1000	12,75	11,12	60,25	61,88	56,58	57,71

1250	13,72	12,09	59,28	60,91	55,93	57,03
1600	14,79	13,16	58,21	59,84	55,23	56,30
2000	15,76	14,13	57,24	58,87	54,62	55,66
2500	16,73	15,10	56,27	57,90	54,03	55,04
3150	17,73	16,10	55,27	56,90	53,44	54,41
4000	18,77	17,14	54,23	55,86	52,85	53,79
5000	19,74	18,11	53,26	54,89	52,32	53,22
6300	20,74	19,11	52,26	53,89	51,79	52,66
8000	21,78	20,15	51,22	52,85	51,26	52,10
10000	22,75	21,12	50,25	51,88	50,79	51,59

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando que a NBR 10.151:2000 preconiza que para áreas predominantemente industriais os níveis de ruído equivalente devem estar compreendidos abaixo de 70 dB no período diurno e de 60 dB no período noturno, é possível afirmar que a implantação das barreiras de divisa soluciona o problema do ruído ferroviário de propulsão considerado o nível diurno em todas as frequências e noturno nas frequências superiores a 500 Hz.

## 6.2. Proposta de intervenção ponto 2

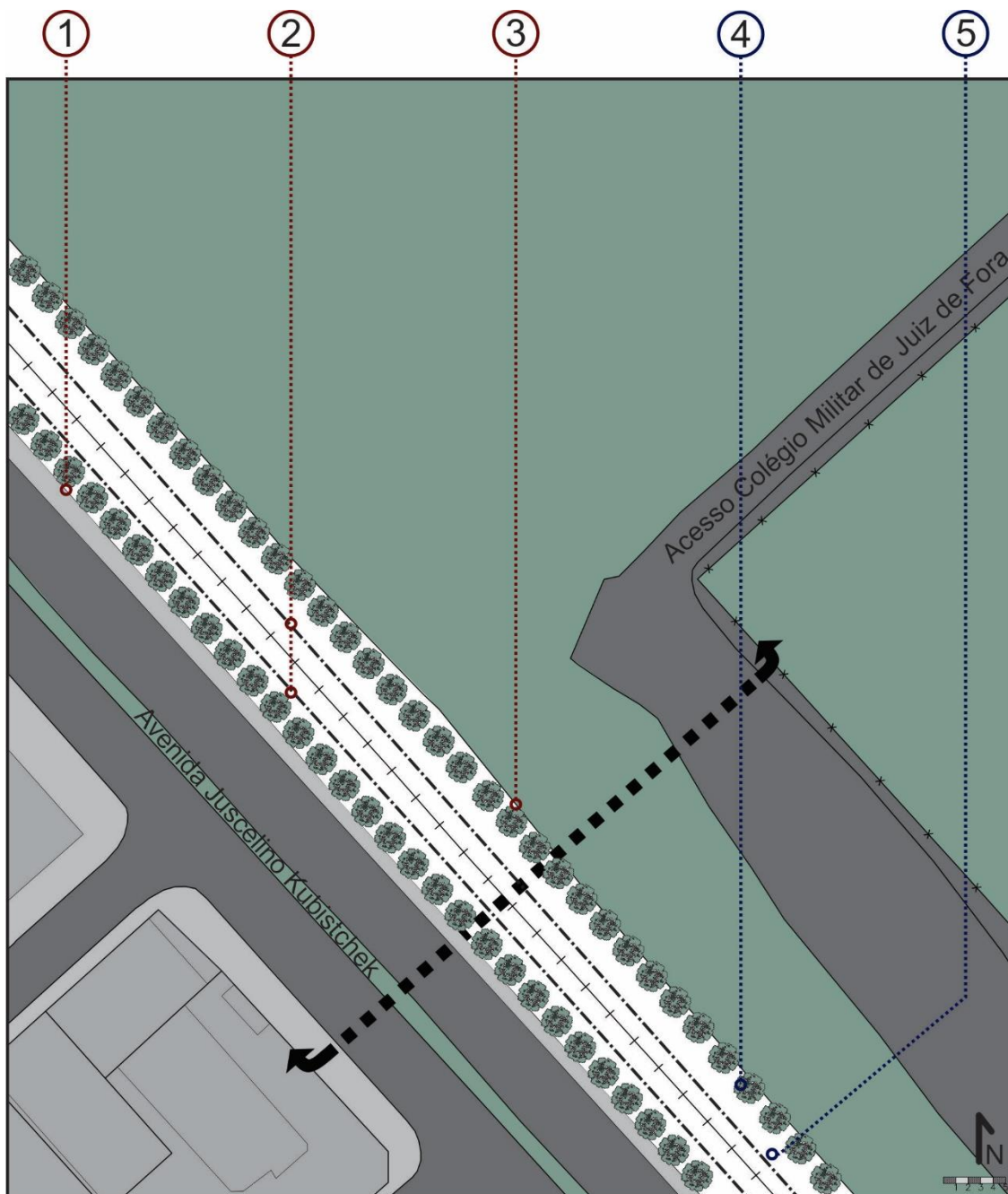
A área, embora urbana, apresenta ocupação semelhante à rural, com edificações baixas de até dois pavimentos muito espaçadas em sua porção nordeste, de padrão construtivo bom, e conta com muitas áreas vazias cobertas por vegetação rasteira e arbustiva, com topografia suave. Devido às características ambientais da área, optou-se por manter algumas das estruturas já existentes na divisa com a área de domínio da ferrovia.

A manutenção dos muros em alvenaria existentes e sua adequação visam, principalmente, dois fatores: a) redução da geração de resíduos sólidos na implantação do sistema de redução de ruídos e b) redução dos custos de implantação do sistema através do reaproveitamento de estruturas previamente existentes quando possível. As medições realizadas apontaram que, durante boa parte do tempo, os níveis de ruído equivalente são toleráveis, razão pela qual as propostas para a área são mais modestas.

Na divisa entre a faixa de domínio e avenida Juscelino Kubistchek, que se encontra em cota elevada em relação à via férrea, propõe-se a manutenção da mureta divisória em concreto com adição de barreira em policarbonato cristal transparente e estrutura metálica perfilada, com ressoadores na borda superior, aumentando a eficiência da barreira e reduzindo os efeitos indesejados da difração na borda.

Na divisa entre a faixa de domínio e o acesso ao Colégio Militar de Juiz de Fora, que se encontra em cota menor em relação à via férrea, propõe-se a manutenção e aumento da altura dos muros em alvenaria de blocos cerâmicos já existentes, também com ressoadores na borda superior. Propõe-se ainda a implantação de espécies vegetais arbóreas e arbustivas de alta densidade foliar ao longo de ambas as divisas como elemento de melhoria visual e ambiental. As proposições podem ser observadas nas figuras de 59 a 61.

Figura 59 - Mapa de intervenções no ponto 2



## Elementos convencionais

- ① Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica sobre base de concreto e ressoador na borda superior;
- ② Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa;

- ③ Barreira Acústica em alvenaria chapiscada, com implantação de ressoador na borda superior.

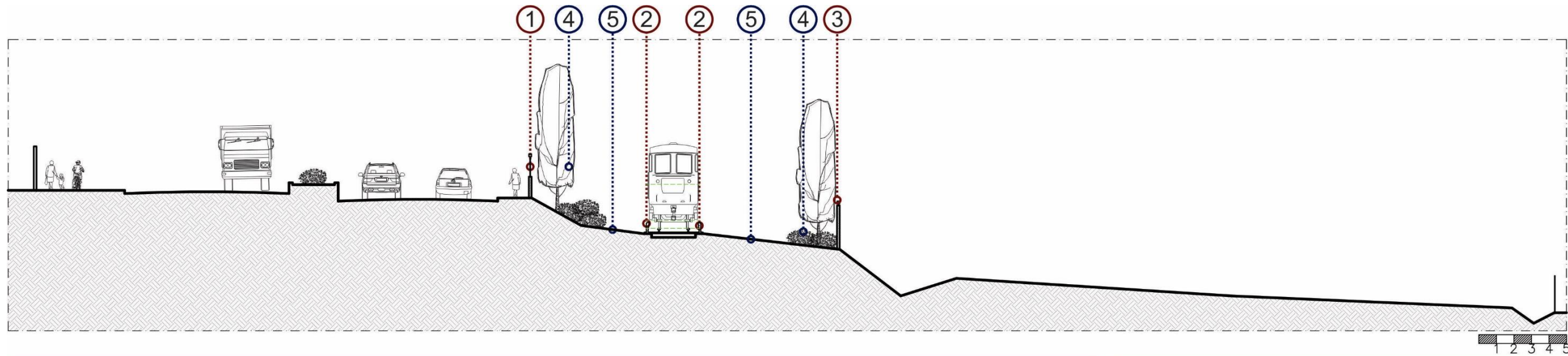
## Elementos não convencionais

- ④ Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar;
- ⑤ Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira.

Fonte: Elaborada pelo autor



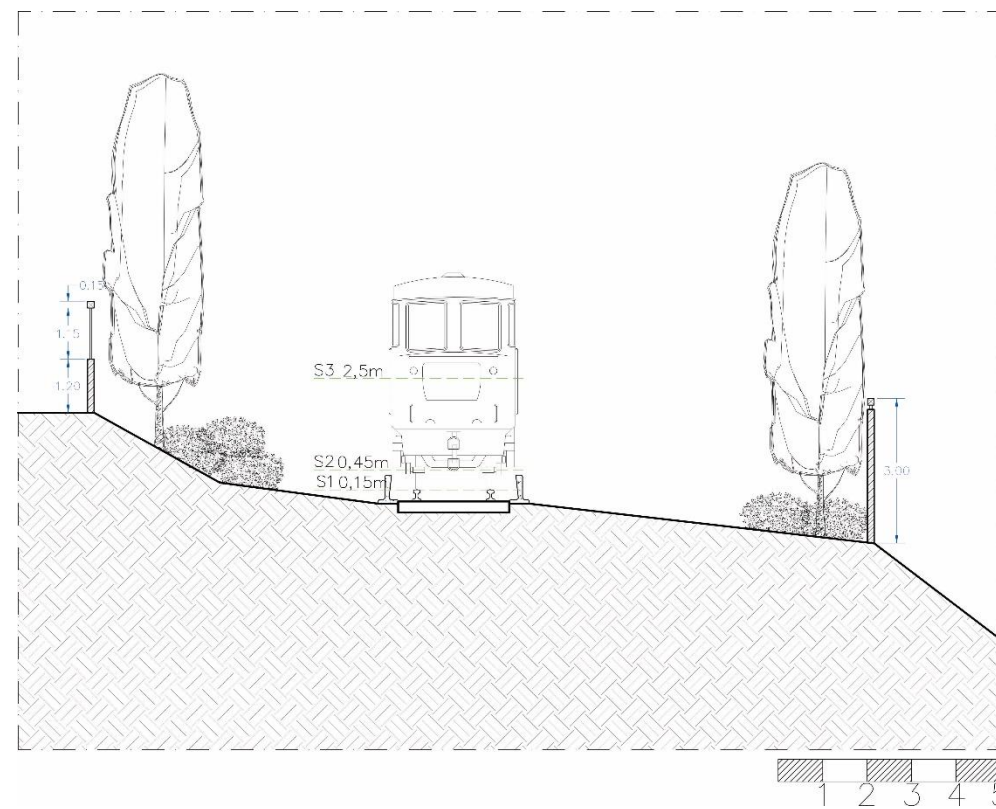
Figura 60 - Corte esquemático intervenção ponto 2



- | Elementos convencionais |   |   | Elementos não convencionais   |   |  |   |  |   |  |
|-------------------------|---|---|---|---|--|---|--|---|--|
| ①                       | Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica sobre base de concreto e ressoador na borda superior; | ② | Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa; | ③ | Barreira Acústica em alvenaria chapiscada, com implantação de ressoador na borda superior. | ④ | Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar; | ⑤ | Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira. |

Fonte: Elaborada pelo autor

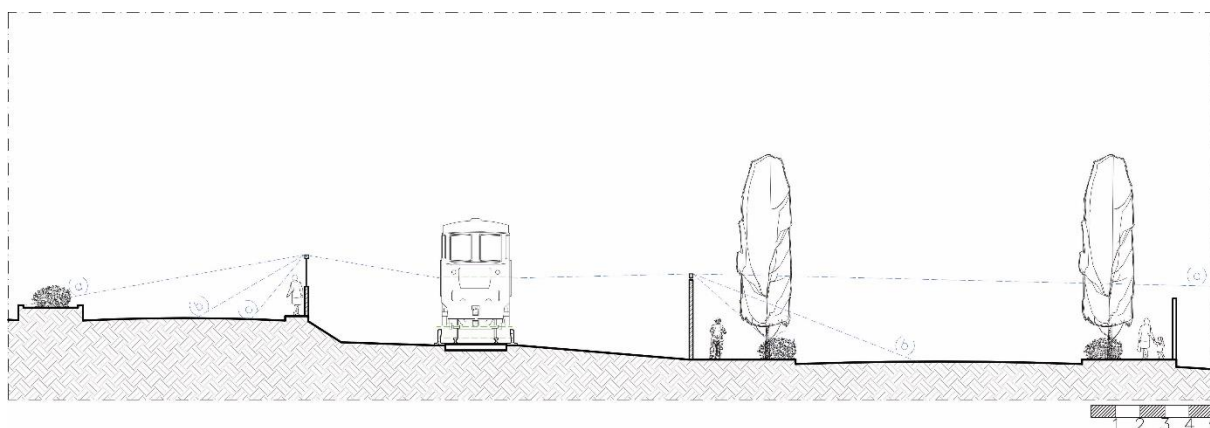
Figura 61 - Ampliação faixa de domínio ponto 2



Fonte: Elaborada pelo autor

A implantação das barreiras propostas gera uma área de sombra acústica que varia de acordo com a frequência do ruído que se pretende barrar. Para os ruídos de alta (a) e média frequência (b), predominantes no espectro sonoro do ruído ferroviário, a barreira mostra-se mais eficiente que para os ruídos de baixa frequência (c), como pode ser observado na figura 62.

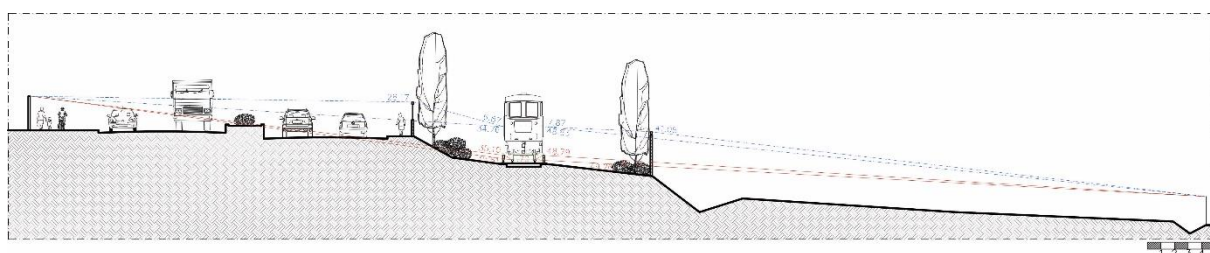
Figura 62 - Sombra acústica no ponto 2



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 63 apresenta as distâncias consideradas para o cálculo do número de Fresnel ( $N$ ), sistematizado na tabela 27, que apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação (perda por inserção) da barreira de trilho, enquanto a tabela 28 traz a redução verificada. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 2,50m.

Figura 63 - Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 2



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 27 - Número de Fresnel para o ponto 2 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,19	0,23	0,06	0,07
63	5,40	0,19	0,23	0,07	0,09
80	4,25	0,19	0,23	0,09	0,11
100	3,40	0,19	0,23	0,11	0,14
125	2,72	0,19	0,23	0,14	0,17
160	2,13	0,19	0,23	0,18	0,22
200	1,70	0,19	0,23	0,22	0,27
250	1,36	0,19	0,23	0,28	0,34
315	1,08	0,19	0,23	0,35	0,43
400	0,85	0,19	0,23	0,45	0,54
500	0,68	0,19	0,23	0,56	0,68
630	0,54	0,19	0,23	0,70	0,85
800	0,43	0,19	0,23	0,89	1,08
1000	0,34	0,19	0,23	1,12	1,35
1250	0,27	0,19	0,23	1,40	1,69
1600	0,21	0,19	0,23	1,79	2,16
2000	0,17	0,19	0,23	2,24	2,71
2500	0,14	0,19	0,23	2,79	3,38
3150	0,11	0,19	0,23	3,52	4,26
4000	0,09	0,19	0,23	4,47	5,41
5000	0,07	0,19	0,23	5,59	6,76
6300	0,05	0,19	0,23	7,04	8,52
8000	0,04	0,19	0,23	8,94	10,82
10000	0,03	0,19	0,23	11,18	13,53

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 28 - Perda por inserção para o ponto 2 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	0,48	1,31	65,32	64,49	59,07	58,25
63	1,49	2,32	64,31	63,48	58,08	57,27
80	2,52	3,35	63,28	62,45	57,08	56,29
100	3,49	4,32	62,31	61,48	56,16	55,39
125	4,46	5,29	61,34	60,51	55,26	54,51
160	5,53	6,36	60,27	59,44	54,29	53,55
200	6,50	7,33	59,30	58,47	53,43	52,71
250	7,47	8,30	58,33	57,50	52,59	51,89

315	8,48	9,31	57,32	56,49	51,74	51,05
400	9,51	10,34	56,29	55,46	50,89	50,22
500	10,48	11,31	55,32	54,49	50,10	49,45
630	11,49	12,32	54,31	53,48	49,31	48,68
800	12,52	13,35	53,28	52,45	48,52	47,90
1000	13,49	14,32	52,31	51,48	47,80	47,19
1250	14,46	15,29	51,34	50,51	47,09	46,51
1600	15,53	16,36	50,27	49,44	46,34	45,77
2000	16,50	17,33	49,30	48,47	45,67	45,12
2500	17,47	18,30	48,33	47,50	45,03	44,49
3150	18,48	19,31	47,32	46,49	44,38	43,86
4000	19,51	20,34	46,29	45,46	43,73	43,22
5000	20,48	21,31	45,32	44,49	43,14	42,65
6300	21,49	22,32	44,31	43,48	42,55	42,08
8000	22,52	23,35	43,28	42,45	41,96	41,51
10000	23,49	24,32	42,31	41,48	41,44	41,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando que a NBR 10.151:2000 preconiza que, para áreas estritamente residenciais urbanas ou de hospitais e escolas, os níveis de ruído equivalente devem estar compreendidos abaixo de 50 dB no período diurno e de 45 dB no período noturno, é possível afirmar que a implantação das barreiras de trilho soluciona o problema do ruído ferroviário de tração para frequências a partir de 400 Hz no período diurno e de 2000Hz no período noturno.

Uma vez que os ruídos de tração ferroviários estão compreendidos principalmente na faixa de 500 a 1000Hz, pode-se afirmar que as barreiras cumprem seu objetivo durante o período diurno enquanto que, no noturno, os outros sistemas se tornam auxiliares para atingir a redução pretendida. Vale ressaltar que, no período de maior necessidade – diurno, com operação do colégio militar – os níveis normativos são atendidos apenas com a implantação da barreira de trilho.

A tabela 29 apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação (perda por inserção) das barreiras de divisa, enquanto a tabela 30 traz a redução verificada. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 2,50m.

Tabela 29 - Número de Fresnel para o ponto 2 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,28	0,12	0,08	0,04
63	5,40	0,28	0,12	0,10	0,04
80	4,25	0,28	0,12	0,13	0,06
100	3,40	0,28	0,12	0,16	0,07
125	2,72	0,28	0,12	0,21	0,09
160	2,13	0,28	0,12	0,26	0,11
200	1,70	0,28	0,12	0,33	0,14
250	1,36	0,28	0,12	0,41	0,18
315	1,08	0,28	0,12	0,52	0,22
400	0,85	0,28	0,12	0,66	0,28
500	0,68	0,28	0,12	0,82	0,35
630	0,54	0,28	0,12	1,04	0,44
800	0,43	0,28	0,12	1,32	0,56
1000	0,34	0,28	0,12	1,65	0,71
1250	0,27	0,28	0,12	2,06	0,88
1600	0,21	0,28	0,12	2,64	1,13
2000	0,17	0,28	0,12	3,29	1,41
2500	0,14	0,28	0,12	4,12	1,76
3150	0,11	0,28	0,12	5,19	2,22
4000	0,09	0,28	0,12	6,59	2,82
5000	0,07	0,28	0,12	8,24	3,53
6300	0,05	0,28	0,12	10,38	4,45
8000	0,04	0,28	0,12	13,18	5,65
10000	0,03	0,28	0,12	16,47	7,06

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 30 - Perda por inserção para o ponto 2 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	2,17	1,51	70,73	71,39	64,76	65,48
63	3,17	0,51	69,73	72,39	63,66	66,62
80	4,21	0,53	68,69	72,37	62,54	66,59
100	5,18	1,50	67,72	71,40	61,52	65,50
125	6,15	2,47	66,75	70,43	60,52	64,43
160	7,22	3,54	65,68	69,36	59,43	63,26
200	8,19	4,51	64,71	68,39	58,47	62,23
250	9,16	5,48	63,74	67,42	57,52	61,21

315	10,16	6,48	62,74	66,42	56,57	60,18
400	11,20	7,52	61,70	65,38	55,60	59,13
500	12,17	8,49	60,73	64,41	54,71	58,17
630	13,17	9,49	59,73	63,41	53,81	57,20
800	14,21	10,53	58,69	62,37	52,91	56,22
1000	15,18	11,50	57,72	61,40	52,08	55,32
1250	16,15	12,47	56,75	60,43	51,27	54,44
1600	17,22	13,54	55,68	59,36	50,40	53,49
2000	18,19	14,51	54,71	58,39	49,63	52,65
2500	19,16	15,48	53,74	57,42	48,88	51,83
3150	20,16	16,48	52,74	56,42	48,12	50,99
4000	21,20	17,52	51,70	55,38	47,36	50,16
5000	22,17	18,49	50,73	54,41	46,66	49,39
6300	23,17	19,49	49,73	53,41	45,97	48,62
8000	24,21	20,53	48,69	52,37	45,27	47,85
10000	25,18	21,50	47,72	51,40	44,63	47,14

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando que a NBR 10.151:2000 preconiza que, para áreas estritamente residenciais urbanas ou de hospitais e escolas, os níveis de ruído equivalente devem estar compreendidos abaixo de 50 dB no período diurno e de 45 dB no período noturno, é possível afirmar que a implantação das barreiras de divisa soluciona o problema do ruído ferroviário de propulsão para frequências a partir de 1600 Hz no período diurno e de 6300Hz no período noturno.

Embora o ruído equivalente sofra considerável redução nas frequências acima de 500 Hz (com inicial em 72,9 dB), percebe-se que a implantação das barreiras propostas não consegue, sozinha, garantir o atendimento dos níveis do ruído de propulsão aos parâmetros normativos. Nesse caso, principalmente no período noturno, faz-se necessária a combinação entre as barreiras acústicas e esquadrias capazes de vedar satisfatoriamente a passagem do som, atendendo aos requisitos construtivos da NBR 15.575.

### 6.3. Proposta de intervenção ponto 3

A área do ponto de medição 3, de uso predominantemente residencial, apresenta  $L_{AEQ}$  elevado em relação aos parâmetros de conforto, bem como  $L_{Amáx}$  também

elevado, o que delinea melhor a proposição da barreira acústica. A presença de uma linha principal e duas secundárias, devido à proximidade ao pátio do bairro Francisco Bernardino, possibilita a aplicação de diferentes dispositivos.

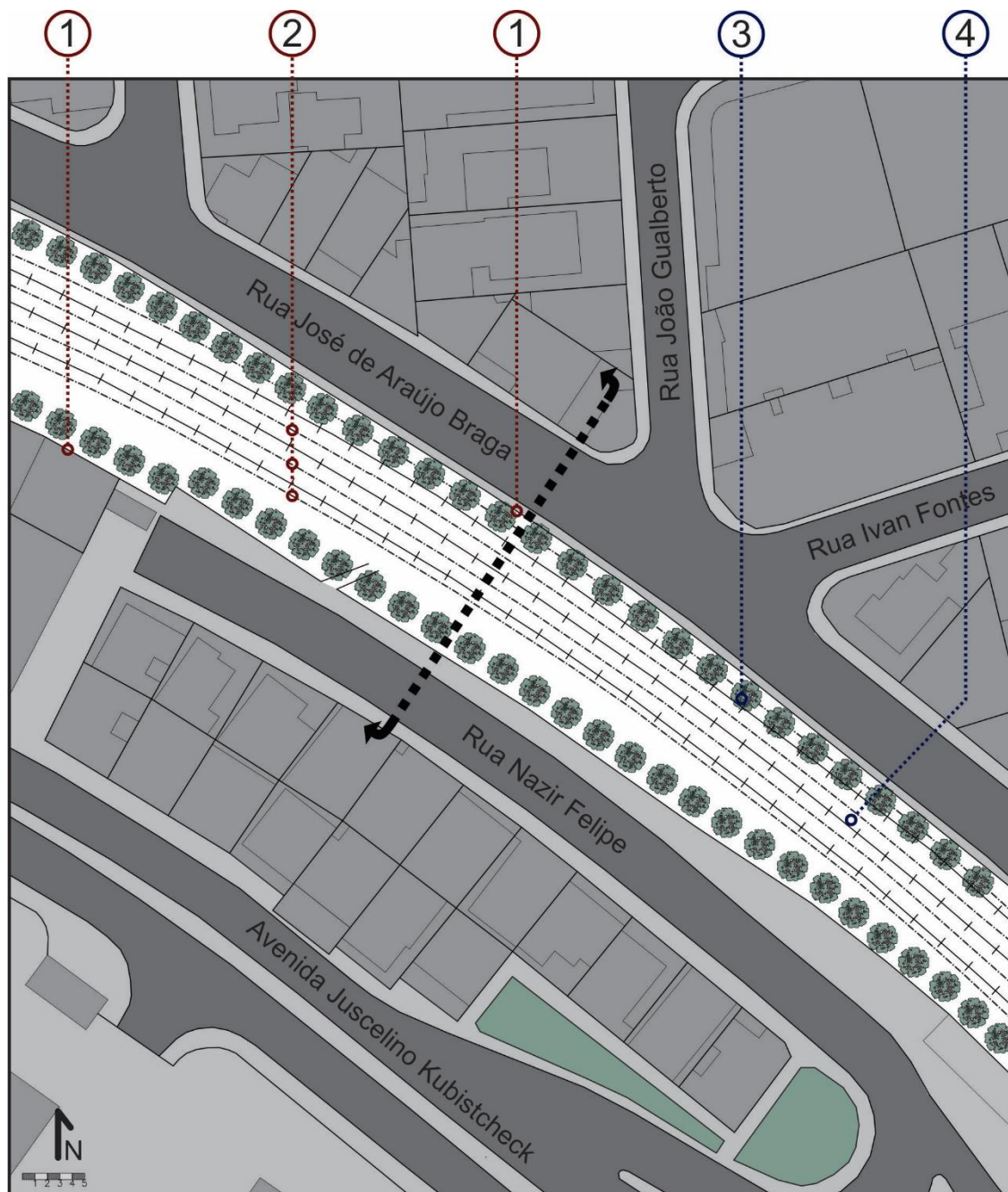
A área tem ocupação predominantemente residencial, com edificações de até dois pavimentos, de padrão construtivo regular a bom. Como premissa da proposição, tem-se a implantação do mínimo possível de barreiras visuais e físicas de maior escala, uma vez que a própria linha férrea já constitui uma barreira física no tecido urbano. Deseja-se ainda a utilização conjunta de elementos técnicos convencionais e elementos não usuais.

A manutenção dos muros em alvenaria existentes e sua adequação visam, principalmente, dois fatores: a) redução da geração de resíduos sólidos na implantação do sistema de redução de ruídos e b) redução dos custos de implantação do sistema através do reaproveitamento de estruturas previamente existentes quando possível. As medições realizadas apontaram que, durante a passagem da composição, os níveis de ruído equivalente são altamente incômodos.

Em ambas as divisas entre a faixa de domínio e as vias, propõe-se a manutenção da mureta divisória em concreto com adição de barreira em policarbonato cristal transparente e estrutura metálica perfilada, com ressoadores na borda superior, aumentando a eficiência da barreira e reduzindo os efeitos indesejados da difração na borda. As bordas superiores das barreiras foram inclinadas 30° em direção à faixa de domínio, mantendo a altura efetiva da barreira – fator importante na perda por inserção – enquanto reduz-se a altura aparente, melhorando a relação de escala entre barreira e pedestres.

A utilização do lastro em pedra britada e o plantio de espécies vegetais de forração e arbustivas propiciam a redução da reflexão sonora no piso e auxiliam na absorção. Propõe-se ainda a implantação de espécies vegetais arbóreas e arbustivas de alta densidade foliar ao longo de ambas as divisas como elemento de melhoria visual e ambiental. As proposições podem ser observadas nas figuras de 64 a 66.

Figura 64 – Mapa de intervenções propostas ponto 3



## Elementos convencionais

- ① Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica sobre base de concreto e ressoador na borda superior;
- ② Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa;

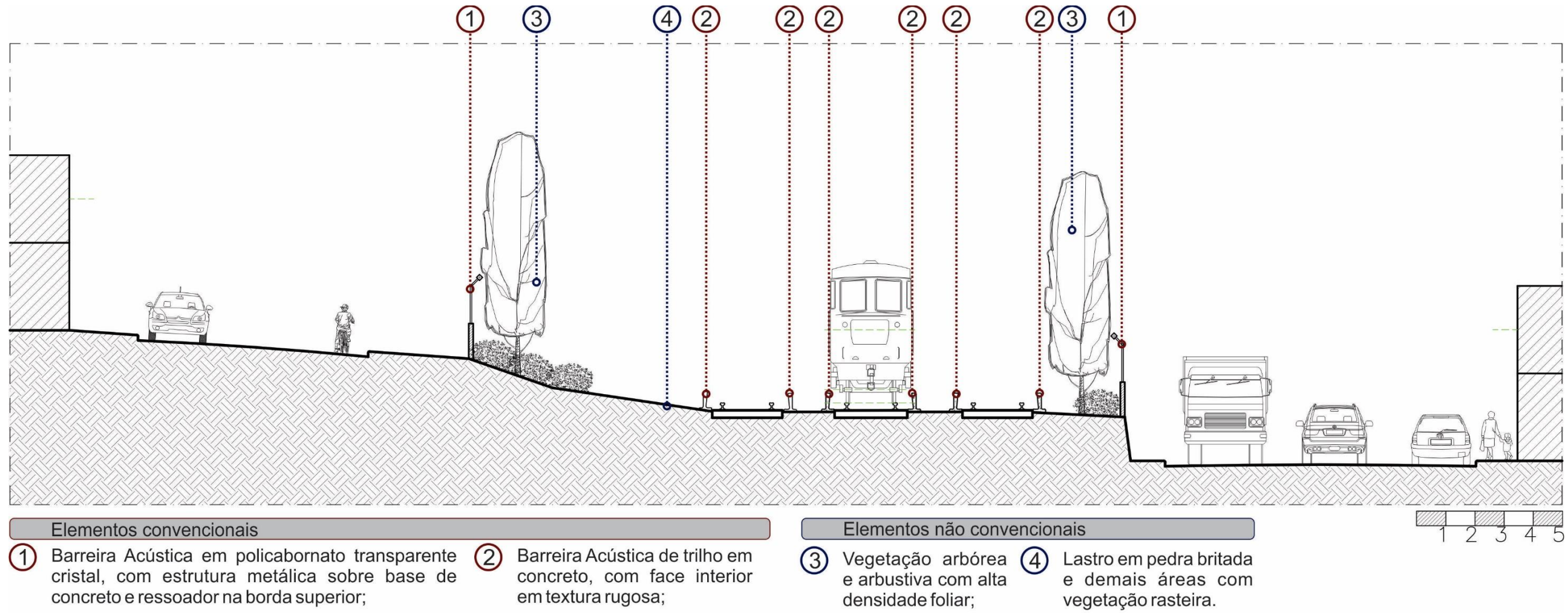
## Elementos não convencionais

- ③ Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar;
- ④ Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira.

Fonte: Elaborada pelo autor

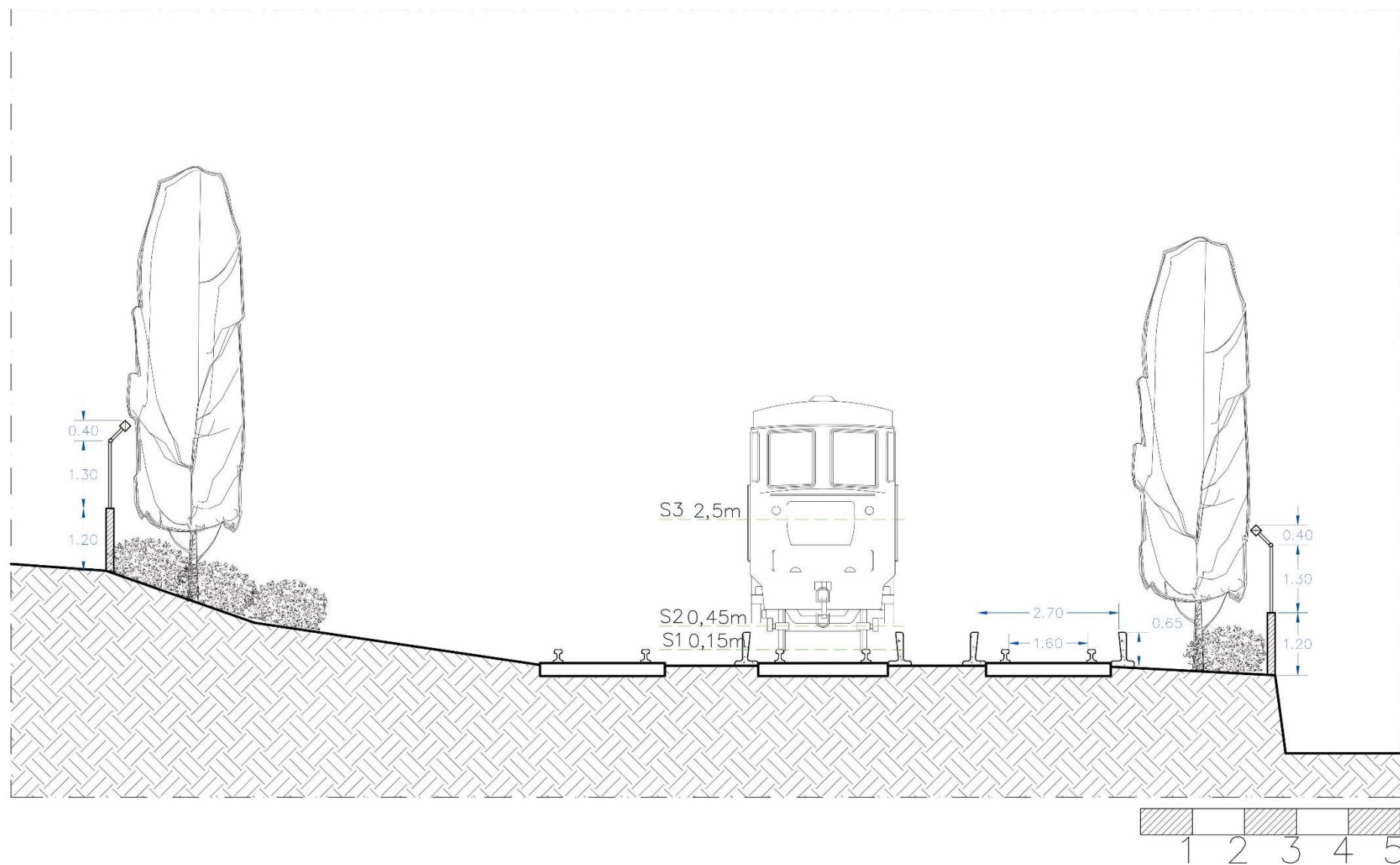


Figura 65 – Corte esquemático intervenção ponto 3



Fonte: Elaborado pelo autor

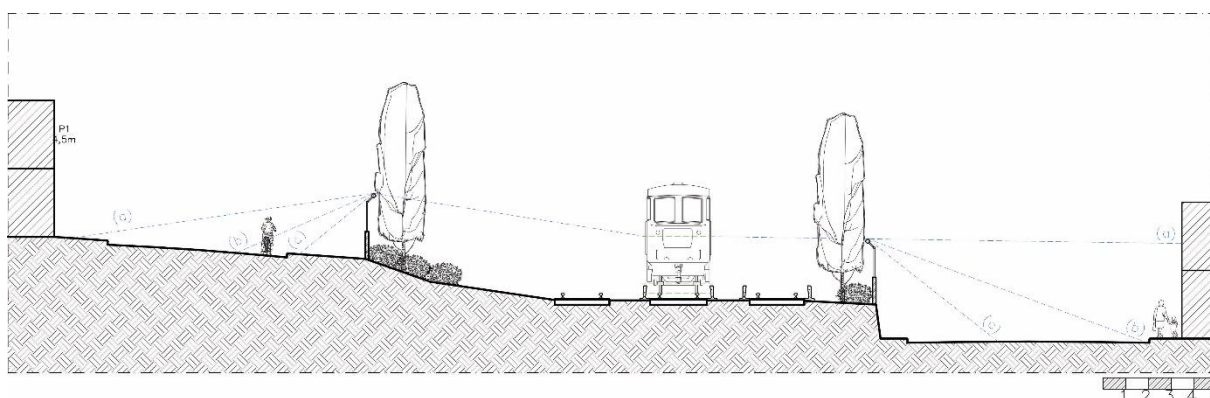
Figura 66 – Ampliação faixa de domínio ponto 3



Fonte: Elaborado pelo autor

A implantação das barreiras propostas gera uma área de sombra acústica que varia de acordo com a frequência do ruído que se pretende barrar. Para os ruídos de alta (a) e média frequência (b), predominantes no espectro sonoro do ruído ferroviário, a barreira mostra-se mais eficiente que para os ruídos de baixa frequência (c), como pode ser observado na figura 67.

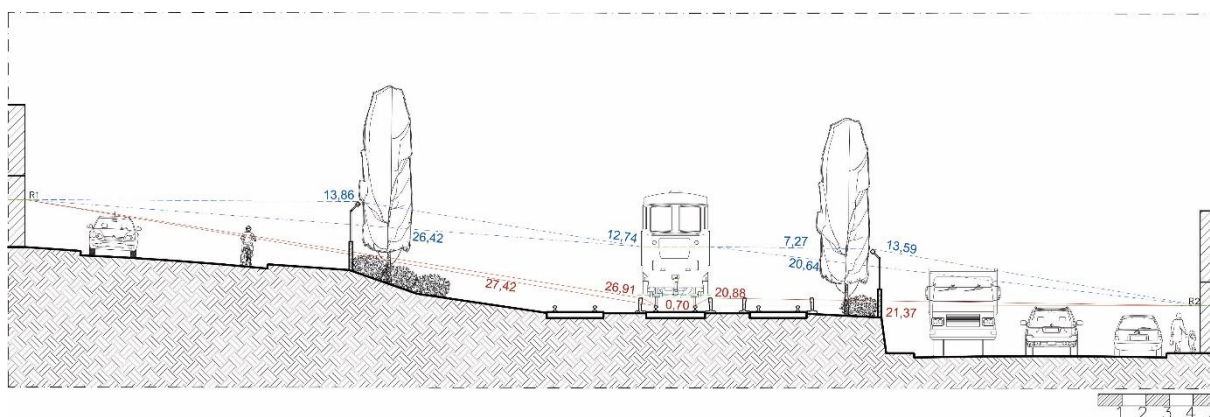
Figura 67 - Sombra acústica no ponto 3



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 68 apresenta as distâncias consideradas para o cálculo do número de Fresnel ( $N$ ), sistematizado na tabela 31, que apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação (perda por inserção) da barreira de trilho, enquanto a tabela 32 traz a redução verificada. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 4,50m, correspondendo aproximadamente ao centro das janelas do segundo pavimento das edificações.

Figura 68- Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 3



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 31 - Número de Fresnel para o ponto 3 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,19	0,21	0,06	0,06
63	5,40	0,19	0,21	0,07	0,08
80	4,25	0,19	0,21	0,09	0,10
100	3,40	0,19	0,21	0,11	0,12
125	2,72	0,19	0,21	0,14	0,15
160	2,13	0,19	0,21	0,18	0,20
200	1,70	0,19	0,21	0,22	0,25
250	1,36	0,19	0,21	0,28	0,31
315	1,08	0,19	0,21	0,35	0,39
400	0,85	0,19	0,21	0,45	0,49
500	0,68	0,19	0,21	0,56	0,62
630	0,54	0,19	0,21	0,70	0,78
800	0,43	0,19	0,21	0,89	0,99
1000	0,34	0,19	0,21	1,12	1,24
1250	0,27	0,19	0,21	1,40	1,54
1600	0,21	0,19	0,21	1,79	1,98
2000	0,17	0,19	0,21	2,24	2,47
2500	0,14	0,19	0,21	2,79	3,09
3150	0,11	0,19	0,21	3,52	3,89
4000	0,09	0,19	0,21	4,47	4,94
5000	0,07	0,19	0,21	5,59	6,18
6300	0,05	0,19	0,21	7,04	7,78
8000	0,04	0,19	0,21	8,94	9,88
10000	0,03	0,19	0,21	11,18	12,35

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 32 - Perda por inserção para o ponto 3 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	0,48	0,92	67,42	66,98	63,04	62,73
63	1,49	1,92	66,41	65,98	62,32	62,02
80	2,52	2,96	65,38	64,94	61,60	61,30
100	3,49	3,93	64,41	63,97	60,94	60,66
125	4,46	4,90	63,44	63,00	60,31	60,03
160	5,53	5,97	62,37	61,93	59,63	59,36
200	6,50	6,94	61,40	60,96	59,03	58,77
250	7,47	7,91	60,43	59,99	58,45	58,20
315	8,48	8,91	59,42	58,99	57,87	57,63
400	9,51	9,95	58,39	57,95	57,30	57,06
500	10,48	10,92	57,42	56,98	56,78	56,55

630	11,49	11,92	56,41	55,98	56,26	56,04
800	12,52	12,96	55,38	54,94	55,74	55,53
1000	13,49	13,93	54,41	53,97	55,28	55,08
1250	14,46	14,90	53,44	53,00	54,84	54,65
1600	15,53	15,97	52,37	51,93	54,37	54,19
2000	16,50	16,94	51,40	50,96	53,97	53,79
2500	17,47	17,91	50,43	49,99	53,59	53,42
3150	18,48	18,91	49,42	48,99	53,21	53,05
4000	19,51	19,95	48,39	47,95	52,84	52,69
5000	20,48	20,92	47,42	46,98	52,51	52,37
6300	21,49	21,92	46,41	45,98	52,19	52,06
8000	22,52	22,96	45,38	44,94	51,89	51,77
10000	23,49	23,93	44,41	43,97	51,62	51,51

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando que a NBR 10.151:2000 preconiza que, para áreas mistas predominantemente residenciais, os níveis de ruído equivalente devem estar compreendidos abaixo de 55 dB no período diurno e de 50 dB no período noturno, é possível afirmar que a implantação das barreiras de trilho soluciona o problema do ruído ferroviário de tração para frequências a partir de 1000 Hz no período diurno, não conseguindo atender à referência normativa no período noturno em nenhuma das faixas de frequência.

Tal questão se desenvolve, principalmente, pela proximidade dos pontos receptores em relação à filha férrea e pela cota elevada dos mesmos em relação às fontes sonoras – 4,5m de altura. Nesse caso, as barreiras de divisa assumem papel de redução também do ruído de tração, uma vez que o ruído resultante da primeira atenuação será ainda barrado em parte pelas barreiras de divisa, conforme apresentado nas tabelas 33 e 34.

Tabela 33 - Número de Fresnel para a segunda atenuação do ponto 3 – ruídos de tração

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,29	0,25	0,09	0,07
63	5,40	0,29	0,25	0,11	0,09
80	4,25	0,29	0,25	0,14	0,12
100	3,40	0,29	0,25	0,17	0,15
125	2,72	0,29	0,25	0,21	0,18
160	2,13	0,29	0,25	0,27	0,24
200	1,70	0,29	0,25	0,34	0,29

250	1,36	0,29	0,25	0,43	0,37
315	1,08	0,29	0,25	0,54	0,46
400	0,85	0,29	0,25	0,68	0,59
500	0,68	0,29	0,25	0,85	0,74
630	0,54	0,29	0,25	1,07	0,93
800	0,43	0,29	0,25	1,36	1,18
1000	0,34	0,29	0,25	1,71	1,47
1250	0,27	0,29	0,25	2,13	1,84
1600	0,21	0,29	0,25	2,73	2,35
2000	0,17	0,29	0,25	3,41	2,94
2500	0,14	0,29	0,25	4,26	3,68
3150	0,11	0,29	0,25	5,37	4,63
4000	0,09	0,29	0,25	6,82	5,88
5000	0,07	0,29	0,25	8,53	7,35
6300	0,05	0,29	0,25	10,75	9,26
8000	0,04	0,29	0,25	13,65	11,76
10000	0,03	0,29	0,25	17,06	14,71

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 34 - Perda por inserção para a segunda atenuação do ponto 3 – ruídos de tração

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	2,32	1,67	54,68	55,33	55,41	55,72
63	3,32	2,68	53,68	54,32	54,95	55,24
80	4,36	3,72	52,64	53,28	54,49	54,77
100	5,33	4,69	51,67	52,31	54,08	54,35
125	6,30	5,65	50,70	51,35	53,69	53,95
160	7,37	6,73	49,63	50,27	53,28	53,53
200	8,34	7,70	48,66	49,30	52,93	53,16
250	9,31	8,66	47,69	48,34	52,60	52,82
315	10,31	9,67	46,69	47,33	52,28	52,48
400	11,35	10,71	45,65	46,29	51,97	52,16
500	12,32	11,67	44,68	45,33	51,69	51,87
630	13,32	12,68	43,68	44,32	51,43	51,60
800	14,36	13,72	42,64	43,28	51,18	51,33
1000	15,33	14,69	41,67	42,31	50,97	51,11
1250	16,30	15,65	40,70	41,35	50,77	50,90
1600	17,37	16,73	39,63	40,27	50,58	50,69
2000	18,34	17,70	38,66	39,30	50,42	50,52
2500	19,31	18,66	37,69	38,34	50,28	50,37
3150	20,31	19,67	36,69	37,33	50,16	50,24
4000	21,35	20,71	35,65	36,29	50,06	50,12
5000	22,32	21,67	34,68	35,33	49,98	50,03

6300	23,32	22,68	33,68	34,32	49,92	49,95
8000	24,36	23,72	32,64	33,28	49,87	49,90
10000	25,33	24,69	31,67	32,31	49,85	49,86

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que, após a segunda atenuação dos ruídos de tração, os níveis de ruído equivalentes atendem à referência normativa para o período diurno em todas as faixas de frequência e para o noturno para frequências partir de 1600 Hz. Somando-se ao ruído resultante a atenuação de aproximadamente 3dB propiciada pelas espécies arbóreas, tem-se valores muito próximos ou menores ainda que os normativos. Em alguns casos, o pouco que resta atenuar para que se chegue aos padrões pode ser obtido mesmo que as vedações das edificações não atendam à norma de desempenho.

A tabela 35 apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação do ruído de propulsão (perda por inserção) das barreiras de divisa, enquanto a tabela 36 traz a redução verificada. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 4,50m, correspondendo aproximadamente ao centro das janelas do segundo pavimento das edificações.

Tabela 35 - Número de Fresnel para o ponto 3 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,18	0,22	0,05	0,06
63	5,40	0,18	0,22	0,07	0,08
80	4,25	0,18	0,22	0,08	0,10
100	3,40	0,18	0,22	0,11	0,13
125	2,72	0,18	0,22	0,13	0,16
160	2,13	0,18	0,22	0,17	0,21
200	1,70	0,18	0,22	0,21	0,26
250	1,36	0,18	0,22	0,26	0,32
315	1,08	0,18	0,22	0,33	0,41
400	0,85	0,18	0,22	0,42	0,52
500	0,68	0,18	0,22	0,53	0,65
630	0,54	0,18	0,22	0,67	0,82
800	0,43	0,18	0,22	0,85	1,04
1000	0,34	0,18	0,22	1,06	1,29
1250	0,27	0,18	0,22	1,32	1,62
1600	0,21	0,18	0,22	1,69	2,07
2000	0,17	0,18	0,22	2,12	2,59

2500	0,14	0,18	0,22	2,65	3,24
3150	0,11	0,18	0,22	3,34	4,08
4000	0,09	0,18	0,22	4,24	5,18
5000	0,07	0,18	0,22	5,29	6,47
6300	0,05	0,18	0,22	6,67	8,15
8000	0,04	0,18	0,22	8,47	10,35
10000	0,03	0,18	0,22	10,59	12,94

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 36 - Perda por inserção para o ponto 3 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	0,25	1,12	76,35	75,48	70,33	69,55
63	1,25	2,12	75,35	74,48	69,43	68,67
80	2,29	3,16	74,31	73,44	68,52	67,78
100	3,26	4,13	73,34	72,47	67,69	66,96
125	4,23	5,10	72,37	71,50	66,88	66,17
160	5,30	6,17	71,30	70,43	66,01	65,32
200	6,27	7,14	70,33	69,46	65,24	64,56
250	7,24	8,11	69,36	68,49	64,49	63,83
315	8,24	9,11	68,36	67,49	63,73	63,09
400	9,28	10,15	67,32	66,45	62,97	62,35
500	10,25	11,12	66,35	65,48	62,28	61,67
630	11,25	12,12	65,35	64,48	61,58	60,99
800	12,29	13,16	64,31	63,44	60,88	60,31
1000	13,26	14,13	63,34	62,47	60,25	59,69
1250	14,23	15,10	62,37	61,50	59,63	59,09
1600	15,30	16,17	61,30	60,43	58,97	58,45
2000	16,27	17,14	60,33	59,46	58,39	57,89
2500	17,24	18,11	59,36	58,49	57,84	57,35
3150	18,24	19,11	58,36	57,49	57,28	56,81
4000	19,28	20,15	57,32	56,45	56,73	56,28
5000	20,25	21,12	56,35	55,48	56,23	55,79
6300	21,25	22,12	55,35	54,48	55,73	55,31
8000	22,29	23,16	54,31	53,44	55,24	54,84
10000	23,26	24,13	53,34	52,47	54,80	54,42

Fonte: Elaborada pelo autor

Percebe-se que a inserção das barreiras contribui para a redução do nível de ruído ambiental equivalente, deixando-o mais próximo do máximo indicado pelas normas, embora não seja suficiente para erradicação do problema, devido aos altos níveis de emissão de ruído e do posicionamento entre fonte e receptores. Nesse caso, mesmo



aplicando a redução de 3dB propiciada pelos elementos vegetais, apenas nas frequências superiores a 1600 Hz teriam valores aceitáveis em período diurno e nenhuma das frequências atenderia à norma no período noturno.

O ruído resultante que chega até as fachadas pode ser mitigado, nesse caso, com a utilização de vedações de vãos de janelas e portas com bom desempenho na redução da transmissão de ruídos, resultando em um ambiente interno adequado aos padrões acústicos normativos.

#### **6.4. Proposta de intervenção ponto 4**

A área do ponto de medição 4, de uso misto, com vocação predominantemente comercial e administrativa, apresenta LAEQ elevado em relação aos parâmetros de conforto, bem como L<sub>Amáx</sub> também elevado. A área tem ocupação predominante com edificações de até dois pavimentos, de padrão construtivo bom. Como premissa da proposição, tem-se a implantação do mínimo possível de barreiras visuais e físicas de maior escala, uma vez que a própria linha férrea já constitui uma barreira física no tecido urbano.

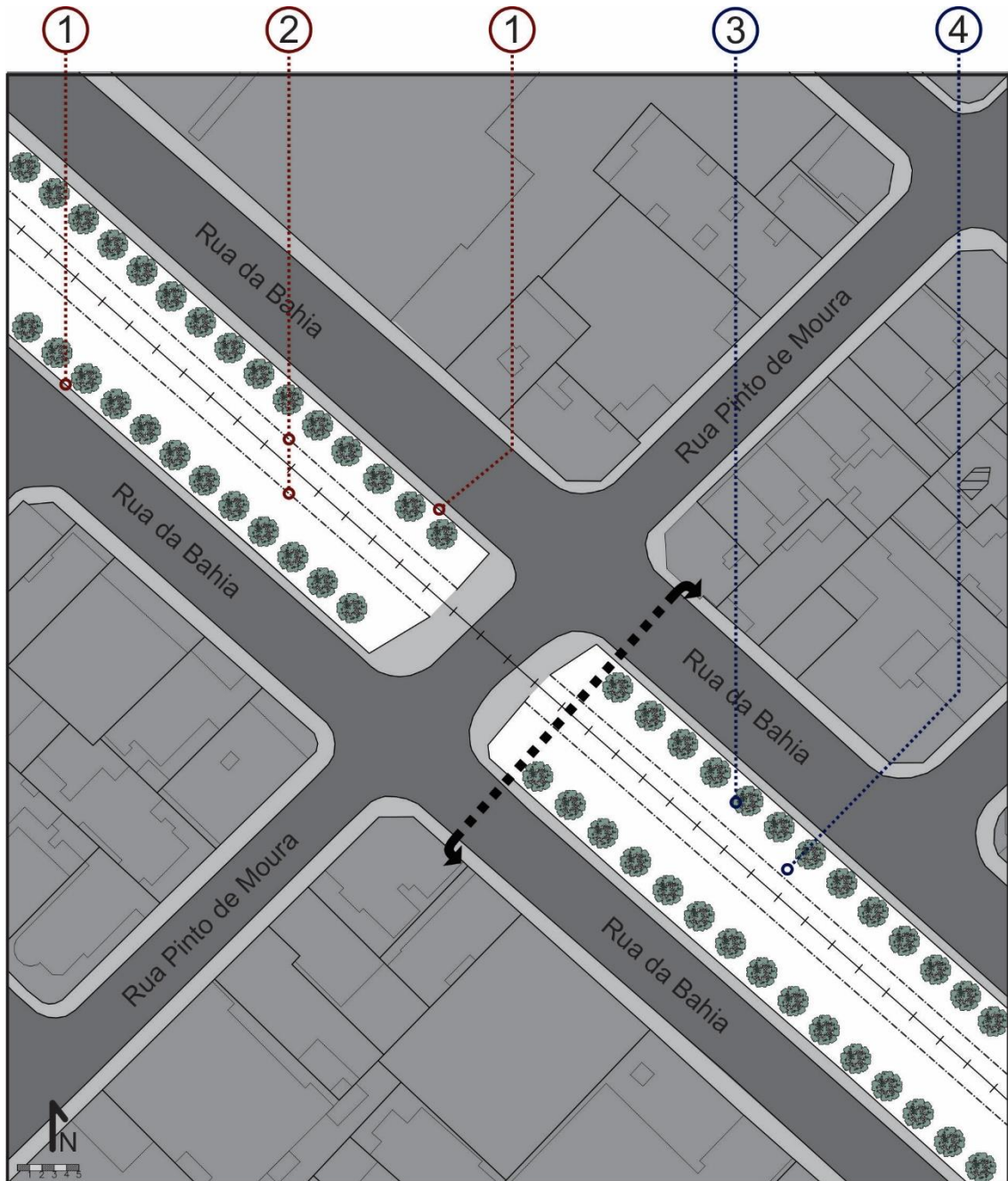
A manutenção dos muros em alvenaria existentes e sua adequação visam, principalmente, dois fatores: a) redução da geração de resíduos sólidos na implantação do sistema de redução de ruídos e b) redução dos custos de implantação do sistema através do reaproveitamento de estruturas previamente existentes quando possível. As medições realizadas apontaram que, durante a passagem da composição, os níveis de ruído equivalente são altamente incômodos.

Em ambas as divisas entre a faixa de domínio e as vias, propõe-se a manutenção da mureta divisória em concreto com adição de barreira em policarbonato cristal transparente e estrutura metálica perfilada, com ressoadores na borda superior, aumentando a eficiência da barreira e reduzindo os efeitos indesejados da difração na borda. As bordas superiores das barreiras de divisa foram inclinadas 30° em direção à faixa de domínio, mantendo a altura efetiva da barreira – fator importante na perda por inserção – enquanto reduz-se a altura aparente, melhorando a relação de escala entre barreira e pedestres.

A utilização do lastro em pedra britada e o plantio de espécies vegetais de forração e arbustivas propiciam a redução da reflexão sonora no piso e auxiliam na absorção do som incidente. Propõe-se ainda a implantação de espécies vegetais arbóreas e arbustivas de alta densidade foliar ao longo de ambas as divisas como elemento de melhoria visual e ambiental.

A localização do ponto de estudo em terreno predominantemente plano, com pouca inclinação devido à ocupação em área de várzea do rio Paraibuna, influencia diretamente na atenuação dos ruídos de propulsão. As proposições para a área podem ser observadas nas figuras de 69 a 71.

Figura 69- Mapa de intervenções propostas ponto 3



## Elementos convencionais

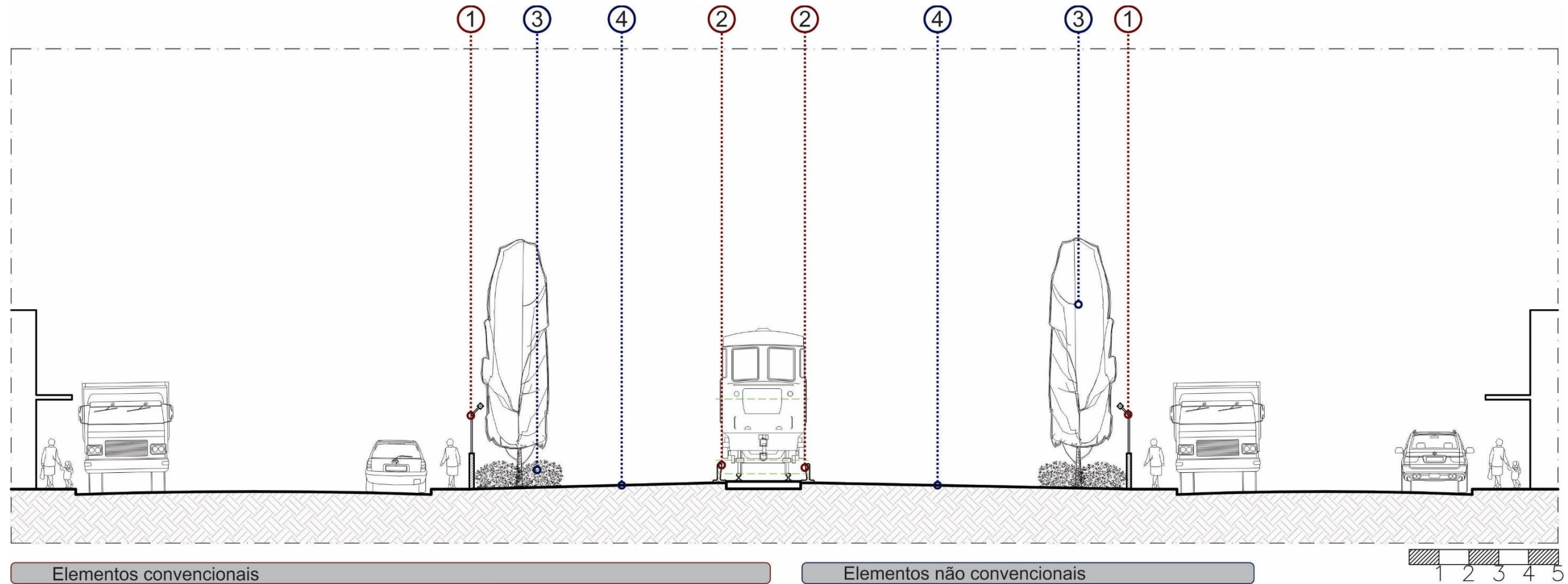
- ① Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica sobre base de concreto e ressoador na borda superior;
- ② Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa;

## Elementos não convencionais

- ③ Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar;
- ④ Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 70 - Corte esquemático intervenção ponto 2



## Elementos convencionais

① Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica sobre base de concreto e ressoador na borda superior;

② Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa;

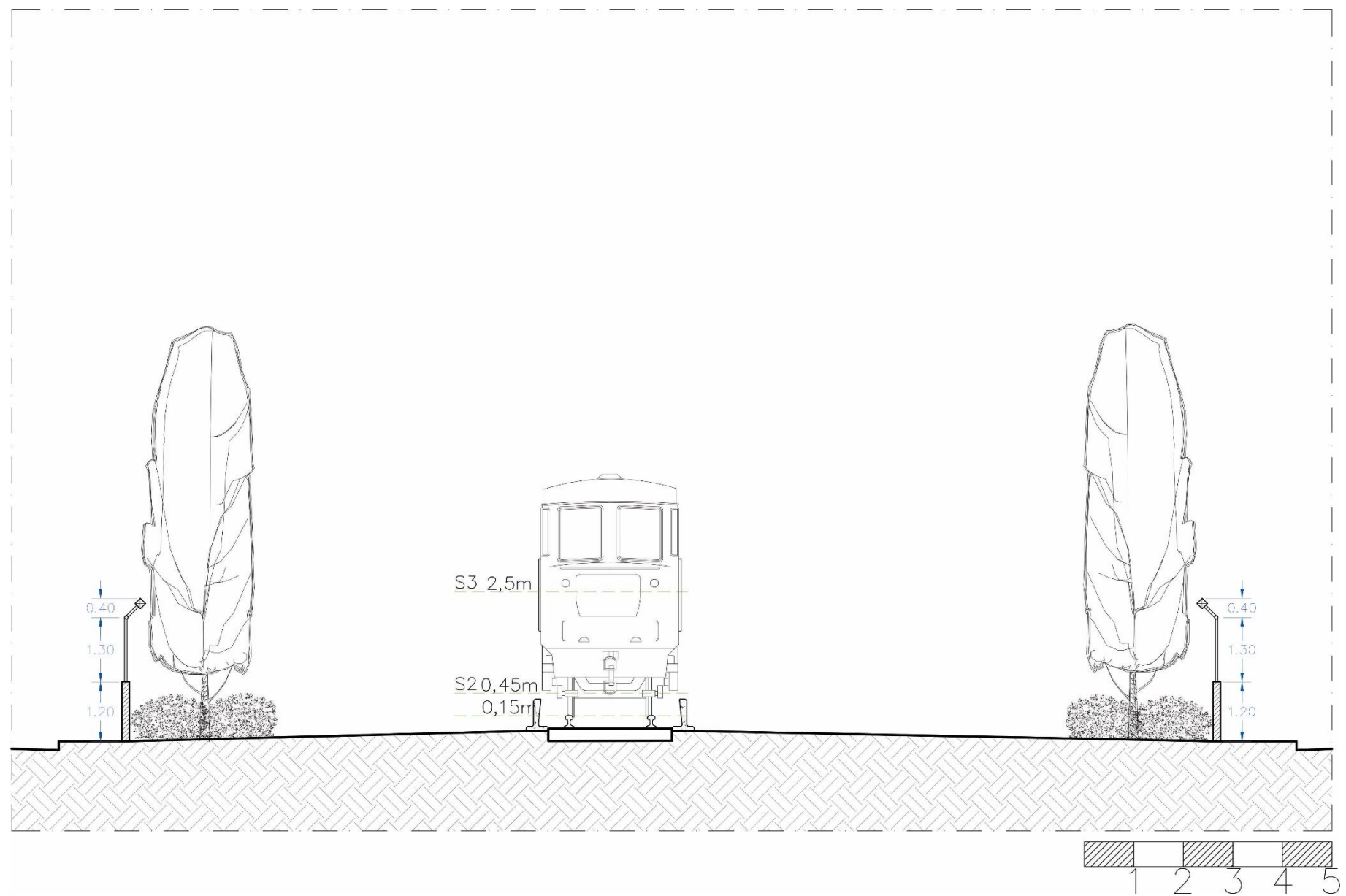
## Elementos não convencionais

③ Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar;

④ Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira.

Fonte: Elaborada pelo autor

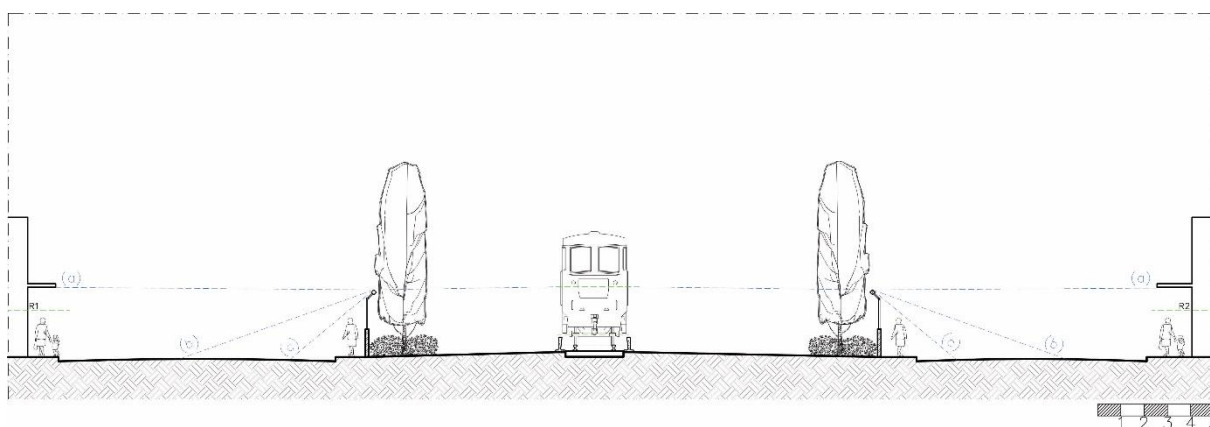
Figura 71 - Ampliação faixa de domínio ponto 4



Fonte: Elaborada pelo autor

A implantação das barreiras propostas gera uma área de sombra acústica que varia de acordo com a frequência do ruído que se pretende barrar. Para os ruídos de alta (a) e média frequência (b), predominantes no espectro sonoro do ruído ferroviário, a barreira mostra-se mais eficiente que para os ruídos de baixa frequência (c), como pode ser observado na figura 72.

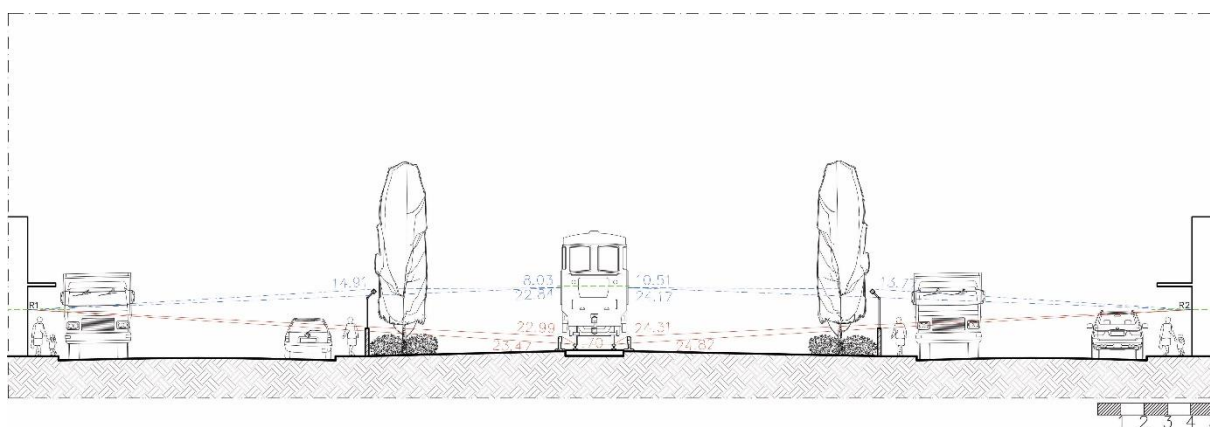
Figura 72 - Sombra acústica no ponto 2



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 73 apresenta as distâncias consideradas para o cálculo do número de Fresnel (N), sistematizado na tabela 37, que apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação (perda por inserção) da barreira de trilho, enquanto a tabela 38 traz a redução do ruído de tração verificada. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 2,00m.

Figura 73 - Distâncias para cálculo da perda por inserção no ponto 2



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 37 - Número de Fresnel para o ponto 4 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,22	0,19	0,06	0,06
63	5,40	0,22	0,19	0,08	0,07
80	4,25	0,22	0,19	0,10	0,09
100	3,40	0,22	0,19	0,13	0,11
125	2,72	0,22	0,19	0,16	0,14
160	2,13	0,22	0,19	0,21	0,18
200	1,70	0,22	0,19	0,26	0,22
250	1,36	0,22	0,19	0,32	0,28
315	1,08	0,22	0,19	0,41	0,35
400	0,85	0,22	0,19	0,52	0,45
500	0,68	0,22	0,19	0,65	0,56
630	0,54	0,22	0,19	0,82	0,70
800	0,43	0,22	0,19	1,04	0,89
1000	0,34	0,22	0,19	1,29	1,12
1250	0,27	0,22	0,19	1,62	1,40
1600	0,21	0,22	0,19	2,07	1,79
2000	0,17	0,22	0,19	2,59	2,24
2500	0,14	0,22	0,19	3,24	2,79
3150	0,11	0,22	0,19	4,08	3,52
4000	0,09	0,22	0,19	5,18	4,47
5000	0,07	0,22	0,19	6,47	5,59
6300	0,05	0,22	0,19	8,15	7,04
8000	0,04	0,22	0,19	10,35	8,94
10000	0,03	0,22	0,19	12,94	11,18

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 38 - Perda por inserção para o ponto 4 com barreiras de trilho

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	1,12	0,48	69,78	70,42	65,58	66,04
63	2,12	1,49	68,78	69,41	64,87	65,32
80	3,16	2,52	67,74	68,38	64,17	64,60
100	4,13	3,49	66,77	67,41	63,52	63,94
125	5,10	4,46	65,80	66,44	62,90	63,31
160	6,17	5,53	64,73	65,37	62,23	62,63
200	7,14	6,50	63,76	64,40	61,65	62,03
250	8,11	7,47	62,79	63,43	61,08	61,45
315	9,11	8,48	61,79	62,42	60,52	60,87
400	10,15	9,51	60,75	61,39	59,95	60,30
500	11,12	10,48	59,78	60,42	59,44	59,78

630	12,12	11,49	58,78	59,41	58,94	59,26
800	13,16	12,52	57,74	58,38	58,44	58,74
1000	14,13	13,49	56,77	57,41	57,99	58,28
1250	15,10	14,46	55,80	56,44	57,56	57,84
1600	16,17	15,53	54,73	55,37	57,11	57,37
2000	17,14	16,50	53,76	54,40	56,72	56,97
2500	18,11	17,47	52,79	53,43	56,34	56,59
3150	19,11	18,48	51,79	52,42	55,98	56,21
4000	20,15	19,51	50,75	51,39	55,62	55,84
5000	21,12	20,48	49,78	50,42	55,31	55,51
6300	22,12	21,49	48,78	49,41	55,00	55,19
8000	23,16	22,52	47,74	48,38	54,71	54,89
10000	24,13	23,49	46,77	47,41	54,46	54,62

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando que a NBR 10.151:2000 preconiza que, para áreas mistas de vocação comercial e administrativa, os níveis de ruído equivalente devem estar compreendidos abaixo de 60 dB no período diurno e de 55 dB no período noturno, é possível afirmar que a implantação das barreiras de trilho soluciona o problema do ruído ferroviário de tração para frequências a partir de 315 Hz no período diurno e de 4000Hz no período noturno.

Tal questão se desenvolve, principalmente, pela proximidade dos pontos receptores em relação à linha férrea e pela similaridade de cota elevada dos mesmos em relação às fontes sonoras, fazendo com que seja necessária uma barreira muito alta para que a atenuação total seja garantida. Nesse caso, as barreiras de divisa assumem papel de redução também do ruído de tração, uma vez que o ruído resultante da primeira atenuação será ainda barrado em parte pelas barreiras de divisa, conforme apresentado nas tabelas 39 e 40.

Tabela 39 - Número de Fresnel para a segunda atenuação do ponto 4 – ruídos de tração

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,27	0,25	0,08	0,07
63	5,40	0,27	0,25	0,10	0,09
80	4,25	0,27	0,25	0,13	0,12
100	3,40	0,27	0,25	0,16	0,15
125	2,72	0,27	0,25	0,20	0,18
160	2,13	0,27	0,25	0,25	0,24



200	1,70	0,27	0,25	0,32	0,29
250	1,36	0,27	0,25	0,40	0,37
315	1,08	0,27	0,25	0,50	0,46
400	0,85	0,27	0,25	0,64	0,59
500	0,68	0,27	0,25	0,79	0,74
630	0,54	0,27	0,25	1,00	0,93
800	0,43	0,27	0,25	1,27	1,18
1000	0,34	0,27	0,25	1,59	1,47
1250	0,27	0,27	0,25	1,99	1,84
1600	0,21	0,27	0,25	2,54	2,35
2000	0,17	0,27	0,25	3,18	2,94
2500	0,14	0,27	0,25	3,97	3,68
3150	0,11	0,27	0,25	5,00	4,63
4000	0,09	0,27	0,25	6,35	5,88
5000	0,07	0,27	0,25	7,94	7,35
6300	0,05	0,27	0,25	10,01	9,26
8000	0,04	0,27	0,25	12,71	11,76
10000	0,03	0,27	0,25	15,88	14,71

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 40 - Perda por inserção para a segunda atenuação do ponto 4 – ruídos de tração

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	2,01	1,67	57,79	58,13	58,46	58,62
63	3,01	2,68	56,79	57,12	58,00	58,15
80	4,05	3,72	55,75	56,08	57,54	57,68
100	5,02	4,69	54,78	55,11	57,13	57,27
125	5,99	5,65	53,81	54,15	56,74	56,87
160	7,06	6,73	52,74	53,07	56,32	56,45
200	8,03	7,70	51,77	52,10	55,97	56,09
250	9,00	8,66	50,80	51,14	55,64	55,75
315	10,00	9,67	49,80	50,13	55,31	55,42
400	11,04	10,71	48,76	49,09	55,00	55,10
500	12,01	11,67	47,79	48,13	54,72	54,82
630	13,01	12,68	46,79	47,12	54,46	54,55
800	14,05	13,72	45,75	46,08	54,21	54,29
1000	15,02	14,69	44,78	45,11	53,99	54,06
1250	15,99	15,65	43,81	44,15	53,79	53,86
1600	17,06	16,73	42,74	43,07	53,60	53,66
2000	18,03	17,70	41,77	42,10	53,44	53,49
2500	19,00	18,66	40,80	41,14	53,30	53,34
3150	20,00	19,67	39,80	40,13	53,17	53,21
4000	21,04	20,71	38,76	39,09	53,07	53,10

5000	22,01	21,67	37,79	38,13	52,99	53,01
6300	23,01	22,68	36,79	37,12	52,92	52,94
8000	24,05	23,72	35,75	36,08	52,88	52,89
10000	25,02	24,69	34,78	35,11	52,85	52,86

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que, após a segunda atenuação dos ruídos de tração, os níveis de ruído equivalentes atendem à referência normativa para o período diurno em todas as faixas de frequência e para o noturno para frequências partir de 400 Hz. Somando-se ao ruído resultante a atenuação de aproximadamente 3dB propiciada pelas espécies arbóreas, tem-se valores muito próximos ou menores ainda que os normativos, atendendo totalmente ao indicado.

A tabela 41 apresenta as variáveis para o cálculo da atenuação do ruído de propulsão (perda por inserção) das barreiras de divisa, enquanto a tabela 42 traz a redução verificada. Para estes cálculos, devido às características de ocupação do solo, foram considerados os pontos receptores 1 (R1, à esquerda) e 2 (R2, à direita), situados na testada dos lotes, a uma altura de 2,00m, correspondendo aproximadamente ao centro das janelas do primeiro pavimento das edificações.

Tabela 41 - Número de Fresnel para o ponto 4 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	$\lambda$ (m)	$\delta$ R1	$\delta$ R2	Número de Fresnel (N) R1	Número de Fresnel (N) R2
50	6,80	0,1	0,11	0,03	0,03
63	5,40	0,1	0,11	0,04	0,04
80	4,25	0,1	0,11	0,05	0,05
100	3,40	0,1	0,11	0,06	0,06
125	2,72	0,1	0,11	0,07	0,08
160	2,13	0,1	0,11	0,09	0,10
200	1,70	0,1	0,11	0,12	0,13
250	1,36	0,1	0,11	0,15	0,16
315	1,08	0,1	0,11	0,19	0,20
400	0,85	0,1	0,11	0,24	0,26
500	0,68	0,1	0,11	0,29	0,32
630	0,54	0,1	0,11	0,37	0,41
800	0,43	0,1	0,11	0,47	0,52
1000	0,34	0,1	0,11	0,59	0,65
1250	0,27	0,1	0,11	0,74	0,81
1600	0,21	0,1	0,11	0,94	1,04
2000	0,17	0,1	0,11	1,18	1,29

2500	0,14	0,1	0,11	1,47	1,62
3150	0,11	0,1	0,11	1,85	2,04
4000	0,09	0,1	0,11	2,35	2,59
5000	0,07	0,1	0,11	2,94	3,24
6300	0,05	0,1	0,11	3,71	4,08
8000	0,04	0,1	0,11	4,71	5,18
10000	0,03	0,1	0,11	5,88	6,47

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 42 - Perda por inserção para o ponto 4 com barreiras de divisa

Frequência (Hz)	Atenuação R1	Atenuação R2	Lpcb R1	Lpcb R2	Laeq R1	Laeq R2
50	2,30	1,89	72,20	72,61	67,36	67,68
63	1,30	0,89	73,20	73,61	68,14	68,46
80	0,26	0,15	74,24	74,35	68,96	69,05
100	0,71	1,12	73,79	73,38	68,61	68,28
125	1,67	2,09	72,83	72,41	67,85	67,53
160	2,75	3,16	71,75	71,34	67,03	66,72
200	3,72	4,13	70,78	70,37	66,31	66,01
250	4,69	5,10	69,81	69,40	65,61	65,31
315	5,69	6,10	68,81	68,40	64,90	64,61
400	6,73	7,14	67,77	67,36	64,19	63,91
500	7,70	8,11	66,80	66,39	63,55	63,28
630	8,70	9,11	65,80	65,39	62,90	62,64
800	9,74	10,15	64,76	64,35	62,25	62,00
1000	10,71	11,12	63,79	63,38	61,67	61,42
1250	11,67	12,09	62,83	62,41	61,10	60,87
1600	12,75	13,16	61,75	61,34	60,50	60,27
2000	13,72	14,13	60,78	60,37	59,97	59,75
2500	14,69	15,10	59,81	59,40	59,46	59,25
3150	15,69	16,10	58,81	58,40	58,96	58,75
4000	16,73	17,14	57,77	57,36	58,45	58,26
5000	17,70	18,11	56,80	56,39	58,00	57,82
6300	18,70	19,11	55,80	55,39	57,56	57,38
8000	19,74	20,15	54,76	54,35	57,12	56,95
10000	20,71	21,12	53,79	53,38	56,73	56,57

Fonte: Elaborada pelo autor

Percebe-se que a inserção das barreiras contribui para a redução do nível de ruído ambiental equivalente, deixando-o mais próximo do máximo indicado pelas normas, embora não seja suficiente para erradicação do problema, devido aos altos níveis de emissão de ruído e do posicionamento entre fonte e receptores. Nesse caso, mesmo

aplicando a redução de 3dB propiciada pelos elementos vegetais, apenas as frequências superiores a 500 Hz teriam valores aceitáveis de ruído equivalente em período diurno e as frequências a partir de 4000 atenderiam à norma no período noturno.

Nessa situação, faz-se necessária a abordagem integrada para solução do problema, fazendo com que o ruído resultante que chega até as fachadas seja mitigado, com a utilização de vedações de vãos de janelas e portas com bom desempenho na redução da transmissão de ruídos, como preconiza a NBR 15.575, resultando em um ambiente interno adequado aos padrões acústicos normativos.

## 7. CONCLUSÃO

Reduzir a emissão de ruídos no sistema de transporte ferroviário de cargas como o temos implantado é relativamente difícil e demanda tempo, devido a questões físicas do sistema – diretamente ligadas a investimentos – e políticas. Esse entrave nos leva a perceber que a solução pode ser direcionada parte para o emissor de ruído e parte para o receptor, através da utilização de dispositivos de atenuação do ruído e mesmo de proteção, como demanda, por exemplo, a NBR-15575.

Como visto, o ruído ferroviário decorre de duas principais fontes: de tração, relativo ao contato entre rodas e trilho, e de propulsão, relativo aos motores e seus sistemas de propulsão, transmissão e arrefecimento. A cada uma dessas classes correspondem medidas para redução do ruído, que podem ser aplicadas primeiramente na fonte, reduzindo a quantidade de ruído emitido, ou no ambiente, reduzindo o nível de pressão sonora durante a propagação. A redução da emissão na fonte é considerada ideal, uma vez que não demanda modificação que cause maiores rupturas no ambiente construído.

Percebe-se que grande parte do ruído de tração emitido pelo sistema decorre da utilização, ainda nos dias de hoje, de um sistema lastro-dormente-trilho semelhante ao que se utilizava no início do século XIX, sem a inserção de elementos resilientes entre os componentes do sistema que, por si só e passivamente, já seriam suficientes para reduzir consideravelmente a emissão de ruídos proveniente do sistema.

Para a redução do ruído de tração na fonte, provenientes de rodas e carris, deve-se melhorar rodas e eixos, de modo que a operação não produza alto desgaste e, conseqüentemente, rodas deformadas e barulhentas. O monitoramento e manutenção da qualidade da superfície do trilho, melhorando as condições de contato entre roda e trilho, o amortecimento de vibrações e a garantia de um bom lastro são essenciais à redução do ruído emitido.

Possibilidades na redução do ruído de propulsão na fonte para veículos pesados incluem blindagens mais eficientes nos motores e na transmissão, bem como melhores vedações nos compartimentos do motor. Nos sistemas de arrefecimento, deve-se atentar à eficiência dos silenciadores para redução da emissão de ruídos nos sistemas

de admissão e escape de ar. No caso de trens de alta velocidade, deve-se considerar ainda medidas de redução do ruído aerodinâmico.

Os ruídos de propulsão, no sistema de transporte ferroviário de cargas, são um problema se consideradas as locomotivas que se movem através de motores a combustão. Nas locomotivas movidas a eletricidade esse ruído é bastante reduzido, indicando que a substituição gradual do material rodante por locomotivas elétricas pode significar uma alternativa de mitigação do problema a longo prazo, restando a ser tratado apenas o ruído de tração.

Nota-se que, geralmente, os métodos de controle de ruído ambiental mostram-se mais eficientes na redução dos ruídos de alta frequência – devido às características físicas de ondas sonoras dessa natureza, de menor comprimento de onda – que dos ruídos de baixa frequência. Essa característica leva à dominância de sons de baixa e média-baixa frequências no ruído resultante, conferindo às áreas ferroviárias a complexidade de tratamento do ruído encontrada.

O planejamento voltado à qualidade do ambiente acústico deve ser incluído no estágio mais elementar do processo de produção das cidades, direcionando a aplicação de medidas favoráveis à manutenção de um ambiente acústico adequado nas áreas em processo de ocupação e direcionando esforços para a restituição desse ambiente acústico nas áreas ocupadas já degradadas. Entende-se que a observação dos parâmetros urbanos de uso e ocupação do solo tem potencial para reduzir o desconforto acústico observado na passagem das composições.

A discussão deste trabalho gira em torno da redução de ruído em termos de nível de pressão sonora, que permite uma verificação direta da melhoria percebida no ambiente acústico. A mitigação do ruído, no entanto, tem também papel importante nas modificações na composição da frequência e na variabilidade sonora em relação ao local, e pode influenciar na audibilidade de outros sons ambientais bem como modificar atributos de percepção sonora do ambiente.

Alguns dos ruídos oriundos da operação do ramal ferroviário, como buzinas e sinais de alerta, embora incômodos, desempenham um papel importante e não devem ser alvo de redução que impeça a concretização de seu fim. Há ainda a dificuldade de mitigação nos ruídos advindos dos sistemas de propulsão da composição, devida tanto à enorme quantidade de energia sonora emitida quanto à sua localização em altura

razoável em relação ao piso. Para o tratamento efetivo desse tipo de ruído, seriam necessárias altas barreiras que, no entanto, poderiam ser as responsáveis pela degradação ambiental e perda da escala humana no espaço em que estão instaladas.

A solução convencional para controle do ruído é a construção de barreiras acústicas, entretanto, há a possibilidade de combinação de elementos naturais e artificiais para possibilitar a redução do nível de pressão sonora sem que, no entanto, sejam criadas barreiras físicas de característica sectária ao longo de todo o trecho. A implantação de elementos não convencionais – mesmo que a redução sonora efetiva seja pequena se comparados aos elementos tradicionais – possibilita a melhora da qualidade percebida no ambiente.

Os efeitos benéficos da utilização conjunta de barreiras acústicas com design atrativo, árvores, arbustos, vegetação rasteira, pavimentos e revestimentos com tratamento superficial voltado à performance acústica podem ser observados na melhoria da qualidade ambiental, reduzindo a emissão de ruído na fonte e melhorando a qualidade percebida do ambiente acústico.

A perda por inserção verificada em cada um dos pontos estudados indica que, para o ruído de tração, as barreiras de trilho e, em algumas situações, a modelagem da dupla atenuação da soma das barreiras de trilho e barreiras de borda – que de fato ocorre em todas as situações, mas foi modelada apenas nos casos em que a barreira de trilho não foi suficiente para, sozinha, reduzir o nível de ruído equivalente ao máximo permitido – demonstram-se suficientes.

Já para o ruído de propulsão, percebe-se que os valores de perda por inserção obtidos ainda são insuficientes em boa parte dos casos, o que ocorre principalmente pelo elevado nível de energia sonora emitido pelos sistemas de propulsão e alerta, bem como pela distância da fonte ao solo (2,5m para a locomotiva estudada), dificultando a atenuação sem que sejam implantadas barreiras muito altas.

Essa constatação leva à conclusão que a abordagem integrada entre redução da emissão, implantação dos dispositivos de proteção na faixa de domínio e melhoria da proteção acústica nas edificações sujeitas ao ruído ferroviário – como por exemplo observando o atendimento à NBR 15.575 para os sistemas de vedação e esquadrias – é a estratégia mais indicada na mitigação do problema. A tabela 43 apresenta um resumo

das estratégias adotadas em cada uma das situações para garantia dos valores normativos de ruído equivalente.

Tabela 43 – Estratégias para redução do ruído equivalente

Estratégia	Elemento convencional	Elemento não convencional	P1	P2	P3	P4
Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica perfilada sobre base de concreto e ressoador na borda superior	X		X	X		
Barreira Acústica em policarbonato transparente cristal, com estrutura metálica perfilada sobre base de concreto e ressoador na borda superior, inclinada 30°	X				X	X
Barreira Acústica de trilho em concreto, com face interior em textura rugosa	X		X	X	X	X
Barreira Acústica em alvenaria chapiscada, com implantação de ressoador na borda superior	X		X	X		
Dupla atenuação dos ruídos de tração – Barreira de trilho + barreira de divisa	X				X	X
Esquadrias e vedações de vãos com atendimento ao desempenho preconizado na NBR 15.575					X	X
Vegetação arbórea e arbustiva com alta densidade foliar		X	X	X	X	X
Lastro em pedra britada e demais áreas com vegetação rasteira		X	X	X	X	X

Fonte: Elaborada pelo autor

Por fim, entende-se que realizar a melhoria ambiental necessária nas áreas lindeiras às ferrovias implica utilizar todas as ferramentas disponíveis: faz-se imprescindível combinar modelos clássicos e novas abordagens no controle do ruído, explorando os benefícios da percepção da paisagem sonora e os elementos que possam melhorar a percepção da qualidade ambiental.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as etapas deste trabalho foram registradas metodologicamente, inclusive os procedimentos de realização da Revisão Sistemática de Literatura, de forma a possibilitar sua reprodutividade e checagem, podendo ser aplicado em outras cidades cortadas por ramais ferroviários, com situação semelhante à de Juiz de Fora – MG.

A geometria das proposições baseia-se nos levantamentos físicos disponibilizados através dos arquivos do levantamento cadastral da cidade de Juiz de Fora, disponibilizado pela Prefeitura Municipal, somados as observações realizadas in loco durante as medições. No caso de efetiva implantação do sistema de redução de ruído ferroviário, faz-se necessário o levantamento planialtimétrico preciso de toda a faixa de domínio para que se obtenha os resultados mais precisos possíveis, já que para a redução da propagação de ruído as distâncias e dimensões são elementos de grande importância na realização dos cálculos.

Os pontos de medição e proposição escolhidos retratam a realidade de diversos usos e ocupações do solo urbano consolidados ao longo da linha férrea na cidade de Juiz de Fora, sem que necessariamente representem os padrões oficiais delineados pela legislação urbana em vigor. A comparação entre os parâmetros encontrados na situação existente, demonstrados nesse trabalho, e os modelados para o caso de observância da legislação no uso e ocupação do solo nas áreas lindeiras podem ser o tema de pesquisas futuras.

O estudo da paisagem sonora, geralmente, utiliza-se de entrevistas e observação dos usuários para chegar aos resultados integrados. Como este trabalho objetivou uma abordagem teórica do tema, de forma a verificar as potencialidades de aplicação no ambiente construído das linhas ferroviárias, tais ferramentas não foram utilizadas. Recomenda-se, portanto, que estudos futuros incluam tais ferramentas e abordem a questão.

Devido à amplitude do tema, a delimitação da pesquisa em apresentar e discutir os conceitos principais, bem como o recorte do estudo de caso com aplicação na cidade de Juiz de Fora, direciona a análise às características do ambiente ferroviário de trens de carga e impede que o tema seja avaliado sob a ótica dos trens urbanos de

passageiros, inexistentes na cidade, embora ambos compartilhem muitas de suas características principais.

A definição amostral do estudo de caso também pode ser considerada uma limitação, uma vez que, não sendo aleatória, reflete a escolha de pontos específicos da linha férrea que cruza a cidade de Juiz de Fora de acordo com critérios pré-determinados por características físico-ambientais e de ocupação lindeira, não podendo ser a amostra considerada como representativa de todas as situações existentes de passagens em nível.

A avaliação da paisagem sonora depende da aplicação de instrumentos, como entrevistas e mapas de seleção visual, para que se verifique a percepção do grupo de indivíduos acerca das características sonoras do ambiente acústico em que estão inseridos. Esta pesquisa não se utiliza de tais elementos, mantendo a avaliação do ambiente acústico com ênfase quantitativa e de atendimento aos parâmetros normalizados.

Por fim, apesar da coleta de dados para realização do estudo de ocorrer de acordo com as normas relativas e terem sido observados todos os parâmetros necessários ao bom andamento dos trabalhos, não foi possível obter o certificado de calibração para o sonômetro utilizado. O sonômetro foi calibrado utilizando-se de calibrador acústico que atende às especificações técnicas em perfeito estado de funcionamento, entretanto a limitação imposta pela inexistência de certificado de calibração torna os dados obtidos referenciais, sem o atendimento à obrigatoriedade normativa de existência do certificado de calibração emitido por organismo certificador.

## REFERÊNCIAS

ACIOLI, José de Lima. **Física Básica para Arquitetura**: mecânica, transmissão de calor, acústica. Brasília: Editora UnB, 1994.

ANDRADE, S. M. B. V. **A classe operária em Juiz de Fora**: uma história de lutas – 1912-1924. Juiz de Fora: EdUFJF, 1987.

ANSELMET, F.; MATTEI, P. **Acoustics, aeroacoustics and vibrations**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 14313:1999** - Barreiras Acústicas Para Vias de Tráfego – Características Construtivas. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

\_\_\_\_\_. **NBR 16313:2014** – Acústica – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 16425-1:2016** – Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes – Parte 1: Aspectos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR-10151:2000** - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR-10152:2017** – Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ATTENBOROUGH, K.; BASHIR, I.; HILL, T.;TAHERZADEH, S. DEFRANCE, J.; JEAN, P. Noise reduction using surface roughness. In: NILSON, M.E.; BENGTTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction**. London: CRC Press, 2015.

ATTENBOROUGH, K. TAHERZADEH, S.; BASHIR, I.; FORSSÉN, J.; VAN DER AA, B.; MÄNNEL, M. Porous ground, crops, and buried ressonators. In: NILSON, M.E.; BENGTTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction**. London: CRC Press, 2015.

BARBOSA, Y. A. **O processo urbano de Juiz de Fora**. Juiz de Fora: UFJF, Instituto de Ciências Humanas, 2013.

BISTAFA. S. R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**. São Paulo: Blücher. 2011.

BOTTELDOOREN, D.; ANDRINGA, T.; ASPURU, I.; BROWN, A. L.; DUBOIS, D.; GUASTAVINO, C.; KANG, J.; LAVANDIER, C.; NILSSON, M.; PREIS, A.; SCHULTE-FORTKAMP, B. From sonic environment to soundscape. In: KANG, J.; SCHULTE-FORTKAMP, B. **Soundscape and the built environment**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. **Norma DNIT 076/2006 – ES** – Tratamento ambiental acústico de áreas lindeiras da faixa de domínio – Especificação de serviço. 2006.

\_\_\_\_\_. Diretoria de Infraestrutura Ferroviária. **Parâmetros Indicadores de Intervenções em Áreas Urbanas**. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/download/consultaspublicas/ferroviario/Parametros%20Indicadores%20de%20Intervencoes%20em%20Areas%20Urbanas.pdf>. Acesso em 03/02/2018.

BROWN, A. L.; GJESTLAND, T.; DUBOIS, D. Acoustic environments and soundscapes. In: KANG, J.; SCHULTE-FORTKAMP, B. **Soundscape and the built environment**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

BRUINSMA, F.; PELS, E.; PRIEMUS, H.; RIETVELD, P.; WEE, B. **Railway Development: Impacts on Urban Dynamics**. Leipzig: Springer, 2008.

BRUNEAU, M. **Fundamentals of acoustics**. Chippenham: Iste, 2006.

BUCUR, V. **Urban Forest Acoustics**. Berlin: Springer, 2006.

DEFRANCE, J.; JEAN, P.; KOUSSA, F.; VAN RENTERGHEM, T.; KANG, J.; SMYRNOVA, Y. Innovative barriers. In: NILSON, M.E.; BENGTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction**. London: CRC Press, 2015.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Federal Railway Administration – FIA. **Urban rail noise abatement program**. Disponível em: <https://www.fra.dot.gov/Elib/Document/1692>. Acesso em 06/03/2018.

\_\_\_\_\_. **Control of Wheel/Rail Noise and Vibration**. Disponível em: <https://www.bart.gov/sites/default/files/docs/noisereport.pdf>. Acesso em 06/03/2018.

\_\_\_\_\_. **Determination of a Sound Level for Railroad Horn Regulatory Compliance**. Disponível em: <https://www.fra.dot.gov/eLib/Details/L02687>. Acesso em 06/03/2018.

FAHY, F.; WALKER, J. (Org.). **Advanced applications in acoustics, noise and vibration**. London: Spon Press, 2006.

FARINA, A. **Soundscape Ecology: principles, patterns, methods and applications**. Dordrecht: Springer, 2014.

FORSSEN, J.; KROPP, W.; KIHLMAN, T. Introduction to traffic noise abatement. In: NILSON, M.E.; BENGTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction**. London: CRC Press, 2015.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas de literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiol. Serv. Saúde**, Brasília, 23(1):183-184, jan-mar 2014.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: EdUFSC, 1992.

HARRISON, M. **Vehicle Refinement: controlling noise and vibration in road vehicles.** Burlington: Elsevier, 2004.

HOROSHENKOV, K.; KHAN, A.; BENKREIRA, H.; MANDON, A.; ROHR, A. Acoustic performance of vegetation and soil substratum in a urban context. In: NILSON, M.E.; BENGTTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction.** London: CRC Press, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12913-1** – Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual framework. Geneva: ISO, 2014.

\_\_\_\_\_. **ISO 1996-1** – Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures. Geneva: ISO, 2003.

\_\_\_\_\_. **ISO 1996-2** – Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels. Geneva: ISO, 2007.

\_\_\_\_\_. **ISO 140-3** – Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneva: International Organization for Standardization, 1995.

JACOBSEN, F.; POULSEN, T.; RINDEL, J. H.; GADE, A. C.; OHLRICH, M. **Fundamentals of acoustics and noise control.** Orsted: Technical University of Denmark, 2007.

JARVILUOMA, H.; VIKMAN, N. On Soundscape Methods and Audiovisual Sensibility. In: RICHARDSON, J.; GORBMAN, C.; VERNALLIS, C. **Oxford Handbook of New Audiovisual Aesthetics.** Oxford: Oxford University Press, 2015.

KANG, J.; HORNIKX, M.; RENTERGHEM, T.; SMYRNOVA, Y.; FORSSÉN, J.; CHEAL, C.; BOTTELDOOREN, D.; YANG, H.; JEON, J.; JANG, H.; TAHERZADEH, S.; ATTENBOROUGH, K.; MANDON, J. Vegetation in urban streets, squares, and courtyards. In: NILSON, M.E.; BENGTTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction.** London: CRC Press, 2015.

KANG, J.; SCHULTE-FORTKAMP, B. **Soundscape and the built environment.** Boca Raton: CRC Press, 2016.

KRUMHANS, C. L.; KESSLER, E. J. Tracing the dynamic changes in perceived tonal organization in a spatial representation of musical keys. **Psychological Review**, 89, 334-68. 1982.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica.** São Paulo: Atlas, 2017.

LESSA, J. **Juiz de Fora e seus pioneiros** – do caminho novo à proclamação. Juiz de Fora: EdUFJF, 1985.

MAEDA, T.; GAUTIER, P. E.; HANSON, C. E.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J. T.; SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D. VOS, P. (Org.) **Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems**. Heidelberg: Springer, 2012.

MAEKAWA, Z.; RINDEL, J. H.; LORD, P. **Environmental and Architectural Acoustics**. New York: Spon Press, 2011.

MENDONÇA, F. T. **Estudo de Barreira Acústica para Trens de Alta Velocidade no Trajeto Rio de Janeiro-Campinas (Região de Itatiaia)**. Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2014.

MIRANDA, S. R. **Cidade, capital e poder: políticas públicas e questão urbana na velha Manchester Mineira**. 1990. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, 1990.

MOURA, A. B. A. P.; MENON JÚNIOR, W.; FARIA, R. L.; ZAIDAN, R. T. Processamento Digital de Imagens LANDSAT como auxílio à classificação e análise da evolução da mancha urbana de Juiz de Fora-MG entre os anos de 1990 e 2011. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.24.11/doc/p0398.pdf> Acesso em 18/03/2018.

MRS LOGÍSTICA S.A. **Formulário de referências para acionistas 2016**. Disponível em: [http://ri.mrs.com.br/conteudo\\_pt.asp?idioma=0&conta=28&tipo=53957](http://ri.mrs.com.br/conteudo_pt.asp?idioma=0&conta=28&tipo=53957). Acesso em 13/06/2017.

MURGEL, E. **Fundamentos de acústica ambiental**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2007.

NIELSEN, J. C. O.; ANDERSON, D.; GAUTIER, P. E.; IIDA, M.; NELSON, J. T.; THOMPSON, D. TIELKES, T.; TOWERS, D. A.; VOS, P. (Org.) **Noise and vibration mitigation for rail transport systems**. Heidelberg: Springer, 2013.

NIEMEYER, M. L.; SLAMA, J. G. **Ruído e a cidade: elementos do ruído urbano**. In: RIO, V. D. (Org.). **Arquitetura: pesquisa & projeto**. São Paulo: Proeditores, Rio de Janeiro: FAU UFRJ, 1998.

NILSON, M.E.; BENGTTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction**. London: CRC Press, 2015.

ÖGREN, M. **Noise emission from railway traffic**. VTI report 559A. 2006. Disponível em [www.vti.se/publications](http://www.vti.se/publications). Acesso em 06/01/2018.

PADUIN, Fábio B. **Avaliação do desempenho acústico das barreiras através da técnica MLS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 1999.

SAMPAIO, J. C. R. **Triângulo da memória de Juiz de Fora**. s.l.: IPHAN, 2015. Disponível em: [http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/Artigo\\_do\\_Patrimonio\\_TrigMemoJF\\_Juilio\\_Sampaio.pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/Artigo_do_Patrimonio_TrigMemoJF_Juilio_Sampaio.pdf). Acesso em 12/01/2018.

SAMPAIO, R.F.; MANCINI, M.C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Rev. bras. fisioter.**, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 83-89, Feb. 2007.

SANDEMBERG, U. Tyre/road noise – myths and realities. In: Inter-noise 2001 the 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, The Hague, The Netherlands, 2001, August 28-30: **proceedings** / edited by Rinus Boone., pp.01-22. Disponível em <http://trove.nla.gov.au/work/29512299?selectedversion=NBD25016907>, acesso em 07/12/2016.

SCHAFER, R. M. **The soundscape**: our sonic environment and the tuning of the world. Rochester: Destiny Books, 1997.

SCHMID, A. L. **A ideia de conforto**: reflexões sobre o ambiente construído. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005.

SCHULTE-WERNING, B. THOMPSON, D. GAUTIER, P. E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; MAEDA, T.; VOS, P. (Org.) **Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems**. Heidelberg: Springer, 2008.

SOUZA, L. C. L. de; ALMEIDA, M. G.; BRAGANÇA, L. **Bê-á-bá da Acústica Arquitetônica**. São Carlos: EdUFSCar, 2006.

TEMPLETON, D.; SACRE, P.; MAPP, P.; SAUNDERS, D. **Acoustics in the built environment**: advice for the design team. Oxford: Architectural Press, 1997.

THOMPSON, D. **Railway noise and vibration**: mechanisms, modelling and means of control. Amsterdam: Elsevier, 2009.

VALQUES, I. J. B. **Avaliação da qualidade ambiental acústica urbana: parametrização e quantificação das variáveis que influenciam a percepção da paisagem sonora, através da análise multivariada, no campus sede da Universidade Estadual de Maringá**. 2016. Tese (Doutorado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

VAN RENTERGHEM, T.; BOTTELDOOREN, D.; KANG, J.; HOROSHENKOV, K.; YANG, H. Acoustical characteristics of trees, shrubs, and hedges. In: NILSON, M.E.; BENGTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction**. London: CRC Press, 2015.

VAN RENTERGHEN, T.; ATTENBOROUGH, K.; JEAN, P. Designing vegetation and tree belts along roads. In: NILSON, M.E.; BENGTSSON, J.; KLAEBOE, R. **Environmental Methods for Transport Noise Reduction**. London: CRC Press, 2015.

VOEGELIN, S. **Sonic possible worlds**: hearing the continuum of sound. New York: Bloomsbury, 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guidelines for community noise**. Geneva, 1999.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Urban Transport and health – sustainable transport**: a sourcebook for policymakers in developing cities. Geneva, 2011.



## ANEXOS

## ANEXO A – RELAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS

Sonômetro	
Marca	Instrutherm
Modelo	DEC-5030
Número de série	111103027
Tipo/classe	IEC 651 IEC 804 Type 2 IEC 1260 Class 2
Número do último certificado de calibração	-----
Data do último certificado de calibração	-----



Calibrador Acústico	
Marca	Instrutherm
Modelo	CAL-3000
Número de série	N446592
Tipo/classe	IEC942 Class 1
Número do último certificado de calibração	02885
Data do último certificado de calibração	02/2011



Termo Higrômetro Digital	
Marca	Instrutherm
Modelo	HTR-157
Número de série	050702491
Tipo/classe	Não se aplica
Número do último certificado de calibração	-----
Data do último certificado de calibração	-----



Termo Anemômetro Digital	
Marca	Instrutherm
Modelo	TARF-180
Número de série	Q602321
Tipo/classe	Não se aplica
Número do último certificado de calibração	-----
Data do último certificado de calibração	-----



Data Logger	
Marca	Instrutherm
Modelo	CDR-510
Número de série	H.224572 ou H.224580
Tipo/classe	Não se aplica
Número do último certificado de calibração	Não se aplica
Data do último certificado de calibração	Não se aplica



**ANEXO B – MODELO DE RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL****RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL****SUMÁRIO**

<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>166</b>
<b>2. NORMAS DE REFERÊNCIA .....</b>	<b>166</b>
<b>3. METODOLOGIA DO ENSAIO .....</b>	<b>166</b>
<b>3.1. Procedimento para medição de níveis de ruído em sistemas lineares de transporte .....</b>	<b>166</b>
<b>3.2. Desenvolvimentos.....</b>	<b>167</b>
<b>4. VISADAS.....</b>	<b>169</b>
<b>5. INSTRUMENTAÇÃO .....</b>	<b>171</b>
<b>5.1. Relação de Instrumentos utilizados.....</b>	<b>171</b>
<b>6. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....</b>	<b>172</b>
<b>7. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>172</b>

## 1. OBJETIVOS

Avaliação acústica do ruído operacional proveniente de sistema linear de transporte ferroviário na passagem em nível situada na:

Ponto 1 – Área Urbana de Uso Rural: (rua/avenida...), (bairro), coordenada geográfica...

Ponto 2 – Área Urbana de Uso Industrial: (rua/avenida...), (bairro), coordenada geográfica...

Ponto 3 – Área Urbana de Uso Misto: (rua/avenida...), (bairro), coordenada geográfica...

Ponto 4 – Área Urbana de Uso Residencial: (rua/avenida...), (bairro), coordenada geográfica...

## 2. NORMAS DE REFERÊNCIA

As medições de ruído realizadas e apresentadas neste relatório foram elaboradas de acordo com a metodologia especificada nos seguintes documentos normativos:

NBR 10.151 - Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento.

NBR 16.425 - Acústica — Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes - Parte 1: Aspectos gerais.

ISO 1996-1 – Acoustics – description measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures.

ISO 1996-2 – Acoustics – description measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Acquisition of data pertinent to land use.

ISO 1996-3 – Acoustics – description measurement and assessment of environmental noise. Part 3: Application to noise limits.

## 3. METODOLOGIA DO ENSAIO

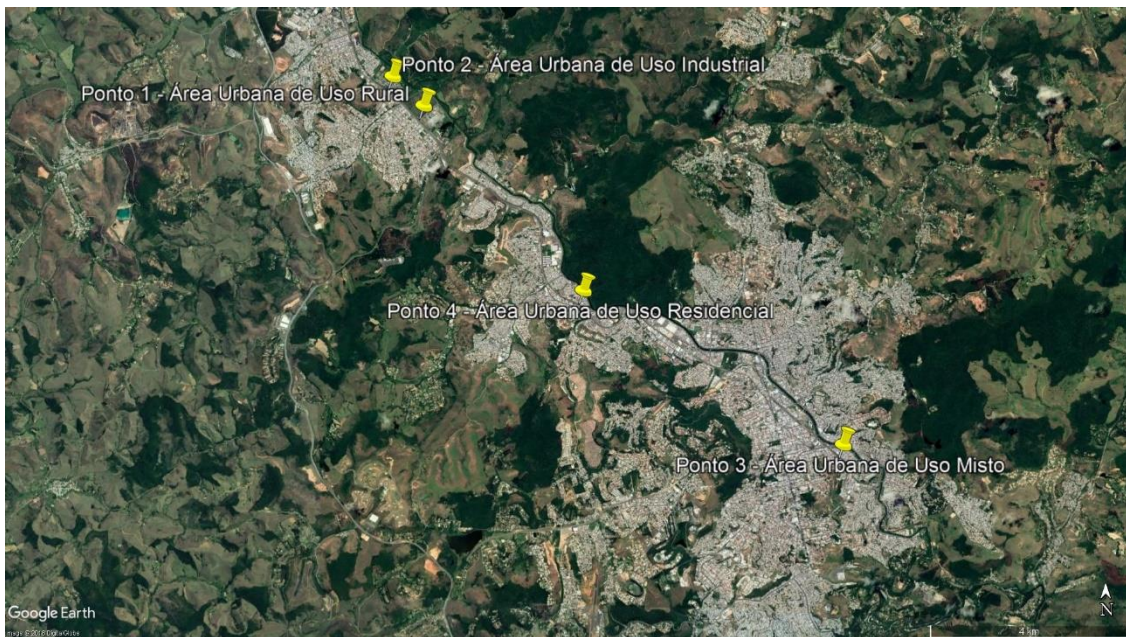
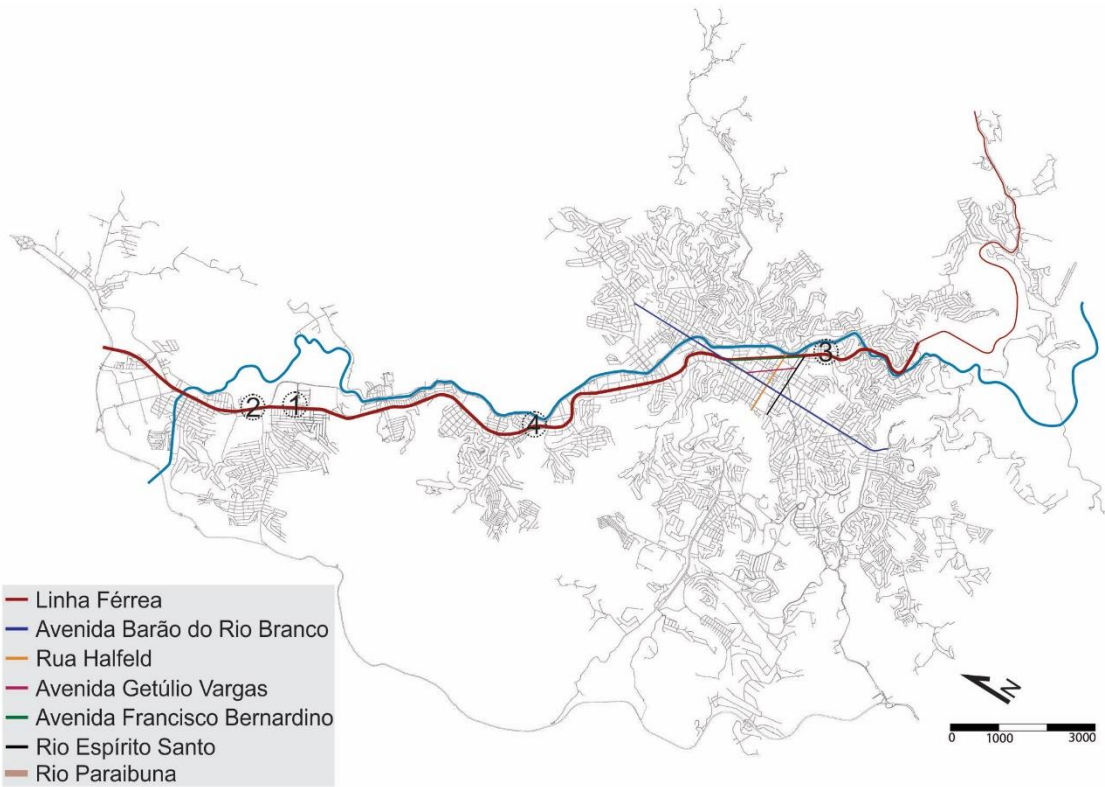
3.1. Procedimento para medição de níveis de ruído em sistemas lineares de transporte  
Condições Gerais:

- a) As medições de níveis de ruído devem ser realizadas fora da faixa de domínio do Sistema objeto de avaliação;
- b) As medições de níveis de ruído não devem ser realizadas em condições climáticas desfavoráveis tais como chuva ou rajadas de vento;
- c) O medidor de Nível de pressão Sonora deve estar provido de protetor de vento (Paravento);
- d) As medições de níveis de ruído devem ser realizadas em ambiente externo às edificações;

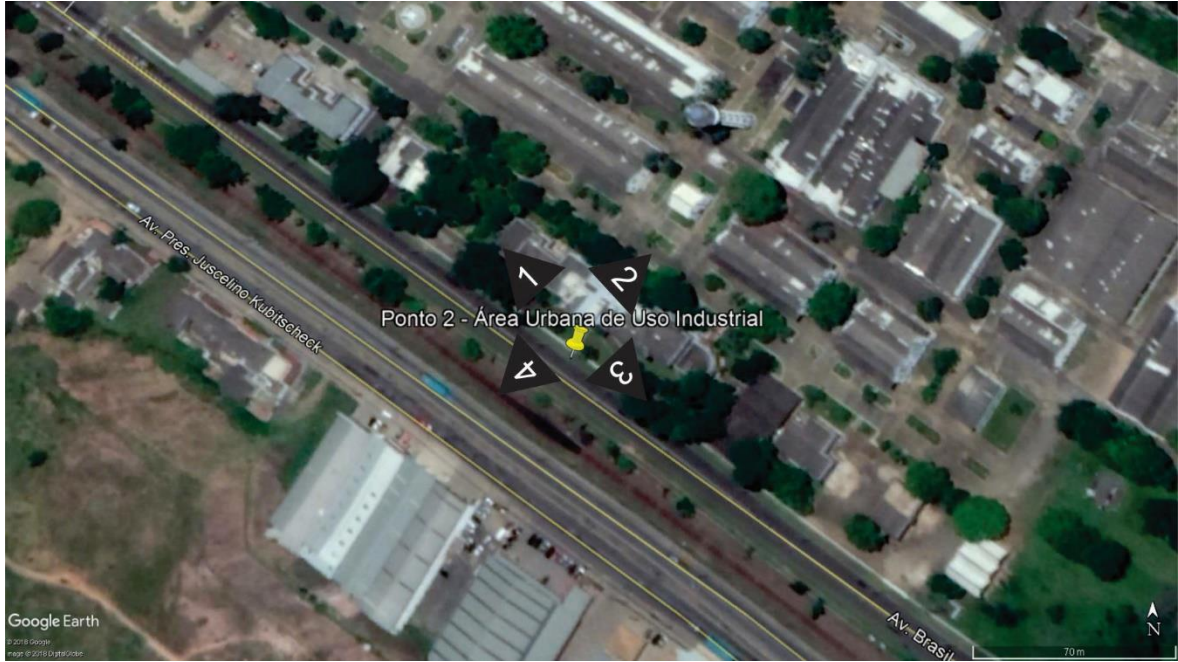
- e) O microfone do medidor de Nível de Pressão Sonora deve ser direcionado para o sistema objeto de avaliação;
- f) O medidor de Nível de Pressão Sonora deverá ser posicionado a 1,2 m do piso e pelo menos a 2 m de quaisquer superfícies refletoras de som, tais como muros, paredes, etc. Na impossibilidade de atender alguma destas recomendações, a descrição da situação medida deve constar no relatório com as devidas justificativas;
- g) As avaliações de níveis de ruído devem ser realizadas nos períodos em que a atividade represente a condição normal de operação do sistema;
- h) As interferências transitórias que ocorrem durante as medições deverão ser desprezadas e não deverão compor os níveis de ruído medidos. Este critério deverá ser utilizado tanto na avaliação de nível de ruído ambiente ( $L_{ra}$ ) quanto em outras medições;
- i) Nas avaliações, as interferências transitórias deverão ser descartadas das medições com o uso do recurso de “pausa” do sonômetro. Caso não seja possível paralisar a medição antes da integração da interferência aos níveis de ruído medidos, a medição deve ser descartada e nova medição deve ser iniciada;
- j) No relatório de medição deverão ser relatados todos os eventos ocorridos, descrevendo os episódios que foram excluídos e os que foram considerados.
- k) Para caracterização dos níveis de ruído deve ser adotado o tempo de medição mínimo de 10 (dez) minutos para cada ponto de medição, desde que o entre o 5º minuto e o 10º minuto a variação do  $L_{Aeq}$  acumulado seja igual ou menor a 0,5 dB(A);
- l) Quando a variação do  $L_{Aeq}$  acumulado entre o 5º minuto e o 10º minuto for maior que 0,5 dB(A), a avaliação deverá ser estendida até 15 (quinze) minutos, sendo encerrada se a variação do  $L_{Aeq}$  nos últimos 5 (cinco) minutos for menor ou igual a 0,5 dB(A).
- m) Caso o  $L_{Aeq}$  acumulado não se estabilizar em 15 minutos, a medição deverá ser cancelada e reiniciada uma nova medição;
- n) No relatório devem ser apresentados os níveis de ruído medidos ( $L_{Aeq}$ ) do 5º, 10º, e 15º minuto, se for o caso, para comparação da evolução do ruído no período avaliado;
- o) As avaliações nas áreas próximas às escolas não deverão ser realizadas nos horários de recreios, intervalos, entrada e saída de alunos;

### 3.2. Desenvolvimentos

As medições foram realizadas atendendo-se integralmente aos requisitos normativos. Os pontos de medição foram definidos de acordo com as características urbanas pretendidas, observando-se o zoneamento urbano, totalizando 5 pontos de medição próximos à ferrovia na cidade de Juiz de Fora, nos seguintes pontos: a) Ponto 1 – Área Urbana de Uso Rural; b) Ponto 2 – Área Urbana de Uso Industrial; c) Ponto 3 – Área Urbana de Uso Misto; d) Ponto 4 – Área Urbana de Uso Residencial.



#### 4. VISADAS







## 5. INSTRUMENTAÇÃO

### 5.1. Relação de Instrumentos utilizados

Sonômetro	
Marca	Instrutherm
Modelo	DEC-5030
Número de série	111103027
Tipo/classe	IEC 651 IEC 804 Type 2 IEC 1260 Class 2
Número do último certificado de calibração	-----
Data do último certificado de calibração	-----

Calibrador Acústico	
Marca	Instrutherm
Modelo	CAL-3000
Número de série	N446592
Tipo/classe	IEC942 Class 1
Número do último certificado de calibração	02885
Data do último certificado de calibração	02/2011

Termo Higrômetro Digital	
Marca	Instrutherm
Modelo	HTR-157
Número de série	050702491
Tipo/classe	Não se aplica
Número do último certificado de calibração	-----
Data do último certificado de calibração	-----



Termo Anemômetro Digital	
Marca	Instrutherm
Modelo	TARF-180
Número de série	Q602321
Tipo/classe	Não se aplica
Número do último certificado de calibração	-----
Data do último certificado de calibração	-----

Data Logger	
Marca	Instrutherm
Modelo	CDR-510
Número de série	H.224572 ou H.224580
Tipo/classe	Não se aplica
Número do último certificado de calibração	Não se aplica
Data do último certificado de calibração	Não se aplica

## 6. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Ponto de medição	
Coordenadas	21°41'49.87"S - 43°25'34.05"O
Distância Ferrovia-ponto	Aproximadamente 18 m
Velocidade do vento	0,8 m/s – NO-SE
Temperatura	26,7°C
Umidade relativa	53%
Horário inicial	14:35
Horário final	14:50
Passagem do trem	14:43– 14:46
L <sub>Aeq</sub> (5 minutos)	62,3 dB
L <sub>Aeq</sub> (10 minutos)	73,0 dB
L <sub>Aeq</sub> (15 minutos)	72,6 dB
L <sub>AE</sub>	102,1 dB
L <sub>Amáx</sub>	96,0 dB
L <sub>Amín</sub>	51,3 dB

## 7. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

- Trem em baixa velocidade;
- Trem com vagões carregados de minério de ferro;
- 3 locomotivas, sendo duas frontais e 1 posterior;
- 129 vagões;
- Trem buzinou devido a passagem em nível próxima;