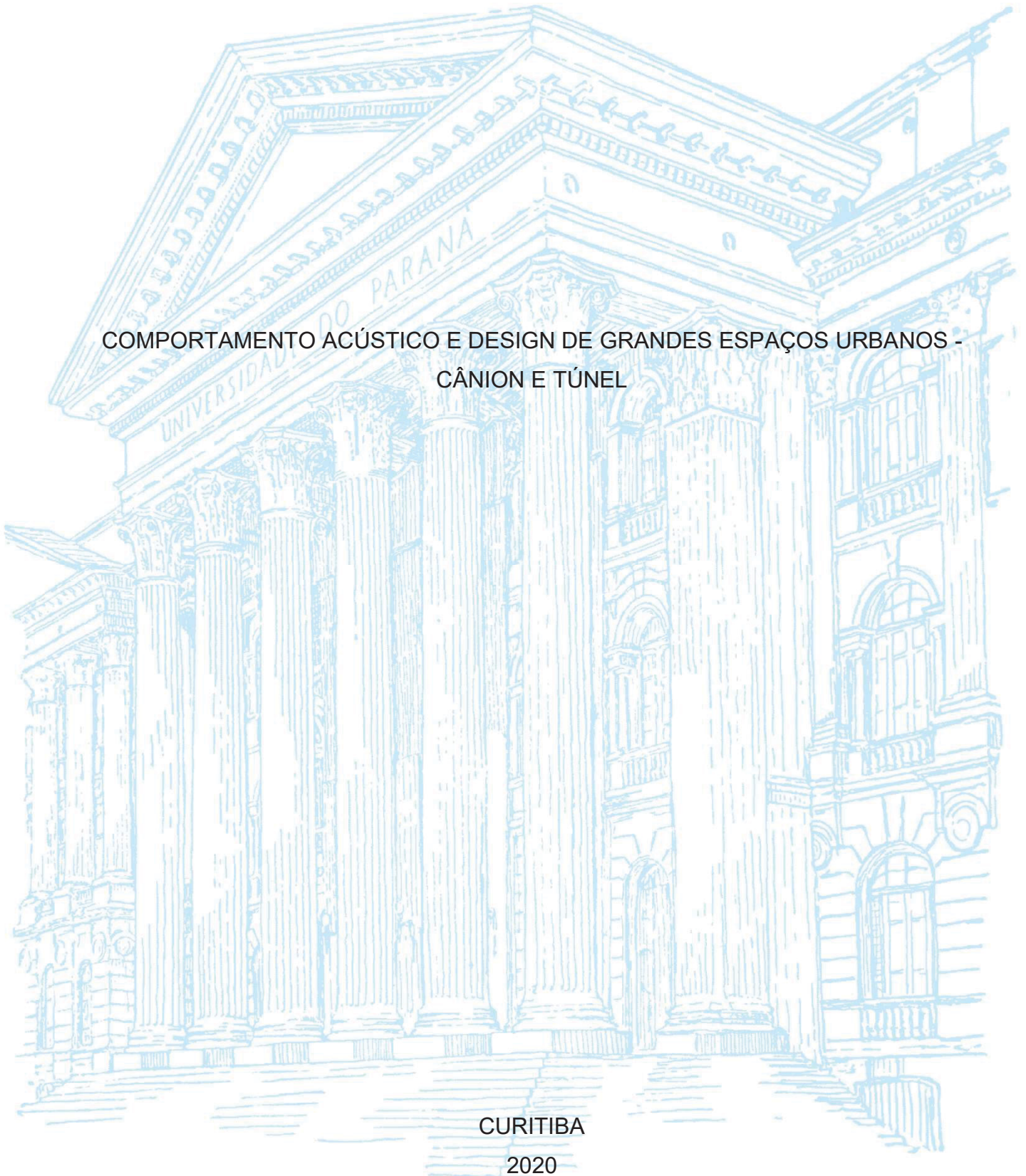


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE DO VALLE

COMPORTAMENTO ACÚSTICO E DESIGN DE GRANDES ESPAÇOS URBANOS -
CÂNION E TÚNEL



CURITIBA

2020

FELIPE DO VALLE

COMPORTAMENTO ACÚSTICO E DESIGN DE GRANDES ESPAÇOS URBANOS -
CÂNION E TÚNEL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial, no curso de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, SENAI-PR e Universität de Stuttgart.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Paulo Henrique Trombetta Zannin

Co-Orientadora: Dipl.-Ing. Eva Veres

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

V181c Valle, Felipe do
Comportamento acústico e design de grandes espaços urbanos - cânion e túnel [recurso eletrônico] / Felipe do Valle. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2020.

Orientador: Paulo Henrique Trombetta Zannin.
Coorientadora: Eva Veres.

1. Ruído urbano. 2. Trânsito - Ruído. 3. Poluição sonora. 4. Espaços urbanos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Zannin, Paulo Henrique Trombetta. III. Veres, Eva. IV. Título.

CDD: 344.0463

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE
URBANO E INDUSTRIAL - 40001016057P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FELIPE DO VALLE** intitulada: **COMPORTAMENTO ACÚSTICO E DESIGN DE GRANDES ESPAÇOS URBANOS - CÂNION E TÚNEL**, sob orientação do Prof. Dr. PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 21 de Dezembro de 2020.

PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

CHRISTINE LAROÇA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

A meus pais Adilma Maria Ramos do Valle e Orlei de Jesus Gomes do Valle, pelo amor, ensinamentos, compreensão e apoio incondicionais.

As minhas irmãs Janaína e Tatiane, pelo incentivo ao fazer pós-graduação e palavras de conforto.

A minha amada Tamiris Xavier Campos, pelo apoio, atenção, carinho e paciência em todos os momentos desse período.

A meus queridos amigos Anderson Leão Frigo e Marina Wosniack pela acolhida na Alemanha, companheirismo e todos os anos de amizade.

A todos meus colegas da 11ª turma do Programa de Pós-graduação Meio Ambiente Urbano e Industrial, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Henrique Trombetta Zannin pela ajuda constante, compartilhamento de conhecimento, incentivador e amizade.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI), em especial, Dra. Daniela Neuffer, Dra. Margarete Casagrande Lass Erbe, Dra. Karen J. do Amaral, Dr. Klaus Fischer, Dr. Uwe Menzel, Dr. Jörg Metzger e Dra. Arislete Dantas de Aquino, pelo comprometimento, dedicação e organização de toda a estrutura necessária para o funcionamento do programa.

Aos professores e colegas do *Institut für Akustik und Bauphysik* (IABP) da Universidade de Stuttgart, Prof. Philip Leistner, Dipl.-Ing. Eva Veres, Dipl.-Ing. Mathias Brodbeck e Dipl.-Phys Xiaoru Zhou, pela orientação, compartilhamento de conhecimento e companheirismo.

Ao serviço Alemão de Intercâmbio acadêmico *Deutscher Akademischer Austausch Dienst* (DAAD) pelo apoio financeiro referente à bolsa Estudar na Alemanha 2019/2020, que possibilitou o intercâmbio com a Universidade de Stuttgart, fundamental aprendizado e realização deste trabalho.

RESUMO

Sabe-se que residentes de grandes centros urbanos estão expostos à poluição sonora urbana diariamente, em especial, pela parcela gerada através do grande fluxo de veículos em vias urbanas, chamado de ruído de tráfego. É de conhecimento ainda, que o ruído ambiental pode acarretar impactos negativos, com prejuízos ao meio ambiente, à qualidade de vida e à saúde da população. Desse modo, estudos que visam reduzir os efeitos da poluição sonora e, conseqüentemente, melhorar a qualidade de vida da população, são de extrema relevância. Em divisões territoriais de espaços urbanos, como quadras ou blocos, projetistas devem considerar lacunas entre ou em edificações para garantir o acesso de pessoas e veículos. Mesmo entre complexos de edifícios paralelos, são necessárias aberturas para conectar os vários espaços abertos entre si. Entretanto, no que diz respeito à transmissão do som, essas lacunas são consideradas "pontos fracos", pois facilitam a passagem do ruído de tráfego para espaços sensíveis ao ruído como, habitações, escritórios, hospitais ou escolas. Dessa forma, este estudo elaborado na cidade de Stuttgart/DE avaliou a influência de túneis cânions urbanos, designados como espaços abertos, na transmissão do ruído de tráfego para locais posteriores a estes espaços. Para isso, foram realizadas medições *in situ* do nível de pressão sonora equivalente (LAeq), gerado pelo ruído de tráfego na *Rotebühlstraße* em Stuttgart/DE. Em seguida, com o auxílio dos softwares *Sketchup®* e *ODEON 15.15 Auditorium®*, foram elaboradas simulações acústicas, empregando variações de aspectos geométricos (CxLxA) e de coeficientes de absorção sonora das superfícies internas dos espaços abertos. Com os dados obtidos, observou-se que os NPS incidentes sobre fachadas localizadas após os espaços abertos, estão acima do recomendado pela instrução técnica alemã para proteção ao ruído, *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)* (1998) e norma brasileira ABNT NBR 10.151 (2020). Ainda, os resultados demonstraram que as dimensões dos espaços abertos afetam significativamente os níveis sonoros sobre fachadas, principalmente àquelas localizadas no sentido dos espaços abertos. Os dados obtidos também demonstraram que a instalação de revestimentos com características de absorção sonora nas superfícies internas de túneis e cânions é uma medida viável do ponto de vista técnico, pois, resultou em atenuação de NPS sobre fachadas posteriores, na ordem de até 22 dB(A).

Palavras-chave: Ruído ambiental. Simulações acústicas. Espaços abertos urbanos. NPS sobre fachadas. Transmissão sonora. Absorção sonora.

ABSTRACT

It is known that residents of large urban centres are exposed daily to urban noise pollution due to the portion generated by the massive flow of vehicles on urban roads, called traffic noise. It is also known that environmental noise can have negative impacts, with damage to the environment, quality of life, and health of the citizens. Therefore, studies that aim to reduce the effects of noise pollution and, consequently, improve the population's quality of life are highly relevant. Urban territorial divisions of urban spaces, such as quarters or blocks, designers must consider gaps between, or in buildings, to guarantee access for people and vehicles. Even between complexes of parallel buildings, openings are necessary to connect the various open spaces. However, regard to the transmission of sound, these gaps are considered as "weak points" as they facilitate the passage of traffic noise to noise-sensitive spaces such as houses, offices, hospitals, or schools. Thus, the present work carried out in Stuttgart/DE city, evaluated the influence of urban canyons and tunnels, designated as open spaces or gaps, to investigate the transmission of traffic noise to places after these gaps. For this purpose, were carried out measurements of the equivalent sound pressure level (LAeq) generated by traffic noise at *Rotebühlstraße* in Stuttgart/DE. Then, with the application of Sketchup® and ODEON 15.15 Auditorium® software, acoustic simulations were developed, using variations of geometric aspects (LxWxH) and sound absorption coefficients of the internal surfaces of open spaces. With the data obtained, it was observed that facades located after large gaps are currently exposed to noise levels above the limits stipulated by German technical instruction, *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)* (1998) and Brazilian standard ABNT NBR 10.151 (2020). The results also showed that the dimensions of open spaces significantly affect the sound levels on facades, especially those located towards open spaces. The data obtained also demonstrated that coatings with sound absorption characteristics on the internal surfaces of tunnels and canyons are a viable measure from a technical point of view, since it resulted in the reduction of SPL over posterior facades, in the order of up to 22 dB(A).

Keywords: Environmental noise. Acoustic simulations. Building Gaps. SPL on facades. Sound transmission. Sound absorption.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PERCEPÇÃO DA POPULAÇÃO ALEMÃ AO RUÍDO	21
FIGURA 2 – PERCEPÇÃO DA POPULAÇÃO BRASILEIRA AO RUÍDO	22
FIGURA 3 - CURVAS DE PONDERAÇÃO	31
FIGURA 4 - ONDA SONORA INCIDINDO SOBRE UMA SUPERFÍCIE	32
FIGURA 5 - EXEMPLO DE MATERIAL ABSORVENTE – LÃ MINERAL	34
FIGURA 6 - ESQUEMA DE TRANSMISSÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO.....	41
FIGURA 7 - SEÇÃO DE TÚNEL EM ROTEBÜHLSTRAÙE - STUTTGART	42
FIGURA 8 - SEÇÃO DE CÂNION EM ROTENWALDSTRAÙE - STUTTGART	43
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DAS FACHADAS PÓS TÚNEL.....	44
FIGURA 10 - TÚNEL AVALIADO EM ROTEBÜHLSTRAÙE	44
FIGURA 11 - TÚNEL EM ROTEBÜHLSTRAÙE	45
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DAS FACHADAS PÓS CÂNION	45
FIGURA 13 - CÂNION AVALIADO EM ROTEBÜHLSTRAÙE	46
FIGURA 14 - CÂNION EM ROTEBÜHLSTRAÙE	46
FIGURA 15 - PONTOS DE MEDIÇÃO	47
FIGURA 16 - MEDIDOR ACÚSTICO	48
FIGURA 17 - AJUSTE DAS FONTES DE NPS.....	51
FIGURA 18 - LAYOUT DE FONTES E RECEPTORES – TÚNEL (a) E CÂNION (b).....	52
FIGURA 19 - LISTA DE MATERIAIS ODEON	52
FIGURA 20 – EXEMPLO DE ESCALA DE CORES – 1000HZ	53
FIGURA 21 –DELIMITAÇÃO DE INTERESSE - TÚNEL (a) e CÂNION (b).....	54
FIGURA 22 - NPS (DB) E SUAS COMPONENTES EM 1/1 DE OITAVA.....	58
FIGURA 23 - COMPONENTES POR BANDA DE 1/1 DE NA ESCALA (A).....	59
FIGURA 24 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO TÚNEL	60
FIGURA 25 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO TÚNEL – LAYOUT	61
FIGURA 26 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO CÂNION.....	61
FIGURA 27 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO CÂNION– LAYOUT	62
FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DO “MUNDO” – TÚNEL (a) E CÂNION (b).....	62
FIGURA 29 - GRIDE DO MODELO NO ODEON – TÚNEL (a) E CÂNION (b)	63
FIGURA 30 - SITUAÇÃO ATUAL TÚNEL – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS.....	64
FIGURA 31 - TÚNEL - MAPA ACÚSTICO PARA SITUAÇÃO ATUAL EM 1000HZ..	65
FIGURA 32 - SITUAÇÃO ATUAL CÂNION – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS.....	66

FIGURA 33 – CÂNION - MAPA ACÚSTICO ATUAL.....	66
FIGURA 34 - TÚNEL LARGURA - 4M	69
FIGURA 35 - TÚNEL LARGURA - 5M	69
FIGURA 36 - TÚNEL LARGURA - 6M	70
FIGURA 37 - TÚNEL ALTURA – 3,5M.....	72
FIGURA 38 - TÚNEL ALTURA - 4M.....	72
FIGURA 39 - TÚNEL COMPRIMENTO – 12M.....	74
FIGURA 40 - CÂNION LARGURA - 3M	76
FIGURA 41 - CÂNION LARGURA - 5M	77
FIGURA 42 - CÂNION LARGURA - 6M	77
FIGURA 43 - CÂNION COMPRIMENTO – 15M.....	79
FIGURA 44 - TÚNEL COM MATERIAL 10% ABSORVENTE	82
FIGURA 45 - TÚNEL COM MATERIAL 30% ABSORVENTE	82
FIGURA 46 - TÚNEL COM MATERIAL 50% ABSORVENTE	83
FIGURA 47 - TÚNEL COM MATERIAL 70% ABSORVENTE	83
FIGURA 48 - CÂNION COM MATERIAL 10% ABSORVENTE	86
FIGURA 49 - CÂNION COM MATERIAL 30% ABSORVENTE.....	87
FIGURA 50 - CÂNION COM MATERIAL 50% ABSORVENTE	87
FIGURA 51 - CÂNION COM MATERIAL 70% ABSORVENTE.....	88
FIGURA 52 - NÍVEIS SONOROS MEDIDOS X LIMITES – dB(A).....	89
FIGURA 53 - NPS SIMULADOS SOBRE FACHADAS – SITUAÇÃO ATUAL.....	91
FIGURA 54 – TÚNEL - VARIAÇÃO DA LARGURA (L).....	93
FIGURA 55 - TÚNEL – NPS SOBRE FACHADAS VARIANDO A LARGURA (L).....	94
FIGURA 56 – TÚNEL - VARIAÇÃO DA ALTURA (A).....	96
FIGURA 57 - TÚNEL – NPS VARIANDO A ALTURA (A).....	97
FIGURA 58 – TÚNEL - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO (C).....	98
FIGURA 59 - TÚNEL – NPS VARIANDO O COMPRIMENTO (C).....	99
FIGURA 60 - CÂNION - VARIAÇÃO DA LARGURA (L)	101
FIGURA 61 - CÂNION – NPS VARIANDO A LARGURA (L).....	102
FIGURA 62 – CÂNION - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO (C).....	104
FIGURA 63 - CÂNION – NPS VARIANDO COMPRIMENTO (C).....	105
FIGURA 64 – TÚNEL - VARIAÇÃO DOS MATERIAIS	107
FIGURA 65 - TÚNEL – NPS VARIANDO MATERIAIS.....	108
FIGURA 66 – CÂNION - VARIAÇÃO DOS MATERIAIS	111

FIGURA 67 - CÂNION – NPS VARIANDO OS MATERIAIS112

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - EFEITOS SUBJETIVOS DA DIFERENÇA DOS NPS	19
QUADRO 2 - NPS EM DB X PA.....	30
QUADRO 3 - VARIAÇÕES EM COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA	35
QUADRO 4 - COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A LÃ DE VIDRO.	35
QUADRO 5 - DIMENSÕES AVALIADAS – MODELO TIPO TÚNEL.....	49
QUADRO 6 - DIMENSÕES AVALIADAS – MODELO TIPO CÂNION	50
QUADRO 7 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – LIMITES ESTIPULADOS PELA TA LÄRM	37
TABELA 2 – LIMITES ESTIPULADOS PELA ABNT NBR 10.151.....	38
TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE NORMAS BRASIL E ALEMANHA	39
TABELA 4 - COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO MATERIAL ATRIBUÍDO	56
TABELA 5 - COMPONENTES POR BANDA EM 1/1 OITAVA DAS MEDIÇÕES.....	57
TABELA 6 - FATORES DE CORREÇÃO PARA PONDERAÇÃO (A).....	58
TABELA 7 - COMPONENTES POR BANDA DE 1/1 DE NA ESCALA (A).....	59
TABELA 8 - CALIBRAÇÃO DOS MODELOS.....	63
TABELA 9 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 4M.....	67
TABELA 10 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 5M.....	68
TABELA 11 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 6M.....	68
TABELA 12 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM ALTURA DE 3,5M.....	71
TABELA 13 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM ALTURA DE 4M.....	71
TABELA 14 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM COMPRIMENTO DE 12M.....	73
TABELA 15 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 3M	75
TABELA 16 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 5M	75
TABELA 17 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 6M	75
TABELA 18 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM COMPRIMENTO DE 15M	78
TABELA 19 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 10% ABSORVENTE	80
TABELA 20 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 30% ABSORVENTE	80
TABELA 21 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 50% ABSORVENTE	81
TABELA 22 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 70% ABSORVENTE	81
TABELA 23 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 10% ABSORVENTE	84
TABELA 24 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 30% ABSORVENTE	85
TABELA 25 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 50% ABSORVENTE	85
TABELA 26 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 70% ABSORVENTE	86
TABELA 27 - NPS SIMULADOS SOBRE ÀS FACHADAS X LIMITES	91
TABELA 28 – NPS SIMULADOS VARIANDO LARGURA DO TÚNEL (L).....	93
TABELA 29 – NPS SIMULADOS VARIANDO ALTURA DO TÚNEL (A).....	96
TABELA 30 – NPS SIMULADOS VARIANDO COMPRIMENTO DO TÚNEL (C)	99
TABELA 31 – NPS SIMULADOS VARIANDO LARGURA DO CÂNION (L).....	102
TABELA 32 – NPS SIMULADOS VARIANDO COMPRIMENTO DO CÂNION (C)	105

TABELA 33 – TÚNEL - ALTERANDO COEFICIENTES DE ABSORÇÃO	108
TABELA 34 - CÂNION - ALTERANDO COEFICIENTES DE ABSORÇÃO	112

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

x	- Constante que depende do gás [1,4 para ar]
R	- Constante universal dos gases [8,31 J / K mol]
T	- Temperatura absoluta do gás [K]
M	- Peso molar do gás [kg / mol]
t	- Tempo de medição [s]
c	- Velocidade do som [m / s]
f	- Frequência [Hz]
T	- Período [s]
W	- Potência sonora [W]
W_0	- Valor de referência da potência sonora [W]
W_1	- Valor de potência sonora a ser comparada [W]
$I_{n(i)}$	- Intensidade sonora normal [W / m^2]
S_i	- Elemento de área [m^2]
I	- Intensidade sonora [W / m^2]
L	- Nível sonoro [B]
NPS	- Nível de Pressão Sonora em Bel[B]
S	- Área [m^2]
Leq	- Nível equivalente de pressão sonora [dB]
$LAeq$	- Nível equivalente de pressão sonora ponderada em A[dB(A)]
S_i	- área da i-ésima superfície [m^2]
N	- Número de superfícies existentes
LAVG	- Average sound level [dB(A)]
p_1	- Valor da pressão sonora a ser comparada [Pa]
p_0	- Valor de referência da pressão sonora
P	- Pressão sonora [Pa]
p_{ef}^2	- Pressão sonora efetiva [Pa]
$p(t)$	- Pressão sonora instantânea [Pa]
ζ	- Coeficiente de reflexão do som
τ	- Coeficiente de transmissão do som
α	- Coeficiente de absorção do som

α_i	- Coeficiente de absorção sonora da i-ésima superfície
ε	- Porosidade
A_{sur}	- Absorção sonora em uma superfície [m ²]
$I_{incidente}$	- Intensidade sonora do som incidente [W / m ²]
$I_{transmitida}$	- Intensidade sonora transmitida [W / m ²]
$I_{refletida}$	- Intensidade sonora refletida [W / m ²]
$I_{absorvida}$	- Intensidade sonora absorvida [W / m ²]
V_v	- Volume de vazios da amostra [m ³]
V_t	- Volume total da amostra [m ³]
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
BMUB	- Germany Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety
NBR	- Norma Brasileira Regulamentadora
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
CONAMA	- Conselho Nacional De Meio Ambiente
OMS	- Organização Mundial de Saúde
IBP	- <i>Institute for Building Physics</i>
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
IEC	- <i>International Electrotechnical Commission</i>
BimSchG	- Legislação Alemã para Controle de Emissões
TA Lärm	- Instrução Técnica Alemã para Proteção ao Ruído

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	POLUIÇÃO SONORA.....	19
2.1.1	Fontes de Ruído Urbano	20
2.1.2	Ruído de Tráfego Rodoviário.....	20
2.1.3	Impactos da poluição sonora.....	22
2.2	CONTROLE DO RUÍDO AMBIENTAL.....	23
2.3	FUNDAMENTOS ACÚSTICOS	24
2.3.1	Caracterização do Som	24
2.3.2	Velocidade do som	25
2.3.3	Frequência Sonora	25
2.3.4	Fonte Sonora	26
2.3.5	Potência Sonora	26
2.3.6	Intensidade Sonora.....	27
2.3.7	Pressão Sonora.....	27
2.3.8	Nível de Pressão Sonora.....	28
2.3.9	Nível Sonoro Equivalente	30
2.3.10	Medidor de nível de pressão sonora.....	31
2.3.11	Superfícies.....	32
2.3.12	Reflexão, Transmissão e Absorção do som	33
2.4	LEGISLAÇÕES E NORMAS	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES DE RUÍDO	40
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ESPAÇOS ABERTOS.....	41
3.3	LOCAIS DE ESTUDO.....	43
3.4	MEDIÇÕES ACÚSTICAS	47
3.5	SIMULAÇÕES ACÚSTICAS.....	48
3.5.1	Modelagem Arquitetônica	48

3.5.2	Simulações Computacionais	50
3.5.3	Calibração do Modelo.....	54
3.6	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO.....	54
3.7	MEDIDAS DE MITIGAÇÃO	55
4	RESULTADOS	57
4.1	MEDIÇÕES ACÚSTICAS	57
4.2	SIMULAÇÕES ACÚSTICAS.....	60
4.2.1	Modelos arquitetônicos.....	60
4.2.2	Simulações Computacionais	63
4.2.3	Calibração do Modelo.....	63
4.2.4	Túnel – situação atual.....	64
4.2.5	Cânion - situação atual.....	65
4.2.6	Simulações Acústicas – Variação das dimensões.....	67
4.2.6.1	Variação da largura do túnel.....	67
4.2.6.2	Variação da altura do túnel.....	70
4.2.6.3	Variação do comprimento do túnel	73
4.2.6.4	Variação da largura do cânion.....	74
4.2.6.5	Variação do comprimento do cânion	78
4.2.7	Variação dos materiais como medida de mitigação.....	79
4.2.7.1	Variação dos materiais - Túnel.....	79
4.2.7.2	Variação dos materiais - Cânion.....	84
5	DISCUSSÕES	89
5.1	MEDIÇÕES ACÚSTICAS	89
5.2	SIMULAÇÕES ACÚSTICAS.....	90
5.2.1	Situação atual.....	90
5.2.2	Variação das dimensões	92
5.2.2.1	Variação da largura – Túnel	93
5.2.2.2	Variação da altura – Túnel.....	95
5.2.2.3	Variação do comprimento – Túnel	98
5.2.2.4	Variação da largura – Cânion	101
5.2.2.5	Variação do Comprimento - Cânion.....	104
5.2.3	Medidas de Mitigação - Variação dos materiais	107
5.2.3.1	Variação dos materiais – Túnel	107
5.2.3.2	Variação dos materiais – Cânion.....	110

6	CONCLUSÕES	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

1 INTRODUÇÃO

Segundo Kolicheski (2016) a poluição ambiental é uma questão bastante discutida na atualidade e está dentre os maiores problemas enfrentados pela sociedade moderna. Isso é decorrente não apenas de um, mas de uma série de fatores, como o mau uso dos recursos naturais, o desmedido crescimento populacional e o aumento da atividade industrial.

Trabalhos sobre poluição ambiental inicialmente estudavam a poluição atmosférica proveniente da combustão de carvão, entretanto, a partir da década de 1970, diante de pressões populares para se estabelecer políticas mais eficientes para o controle da poluição, houve o interesse em estudar outras formas de poluição. Assim, através de movimentos antipoluição e da crescente pressão popular, ocorreu uma conscientização maior sobre poluição atmosférica, hídrica, do solo e sobre a poluição sonora (GITTINS; CLAY; BASSET, 1999).

Seguindo o apelo da sociedade, assim como em outras grandes metrópoles, a cidade de Stuttgart começou a avaliar sistematicamente o ruído ambiental na década de 1970. Como medida para controle de ruído, o município lançou em 1978 o programa para instalação de janelas acústicas para moradores próximos a ruas movimentadas. Outra medida adota a partir de 1983, foi o mapeamento do ruído de tráfego através de medições em toda a área urbana de Stuttgart. Após o mapeamento acústico foram criadas 270 zonas de uso, 30 zonas de velocidade e cerca de 90 barreiras acústicas foram construídas (STUTTGART, 2019).

A poluição sonora é uma das principais formas de poluição ambiental do mundo, sendo responsável direta por impactos negativos, com prejuízos ao meio ambiente e à qualidade de vida da população (WHO, 2011). Sintomas como irritabilidade, zumbido, dores de cabeça, insônia, estresse, aumento de pressão arterial, distúrbio do sono e perda auditiva, estão relacionados à exposição do homem ao ruído (BELOJEVIC et. al., 1997; MASCHKE, 1999; BISTAFA, 2006; GERAVAND et. al., 2015).

Além dos efeitos diretos à saúde da população, a poluição sonora também pode acarretar impactos econômicos negativos, haja vista que, imóveis afetados pelo ruído podem sofrer desvalorização frente ao mercado imobiliário (ELLER, 2000, SCATOLINI & ELLER, 2008; TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2008; FURLANETTO, 2012; SOUZA et. al., 2017).

Ainda, estudos elaborados ao longo dos anos têm demonstrado que os efeitos negativos do ruído sobre a qualidade de vida, estão se tornando cada vez mais perceptíveis e, que grande parcela da população se sente incomodada pela poluição sonora. De acordo com pesquisa *online* realizada em 2016 pela Agência Alemã do Meio Ambiente (*Umweltbundesamts*), 76% da população na Alemanha se sente irritada com o ruído do tráfego rodoviário. Além disso, aproximadamente 59% se queixam do ruído da vizinhança, 46% do ruído industrial e comercial, 44% do ruído das aeronaves e 38% do ruído do tráfego ferroviário (BMUB, 2016).

Demais estudos realizados em grandes metrópoles pelo mundo, corroboram o desconforto causado pela poluição sonora e apontam o ruído de tráfego como sendo a principal fonte de incômodo entre a população (GRIFFITHS & LANGDON, 1968, ZANNIN et. al., 2002; ANDERSSON et. al., 2010; ENGEL, 2012; FILHO, 2014).

Em decorrência dos problemas expostos, há a necessidade de desenvolver dispositivos para a mitigação do ruído ambiental. Logo, devem ser empregadas medidas de controle para o ruído ambiental, seja em caráter técnico, público, legal ou administrativo. Deste modo, este trabalho apresenta, de maneira inovadora, uma metodologia para avaliação do comportamento acústico em espaços urbanos em ou entre edificações (tuneis e cânions), utilizados como passagens entre ruas no contexto urbano.

1.1 JUSTIFICATIVA

Residentes de grandes centros urbanos estão expostos diariamente aos efeitos acarretados pela poluição sonora urbana, em especial pelo ruído de tráfego. Desde modo, estudos que visam reduzir os efeitos da poluição sonora e, conseqüentemente, melhorar a qualidade de vida da população, são de extrema relevância.

Em divisões territoriais de espaços urbanos, como quadras ou blocos, projetistas devem considerar lacunas entre, ou em edificações, para garantir o acesso de pessoas e veículos. Mesmo entre complexos de edifícios paralelos, são necessárias aberturas para conectar os vários espaços abertos entre si.

Entretanto, no que diz respeito à transmissão do som para os espaços abertos ou separados, essas lacunas são consideradas “pontos fracos”, pois, facilitam a passagem do ruído de tráfego em ruas movimentadas, para locais construídos

sensíveis ao ruído como, habitações, escritórios, hospitais e escolas. Logo, este estudo subsidiará projetistas, poder público e a população, na compreensão dos efeitos acústicos causados pelos espaços abertos, na transmissão de níveis de pressão sonora sobre fachadas posteriores às lacunas. Ainda, serão propostas soluções construtivas para adequação dos níveis de pressão sonora em regiões semelhantes aos objetos de estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento acústico em grandes espaços abertos de edificações urbanas, descritos como seções de cânion e túnel na cidade de Stuttgart/DE.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fachadas de primeiro andar em edifícios urbanos impactadas pelo ruído ambiental na cidade de Stuttgart/DE;
- Reconhecer a(s) principal(is) fonte(s) urbana de ruído ambiental na cidade de Stuttgart/DE;
- Identificar os espaços abertos urbanos objetos de estudo, na cidade de Stuttgart/DE;
- Quantificar qualidade acústica atual sobre fachadas localizadas após espaços abertos urbanos;
- Quantificar a transmissão sonora entre espaços livres urbanos, relativo às suas geometrias e materiais construtivos;
- Comparar resultados segundo diretrizes especificadas em normas brasileiras e alemãs;
- Avaliar panorama geral da qualidade acústica sobre as fachadas localizadas após espaços abertos urbanos;
- Propor medidas mitigadoras, visando o conforto acústico da população e enquadramento com normatizações vigentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o melhor discernimento sobre os aspectos fundamentais de acústica, nesta seção serão aprofundados os conceitos fundamentais que permeiam o tema proposto.

2.1 POLUIÇÃO SONORA

O ruído pode ser definido como a propagação sonora de forma não harmoniosa, ou seja, os diversos movimentos oscilatórios se combinam e produzem um movimento resultante, cujas oscilações são desarmônicas (KINSLER et. al., 1982). O ruído também é definido como um som indesejável, sendo normalmente o resultado de atividades humanas do dia a dia (HASSAL & ZAVERI, 1979; GERGES & ARENAS, 2010). Para Goelzer et. al. (2001), a diferença entre som e ruído reside também na percepção subjetiva das pessoas, pois ambos constituem o mesmo fenômeno físico. O que para uma pessoa é música pode ser ruído para outra (RUSSO, 1999; SCHAFER, 2001).

A QUADRO 1 apresenta o efeito subjetivo para algumas variações em decibéis (HASSAL & ZAVERI, 1979).

QUADRO 1 - EFEITOS SUBJETIVOS DA DIFERENÇA DOS NPS

Variações do Nível ΔL (dB)	Efeitos Subjetivos
3	Apenas perceptível
5	Claramente perceptível
10	Duas vezes mais ou menos perceptível

FONTE: Hassal & Zaveri (1979).

Fisicamente, o ruído é considerado como um sinal acústico aperiódico, originado da superposição de vários movimentos de vibrações composto por inúmeras frequências, as quais não apresentam relação entre si. O resultado é um sinal complexo, sem uma frequência fundamental fixa (NEPOMUCENO, 1994; MOTTA, 2005). Pode ser classificado segundo o seu nível de intensidade (RUSSO, 1999):

- Ruído contínuo estacionário – apresenta variações de níveis desprezíveis durante o período de observação;

- Ruído contínuo não estacionário – o nível varia significativamente durante o período de observação;
- Ruído contínuo flutuante – o nível varia continuamente de um valor apreciável durante o período de observação;
- Ruído intermitente – o nível cai ao valor de fundo (ruído de fundo) várias vezes durante o período de observação;
- Ruído de impacto ou impulsivo – apresentado em picos de energia acústica de duração inferior a um segundo em intervalos superiores a um segundo.

Deve-se salientar que o som ou o ruído só tem sentido se existir um receptor, isto é, quando é captado por um ouvido humano ou animal. O cérebro reconhece as vibrações sonoras que entram pelo ouvido e dão ao ser humano ou ao animal uma sensação que caracteriza a percepção daquele som ou ruído (CALIXTO, 2013).

2.1.1 Fontes de Ruído Urbano

A combinação de diferentes fontes sonoras presentes em grandes centros urbanos, como alarmes, sirenes de ambulâncias, igrejas, obras de construção civil, ruído de tráfego, indústrias, têm contribuído para o aumento dos níveis de sonoros, podendo tornar o ambiente urbano desagradável. Muitas vezes o impacto sonoro prejudica a realização de diferentes tarefas, como por exemplo: estudar, trabalhar e até mesmo descansar (GUEDES et. al., 2011; SZEREMETA, 2007; MILANEZ, 2013).

Em grandes metrópoles, as principais fontes de ruído urbano podem ser agrupadas como: transporte (aeroviário, rodoviário ou ferroviário), industrial e construção civil. Ainda, existe o ruído gerado pelo lazer, atividades militares, comércio e serviço (GUEDES, 2005).

2.1.2 Ruído de Tráfego Rodoviário

O agente caracterizador da poluição sonora urbana é denominado de ruído urbano ou ruído ambiental, considerado um ruído complexo, pois é composto de várias parcelas de ruídos secundários, provenientes de fontes e atividades diversas

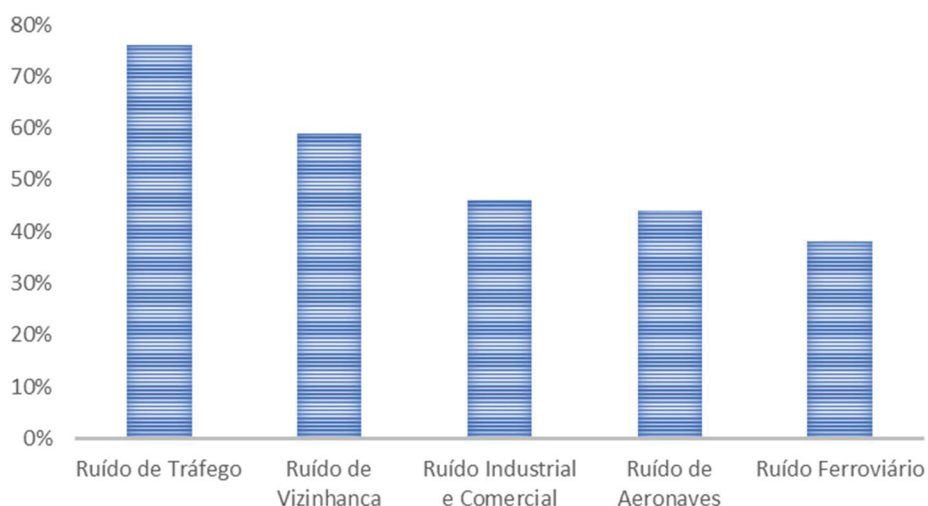
(WHO, 2011). Sendo assim, para eliminar ou atenuar este tipo de ruído, é necessário intervir em cada parcela que o compõe (WHO, 2011).

O ruído de tráfego rodoviário é uma fração do ruído gerado e irradiado lateralmente a uma rodovia, que agrega as fontes de trânsito, estejam estas desempenhando funções de passagem (circulação e estacionamento) ou de serviços (obras rodoviárias) (VDA, 1978; JOHNSON & SANDERS, 1968).

O ruído proveniente do tráfego rodoviário em grandes centros urbanos, dentre todas as fontes existentes, é a parcela que mais contribui para a poluição sonora urbana, uma vez que, em termos de duração é considerado permanente e não pontual, isto é, não se limita a uma única área (KHAN et. al., 2018; ZANNIN et. al., 2019). Devido a dinâmica urbana de ocupações próximas a rodovias, a população está fortemente influenciada pela modulação do ambiente acústico correlato ao ruído rodoviário (GILES-CORTI et. al., 2016).

Estudo realizado por BMUB (2016) apontou que: "1) A principal fonte de ruído na Alemanha vem do ruído do tráfego; 2) 70% dos alemães se sentem irritados com o barulho; 3) A exposição a ruídos noturnos acima de 40 dB (A) podem levar a problemas de saúde; 4) 10% das residências estão expostas a níveis equivalentes de pressão sonora (L_{eq}) acima de 66 - 70 dB (A)" (FIGURA 1).

FIGURA 1 – PERCEPÇÃO DA POPULAÇÃO ALEMÃ AO RUÍDO

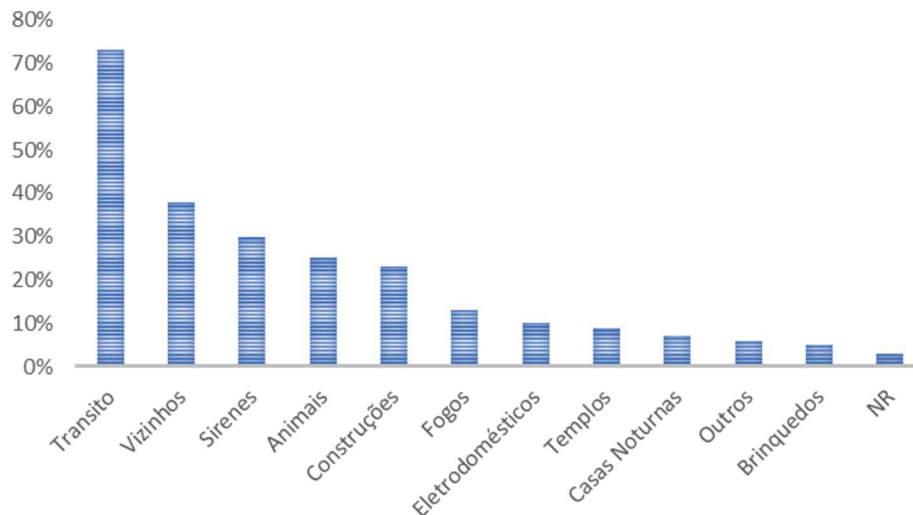


FONTE: BMUB (2016)

Em concordância com os resultados obtidos na Alemanha, o estudo elaborado por Zannin *et al.* (2002) traçando a reação da população de Curitiba ao ruído

ambiental, apontou que das 863 pessoas entrevistadas, 73% indicaram o ruído de tráfego urbano como principal fonte de desconforto (FIGURA 2).

FIGURA 2 – PERCEPÇÃO DA POPULAÇÃO BRASILEIRA AO RUÍDO



FONTE: Zannin *et al.* (2002)

É importante atentar também que o ruído de tráfego é uma parcela do ruído ambiental, sendo a resultante do somatório de diversos tipos de ruído provenientes de fontes em trânsito (ex.: automóveis, ônibus, trens etc.) (JOHNSON & SANDERS, 1968).

2.1.3 Impactos da poluição sonora

O ruído ambiental ocorre quando num determinado ambiente o som altera a condição normal de audição capaz de provoca efeitos psicológicos e/ou fisiológicos nos indivíduos, sendo os mais comuns: irritabilidade, baixa concentração, insônia e dores de cabeça, distúrbios do sono, redução de oportunidades de repouso, diminuição da produtividade, deterioração da qualidade de vida, distúrbios digestivos, falta de concentração, fadiga, aumento da pressão arterial, estresse e perda da audição (MASCHKE, 1999; DE SOUZA, 2000; BASNER *et. al.*, 2014; MOREL *et. al.*, 2016).

Ainda, a poluição sonora pode acarretar perdas econômicas devido à desvalorização de imóveis em regiões ruidosas (FURLANETTO, 2012; SOUZA *et. al.*,

2017). Estima-se que, para cada 1 dB de ruído acima do permissível por lei, há uma desvalorização de 1,07% sobre o valor imobiliário de residências em Glasgow, Escócia (LAKE et. al., 1998). Outro estudo ainda apontou que 60% da população sueca pagaria 10% mais caro para ter um isolamento sonoro melhor (RASMUSSEN, 2004).

2.2 CONTROLE DO RUÍDO AMBIENTAL

Considerando-se os possíveis impactos relacionados à exposição humana e animal ao ruído ambiental, torna-se necessária a adoção de medidas para o controle desse aspecto ambiental. Comumente, não é possível eliminar completamente o ruído indesejado, entretanto, devem ser respeitados os critérios mínimos de aceitabilidade, determinados por legislações, normas e estudos científicos.

Em áreas impactadas pelo ruído ambiental, uma parte importante do processo de controle é identificar as fontes de ruído e classificá-las em termos de contribuições para o ruído excessivo. Quando os requisitos para controle de ruído foram quantificados e as fontes identificadas e classificadas, é possível considerar várias opções de controle e, finalmente, determinar o custo-benefício das várias opções (BIES & HANSEN, 2002).

De acordo com Calixto (2013), as áreas de riscos devem ser tratadas por meio da redução do nível de pressão sonora equivalente. Para o controle efetivo do ruído ambiental, existem três métodos que podem ser utilizados isoladamente ou em conjunto:

- 1) Controle na fonte - A redução do ruído na fonte consiste no enclausuramento das fontes de ruídos ou na substituição por fontes menos ruidosas.

- 2) Controle na transmissão - Ao considerar o controle na transmissão do ruído da fonte ao receptor, alguns ou todos os seguintes tratamentos precisam ser considerados: barreiras (paredes simples), gabinetes parciais ou gabinetes completos de equipamentos, gabinetes locais para componentes ruidosos em uma máquina, reativos ou dissipativos silenciadores (o primeiro para ruídos de baixa frequência ou pequenos escapamentos, o

segundo para saídas de alta frequência ou de grande diâmetro), dutos revestidos ou câmaras de ar revestidas para sistemas de tratamento de ar, isolamento de vibração de máquinas de estruturas que irradiam ruído, absorvedores de vibrações e amortecedores, controle ativo de ruído e adição de material absorvente de som a espaços reverberantes para reduzir os campos de ruído refletidos.

3) Controle no receptor - Em alguns casos, pode ser necessário aplicar o controle de ruído ao receptor do ruído excessivo. Esse tipo de controle pode envolver o uso de protetores auriculares, tampões para os ouvidos ou outras formas de proteção auditiva; afastar receptores das fontes de ruído; janelas acústicas, reduzir o tempo de exposição ao ruído; e educação e ênfase em relações públicas para problemas de ruído na comunidade.

Hierarquicamente, apenas quando as duas primeiras medidas de controle não forem suficientes, métodos de controle no receptor devem ser empregados. O controle do ruído na origem é mais efetivo, pois, é focando em ações na fonte geradora de ruído, com capacidade de ganho mais abrangente na qualidade sonora ambiente.

2.3 FUNDAMENTOS ACÚSTICOS

2.3.1 Caracterização do Som

O som pode ser caracterizado como o resultado de um impulso vibracional causado por flutuações de pressão através de um meio elástico como o ar, a água, o concreto ou qualquer outro meio sólido, líquido ou gasoso. Esse meio sofre repetidas compressões e expansões moleculares, que se propagam em forma de ondas, a partir da fonte sonora (FILHO et. al., 2014).

Os impulsos vibracionais são perceptíveis ao ouvido humano dentro da faixa no qual ocorram na faixa de 20 a 20 mil oscilações por segundo (GERGES, 2000; MÖSER, 2004; BISTAFA, 2006). Assim, um sinal acústico pode surgir de diversas fontes como, por exemplo, turbulência do ar ou de outro gás, a passagem de um corpo através de um fluido ou o impacto de um sólido com outro sólido (RAICHEL, 2000).

É de fundamental importância a compreensão que não há deslocamento permanente de moléculas, ou seja, não há a transferência de matéria, apenas energia (exceto, por exemplo, nas proximidades de uma explosão) (GERGES, 2000).

2.3.2 Velocidade do som

Dependendo do meio de propagação do som, o tempo necessário para a energia ser transferida de uma partícula para a sua vizinha varia. A causa direta desse fato é a mudança da velocidade do som de acordo com o meio. Assim, para o meio gasoso a velocidade do som (c) é definida conforme EQUAÇÃO 1 (DINIZ, 2003):

$$c = \sqrt{\frac{xRT}{M}} \quad (1)$$

Onde,

c = velocidade do som [m / s]

x = constante que depende do gás [1,4 para o ar]

R = constante universal dos gases [8,31 J / K mol]

T = temperatura absoluta do gás [K]

M = peso molecular do gás [$2,87 \cdot 10^{-2}$ Kg / mol para o ar]

O ar é considerado como meio de propagação para a maioria das aplicações em acústica, sendo utilizado no presente trabalho. Utilizando os valores aplicáveis para o ar, obtém-se a velocidade de propagação do som no ar igual a 344m/s a 20°C.

2.3.3 Frequência Sonora

Frequência é o número de repetições de um evento por unidade de tempo. A frequência sonora é o número de ocorrência de uma onda sonora, a partir de uma vibração, em um segundo. A unidade mais utilizada para frequência sonora é o Hertz (Hz). A frequência é usualmente chamada de inverso do período, definida pela EQUAÇÃO 2 (HARRIS, 1993; RUSSO, 1997; RUSSO et. al., 2011):

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

Onde,

f = frequência [Hz].

T = período [s]

Segundo Bistafa (2006) o ouvido humano consegue detectar sons na faixa de frequência de 20 Hz a 20 KHz. Sons com frequência abaixo de 20 Hz chamam-se infrassons e sons com frequência acima de 20 KHz são os ultrassons.

2.3.4 Fonte Sonora

A fonte sonora é um corpo, objeto ou sistema de onde se origina o som (HASSAL, 1979). Os tipos de fontes mais usuais são:

- **Pontuais:** quando apresentam dimensões bastante inferiores em relação à distância até o receptor;
- **Fonte em linha:** quando é considerada composta por muitas fontes pontuais dispostas sequencialmente, formando uma irradiação contínua;
- **Fonte em área:** quando uma fonte ou um conjunto de fontes apresenta-se disposta em uma área de perímetro fechado, e suas dimensões são consideráveis ou perceptíveis em relação à distância até o receptor.

2.3.5 Potência Sonora

A potência sonora é definida como a quantidade de energia irradiada em uma unidade de tempo por uma fonte sonora, expressa em Watts [W]. O valor da potência sonora não depende de fatores externos à fonte de interesse. Tecnicamente pode-se resolver a potência sonora através da integração da intensidade sonora, sobre uma superfície de medição, a qual envolve completamente a fonte sonora conforme EQUAÇÃO 3 (HARRIS, 1979):

$$W = \sum_{i=1}^n I_{n(i)} S_i \quad (3)$$

Onde,

W = potência sonora [W]

$I_{n(i)}$ = intensidade sonora normal [W / m²]

S_i = elemento de área [m²]

2.3.6 Intensidade Sonora

O som se propaga em todas as direções a partir da fonte, sendo assim, a energia dividida em uma área cada vez maior. Essa divisão da energia fará com que a intensidade do som caia com sua propagação. Dessa forma, a intensidade sonora (I) pode ser definida como a potência sonora da fonte dividida pela área perpendicular à propagação sonora. A unidade mais utilizada para a intensidade sonora é o watt por metro ao quadrado [W / m²] (BISTAFA, 2006).

A intensidade sonora pode ainda ser expressa em função da potência sonora, para uma fonte omnidirecional, como apresentado na EQUAÇÃO 4 (ISO, 1994):

$$I = \frac{W}{S} \quad (4)$$

Onde,

I = Intensidade sonora [W / m²]

W = Potência sonora [W]

S = Área [m²]

2.3.7 Pressão Sonora

O movimento das partículas em um meio elástico, em torno do seu ponto de equilíbrio, provoca a geração de variações de pressão. Sendo essa variação função da propagação do som, esta recebe a denominação de pressão sonora. A unidade usual para a pressão sonora é o Pascal [Pa] ou Newton por metro quadrado [N / m²] (GERGES, 2000).

O valor de referência para pressão sonora é de aproximadamente $2 \cdot 10^{-5}$ Pa ou 20 µPa (vinte micro Pascal), a partir do qual o ouvido humano apresenta sensação auditiva, ou seja, o limiar de audibilidade (KINSLER et. al., 1982; BESS & HUMES, 1998; ZANNIN, 2004).

Ao longo da realização de uma medição, existe a ocorrência de diferentes valores de pressão sonora (pressões instantâneas) para um dado espaço de tempo.

Portanto, para obter um valor único representativo, denominado de pressão sonora efetiva, emprega-se a expressão dada pela EQUAÇÃO 5 (BIES & HANSEN, 2003; BERANEK & VÉR, 1992):

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t} \int_0^t P_{(T)}^2 dt \quad (5)$$

Onde,

p_{ef}^2 = pressão sonora efetiva [Pa]

t = tempo de medição [s]

$P_{(T)}$ = pressão sonora instantânea [Pa]

2.3.8 Nível de Pressão Sonora

Por definição, o Nível de Pressão Sonora (NPS), correspondente à pressão de referência, em decibel, é dez vezes o logaritmo de base dez da razão entre o quadrado da pressão sonora efetiva pela pressão sonora de referência. Como supracitado, o menor valor da pressão sonora mínima para audibilidade é de aproximadamente $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Já no limite superior, tem-se que o limiar da dor ocorre a uma pressão sonora de aproximadamente 400 Pa.

Devido à grande faixa de variação do som, tornou-se mais apropriado o emprego de uma escala logarítmica com uma base de referência. Desta forma, adotou-se o limiar da audição humana, 1 Bel, para essa base (BISTAFA, 2006).

O Bel (em homenagem a Alexander Graham Bell) é a unidade de nível que indica a faixa entre duas quantidades proporcionais. Então, 1 decibel é a décima parte de 1 Bel, ou seja, 0,1 Bel, denominado como Logaritmo de Briggs ou decimal da relação entre duas grandezas quadráticas (HARRIS, 1998; NEPOMUCENO, 1968).

A expressão matemática geral que define o nível de uma potência qualquer, em Bel, é definida pela fórmula 6 (ROSSING et. al., 1990; SCHULTZ, 1972).

$$N = \log \frac{W_1}{W_0} \quad (6)$$

Onde:

N = Nível de potência [B]

W₁ = Valor da potência a ser comparada [W]

W_0 = Valor de referência da potência [W]

Como a potência sonora é proporcional ao quadrado da pressão sonora, é possível então, a utilização da escala Bel para medição dos níveis de pressão sonora, como sendo o logaritmo da relação existente entre um determinado valor de pressão sonora e a pressão sonora mínima de referência (EQUAÇÃO 7):

$$NPS = \log \frac{p_1^2}{p_0^2} \quad \text{ou} \quad NPS = 2 \log \frac{p_1}{p_0} \quad (7)$$

Onde,

NPS = Nível de pressão sonora em Bel [B]

p_1 = valor da pressão sonora a ser comparada [Pa]

p_0 = valor de referência da pressão sonora [$2 \cdot 10^{-5}$ Pa]

Para níveis de pressões sonoras, foi definido o uso de um submúltiplo do Bel, o decibel [dB], devido a faixa dos valores de pressões sonoras estudadas em acústica.

Assim, a expressão que define o nível de pressão sonora em decibel é dada pela EQUAÇÃO 8 (GERGES, 2000; SCHULTZ, 1972):

$$NPS = 10 \log \frac{p_1^2}{p_0^2} \quad \text{ou} \quad NPS = 20 \log \frac{p_1}{p_0} \quad (8)$$

Onde,

NPS = NPS referente ao nível de referência em decibel [dB],

p_1 = pressão sonora medida [Pa],

p_0 = pressão sonora de referência [$2 \cdot 10^{-5}$ Pa]

A relação de níveis de pressão sonora em dB com a pressão sonora em Pa pode ser observada no QUADRO 2.

QUADRO 2 - NPS EM DB X PA

NPS (dB) Ref. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa	P [Pa]	Exemplos
130	--	Sirene de alarme pública (a 2 m. dist.)
120	20	Dinamômetros motores diesel (a 1 m. dist.)
110	--	Serra fita (p/madeira ou metais a 1 m. dist.)
90	--	Caminhão diesel 80 kh/h (a 15 m. dist.)
80	0,2	Escritório barulhento
70	--	Carro passageiros 80 kh /h (a 15 m. dist.)
60	0,02	Conversação normal (a 1 m. dist.)
40	0,002	Local residencial tranquilo
30	--	Tic-tac de relógio
0	0,00002	Limiar de audibilidade

FONTE: Santos & Matos (1996).

2.3.9 Nível Sonoro Equivalente

Além do nível de pressão sonora, o tempo de exposição ao qual uma pessoa está sujeita deve ser considerado. Como os níveis sonoros variam em função do tempo, calcula-se então o nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}).

O nível de pressão sonora equivalente é um nível constante médio que equivale, em termos de energia acústica, aos níveis variáveis do ruído durante o período de medição, expresso em decibel (dB) e dado pela EQUAÇÃO 9 (SCHULTZ, 1996):

$$L_{eq} = 10 \log \left\{ \left(\frac{1}{t} \right) \left[\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \right\} \text{ [dB]} \quad (9)$$

Onde,

L_{eq} = nível de pressão sonora equivalente [dB]

$t = (t_2 - t_1)$ = tempo total de duração [s]

$p(t)$ = pressão sonora instantânea [Pa]

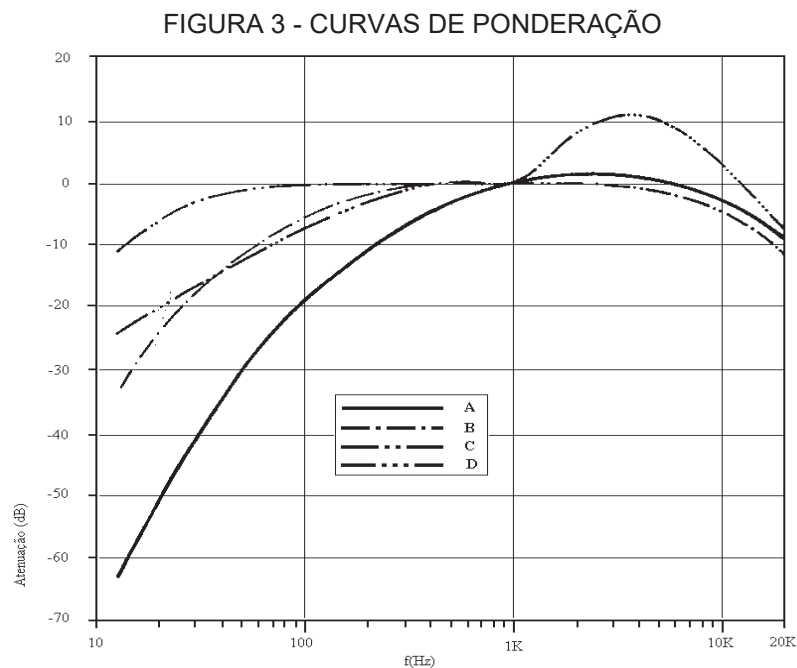
p_0 = pressão sonora de referência [$2 \cdot 10^{-5}$ Pa]

O grau de prejuízo que certo ruído pode provocar à audição depende tanto de sua intensidade como também da sua duração. Sendo assim, um nível equivalente (L_{eq}) pode resultar no mesmo grau de lesão auditiva que um nível variável considerado no mesmo intervalo de tempo, até um limite de aproximadamente 115 dB, a partir do qual uma exposição de curta duração pode causar uma lesão (GERGES, 2000).

2.3.10 Medidor de nível de pressão sonora

A medição de níveis de pressão sonora possui o objetivo de avaliar o nível sonoro em regiões sob influência de indústrias, rodovias, ferrovias, obras civis, aeroportos, entre outras atividades, visando o conforto da comunidade residente.

Para levantamentos de NPS ambiente são utilizados medidores de nível de pressão sonora (sonômetros). Estes equipamentos registram de forma direta o nível de pressão sonora de um fenômeno acústico, expressando o resultado em dB. Podem ser do tipo simples que fornece apenas o nível global em dB(A) ou sofisticados com recursos que oferecem resultados em dB linear (A, B, C ou D), dB impulso, espectro e/ou em outras escalas (FIGURA 3), sendo apresentado com filtro analógico ou digital (GERGES, 2000; ANJELO, 2013).



FONTE: Calixto (2002).

Medidores de nível sonoro apresentam um circuito de medição que podem ter respostas lentas (*slow*) ou rápidas (*fast*). Respostas lentas são empregadas em medições de ruído cujo nível varia excessivamente, em situações de grande flutuação, obtendo-se um valor médio (L_{eq}). Já as respostas rápidas são empregadas para medir ruído contínuo e para determinar valores extremos de ruídos intermitentes. Tais equipamentos são dotados de filtros de ponderação, cujo intuito é fazer com que os

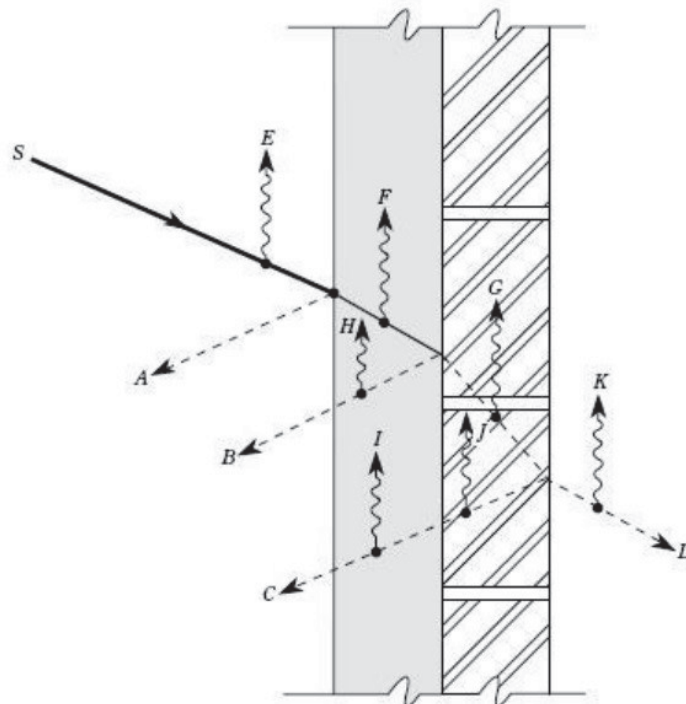
níveis sonoros captados pelos medidores sejam devidamente corrigidos para assemelharem-se à percepção do som pelo ouvido humano. Tais curvas de compensação são designadas pelas letras de A até D (BERANEK & VÉR, 1992; BIES & HANSEN, 2002; SANTOS & MATOS, 1996).

Os equipamentos de medição devem atender a critérios tecnológicos mínimos orientados pela *international electrotechnical commission* (IEC), caso contrário, não será possível fazer a correta caracterização do som.

2.3.11 Superfícies

Quando o som atinge uma determinada superfície ocorrem reflexões, absorções e transmissões do som. Segundo o princípio da conservação da energia, esta não pode ser criada ou destruída nestes choques. Sendo o som capaz de transportar energia através da vibração das partículas, parte dele é absorvido pela superfície através de calor por exemplo (OLIVEIRA, 2009). A FIGURA 4 mostra os processos que ocorrem quando uma onda sonora incide sobre uma superfície, onde **A**, **B** e **C** representam reflexões, **D** é a onda transmitida e **E** a **K** representam dissipações de energia na forma de calor

FIGURA 4 - ONDA SONORA INCIDINDO SOBRE UMA SUPERFÍCIE



FONTE: Adaptado de Valle (2009)

2.3.12 Reflexão, Transmissão e Absorção do som

A reflexão do som acontece quando a energia sonora proveniente da onda incidente retorna ao meio de origem, total ou parcialmente (HASSAL & ZAVERI, 1979). Durante o processo de reflexão sonora, a onda retorna ao ambiente com um ângulo igual ao de incidência sobre a superfície. O coeficiente de reflexão é definido pela EQUAÇÃO 10 (VALLE, 2009):

$$\zeta = \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \quad (10)$$

Onde,

ζ = coeficiente de reflexão do som

$I_{refletida}$ = intensidade sonora refletida [W / m²]

$I_{incidente}$ = intensidade sonora do som incidente [W / m²]

A transmissão sonora ocorre quando a energia acústica, ou parte desta, é conduzida através da superfície de incidência, surgindo do outro lado da mesma (LONG, 2006). O coeficiente de transmissão é calculado conforme EQUAÇÃO 11:

$$\tau = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} \quad (11)$$

Onde,

τ = coeficiente de transmissão sonora [-]

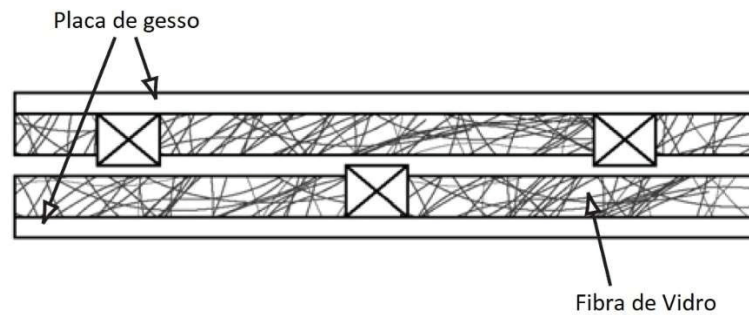
$I_{transmitida}$ = intensidade sonora transmitida [W / m²]

$I_{incidente}$ = intensidade sonora do som incidente [W / m²]

Já a absorção sonora é a propriedade que a quase totalidade dos materiais possuem de poderem reter e transformar parte da energia sonora. A absorção do som ocorre quando a energia acústica da onda sonora é transformada em, geralmente, energia térmica e absorvida por uma superfície, não sendo refletida de volta para o meio incidente (LONG, 2006).

O material absorvente poroso é amplamente utilizado no isolamento acústico. Construções leves geralmente são baseadas em partições de folhas duplas com um espaço de ar entre elas (FIGURA 5).

FIGURA 5 - EXEMPLO DE MATERIAL ABSORVENTE – LÃ MINERAL



FONTE: Giesbrecht (2007).

Quando o som se propaga em espaços pequenos, como em poros interconectados de um material poroso, a energia é perdida. Isto ocorre principalmente devido aos efeitos viscosos da camada limite. Como o ar é um fluido viscoso, a energia sonora é dissipada por atrito com as paredes dos poros. A porosidade (ε) é uma medida da razão entre o volume de poros envolvido na propagação do som e o volume total do material utilizado. Para absorvedores especializados, como lâã mineral, a porosidade conhecida é próxima de um e, portanto, o valor geralmente é assumido e não medido (GIESBRECHT, 2007). A porosidade pode ser calculada pela EQUAÇÃO 12 (FAHY, 2000; GERGES & ARENAS, 2010; GOMES, 2015):

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} \quad (12)$$

Onde,

ε = porosidade [-]

V_v = volume de vazios da amostra [m³]

V_t = volume total da amostra [m³]

O coeficiente de absorção do som é definido como a capacidade de um material absorver o som, dado pelo coeficiente adimensional de absorção sonora (α) (EQUAÇÃO 13):

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (13)$$

Onde,

α = coeficiente de absorção sonora [-]

$I_{\text{absorvida}}$ = intensidade sonora absorvida [W / m²]

$I_{\text{incidente}}$ = intensidade sonora do som incidente [W / m²]

O coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1 de acordo com a frequência do som incidente e, é importante destacar, que geralmente aumenta de acordo com a espessura e a densidade do material (FAHY, 2000; FEHRL, 2006). Um material puramente absorvente possui um valor de $\alpha = 1$, e um material puramente reflexivo, possui coeficiente de absorção sonora $\alpha = 0$ (GERGES & ARENAS, 2010).

Os materiais podem ser classificados pelo valor do seu coeficiente de absorção sonora. Valores superiores a 0,5 para que os materiais sejam considerados absorventes. Materiais com coeficientes de absorção sonora inferiores a 0,2 são geralmente considerados refletores sonoros. A diferença relativa entre dois materiais com a mesma área e diferentes coeficientes de absorção sonora (QUADRO 3) (EGAN, 2007).

QUADRO 3 - VARIAÇÕES EM COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA

Diferença de coeficientes (α)	Efeito
$\Delta\alpha < 0.10$	Pouco ou nada perceptível
$[0.10 < \Delta\alpha < 0.40]$	Perceptível
$\Delta\alpha > 0.40$	Considerável

FONTE: Oliveira (2009).

O controle do ruído em um ambiente é realizado através da capacidade de absorção sonora dos materiais que o revestem. Essa capacidade é indicada pela perda de energia sonora do material e depende de algumas de suas propriedades físicas como sua estrutura, sua densidade, entre outros (GERGES, 1992; GOMES, 2010).

A absorção total atribuída à um material pode ser descrito de maneira geral, através de coeficiente de redução sonora (NRC). O NRC é calculado pela média aritmética dos coeficientes de absorção sonora das bandas de oitava de 150 a 4000Hz (QUADRO 4).

QUADRO 4 - COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A LÃ DE VIDRO

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de absorção sonora	0,21	0,58	0,84	1,00	0,99	1,03	0,85

FONTE: ISAR (2019).

A absorção sonora em uma superfície (A_{sup}) é determinada de acordo com a área da superfície avaliada e o coeficiente de absorção do material de revestimento, calculado de acordo com a EQUAÇÃO 14 (COX & D'ANTONIO, 2009):

$$A_{sup} = \alpha \cdot S [m^2] \quad (14)$$

Onde,

A_{sur} = absorção sonora em uma superfície [m²]

S = área da superfície do material [m²]

α = coeficiente de absorção do material [-]

A absorção sonora total para recintos com múltiplos tipos de materiais e com áreas distintas, pode ser calculada pela soma da absorção sonora individual, dada pela EQUAÇÃO 15 (COX & D'ANTONIO, 2009):

$$A_{suptotal} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i [m^2] \quad (15)$$

Onde,

A_{suptotal} = absorção sonora total da i-ésima superfície [m²]

α_i = coeficiente de absorção sonora da i-ésima superfície [-]

S_i = área da i-ésima superfície [m²]

N = número de faces existentes [-]

2.4 LEGISLAÇÕES E NORMAS

O combate ao ruído ambiental ocorre também por meio de legislações e normas, em especial, visando o desenvolvimento de políticas públicas para a conscientização da sociedade – população, governo, políticos, juristas, trabalhadores – na mitigação do problema. Um dos maiores obstáculos frente à conscientização da sociedade sobre os efeitos do ruído, reside quando a própria população impactada tem dificuldade na percepção deste poluente, por desconhecimento sobre o assunto e por sua passividade frente a poluição sonora, dizendo-se “acostumada ao barulho”.

Atualmente, diversos países, estados e municípios possuem instrumentos legais para controle do ruído ambiental, que visam: estipular técnicas para detecção de níveis de pressão sonora, métodos de avaliação, definição das fontes, bem como determinação dos limites de níveis sonoros em áreas habitadas. O método de avaliação envolve as medições do nível de pressão sonora equivalente (Leq), corrigido com filtro de ponderação A.

Dentre os países com dispositivos legais para controle de ruído ambiental, a Alemanha pode ser considerada como uma das referências mundiais. No município de Stuttgart, local de realização desse trabalho, o combate à poluição sonora iniciou com registros sistemáticos do ruído já na década de 1970. Pensando no planejamento futuro, com base em medições e cálculos computacionais, foi realizado o mapeamento do ruído do tráfego para toda a cidade de Stuttgart (STUTTGART, 2020).

De acordo com Legislação Federal de Controle de Emissões na Alemanha (*Bundes-Immissionsschutzgesetz – BimSchG*) e DIRETIVA UE 2002/49, as cidades na Alemanha devem compilar mapas de ruído e estipular planos de ação, como o objetivo de combater a poluição sonora (BIMSCHG, 2019; Richtlinie 2002/49/EG, 2002). Os limites de níveis sonoros são dispostos pela Lei Federal de Controle de Emissões – Instrução Técnica para Proteção ao Ruído – *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm* (TABELA 1). Esta instrução define os níveis máximos de acordo com cada tipo de ocupação e período do dia, classificando o período diurno das 6:00 às 22:00 e noturno das 22:00 às 06:00 (TA LÄRM, 1998).

TABELA 1 – LIMITES ESTIPULADOS PELA TA LÄRM

Tipos de áreas	Diurno dB(A)	Noturno dB(A)
Áreas industriais	70	70
Áreas comerciais	65	50
Áreas mistas com predominância de atividades comerciais	60	45
Áreas mistas predominantemente residenciais	55	40
Áreas estritamente residenciais	50	35
Áreas de clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas	45	35

FONTE: TA Lärm (1998).

Ainda segundo a TA Lärm (1998), os picos máximos de ruído individuais não podem exceder as diretrizes de emissões em mais de 30 dB (A) durante o dia e em mais de 20 dB (A) durante a noite.

No Brasil, as regulamentações com relação à poluição sonora ambiental, começou nos anos 90, quando em março de 1990 o governo brasileiro estabeleceu, através do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Por meio das resoluções nº 001 (1990) e nº 252 (1999) do CONAMA, passou a ser considerado que problemas inerentes aos níveis excessivos de ruído estão sujeitos ao Controle da

Poluição de Meio Ambiente. Assim, tais resoluções adotaram em suas redações, a ABNT NBR 10151/2019 como norteador na execução de medições de níveis de pressão sonora e avaliação de NPS de acordo com cada tipo de região.

Os limites aplicados pela ABNT NBR 10.151 (2020) são estipulados de acordo com o tipo de área avaliada e período do dia (TABELA 2). O período noturno não deve começar depois das 22 h e não deve terminar antes das 7 h do dia seguinte. Se o dia seguinte for domingo ou feriado o término do período noturno não deve ser antes das 9 h (ABNT, 2020).

TABELA 2 – LIMITES ESTIPULADOS PELA ABNT NBR 10.151

Tipos de áreas	Diurno dB(A)	Noturno dB(A)
Área de residências rurais	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista predominantemente residencial	55	50
Área mista com predominância de atividades comerciais e/ou administrativas	60	55
Área mista com predominância de atividades culturais, lazer e turismo	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

FONTE: ABNT 10.151/2020 (2020).

Comumente, legislações e normas técnicas, nacionais e internacionais, apresentam procedimentos para análise e avaliação do ruído ambiental, sendo norteadas por critérios técnicos estabelecidos pela comunidade científica e através de órgãos internacionais como: *International Organization for Standardization* (ISO) e *International Electrotechnical Commission* (IEC). Entretanto, não há uma padronização internacional para que os limites máximos de NPS sejam uniformes para todos os países, seguindo muitas vezes, aspectos culturais e regionais para a definição dos padrões. Confrontando as legislações aplicadas para os níveis de ruído no Brasil e Alemanha (TABELA 3), podem ser verificadas algumas diferenças entre os tipos de áreas apreciadas e os valores limites estipulados.

TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE NORMAS BRASIL E ALEMANHA

Tipos de áreas	NBR 10.151		TA Lärm	
	Diurno dB(A)	Noturno dB(A)	Diurno dB(A)	Noturno dB(A)
Área de residências rurais	40	35	--	--
Áreas de clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas	--	--	45	35
Áreas estritamente residenciais	--	--	50	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45	--	--
Área mista predominantemente residencial	55	50	55	40
Área mista com predominância de atividades comerciais e/ou administrativas	60	55	60	45
Áreas comerciais	--	--	65	50
Área mista com predominância de atividades culturais, lazer e turismo	65	55	--	--
Área predominantemente industrial	70	60	70	70

Considerando os padrões para período diurno, pode-se dizer que ambas as normas seguem valores semelhantes. Já para o período noturno, a legislação alemã é considerada mais restritiva, pois, para áreas residenciais a Alemanha segue o valor máximo recomendado de 35 dB(A), enquanto para a diretriz brasileira, para o mesmo tipo de região é recomendado um limite de 50 dB(A).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo se caracteriza como uma pesquisa exploratória, na modalidade estudo de caso, com coleta e análise de dados. Nesta seção estão expostos os materiais e métodos empregados para alcançar os objetivos traçados pelo estudo.

As etapas a seguir foram utilizadas como método para a realização do estudo:

- 1) Caracterização das fontes de ruído – Foram identificadas as principais fontes de ruído em espaços urbanos;
- 2) Caracterização de espaços abertos – Comportamento acústico em espaços abertos em edifícios, definidos com túneis e cânions, na transmissão de ruídos urbanos para fachadas posteriores a esses espaços;
- 3) Locais de Estudo – Foram definidos dois locais para avaliação na cidade de *Stuttugart/DE*, contendo fachadas localizadas após edificações com túnel e cânion;
- 4) Medições Acústicas – Coleta de dados nos locais selecionados através de medições acústicas dos níveis de pressão sonora equivalente (L_{Aeq});
- 5) Simulações acústicas – Elaboração de mapas acústicos para avaliação dos níveis de pressão sonora atual, bem como a predição dos NPS com variações de parâmetros iniciais como: dimensões (altura, largura e comprimento) e materiais utilizados;
- 6) Normas e Legislações – Foram comparados os resultados obtidos nas medições e simulações acústicas com níveis sonoros máximos recomendados por normas alemã e brasileira;
- 7) Análise dos resultados – Estudo dos dados obtidos nos passos anteriores quanto a qualidade acústica sobre as fachadas localizadas após os espaços abertos;
- 8) Medidas Mitigadoras – Preposição de medidas de mitigação para locais avaliados em desconformidade e termos de ruído ambiental;

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES DE RUÍDO

A cidade de Stuttgart é considerada um grande centro urbano da Alemanha, de alta concentração de habitações, veículos, empresas de serviço, escritórios e indústrias.

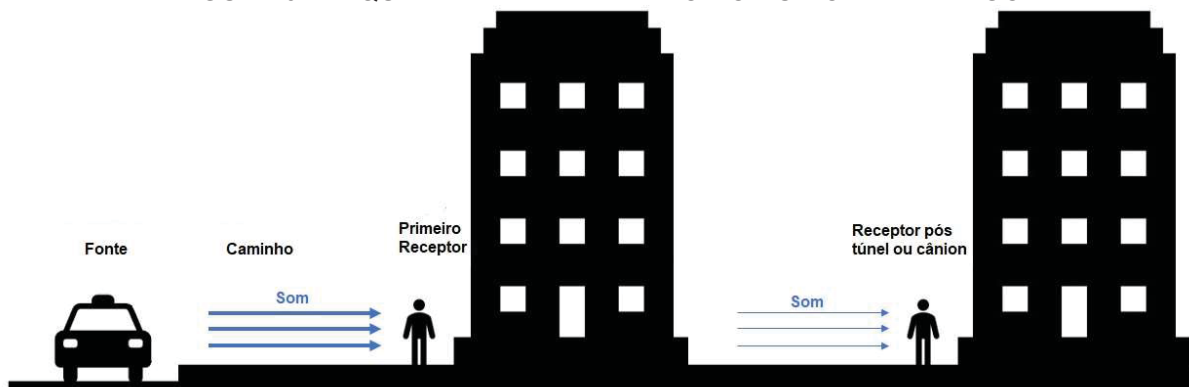
Inicialmente, foi avaliado qual a região preferencial para a elaboração do estudo do município. Assim, foi selecionada a região central de Stuttgart, que demanda de uma melhor qualidade acústica devido à alta densidade habitacional, centros comerciais e escritórios.

Devido as características supracitadas, o município de Stuttgart possui uma vasta malha rodoviária em sua região central, assim, ficou caracterizado *in loco* o ruído de tráfego como a principal fonte de ruído ambiental na região.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ESPAÇOS ABERTOS

Posteriormente, foram identificados edifícios na cidade de Stuttgart afetados pelo ruído de tráfego e que se caracterizam pela presença de espaços abertos: túnel e cânion. Em centros urbanos com alta concentração de edificações, a divisão territorial projetada deve considerar espaços, como quadras ou blocos, onde haverá lacunas em edificações para garantir o acesso de pessoas e/ou veículos. Mesmo entre complexos de edifícios paralelos, são necessárias aberturas para conectar os vários espaços abertos entre si. Entretanto, no que diz respeito à transmissão do som, esses espaços são vistos também como "pontos fracos", pois, facilitam a passagem do ruído de tráfego em ruas movimentadas, para espaços construídos sensíveis ao ruído. A FIGURA 6 representa a transmissão do ruído gerado em rodovias para fachadas posteriores aos espaços abertos.

FIGURA 6 - ESQUEMA DE TRANSMISSÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO



Os espaços abertos urbanos considerados nesse estudo foram dos tipos túnel e cânion. Espaço do tipo túnel é classificado como uma galeria superficial em edifício, de seção ampla, extensa, larga e coberta, utilizada como estrutura de apoio para possibilitar, ou facilitar, o acesso a um determinado local, como exemplificado na FIGURA 7.

FIGURA 7 - SEÇÃO DE TÚNEL EM ROTEBÜHLSTRAÙE - STUTT GART



FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

Espaço do tipo cânion é classificado como a abertura entre dois edifícios, de seção de corredor extensa, larga e descoberta, podendo ou não ser empregado para a passagem a um determinado local, como ilustrado na FIGURA 8.

FIGURA 8 - SEÇÃO DE CÂNION EM *ROTENWALDSTRASSE* - STUTT GART

FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

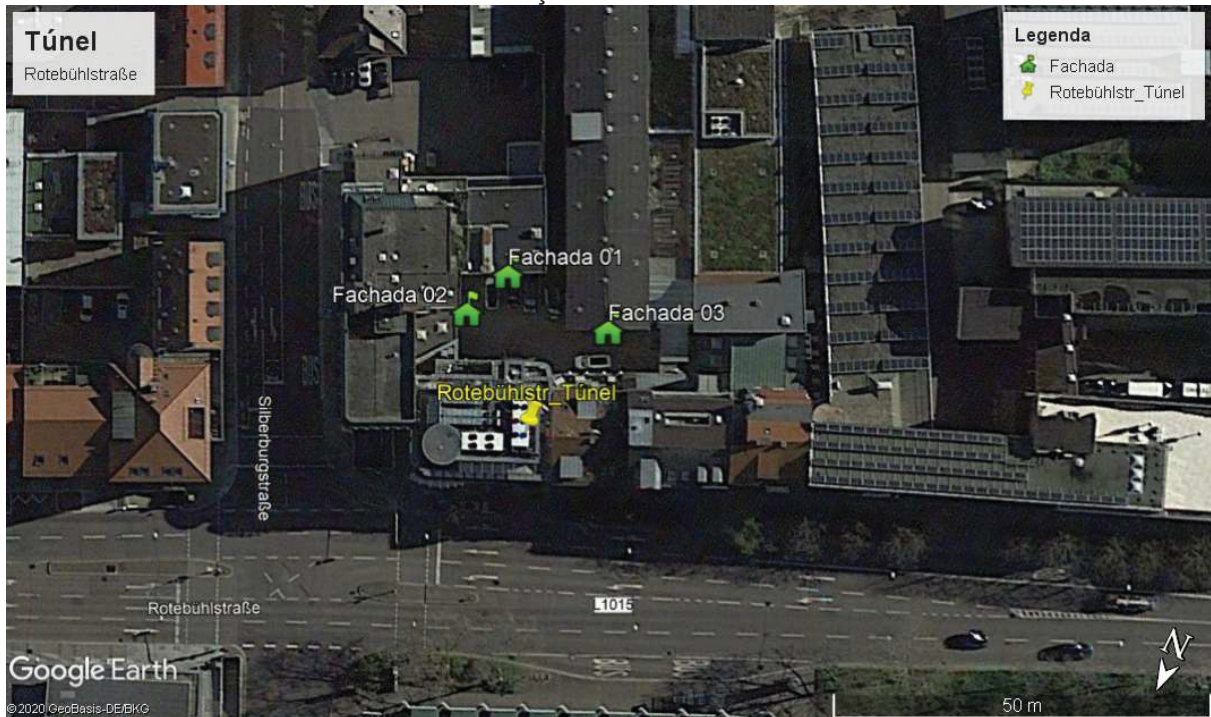
3.3 LOCAIS DE ESTUDO

Nos tópicos a seguir serão apresentados os locais selecionados para elaboração do estudo. Os locais avaliados apresentaram as características mandatórias para a elaboração do estudo, ou seja, a presença de fachada(s) habitacional(is) após estruturas de túnel e cânion, afetadas pelo ruído de tráfego.

1) *Rotebühlstraße* – Fachadas Pós Túnel

Para avaliação do comportamento acústico para fachadas localizadas após túneis, foi selecionado uma seção de espaço aberto do tipo túnel em *Rotebühlstraße*, esquina com *Silberburgstraße*, na cidade Stuttgart (512267.00 m E; 5402208.00 m N) (FIGURA 9).

FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DAS FACHADAS PÓS TÚNEL



FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

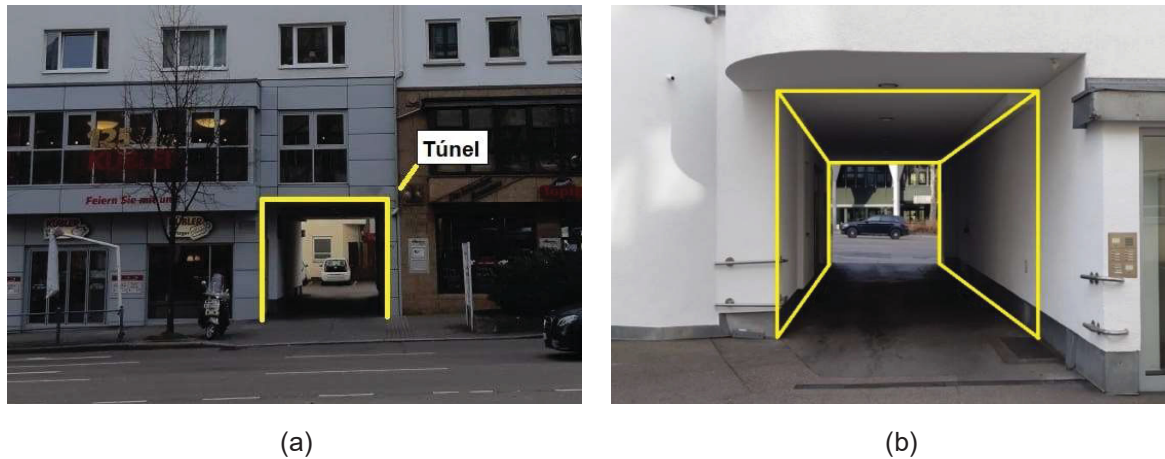
Esta localidade é diretamente afetada pelo ruído gerado pelo intenso fluxo veículos na *Rotebühlstraße* (FIGURA 10). A FIGURA 11 ilustra o túnel objeto de estudo observando a vista frontal e dos fundos.

FIGURA 10 - TÚNEL AVALIADO EM ROTEBÜHLSTRAßE



FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

FIGURA 11 - TÚNEL EM ROTEBÜHLSTRAßE



(a) (b)
 FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

2) Rotebühlstraße – Fachadas Pós Cânion

Para avaliação dos níveis sonoros sobre fachadas pós cânion, foi selecionado uma seção de espaço aberto em *Rotebühlstraße*, próximo à *Reuchlinstraße*, na cidade Stuttgart (511766.00 m E; 5402048.00 m N) (FIGURA 12).

FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DAS FACHADAS PÓS CÂNION



FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

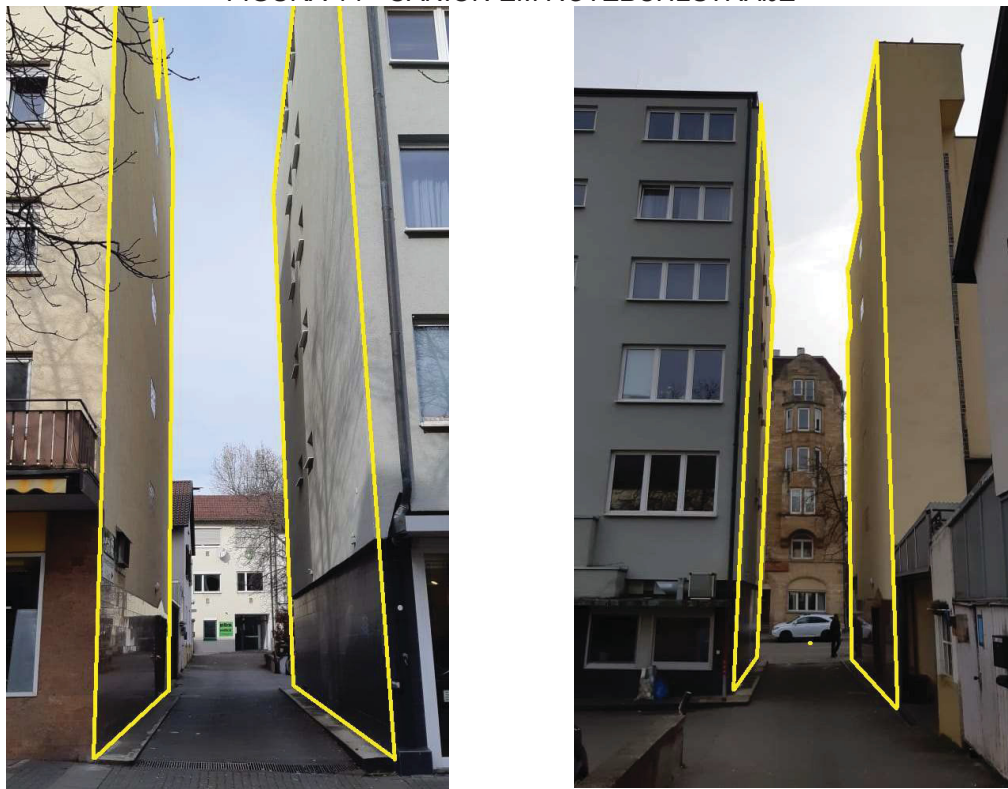
Esta localidade é afetada diretamente pelo ruído de tráfego, gerado pelo pesado fluxo veículos na *Rotebühlstraße* (FIGURA 13). A FIGURA 14 ilustra o cânion objeto de estudo observando a vista frontal e dos fundos.

FIGURA 13 - CÂNION AVALIADO EM ROTEBÜHLSTRAßE



FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

FIGURA 14 - CÂNION EM ROTEBÜHLSTRAßE



(a)

(b)

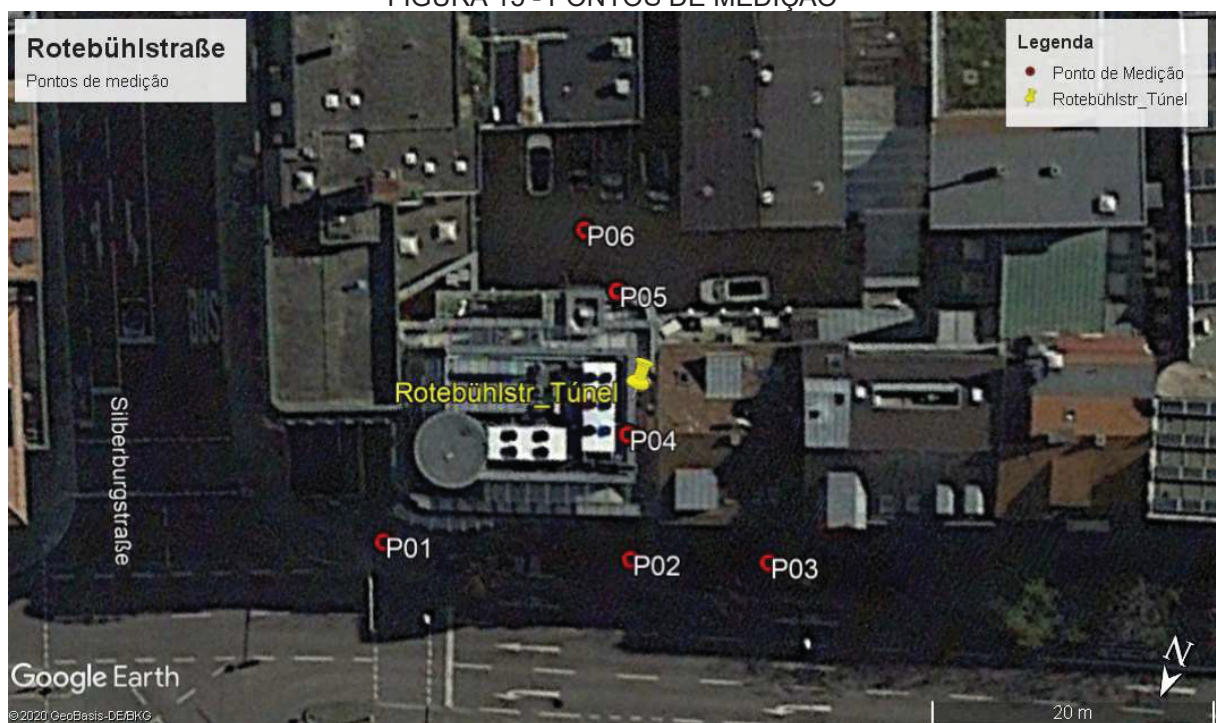
FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

3.4 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

A correta avaliação do comportamento sonoro em espaços abertos, somente é possível com a determinação dos níveis de pressão sonora equivalente (LAeq) através das medições acústicas. O aferimento acústico é fundamental para a cadeia de levantamento de dados, pois, é empregado para avaliar os níveis sonoros emitidos pelo ruído de tráfego e para a calibração das simulações acústicas.

Deste modo, foram realizadas medições acústicas em seis pontos, sendo, três pontos localizados ao longo da *Rotebühlstraße* e três pontos internos localizados após o espaço aberto do tipo túnel, conforme representado na FIGURA 15. As aferições de deram perpendicularmente ao eixo da pista em emissão, em pontos afastados aproximadamente 1,2m do piso e, sempre que possível, pelo menos a 2m de quaisquer superfícies refletoras, como muros, paredes, etc. seguindo diretrizes da ABNT NBR 10.151 (2020) e *TA Lärm* (1998).

FIGURA 15 - PONTOS DE MEDIÇÃO



FONTE: Adaptado de Google Earth – GeoBasis-DE/BKP (2020).

As avaliações dos níveis de pressão sonora foram realizadas em dia útil no período diurno (7:01 às 22:00 h), validadas por um medidor sonoro (classe I) da marca *Norsonic AS*, modelo NOR 140, devidamente calibrado (FIGURA 16). Previamente as

medições, o equipamento foi preparado para modo de resposta fast e na curva de ponderação A e Z. Assim, cada ponto foi mensurado por 02:30 minutos, para obtenção do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}), os níveis sonoros máximos (L_{max}) e mínimos (L_{min}), bem como os níveis sonoros por bandas 1/3 de oitava.

FIGURA 16 - MEDIDOR ACÚSTICO



3.5 SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

Foram empregadas simulações computacionais para a avaliação da transmissão e comportamento acústico em tuneis e cânions urbanos, por meio dos softwares *Sketchup Pro 2019*® e *ODEON 15.15 Auditorium*®. Os procedimentos computacionais empregues neste trabalho estão apresentadas como uma alternativa técnica para construtores, projetistas e consultores, na predição dos níveis de pressão sonora sobre fachadas de primeiro nível, em edifícios impactados pelo ruído de tráfego.

3.5.1 Modelagem Arquitetônica

Paras os cálculos computacionais, preliminarmente houve a necessidade de criar os modelos arquitetônicos dos locais avaliados através do software *Sketchup Pro 2019*®. Os edifícios foram desenvolvidos se valendo do recurso de *layers*, onde é possível nomear linhas e superfícies pertencentes ao mesmo grupo de semelhança. Dessa forma, foram criados *layers* específicos para as superfícies que constituem o túnel e cânion. Este recurso é utilizado para melhorar a organização do projeto e para facilitar a atribuição de materiais.

Além da composição digital dos edifícios de interesse, houve a necessidade da delimitação da área utilizada para os cálculos computacionais e representação do ambiente natural. Dessa forma, foram adicionados prismas retangulares como *layers* no entorno dos edifícios planejados e denominados como “Mundo”. A representação do entorno nos locais avaliados é de suma importância nas simulações acústicas, pois, possibilita a qualificação de suas superfícies como áreas de absorção total do som no *ODEON Auditorium 15.15* ®, caracterizando de maneira fidedigna o comportamento acústico nos ambientes onde os edifícios avaliados estão inseridos.

Com a concepção dos modelos digitais, mantendo as características originais das edificações, foram criadas bases geométricas para que as simulações computacionais possam representar os resultados esperados dos níveis sonoros atuais, a serem corroborados pelas medições acústicas.

Posteriormente, foram elaborados protótipos, onde foram aplicadas variações nas medidas do túnel e cânion: altura, largura e comprimento. Tais variações foram motivadas pela necessidade de investigar qual real influência das proporções de um túnel ou cânion, na transmissão de ruído ambiental para fachadas posteriores a estas aberturas. Nos QUADROS 5 e 6 podem ser observadas todas as variações dimensionais utilizadas na avaliação.

QUADRO 5 - DIMENSÕES AVALIADAS – MODELO TIPO TÚNEL

Túnel	Dimensões do túnel em metros [m]		
	Comprimento (C)	Largura (L)	Altura (A)
Original	15	3	3
Varição do comprimento	12	3	3
Varição da largura	15	4	3
	15	5	3
	15	6	3
Varição altura	15	3	3,5
	15	3	4

QUADRO 6 - DIMENSÕES AVALIADAS – MODELO TIPO CÂNION

Cânion	Dimensões do cânion em metros [m]	
	Comprimento (C)	Largura (L)
Original	12	4
Varição do comprimento	15	4
Varição da largura	15	3
	15	5
	15	6

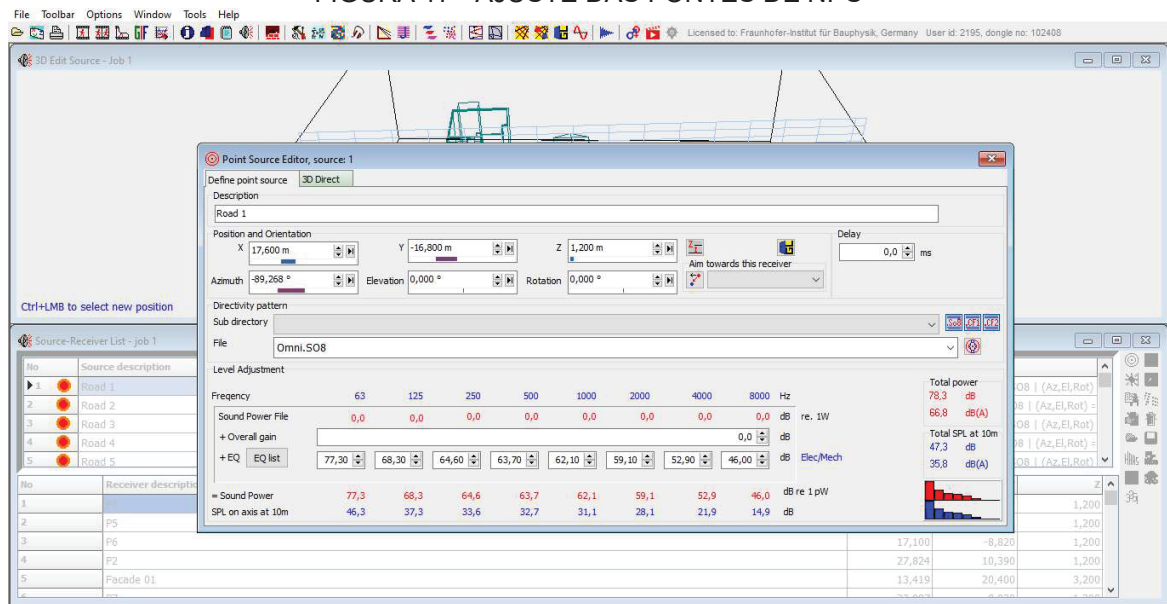
3.5.2 Simulações Computacionais

Para as simulações computacionais de dispersão do ruído ambiental, foi empregado o *software ODEON 15.15 Auditorium®*. Este programa possui uma *interface* que permite configurar um projeto acústico através de simulações e medições dos níveis de pressão sonora (NPS), sendo amplamente difundido em projetos relacionados à acústica de ambientes internos “*Room Acoustic*”. Este estudo, entretanto, visou na aplicação do *ODEON* também como uma ferramenta para a avaliação acústica em espaços abertos, seguindo algumas etapas fundamentais para o sucesso de sua utilização.

Após a criação dos modelos arquitetônicos, estes foram exportados e convertidos para arquivos compatíveis e editáveis pelo programa *ODEON 15.15 Auditorium®*. Ao abrir os arquivos exportados, os modelos são reconhecidos como espaços, volumosos e geometricamente fechados, onde, é possível a visualização das arestas.

Uma vez que as geometrias dos modelos foram carregadas no *ODEON*, previamente ao início dos cálculos computacionais, foi necessário definir as fontes de NPS. Para isso, foi utilizado a função “lista de fontes e receptores” na barra de ferramentas do programa, para assim abrir a lista da qual fontes discretas foram definidas. Na lista para definição das fontes, primeiramente foram definidas as posições das fontes em coordenadas (x, y, z), onde, os valores de x e y são relativos às posições horizontais, variando de acordo com a posição dos pontos escolhidos. Já o valor z, refere-se à altura, que fora mantida constante ($z = 1,2$ m) para todas as fontes (FIGURA 17).

FIGURA 17 - AJUSTE DAS FONTES DE NPS



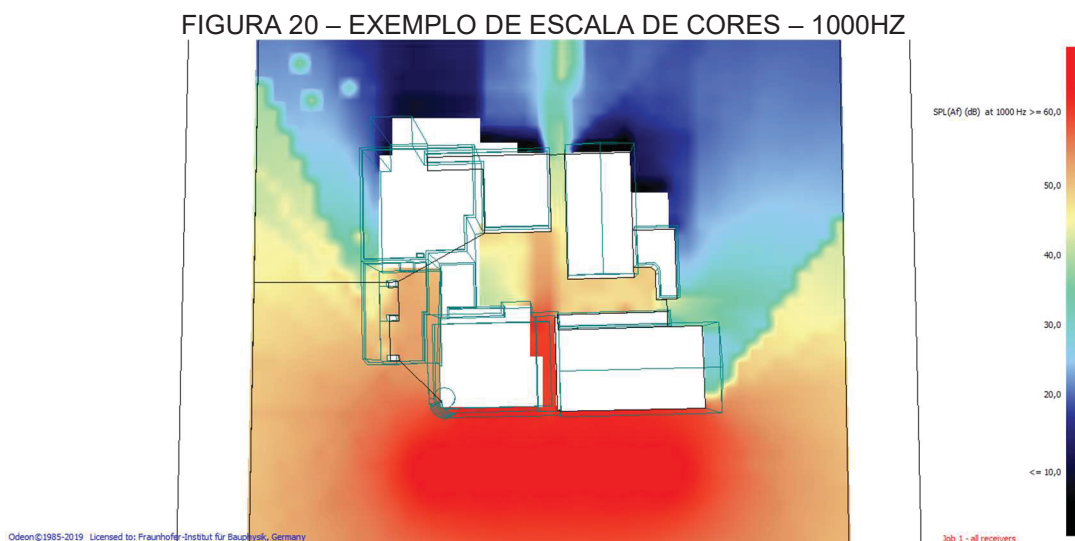
Para a simulação do ruído de tráfego, foram inseridas 5 fontes de ruído linearmente dispostas entre si, de forma a representar os níveis sonoros emitidos pela *Rotebühlstraße*. Por fim, foram ajustados os níveis de pressão sonora das fontes, se valendo dos valores de 1/1 de oitavas previamente mensuradas em frente aos locais de avaliação.

Receptores foram inseridos nos modelos, visando calcular as respostas pontuais dos níveis de pressão sonora em frente às fachadas de interesse e pontos de medição. Assim, as posições dos receptores foram definidas visando a avaliação dos pontos de medição e as fachadas de interesse após as aberturas (túnel e cânion). O posicionamento é realizado em coordenadas (x, y, z), onde, os valores de x e y são relativos às posições horizontais e valor de z relativo à altura, foi mantido constante (z = 1,2m), para avaliação dos níveis sonoros na mesma altura das fontes.

Os receptores com propósito de avaliação dos níveis sonoros em fachadas posteriores às aberturas, foram identificados numericamente. Com a definição das fontes e receptores, obteve-se os *layouts* apresentado na FIGURA 18.

Para as superfícies externas e internas, foi selecionado a opção de nº 103 (Material 103), que reproduz características sonoras para superfícies com paredes de concreto e pintadas. De forma a representar o ambiente natural urbano, as superfícies utilizadas no entorno dos edifícios caracterizadas como “mundo”, foram designadas como opção nº 1 (Material 1), ou seja, considerou-se que os sons incidentes nestas superfícies sejam 100% absorvidos. O material totalmente absorvente é usado para modelar situações ao ar livre, pois, é o único material que interrompe as ondas sonoras simuladas, garantindo que nenhuma reflexão seja calcula pelo programa a partir de superfícies atribuídas a este material.

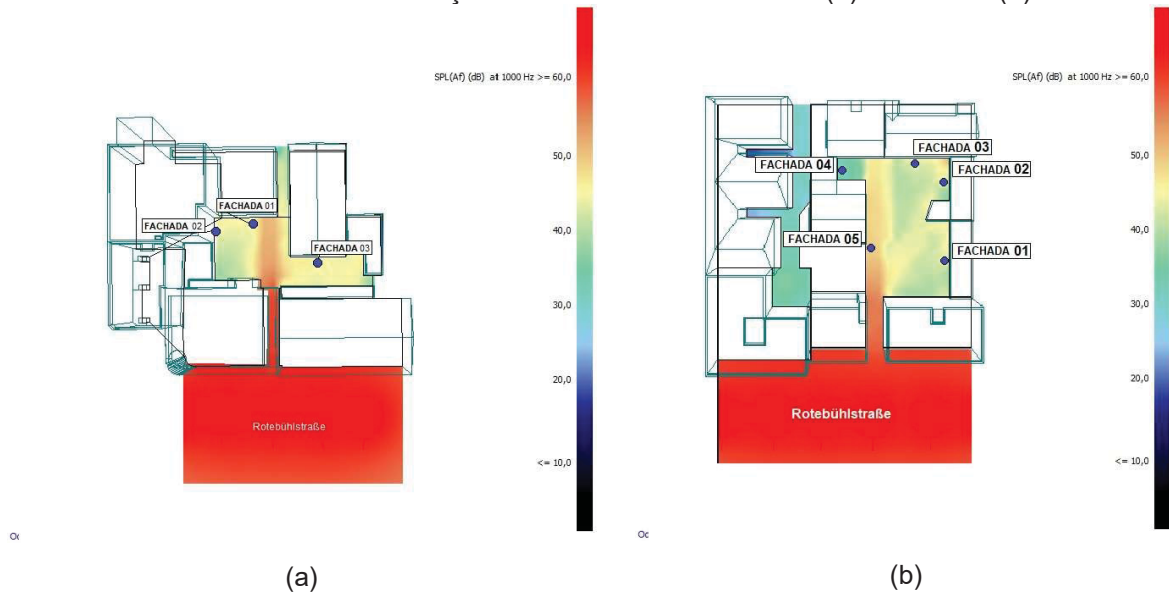
Ajustadas as fontes sonoras, receptores e materiais, deve ser definido no ODEON qual será a grade de cálculo, ou seja, informar qual(is) a(s) superfície(s) de interesse, para visualizar os resultados de NPS nos receptores e o gráfico de cores do comportamento acústico no local avaliado. Então, foi empregado o comando para o cálculo de todas as interações sonoras presentes no modelo, resultando o mapa acústico com escala de cores conforme exemplificado pela FIGURA 20.



Após a obtenção do grid de cores, as imagens obtidas foram editadas de forma a determinar a área e os pontos de interesse, ou seja, a área do mapeamento acústico que seja fidedigna à realidade, tanto para avaliação dos níveis sonoros sobre as fachadas de interesse, quanto para averiguar a influência dos espaços abertos na transmissão sonora. Dessa forma, foram definidos pontos de controle, chamados de “fachada” e numerados de 01 a 03 para a situação de túnel e 01 a 05 para situação

de cânion. A FIGURA 21 exemplifica as áreas de interesse para túnel e cânion, bem como as fachadas avaliadas.

FIGURA 21 –DELIMITAÇÃO DE INTERESSE - TÚNEL (a) e CÂNION (b)



3.5.3 Calibração do Modelo

Previamente ao uso de um modelo de simulação acústica como alternativa técnica de predição, deve-se calibrar o modelo, visando atribuir confiabilidade aos resultados obtidos. Dessa maneira, em um primeiro momento da calibração, houve a conferência do modelo realizada pelo próprio programa computacional, onde possíveis inconsistências de topografia, características altimétricas de construções e de dados fornecidos são apontadas.

Logo após, foi confrontado os níveis de pressão sonora simulados pelo modelo, com os níveis medidos em campo. A comparação é feita através dos resultados obtidos nos receptores do modelo, no local exato onde foram realizadas as medições em campo. Segundo a *European Commission Working Group – Assessment of Exposure to Noise* a diferença (Δ) entre o nível de pressão sonora equivalente L_{eq} medido e calculado não deve ultrapassar 4,6 dB(A). Se esta recomendação for atendida, considera-se que o modelo está calibrado (WG-AEN, 2006).

3.6 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Ainda, foi realizado a comparação dos valores de NPS, mensurados e simulados, com os valores máximos orientados pela legislação alemã *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)* e norma brasileira ABNT NBR 10.151/2020, para o período diurno.

Considerando que a proposta dessa pesquisa é proporcionar o conforto acústico à comunidade, para a avaliação segundo a legislação, foram empregados dois limites comparativos. O Primeiro critério segue orientação da ANBT NBR 10.151(2020) para áreas estritamente urbana ou de hospitais ou de escolas residenciais. O segundo critério de comparação, seguiu ao padrão de referência disposto pela *TA Lärm* (1998) para áreas com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. O QUADRO 7 apresenta os critérios de avaliação considerados.

QUADRO 7 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Critério de Avaliação	Legislação	Padrão dB(A)
Limite 1	NBR 10.151/20	50
Limite 2	<i>TA Lärm</i>	45

3.7 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

Como medida para redução dos níveis sonoros sobre fachadas localizadas após os espaços abertos, foi mensurada a influência dos materiais destes espaços na transmissão sonora modelando situações em que o revestimento interno do túnel e cânion foram alterados. Primeiramente as simulações se deram para que os materiais inseridos *ODEON 15.15 Auditorium®* representassem a situação atual, selecionado o revestimento de alvenaria (Material 103). Visando a atenuação dos níveis sonoros, subsequentemente foram adotadas variações dos coeficientes de absorção, alterando os padrões de absorção sonora para as superfícies internas dos espaços abertos. Excetuando a superfície de pavimentação, onde não foram realizadas modificações, para todas as demais superfícies internas foram criados modelados com materiais caracterizados como: 10% absorvente (Material 10), 30% absorvente (Material 30), 50% absorvente (Material 50) e 70% absorvente (Material 70). Na TABELA 4 estão expostos os coeficientes de absorção para cada tipo de materiais utilizados nos modelos computacionais.

4 RESULTADOS

Neste item estão apresentados os resultados obtidos na aplicação da metodologia supracitada. A avaliação do comportamento acústico em túneis e cânions se deu através da:

- I. Análise dos níveis de ruído de tráfego, gerados na *Rotebühlstraße* apresentados nas medições de campo.
- II. Análise da influência das dimensões geométricas de túneis e cânions na transmissão de níveis sonoros, através de simulações acústicas.
- III. Análise da influência dos materiais utilizados nas superfícies interiores de túneis e cânions, também apontados nas simulações acústicas.

4.1 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

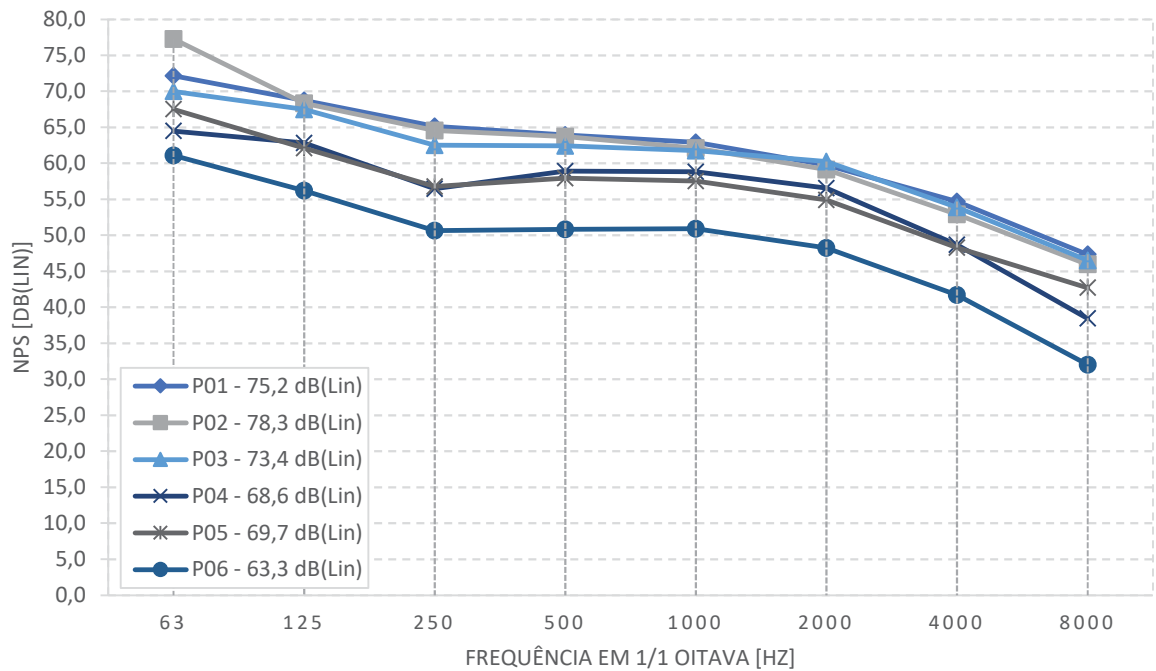
Para calibrar os modelos de simulações acústicas e mensurar o impacto dos níveis de pressão sonora gerados na *Rotebühlstraße*, foram mensurados os níveis sonoros em seis (06) pontos perpendiculares à pista de rolagem, sendo, três pontos localizados ao longo da via de interesse somados a três pontos internos localizados após o espaço aberto do tipo túnel, conforme metodologia apresentada no item 3.4. Os resultados das medições estão apresentados nas TABELA 5.

TABELA 5 - COMPONENTES POR BANDA EM 1/1 OITAVA DAS MEDIÇÕES

Pontos	Nível de pressão sonora [dB (Lin)] medido na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Lin
P01	72,1	68,7	65,1	63,9	62,9	59,7	54,7	47,3	75,2
P02	77,3	68,3	64,6	63,7	62,1	59,1	52,9	46,0	78,3
P03	70,0	67,5	62,5	62,4	61,7	60,2	53,9	46,5	73,4
P04	64,5	62,8	56,4	58,9	58,8	56,5	48,7	38,4	68,6
P05	67,5	62,1	56,8	57,9	57,5	54,9	48,3	42,7	69,7
P06	61,1	56,2	50,6	50,8	50,9	48,3	41,7	32,0	63,3

A FIGURA 22 apresenta de forma gráfica, os valores obtidos dos níveis equivalentes de pressão sonora em dB e suas componentes por banda de 1/1 de oitava. Verifica-se que há predominância de níveis sonoros nas baixas frequências, entre 63Hz e 125Hz.

FIGURA 22 - NPS (DB) E SUAS COMPONENTES EM 1/1 DE OITAVA



Após a obtenção dos resultados em dB, foram aplicados os fatores de correção para a ponderação (A) dos valores medidos, desta forma, assemelha-se à percepção do som pelo ouvido humano. Os valores para o ajustamento da ponderação (A), foram aplicados de acordo com a norma IEC 61672 (2002) (TABELA 6).

TABELA 6 - FATORES DE CORREÇÃO PARA PONDERAÇÃO (A)

Frequência [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ponderação A	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1	-1,1

FONTE: Adaptado de IEC (2002).

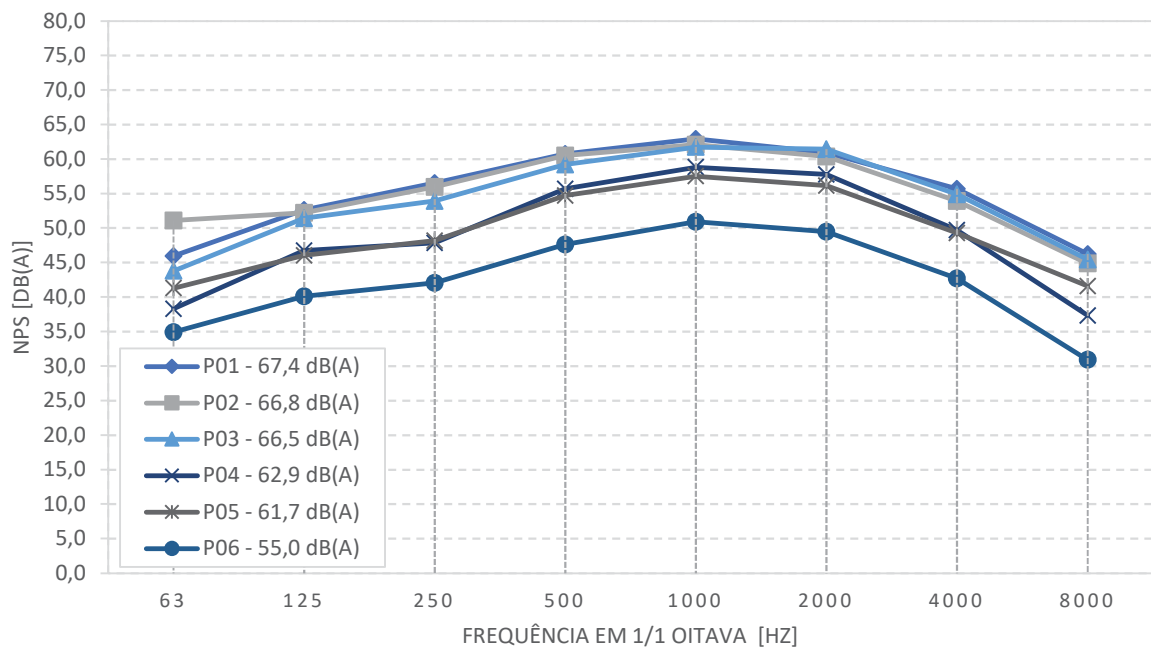
Na TABELA 7 são apresentados os resultados aplicando os fatores de ajustamento. Obtêm-se as componentes por banda de 1/1 de oitava dos valores de níveis pressão sonora em dB e nível global (soma das componentes) com ponderação na escala (A).

TABELA 7 - COMPONENTES POR BANDA DE 1/1 DE NA ESCALA (A)

Pontos	Nível de pressão sonora [dB (A)] medido na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
P01	45,9	52,6	56,5	60,7	62,9	60,9	55,7	46,2	67,3
P02	51,1	52,2	56,0	60,5	62,1	60,3	53,9	44,9	66,7
P03	43,8	51,4	53,9	59,2	61,7	61,4	54,9	45,4	66,5
P04	38,3	46,7	47,8	55,7	58,8	57,7	49,7	37,3	62,7
P05	41,3	46,0	48,2	54,7	57,5	56,1	49,3	41,6	61,7
P06	34,9	40,1	42,0	47,6	50,9	49,5	42,7	30,9	54,9

As componentes de frequência apresentadas na TABELA 7, podem ser verificados na forma de gráfico através da FIGURA 23.

FIGURA 23 - COMPONENTES POR BANDA DE 1/1 DE NA ESCALA (A)



Os resultados em frequências ponderados em (A) apresentado na supra apresentada, demonstra um espectro característico de ruído de tráfego rodoviário urbano (EN ISO, 1996; EN ISO, 1996; MATEUS, 2008), onde, o amplo com frequências na faixa de 63 a 8000 Hz para todos os pontos medidos, apresentaram valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz. Este fenômeno é esperado, devido aos ruídos gerados por motores de veículos combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento (KNABBEN, 2012).

4.2 SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

Neste item serão apresentados os resultados obtidos com as simulações acústicas, observando primeiramente comportamento acústico em túneis e cânions urbanos, para o cenário atual. Em seguida, serão expostos e analisados os resultados atingidos com as variações das dimensões geométricas e dos materiais utilizados nas superfícies interiores do túnel e cânion considerados.

4.2.1 Modelos arquitetônicos

Empregando o *software Sketchup Pro 2019®*, foram gerados os padrões digitais arquitetônicos dos edifícios avaliados (FIGURAS 24 - 27).

FIGURA 24 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO TÚNEL

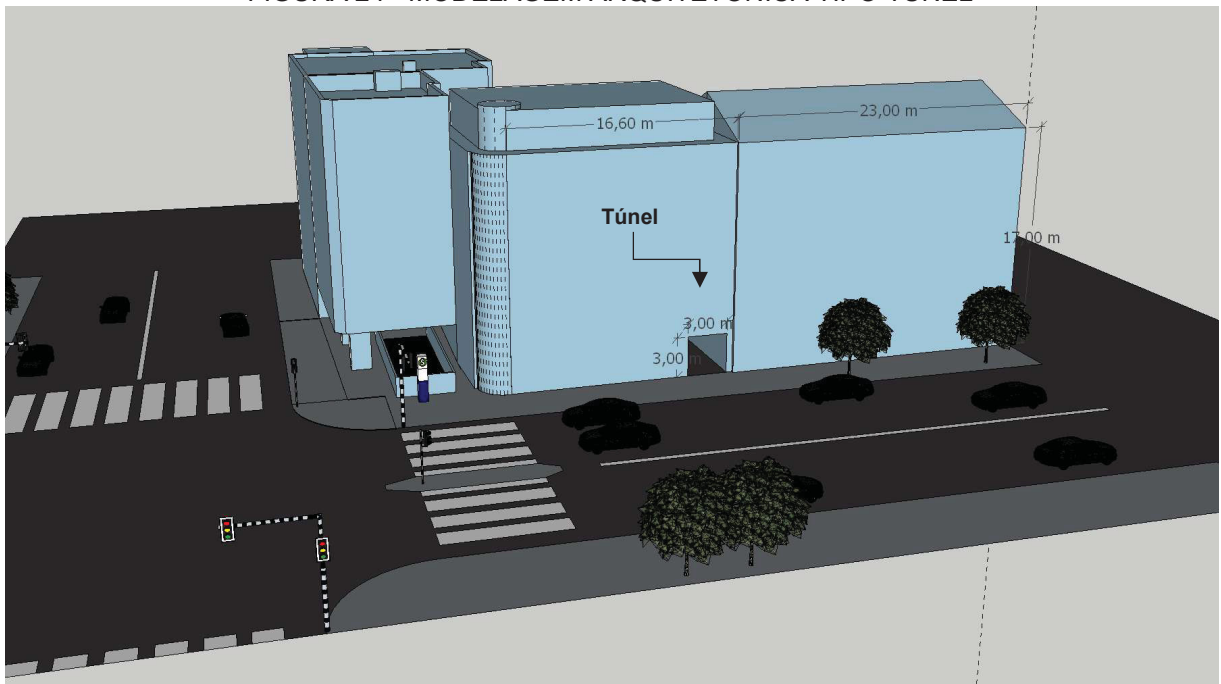


FIGURA 25 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO TÚNEL – LAYOUT

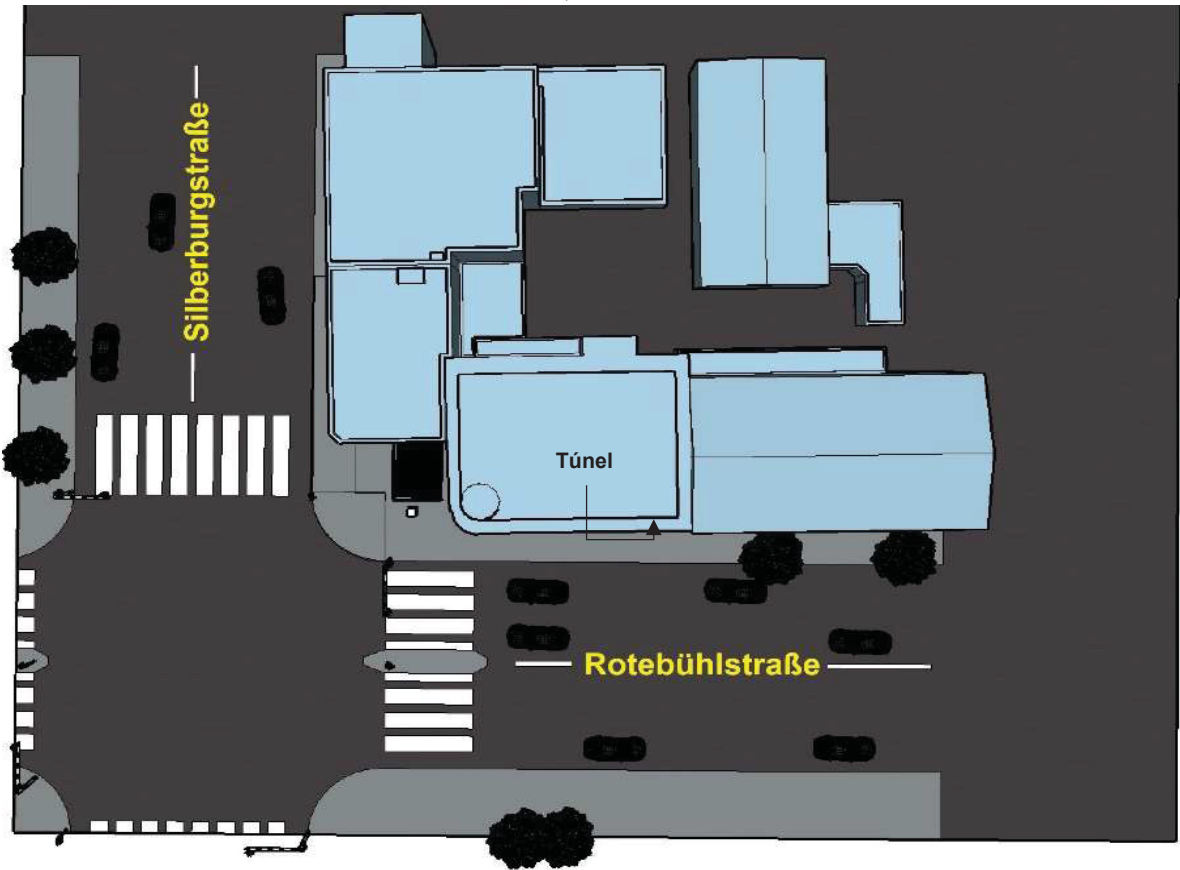
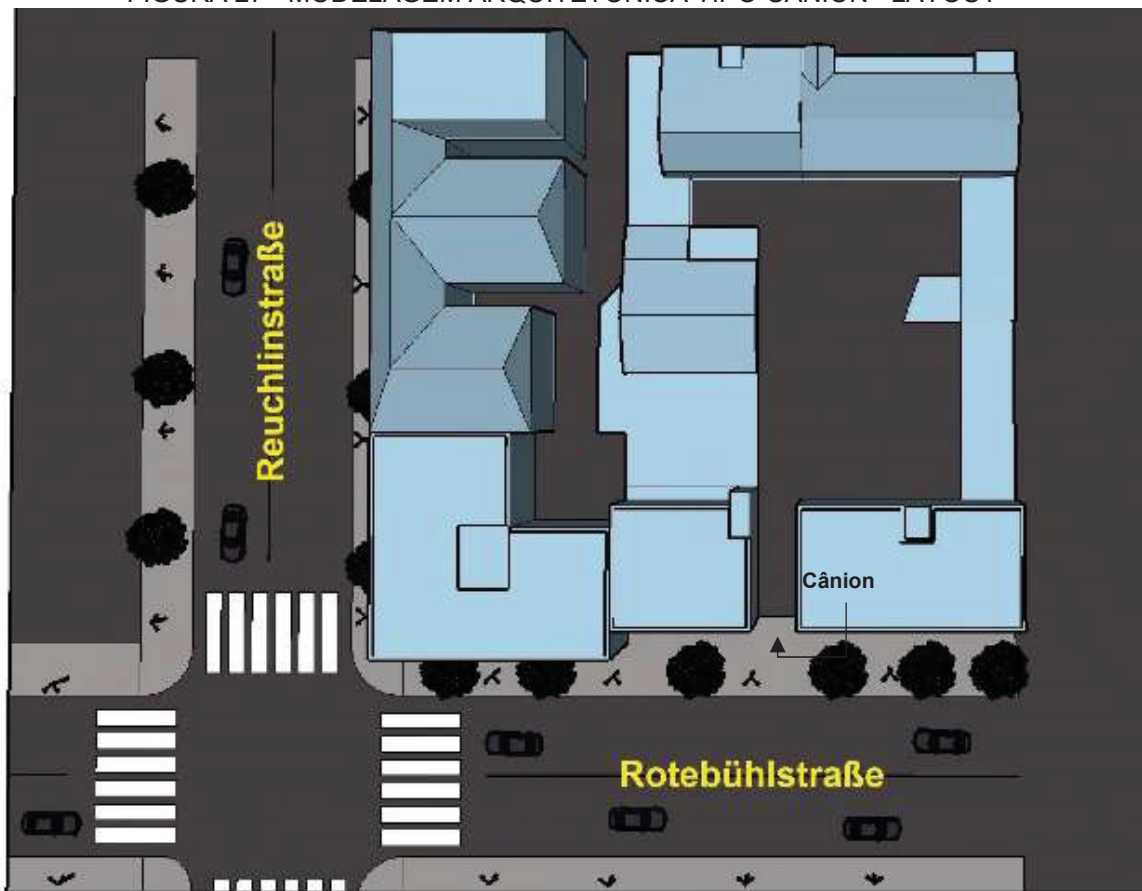


FIGURA 26 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO CÂNION

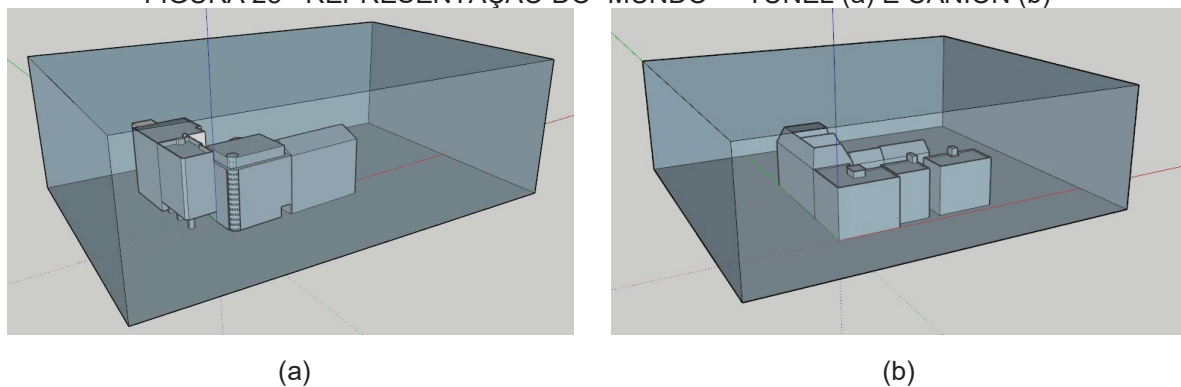


FIGURA 27 - MODELAGEM ARQUITETÔNICA TIPO CÂNION- LAYOUT



Após a modelagem arquitetônica, foram adicionados prismas retangulares como *layers* no entorno dos edifícios planejados e denominados como “Mundo” (FIGURA 28).

FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DO “MUNDO” – TÚNEL (a) E CÂNION (b)

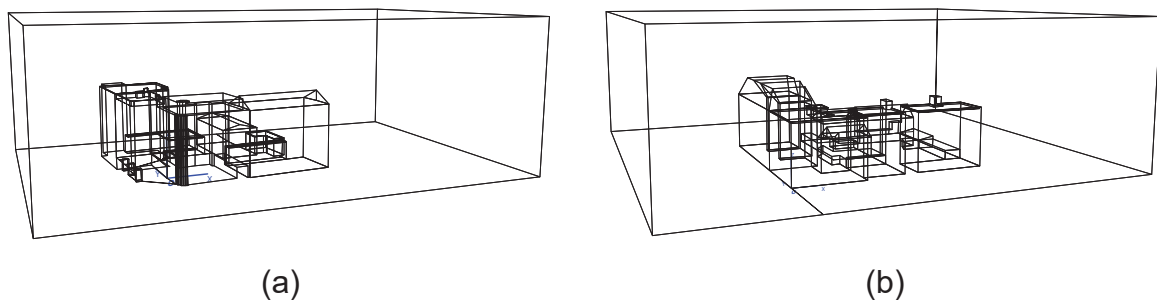


Tais prismas representam o entorno nos locais avaliados, qualificação das superfícies como áreas de absorção total, delimitação da área utilizada para os cálculos computacionais e representação do ambiente natural.

4.2.2 Simulações Computacionais

Ao exportar os modelos arquitetônicos para o *ODEON 15.15 Auditorium®*, obtém-se os modelos utilizados nas simulações acústicas, reconhecidos como espaços, volumosos e geometricamente fechados, onde, é possível a visualização das arestas, conforme exibido na FIGURA 29.

FIGURA 29 - GRIDE DO MODELO NO ODEON – TÚNEL (a) E CÂNION (b)



4.2.3 Calibração do Modelo

Na TABELA 8, estão apresentados os valores comparativos entre os resultados medidos em frente a *Rotebühlstraße* e os resultados calculados.

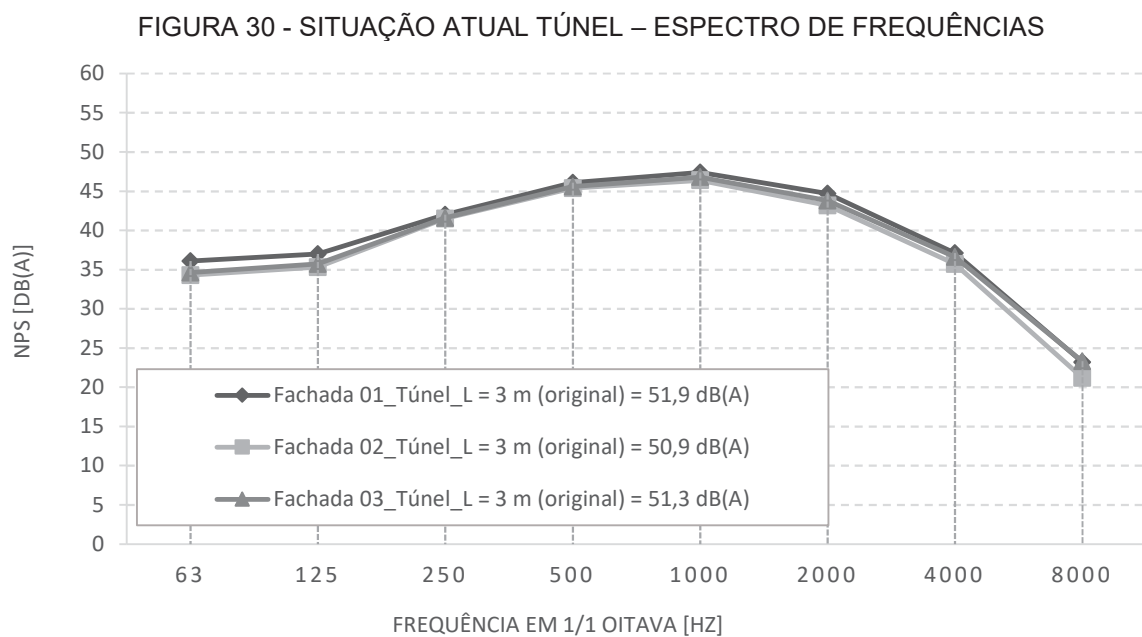
TABELA 8 - CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Pontos de medição	NPS dB(A) Medido	NPS dB(A) Calculado Túnel	NPS dB(A) Calculado Cânion	Δ NPS dB(A) Túnel	Δ NPS dB(A) Cânion
Ponto 01	67,4	65,1	66,6	- 2,3	- 0,8
Ponto 02	66,7	66,6	65,7	- 0,1	- 1,0
Ponto 03	66,5	67,1	65,5	- 0,6	- 1,0

Confrontando os dados de medições com os resultados de saída dos modelos, observa-se que todos os pontos, amostrados e calculados, atendem à recomendação do WG-AEN. Logo, o modelo pode ser considerado confiável, para a sua aplicação como técnica investigativa do comportamento sonoro em espaços abertos.

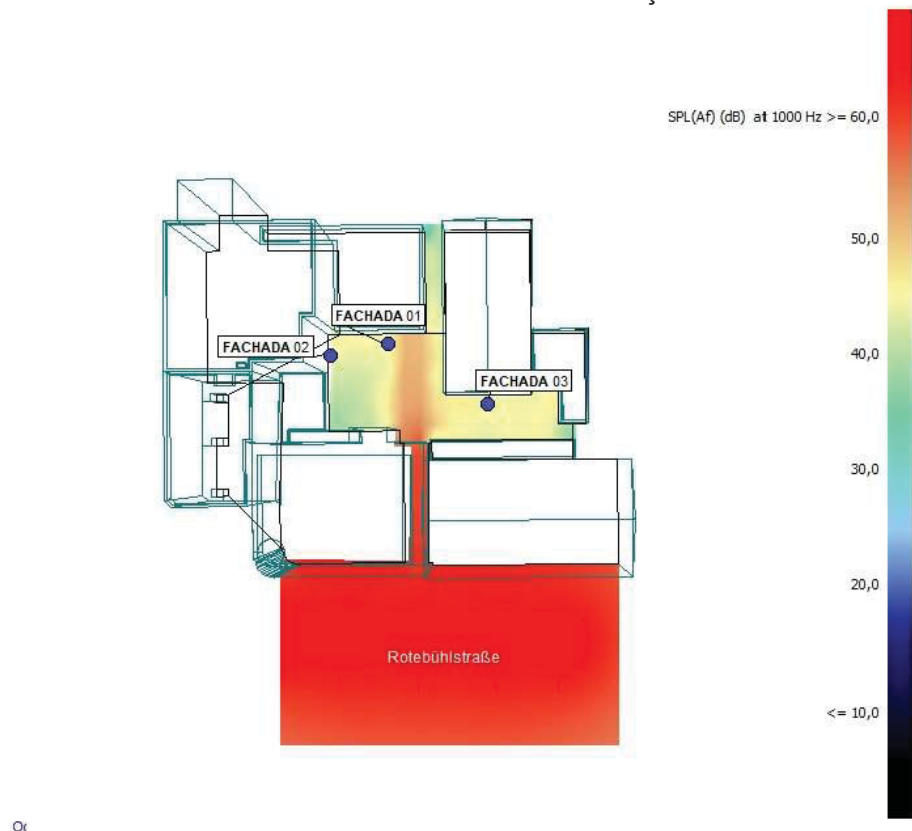
4.2.4 Túnel – situação atual

A FIGURA 30 apresenta os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel estudado. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A, expõem os níveis sonoros que na atualidade incidem sobre as fachadas selecionadas, ou seja, as simulações se deram utilizando as dimensões originais (15x3x3) e materiais das superfícies internas do túnel (concreto pintado).



A FIGURA 31 representa o mapa acústico para a frequência de 1000Hz, que é a componente que apresenta os maiores níveis sonoros. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados na TABELA 5 para a frequência de 1000Hz.

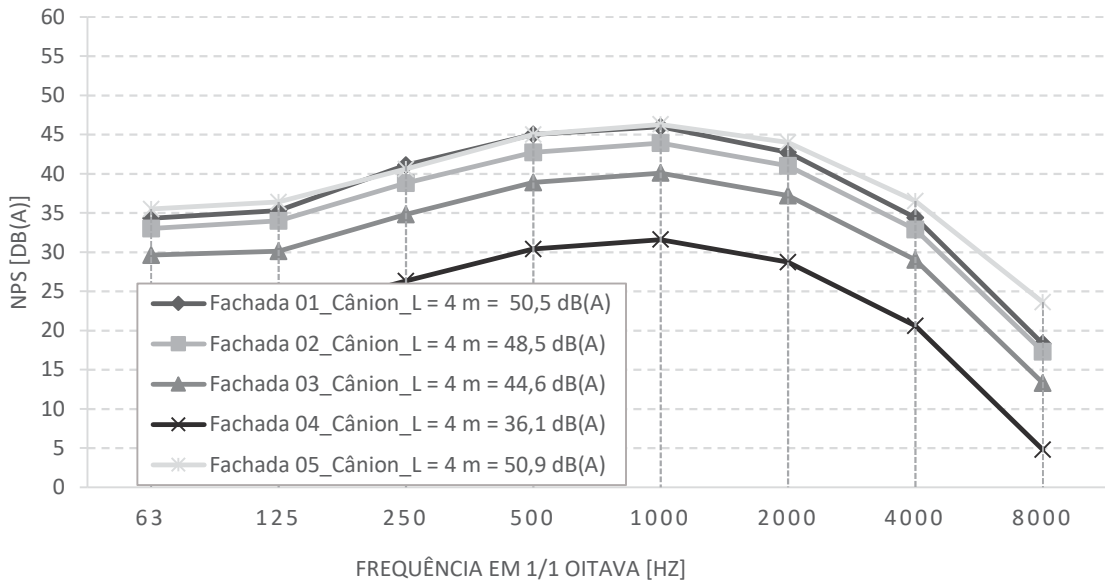
FIGURA 31 - TÚNEL - MAPA ACÚSTICO PARA SITUAÇÃO ATUAL EM 1000HZ



4.2.5 Cânion - situação atual

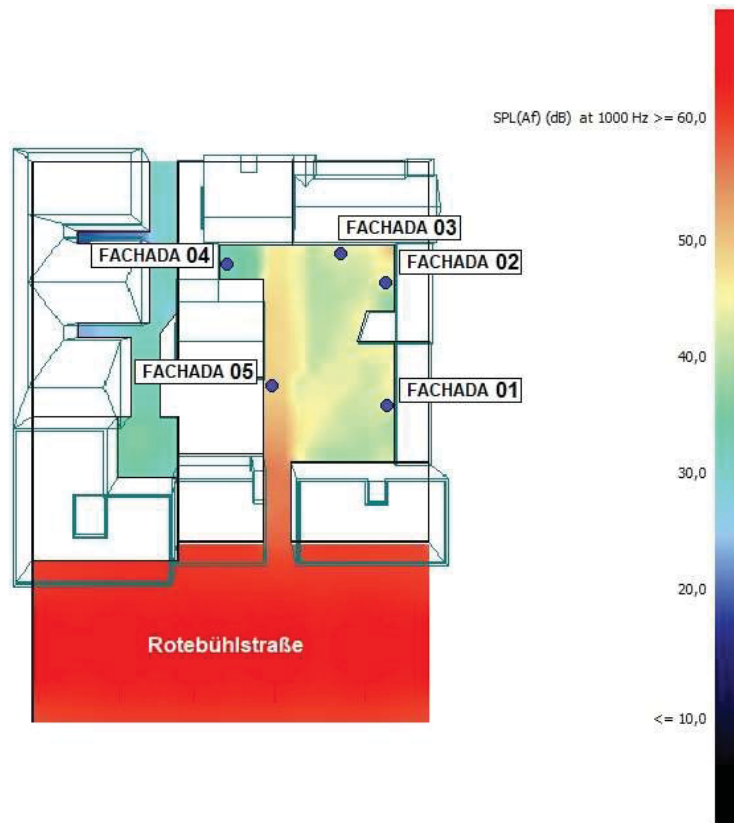
A FIGURA 32 apresenta os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion avaliado. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A, expõem os níveis sonoros que na atualidade incidem sobre as fachadas selecionadas, ou seja, as simulações se deram utilizando as dimensões originais (12x4) e materiais das superfícies internas do cânion (concreto pintado).

FIGURA 32 - SITUAÇÃO ATUAL CÂNION – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS



A FIGURA 33 apresenta o mapa acústico para a frequência de 1000Hz, que é a componente que apresenta os maiores níveis sonoros. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados na TABELA 7 para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 33 – CÂNION - MAPA ACÚSTICO ATUAL



4.2.6 Simulações Acústicas – Variação das dimensões

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos, para avaliar a interferência das dimensões na transmissão de níveis sonoros. Foram realizadas variações no comprimento, largura e altura do túnel e cânion avaliados, entretanto, os materiais das superfícies internas forma mantidas.

4.2.6.1 Variação da largura do túnel

Primeiramente, foram simulados os níveis de pressão sonora, variando a largura do túnel em relação à largura original (3m). Assim, as simulações deram-se com as seguintes larguras: 4m, 5m e 6m.

1) Túnel - largura 4 metros

A TABELA 9 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel com a largura de 4m, ou seja, 1m superior que a largura original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 9 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 4M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	38,5	39,6	44,1	48,4	49,7	47,4	40,1	27,6	54,3
Fachada 02	32,0	33,1	39,0	43,1	44,3	41,3	33,7	19,6	48,7
Fachada 03	36,6	37,8	43,6	47,7	48,8	45,9	38,6	25,2	53,3

2) Túnel - largura 5 metros

A TABELA 10 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel com a largura de 5m, ou seja, largura 2m superior que a original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 10 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 5M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	40,9	42,0	46,6	50,9	52,3	49,9	42,6	30,3	56,8
Fachada 02	38,5	39,7	45,3	49,7	50,8	48,0	40,5	26,7	55,3
Fachada 03	38,3	39,4	45,1	49,2	50,4	47,4	40,0	26,2	54,9

3) Túnel - largura 6 metros

A TABELA 11 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel com a largura de 6m, ou seja, largura 3m superior que a original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 11 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 6M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	41,4	42,5	47,1	51,4	52,8	50,4	43,2	30,8	57,4
Fachada 02	39,4	40,3	45,6	50,0	51,4	48,7	41,2	27,8	55,8
Fachada 03	37,8	38,8	44,3	48,4	49,6	46,7	39,3	25,5	54,1

As FIGURAS 34, 35 e 36 apresentam a evolução da dispersão de NPS, para as diferentes larguras simuladas na frequência de 1000Hz. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 34 - TÚNEL LARGURA - 4M

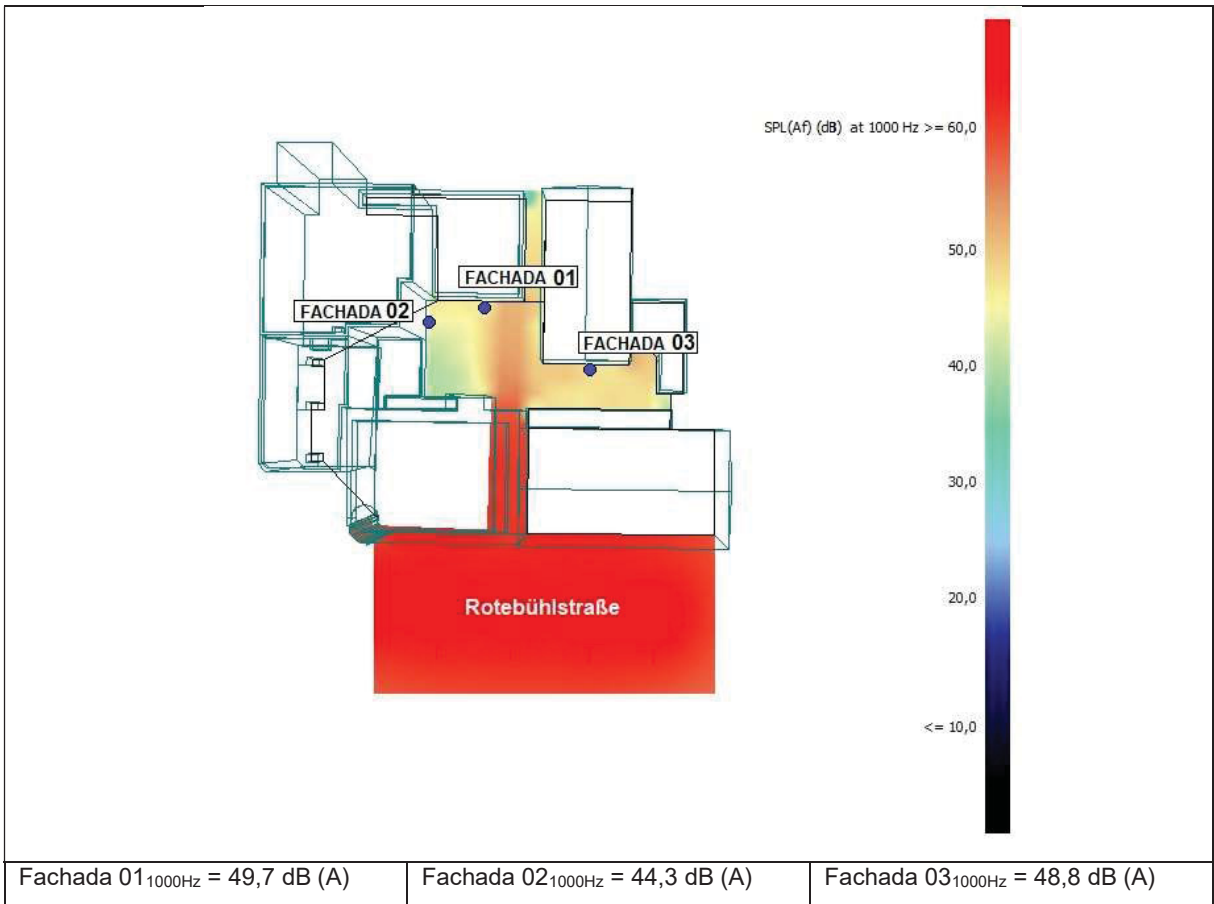


FIGURA 35 - TÚNEL LARGURA - 5M

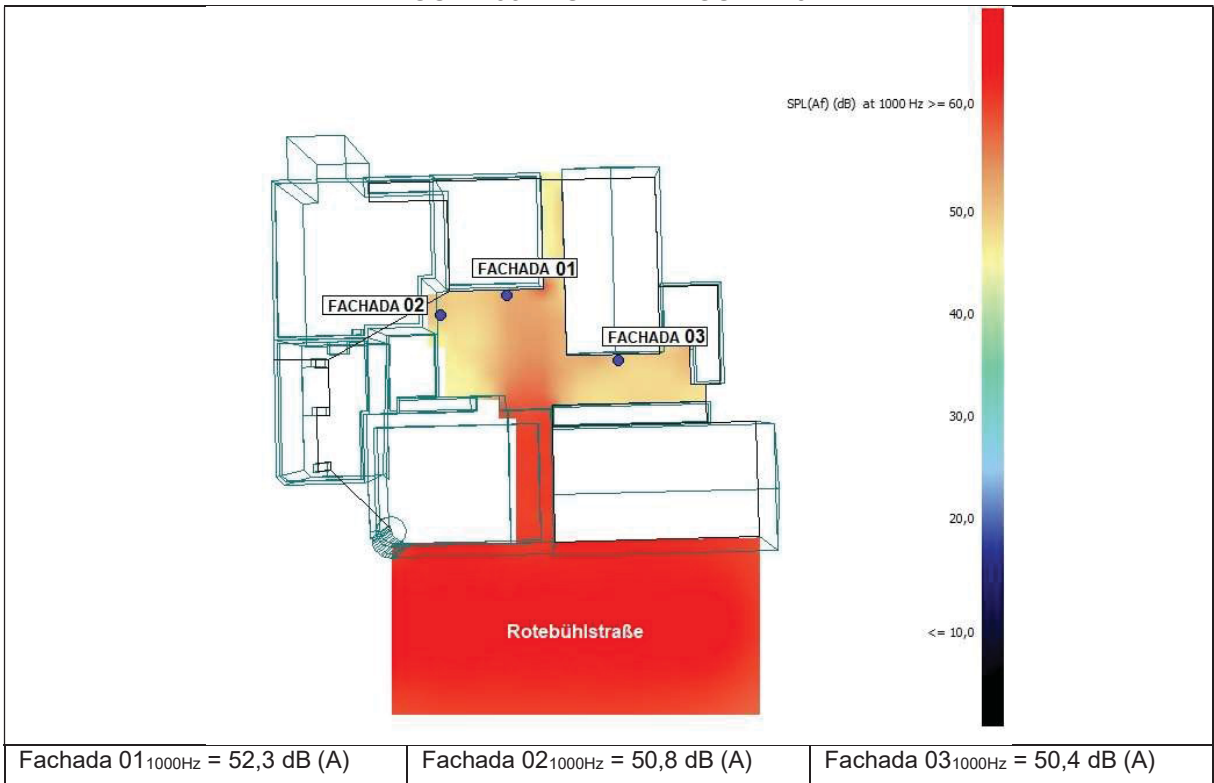
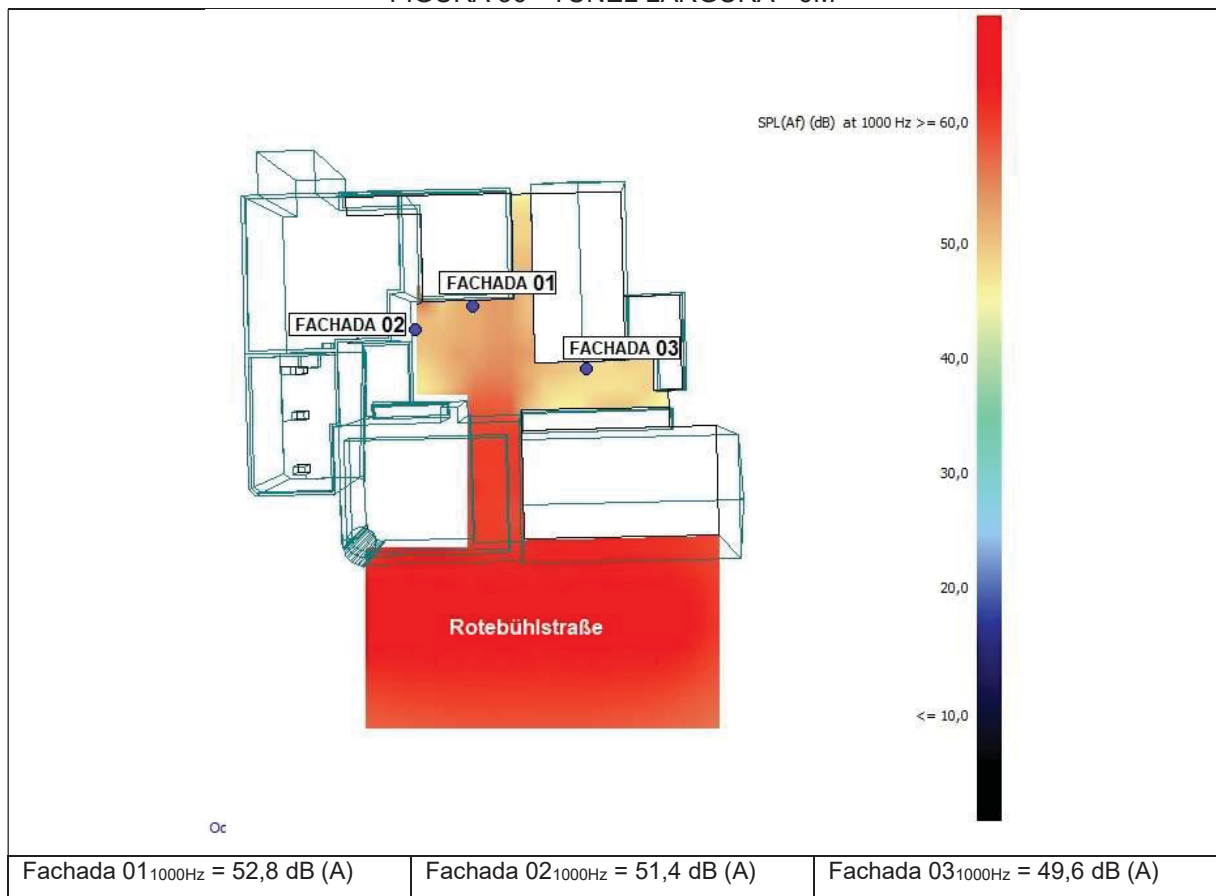


FIGURA 36 - TÚNEL LARGURA - 6M



4.2.6.2 Variação da altura do túnel

Também foram simulados os níveis de pressão sonora, variando a altura do túnel em relação à altura original (3m). Assim, as simulações deram-se com as seguintes alturas: 3,5m e 4m.

1) Túnel - altura 3,5 metros

A TABELA 12 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel com altura de 3,5m, ou seja, altura 0,5m superior que a original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 12 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM ALTURA DE 3,5M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	32,4	33,5	39,3	43,2	44,2	41,1	33,7	20,0	48,7
Fachada 02	34,5	35,5	41,8	45,7	46,7	43,5	36,0	22,0	51,2
Fachada 03	36,2	37,3	43,7	47,6	48,6	45,3	37,8	23,5	53,1

2) Túnel - altura 4 metros

A TABELA 13 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel com altura de 4m, ou seja, altura 1m superior que a original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 13 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM ALTURA DE 4M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	36,9	38,0	43,7	47,7	48,8	45,9	38,5	25,2	53,3
Fachada 02	34,9	35,9	42,2	46,0	47,0	43,9	36,4	22,7	51,6
Fachada 03	39,0	40,1	46,1	50,1	51,1	48,1	40,8	27,2	55,6

As FIGURAS 37 e 38 apresentam a evolução da dispersão de NPS, para as diferentes alturas simuladas na frequência de 1000Hz. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 37 - TÚNEL ALTURA - 3,5M

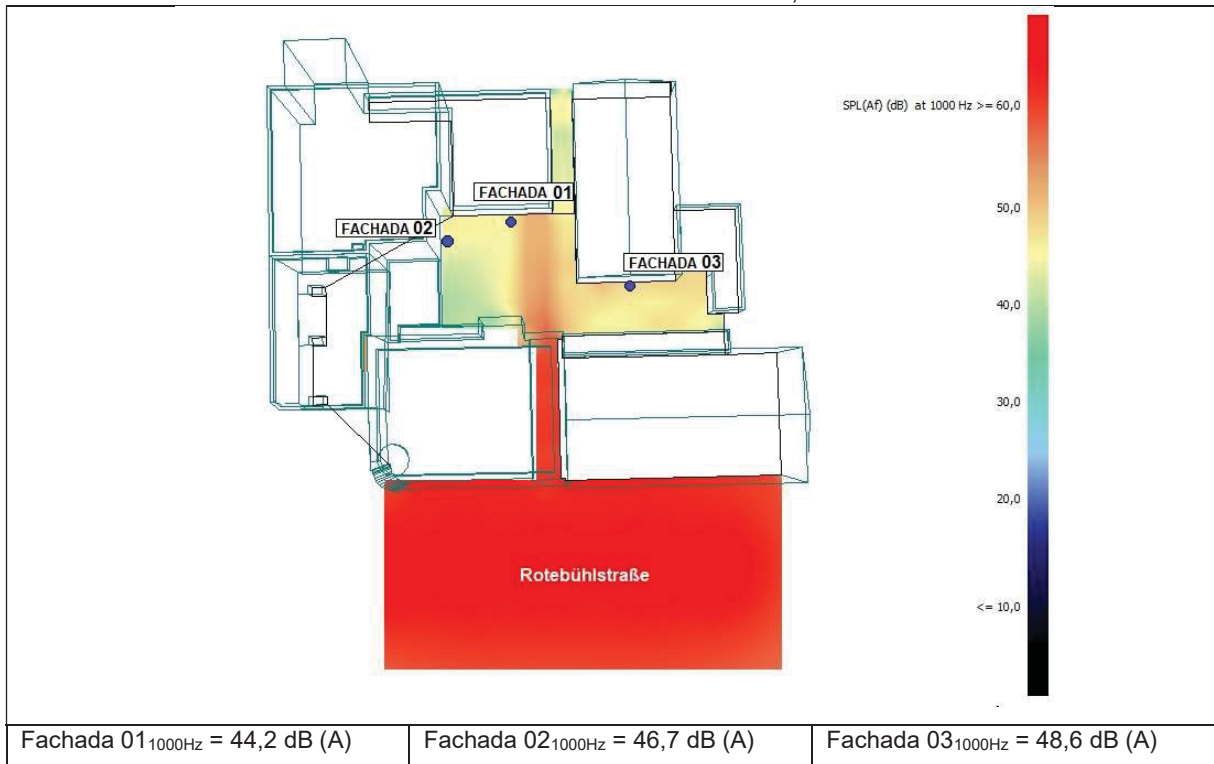
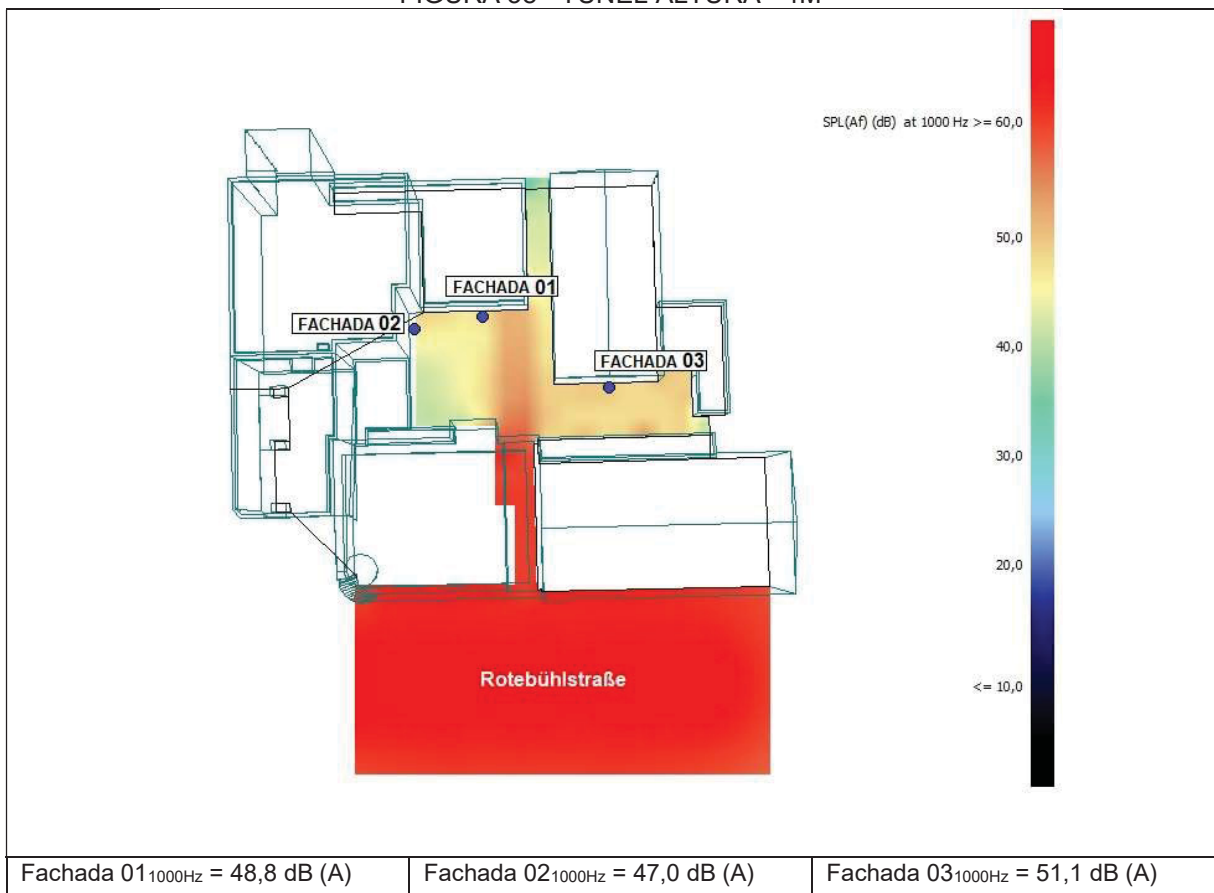


FIGURA 38 - TÚNEL ALTURA - 4M



4.2.6.3 Variação do comprimento do túnel

Após as variações de largura e comprimento, foram simulados os níveis de pressão sonora, variando o comprimento do túnel em relação ao comprimento original (15m). Assim, as simulações se deram com o comprimento de 12m.

1) Túnel - comprimento 12 metros

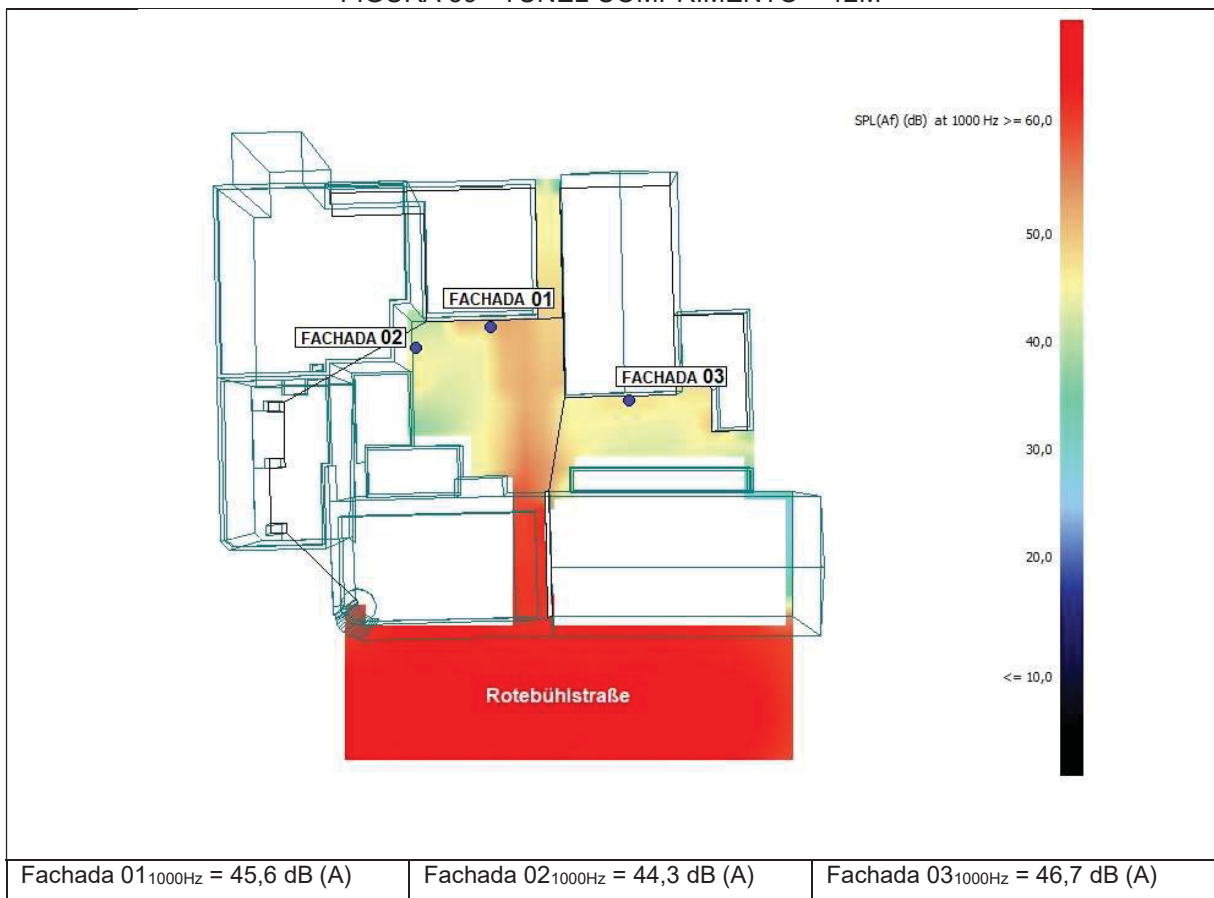
A TABELA 14 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel com 12m de comprimento, ou seja, comprimento 3m inferior que o original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 14 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM COMPRIMENTO DE 12M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	34,2	35,2	40,4	44,5	45,6	42,8	35,2	21,4	50,1
Fachada 02	32,0	33,1	39,3	43,3	44,3	41,3	33,8	20,2	48,8
Fachada 03	34,8	35,9	41,3	45,5	46,7	44,0	36,8	23,9	51,2

Na FIGURA 39 pode-se observar a dispersão de NPS, para o comprimento simulado na frequência de 1000Hz. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 39 - TÚNEL COMPRIMENTO – 12M



4.2.6.4 Variação da largura do cânion

Ainda, foram elaboradas simulações dos níveis de pressão sonora, variando a largura do cânion em relação à largura original (4m). Assim, as simulações se deram com as seguintes larguras: 3m, 5m e 6m.

1) Cânion - largura 3 metros

A TABELA 15 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion com a largura de 3m, ou seja, largura 1m inferior que a original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 15 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 3M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	32,0	33,2	38,4	42,5	43,5	40,5	32,8	18,0	48,1
Fachada 02	27,4	24,8	29,9	34,0	35,0	31,8	23,6	6,9	39,7
Fachada 03	28,6	29,1	33,8	37,8	38,9	36,0	27,7	11,7	43,5
Fachada 04	18,5	17,9	21,8	25,7	26,5	23,6	15,1	-1,3	31,4
Fachada 05	36,1	36,7	40,9	45,2	46,6	44,3	36,9	24,0	51,2

2) Cânion - largura 5 metros

A TABELA 16 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion com a largura de 5m, ou seja, largura 1m superior que a original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 16 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 5M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	34,3	35,3	40,9	45,0	46,2	43,3	35,3	20,1	50,7
Fachada 02	31,8	31,9	37,0	41,1	42,3	39,4	31,3	15,9	46,8
Fachada 03	34,0	35,4	39,8	44,1	45,6	43,2	35,5	21,6	50,1
Fachada 04	30,3	31,3	38,1	41,7	42,3	38,2	28,6	7,3	46,8
Fachada 05	36,9	37,8	42,0	46,5	47,9	45,6	38,2	25,3	52,5

3) Cânion - largura 6 metros

A TABELA 17 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion com a largura de 6m, ou seja, largura 2m superior que a original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 17 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM LARGURA DE 6M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	36,0	36,8	41,5	45,6	46,8	43,9	35,9	20,9	51,3
Fachada 02	32,5	33,9	38,5	42,7	43,9	41,0	33,0	17,4	48,4
Fachada 03	35,0	36,3	40,9	45,2	46,6	44,1	36,3	22,1	51,1
Fachada 04	33,2	33,7	39,2	43,3	44,4	41,3	32,9	15,4	48,9
Fachada 05	39,1	40,0	44,3	48,6	50,1	47,7	40,3	27,5	54,6

As FIGURAS 40, 41 e 42 apresentam a evolução da dispersão de NPS, para as diferentes larguras simuladas na frequência de 1000Hz. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 40 - CÂNION LARGURA - 3M

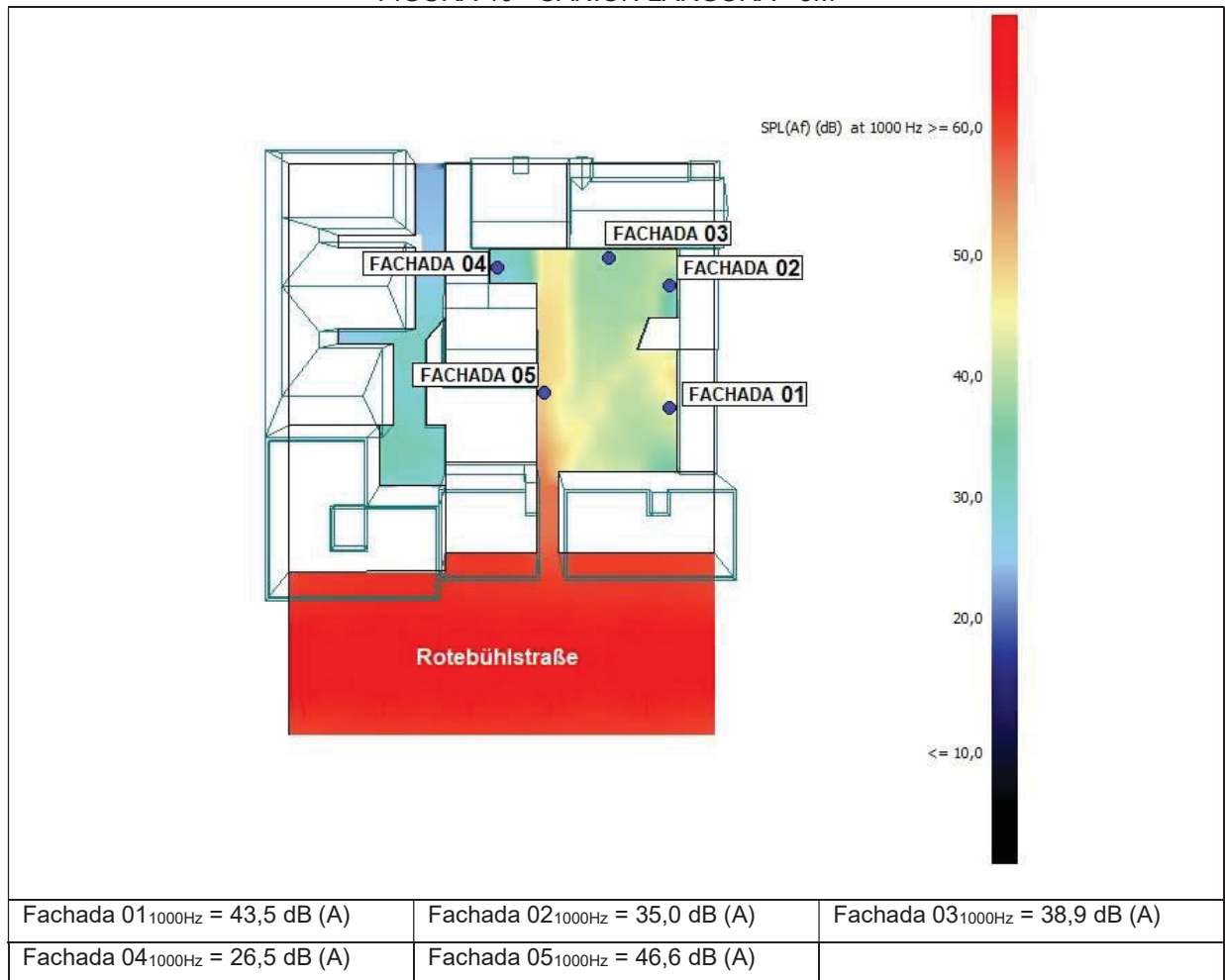


FIGURA 41 - CÂNION LARGURA - 5M

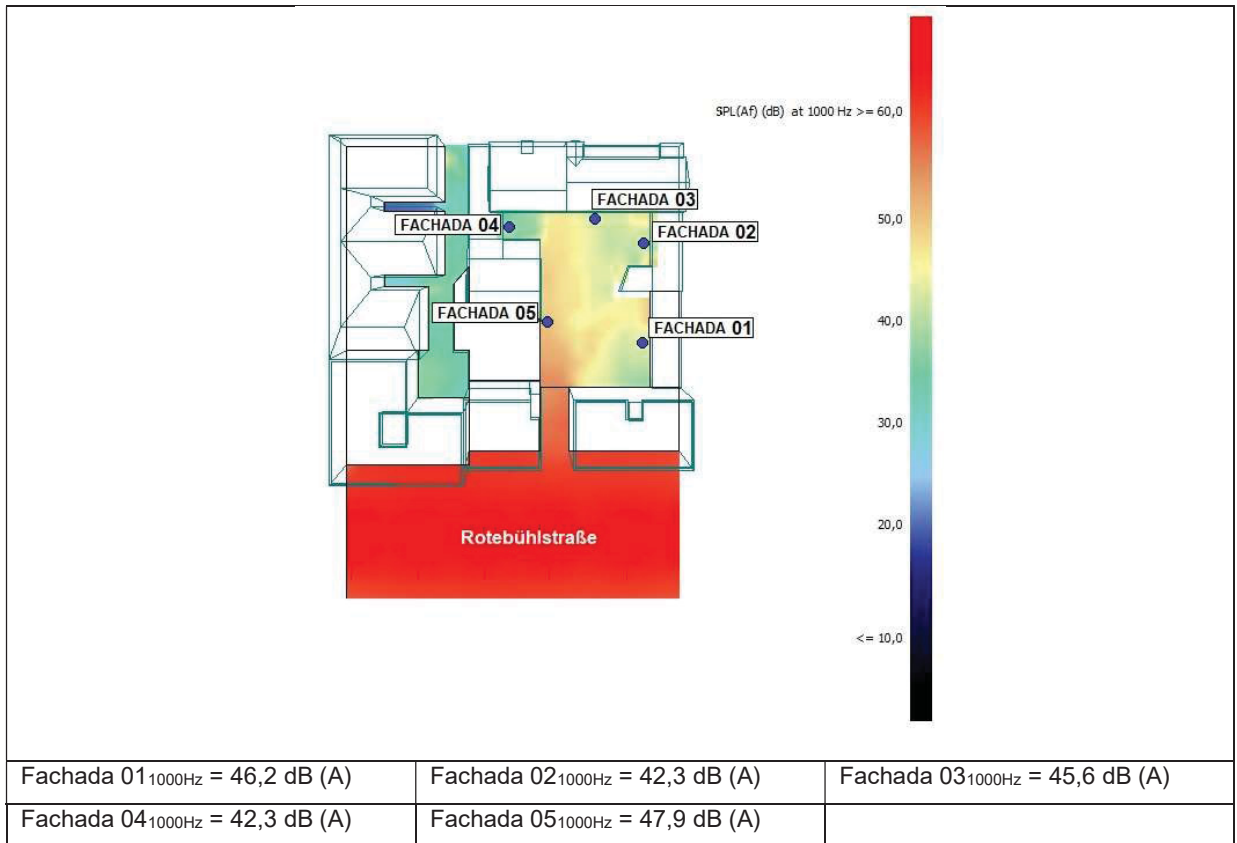
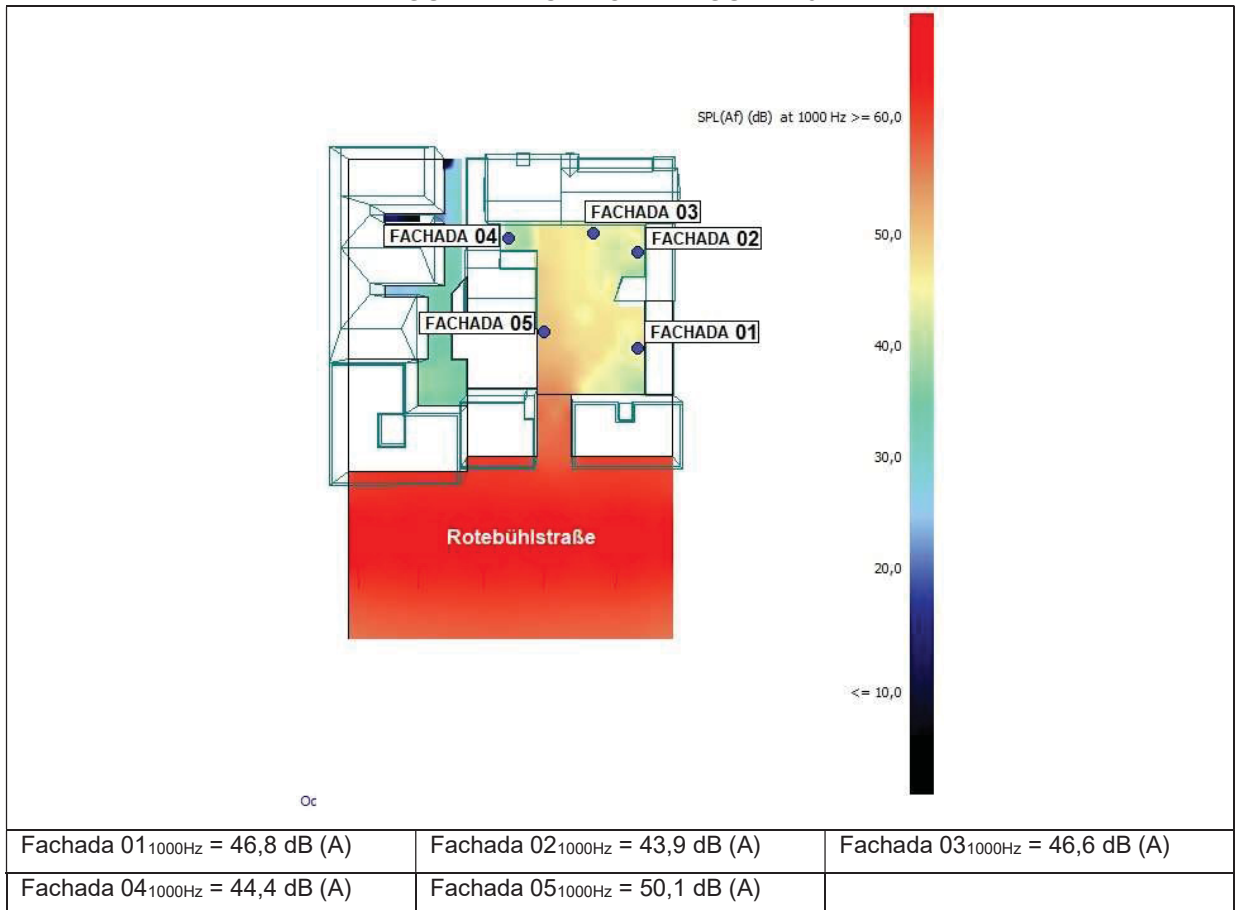


FIGURA 42 - CÂNION LARGURA - 6M



4.2.6.5 Variação do comprimento do cânion

Foram elaboradas simulações dos níveis de pressão sonora, variando o comprimento do cânion em relação ao comprimento original (12m). Assim, as simulações deram-se com comprimento de 15m.

1) Cânion – comprimento 15 metros

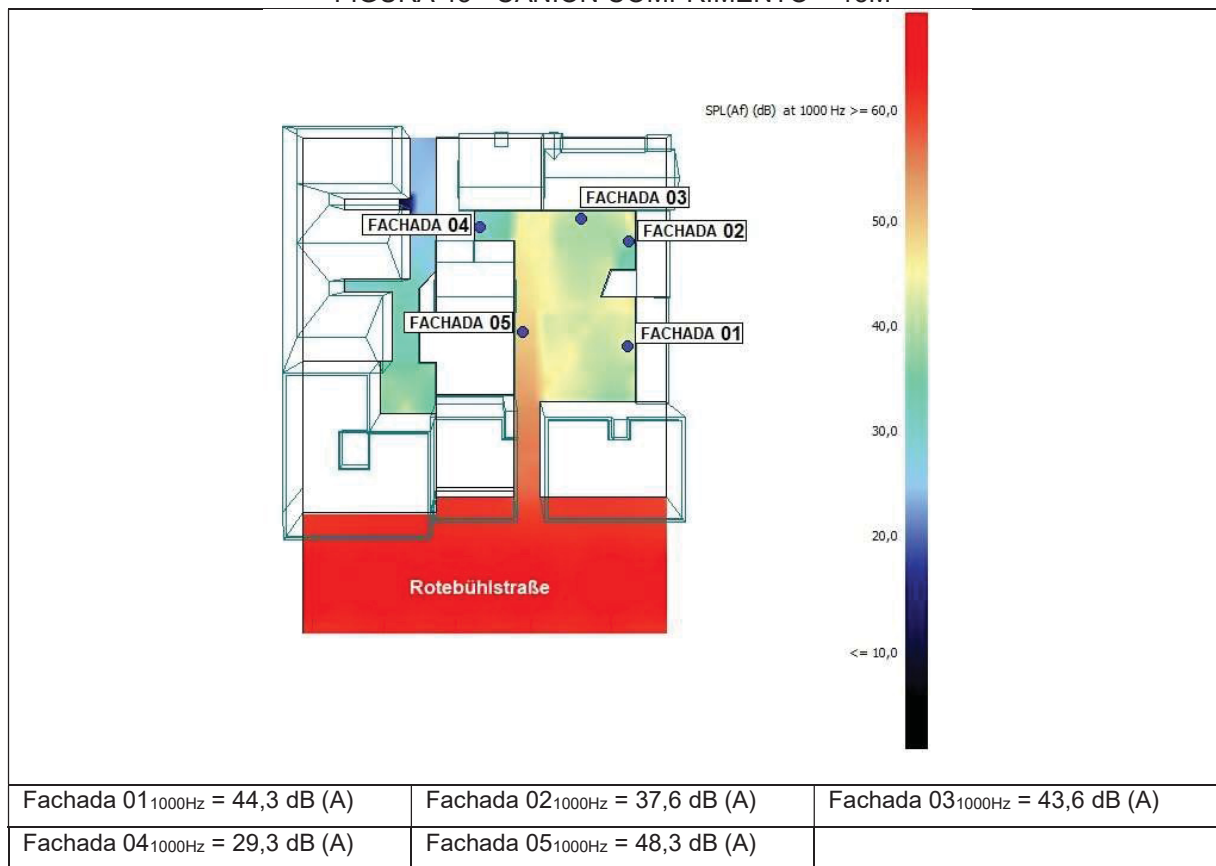
A TABELA 18 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion com comprimento de 12m, ou seja, 3m superior que o comprimento original. Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 18 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM COMPRIMENTO DE 15M

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	34,3	33,9	39,6	43,2	44,3	41,1	33,1	17,8	48,9
Fachada 02	25,9	27,0	32,5	36,6	37,6	34,5	26,2	9,8	42,1
Fachada 03	33,0	33,8	38,5	42,6	43,6	40,5	31,1	12,6	48,1
Fachada 04	20,0	20,1	24,4	28,3	29,3	26,4	18,0	1,5	34,0
Fachada 05	37,3	38,4	42,6	46,8	48,3	46,0	38,6	25,8	52,9

Na FIGURA 43 pode-se observar a dispersão de NPS, para o comprimento simulado na frequência de 1000Hz. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 43 - CÂNION COMPRIMENTO – 15M



4.2.7 Variação dos materiais como medida de mitigação

Neste item estão expostos os resultados atingidos, para mensurar a influência dos materiais na transmissão sonora através de espaços abertos e avaliar como possível medida para atenuação de ruído ambiental sobre fachadas localizadas após espaços abertos. Para tal, foram modeladas situações em que o revestimento interno de túneis e cânions, excetuando a superfície de pavimentação, foram testados para materiais com maior absorção sonora. Desta forma, foram selecionados materiais para as superfícies internas caracterizados como: 10% ($\alpha = 0,1$) absorvente, 30% absorvente ($\alpha = 0,3$), 50% absorvente ($\alpha = 0,5$) e 70% absorvente ($\alpha = 0,7$).

4.2.7.1 Variação dos materiais - Túnel

A seguir estão apresentados os valores de NPS sobre as fachadas de interesse, alterando os coeficientes de absorção interna do túnel objeto de estudo, porém, mantendo as dimensões originais.

1) Túnel - 10% absorvente

A TABELA 19 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel. Os cálculos de predição se deram considerando que as superfícies internas do túnel estão revestidas com material de 10% de absorção sonora ($\alpha = 0,1$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 19 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 10% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	36,1	37,0	41,5	45,8	47,1	44,6	37,0	23,0	51,6
Fachada 02	34,3	35,3	40,1	44,3	45,6	43,0	35,1	20,7	50,1
Fachada 03	34,6	35,7	40,2	44,5	45,9	43,5	36,0	22,7	50,5

2) Túnel - 30% absorvente

A TABELA 20 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel. Os cálculos de predição se deram considerando que as superfícies internas do túnel estão revestidas com material de 30% de absorção sonora ($\alpha = 0,3$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 20 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 30% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	35,2	36,1	40,4	44,7	46,0	43,5	35,9	21,9	50,6
Fachada 02	28,4	29,5	34,4	38,6	39,8	37,2	29,3	14,8	44,3
Fachada 03	28,6	29,7	34,2	38,5	39,9	37,6	30,0	16,8	44,5

3) Túnel - 50% absorvente

A TABELA 21 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel. Os cálculos de predição se deram considerando que as superfícies internas do túnel estão revestidas com material de 50% de absorção sonora ($\alpha = 0,5$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 21 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 50% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	34,9	35,8	40,1	44,3	45,6	43,1	35,5	21,4	50,2
Fachada 02	22,7	24,6	29,4	33,3	34,3	31,4	23,3	8,0	38,9
Fachada 03	21,1	23,3	27,4	31,3	32,5	30,0	22,5	9,3	37,2

4) Túnel - 70% absorvente

A TABELA 22 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao túnel. Os cálculos de predição se deram considerando que as superfícies internas do túnel estão revestidas com material de 70% de absorção sonora ($\alpha = 0,7$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 22 - TÚNEL - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 70% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	34,8	35,7	40,0	44,2	45,5	43,0	35,4	21,3	50,1
Fachada 02	20,4	22,0	27,2	31,2	32,2	29,2	20,7	4,1	36,8
Fachada 03	13,0	16,1	19,9	23,4	24,4	21,9	14,3	0,8	29,2

Nas FIGURAS 44 a 47, pode-se observar a dispersão de NPS e a influência dos materiais utilizados no túnel, com diferentes coeficientes de absorção simulados. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 44 - TÚNEL COM MATERIAL 10% ABSORVENTE

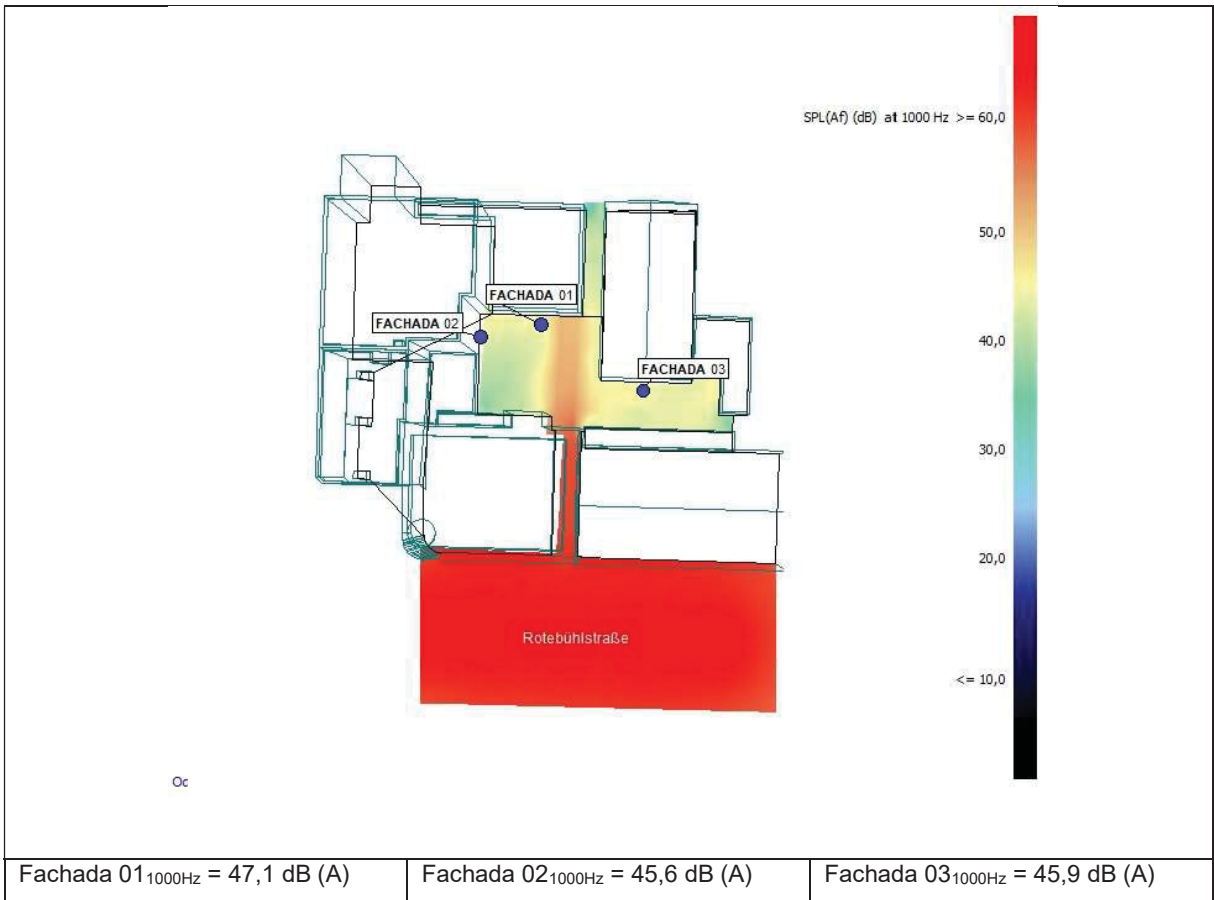


FIGURA 45 - TÚNEL COM MATERIAL 30% ABSORVENTE



FIGURA 46 - TÚNEL COM MATERIAL 50% ABSORVENTE

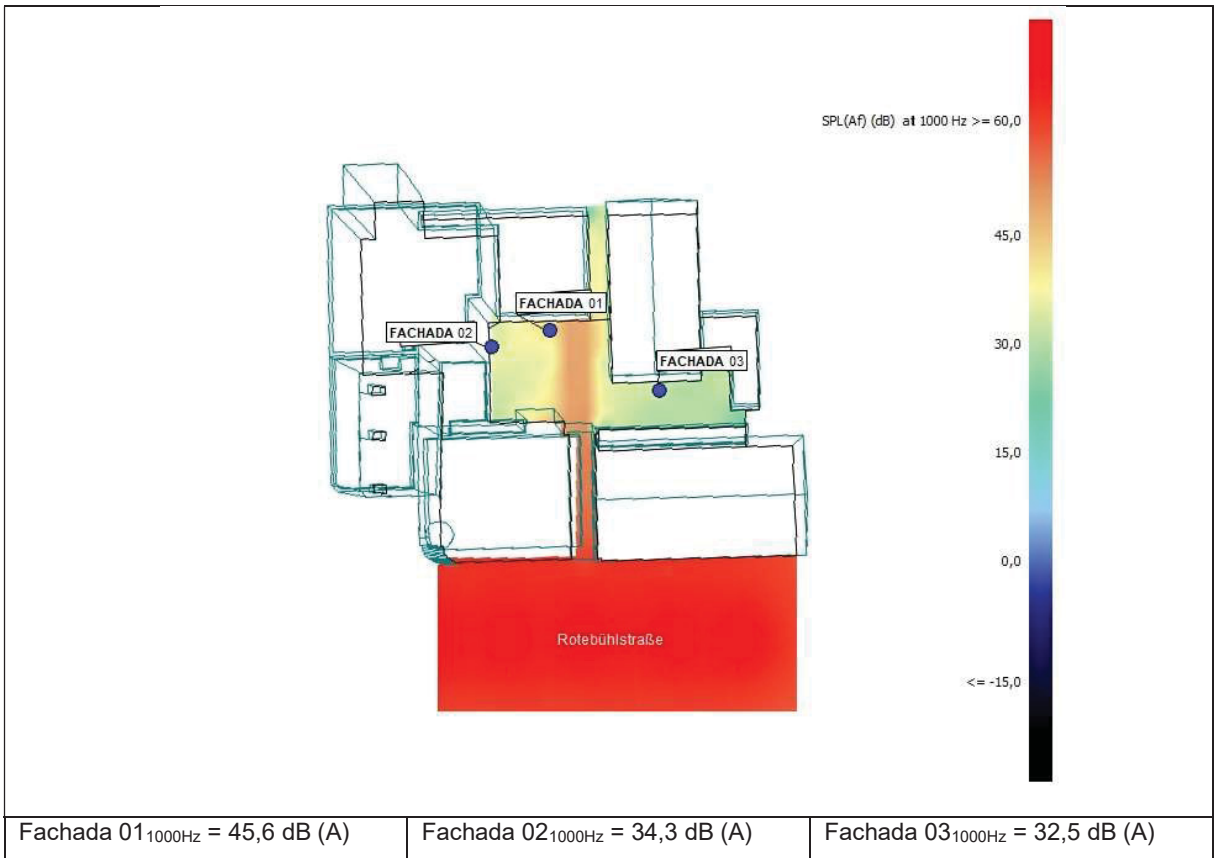
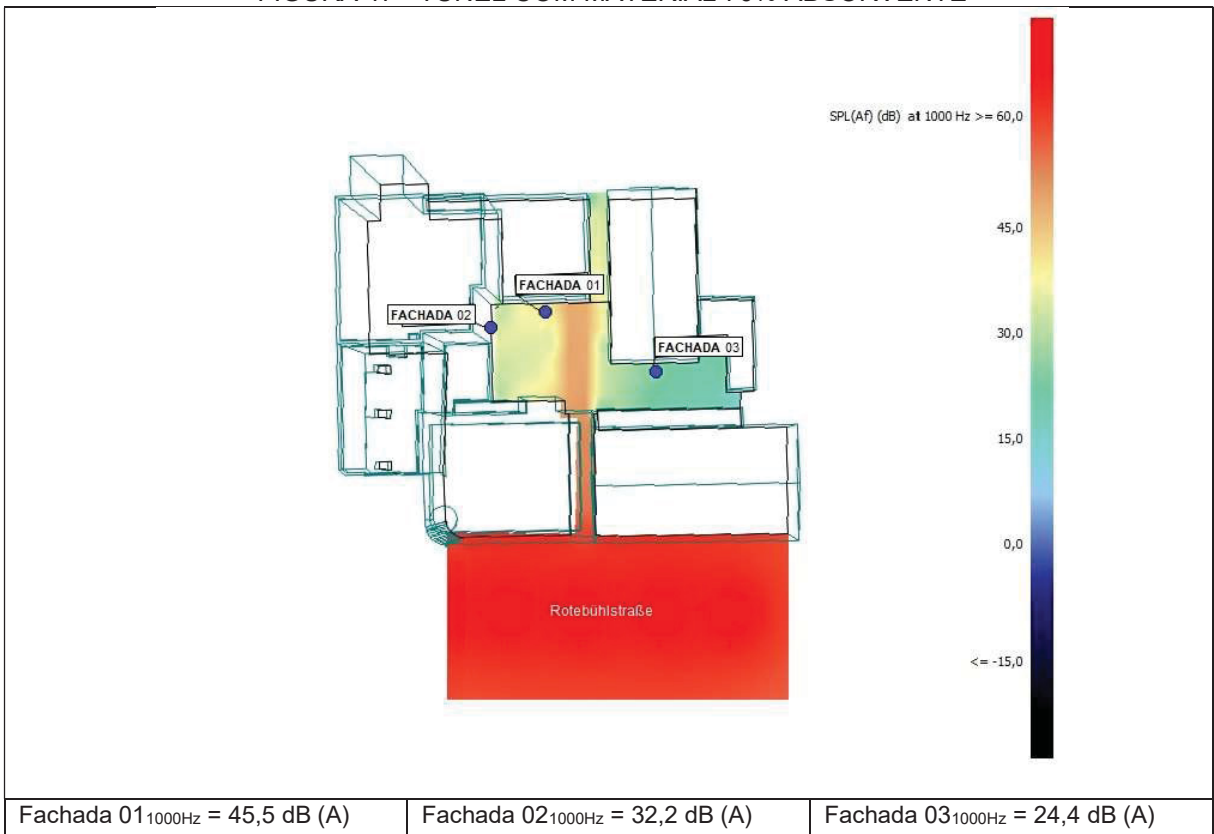


FIGURA 47 - TÚNEL COM MATERIAL 70% ABSORVENTE



4.2.7.2 Variação dos materiais - Cânion

Aqui serão apostados os resultados de NPS sobre as fachadas de interesse, alterando os coeficientes de absorção interna do cânion objeto de estudo, porém, mantendo as dimensões originais.

1) Cânion - 10% absorvente

A TABELA 23 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion. Os cálculos de predição consideraram que as superfícies internas do cânion estão revestidas com material de 10% de absorção sonora ($\alpha = 0,1$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 23 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 10% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	34,3	35,3	40,0	44,2	45,4	42,5	33,9	17,9	49,9
Fachada 02	33,0	34,0	38,4	42,3	43,6	40,9	32,7	17,2	48,2
Fachada 03	29,6	30,1	34,3	38,5	39,7	37,1	28,8	13,1	44,3
Fachada 04	21,5	21,9	26,0	30,1	31,4	28,6	20,4	4,7	35,9
Fachada 05	35,5	36,4	40,3	44,7	46,1	44,0	36,4	23,6	50,8

2) Cânion - 30% absorvente

A TABELA 24 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion. Os cálculos de predição consideraram que as superfícies internas do cânion estão revestidas com material de 30% de absorção sonora ($\alpha = 0,3$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 24 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 30% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	29,8	30,9	35,5	39,8	40,9	38,1	29,6	14,0	45,4
Fachada 02	30,9	31,9	36,2	40,3	41,6	38,9	30,7	15,3	46,1
Fachada 03	28,0	28,4	32,5	36,6	37,7	35,1	26,9	11,4	42,4
Fachada 04	20,6	20,7	24,8	28,8	30,0	27,3	19,1	3,4	34,7
Fachada 05	34,6	35,5	39,4	43,8	45,2	43,1	35,6	22,8	49,8

3) Cânion - 50% absorvente

A TABELA 25 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion. Os cálculos de predição consideraram que as superfícies internas do cânion estão revestidas com material de 50% de absorção sonora ($\alpha = 0,5$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 25 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 50% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	26,1	27,4	31,5	35,5	36,6	33,8	25,5	10,6	41,2
Fachada 02	28,9	30,1	34,2	38,2	39,4	36,8	28,7	13,3	44,0
Fachada 03	27,2	27,5	31,3	35,3	36,4	33,7	25,5	10,1	41,1
Fachada 04	20,0	20,0	23,8	27,8	29,2	26,4	18,2	2,5	33,8
Fachada 05	34,2	35,1	38,9	43,2	44,6	42,5	35,0	22,3	49,3

4) Cânion - 70% absorvente

A TABELA 26 expõe os níveis de pressão sonora simulados sobre as fachadas dos edifícios posteriores ao cânion. Os cálculos de predição consideraram que as superfícies internas do cânion estão revestidas com material de 70% de absorção sonora ($\alpha = 0,7$). Os resultados de NPS expressos em dB e ponderados em A.

TABELA 26 - CÂNION - SIMULAÇÕES COM MATERIAL 70% ABSORVENTE

Pontos	Nível de pressão sonora [dB] na frequência [Hz]								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A
Fachada 01	24,0	25,5	29,6	33,6	34,6	31,8	23,5	8,6	39,3
Fachada 02	26,6	28,3	32,1	36,0	37,3	34,8	26,9	11,7	42,0
Fachada 03	26,7	27,0	30,7	34,7	35,8	33,1	24,9	9,4	40,5
Fachada 04	19,5	19,4	23,2	27,2	28,5	26,0	17,7	2,1	33,2
Fachada 05	33,9	34,8	38,6	42,9	44,4	42,2	34,7	22,1	49,0

Nas FIGURAS 48 a 51, pode-se observar a dispersão de NPS e a influência dos materiais utilizados no cânion, com diferentes coeficientes de absorção simulados. A escala de cores representa os níveis sonoros simulados na área de interesse e os pontos em destaque apresentaram valores destacados para a frequência de 1000Hz.

FIGURA 48 - CÂNION COM MATERIAL 10% ABSORVENTE

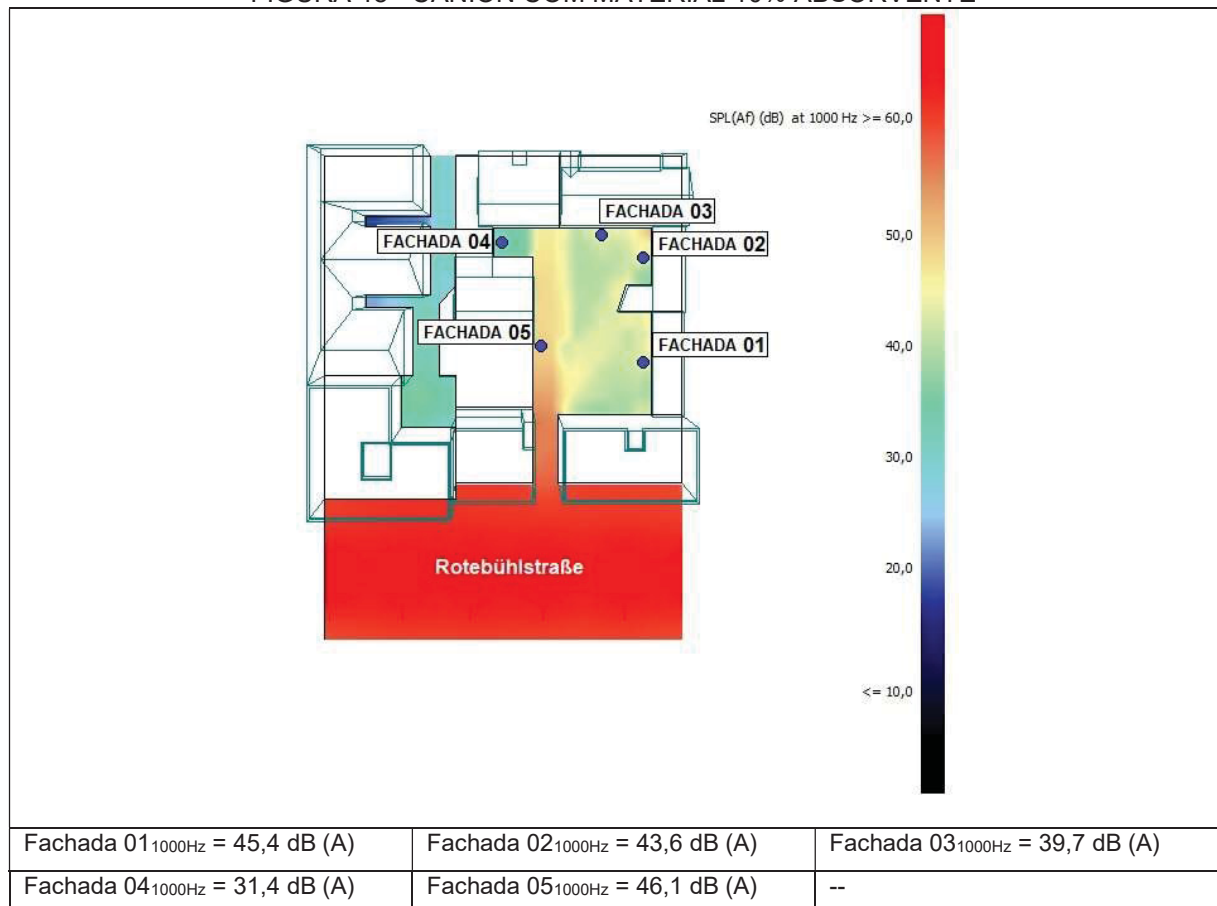


FIGURA 49 - CÂNION COM MATERIAL 30% ABSORVENTE

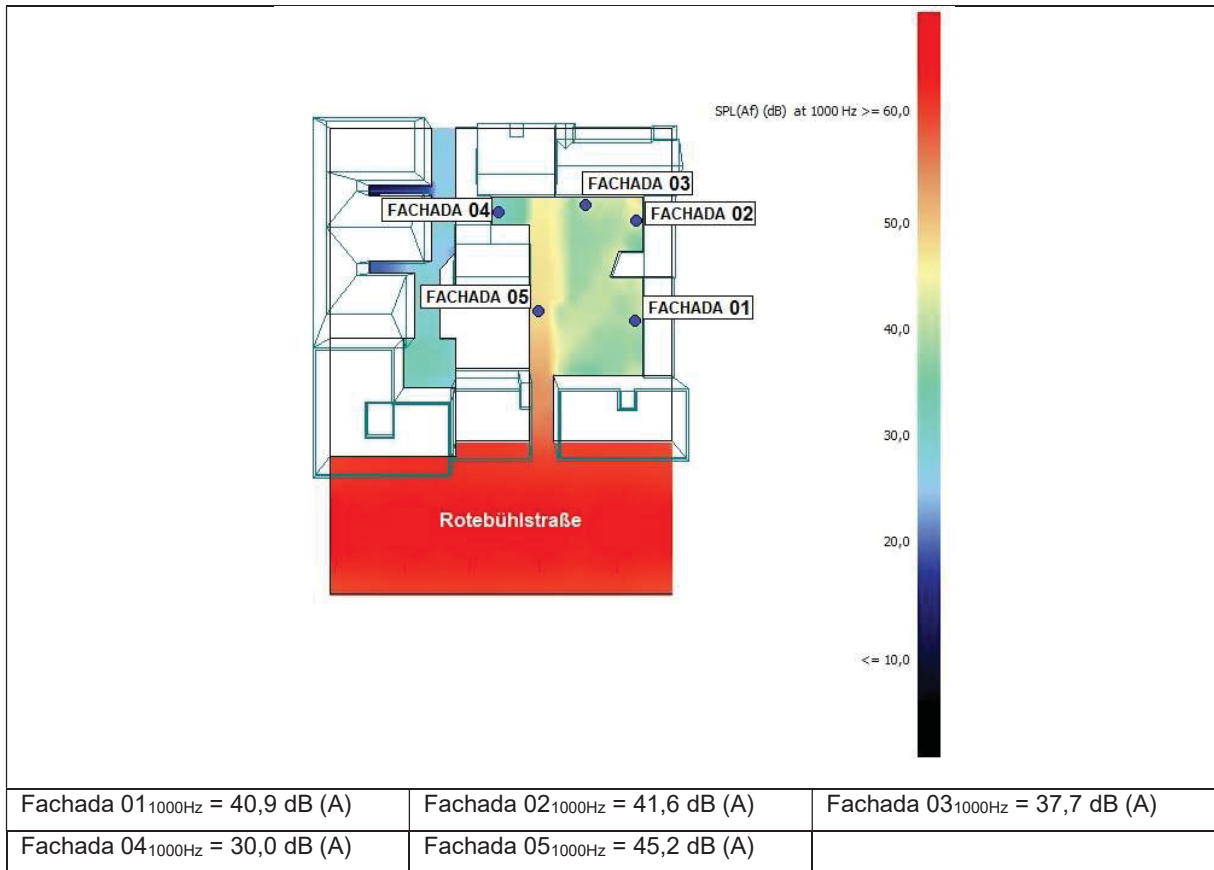


FIGURA 50 - CÂNION COM MATERIAL 50% ABSORVENTE

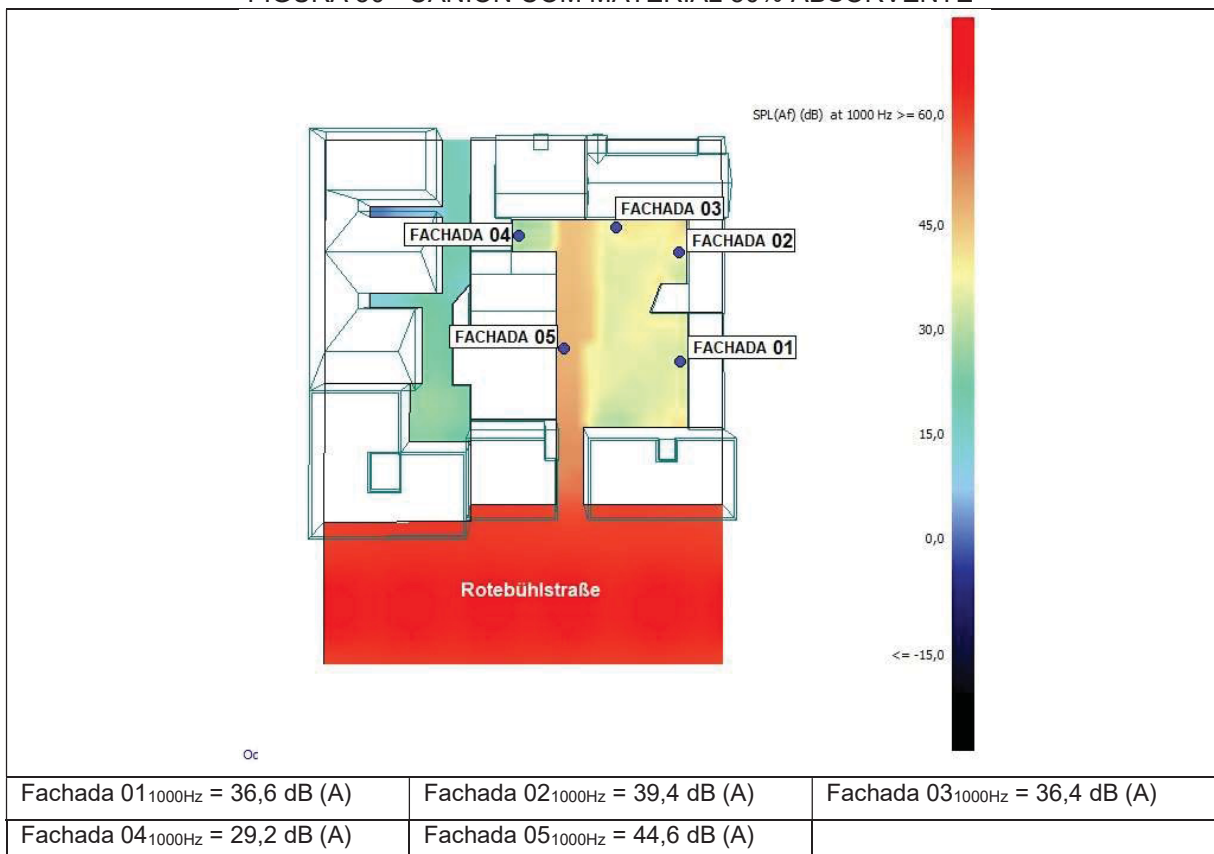
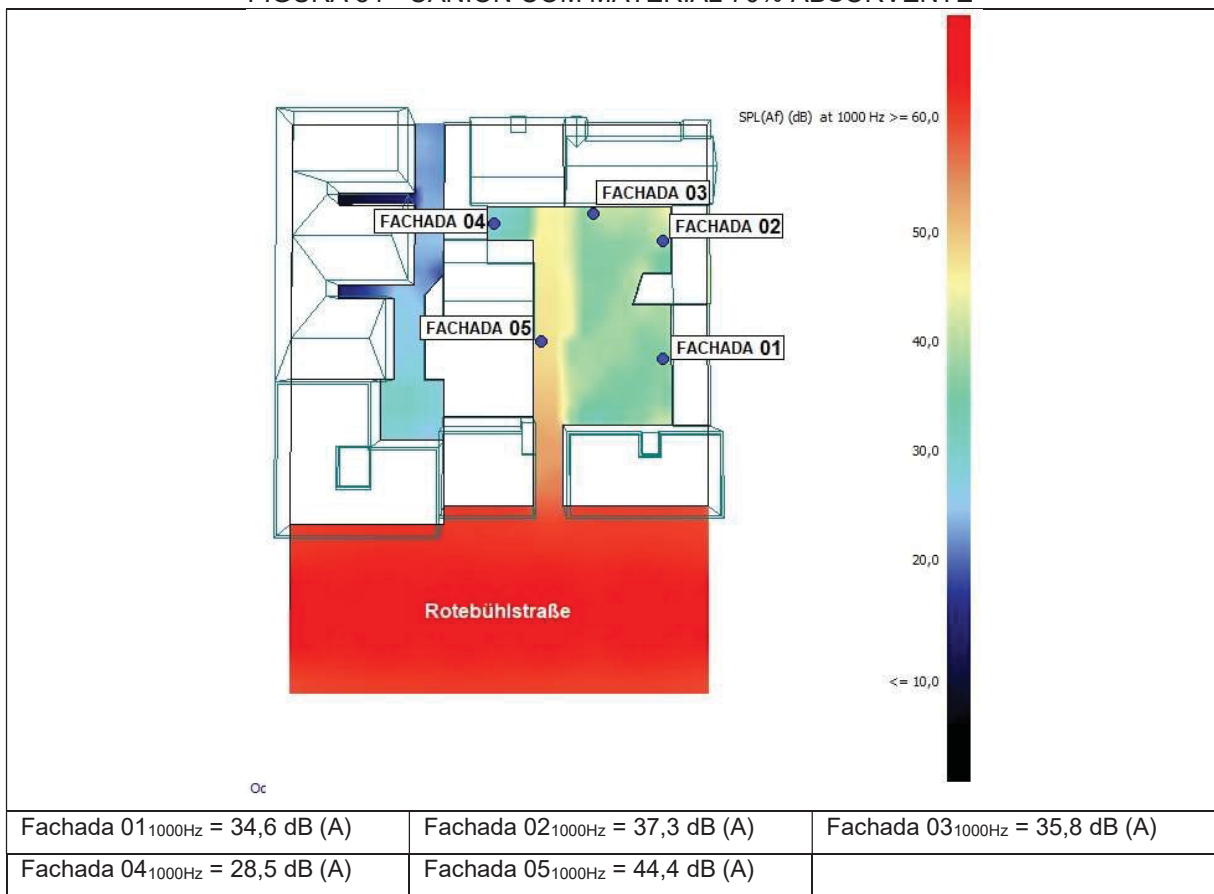


FIGURA 51 - CÂNION COM MATERIAL 70% ABSORVENTE



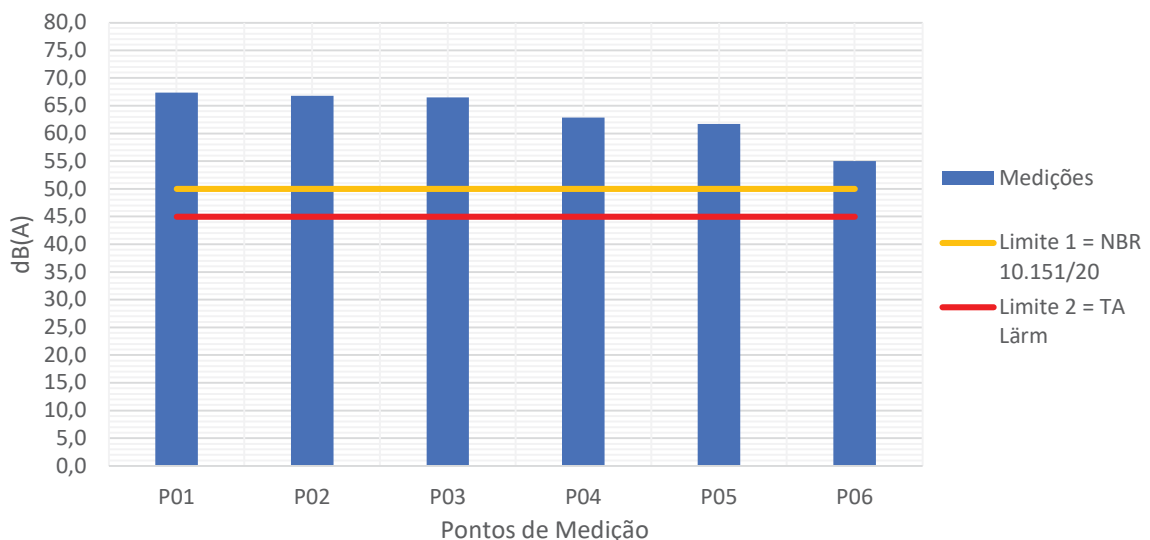
5 DISCUSSÕES

5.1 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

Ao analisar as medições acústicas ponderadas em A, primeiramente foi possível constatar característica do ruído de tráfego rodoviário urbano no local, onde, o amplo com frequências para todos os pontos medidos, apresentaram valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz. Este fenômeno é esperado de acordo com a literatura, devido aos ruídos gerados por motores de veículos combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

Ainda, foi possível comparar os valores mensurados dos níveis de pressão sonora em cada ponto, com os valores máximos para o período diurno, orientados pela legislação alemã *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)* e norma brasileira ABNT NBR 10.151/2019. Conforme especificada na metodologia, a proposta desse trabalho é proporcionar o conforto acústico à comunidade, para a avaliação segundo a legislação, foram empregados limites para regiões mais sensíveis ao ruído, ou seja, regiões habitacionais, áreas com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. A FIGURA 52 apresenta os limites comparativos representados por linhas horizontais e os resultados obtidos com as medições, representados por barras verticais.

FIGURA 52 - NÍVEIS SONOROS MEDIDOS X LIMITES – dB(A)



Os resultados para verificação dos níveis sonoros urbanos em relação aos pontos P01, P02 e P03, apontaram que as fachadas frontais dos edifícios avaliados estão impactadas pelo ruído de tráfego urbano. Os valores apresentados foram na ordem de 16,5 a 17,4 dB(A) acima do recomendado para áreas residenciais e 21,5 a 22,4 dB(A) acima para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. Desse modo, pode-se dizer que áreas sensíveis ao longo da *Rotebühlstraße*, estão impactadas negativamente pelo ruído de tráfego urbano emitido na via.

Para os pontos P04, P05 e P06, classificados como objetos principais do estudo e localizados após o espaço aberto urbano na forma de túnel, verificou-se que, mesmo em pontos posicionados posteriormente ao edifício, as medições demonstraram valores de NPS na ordem de 5,0 a 12,9 dB(A) acima do deliberado para áreas residenciais e 10,0 a 17,9 dB(A) acima para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. Assim, pode-se afirmar que os locais atualmente, estão impactados negativamente pelo ruído de tráfego urbano gerado na *Rotebühlstraße* e que, espaços abertos em edifícios, como túneis e cânions, são considerados “pontos fracos”, pois possibilitam a transmissão do ruído em níveis relevantes para outros locais.

5.2 SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

5.2.1 Situação atual

Para a representação atual da transmissão sonora através de espaços abertos, foram realizadas simulações acústicas onde, foram mantidas as dimensões geométricas originais dos espaços, bem como os materiais utilizados em suas superfícies internas. Desta forma, os resultados de NPS simulados, representam uma aproximação real dos níveis sonoros incidentes sobre fachadas localizadas posteriormente aos espaços abertos do tipo túnel e cânion (TABELA 27).

TABELA 27 - NPS SIMULADOS SOBRE ÀS FACHADAS X LIMITES

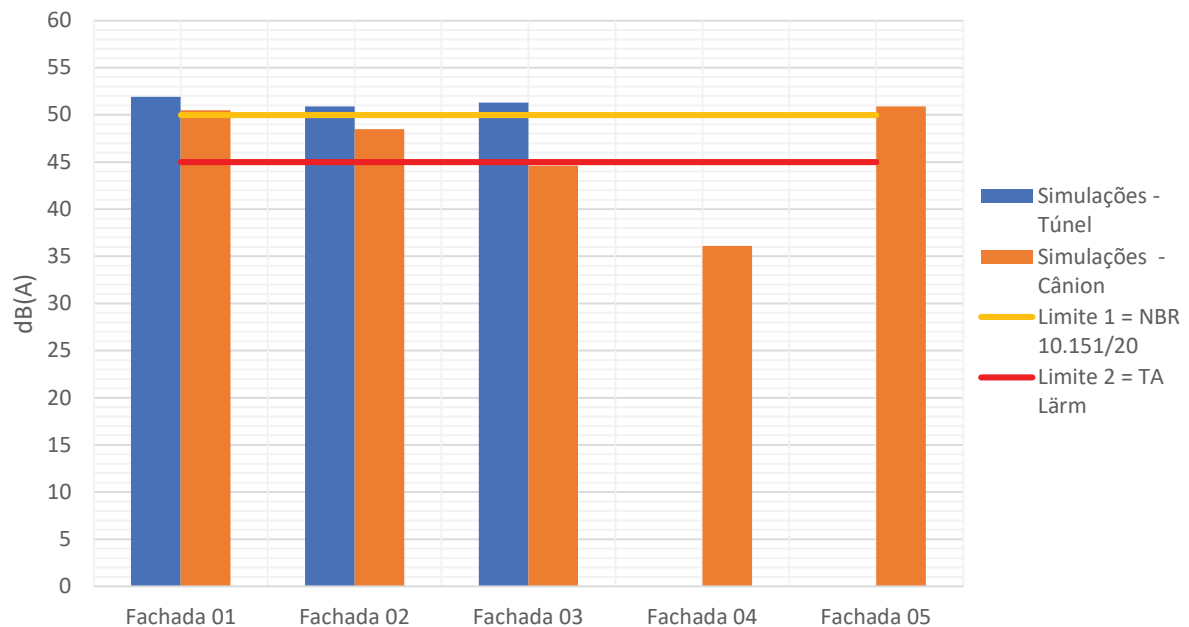
Ponto	Túnel dB(A)	Cânion dB(A)	Limite 1* dB(A)	Limite 2** dB(A)
Fachada 01	51,9	50,5	50	45
Fachada 02	50,9	48,5		
Fachada 03	51,3	44,6		
Fachada 04	--	36,1		
Fachada 05	--	50,9		

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

**Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 53 apresenta na forma de gráfico os resultados descritos na TABELA 27.

FIGURA 53 - NPS SIMULADOS SOBRE FACHADAS – SITUAÇÃO ATUAL



As simulações acústicas utilizadas para representar os NPS incidentes sobre as fachadas posteriores ao túnel, evidenciaram que nenhuma das três fachadas simuladas está atendendo aos requisitos mínimos estipulados pela legislação TA Lärm e ABNT NBR 10.151. Os valores simulados para as fachadas pós túnel, apresentaram valores na ordem de 0,9 a 1,9 dB(A) acima do recomendado para áreas classificadas como residenciais e 5,9 a 6,9 acima do limite para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas.

Os resultados calculados para as fachadas pós cânion, expuseram para as fachadas 01 e 05, valores acima dos padrões orientados pelas normas de referência,

na ordem de 0,5 a 0,9 dB(A) superior para áreas consideradas residenciais e 5,5 a 5,9 acima do limite para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. A respeito das fachadas 02, 03 e 04 pós cânion, os resultados se mostraram abaixo dos limites estipulados. Esta distinção entre valores é explicada pela atenuação natural do ruído com a distância, haja vista que, enquanto fachadas mais afastadas do cânion apresentaram valores satisfatórios, fachadas localizadas mais próximas à rua *Rotebühlstraße* e ao cânion, apresentaram valores mais altos, conseqüentemente, acima do recomendado pelos padrões estipulados.

De forma geral, as simulações acústicas mantendo os elementos construtivos mostraram que, mesmo para fachadas localizadas após túneis e cânions, são afetadas negativamente pelo ruído de tráfego, quando comparados os valores simulados e com os limites estipulados por normas. Assim, as simulações acústicas com intuito de caracterização do cenário atual, sugerem que espaços abertos em edifícios (túneis e cânions), podem ser considerados “pontos fracos”, pois propiciam a transmissão do ruído em níveis relevantes para outros locais.

Através da escala de cores dos mapas acústicos, ainda pode ser observado um “corredor sonoro”, localizado de maneira central após a saída dos espaços abertos e indicando os valores de NPS calculados. Os mapas de cores apontam visualmente, que fachadas afastadas de maneira lateral a túneis e cânions, estão sujeitas a níveis sonoros mais moderados.

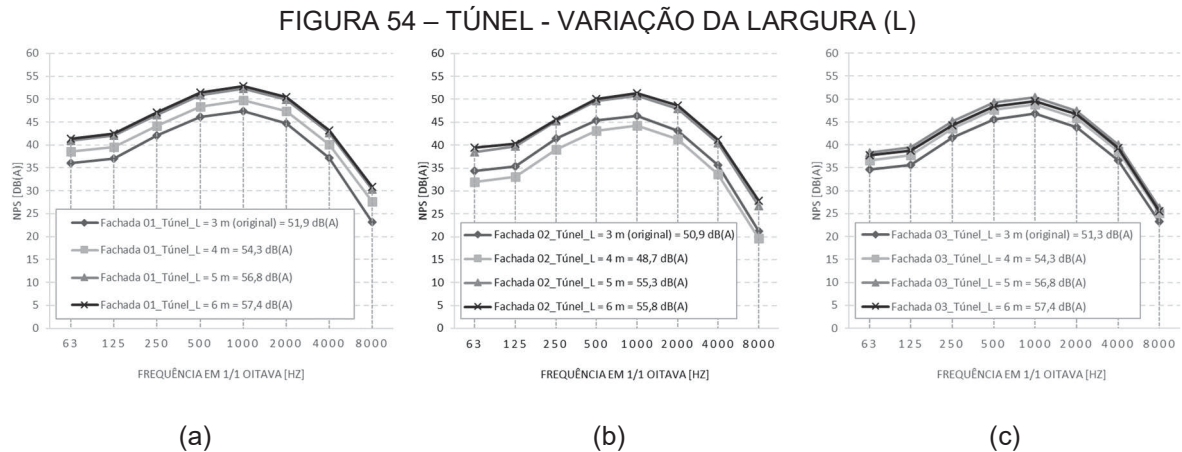
Portanto, com vistas ao conforto acústico da população das regiões avaliadas, ficou notório a necessidade da avaliação do comportamento sonoro através desses espaços abertos, bem como, a implementação de medidas que possam amenizar a transmissão do ruído através destes espaços. Logo, as simulações computacionais para a avaliação dos cenários futuros foram fundamentais, pois foram o ponto de partida para que se dimensione de forma apropriada a substituição ou alteração de algum elemento construtivo de túneis e cânions, com o propósito de mitigar os NPS transmitidos entre esses espaços.

5.2.2 Variação das dimensões

Neste item serão discutidos os valores de níveis de pressão sonora alcançados, quanto a transmissão sonora através de túnel e cânion urbano, avaliando a influência das dimensões geométricas dos espaços abertos.

5.2.2.1 Variação da largura – Túnel

A FIGURA 54 apresenta evolução dos NPS [dB(A)] por banda de oitava na fachada 01 (a), fachada 02 (b) e fachada 03 (c), obtidos com a variação da largura do túnel.



Para todas as larguras de fachadas simuladas observou-se o acréscimo dos NPS constante para todas as frequências. Ainda, pode-se verificar os NPS [dB(A)] com características de ruído de tráfego mantidas, ou seja, com valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz devido aos ruídos gerados por motores, combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A TABELA 28 apresenta os valores simulados dos níveis de pressão sonora ponderados em (A) sobre as fachadas, alterando a largura do túnel em relação à largura original (3m). Assim, as simulações se deram com as seguintes larguras (L): 4m, 5m e 6m.

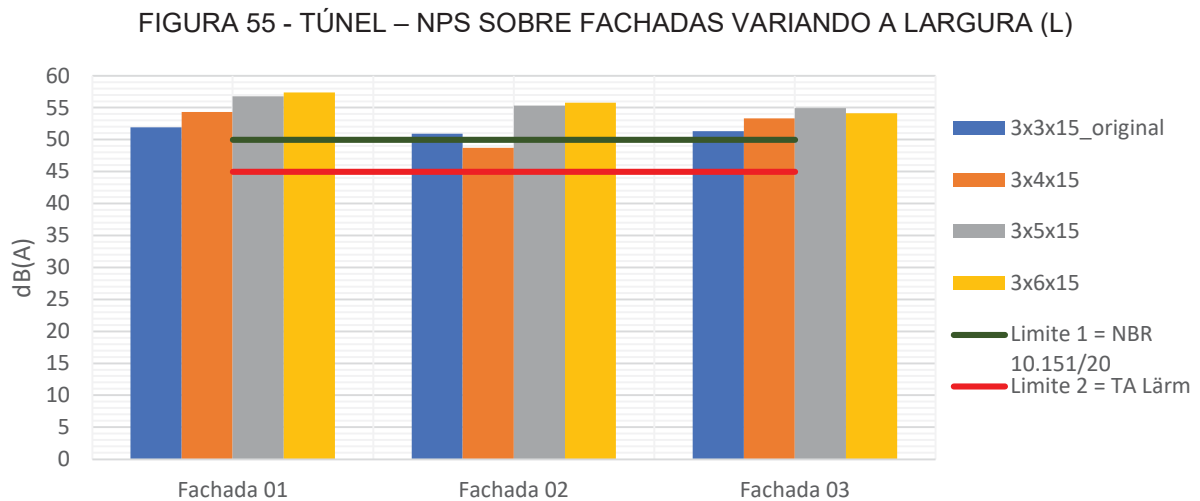
TABELA 28 – NPS SIMULADOS VARIANDO LARGURA DO TÚNEL (L)

Ponto	Nível de pressão sonora [dB(A)] quando alterado a largura do túnel (L) [m]					Limite 1*	Limite 2**
	3	4	5	6			
Fachada 01	51,9	54,3	56,8	57,4	50	45	
Fachada 02	51,9	54,3	56,8	57,4			
Fachada 03	51,9	54,3	56,8	57,4			

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

**Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 55 apresenta na forma de gráfico os resultados descritos na TABELA 28, confrontados com os limites propostos.



Confrontando os valores de NPS simulados mantidos os elementos geométricos originais, com o valor calculado para a máxima largura do túnel, pode ser verificado o aumento dos NPS na grandeza de 5,5 dB(A) para a fachada 01, de 4,9 dB(A) para fachada 02 e 2,8 dB(A) para fachada 03. Logo, as simulações acústicas apresentaram de forma geral, a tendência de acréscimo dos níveis de pressão sonora incidentes sobre as fachadas posteriores ao túnel, à medida que foi acrescido a largura do espaço.

Ainda, pode ser verificado de forma quantitativa, a elevação dos NPS com a variação da largura, quando confrontados os resultados simulados com os limites estipulados pela *TA Lärm* (1998) e ABNT NBR 10.151 (2020). Os valores pós túnel, simulados para as dimensões originais, apresentaram valores na ordem de 0,9 a 1,9 dB(A) acima para áreas consideradas residenciais e 5,9 a 6,9 dB (A) acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. Já, os resultados alcançados para a maior largura simulada, 6m, apresentaram valores na ordem de 4,1 a 7,4 dB(A) acima para áreas classificadas residenciais e 9,1 a 12,4 dB(A) acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas.

Pode-se estabelecer também, que os níveis de pressão sonora calculados sobre as fachadas pós túnel, podem ser representados pela parcela de ondas sonoras que incidem diretamente sobre as fachadas, somadas às ondas resultantes das

reflexões e absorções que ocorrem nas superfícies internas do túnel. Logo, os resultados se mostraram coerentes com tal definição, pois, quando houve o acréscimo da largura do túnel, por conseguinte ocorreu o aumento da parcela do som que incide diretamente sobre as fachadas, devido à redução das barreiras físicas para as ondas sonoras. Também, quando foi estipulado o aumento das dimensões do túnel, houve menos perda de intensidade sonora, ocasionada pelas reflexões e absorções sonoras nas superfícies do túnel.

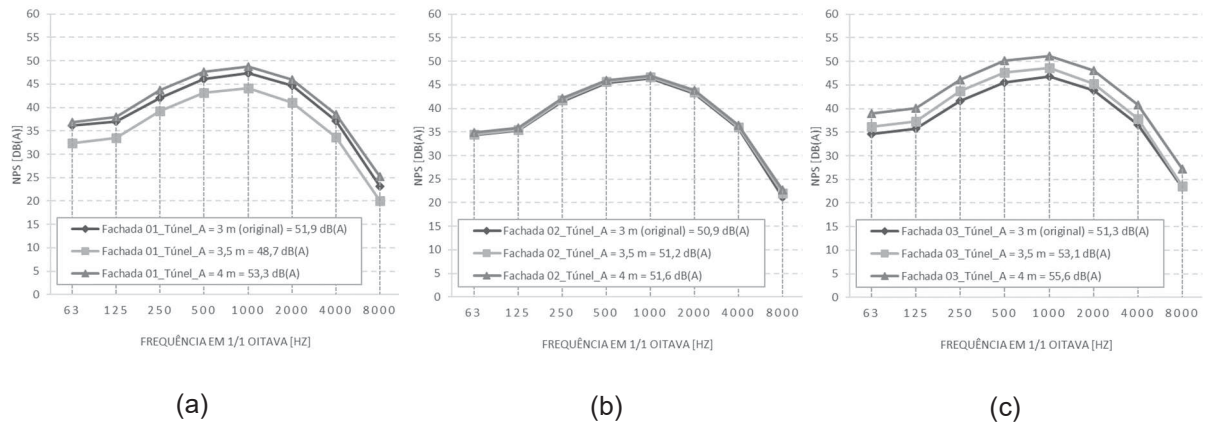
Através da escala de cores das simulações acústicas, ainda pode ser observado a influência da largura no túnel na transmissão sonora, pois, o “corredor sonoro” localizado na saída do túnel, indicando os valores de NPS, foi modificando seu aspecto conforme ocorreu o acréscimo da largura. Através dos mapas de cores, visualiza-se que para túneis com maior largura, as fachadas laterais são mais impactadas pelo ruído e que a dispersão sonora pós túnel ocorre de forma mais homogênea sobre a região posterior.

Assim, ficou evidente a influência da largura na transmissão sonora do ruído de tráfego através de túneis urbanos, pois, fachadas de edifícios localizadas após túneis com larguras inferiores, apresentaram níveis sonoros mais baixos, com relação aos níveis sonoros simulados para túneis com larguras superiores. Entretanto, mesmo para larguras menores, os resultados de NPS sobre as fachadas pós túnel estão acima dos níveis orientados pelas normatizações. Portanto, medidas de controle complementares terão que ser implementadas, para alcançar os níveis de conforto acústico esperados para os locais.

5.2.2.2 Variação da altura – Túnel

A FIGURA 56 apresenta evolução dos NPS [dB(A)] por banda de oitava na fachada 01 (a), fachada 02 (b) e fachada 03 (c), obtidos com a variação da altura do túnel.

FIGURA 56 – TÚNEL - VARIAÇÃO DA ALTURA (A)



Observa-se o acréscimo dos NPS constante para todas as frequências das fachadas avaliadas. Para todas as alturas simuladas, os NPS [dB(A)] mantiveram características de ruído de tráfego, ou seja, com valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz, devido aos ruídos gerados por motores, combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A TABELA 29 apresenta os valores simulados dos níveis de pressão sonora ponderados em (A) sobre as fachadas, alterando a altura do túnel em relação à altura original (3m). Assim, as simulações se deram com as seguintes alturas (A): 3,5m e 4m.

TABELA 29 – NPS SIMULADOS VARIANDO ALTURA DO TÚNEL (A)

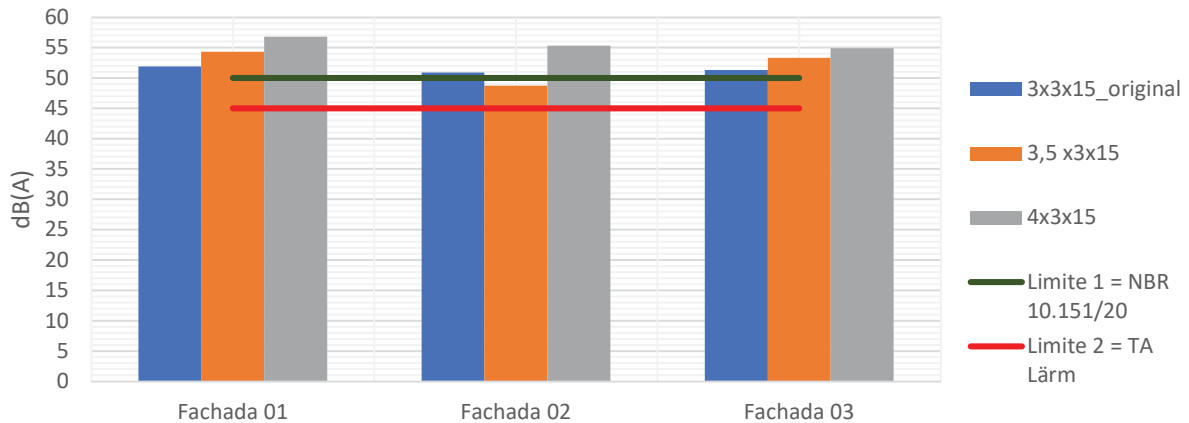
Ponto	Nível de pressão sonora [dB(A)] quando alterado a altura do túnel (A) [m]				
	3	3,5	4	Limite 1*	Limite 2**
Fachada 01	51,9	48,7	53,3	50	45
Fachada 02	50,9	51,2	51,6		
Fachada 03	51,3	53,1	55,6		

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

** Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 57 apresenta na forma de gráfico os resultados descritos na TABELA 29, confrontados com os limites propostos.

FIGURA 57 - TÚNEL – NPS VARIANDO A ALTURA (A)



Ao confrontar os dados obtidos nas simulações mantidos os elementos geométricos originais do túnel, com o valor calculado para a altura máxima do túnel, podem ser verificados acréscimos dos NPS na grandeza de 4,9 dB(A) para a fachada 01, de 4,4 dB(A) para fachada 02 e 3,6 dB(A) para fachada 03. Portanto, as simulações, mostraram de maneira geral, a tendência de acréscimo dos níveis de pressão sonora incidentes sobre as fachadas posteriores ao túnel, à medida que foi empregando o aumento da altura do túnel.

Pode ser verificado também de forma quantitativa, a elevação dos NPS com a variação da altura, quando confrontados os resultados simulados com os limites estipulados pela *TA Lärm* e ABNT NBR 10.151. Os valores simulados para as fachadas pós túnel, mantidas as dimensões originais do espaço, apresentaram valores sobre as fachadas na ordem de 0,9 a 1,9 dB(A) acima para áreas consideradas residenciais e 5,9 a 6,9 acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. Entretanto, os dados alcançados para a maior altura simulada, 4m, apresentaram níveis sonoros sobre as fachadas na ordem de 4,9 a 6,8 dB(A) acima do recomendado para áreas consideradas residenciais e 9,9 a 11,8 acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas.

Assim como explano anteriormente, os níveis de pressão sonora calculados sobre as fachadas pós túnel, podem ser representados pela parcela de ondas sonoras que incide diretamente nas fachadas, somada às ondas resultantes das reflexões e absorções que ocorrem nas superfícies internas do túnel. Logo, os resultados com relação à altura, também se mostraram coerentes com tal definição, pois, quando houve o acréscimo da altura do túnel, conseqüentemente ocorreu o aumento da

parcela do som que incide diretamente sobre as fachadas, devido à redução das barreiras físicas para as ondas sonoras. Também, quando empregado o aumento das dimensões do túnel, houve menos perda de intensidade sonora, ocasionada pelas reflexões e absorções sonoras nas superfícies do túnel.

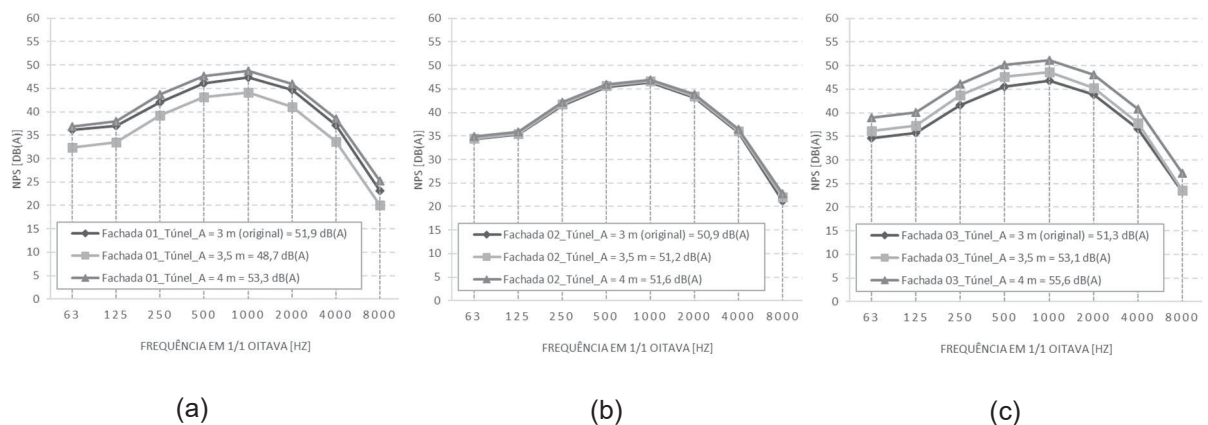
Mediante escala de cores gerada nas simulações acústicas, também pode ser observado a influência da altura no túnel na transmissão sonora, pois, o “corredor sonoro” localizado na saída do túnel, indicando os valores de NPS, foi alterando conforme ocorreu o acréscimo da altura. Analisando os mapas acústicos, observa-se ainda que, embora não tenha ocorrido uma maior dispersão lateral dos níveis sonoros, houve acréscimo dos níveis sonoros sobre todas as fachadas simuladas.

Dessa forma, ficou visível a influência da altura de túneis na transmissão sonora do ruído de tráfego, pois, fachadas de edifícios localizadas após túneis com alturas reduzidas, apresentaram níveis sonoros mais baixos, com relação aos níveis sonoros simulados para túneis com alturas superiores. Porém, mesmo para as menores alturas possíveis, os resultados de NPS simulados sobre as fachadas pós túnel, estão acima dos níveis orientados pelas normas de referência. Portanto, medidas de controle complementares terão que ser implementadas, para alcançar o conforto acústico previsto para as áreas.

5.2.2.3 Variação do comprimento – Túnel

A FIGURA 58 apresenta evolução dos NPS [dB(A)] por banda de oitava na fachada 01 (a), fachada 02 (b) e fachada 03 (c), obtidos com a variação comprimento do túnel.

FIGURA 58 – TÚNEL - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO (C)



Verifica-se o acréscimo dos NPS constante para todas as frequências das fachadas avaliadas. Para todos os comprimentos simulados, os NPS [dB(A)] mantiveram características de ruído de tráfego, ou seja, com valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz, devido aos ruídos gerados por motores, combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A TABELA 30 apresenta os valores simulados dos níveis de pressão sonora ponderados em (A) sobre as fachadas, alterando o comprimento do túnel em relação ao comprimento original (15m). Assim, além do comprimento original, também foi realizada uma simulação para o comprimento de 12m.

TABELA 30 – NPS SIMULADOS VARIANDO COMPRIMENTO DO TÚNEL (C)

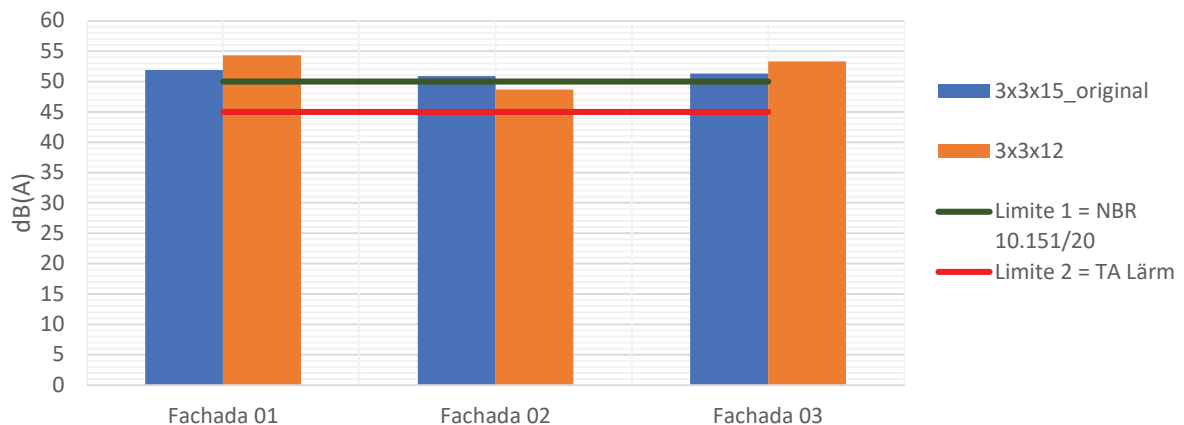
Ponto	Nível de pressão sonora [dB(A)] quando alterado o comprimento do túnel (C) [m]			
	15	12	Limite 1*	Limite 2**
Fachada 01	51,9	50,1	50	45
Fachada 02	50,9	48,8		
Fachada 03	51,3	51,2		

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

**Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 59 apresenta na forma de gráfico os resultados descritos na TABELA 30, confrontados com os limites propostos.

FIGURA 59 - TÚNEL – NPS VARIANDO O COMPRIMENTO (C)



Ao comparar os dados obtidos com as simulações de NPS, mantendo as dimensões originais do túnel, com os resultados alcançados para um comprimento menor da seção, pode ser verificado o acréscimo dos NPS na grandeza de 2,4 dB(A)

para a fachada 01, um decréscimo de 2,2 dB(A) para fachada 02 e um acréscimo de 2 dB(A) para fachada 03. Portanto, as simulações acústicas utilizadas para avaliar a influência do comprimento do túnel apontaram que, mesmo havendo um decréscimo de NPS para a fachada 02, houve a tendência de acréscimo dos níveis de pressão sonora incidentes sobre as demais fachadas, quando da redução do comprimento do túnel.

Mesmo havendo um decréscimo o nível sonoro para a fachada 02, através da figura 58, pode-se observar de forma quantitativa a alteração dos NPS com a variação do comprimento, quando confrontados os resultados simulados com os limites estipulados pela *TA Lärm* e ABNT NBR 10.151. Os valores simulados para as fachadas pós túnel para as dimensões originais, apresentaram valores sobre as fachadas acima do recomendado, na ordem de 0,9 a 1,9 dB(A) para áreas consideradas residenciais e 5,9 a 6,9 acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. Os valores apresentados para a fachada 02, simulados para túnel com 12m de comprimento, apresentaram resultados que satisfazem a legislação para áreas consideradas residenciais. Porém, os demais resultados alcançados, apresentaram valores sobre as fachadas na ordem de 3,3 a 4,3 dB(A) acima para áreas residenciais e 8,3 a 9,3 acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas.

Assim, os níveis de pressão sonora calculados sobre as fachadas pós túnel, podem ser representados pela parcela de ondas sonoras que incide diretamente nas fachadas, somada às ondas resultantes das reflexões e absorções que ocorrem nas superfícies internas do túnel. Logo, os resultados com relação ao comprimento, também se mostraram coerentes com tal definição, pois, quando houve o decréscimo do comprimento do túnel, conseqüentemente ocorreu a diminuição da superfície interna desse espaço, significando na redução das perdas de intensidade sonora ocasionadas pelas reflexões e absorções sonoras nas superfícies do túnel.

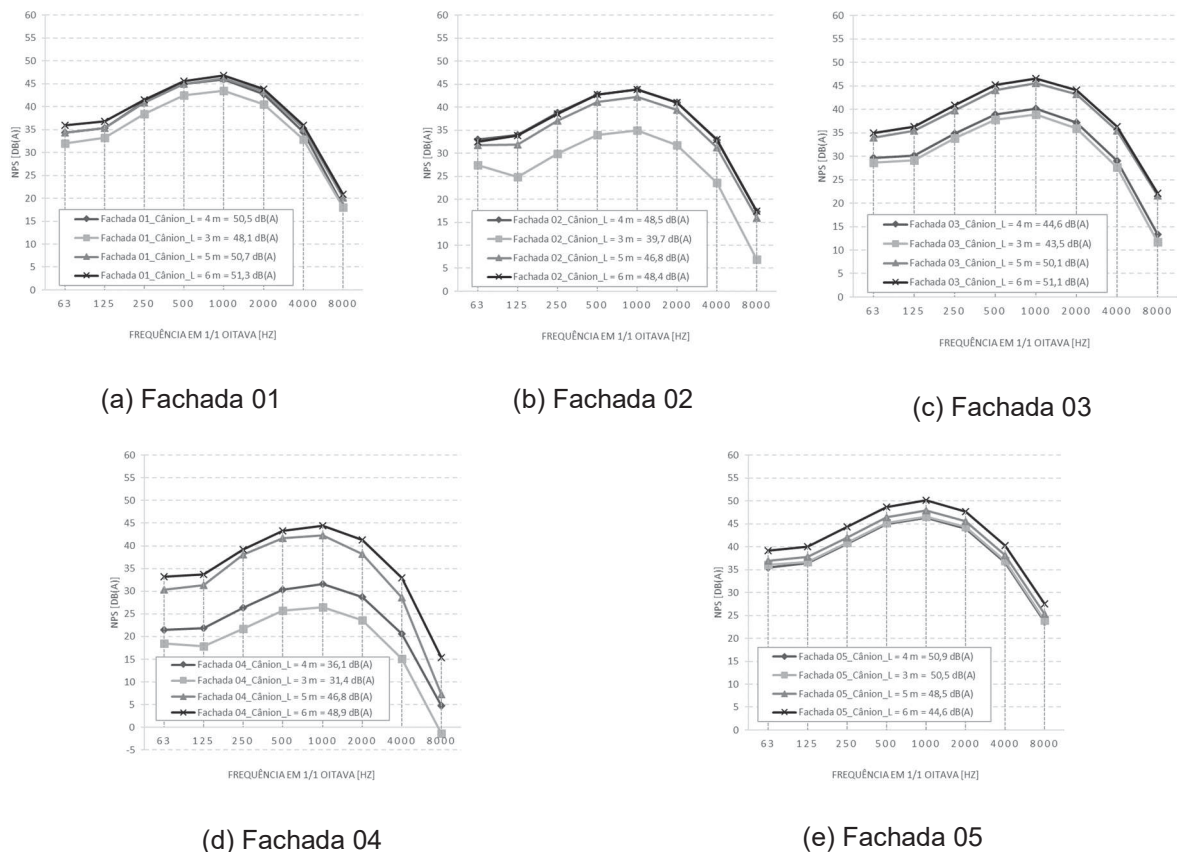
Através da escala de cores das simulações acústicas, pode ser observado a influência do comprimento do túnel na transmissão sonora, pois, o “corredor sonoro” localizado na saída do túnel, indicando valores de NPS, alterou-se conforme ocorreu o decréscimo do comprimento. Através dos mapas de cores, visualizou-se ainda que, para tuneis mais curtos, as fachadas laterais são mais impactadas pelo ruído e que a dispersão sonora pós túnel ocorre de forma mais dispersa sobre a região posterior.

Dessa forma, ficou perceptível a influência do comprimento na transmissão sonora do ruído de tráfego através túneis urbanos, pois, fachadas de edifícios localizadas pós túneis com comprimento inferior, apresentaram níveis sonoros mais elevados, com relação aos níveis sonoros simulados para túneis com comprimento original. Entretanto, mesmo para comprimentos maiores, os resultados de NPS simulados sobre as fachadas pós túnel, estão insatisfatórios segundo níveis padronizados pelas normas de referência. Portanto, medidas de controle complementares deverão ser implementadas, para alcançar o conforto acústico da população residente na região.

5.2.2.4 Variação da largura – Cânion

A FIGURA 60 apresenta evolução dos NPS [dB(A)] por banda de oitava na fachada 01 (a), fachada 02 (b), fachada 03 (c), fachada 04 (d) e fachada 05 (e), obtidos com a variação da largura do cânion.

FIGURA 60 - CÂNION - VARIAÇÃO DA LARGURA (L)



Observa-se o acréscimo dos NPS constante para todas as frequências das fachadas avaliadas. Em todas as larguras simuladas, os NPS [dB(A)] mantiveram características de ruído de tráfego, ou seja, com valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz, devido aos ruídos gerados por motores, combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A TABELA 31 apresenta os valores simulados dos níveis de pressão sonora ponderados em (A) sobre as fachadas, alterando a largura do cânion em relação à largura original (4m). Assim, as simulações se deram com as seguintes larguras (L): 3m, 5m e 6m.

TABELA 31 – NPS SIMULADOS VARIANDO LARGURA DO CÂNION (L)

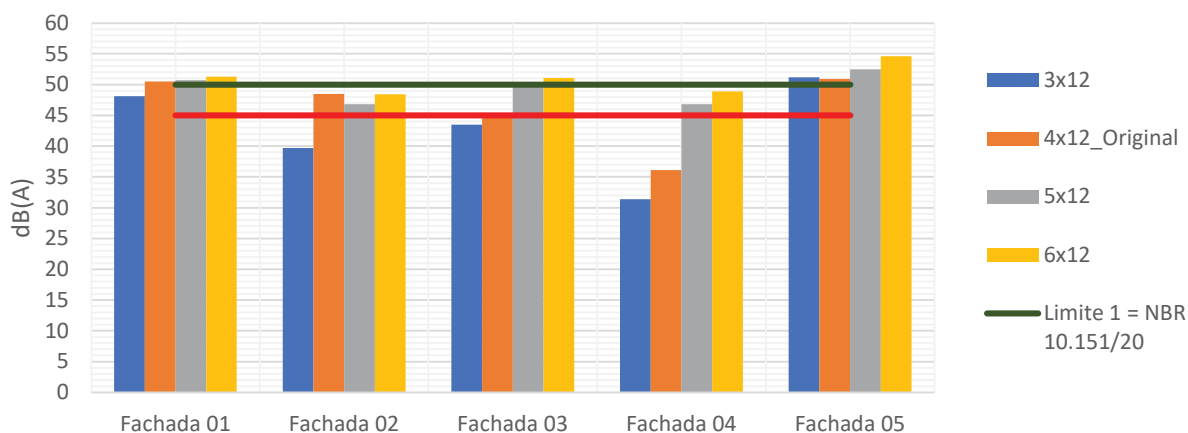
Ponto	Nível de pressão sonora [dB(A)] quando alterado a largura do cânion (L) [m]					
	3	4	5	6	Limite 1*	Limite 2**
Fachada 01	48,1	50,5	50,7	51,3	50	45
Fachada 02	39,7	48,5	46,8	48,4		
Fachada 03	43,5	44,6	50,1	51,1		
Fachada 04	31,4	36,1	46,8	48,9		
Fachada 05	51,2	50,9	52,5	54,6		

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

**Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 61 apresenta na forma de gráfico os resultados descritos na TABELA 31, confrontados com os limites propostos.

FIGURA 61 - CÂNION – NPS VARIANDO A LARGURA (L)



As simulações acústicas utilizadas para avaliar a influência da geometria do espaço, apontaram a tendência de acréscimo dos níveis de pressão sonora incidentes

sobre as fachadas pós cânion, à medida que foi empregado o aumento gradual da largura do cânion. Confrontando os valores de NPS calculados para a menor largura (3m), com os resultados obtidos para a largura máxima (6m), foi verificado o aumento dos NPS na grandeza de 3,2 dB(A) para a fachada 01, 8,7 dB(A) para fachada 02, 7,6 dB(A) para fachada 03, 17,5 dB(A) para fachada 04 e 3,4 dB(A) para fachada 05.

Configurou-se também a elevação dos NPS com a variação da largura, quando confrontados os resultados simulados com os limites estipulados pela *TA Lärm* e ABNT NBR 10.151. Os dados obtidos para a largura mínima sobre as fachadas 01 e 05 pós cânion, apresentaram valores acima do recomendado pelas normas de referência, na ordem de 3,1 e 6,2 dB(A) respectivamente, quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas. Ainda com relação ao cânion de largura mínima, se considerados os limites para regiões residenciais, somente a fachada 05 ultrapassou aos padrões de NPS, na ordem de 1,2 dB(A). Avaliando as simulações para a maior largura, 6m, e considerando os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas, todas as fachadas apresentaram valores acima do recomendado. Entretanto, se considerados os limites para áreas residenciais, somente as fachadas 01, 03 e 05, apresentaram níveis superiores aos limites deliberados.

Os níveis de pressão sonora calculados sobre as fachadas pós cânion, podem ser caracterizados pela parcela de ondas sonoras que incide diretamente nas fachadas, somada às ondas resultantes das reflexões e absorções que ocorrem nas superfícies internas do cânion. Logo, os resultados se mostraram coerentes com tal definição, pois, quando houve o acréscimo da largura do cânion, por conseguinte ocorreu o aumento da parcela do som que incide diretamente sobre as fachadas, devido à redução das barreiras físicas para as ondas sonoras. Também, quando houve o aumento das dimensões do cânion, decorreu em menos perda de intensidade sonora, ocasionada pelas reflexões e absorções sonoras nas superfícies do cânion.

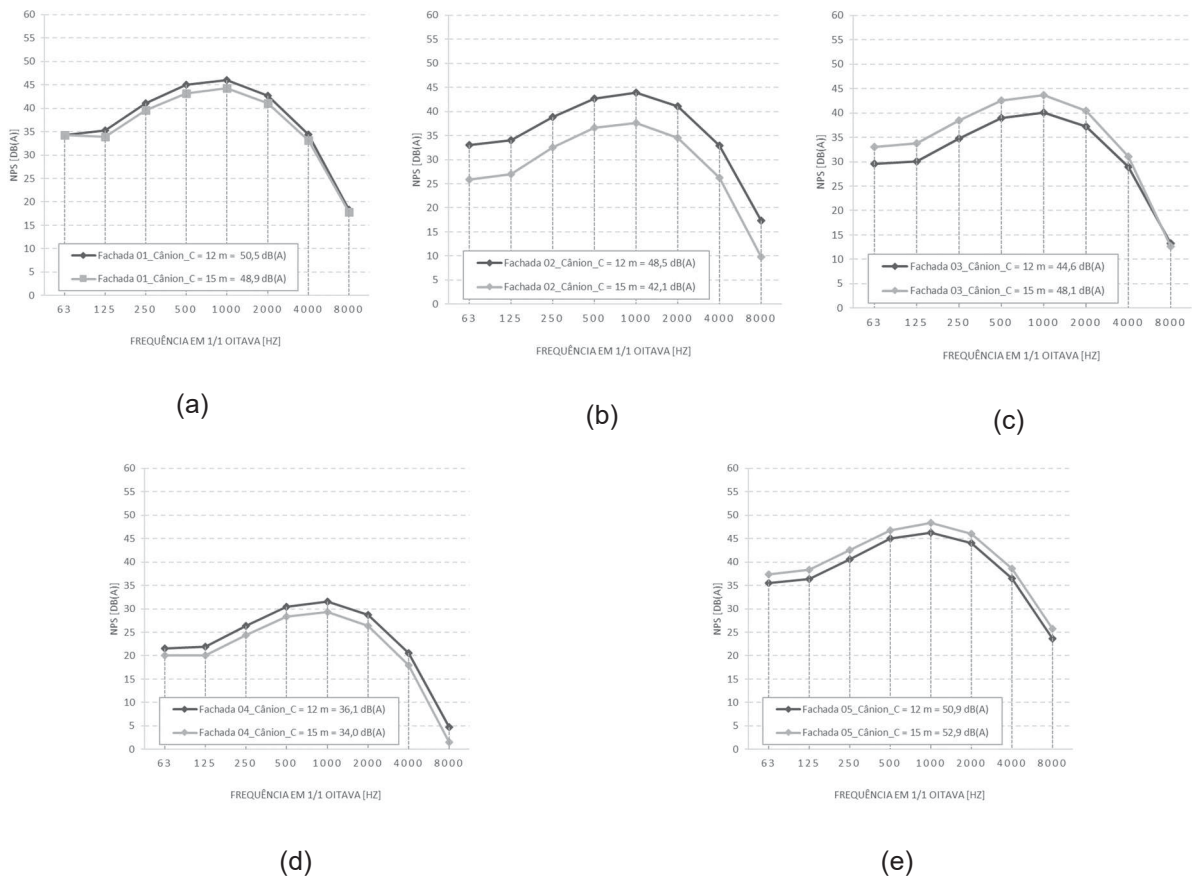
Através da escala de cores dos mapas acústicos, também pode ser observado a influência da largura no cânion na transmissão sonora, pois, o “corredor sonoro” localizado na saída do cânion, indicando os valores de NPS, foi alterando conforme ocorreu o acréscimo da largura. Visualiza-se que, para cânions mais largos, as fachadas laterais são mais impactadas pelo ruído e a níveis sonoros pós cânion ocorre de forma dispersa sobre a região posterior.

Assim, ficou evidente a influência da largura de cânions urbanos na transmissão sonora do ruído de tráfego, pois, fachadas de edifícios localizadas após cânion com larguras inferiores, apresentaram níveis sonoros mais baixos, com relação aos níveis sonoros simulados para cânion com largura superior. Entretanto, mesmo para larguras menores, alguns resultados de NPS sobre as fachadas estão acima dos níveis orientados. Portanto, medidas de controle complementares deverão ser adotadas, para alcançar o conforto almejado.

5.2.2.5 Variação do Comprimento - Cânion

A FIGURA 62 apresenta evolução dos NPS [dB(A)] por banda de oitava na fachada 01 (a), fachada 02 (b), fachada 03 (c), fachada 04 (d) e fachada 05 (e), obtidos com a variação do comprimento do cânion.

FIGURA 62 – CÂNION - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO (C)



Nas imagens acima observa-se o acréscimo dos NPS constante para todas as frequências das fachadas avaliadas. Para todos os comprimentos simulados, os

NPS [dB(A)] mantiveram características de ruído de tráfego, ou seja, com valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz, devido aos ruídos gerados por motores, combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A TABELA 32 apresenta os valores simulados dos níveis de pressão sonora ponderados em (A) sobre as fachadas, alterando o comprimento do cânion em relação ao comprimento original (12m). Assim, além do comprimento original, também foi realizada uma simulação para o comprimento de 15m.

TABELA 32 – NPS SIMULADOS VARIANDO COMPRIMENTO DO CÂNION (C)

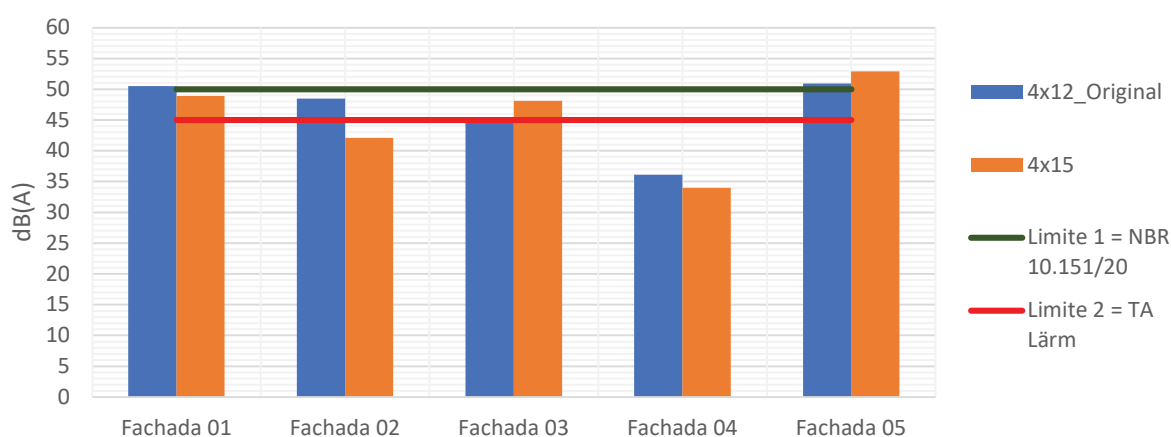
Ponto	Nível de pressão sonora [dB(A)] quando alterado o comprimento do cânion (C) [m]			
	12	15	Limite 1*	Limite 2**
Fachada 01	50,5	48,9	50	45
Fachada 02	48,5	42,1		
Fachada 03	44,6	48,1		
Fachada 04	36,1	34,0		
Fachada 05	50,9	52,9		

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

**Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 63 apresenta na forma de gráfico os resultados descritos na TABELA 32, confrontados com os limites propostos.

FIGURA 63 - CÂNION – NPS VARIANDO COMPRIMENTO (C)



Ao analisar os dados obtidos com as simulações de NPS, mantendo as dimensões originais, com os resultados para o maior comprimento do cânion, pode ser identificado que as fachadas 03 e 05 para o cânion de 15m, apresentaram valores superiores na ordem de 3,5 e 2 dB(A) com relação ao cânion original de 12m. Estes

valores podem ser explicados devido ao posicionamento das fachadas, pois, quando localizadas mais centralizada em relação ao cânion, estão mais expostas às ondas que diretamente incidem sobre elas, somadas as ondas resultantes das reflexões internas de um cânion mais longo.

Já as fachadas 01, 02 e 04, apresentaram valores inferiores para o cânion mais extenso, na ordem de 1,6, 6,4 e 2,1 dB(A) inferiores com relação ao cânion de 12m de comprimento. Tais resultados são apresentados, devido ao posicionamento lateral dessas fachadas em relação à saída do cânion, onde os níveis de NPS são superiores nestas fachadas em razão da maior dispersão sonora pós cânion de menor comprimento.

Avaliando os resultados simulados para o comprimento original, 12m, com os limites empregados pela *TA Lärm* e ABNT NBR 10.151, observa-se que as fachadas 01 e 05 apresentaram valores na ordem de 0,5 e 0,9 dB(A) superiores aos níveis recomendados para áreas consideradas residenciais. Já para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas, as fachadas 01, 02 e 05 mostraram resultados respectivamente na ordem de 5,5, 3,5 e 5,9 dB(A) acima dos padrões utilizados.

Ao analisar os dados calculados para o comprimento sugerido de 15m, observa-se que somente a fachada 05 demonstrou valor na ordem de 2,9 dB(A) acima dos padrões definidos pela *TA Lärm* e ABNT NBR 10.151 para áreas residenciais. Entretanto, se considerada a região com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas, as fachadas 01, 03 e 05 apresentaram valores na ordem de 3,9, 3,1 e 7,9 dB(A) superiores ao estipulado.

Os níveis de pressão sonora calculados sobre as fachadas pós cânion, podem ser representados pela parcela de ondas sonoras que incide diretamente sobre as fachadas, somada às ondas resultantes das reflexões e absorções que ocorrem nas superfícies internas do cânion. Logo, os resultados com relação ao comprimento também se mostraram coerentes com tal definição, pois, quando houve o acréscimo do comprimento do cânion, ocorreu o acréscimo da intensidade sonora sobre fachadas centrais, devido ao direcionamento das ondas sonoras refletidas nas superfícies internas do cânion.

Através do mapa de cores nas simulações acústicas, embora em menor grau, também pode ser observado a influência do comprimento do cânion na transmissão sonora, pois, o “corredor sonoro” localizado na saída do cânion, indicando os valores

de NPS, foi alterando conforme ocorreu o acréscimo do comprimento. Através dos mapas de cores, visualiza-se que para o cânion mais curto, as fachadas laterais são mais impactadas pelo ruído de tráfego.

Dessa forma, ficou visível a influência do comprimento de cânions na transmissão sonora do ruído de tráfego, principalmente sobre fachadas localizadas lateralmente ao cânion. Entretanto, mesmo para comprimentos maiores, alguns resultados de NPS simulados sobre as fachadas, se mostraram acima dos níveis orientados pelas normas de referência. Portanto, medidas de controle complementares deverão ser implementadas, para alcançar o conforto acústico da população local.

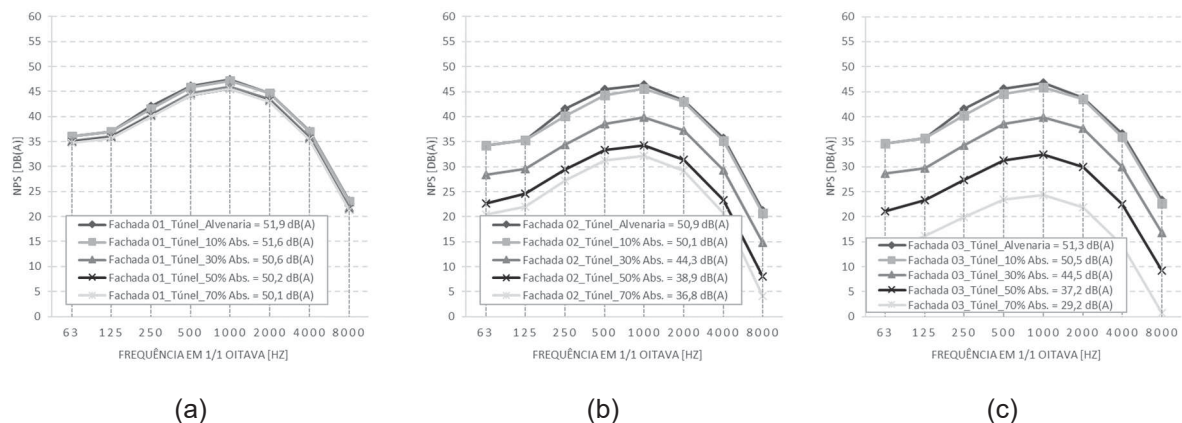
5.2.3 Medidas de Mitigação - Variação dos materiais

Neste item serão discutidos os valores de NPS sobre as fachadas de interesse, alterando os coeficientes de absorção sonora das superfícies internas do túnel e cânion, porém, mantendo as dimensões originais. Ainda, será avaliado a utilização de materiais absorventes como técnica para a mitigação de NPS sobre fachadas posicionadas após estes espaços.

5.2.3.1 Variação dos materiais – Túnel

A FIGURA 64 apresenta evolução dos NPS [dB(A)] por banda de oitava na fachada 01 (a), fachada 02 (b) e fachada 03 (c), obtidos com a variação das características dos materiais utilizados como revestimento no túnel.

FIGURA 64 – TÚNEL - VARIAÇÃO DOS MATERIAIS



Nas imagens supra apresentadas observa-se atenuação dos NPS à medida que foi aumentando a capacidade de absorção das superfícies internas. Para todos os materiais simulados, os NPS [dB(A)] mantiveram características de ruído de tráfego, ou seja, com valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz, devido aos ruídos gerados por motores, combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A TABELA 33 apresenta os valores simulados, para os níveis de pressão sonora ponderados em (A) sobre as fachadas, alterando os coeficientes absorção dos materiais utilizados para revestimento das superfícies internas do túnel.

TABELA 33 – TÚNEL - ALTERANDO COEFICIENTES DE ABSORÇÃO

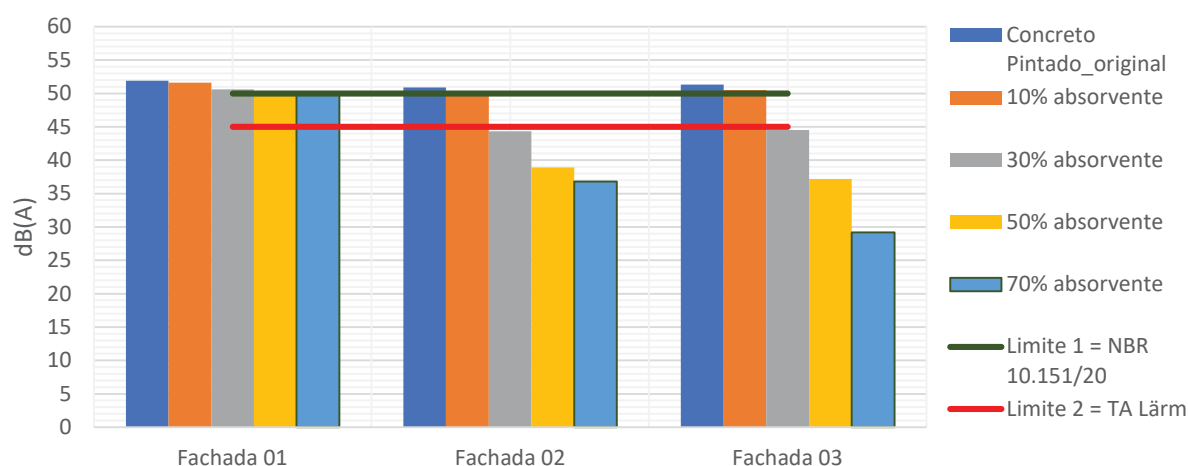
Ponto	Níveis de pressão sonora [dB(A)] quando variando o coeficiente de absorção sonora do túnel [%]						
	8 [original]	10	30	50	70	Limite 1*	Limite 2**
Fachada 01	51,9	51,6	50,6	50,2	50,1	50	45
Fachada 02	50,9	50,1	44,3	38,9	36,8		
Fachada 03	51,3	50,5	44,5	37,2	29,2		

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

**Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 65 apresenta na forma de gráfico os resultados descritos na TABELA 33 confrontados com os limites propostos.

FIGURA 65 - TÚNEL – NPS VARIANDO MATERIAIS



Com as simulações acústicas, foi possível averiguar que materiais representativos para revestimento do túnel, possuem relevante influência na transmissão sonora para fachadas localizadas após este espaço aberto. Comparando

os valores de NPS obtidos das superfícies internas do túnel em suas condições originais, com situações em que ocorreu incrementação na capacidade de absorção dos revestimentos internos, observou-se uma redução gradual dos níveis sonoros incidentes sobre as fachadas posteriores. Segundo os cálculos realizados, ao simular um túnel com suas superfícies internas com capacidade de absorção sonora de 70%, houve atenuação significativa sobre fachadas pós túnel, na ordem de 1,8 dB(A) para a fachada 01, 14,1 dB(A) para a fachada 02 e 22,1 dB(A) para a fachada 03.

Na figura 64 pode ser verificado de forma quantitativa os NPS calculados e confrontados com os limites estipulados pela *TA Lärm* e ABNT NBR 10.151. Os valores simulados para as fachadas pós túnel com revestimento original, 8% de absorção, apresentaram todos os valores acima dos padrões recomendados, obtendo valores extrapolados na ordem de 0,9 a 1,9 dB(A) para áreas classificadas residenciais e 5,9 a 6,9 dB (A) acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas.

Resultados alcançados empregando revestimento interno com 70% de absorção, apresentaram valores superiores dos limites padronizado somente para a fachada 01, que obteve valor de 0,1 dB(A) superior para áreas consideradas residenciais e 5,1 dB(A) acima quando considerados os limites para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas.

Os níveis de pressão sonora calculados sobre as fachadas pós túnel, podem ser representados pela parcela de ondas sonoras que incide diretamente sobre as fachadas, somada às ondas resultantes das reflexões e absorções que ocorrem nas superfícies internas do túnel. Portanto, incrementando túneis com revestimentos internos de alta absorção sonora, minimizam-se as reflexões sonoras nas superfícies internas. Os resultados se mostraram coerentes com tal definição, pois, fachadas localizadas de maneira centralizada após túneis, como a fachada 01, estão mais expostas à parcela de ondas sonoras que incidem diretamente sobre elas, logo, materiais absorventes nas superfícies internas dos túneis serão menos eficientes neste caso. Já, fachadas localizadas lateralmente ao sentido do túnel, como as fachadas 02 e 03, serão mais beneficiadas pela utilização de materiais absorventes, pois, estão mais suscetíveis às ondas sonoras originárias de reflexões internas nos túneis.

Através da escala de cores das simulações acústicas, também pode ser verificado a influência dos materiais utilizados na transmissão sonora, pois, o “corredor

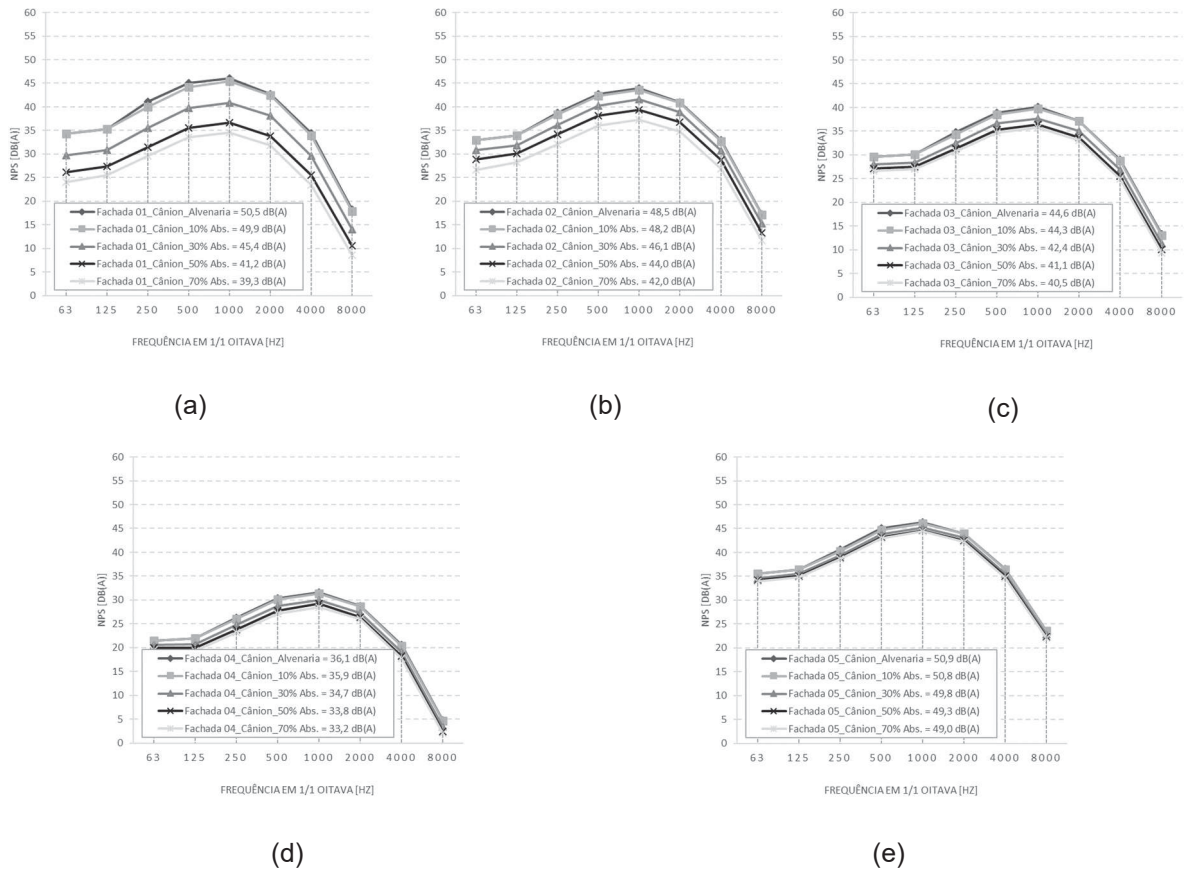
sonoro” localizado na saída do túnel, que representa os valores de NPS, ficou mais definido à medida que foi acrescentado a absorção sonora no túnel, indicando a transmissão de ondas diretas. Já, as regiões localizadas perpendicularmente ao sentido do túnel, apresentaram redução dos níveis sonoros, indicando a redução das reflexões internas que ocorrem no espaço aberto.

Dessa forma, fica evidente a influência dos materiais internos na transmissão sonora do ruído de tráfego através de túneis urbanos. Os resultados também demonstraram que, a instalação de revestimentos com características de absorção sonora nas superfícies internas de túneis, é uma medida viável do ponto de vista técnico, pois, ocasionou em uma redução significativa de NPS sobre fachadas pós túnel. Porém, para fachadas localizadas centralizadas ao sentido dos túneis, os materiais absorventes se mostraram menos eficazes.

5.2.3.2 Variação dos materiais – Cânion

A FIGURA 66 apresenta evolução dos NPS [dB(A)] por banda de oitava na fachada 01 (a), fachada 02 (b), fachada 03 (c), fachada 04 (d) e fachada 05 (e), obtidos com a variação das características dos materiais utilizados como revestimento no cânion.

FIGURA 66 – CÂNION - VARIAÇÃO DOS MATERIAIS



Observa-se atenuação dos NPS à medida que foi aumentando a capacidade de absorção das superfícies internas. Para todos os materiais simulados, os NPS [dB(A)] mantiveram características de ruído de tráfego, ou seja, com valores mais elevados na faixa de entre 500 e 2000 Hz, devido aos ruídos gerados por motores, combinados com a parcela ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A TABELA 34 apresenta os valores simulados, para os níveis de pressão sonora ponderados em (A) sobre as fachadas, alterando os coeficientes absorção dos materiais utilizados para revestimento das superfícies internas do cânion.

TABELA 34 - CÂNION - ALTERANDO COEFICIENTES DE ABSORÇÃO

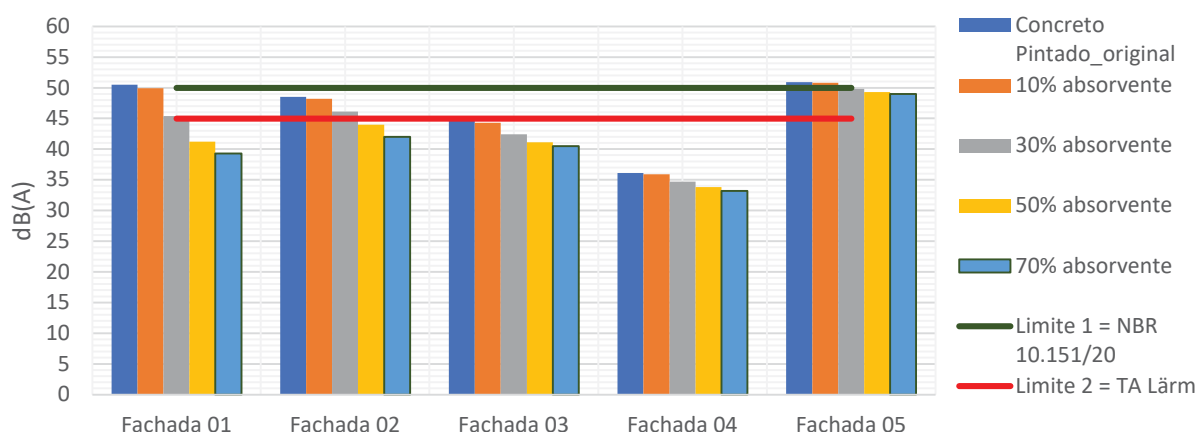
Ponto	Níveis de pressão sonora [dB(A)] quando variando o coeficiente de absorção sonora do cânion [%]						
	8 [original]	10	30	50	70	Limite 1*	Limite 2**
Fachada 01	50,5	49,9	45,4	41,2	39,3	50	45
Fachada 02	48,5	48,2	46,1	44,0	42,0		
Fachada 03	44,6	44,3	42,4	41,1	40,5		
Fachada 04	36,1	35,9	34,7	33,8	33,2		
Fachada 05	50,9	50,8	49,8	49,3	49,0		

* Limite 1 = NBR 10.151/2020

**Limite 2 = TA Lärm

A FIGURA 67 apresenta na forma de gráfico, os resultados descritos na TABELA 34 confrontados com os limites propostos.

FIGURA 67 - CÂNION – NPS VARIANDO OS MATERIAIS



Os materiais utilizados como revestimento interno de cânions, exercem grande influência na transmissão sonora para fachadas localizadas após este espaço aberto. Pois, comparando os valores simulados de NPS quando mantidas as condições originais do cânion, com os resultados incrementando a capacidade de absorção das superfícies internas, observou-se uma redução gradual dos níveis sonoros incidentes sobre as fachadas posteriores. De acordo com as simulações elaboradas, para cânion com superfícies internas de 70% de absorção sonora, houve atenuações significativas sobre as fachadas pós este espaço, redução na ordem de 11,2 dB(A) para a fachada 01, 6,5 dB(A) para a fachada 02, 4,1 dB(A) para a fachada 03, 2,9 dB(A) para a fachada 04 e 1,9 dB(A) para a fachada 05.

Pode-se verificar também quantitativamente a redução do NPS com a variação dos materiais, quando são comparados os resultados simulados com os limites estipulados por *TA Lärm* e ABNT NBR 10.151. Previamente às variações da capacidade de absorção, os valores simulados para as fachadas pós cânion, apresentaram os valores acima do recomendado para as fachadas 01 e 05, obtendo valores na ordem de 0,5 e 0,9 dB(A) acima para áreas classificadas residenciais. Para regiões com clínicas de tratamento, hospitais, casas de repouso e escolas, as fachadas 01, 02 e 05 se mostraram em desconformidade, pois resultaram em valores na ordem 3,5 a 5,9 dB(A) acima do limite.

Os níveis de pressão sonora calculados sobre as fachadas pós cânion, podem ser representados pela parcela de ondas sonoras que incide diretamente sobre as fachadas, somada às ondas resultantes das reflexões e absorções que ocorrem nas superfícies internas do cânion. Portanto, incrementando cânions com revestimentos internos com alta absorção sonora, minimizam-se as reflexões sonoras internas. Os resultados se mostraram coerentes com tal definição, pois, fachadas localizadas de maneira centralizada após o cânion, como a fachada 05, estão mais expostas à parcela de ondas sonoras que incidem diretamente sobre elas, logo, materiais absorventes em cânions obtiverem menor eficiência neste caso. Já, fachadas localizadas lateralmente ao sentido do cânion, como as fachadas 01, 02 e 03, serão mais beneficiadas pela utilização de materiais absorventes, pois, estão mais suscetíveis às ondas sonoras originárias de reflexões internas em cânions.

Através da escala de cores nas simulações acústicas, também pode ser observado a influência dos materiais utilizados na transmissão sonora em cânions, pois, o “corredor sonoro” localizado na saída do espaço aberto indicando os valores de NPS, ficou mais definido a medida em que foi acrescentado a absorção sonora no cânion, indicando a transmissão de ondas diretas. Já, as regiões localizadas perpendicularmente ao sentido do túnel, apresentaram redução dos níveis sonoros, indicando a redução das reflexões internas que ocorrem no espaço aberto.

Dessa forma, com as simulações, a influência dos materiais na transmissão sonora do ruído de tráfego através de cânions urbanos ficou evidente. Os resultados também demonstraram que, a utilização de revestimentos com absorção sonora nas superfícies internas de cânions, é uma medida viável do ponto de vista técnico, pois, acarretou uma redução significativa de NPS sobre fachadas perpendiculares ao

sentido do túnel. Porém, para fachadas centrais localizadas em sentido direto após cânions, os materiais absorventes se mostraram menos eficazes.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa representou uma abordagem metodológica inovadora, relativa à avaliação dos níveis de ruído incidentes sobre fachadas de primeiro piso e, principalmente, sobre o impacto na qualidade de vida da população.

Elaborado em Stuttgart/DE, por meio de medições e simulações acústicas, o presente trabalho contextualizou de forma quantitativa, os níveis de ruído incidentes sobre fachadas, localizadas após espaços urbanos, denominados como túnel e cânion. Relativo à transmissão do som, tais espaços são apontados como "pontos fracos", pois, propiciam a passagem do ruído para espaços sensíveis, como: habitações, escritórios, hospitais ou escolas. Assim, foram identificados edifícios em Stuttgart/DE afetados pelo ruído urbano e que se caracterizam pela presença de espaços abertos.

Para a caracterização das fontes de níveis sonoros sobre as fachadas selecionadas, foram realizadas medições do nível de pressão sonora equivalente (LAeq), na *Rotebühlstraße* em Stuttgart/DE. Assim, foi possível ratificar o ruído de tráfego como a principal fonte de NPS no local, pois, os resultados das medições acústicas apresentaram valores mais elevados na faixa de frequência entre 500 e 2000 Hz. Com as medições acústicas, também foi possível verificar que na atualidade, os valores dos níveis de pressão sonora (LAeq) em regiões próximas à *Rotebühlstraße*, estão acima dos valores recomendados pela legislação alemã *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm* (1998) e norma brasileira ABNT NBR 10.151 (2020). Portanto, as edificações paralelas à via avaliada, estão em situação inadequada e consideradas poluídas acusticamente.

Através dos valores obtidos nas simulações acústicas, também ficou evidenciado padrões acima do recomendado para níveis de NPS sobre fachadas avaliadas. Assim, foi possível confirmar através dos dados obtidos que fachadas, mesmo situadas posteriores a edificações, estão suscetíveis aos NPS transmitidos em lacunas urbanas, como túneis e cânions. Tal afirmação corrobora com a percepção subjetiva, em que lacunas favorecem a transmissão do ruído de tráfego.

Para aprimorar o entendimento da interferência de espaços abertos sobre os níveis sonoros incidentes em fachadas, foram realizadas variações nas dimensões das lacunas. Simulando lacunas com suas larguras e/ou alturas maiores que as originais, observou-se o aumento da parcela do som que incide diretamente sobre as

fachadas, principalmente, devido à redução da barreira física, bem como, uma menor perda da intensidade sonora ocasionada pelas reflexões e absorções nas superfícies internas dos espaços abertos. Os resultados alterando-se o comprimento das lacunas revelaram que, para comprimentos menores ocorre a diminuição da superfície interna dos espaços abertos, significando na redução das perdas de intensidade sonora ocasionadas pelas reflexões e absorções sonoras nas superfícies internas. Dessa forma, pode-se assegurar que as dimensões de espaços abertos possuem influência direta na intensidade sonora transmitida para fachadas posteriores, uma vez que, acrescentando as medidas de altura e largura para tuneis e largura para cânions, conseqüentemente, houve acréscimos nos níveis sonoros incidentes sobre as fachadas avaliadas. Com relação ao comprimento, foi verificado um comportamento sonoro em que, quando reduzido o comprimento, fachadas situadas subsequentemente após ao túnel e cânion, apresentaram redução nos ruídos incidentes. Já, para as demais fachadas posicionadas lateralmente ao sentido das lacunas, apresentaram acréscimos com a redução do comprimento.

As simulações com variações das dimensões demonstraram que, mesmo para situações em que há menor transmissão de níveis sonoros, todas as fachadas pós túnel apresentaram níveis acima do recomendado para área sensíveis ao ruído e parte das fachadas pós cânion apresentaram valores acima do orientado pela legislação.

Outro resultado alcançado com as simulações acústicas, foi o emprego de materiais com capacidade de absorção sonora como medida de mitigação da poluição sonora. À medida que foi acrescida a capacidade de absorção sonora das superfícies internas, observou-se uma redução gradual dos níveis de ruído sobre fachadas pós túnel e cânion. Portanto, a técnica utilizada se apresentou como uma alternativa viável para mitigação dos níveis sonoros, visto que, resultou numa atenuação de NPS sobre as fachadas posteriores às lacunas, na ordem de até 22,1 dB(A). Entretanto cabe ressaltar, que a técnica se mostrou eficaz para atenuação do ruído sobre fachadas estabelecidas lateralmente ao sentido do túnel e cânion, atingindo níveis em conformidade com as legislações de referência. Para fachadas situadas subsequentemente após túneis e cânions, houve atenuação com a aplicação de materiais de absorção sonora, porém, não atingiram os níveis desejados para regiões sensíveis. Dessa forma, em fachadas posicionadas logo após aberturas urbanas, recomenda-se a aplicação de medida complementar de controle ao ruído, como, janelas acústicas.

Com uma visão global sobre este estudo, pode-se concluir também que poderá subsidiar projetistas, poder público e a população em geral, na compreensão dos efeitos acústicos causados pelos espaços abertos, pois, apontou que a variação de largura foi o parâmetro construtivo que mais influenciou na intensidade sonora transmitida para fachadas posteriores às lacunas. Também, apresentou uma proposta de solução construtiva para adequação dos níveis de pressão sonora em regiões semelhantes aos objetos de estudo. Outro sim, apontou que a aplicação em túneis e cânions de materiais com grande capacidade de absorção sonora, como lãs minerais, resultará em atenuações significativas na transmissão de níveis sonoros.

Recomendações para trabalhos futuros: avaliar a influência dos espaços abertos sobre fachadas em diferentes pisos; estudo quanto a viabilidade financeira para diversos materiais absorventes; avaliação da técnica em cidades com diferentes tipos de arquitetura, otimização da área necessária para instalação de material absorvente, especialmente para cânions.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, H.; JONSSON, L.; ÖGREN, M. "Property Prices and Exposure to Multiple Noise Sources: Hedonic Regression with Road and Railway Noise," *Environmental & Resource Economics*, European Association of Environmental and Resource Economists, vol. 45(1), pages 73-89, January 2010.

ANJELO, K. L. H. **Avaliação do Ruído e Seus Efeitos em Professores e Alunos de Academias de Ginástica**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Enfermagem), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.151**: Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – Aplicação de uso geral. Rio de Janeiro, 2020.

BASNER, M.; BABISCH, W.; DAVIS, A.; BRINK, M.; CLARK, C.; JANSSEN, S.; STANSFELD, S. **Auditory and non-auditory effects of noise on health**. Department of Psychiatry, University of Pennsylvania Perelman School of Medicine, Philadelphia, PA 19104–6021, USA. 2014.

BELOJEVIC, G.; JACOVLEVIC, B.; ALESKSC, O. **Subjective Reaction for Traffic Noise with Regard to some Personality Traits**. *Environmental International*, Yugoslavia, v. 23, n. 2, p. 221-226, 1997.

BERANEK, L. L.; VÉR, I. L. **Noise and Vibration Control Engineering – Principles and Applications**. 4 ed. New York: Wiley Interscience Publication, 823 p., 1992.

BESS, F. H.; HUMES, L.E. **Fundamentos de Audiologia**. 2ª ed. Porto Alegre: Atmed, 1998

BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice**. Third ed. New York: Spon Press – Taylor & Francis Group, 4 p., 2003

BIES, D.A; HANSEN, C.H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice**. 2 ed. New York: Spon Press – Taylor & Francis Group, 736 p. 2002.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**. 1. Ed. 2006.

BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. **Umweltbewusstsein in Deutschland 2016 - Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage** Berlin, 2016.

BRASIL, **Resolução CONAMA nº. 001**, de 08 de março de 1990: Dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política. Brasília, Publicação DOU, de 02 de abril de 1990, pág. 6408.

BRASIL, **Resolução CONAMA nº. 252**, de 01 de fevereiro de 1999: Dispõe sobre os limites máximos de ruído nas proximidades do escapamento para veículos rodoviários automotores, inclusive veículos encarroçados, complementados e modificados, nacionais e importados. Brasília, Publicação DOU nº 021, de 01 de fevereiro de 1999, págs. 60-61.

BROWN A. L. **Exposure of the Australian Population to Road Traffic Noise**. *Applied Acoustic*, Australia, v.43, p. 169-176, 1994.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB). **Umweltbewusstsein in Deutschland - Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage**, Berlin, 2016.

CALIXTO, A. **“Apostila de Conceitos fundamentais: Vibração, Som e Luz.”** 2013.

CALIXTO, A. **O Ruído gerado pelo Tráfego de Veículos em “Rodovias-Grandes Avenidas”, situadas dentro do perímetro urbano de Curitiba, analisados sobre parâmetros acústicos objetivos e seu impacto ambiental.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

CARVALHO, A. P. O; LENCASTRE, M. **Absorção Sonora de Retábulo em Talha Barroca.** Revista ESTUDOS PATRIMÔNIO - IPPAR, nº 3, 2002.

COX, T. J., D'ANTONIO, P. **Acoustic Absorbers and Diffusers, theory, design and application.** 2a edição, Oxônia e Nova Iorque: Taylor & Francis, 2009.

DE SOUZA, R. S. **Entendendo a questão Ambiental.** Edunisc – Santa Cruz do Sul, 2000.

DEUTSCHLAND **Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm).** Vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503)

DEUTSCHLAND, **Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG).** Ausfertigungsdatum: 15.03.1974. Neugefasst durch Bek. V. 17.5.2013 I 1274; zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 8.4.2019 I 432.

DEUTSCHLAND, **Richtlinie 2002/49/EG** Des Europäischen Parlaments Und des Rates. Vom 25. Juni 2002.

DINIZ, F. B. **Impacto Ambiental Sonoro Gerado por Subestações de Energia Elétrica na Cidade de Curitiba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federaldo Paraná, 136 p. 2003.

EGAN, M.D., **Architectural Acoustics,** J. Ross Publishing, Fort Lauderdale, 2007

ELLER, R.A.G. **Impacto do ruído aeronáutico sobre o valor dos imóveis residenciais: o caso do Aeroporto Internacional de São Paulo.** Diss. Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2000.

EN ISO 717-1:1996 – Acoustic – Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (EN ISO 717-1:1996).

EN ISO 717-2:1996 – Acoustic – Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (EN ISO 717-2:1996).

ENGEL, M. S. **Caracterização da poluição sonora, através de medições e mapeamentos sonoros e entrevistas de percepção sonora na Linha Verde em Curitiba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), UFPR, 2012.

EVEREST, F.A., **The Master Handbook of Acoustics** – Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 2001.

FAHY, F. **Foundations of Engineering Acoustics.** Academic Press. 1st Edition, 2000.

FEHRL. **Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces.** SILVIA - Sustainable road surfaces for traffic noise control. Brussels, Belgium, 2006.

FILHO, M. V. O. **Ruído Ambiental: Avaliação Acústica de Edificações em Curitiba-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), UFPR, 2014.

FURLANETTO, T. **Estudo de alternativas locacionais para a viabilidade ambiental de empreendimentos: o caso do aeroporto de Ribeirão Preto - SP**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

GERAVANDI, S.; TAKDASTAN, A.; ZALLAGHI, E.; NIRI, M. V.; MOHAMMADI, M. J.; SAKI, H.; NAIEMABADI, A. **Noise Pollution and Health Effects**. Jundishapur Journal of Health Sciences, 2015.

GERGES, S. N. Y. **Ruído – Fundamentos e Controle**. Imprensa Universitária – Universidade Federal de Santa Catarina. 1ª Edição, 1992.

GERGES, S. N. Y.; ARENAS, J. P. **Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones**. NR Editora, Florianópolis, 2010.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**, 2ª Edição., Imprensa Universitária – Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

GIESBRECHT, P. K. **Incerteza na medição das características acústicas dos materiais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2007

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GILES-CORTI, B.; VERNEZ-MOUDON, A.; REIS, R.; TURRELL, G.; DANNENBERG, A.L.; BADLAND, H.; FOSTER, S.; LOWE, M.; SALLIS, J.F.; STEVENSON, M.; ET AL. **City planning and population health: A global challenge**. Lancet, 388, 2912–2924, 2016.

GITTINS, M.J.; CLAY, H.H. (organizador); BASSET, W.H. (editor). **Clay's Handbook of environmental health**. 18 ed. London: E & FN Spon, 1999.

GOELZER B., HANSEN C. H., SEHRNDT G. A. **Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control**. Dortmund: Federal Institute for Occupational Safety and Health, 2001.

GOMES, C.V.S. **Comportamento Acústico de Materiais Absorvedores em Multicamadas**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2015.

Google Earth – GeoBasis-DE/BKP, 2020.

GRIFFITHS, I.D.; LANGDON, F.J., **Subjective response to road traffic noise**, Journal of Sound and Vibration, Volume 8, Issue 1, July 1968, Pages 16-32.

GUEDES, I. C. M. **Influência da forma urbana em ambiente sonoro: um estudo no bairro Jardins, em Aracaju (SE)**. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GUEDES, I. C. M.; BERTOLI, S. R., ZANNIN, P. H. T. **Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in Aracaju Brazil**. Science of the Total Environment, v. 412, p. 66-76, 2011.

HARRIS, C. M. **Handbook of acoustical measurements and noise control**. USA: Acoustical Society of America, 1998.

HARRIS, C. M. **Noise Control in Buildings. A Practical Guide for Architects and Engineers.** McGraw-Hill, Inc., 1993.

HASSAL J. R, ZAVERI, K. **Acoustic Noise Measurement.** 4. ed. 1979.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. 61.672 - 2: Part 2 - Electroacoustics – Sound level meters – Part 2: Pattern evaluation tests, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARTIZATION – ISO. **ISO 3744:** Acoustics – Determinations of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane. Geneva, 1994.

ISAR – Lã de vidro – Isolamento Acústico. Disponível em: <<http://www.isar.com.br>>. Acesso em: dezembro de 2019.

JOHNSON, D. R.; SANDERS, G. **The Evaluation of Noise from freely flowing road traffic.** Journal of Sound and Vibration, UK, v. 7, n. 2, p. 287-309, 1968.

KHAN, J.; KETZEL, M.; KAKOSIMOS, K.; SØRENSEN, M.; JENSEN, S.S. **Road traffic air and noise pollution exposure assessment—A review of tools and techniques.** Sci. Total Environ. 634, 661–676, 2018.

KINSLER, L. E.; FREY, A.R.; COPPENS A.B.; SANDERS J.V. **Fundamentals of Acoustic**, 3^a ed., USA, 1982.

KNABBEN, R. M. **Estudo do ruído pneu-pavimento e da absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

KOLICHESKI M. B. (org.) et al. **Meio ambiente urbano e industrial: soluções, tecnologias, e estratégias aplicadas à gestão** - Curitiba: UFPR, SENAI, Universität Stuttgart, 2016.170p.

LAKE, I. R.; LOVETT, A. A.; BATEMAN, I. J.; LANGFORD, I. H. **Modelling environmental influences os property prices in an urban environment.** Comput., Environ. and Urban Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 121±136, 1998.

LONG, M. **Architectural Acoustics.** Elsevier Academic Press, 2006.

MASCHKE, C. **Preventive Medical Limits for Chronic Traffic Noise Exposure.** Acoustic, Berlin, v. 85, 448p., 1999.

MASCHKE, C. **Preventive Medical Limits for Chronic Traffic Noise Exposure.** Acoustic, Berlin, v. 85, 448p., 1999.

MATEUS, D. “Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído” – Apostila de apoio à disciplina de Acústica aplicada, DEC-FCTUC, Coimbra, 2008.

MILANEZ, M. L. **Análise do Impacto Ambiental Sonoro Com a Implantação do Trecho Norte da Linha Verde em Curitiba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MOREL, J.; MARQUIS-FAVRE, C.; GILLE, L.A. **Noise annoyance assessment of various urban road vehicle pass-by noises in isolation and combined with industrial noise: A laboratory study.** Appl. Acoust. 101, 47–57, 2016.

MÖSER M., **Engineering Acoustics – An Introduction to Noise Control.** 289p. 2004.

MOTTA, M. A. O sentido da audição. In: MENEZES, P. L.; NETO, S. C.; MOTTA, M. A. **Biofísica da audição.** São Paulo: Editora Lovise, 2005.

NEPOMUCENO, L. A. **Elementos de acústica física e psicoacústica.** São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

NEPOMUCENO, L. X. **Acústica técnica.** 1 ed. São Paulo: Editora Técnico Científica Industrial Ltda. – ETEGIL, 1968.

OLIVEIRA, P. D. P. S. **Desenvolvimento e Caracterização Acústica de Elementos Autoportantes Para Absorção Sonora em Espaços Tipo Open Space.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, 2009.

RAICHEL, D. R. **The Science and Application of Acoustics,** 2ª ed., 2000.

RASMUSSEN, B. **Sound insulation between dwellings – Classification schemes and building regulations in Europe.** International Congress and Exposition on noise control engineering, 33. Prague, 2004.

ROSSING T. D.; MOORE F. R.; WHEELER P. A. **The Science of Sound.** 2 ed. Los Angeles: Pearson Addison Wesley, 1990.

RUSSO, I. C. P.; LOPES, L. Q.; BRUNETTO-BORGANNI, L. M. Noções de Acústica e Psicoacústica. In: SANTOS-MOMENSOHN, T. M.; RUSSO, I. C. P. **Prática da Audiologia Clínica.** 8ª ed. São Paulo: Editora Cortez, 2011.

RUSSO, I. P. C. **Acústica e Psicoacústica aplicadas à Fonoaudiologia.** 2ª ed. São Paulo: Editora Lovise, 1999.

RUSSO, I. P.C. Noções gerais de acústica e psicoacústica. In: NUDELMANN, A. A. *et. al.* (Orgs). **PAIR – Perda auditiva induzida pelo ruído.** Porto Alegre: Bagagem Comunicação, 1997.

SANTOS, U. P.; MATOS, M. P. Aspectos de Física. In: SANTOS, U. P. **Ruído: riscos e prevenção.** São Paulo: Editora Hucitec, 1996.

SCATOLINI, F.; ELLER, R. D. A. G. **Impacto do Ruído Aeronáutico no Mercado Imobiliário de São Paulo.** Simpósio de Transporte Aéreo, Rio de Janeiro, 2008.

SCHAFER, R. M. **A afinação do mundo.** São Paulo: Editora UNESP, 2001.

SCHULTZ T. J. **Community Noise Rating.** 2 ed. New York: Elsevier Applied Science, 1972.

SOUZA L. L.; NASCIMENTO C. R. D.; COELHO A. H. **Elaboração de curvas de ruído para análise de uso e ocupação do solo no entorno do Aeroporto Internacional de Boa Vista - Atlas Brasil Cantanhede.** Revista dos Transportes Públicos – ANTP, 2017.

STUTTGART. Bürgerservice. **Lärm.** Disponível em: < <https://www.stuttgart.de/laerm> >. Acesso em: 18 de outubro de 2019.

STUTT GART. Bürgerservice. **Lärm**. Disponível em:< <https://www.stuttgart.de/laerm>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2020.

SZEREMETA, B. **Avaliação e Percepção da Paisagem Sonora de Parques Públicos de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, 91 p. 2007.

T&E – TRANSPORT & ENVIRONMENT. **Can you hear us? Why it is finally time for EU to tackle the problem of noise from road and rail traffic**. Technical Report, European Federation for Transport and Environment, 2008.

VALLE, S. **Manual Prático de Acústica – 3ª Edição, Revisada e Ampliada**. Editora Música & Tecnologia – 2009.

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E. V. - VDA **Urban Traffic and Noise**. 1 ed. Frankfurt: VDA, 1978.

WG-AEN. European Commission Working Group – Assessment of Exposure to Noise. **Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure**. Position Paper, Final Draft. Version 2, 13th January 2006.

WHO European Centre for Environment and Health, **Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe**, 2011.

WHO European Centre for Environment and Health, **Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe**, 2011

ZANNIN, P. H. T. **Acústica Ambiental**. Curitiba: Editora UFPR, 2004.

ZANNIN, P.H.T., CALIXTO, A., DINIZ F. B. D., FERREIRA J. A. C., SCHULLER R. **Incômodo Causado pelo Ruído Urbano à População de Curitiba**, PR. Revista de Saúde Pública, São Paulo, v.36, n. 4, p. 521-524, 2002.

ZANNIN, P.H.T., DO VALLE, F., DO NASCIMENTO E. O. **Assessment of Noise Pollution along Two Main Avenues in Curitiba, Brazil, PR** Open Journal of Acoustics, 9, 26-38, 2019.