



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Isadora Castro de Oliveira

Avaliação de métodos alemães de medição de ruídos causados pelo tráfego ferroviário e utilização de barreiras acústicas

Ouro Preto - MG
2017

Isadora Castro de Oliveira

Avaliação de métodos alemães de medição de ruídos causados pelo tráfego ferroviário e utilização de barreiras acústicas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil

Área de concentração: Transportes

Orientador: Prof. Fernando Antônio Borges Campos

Ouro Preto - MG
2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ATA No. 202 DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA A
CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

DATA DA DEFESA: 18/08/2017
CANDIDATA: Isadora Castro de Oliveira
ORIENTADOR: Prof. Fernando Antônio Borges Campos

BANCA EXAMINADORA:
Prof. Ralph Werner Heringer Oliveira (M.Sc.) – UFOP (Presidente)
Eng. Hebert da Consolação Alves – UFOP
Eng. Daniel Pinto Fernandes (D.Sc.)

TÍTULO DO TRABALHO: Avaliação de métodos alemães de medição de ruídos causados
pelo tráfego ferroviário e utilização de barreiras acústicas

Em sessão pública de defesa de trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, após
exposição do trabalho e arguição oral do candidato pelos membros da banca, o trabalho foi
avaliado com a seguinte nota: 9,5. Portanto:

APROVADO
 REPROVADO

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é abaixo assinada pelos
membros da banca na ordem acima determinada e pelo candidato.

Ouro Preto, 18 de agosto de 2017

Presidente: 

Membros: Hebert da consolação Alves.

Daniel Pinto Fernandes.

Candidata: Isadora Castro de Oliveira

O482a Oliveira, Isadora Castro de.
Avaliação de métodos alemães de medição de ruídos causados pelo tráfego ferroviário e utilização de barreiras acústicas [manuscrito] / Isadora Castro de Oliveira. - 2017.

77f.: il.: color; graf.; tabs; mapas.

Orientador: Prof. MSc. Fernando Antônio Borges Campos.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Poluição sonora. 2. Ferrovias - Controle de ruído. 3. Acústica - Normas técnicas (Engenharia). 4. Engenharia acústica. I. Campos, Fernando Antônio Borges. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624

RESUMO

A presente pesquisa procura examinar e analisar o método alemão de medição e controle de ruídos ferroviários, e investigar o que é previsto nas leis e normas brasileiras neste aspecto, e propõe uma adaptação à realidade do nosso país em vista da atual demanda de expansão das ferrovias. O desenvolvimento econômico dos centros urbanos brasileiros, na maioria das vezes desordenado e sem fiscalização, causou uma consequente ocupação direta das margens das vias férreas, resultando em uma relação complicada entre a população e os trens. O aumento do fluxo de transporte é um indicativo de que as populações do entorno dessas vias serão cada vez mais afetadas pelo tráfego de trens. Sabe-se que estes veículos geram grande intensidade de ruídos e vibrações, tanto devido à passagem pelos trilhos, quanto ao funcionamento de suas máquinas. Essas ocorrências acabam por gerar incômodos, bem como possíveis problemas de saúde física e mental para a população, quando a linha férrea atravessa as cidades. As regulações ambientais para as empresas brasileiras de transporte ferroviário exigem apenas o constante monitoramento das emissões de ruídos em suas vias. Este cenário poderia ser melhorado através da otimização das vias permanentes e da construção de barreiras acústicas, a exemplo daquelas existentes na Alemanha, medidas estas que não estão previstas na legislação ou nas normas brasileiras. A Alemanha, país de referência em ferrovias, possui normas e regulamentos que dizem respeito a muros de isolamento acústico às margens de vias férreas próximas a moradias, o que contribui enormemente para minimizar a propagação dos ruídos, e consequente benefício à população. Foram analisados os seguintes pontos: relevância desta questão, situação ferroviária em cada país e as normas e leis vigentes em ambos. Considerando um exemplo de aplicação das normas brasileiras e alemãs em medição de ruídos realizada em trecho da linha férrea do município de Conselheiro Lafaiete - MG, conclui-se que, apesar de complexa, a situação em nosso país pode ser melhorada caso fosse aplicada a norma alemã na execução de medições de ruídos e de melhorias em nossas vias férreas.

Palavras-chave: RUÍDOS, MEDIÇÃO DE RUÍDOS, EMISSÃO, IMISSÃO, FERROVIAS, NORMAS ALEMÃS, NORMAS BRASILEIRAS, BARREIRAS ACÚSTICAS.

ABSTRACT

The present research aims to examine and analyse the German method of measuring and controlling railroad noises. It also investigates what is stipulated by Brazilian laws and rules concerning this aspect, and finally proposes the adaptation to this country, facing its present demand of railroad expansion. The economical development of urban centres mostly lacking arrangement and regulation has caused the consequent occupation of railway borders, resulting in an intricate relation between the population and the trains. The increasing flux of transportation is a pointer that populations that surround those railways will be more and more affected by train traffic. It is known that the vehicles produce noises and vibrations of large intensity, both because of their passage on the trails, and because of the engines functioning. These occurrences yield to cause discomfort, and are likely to cause physical and mental health problems to the people living along the railway borders inside the cities. The Brazilian environmental regulation to the railroad transportation companies merely requires the constant monitoring of noise emission on their roads. This scenery could be improved through the optimization of the permanent railroads, and the construction of acoustic barrels, taking as example the existing ones in Germany. Such procedures are not previewed in Brazilian rules. Germany – a country which is a world reference for railroads – owns regulations that deal with acoustic isolation walls bordering railways along residential areas, which dramatically contributes to minimize the noise propagation, and consequently bringing benefits to the population. Through the analyses of the relevance of this case, as well as the issue of railroads in each country, the current regulations and laws in both countries, and considering an example for applying the Brazilian and German standards by a noise measurement of a railroad in the municipality of Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais, Brazil, one comes to the conclusion that, despite its complexity, the situation in Brazil may be optimized, should the German regulations were applied in measurements and improvement of Brazilian railways.

Key-words: NOISE, NOISE MEASUREMENT, EMISSION, IMISSION, RAILWAYS, GERMAN STANDARDS, BRAZILIAN STANDARDS, NOISE BARRIER.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVO	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 DEFINIÇÕES FÍSICAS	12
3.1.1 SOM	12
3.1.2 DECIBEL	12
3.1.3 PROPAGAÇÃO DO SOM	13
3.1.4 RUÍDO	13
3.1.5 IMISSÃO SONORA	14
3.2 INFLUÊNCIAS DO RUÍDO NA SAÚDE	14
3.3 RUÍDO FERROVIÁRIO	16
3.4 SITUAÇÃO ATUAL DA QUESTÃO NO BRASIL	18
3.4.1 MALHA FERROVIÁRIA	18
3.4.2 DISTRIBUIÇÃO DOS MODAIS DE TRANSPORTE	19
3.4.3 CONTROLE DE RUÍDOS	20
3.5 SITUAÇÃO ATUAL DA QUESTÃO NA ALEMANHA	21
3.5.1 MALHA FERROVIÁRIA	21
3.5.2 DISTRIBUIÇÃO DOS MODAIS DE TRANSPORTE	22
3.5.3 CONTROLE DE RUÍDOS	23
4 MÉTODOS	30
4.1 MÉTODO BRASILEIRO	30
4.1.1 NBR 10151/2000	30
4.2 MÉTODOS ALEMÃES	32
4.2.1 16.BIMSCHV	32
4.2.2 RUÍDO 03	33
5 APLICAÇÃO E RESULTADOS	63
6 ANÁLISE COMPARATIVA	70
7 CONCLUSÃO	72
ANEXO	75
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Visando entender os princípios básicos da propagação de ruídos e suas consequências, é necessário estudar os fundamentos físicos do som e os biológicos da audição, bem como os riscos que se apresentam à saúde do ser humano exposto a ruídos constantes. Como impactos diretos da exposição do ser humano a ruídos podem-se citar problemas de audição, distúrbios do sono, problemas cardiovasculares e psicofisiológicos, diminuição da produtividade e mudanças comportamentais.

O impacto da poluição sonora na saúde da população é o fator primordial que leva países a estabelecerem leis e normas regulamentadoras que visam limitar a emissão e a consequente imissão de ruídos. Por imissão entende-se o nível de pressão sonora que chega ao ouvinte. O transporte ferroviário é uma grande fonte dessa poluição. Visto que pessoas que vivem às margens de ferrovias estão sujeitas constantemente a esse problema, países de referência em utilização de ferrovias, como a Alemanha, possuem leis e normas específicas para o controle de ruídos ferroviários, que preveem soluções mitigadoras, como a construção de barreiras acústicas, para proteger a população de seus efeitos nocivos. Apesar de não possuir uma densa malha ferroviária em comparação com países de extensão similar, o Brasil apresenta problemas com relação a ruídos emitidos pela passagem de trens em centros urbanos, afetando diretamente o ambiente destas cidades.

Devido à extensão da malha ferroviária e à grande utilização das ferrovias como meio de transporte, a Alemanha possui uma gama de leis e normas que tratam do assunto, no que tange à construção da via, utilização da faixa de domínio e interação da atividade com a população em seu entorno. Existe neste país a preocupação com o bem estar das pessoas que convivem com a passagem desses veículos, principalmente na questão dos ruídos. Além de existirem limites de emissão, são feitos mapeamentos dessas emissões, procedimentos de controle de emissão periódicos e todos os trechos urbanos de linha férreas são separados de seu entorno por barreiras de redução de ruídos, como mostra a Figura 1, abaixo.

Figura 1 - Ao fundo, barreira de redução de ruídos em um trecho de ferrovia alemão.
(Fonte: arquivo pessoal)



Em contrapartida, o Brasil, por ser um país que não manteve a tradição do transporte ferroviário, não dispõe de regulamentações suficientes sobre o tema. Sabe-se que existe a intenção de explorar melhor este modo de transporte de cargas e pessoas no país, entretanto, o foco se dá apenas na construção da via em si e na geração de divisas. As linhas férreas hoje existentes no país que se encontram em bom estado, estão sob concessão de empresas privadas. Entretanto, a faixa de domínio dessas se encontra, na maioria dos casos, invadida pelos moradores das cidades, como consequência do crescimento desordenado das mesmas. A proximidade desses habitantes com o cotidiano da operação ferroviária não se dá de forma harmônica.

As regulações ambientais que atuam sobre as empresas brasileiras de transporte ferroviário exigem que seja feito, apenas, o monitoramento constante das emissões de ruídos em suas vias. Este é um fator preponderante para a concessionária obter sua licença ambiental e poder operar a linha férrea. No entanto, não existe grande fiscalização neste âmbito dos ruídos, o que pode sugerir que este controle não seja feito de forma a beneficiar a população. Este cenário poderia ser melhorado através da otimização das vias permanentes e da construção de barreiras acústicas, a exemplo daquelas existentes na Alemanha, medidas estas que não estão previstas na legislação ou nas normas brasileiras. Dessa forma, sem que

houvesse fiscalização no passado, e sem que hajam normas no presente, tanto as empresas que detêm a concessão dessas vias, quanto a população que vive em suas margens, têm que lidar com disputas de interesse e falta de respaldo legal e normativo. A imagem abaixo exemplifica a situação comum de margem de ferrovia o Brasil.

Figura 2 - Exemplo de invasão de faixa de domínio de via férrea em Ouro Preto - MG. (Fonte: Google Maps)



2 OBJETIVO

A presente pesquisa teve como objetivo examinar e analisar o método alemão de medição e controle de ruídos ferroviários, para entender como é aplicado, e investigar o que é previsto nas leis e normas brasileiras com relação à medição e mitigação de ruídos ferroviários. Por fim, visou-se comparar a situação normativa de ambos os países e debater a possibilidade de aplicação, na realidade brasileira, do método alemão descrito, tendo como base uma medição real e comparativa feita na via férrea que corta a cidade de Conselheiro Lafaiete, no interior do estado de Minas Gerais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para analisar a importância do controle de propagação de ruídos ferroviários é preciso consultar publicações que abordem o tema e buscar nelas argumentos que indiquem o quão o tema ainda pode ser explorado. Assim, serão citados trechos de publicações anteriores para que se possa estabelecer uma base para a presente pesquisa, delimitando o problema em questão e validando suas premissas.

3.1 Definições físicas

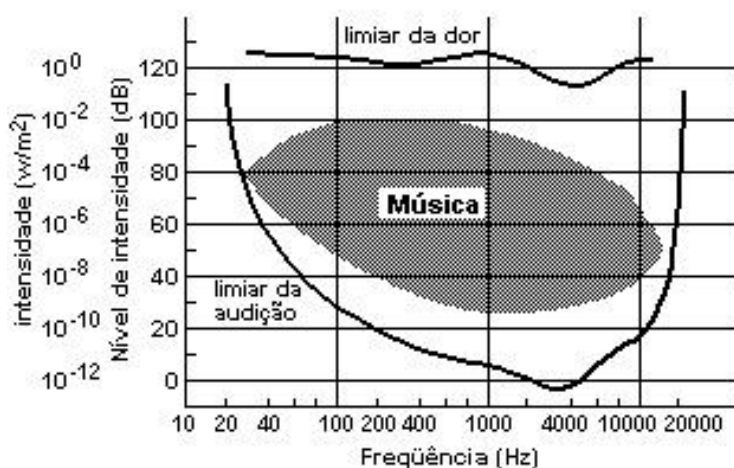
3.1.1 Som

Em seu livro, Gerges, 1992, define o som como sendo caracterizado por flutuações de pressão em um meio compressível e afirma que não são todas as flutuações de pressão que produzem a sensação de audição quando atingem o ouvido humano, visto que ela só ocorrerá quando a amplitude destas flutuações e a frequência com que elas se repetem estiverem dentro de determinadas faixas de valores.

3.1.2 Decibel

O ouvido humano consegue captar uma gama de intensidades sonoras que se encontram entre o limiar da audição e o da dor, como indicado na Figura 3.

Figura 3 - Espectro sonoro. (Fonte: Calixto [2]. 2016)



O nível de intensidade sonora é medido pela unidade Decibel (dB). A uma determinada frequência a ordem de grandeza de um som que causa dor é muito grande com relação a um que seria somente audível. Deste modo a escala de intensidade foi dividida na unidade Bel, que corresponde a \log_{10} . Entretanto, por ele

ser um valor de divisão de escala relativamente grande, é usado um décimo do Bel, que corresponde a um Decibel, como mostrado a seguir.

$$1 \text{ Bel} = 10 \text{ Decibel} \quad (3.1)$$

$$1 \text{ dB} = 10^{0,1} = 1,26 \quad (3.2)$$

Vemos, então, um Decibel gera um aumento de intensidade de 1,26. Portanto, uma mudança de 3dB gera um aumento de intensidade correspondente a 2 (Gerges, 1992).

3.1.3 Propagação do Som

Ainda segundo Gerges 1992, o som se propaga em forma de ondas esféricas a partir de uma fonte pontual, que se caracteriza por qualquer superfície vibrante que cause excitações no ar. Existem duas situações que dificultam esse modelo, sendo elas a presença de obstáculos na trajetória de propagação e a não uniformidade do meio, em campo aberto.

O efeito do obstáculo na trajetória do som só é perceptível caso este possua dimensões comparáveis ao comprimento da onda sonora. Portanto, para que a passagem do som seja impedida as barreiras devem ser colocadas perto da fonte ou do receptor e suas dimensões devem ser equivalentes de três a cinco vezes o comprimento do som em questão (Gerges, 1992).

3.1.4 Ruído

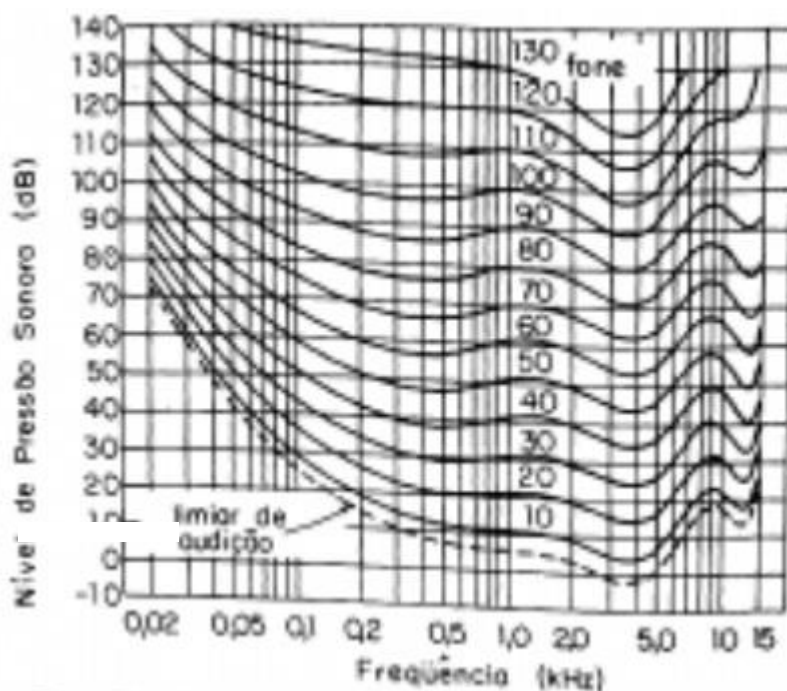
Gerges, 1992, define o ruído como sendo um som desagradável e indesejado. Para Calixto, 2002, ele se caracteriza pela existência de muitas amplitudes e frequências ocorrendo ao mesmo tempo de maneira não harmônica.

Para quantificá-lo existem algumas escalas e critérios, como os circuitos de compensação A, B, C e D usados em aparelhos eletrônicos que medem o Nível de Pressão Sonora (NPS).

Estes são circuitos eletrônicos variáveis com a frequência, de forma a modelar o comportamento do ouvido humano, pelo fato de ele não ser igualmente sensível a todas as frequências, mas especialmente sensível a frequências entre 2Hz e 5Hz e menos sensível a aquelas muito altas ou baixas. O circuito A, utilizado em diversas normas, foi concebido para se aproximar de curvas de contorno de audibilidade para

NPS baixos, próximo a 50Hz. Na Figura 4, vemos os contornos de audibilidade, que variam com o NPS e a frequência sonora.

Figura 4 - Níveis de audibilidade. (Fonte: Gerges, 1992. Página 42)



3.1.5 Imissão sonora

Imissão sonora é descrita como a pressão sonora que efetivamente chega ao sistema auditivo do receptor, sendo seu nível definido pelo nível de pressão sonora (NPS) emitido por uma fonte menos as perdas na transmissão entre a fonte e o receptor (Calixto, 2002).

3.2 Influências do Ruído na Saúde

"Os feitos do ruído na saúde podem surgir como uma consequência direta dos estressores do ruído ou ser resultado de reações subjetivas ao incômodo causado pelo mesmo."* (Babisch et al., 2003; Job, 1996; Lercher, 1996; Niemann et al., 2005 apud Brink, 2011). As fontes de ruído na atualidade são inúmeras, principalmente em cidades, onde há grande concentração de pessoas e as atividades por elas exercidas demandam o uso de equipamentos e veículos.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2016), o ruído em excesso prejudica a saúde do ser humano e interfere em seu dia-a-dia, além de causar distúrbios do sono, problemas cardiovasculares e psicofisiológicos, diminuir a produtividade e provocar mudanças comportamentais em indivíduos a ele submetidos.

Por se tratar de um fator ao qual grande parte da população mundial se encontra submetida, diversas pesquisas sobre o tema foram publicadas, sendo nelas descritas as influências diretas e indiretas que o ruído causa na saúde humana. Segundo Gerges 1992, são conhecidos vários efeitos como aceleração da pulsação, aumento da pressão sanguínea e estreitamento dos vasos sanguíneos, e sob longo tempo de exposição ocorre sobrecarga do coração, causando secreções anormais de hormônios, e tensões musculares, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Efeitos do ruído no corpo humano. (Fonte: Gerges, 1992)



Uma das consequências mais comuns da exposição a ruídos é a perda de audição, que vem a influenciar na comunicação. "Ela se caracteriza primeiramente pela dificuldade de se entender bem algumas palavras ao telefone, pois as frequências usadas na compreensão da comunicação verbal são mais altas (consoantes) e o indivíduo começa a perder sua sensibilidade pelas altas frequências. O problema reside no fato de que a percepção de uma dificuldade auditiva ocorre geralmente muito tarde, impedindo que o dano possa ser revertido completamente." (Calixto, 2002).

Ainda segundo Calixto 2002, o ruído excessivo provoca aumento do nível de estresse, prejudica a aprendizagem de crianças que estudam em áreas ruidosas, prejudica a comunicação entre pessoas e prejudica o sono por afetar seus principais estágios restauradores orgânicos e cerebrais.

3.3 Ruído Ferroviário

O transporte ferroviário é importante para o desenvolvimento de um país por ser responsável pelo escoamento de grande parte da sua produção, sendo, entretanto, alvo de críticas devido à poluição sonora em áreas urbanas (Kohler, Specht e Bronzati, 2012). O Brasil prevê ampliações em seus modais ferroviários para as próximas décadas e, por esse motivo, é essencial entender o ruído ferroviário e como ele pode ser mitigado.

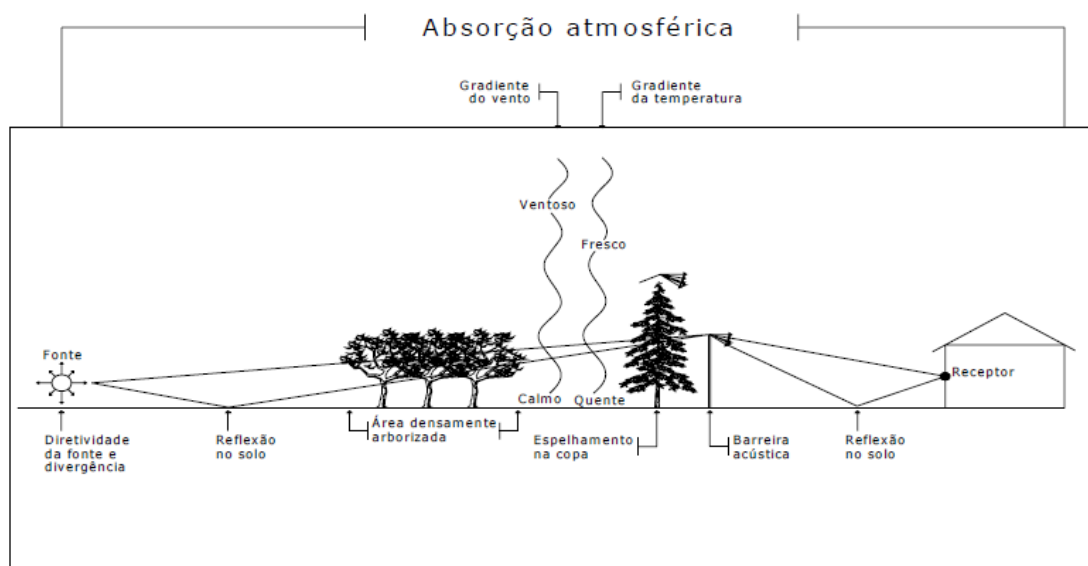
O DNIT 2016 classifica a poluição sonora gerada pelo transporte ferroviário como sendo decorrente do ruído do motor da locomotiva, contato da roda com o trilho quando da passagem dos trens, o acionamento da buzina para fins de alerta aos motoristas e pedestres e, em alguns casos, os dispositivos sonoros quando do acionamento das cancelas em passagens em nível com sinalização ativa. Essa classificação se refere aos ruídos aos quais a população brasileira está submetida.

No Brasil predomina o transporte de cargas, mas outros países utilizam trens não apenas para transportar cargas como também para levar pessoas, e possuem modais ferroviários mais desenvolvidos, nos quais os trens atingem velocidades mais elevadas. Neste caso, as fontes de ruído se diferem, em partes, daquelas definidas pelo DNIT. "Podemos, então, dividir o ruído ferroviário em três grandes grupos: ruído de propulsão, ruído aerodinâmico e ruído mecânico/estrutural da interação das rodas sobre os trilhos" (Hanson, Ross and Towers, 2012, apud Mendonça, 2014).

Em todos os países, assim como no Brasil, existem normas e leis que regulamentam as emissões de ruídos no meio ambiente, o que inclui as vias férreas. Segundo o DNIT 2016, caso o nível de ruído medido durante a passagem do trem seja superior aos limites máximos permitidos, deverá ser adotada solução para atenuar esse ruído de modo a atender aos referidos limites.

Medidas para mitigação de ruídos são diversas. Anderson e Kurze citados por Bistafa 2006 apud Kohler, Specht e Bronzati, 2012, destacam que "uma das mais utilizadas é a das barreiras sonoras, por sua relativa simplicidade e eficácia. As barreiras sonoras podem ser feitas de diversas formas e materiais, dependendo do ambiente onde se encontram e do nível de ruído que se tem por objetivo atenuar." A seguir, vê-se na Figura 6 as formas de atenuação de ruídos citadas.

Figura 6 - Principais formas de atenuação de ruídos. (Fonte: Kohler, Specht e Bronzati, 2012)



"A barreira sonora baseia-se em princípios básicos da física acústica, ou seja, ela funciona como um obstáculo à onda sonora, desviando ou absorvendo-a. A barreira sonora pode ser inclusive de solo (taludes) ou árvores, as quais são denominadas de barreiras naturais, não ocasionando poluição visual." (Bistafa 2006 apud Kohler, Specht e Bronzati, 2012).

A redução dos níveis de ruído com a utilização de barreiras é significativa, como ressalta Mendonça 2014, em seu estudo, que simulou o uso de barreiras acústicas para trens de alta velocidade no trajeto Rio de Janeiro - Campinas. " No caso estudado, pôde-se comprovar que, pela proximidade das residências e seus diferentes níveis de altura em relação à linha férrea, há a necessidade de utilização de barreiras com altura elevada para que sejam respeitados os limites. A utilização dessas barreiras resultou em uma atenuação do ruído de tráfego de até 25 dBA." Pode-se perceber, no entanto, que a proximidade das edificações com relação à via é uma adversidade encontrada para a utilização de barreiras de ruídos para situações brasileiras.

3.4 Situação atual da questão no Brasil

3.4.1 Malha ferroviária

O Brasil conta, atualmente, com 28190 km de ferrovias, sendo elas administradas por diversas empresas de logística através do sistema de concessão ferroviária em vigência no país, de acordo com a figura 7.

Figura 7 - Mapa ferroviário brasileiro. (Fonte: ANTF)



3.4.2 Distribuição dos modais de transporte

A participação do modal ferroviário na matriz de transportes do país está em torno de 20,7% do volume de carga transportado (transporte de cargas) e 0,88% do total de passageiros transportados no país (transporte de passageiros). Abaixo estão as tabelas com as estatísticas descritas, obtidas do Boletim Estatístico mais recente (julho de 2016) da Confederação Nacional dos Transportes (CNT).

Tabela 1 - Modal Split do volume de carga transportada (Fonte: Boletim Estatístico CNT)

Matriz do Transporte de Cargas		
Modal	Milhões (TKU)	Participação (%)
Rodoviário	485.625	61,1
Ferroviário	164.809	20,7
Aquaviário	108.000	13,6
Dutoviário	33.300	4,2
Aéreo	3.169	0,4
Total	794.903	100,0

Tabela 2 - Modal Split do volume de passageiros transportados (Fonte: Boletim Estatístico CNT)

Modal	Passageiros Transportados			
	Rodoviário ⁽²⁰¹⁴⁾ Interestadual/Internacional	Ferroviário ⁽²⁰¹⁴⁾ Longa Distância	Aquaviário* ^(2014/2015)	Aeroviário** ⁽²⁰¹⁵⁾
Total	99.617.311	1.817.448	549.619	103.475.289

*Número de passageiros que viajaram em cruzeiros marítimos pelo país Temporada 2014/2015

**embarque e desembarque

3.4.3 Controle de ruídos

Apesar de não ser o modal mais significativo do país, tanto em termos de transporte de cargas, como de passageiros, e de se concentrar em partes específicas do país, existem projetos de expansão da malha ferroviária brasileira dentro dos próximos 25 anos, de acordo com o governo federal.

Analisando as normas, leis e recomendações brasileiras vigentes (NBR 10151/2000, NBR 10152/1987 e Produto 8 do DNIT) vemos que suas maiores especificações são relativas à emissão de ruídos, em si.

A NBR 10151/2000 estabelece o critério para se realizar medições da emissão de ruídos em áreas habitadas e os valores limite dessa emissão (níveis de critério de avaliação) em ambientes externos, para os períodos do dia e da noite. Estes valores servem de parâmetro para que sejam avaliados os impactos desse ruído no ambiente em questão, visando o conforto da população. Vale ressaltar que esta norma é utilizada no caso de ruídos de fontes estáticas, o que não é o caso do ruído ferroviário.

A NBR 10152/1987 estabelece os níveis de ruído para o conforto acústico, fixando os níveis compatíveis com diversos tipos de ambiente, suas faixas no espectro do som e os níveis de pressão correspondente a eles.

O material disponibilizado pelo DNIT - Produto 8: Parâmetros Indicadores de Intervenções em Áreas Urbanas - é o que mais se aplica a situações práticas no que diz respeito à proteção contra ruídos oriundos de ferrovias. Ele analisa a questão atual do país neste aspecto, indica as normas a se seguir e indica que devem ser adotadas soluções para a atenuação dos ruídos, caso esses ultrapassem os valores previstos na NBR 10151/2000 e NBR 10152/1987. Entretanto, estas soluções só poderão ser adotadas caso a faixa de domínio da ferrovia esteja livre de ocupações, o que, como descrito pela própria cartilha, é raro no Brasil. O DNIT 2016 cita ainda as possibilidades de mitigação das emissões e destaca o uso de barreiras acústicas feitas de tijolos e concreto. No entanto, estas recomendações são feitas com base na NBR 14313/99 que foi cancelada pela ABNT, o que deixa o país numa situação de vacância de normas que prevejam o uso de medidas de controle do ruído ferroviário.

São feitas considerações gerais com relação à situação do país no que diz respeito a ferrovias, visto que a expansão das cidades à margem das vias gerou processos de conflito com a população devido à passagem do trem, por causa de fatores como o ruído causado. Por esse motivo, os trens começaram a circular em velocidades mais baixas quando dentro de cidades, o que acaba por diminuir a competitividade do transporte ferroviário frente a outros tipos de transporte de carga no país. Assim, o departamento criou este material visando a implementação de melhorias físicas específicas para cada situação, identificando as principais interferências urbanas e os parâmetros técnicos que podem auxiliar neste processo, contemplando procedimentos a serem seguidos na inferência e análise de soluções.

Recomenda-se que se proceda às medições segundo a NBR 10151/2000 de forma a quantificar o nível de pressão sonora ao longo do limite da faixa de domínio da ferrovia nas situações com e sem a passagem da composição, para que se verifique a influência da mesma. Caso os limites estejam acima dos previstos em norma deve ser adotada solução para atenuar os ruídos.

Após a análise dos parâmetros é feita a indicação da intervenção, que no caso se trata do controle do ruído emitido. Entretanto ela só poderá ser feita no caso de a faixa de domínio da ferrovia estar totalmente liberada no perímetro urbano.

Existem três formas de intervenção, citadas hierarquicamente: o controle do ruído na fonte, onde a causa do ruído é a própria fonte; seu controle no meio de

propagação, onde o meio é o elemento transmissor do ruído; o controle do ruído no receptor, sendo ele os moradores próximos à área atravessada pela ferrovia.

Recomenda-se a utilização de barreiras acústicas entre a via e o receptor como sendo a solução mais indicada para que haja uma atenuação dos níveis de ruído enquadrando-os dentro do limite normativo. Elas devem ser construídas por anteparos naturais (espécies vegetais selecionadas para este fim, recomendadas na Norma DNIT 073/2006) ou artificiais (módulos conectados por peças substituíveis e padronizadas na forma de parede, com dimensões definidas em projeto) dispostos ao longo da via permanente ferroviária. No que se refere aos materiais artificiais, os recomendados estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Materiais usualmente empregados em barreiras acústicas artificiais. (Fonte: DNIT)

Material	Atenuação (dB)
Parede de tijolo maciço com 45 cm de espessura	55
Parede de 1 tijolo de espessura de 23 cm	50
Parede de meio tijolo de espessura com 12 cm e rebocado	45
Parede de concreto de 8 cm de espessura	40
Parede de tijolo vazado de 6 cm de espessura e rebocado	35

Vale ressaltar que este material disponibilizado pelo DNIT usa como referência a NBR 14313/1999 que se encontra cancelada, como citado anteriormente.

3.5 Situação atual da questão na Alemanha

3.5.1 Malha ferroviária

A Alemanha conta, atualmente, com 37800 km de ferrovias, sendo elas administradas e sua grande maioria pela Deutsche Bahn AG (DB AG), uma ex-estatal que controla 88% das ferrovias no país. O restante das vias é controlado por outras empresas. Abaixo vemos um mapa com os principais trechos ferroviários do país (que correspondem ao maior fluxo de bens e passageiros).

Figura 8 - Mapa dos principais vias ferroviárias da Alemanha (Fonte: Lärmaktionsplan - LAP)



3.5.2 Distribuição dos modais de transporte

A participação do modal ferroviário na matriz de transportes alemã está em torno de 8,7% do volume total de carga transportado (transporte de cargas) e 3,8% do total de passageiros transportados no país (transporte de passageiros). Abaixo estão os gráficos com as estatísticas descritas, obtidas do Boletim de Previsão a Médio Prazo para o Transporte de Mercadorias e de Passageiros (2014/15) feito pela empresa Intraplan Consult GmbH.

Gráfico 1- Distribuição modal do volume de bens transportados (Fonte: Intraplan Consult GmbH)

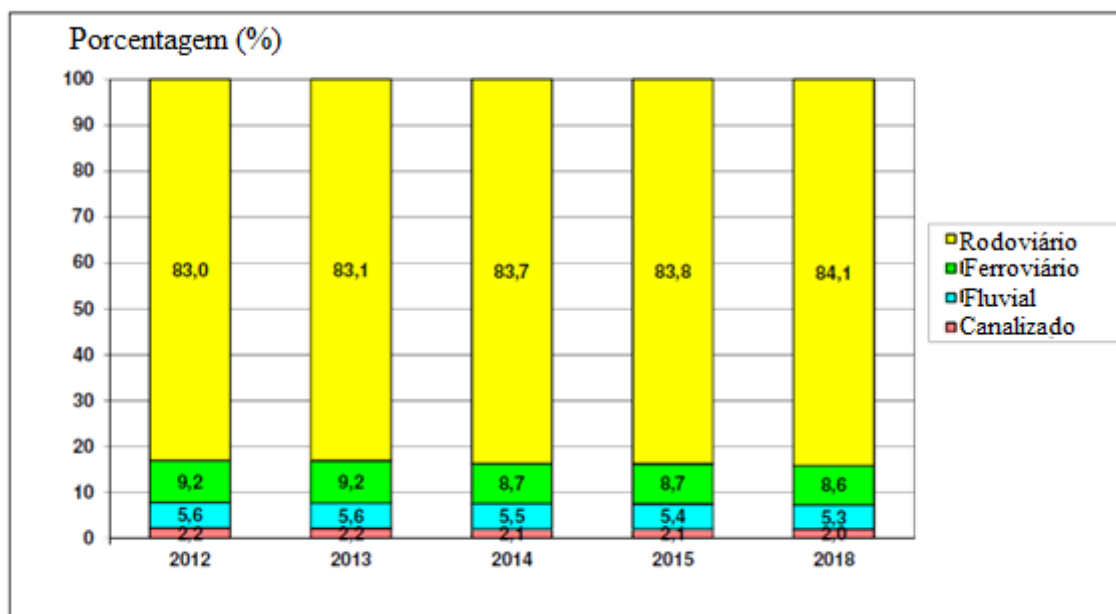
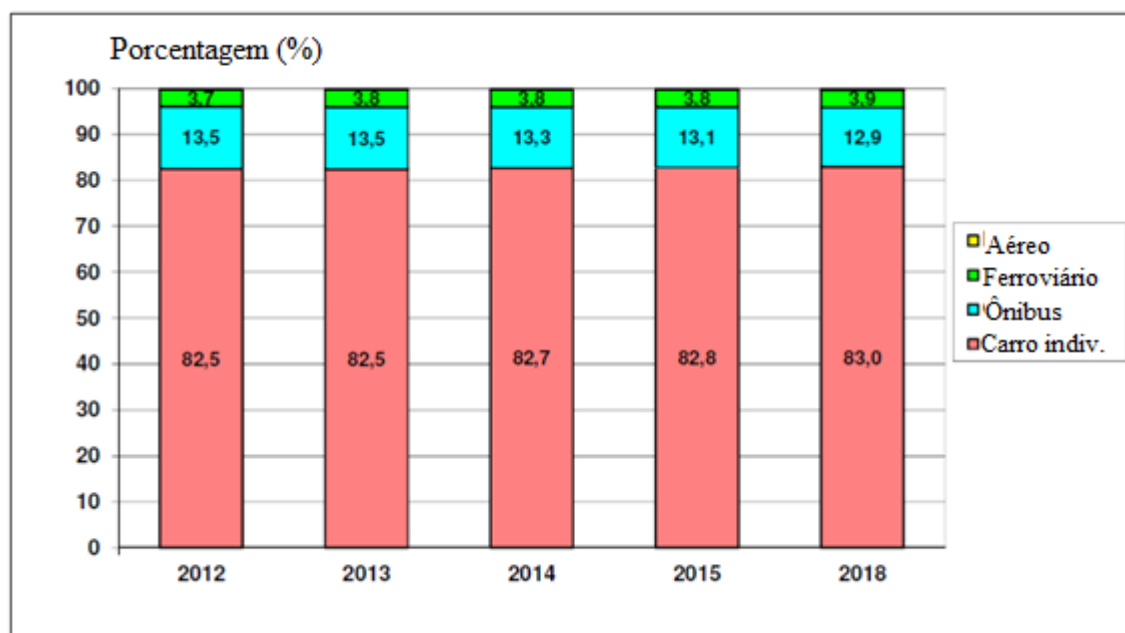


Gráfico 2 - Distribuição modal do volume de pessoas transportadas (Fonte: Intraplan Consult GmbH)



3.5.3 Controle de ruídos

Apesar de o modal ferroviário também não ser o mais significativo do país, a malha alemã é distribuída por toda sua extensão territorial e estabelece um papel ativo no cotidiano do país. Por esse motivo, o sistema de leis, normas e projetos

estabelecido pelo governo alemão e por agências privadas do país, pode ser considerado completo, visto que abrange todos os tópicos referentes à questão. Existe uma relação de complementação entre os métodos de regulamentação, cálculo e aplicação de medidas paliativas.

As diretrizes para a redução de ruídos do Ministério do Transporte e Infraestrutura Digital (BMVI) indicam as leis a serem seguidas relativas a essa questão, estabelece o procedimento para o cálculo do custo-benefício da implementação de medidas de proteção contra ruídos e define os responsáveis legais.

A lei BImSchG trata de todos os tipos de emissão que geram impactos negativos no meio ambiente como um todo. No âmbito dos ruídos ela estabelece procedimentos para o caso de problemas entre empresas e moradores, prevendo acordos, garantias e ressarcimentos. Ela trata também do planejamento que deve ser feito para que haja minoração dos ruídos emitidos e imitados, no que tange a mapas de ruídos e planos de ação. Finalmente, nela são citadas todas as disposições legais administrativas, europeias e federais.

O decreto 16. BImSchV concretiza a BImSchG, estabelecendo os limites para a imissão do ruído, o procedimento de cálculo a ser seguido para a determinação do nível de classificação do ruído (Schall 03) e discorre sobre as características acústicas de novas tecnologias de proteção contra ruídos. Vale ressaltar que este decreto propõe uma metodologia de cálculo e não uma metodologia de medição do nível de classificação, visto que ela considera que a medição com o aparelho de pressão sonora pode gerar erros e imprecisões que são evitadas com os cálculos, sendo que eles consideram todos os aspectos envolvidos na emissão e imissão.

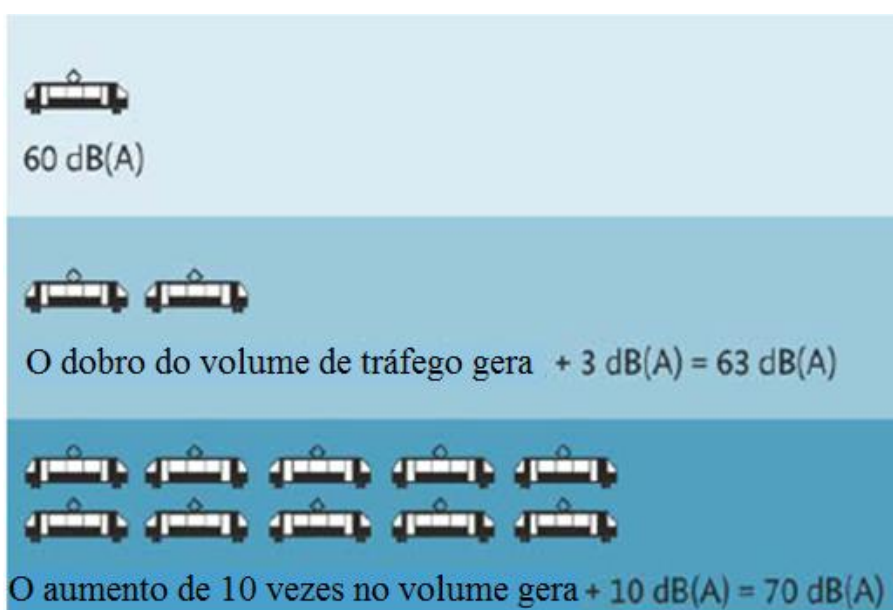
Este procedimento de cálculo estabelece o nível de classificação do ruído para os períodos do dia e da noite, com base na modelagem da fonte de emissão, abrangendo tudo o que pode gerar o ruído, na direção de propagação e no caminho até o ponto de imissão, a emissão em si, a identificação do som e a propagação do som nos meios (solo, ar, obstáculos) considerando os efeitos de blindagem e reflexão que podem ser gerados por barreiras acústicas. A emissão é calculada detalhadamente e leva em conta o tipo de veículo, o tipo de fonte emissora, a velocidade de passagem da composição, o tipo de estrutura e passagem de nível presentes (se houver), pontes, túneis, estações, entre outros, e o tipo de redução local de ruído (presentes no veículo ou infraestrutura de rodagem).

O decreto 24. BImSchV estabelece critérios para o conforto acústico no interior de edificações e prevê medidas passivas de proteção ao ambiente interno.

O Plano de Ação contra Ruídos (LAP) foi publicado, em sua versão piloto, pela Agência Nacional de Ferrovias (Eisenbahn-Bundesamt - EBA) abrangendo todos os grandes eixos ferroviários fora de grandes centros do país (cidades com mais de 100000 habitantes e densidade populacional de 1000 hab/km²). Ele estabelece metas e bases para diretrizes futuras através da consulta aberta à população, da análise de mapas de ruído do país inteiro para identificar áreas mais afetadas e de mitigação mais urgente e prevê a proteção da população contra ruídos construindo barreiras clássicas, inovadoras e usando novas tecnologias de redução de ruídos, em conjunto com empresas como a DB. No plano de ação particular da empresa são detalhadas as formas de proteção contra ruídos, tanto ativas quanto passivas, abrangendo as locais e as inovações tecnológicas.

O LAP está previsto na lei BImSchG e se fez necessário frente a especificações da União Européia para a diminuição dos ruídos no continente através de planos de ação e mapas de ruído. A importância deste plano se dá ao se analisar a relação direta entre crescimento econômico e da qualidade de vida com o crescimento do transporte ferroviário de bens e pessoas. Sabe-se que um maior volume de transporte significa um aumento na emissão de ruídos, como mostra a figura 9.

Figura 9 - Influência do volume de tráfego na emissão de ruídos. (Fonte: LAP Parte A)



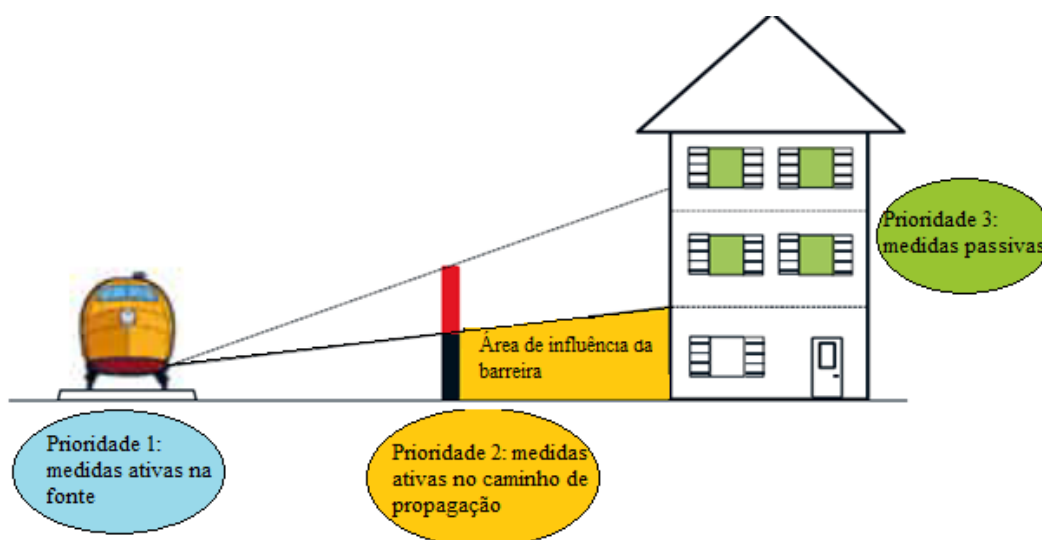
O LAP preconiza que existem três maneiras de reduzir o ruído ferroviário que afeta edificações já existentes: tratando dele na fonte, no seu caminho de propagação (medidas ativas) e em seu ponto de emissão (medidas passivas). Na Figura 10 pode-

se identificar diversas formas de medidas ativas e passivas de proteção contra ruídos, inclusive inovações tecnológicas, utilizadas na Alemanha, e na Figura 11 pode-se entender a ordem de prioridade dada às suas aplicações. Vale ressaltar que ambas os tipos de medida são de responsabilidade da empresa que opera a via, sendo as passivas no caso de edificações já existentes.

Figura 10 - Medidas ativas e passivas de proteção a ruídos ferroviários. (Fonte: LAP Parte A)



Figura 11 - Nova ordem de prioridade para a utilização de medidas de proteção contra ruídos. (Fonte: BMVI)



Medidas de tratamento do ruído na fonte e na propagação (ativas) incluem melhorias nos veículos, como novos sistemas de freio que geram uma diminuição dos ruídos em até 10 dB; melhorias na infra e superestrutura, como utilização de trilhos perfeitamente soldados, diminuindo a emissão em até 6 dB; a construção de "büG" que através do constante cuidado com a superfície dos trilhos, reduzem a emissão em 5 dB.

Na vanguarda estão as barreiras acústicas e diques, com as quais muitos residentes podem ser protegidos do barulho. As paredes de isolamento são o meio ativo mais comumente utilizado para a redução de ruído e têm grande influência sobre o caminho de propagação do ruído, como indica a figura 12. Os materiais são normalmente de alumínio, mas também existem paredes de concreto, vidro, madeira ou uma combinação destes materiais, como indicado na figura 13. A favor do alumínio contam a sua facilidade de manuseio e o bom retorno ao ciclo de material. Barreiras acústicas são projetadas para serem altamente absorventes e para evitar quase completamente as reflexões de som ao longo da via.

Figura 12 - Influência da barreira acústica na emissão de ruídos ferroviários. (Fonte: BMVI)

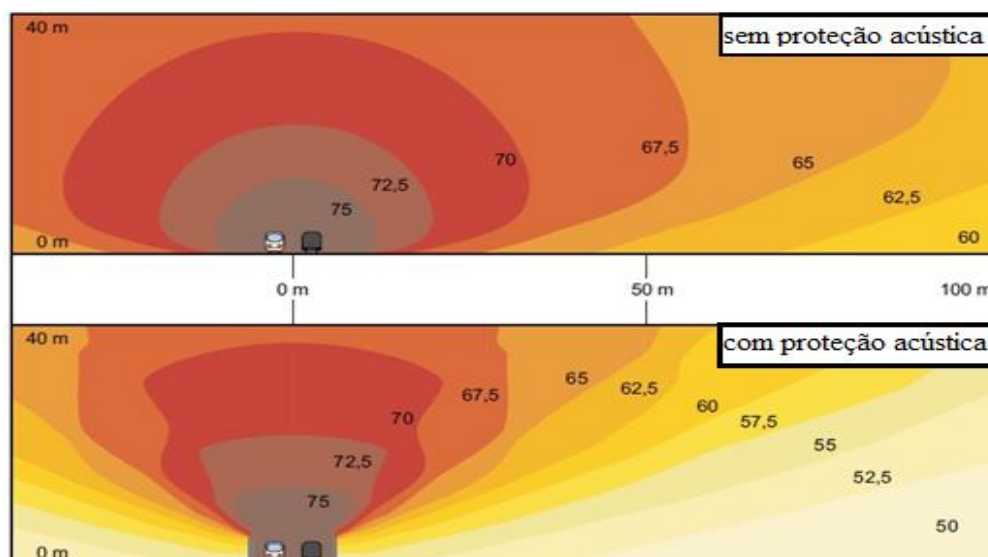


Figura 13 - Construção de uma barreira metálica com base pré-fabricada em concreto.

(Fonte: DB AG)



Caso as barreiras acústicas não possam ser construídas devido ao custo-benefício em determinadas situações urbanas e topográficas, devem ser usadas medidas passivas aplicadas nas edificações afetadas.

Existem também as novas tecnologias no âmbito das barreiras de proteção contra ruídos, sendo elas:

- Barreiras acústicas baixas: comparadas com barreiras acústicas convencionais barreiras baixas podem ser construídas mais perto da pista, conforme mostra a figura 14. Barreiras de 74 cm de altura reduzem o som em até 6 dB (A) e as de 55 cm de altura entre 3-5 dB (A).
- Barreiras acústicas de gabião: Gabiões são cestos de arame preenchidos com pedras. Um núcleo especial que consiste, por exemplo, de material reciclado, isola o som e não o deixa passar através da cesta de pedra. Um exemplo está indicado na figura 15. Elas têm o mesmo efeito de paredes à prova de som convencionais e podem ser usadas especialmente onde as paredes convencionais não são aceitas por questões estéticas.

Figura 14 - Barreira acústica baixa. (Fonte: DB AG)



Figura 15 - Barreira acústica de gabião. (Fonte: DB AG)



4 MÉTODOS

Como base para a realização da pesquisa foram utilizadas as leis e normas referentes a cada país (Brasil e Alemanha), suas recomendações e procedimentos foram descritos e posteriormente procedeu-se a uma aplicação em situação real, seguida de uma análise comparativa.

A seguir, especifica-se individualmente os métodos utilizados.

4.1 Método Brasileiro

Nesta seção trata-se da norma brasileira NBR10151/2000 que será aplicada no caso do estudo ruído ferroviário em questão, visto que está atualmente em vigência e que não há no momento outra norma que se aplique ao ruído de fontes móveis, que seria mais adequado ao presente estudo.

A critério de informação, existiam duas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que complementavam a norma descrita no tópico a seguir, e que foram canceladas. Ambas pautaram projetos e publicações anteriores ao ano de 2016. A primeira, NBR 14313/1999 com o título "Barreiras acústicas para vias de tráfego – Características construtivas" foi cancelada sem substituição em maio de 2016. A segunda, NBR 7731/1983 com o título "Guia para execução de serviços de medição de ruído aéreo e avaliação dos seus efeitos sobre o homem" também se encontra cancelada. Os dados sobre a inutilização das normas acima citados foram retirados da página de internet da ABNT.

4.1.1 NBR 10151/2000

A NBR 10151/2000 - Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento, está em vigor desde 1987, tendo sua última versão sido lançada em 2000.

Esta norma tem por objetivos fixar as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independente da existência de reclamações; especificar um método para a medição de ruído, a aplicação de correções nos níveis medidos se o ruído apresentar características especiais e uma comparação dos níveis corrigidos com um critério que leva em conta vários fatores específicos. O método de avaliação envolve as medições do nível de pressão sonora equivalente (LA_{eq}), em decibel ponderado em "A", comumente chamado dB(A).

Seus procedimentos descrevem a medição de ruídos no exterior e interior de edificações externas à fonte do ruído, utilizando um medidor de nível de pressão

sonora que faça medidas diretas do LA_{eq} , calibrado por meio de um calibrador acústico.

Caso o medidor não disponha da função acima especificada, procede-se ao cálculo do LA_{eq} da seguinte forma:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (4.1)$$

Onde:

- L_i é o nível de pressão sonora, em dB(A), lido em resposta rápida a cada 5 s, durante o tempo de medição do ruído;
- n é o número total de leituras.

Efetuada a medição e obtidos os LA_{eq} , a norma pede que este valor seja corrigido para que seja obtido o nível corrigido L_c , das seguintes formas:

- i. para ruídos sem caráter impulsivo e sem componentes tonais não é efetuada correção;
- ii. para ruído com características impulsivas ou de impacto, L_c é determinado pelo valor máximo de L_i acrescido de 5 dB(A).
- iii. para ruído com componentes tonais, L_c é determinado pelo LA_{eq} acrescido de 5 dB(A).
- iv. para ruído que apresente simultaneamente características impulsivas e componentes tonais L_c deve ser determinado aplicando-se os procedimentos ii. e iii., sendo o resultado o maior valor.

Para avaliar se o nível de ruído externo medido está dentro dos limites previstos, procede-se à comparação de L_c com o Nível de Critério de Avaliação (NCA), dados na Tabela 4. Vale ressaltar que o período noturno pode ser definido pelas autoridades locais, respeitando o limite de se iniciar no máximo às 22h e terminar no mínimo às 7h.

Tabela 4 - NCA para ambientes externos em dB(A). (Fonte: NBR 10151/2000)

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

Para níveis de ruído interno, considerar os valores da Tabela 1 com a correção de -10dB(A) para a janela aberta, e -15dB(A) para a janela fechada.

4.2 Métodos Alemães

A seguir será descrito o método previstos na Alemanha para controle da emissão e imissão de ruídos que estabelecem parâmetros de comparação, em semelhança às normas brasileiras acima citadas.

4.2.1 16.BImSchV

A portaria número 16 trata da implementação do BImSchG, com o nome de Portaria para a proteção contra ruídos (Verkehrslärmschutzverordnung) concretiza o § 43 do BImSchG. Nela estão a base de cálculo para a avaliação do ruído do tráfego, sendo ela a regra para calcular o ruído ferroviário, a Som 03 (Schall 03), que consiste no seu Anexo 2. O Anexo 1 estabelece os critérios de cálculo para rodovias.

§1 Escopo

O regulamento aplica-se à construção ou modificação substancial de rodovias e ferrovias. A mudança é essencial quando: uma estrada será expandida estruturalmente aumentando o número de pistas para o tráfego de veículos ou o número de faixas para o tráfego de trens; por meio da construção o nível de emissão de ruído se alterar em pelo menos 3 dB (A), ou sendo alcançados 70 dB (A) durante o dia ou 60 dB (A) durante a noite. Isto não se aplica a áreas comerciais.

§2 Limites de Imissão

Para proteger a vizinhança do ruído do tráfego, deve-se garantir que devido à construção ou alteração das vias o nível de classificação da imissão não exceda os seguintes limites, descritos na tabela 5:

Tabela 5 - Limites de imissão. (Fonte: 16.BImSchV)

Dia	Noite
1. Em hospitais, escolas, asilos e casas de repouso 57 dB(A)	47 dB(A)
2. Em áreas residenciais e pequenos conjuntos habitacionais 59 dB(A)	49 dB(A)
3. Em áreas centrais, vilas e demais 64 dB(A)	54 dB(A)
4. Em áreas comerciais 69 dB(A)	59 dB(A)

§4 Cálculo do nível de classificação de ruído para ferrovias

O nível de classificação para ferrovias será calculado de acordo com a metodologia de cálculo descrita no apêndice 2, chamada Schall 03 (Ruído 03). O cálculo deve ser feito separadamente por período de avaliação sendo eles o dia (6:00 às 22:00), e a noite (22:00 às 6:00).

No cálculo deve-se atentar às seguintes condições: características de emissão de som de veículos e estradas, os efeitos do percurso de propagação, as características específicas do transporte ferroviário como o incômodo gerado pelos sons devido à sua evolução temporal, a sua duração, repetição e frequência, tom e pulso.

§5 Determinação das características acústicas para novas tecnologias ferroviárias e inovações tecnológicas em acústica

Novas tecnologias ferroviárias ou inovações tecnológicas em acústica só podem ser incluídas no cálculo do nível de classificação de ruído se a autoridade competente tiver especificado em um processo nos termos existentes para o cálculo das características acústicas. Novas tecnologias ferroviárias é toda tecnologia que não está listada no Apêndice 2, seção 3 a 6 e é atribuída a uma das seguintes áreas: tipo de estradas, medidas de redução de ruído na faixa ou ao volante ou, medidas de redução de ruído específicos do transporte ferroviário no caminho de propagação.

Inovações tecnológicas em acústica são consideradas como sendo as inovações técnicas e desenvolvimentos de tecnologias ferroviárias que gerem impacto sobre a emissão e a imissão de ruídos.

4.2.2 Ruído 03

A Ruído 03 (Schall 03) consiste no Anexo 2 da 16.BImSchV, sendo nele definidos todos os aspectos que tangem ao cálculo do nível de classificação da emissão de ruídos ferroviários.

Para vias férreas será definido o nível de classificação L_r de uma vizinhança separadamente para o dia (6:00 às 22:00) e a noite (22:00 às 06:00). A base para o cálculo do nível de classificação é o número de recursos previstos de cada tipo de comboio, bem como o planejamento operacional relativo à velocidade na seção da ferrovia em questão. Com base nos dados de planejamento, o cálculo do nível de classificação foi dividido nas seguintes etapas:

- Distribuição da linha férrea analisada em faixas individuais e perfis, entre outros, com a mesma composição de tráfego, a mesma velocidade, mesmo tipo de infraestrutura e mesma condição da superfície e a identificação e determinação das fontes de som em estações de manobra e transbordo;
- Cálculo do nível de potência sonora linear ou superficial, em bandas de oitava a partir da quantidade de trens por hora n_{FZ} de todos os tipos de unidade de veículos (FZ), separadamente para cada seção de uma rota especificada em ou para cada fonte de som de estação de manobra e transbordo (em todas as alturas h);
- Divisão das seções em pedaços k_s ou das superfícies em subáreas k_f para formar fontes pontuais com níveis associados de potência sonora, considerando o padrão de diretividade e radiação;
- Cálculo de emissões sonoras de ferrovias;
- Cálculo das emissões sonoras através do cálculo de dispersão;
- Resumo das influências da imissão de ruídos;
- Estabelecimento do nível de classificação L_r para os períodos relevantes de avaliação.

Caso sejam usados softwares para o cálculo eles devem garantir a ilustração padronizado da referida disposição, de acordo com a norma DIN 45687, Acústica - Os produtos de software para o cálculo da poluição sonora ao ar livre - requisitos de qualidade e teste, emitido maio de 2006.

4.2.2.2 Modelagem da fonte de ruído

a. Divisão em seções de emissão acústica uniforme

Rotas a serem avaliadas devem ser divididas em seções de emissão sonora uniformes segundo os seguintes critérios: composição do tráfego, classes de

velocidade, tipo de infraestrutura, condição do trilho, zonas das estações e paradas, pontes e viadutos, passagens de nível, raios de curva. Para as seções assim formadas deve ser determinado o nível uniforme de potência sonora em relação ao comprimento.

b. Nível de potência de ruído para trechos de ferrovias

O nível da potência sonora relacionada com o comprimento ($L_{W'A,f,h,m,Fz}$) na banda de oitava f , na faixa de altura h , como resultado da fonte parcial de som m (ver Tabela 8), para uma categoria de veículo Fz por hora calculada utilizando a seguinte equação:

$$L_{W'A,f,h,m,Fz} = a_{A,h,m,Fz} + \Delta a_{f,h,m,Fz} + 10 \lg \frac{n_Q}{n_{Q,0}} \text{ dB} + b_{f,h,m} \lg \left(\frac{v_{Fz}}{v_0} \right) \text{ dB} + \sum_c (c1_{f,h,m,c} + c2_{f,h,m,c}) + \sum_k K_k \quad (4.4)$$

Sendo: $a_{A,h,m,Fz}$ = nível global ponderado em A de potência sonora linear em relação à velocidade v_0 de referência = 100 km / h em pista com superfície em estado regular, de acordo com o Anexo 1, em dB;

$\Delta a_{A,h,m,Fz}$ = Diferença de nível em banda de oitava f , de acordo com o Anexo 1, em dB;

n_Q = Número de fontes de som por unidade de veículo;

$n_{Q,0}$ = Referência de fontes de som por unidade de veículo;

$b_{f,h,m}$ = Fator de velocidade de acordo com a Tabela 9;

v_{Fz} = Velocidade, em km/h;

v_0 = Velocidade de referência, $v_0 = 100$ km/h

$\sum_c (c1_{f,h,m,c} + c2_{f,h,m,c})$ Soma de correção de nível C de acordo com o tipo de via (c1) de acordo com a Tabela 10 e a superfície de condução (c2) de acordo com a tabela 11, em dB,

$\sum_k K_k$ Soma de correção de nível k para pontes de acordo com as Tabelas 12 e 16 e a visibilidade do ruído de acordo com a Tabela 14, em dB.

Observação: os valores de cada incógnita serão obtidos de diversas tabelas que serão apresentadas a seguir.

Em função do tráfego de trens por hora (n_{Fz}), tem-se:

$$L_{W'A,f,h} = 10 \lg \left(\sum_{m,Fz} n_{Fz} 10^{0,1 L_{W'A,f,h,m,Fz}} \right) \text{dB} \quad (4.5)$$

c. Nível de potência sonora para estações de manobra e de carregamento

O nível da potência sonora ponderada em A de fontes pontuais na gama de uma oitava f , na altura h , devido a uma única fonte i é dependente do número N_i de eventos ou unidades por hora, sendo calculado pela seguinte equação:

$$L_{WA,f,h,i} = L_{WA,h,i} + \Delta L_{W,f,h,i} + 10 \lg n_i \text{ dB} + \sum_k K_k \quad (4.6)$$

O nível da potência sonora relacionada com o comprimento ponderado de fontes lineares de som, na banda de oitava f , na altura h , devido a uma única fonte j depende do número N_j de eventos ou unidades por hora, é calculado utilizando a seguinte equação:

$$L_{W'A,f,h,j} = L_{W'A,h,j} + \Delta L_{W,f,h,j} + 10 \lg n_j \text{ dB} + \sum_k K_k \quad (4.7)$$

Sub-áreas de manobra e estações de manipulação que apresentem emissão de som uniforme podem ser combinadas em uma fonte sonora superficial. A emissão da fonte, é dada pela ponderação indicada a seguir:

$$L_{W''A,f,h} = 10 \lg \left[\left(\sum_i q_{i,h} 10^{0,1 L_{WA,f,h,i}} + \sum_j q_{j,h} 10^{0,1 L_{W'A,f,h,j}} \frac{l_j}{l_0} \right) \frac{S_0}{S_F} \right] \text{dB} \quad (4.8)$$

d. Formação de fontes pontuais por separação em seções

O cálculo utilizado para avaliar o ruído depende de fontes pontuais. Assim, deve-se descrever todas as fontes planas e superficiais como sendo fontes pontuais (ver Figura 6). Uma fonte que contribui para um único ponto de emissão é modelada como uma fonte pontual. Assim, o comprimento das seções é L_{KS} ou sua área é S_{KF} definido pela decomposição da fonte, para que ao se dividir todas as seções ou sub-áreas da emissão pela equação 30 haja uma diferença na emissão de no máximo 0,1 dB.

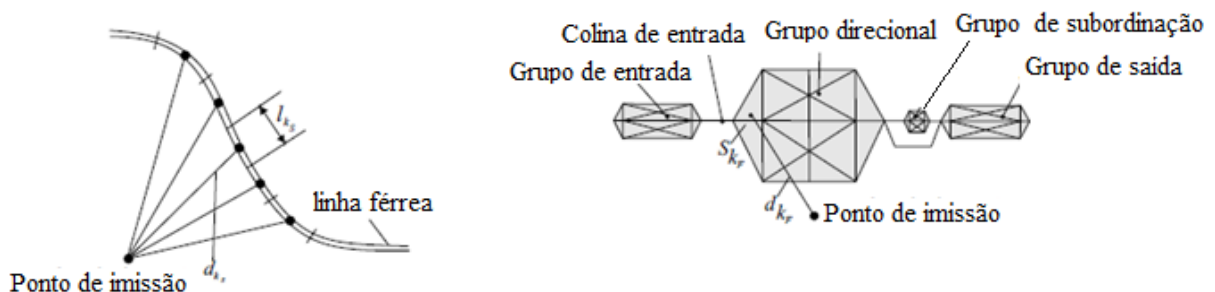


Figura 16 - Exemplo de divisão de trechos de emissão uniforme. (Fonte: Schall 03)

A partir do comprimento de um fragmento (L_{kS}) os níveis da potência sonora ponderada em A serão dados por:

$$L_{WA,f,h,k_S} = L_{W'A,f,h} + 10 \lg \left(\frac{L_{k_S}}{l_0} \right) \text{ dB} \quad (4.9)$$

com $l_0 = 1,0 \text{ m}$

Para a superfície superfície parcial (S_{kF}) os níveis da potência sonora ponderada em A serão dados por:

$$L_{WA,f,h,k_F} = L_{W'A,f,h} + 10 \lg \left(\frac{S_{k_F}}{S_0} \right) \text{ dB} \quad (4.10)$$

com $S_0 = 1,0 \text{ m}^2$

O nível de potência sonora em bandas de oitava de acordo com a equação 4.10 descreve em conjunto com o ângulo sólido dado pela equação 4.12, a emissão de som não-direcional de uma fonte pontual no meio de uma área parcial k_F a h_s de altura acima do trilho ou da parte superior da via.

e. Índice de diretividade e ângulo sólido

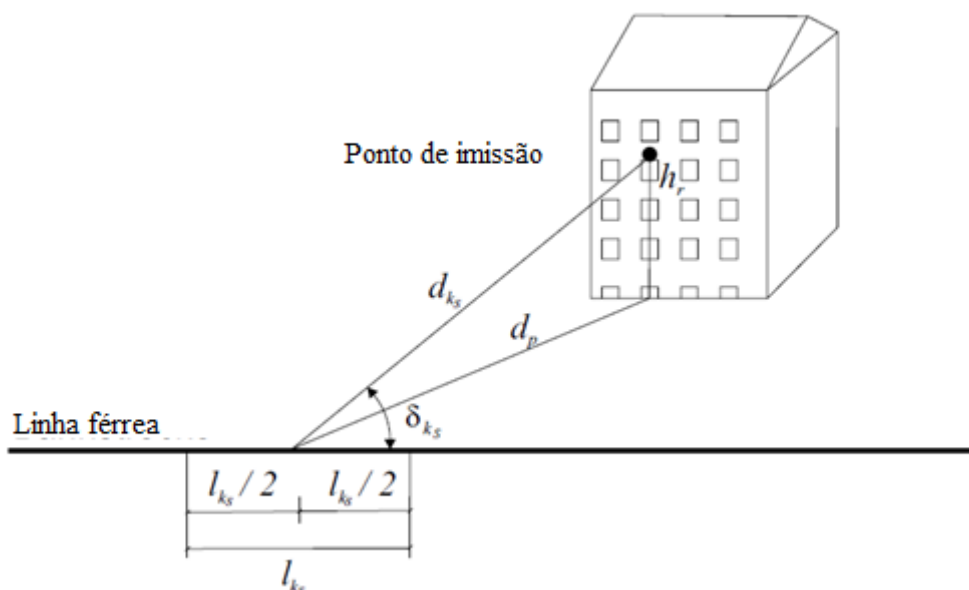
1. Índice de diretividade

O índice de diretividade D_{i,k_S} é dado pela seguinte equação para cortes no trajeto da rota calculada:

$$D_{i,k_S} = 10 \lg \left(0,22 + 1,27 \sin^2 \delta_{k_S} \right) \text{ dB} \quad (4.11)$$

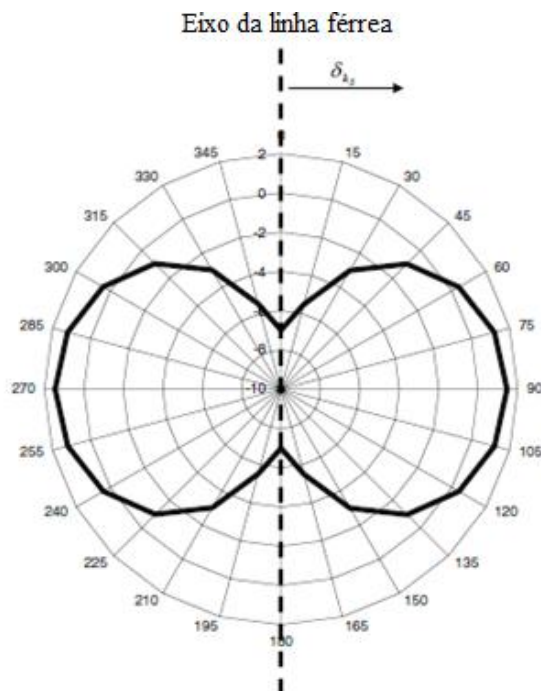
Aqui δ_{k_S} denota o ângulo entre um feixe sonoro a partir da fonte pontual da qual emana, e o eixo da faixa, como ilustrado na Figura 7.

Figura 17 - Definição do ângulo δ_{kS} em um trecho de ferrovia. (Fonte: Schall 03)



Observação: o índice de diretividade, dado pela equação 4.11, está graficamente ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - O índice de diretividade (dB) para o ângulo δ_{kS} em graus. (Fonte: Schall 03)



2. Ângulo sólido

O nível de potência sonora de todas as fontes deste sistema especificam a radiação para o ângulo sólido 4π . Com ele é considerado o aumento aparente no nível de potência sonora da fonte de som devido a reflexões do ângulo sólido no solo, que é dado através da seguinte equação:

$$D_{\Omega} = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{\left[d_p^2 + (h_g - h_r)^2 \right]}{\left[d_p^2 + (h_g + h_r)^2 \right]} \right\} \text{ dB} \quad (4.12)$$

Sendo: h_g = Altura da fonte de som no chão, em m;
 h_r = Altura do local de imissão acima do solo, em m;
 h_p = distância horizontal entre a fonte sonora e a imissão em m;

4.2.2.3 Emissões sonoras de ferrovias

a. Tipo de veículo

O cálculo das emissões sonoras para cada categoria de veículo tem como base a Tabela 6:

Tabela 6 - Tipos e categorias de veículos ferroviários e o número de referência de seus eixos. (Fonte: Tabela 3, Schall 03)

Coluna	A	B	C
Linha	Tipo de Veículo	Categoria do Veículo (F_z)	Número de Eixos de Referência ($n_{Achs,0}$)
1	Locomotiva de trens de alta velocidade	1	4
2	Veículo médio/de controle não conduzido, de trens de alta velocidade	2	4
3	Unidade múltipla de trens de alta velocidade	3	32
4	Trem inclinado de alta velocidade	4	28
5	Unidade múltipla elétrica e metrô de superfície	5	10
6	Unidade múltipla a diesel	6	6
7	Locomotiva elétrica	7	4
8	Locomotiva a diesel	8	4
9	Trem de viagem	9	4
10	Trem de carga	10	4

Observações com relação à coluna C da Tabela 7: A potência sonora do ruído de rolamento aumenta com o número de eixos. Caso haja diferença no número de eixos (n_{achs}) com relação ao número de referência dos eixos ($n_{achs,0}$) de um veículo, é dada na equação 4.4 uma correção com $n_Q = n_{achs}$. Esta correção só é estabelecida caso o tipo de fonte sonora seja o ruído de rolamento, conforme a Tabela 9 apresentada a seguir. Para todos os outros tipos de fontes de som se aplica $n_Q = n_{Q,0}$. Os dados serão utilizados na equação 4.4 para o cálculo do nível de potência do ruído para o trecho.

A composição e o número de unidades de veículos dos trens, quando não forem especificados para o cálculo, poderão ser retirados da tabela 7.

Tabela 7 - Dados do transporte ferroviário. (Fonte: Tabela 4, Schall 03)

Coluna	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Linha	Tipo de trem	Velocidade máxima permitida	Número de unidades padrão de acordo com a categoria do trem									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Trem ICE 1	250	2	12								
2	Meio Trem ICE 2	250	1	7								
3	Trem ICE 2	250	2	14								
4	Meio Trem ICE 3	300			1							
5	Trem ICE 3	300			2							
6	ICE T	230				1						
7	Meio Trem Thaly PBKA	300	2	5								
8	Trem Thaly PBKA	300	4	10								
9	ETR 470 Cisalpino	200				1						
10	Trem IC com locomotiva a diesel	200							1		12	
11	Trem IC com locomotiva	160								1	12	

	elétrica											
12	Trem de curta distância com locomotiva a diesel	160							1		5	
13	Trem de curta distância com locomotiva elétrica	140								1	5	
14	Trem de curta distância (VT)	140					1					
15	Trem de curta distância (ET)	120						1				
16	IC 3	180						1				
17	Metrô	120					1					
18	Trem de carga distância com locomotiva a diesel	100							1			24
19	Trem de carga distância com locomotiva elétrica	100								1		24

b. Tipos de fonte de som

Para o cálculo da emissão acústica, quatro tipos de fontes de som estão listados na Tabela 8, a serem consideradas nas alturas relevantes acima da borda superior dos trilhos (SO).

Tabela 8 - Tipos de fonte de som em veículos ferroviários. (Fonte: Tabela 5, Schall 03)

Coluna	A	B	C	D	E
Linha	Tipo de fonte de ruído	Altura (h) [m]	Altura sobre o trilho (SO) [m]	Fonte parcial (m) [m]	Causas e componentes do ruído
1	Rolamento	1	0	1	Rugosidade do trilho
2		1	0	2	Rugosidade da roda
3		2	4	3	Radiação do ruído de rolamento transmitido como ruído corporal devido à rugosidade do trilho pelas superestruturas do caminhão-tanque
4		2	4	4	Radiação do ruído de rolamento transmitido como um som do corpo devido à rugosidade das rodas por carrinhos de tanques
5		3	5	5	Pantógrafo
6	Aerodinâmica	2	4	6	Pé pedestal, rede de refrigeração e sistemas de ar condicionado na área do telhado
7		1	0	7	Ao redor dos bogies
8	Ruído agregado	2	4	8	Ventiladores de refrigeração e sistemas de ar condicionado, lado de sucção na área do telhado
9		1	0	9	Ventiladores de sistemas de refrigeração e ar condicionado, sucção e pressão laterais na área subterrânea

10	Ruído de funcionamento	2	4	10	sistema de escape
11		1	0	11	Motor, transmissão

Observações sobre a Tabela 8:

- Linhas 1 e 2: Em caso de encostas com uma inclinação $\geq 20\%$ e comprimento ≥ 500 m para comboios de mercadorias com freios em bloco de ferro fundido em descida, prever um valor adicional de 3 dB sobre o ruído de rolamento na altura $h_s = 0$ m, devido aos ruídos de travagem.
- Linhas 3 e 4: Para vagões-tanque, a rugosidade atua no efeito do ruído de rolamento através de radiação som em construções inclusive para alturas $h_s = 4$ m de. A fonte parcial correspondente é aplicada apenas aos vagões-tanque. A menos que seja conhecido, será adotada uma cota de 20% de vagões-tanque para cada trem de carga.

c. Velocidade

O nível global da potência sonora ponderado em A por unidade de comprimento listado no Anexo 1 será aplicado a uma velocidade de referência $v_0 = 100$ km / h. A influência de diferentes velocidades é levada em conta na equação 4.4 com o fator de velocidade b de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Fator de velocidade b para ferrovias. (Fonte: Tabela 6, Schall 03)

Coluna	A	B	C							
Linha	Tipo de Fonte Sonora	Fontes	Fator de velocidade b na banda média de frequência de oitava (em Hz)							
1			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
2	Ruído de rolamento	1,2,3,4	-5	-5	-5	0	10	25	25	25
3	Ruído aerodinâmico	5,6,7	50							
4	Ruído agregado	8,9	-10							
5	Ruído de condução	10,11	20							

A velocidade do veículo (v_{Fz}) é determinada da seguinte forma: O ponto de partida é a regra de tráfego que define a velocidade permitida para cada veículo. Se vários carros de um comboio possuem diferentes velocidades máximas, a velocidade

do veículo mais lento será utilizada para todos os veículos. Caso a velocidade permitida na via seja menor, deve ser utilizado este valor.

Na área de estações ferroviárias (dentro dos sinais de entrada) e de pontos de parada (sendo comprimento da plataforma superior a 100 m de cada lado) a velocidade permitida é para a via aberta deve ser de, no mínimo 70 km/h a menos que seja definida pela sinalização. A uma velocidade $v_{Fz} = 70$ Km/h, para este tipo de área, são considerados ruídos causados, por exemplo, pelo fechamento da porta ou pela passagem sobre interruptores e/ou pela frenagem ou arranque.

Observação: Os limites de velocidade para diferentes tipos de trens podem ser retirados da Tabela 8.

d. Tipos de estrada de ferro e passagens de nível (fator c_1)

As características acústicas listadas no Anexo 1 aplicam-se a vias com dormentes. Para outros tipos de superfícies de vias são estabelecidos fatores de correção de acordo de acordo com a Tabela 11 para serem aplicados na equação 4.4.

Tabela 10 - Fatores de correção c_1 para tipos de estrada de ferro sem dormentes. (Fonte: Tabela 7, Schall 03)

Coluna	A	B	C							
Linha	Tamanho do efeito		Correções de nível c_1 na linha em dB para as frequências centrais da banda de oitava, em Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Estrada fixa	Aumento da radiação ferroviária	0	0	0	7	3	0	0	0
2		Reflexão na estrada	1	1	1	1	1	1	1	1
3	Estrada fixa com absorvedor	Aumento da radiação ferroviária	0	0	0	7	3	0	0	0
4		Reflexão na estrada	0	0	0	-2	-2	-3	0	0
5	Passagem de nível	Aumento da rugosidade do trilho	0	0	0	8	4	0	0	0

6		Reflexão na estrada	1	1	1	1	1	1	1	1
---	--	---------------------	---	---	---	---	---	---	---	---

Observação 1: Linhas férreas com lastro incluem possibilidades de dormentes de concreto, de madeira ou de aço.

Observação 2: Na área de coração, geralmente não se instalam tecnologias de absorção.

Observação 3: Em um nível de correção para passagens de nível, que servem apenas como passagem para pedestres e ciclistas, deve ser ignorada a linha 5 e para aquelas que têm largura fixa ≤ 7 m, pode ser ignorada a linha 6.

e. Técnicas de redução de ruído na pista (fator c2)

As características acústicas listadas no Anexo 1 aplicam-se a uma condição mediana da superfície de condução e sem medidas acústicas especiais sobre o trilho. Para a condição de superfície de condução denominada "faixa especialmente monitorada (büG)" e de ação para os trilhos são definidos fatores de correção na Tabela 11, para serem utilizados na equação 4.4.

Tabela 11 - Fatores de correção C2 para a condição de superfície büG bem como para amortecedores ferroviários e protetores. (Fonte: Tabela 8, Schall 03)

Coluna	A	B	C							
Linha	Medida	Fonte parcial (m)	Correções de nível c2 na linha em dB para as frequências centrais da banda de oitava, em Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Trilha especialmente monitorada (büG)	1,3	0	0	0	-4	-5	-5	-4	0
2	Amortecedores ferroviários	1,3	0	0	0	-2	-3	-3	0	0
3		2,4	0	0	0	-1	-3	-2	0	0
4	Escudo web Rail	1	0	0	0	-3	-4	-5	0	0

Observação: A "faixa especialmente monitorados (büG)" é uma medida de proteção para ruídos com uma forma particular de monitoramento e manutenção das superfícies de rolamento ferroviário. Ela baseia-se no reconhecimento de que, indo além do estado das rodas, o que depende do veículo, a condição da superfície dos trilhos desempenha um papel crucial na formação do ruído de rolamento. Ao usar esta

medida, determinados trechos de via são verificados em intervalos regulares de tempo e o seu estado acústico analisado e corrigido, se necessário com um método especial de moagem (denominado moagem acústica).

f. Pontes (fatores K_{Br} e K_{LM})

Quando um trem passa sobre uma ponte, o nível de ruído da superestrutura da ponte deve ser considerado através de um fator de correção, que inclui os ruídos de baixa frequência. Este fator apresenta-se como uma correção combinada K_{Br} para a ponte e a via, uma vez que também inclui o impacto da estrada na ponte junto com a emissão de ruído da ponte. Medidas que conduzam a uma redução da emissão sonora de uma ponte serão consideradas por uma correção K_{LM} e devem ser reconhecidas como medidas de insonorização. Para os cinco tipos mais comuns de superestrutura de pontes e correções de nível são apresentados os fatores na Tabela 12. A correção é feita considerando as áreas laterais da ponte, sendo de 2 m em ambos os lados. Os fatores de correção se aplicam às fontes parciais 1 e 2. Para todas as outras fontes parciais considera-se $K_{Br} + K_{LM} = 0$ dB. Correções para tipos de estrada de acordo com a Tabela 15, linha 1 a 4 não serão reconhecidas neste caso.

Tabela 12 - Fatores de correção K_{Br} e K_{LM} para pontes. (Fonte: Tabela 9, Schall 03)

Coluna	A	B	C
Linha	Medida	K_{BR} [dB]	K_{LM} [dB]
1	Pontes com superestrutura de aço, trilhos montados diretamente	12	-6
2	Pontes com superestrutura de aço e trilha de trenó na cama de lastro	6	-3
3	Pontes com uma laje de pavimento sólido ou com uma superestrutura de aço especial e trilha de trenó na cama de lastro	3	-3
4	Pontes com uma trilha fixa	4	-

g. Emissões sonoras para estruturas

No campo das aberturas dos túneis e saguões, as emissões sonoras são levadas em conta. Supõe-se as condições especificadas nos parágrafos a. até e. para

determinar seu desempenho acústico. A absorção e transmissão características das estruturas devem ser determinados de acordo com as regras específicas para cada tipo de estrutura.

h. Estações de manobra e de carregamento

Para calcular as emissões sonoras de estações de manobra e carregamento, são levadas em conta as fontes de som listadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Fontes de som em estações de manobra e carregamento. (Fonte: Tabela 10, Schall 03)

Coluna	A	B	C	D	E
Linha	Parte da planta	Tipo da fonte do ruído	Altura (h)	Altura h_s acima SO/FO	causa do ruído
1	Estações de transmissão e transbordo				
2	Grupo de entrada, direção, reorganização e extensão em estaleiros de triagem e estações de transbordo, bem como em sistemas de trem de automóveis	Ruído de locomotivas e vagões, unidades de potência e ruído de direção da locomotiva	1	0	Rugosidade dos trilhos e roda, ventilador, motor, transmissão
3		Conduzindo o ruído da locomotiva de manobra	2	4	sistema de escape
4		Curvas de ruído	1	0	Stick-slip, manchando as rodas da roda na cabeça do trilho
5	Grupo de entrada	Removendo o ruído dos vagões de mercadorias	2	4	Unidades e movimentação da locomotiva prensada

		em toda a pista			
6	Direção e grupo subordinado	Ruído retardadores	1	0	Fricção dos flancos das rodas nas vigas dos travões
7		Ruído do retardador (toque)	1	0	Pressão de amortecedores
8		Ruído de retroescavadeira	1	0	Fricção do rodado em metal
9		Ruído de impacto Casserole	6	1,5	acidente vascular cerebral tampão
10	Grupo de direção e extensão	Som ao rasgar e desacelerar carros vagamente acoplados	5	1,5	Aceleração e desaceleração súbitas de vagões de mercadorias vagamente acoplados

i. Anormalidades do ruído ferroviário (fatores k_L e k_{LA})

Tons, pulsos ou sons que contenham informações, que sejam vindos seções ou sub-áreas, são levados em conta com uma sobretaxa independente de frequência K_L para o nível de potência sonora de acordo com a Tabela 15, para fontes dos tipos 1 e 2 de acordo com o Anexo 1. Caso ainda permaneçam rangidos, um fator de correção adicional K_{LA} é levado em conta.

Tabela 14 - Fator de correção K_L para a visibilidade do ruído. (Fonte: Tabela 11, Schall 03)

Coluna	A	B	C	D	E
Linha	Tipo de fonte de ruído	Fonte de ruído	K_L [dB]	K_{LA} [dB]	Observação
1	Ruído pela passagem em curvas	Raio da curva < 300m	8	-3	
2		Raio da curva de 300m a < 500m	3	-3	
3		Raio da curva \geq 500m	0		
4	Ruído pela passagem em curvas nas estações de desvio e transbordo	Todos os raios das curvas \leq 500m	6	-3	
5	Ruído de frenagem	Frenagem de afluxo	6	-3	
6		Frenagem em vale TW sem ou com segmentos, freio de via direcional TWE unilateral com segmentos, freio de vale FEW Leipzig	6	-3	
7		Frenagem em vale TW em ambos os lados	3		

		com segmentos GG, TW otimizado para o som			
8		Freio parafuso	3		
9		Retardador	3		Também se aplica a viagens de derivação sobre rotas de retardador
10	Outros ruídos	Ruído de retroescavadeira	6		Os ruídos ocorrem apenas em marshalling yards sem tecnologia de manobra moderna
11		choques	3		Em estações de triagem com tecnologia moderna
12			6		Em estações de triagem com tecnologias antigas
13		Marcação e desaceleração de vagões de mercadorias acoplados	6		O ruído pode ser evitado por meio de um carro de acoplamento fixo

4.2.4.4 Propagação do som

Nos caminhos de propagação do som entre uma fonte pontual e o ponto de imissão deve ser calculada a atenuação da propagação (A) pela seguinte equação:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} \quad (4.13)$$

Sendo os fatores da equação definidos nos próximos tópicos.

a. Propagação geométrica

A atenuação da propagação geométrica é calculada para a propagação de som esférica de uma fonte pontual de radiação não-direcional no espaço livre, de acordo com a seguinte equação:

$$A_{div} = 10 \lg \left(\frac{4\pi d^2}{d_0^2} \right) \text{ dB} \quad (4.14)$$

Sendo: d = comprimento do caminho entre a fonte pontual e o ponto de imissão, em metros;

$d_0 = 1$ m (comprimento de referência).

b. Absorção do ar

A atenuação por absorção do ar durante a propagação do som é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (4.15)$$

Onde α é o coeficiente de absorção do ar, em dB/1000 m, para cada banda de oitava na frequência central da banda. Os valores padrão dos coeficientes de absorção são apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 - Coeficiente de absorção do ar para bandas de oitava do som. (Fonte: Tabela 17, Schall 03)

Coluna	A	C							
Linha	Designação	Frequência média da banda de oitava f (em Hz)							
1		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
2	Coeficiente de absorção α (em dB) a cada 1000 m	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117

c. Influência do solo

A atenuação do ruído por influência do solo é calculada de acordo com um sistema independente da frequência, utilizando as seguintes equações:

$$A_{gr} = A_{gr,B} + A_{gr,W} \quad (4.16)$$

Sendo: $A_{gr,B}$ = atenuação por absorção da superfície do solo (Eq. 4.17);
 $A_{gr,W}$ = atenuação pela reflexão da água (Eq. 4.19).

$$A_{gr,B} = \left[4,8 - \frac{2h_m}{d} \left(17 + \frac{300d_0}{d} \right) \right] \text{dB} \geq 0 \text{ dB} \quad (4.17)$$

$$h_m = \frac{S}{d} \quad (4.18)$$

Onde: h_m = altura média do caminho de propagação do som em relação ao solo, em metros (ver Figura 9);
 d = distância entre o centro da fonte sonora e o ponto de imissão, em metros;
 S = Interface entre o caminho e o solo, em m^2 .

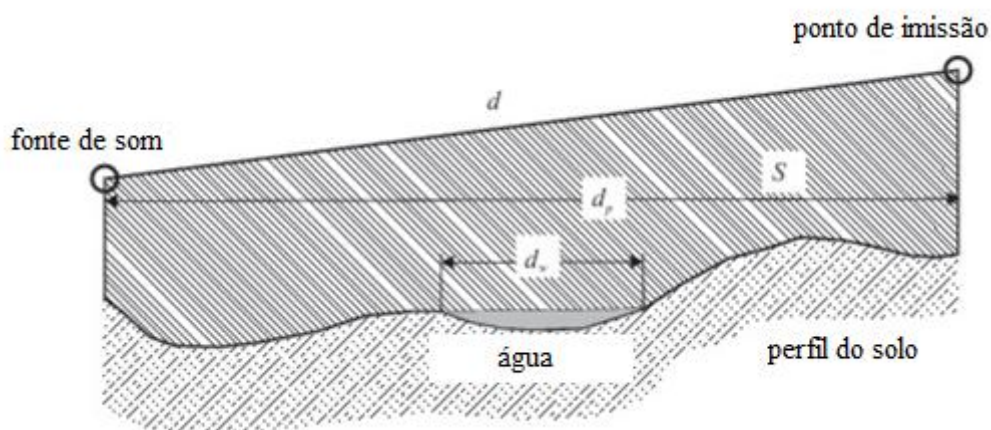
Observação: A grafia da equação 4.17 destina-se a indicar que, por meio da fórmula, valores negativos calculados serão substituídos por 0 dB.

$$A_{gr,W} = \left(-3 \frac{d_w}{d_p} \right) \text{dB} \quad (4.19)$$

Onde: d_w é parte da distância horizontal entre o centro da fonte sonora e o ponto de imissão sobre a água, em m.

Figura 19 - Processo de determinação dos parâmetros da influência do solo A_{gr} .

(Fonte: Schall, 03)



d. Blindagem por obstáculos

Um objeto no caminho de propagação entre a fonte e o ponto de imissão deve ser considerado como um obstáculo quando atende aos seguintes requisitos:

- Na projeção do feixe de som sobre o plano, ele passa através de uma ou mais arestas de difracção do obstáculo (ver Figura 10);
- A massa por unidade de área do obstáculo é pelo menos 10 kg / m^2 ;
- O obstáculo tem uma superfície acusticamente fechada;
- A dimensão horizontal do obstáculo (L_H) perpendicular à linha de ligação entre a fonte e o receptor é maior do que o comprimento de onda λ na frequência central da banda de oitava, de acordo com a seguinte equação:

$$(l_l + l_r) > \lambda \quad (4.19)$$

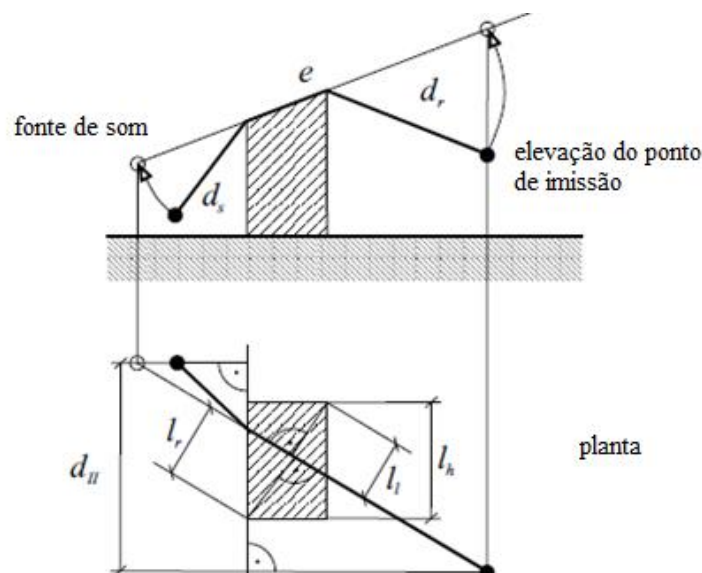
$$\lambda = \frac{340 \text{ m/s}}{f_m} \quad (4.20)$$

Onde: λ = Comprimento de onda de som na frequência central banda de oitava (f_m), em m;

l_l = distância vertical entre a linha que liga a fonte e o receptor e 1º Ponto final do obstáculo, em m;

l_r = distância vertical entre a linha que liga a fonte e o receptor e 2º ponto final do obstáculo, em m.

Figura 20 - Caminho do som através de uma barreira com duas arestas ativas paralelas. (Fonte: Schall 03)



A borda da tela, sobre a qual o som é difratado, deve ser considerada uma aresta superior se formar um ângulo inferior a 45 ° com a horizontal. Caso contrário, ela é chamada de borda lateral em torno do qual a flexão lateral ocorre. Uma aresta superior é modelada como uma série de segmentos de linha e uma aresta lateral com uma linha reta. Plataformas, telhados de plataforma, vagões fixos ou móveis, carros individuais, bondes, *containers* empilhados e demais obstáculos em movimento não são considerados obstáculos no caminho de propagação.

Para barreiras acústicas baixas $1,0 \text{ m} > H_{LSW} > 0,5 \text{ m}$, a uma distância $d_s < 2 \text{ m}$ ao centro mais próximo da pista, a altura H_{LSW} deve ser reduzida em 30% acima do nível do trilho para cálculos de propagação do som. Bordas de plataforma não devem ser consideradas obstáculos.

A atenuação do som através da flexão lateral em torno de um obstáculo é dada pela equação abaixo:

$$A_{flex} = D_z > 0 \text{ dB} \quad (\text{identidade 4.1})$$

Onde: D_z é a medida da reflexão de acordo com a equação 4.22, em dB.

Na difração acima de um obstáculo, a atenuação é dada de acordo com a seguinte equação:

$$A_{bar} = D_z - D_{refl} - A_{gr} \geq 0 \text{ dB} \quad (4.21)$$

$$D_{refl} = \left(3 - \frac{h_{abs}}{1 \text{ m}} \right) \text{ dB} \geq 0 \text{ dB} \quad (4.22)$$

Sendo: D_{refl} = Correção do nível de reflexão de barreiras acústicas a distâncias $d_s \leq 5 \text{ m}$ da base do soquete absorvente, com a altura h_{abs} = medida acima do nível do trilho, em dB;

A_{gr} = influência inferior pela equação 4.15, em dB.

Observação: D_{refl} leva em conta a reflexão múltipla entre a reflexão da parede acústica e a estrutura do corpo. Além disso, as reflexões da parede isolante de acordo com o item f devem ser consideradas. Para distâncias $> 5 \text{ m}$ entre a fonte de som e barreira sonora reflexiva, D_{refl} pode ser negligenciada.

A medida da blindagem (D_z) é dada pela seguinte equação:

$$D_z = 10 \lg \left(3 + \frac{C_2}{\lambda} C_3 z K_{met} \right) \text{dB} \quad (4.23)$$

Sendo: C2 = 40 fator de triagem para as linhas ferroviárias com os tipos de fonte de som dados na Tabela 9;

C2 = 20 fator de triagem para as superfícies das instalações ferroviárias com tipos de fonte de som de acordo com a Tabela 14;

C3 = 1 fator de triagem para difração única, ou segundo a equação 4.24 para múltiplas difrações.

$$C_3 = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2} \quad (4.24)$$

Fator de correção da influência meteorológica: $K_{met} = 1$ para $z < 0$, ou segundo a equação 4.25 para $z > 0$.

$$K_{met} = \exp \left(-\frac{1}{2000 \text{m}} \sqrt{\frac{d_s d_r d}{2z}} \right) \text{ para } z > 0 \quad (4.25)$$

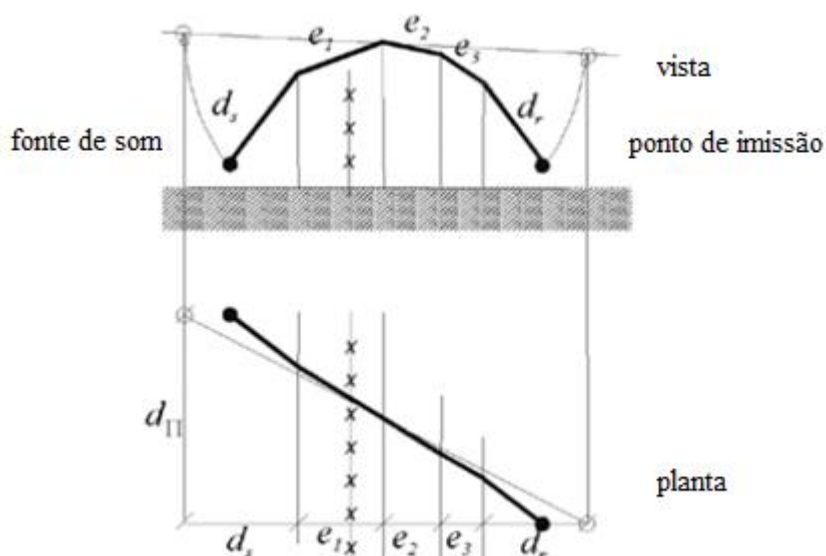
Para bordas de difração paralela se aplica:

$$z = \sqrt{(d_s + d_r + e)^2 + d_{\Pi}^2} - d \quad (4.26)$$

O valor da proteção é dado pela diferença entre as distâncias dos caminhos difratado e direto do som. Se existe uma linha de visão entre a fonte sonora e o ponto de imissão, z é fornecido com um sinal negativo.

Onde: d_s = distância da fonte pontual para a primeira margem de difracção, em m;
 d_r = distância da última borda de difração para a imissão, em m;
 e = comprimento do caminho entre a primeira e a última bordas da tela, em m;
 d_{Π} = distância entre a fonte e ponto de imissão, medidos paralelamente ao bordo de difração (ver Figura 11), em m;
 d = comprimento do caminho entre a origem e a imissão, em m.

Figura 21 - Exemplo de trajetória de som ao longo de duas grandes bordas de difração paralela (bordas insignificantes são marcados por um x). (Fonte: Schall 03)

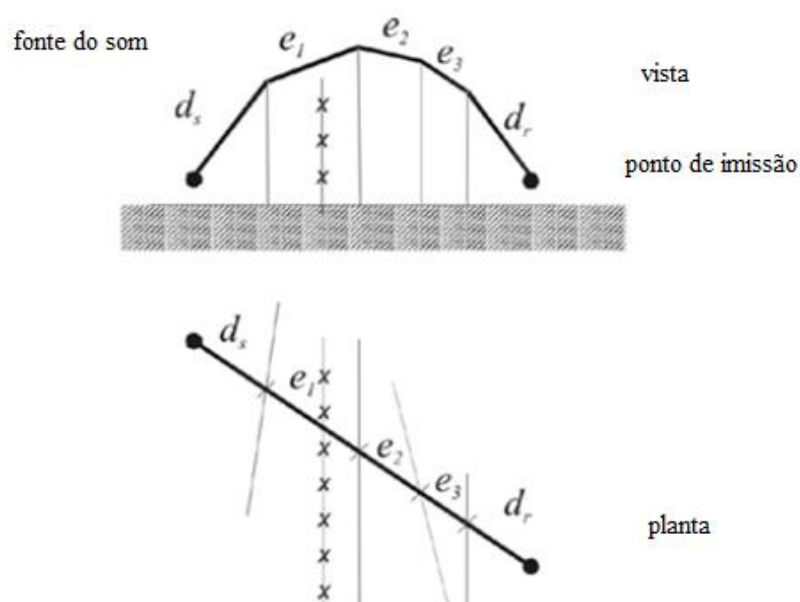


Para arestas de difração não paralelas, isto é, se, pelo menos, uma borda de difração não é paralela à outra sendo as bordas de difração elásticas, aplica -se:

$$z = \sqrt{(d_s + d_r + e)^2 - d^2} \quad (4.27)$$

Figura 22 - Exemplo de um caminho de som para obter mais do que duas arestas significativas não paralelas de difração (bordas insignificantes são marcados por x).

(Fonte: Schall 03)



A difração múltipla é considerada apenas se o caminho do som é difratado através de arestas múltiplas, como exemplificado na Figura 22. Ao estabelecer medidas de redução de som as características acústicas do isolamento acústico e absorção de som de acordo com o estado da técnica devem ser observadas. O valor da proteção sonora (D_z) em qualquer banda de oitava deve ser calculada pela difração simples (isto é, nas telas de som agudo) não sendo maior que 20 dB e com o dobro de difração (isto é, nas telas de som grave) não sendo superior a 25 dB.

e. Aumento do nível de ruído causado por reflexões

Em barreiras acústicas reflexivas ou parcialmente reflexivas (por exemplo, de vidro) deve-se considerar o reflexo ou as propriedades de absorção das barreiras no cálculo através da consideração de fonte espelhada ou receptor espelhado. Além disso, a reflexão do som entre o corpo das paredes de isolamento e do veículo atuam reduzindo o efeito de blindagem, de acordo com a equação 4.22 e deve ser levada em consideração.

Reflexões a partir de edifícios e barreiras acústicas são visíveis para todas as bandas de oitava, e devem ser calculadas quando cada um dos seguintes requisitos for cumprido:

- Existe uma reflexão geométrica/especular, como se mostra esquematicamente na Figura 23;
- A refletividade da superfície do obstáculo é maior do que $\rho = 0,2$;
- A menor dimensão do refletor, satisfaz a seguinte equação:

$$l_{\min} \cos \beta > \sqrt{\frac{2\lambda}{\frac{1}{d_{so}} + \frac{1}{d_{or}}}} \quad (4.28)$$

Onde: l_{\min} = menor dimensão do refletor, em m;

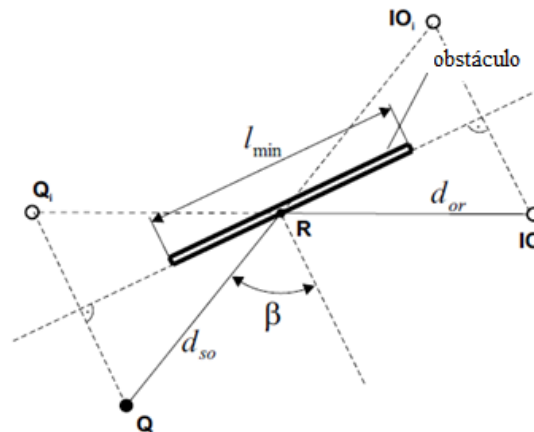
β = ângulo entre a linha que liga a fonte à imissão e a normal ao refletor;

λ = comprimento de onda de som na frequência central da banda de oitava (f_m), em m (equação 4.20);

d_{so} = caminho do som Q da fonte e R do reflector, em m;

d_{or} = caminho do som entre os pontos R do reflector para o IO da imissão, em m.

Figura 23 - Reflexão especular em um obstáculo. (Fonte: Schall 03)



O nível de potência sonora ponderado em A, da fonte de som especular é calculada pela equação seguinte:

$$L_{WA,im} = L_{WA} + D_{\rho} + D_{Ir} \quad (4.29)$$

Sendo: L_{wa} = nível de potência sonora ponderada em A, de acordo com as equações 4.10 e 4.11, em dB;

D_{ρ} = perda de absorção para reflexões sobre a superfície da parede de acordo com a Tabela 17, em dB;

D_{IR} = índice de diretividade da fonte pontual na direção do receptor especular de som (ver equação 4.11), em dB.

A dependência da perda por absorção e índice de diretividade da frequência permanece desconsiderada nesta situação.

Tabela 16- Perda por absorção em paredes. (Fonte: Tabela 18, Schall 03)

Coluna	A	B
Linha	Superfície de parede	Perda por absorção D_{ρ} [dB]
1	Paredes niveladas e duras	0
2	Construindo paredes com janelas e pequenos anexos	1
3	Paredes acústicas absorventes	4
4	Paredes acústicas altamente absorventes	8

4.2.4.5 Cálculo das imissões sonoras

A imissão de ruído que chega a um ponto de imissão é calculada como L_{pAeq} nível de pressão sonora contínua equivalente, durante o período de uma hora. Ele é formado pela soma das contribuições de energia de:

- Todas as fontes de som parciais em bandas de oitava com frequências centrais de 63 Hz a 8000 Hz;
- Todas as alturas h ;
- Todas as secções K_S ;
- Todas as subzonas k_F ;
- Todos os caminhos de propagação w .

Em trechos de ferrovias devem ser feitos somatórios dos níveis de pressão sonora de acordo com a equação:

$$L_{pAeq} = 10 \lg \left(\sum_{f,h,k_S,w} 10^{0,1(L_{WA,f,h,k_S} + D_{I,k_S,w} + D_{\Omega,k_S} - A_{f,h,k_S,w})} \right) \text{ dB} \quad (4.30)$$

- Sendo:
- f = contador para a banda de oitava;
 - h = gama de altura de contador;
 - k_S = contador de porções de ou uma de suas porções;
 - w = contador para diferentes caminhos de propagação;
 - L_{WA,f,h,k_S} = nível de potência sonora ponderada da fonte pontual no meio da porção K_S , o que indica a emissão a partir da faixa de altura h de acordo com a equação 4.9, em dB;
 - $D_{I,k_S,w}$ = índice de diretividade para o percurso de propagação W de acordo com a equação 4.11, em dB;
 - D_{Ω,k_S} = ângulo sólido de acordo com a equação 4.12, em dB;
 - $A_{f,h,k_S,w}$ = valor da absorção do caminho de propagação para a banda de oitava (f) na faixa de altura h da seção k_S ao longo do caminho W , de acordo com a equação 4.13, em dB.

Também se define o cálculo das emissões sonoras para estações de manobra e manipulação, do qual não trataremos por fugir do escopo do trabalho.

4.2.4.6 nível de classificação

- a. Nível de pressão sonora contínuo equivalente nos períodos de avaliação

Se os dados dos volumes de tráfego dos dois períodos de avaliação relevantes, dia (16 horas) e Noite (8 horas), são conhecidos, estes volumes de tráfego devem ser

convertidos em volumes médios de tráfego por hora para esses períodos. Os níveis de pressão acústica contínuos equivalentes são calculados a partir da equação (Eq. 29) e a equação (Eq. 30) e para vias ferroviárias serão indicados por $L_{p,Aeq,Dia}$ e $L_{p,Aeq,noite}$. Estando os volumes de tráfego definidos separadamente para cada hora durante os períodos de avaliação, deve-se definir os níveis de pressão sonora contínua equivalente para os períodos de avaliação do dia e da noite, de acordo com as equações:

$$L_{p,Aeq,Tag} = 10 \lg \left(\frac{1}{16} \sum_{T=1}^{16} 10^{0,1 L_{p,Aeq,T}} \right) \text{ dB}$$

$$L_{p,Aeq,Nacht} = 10 \lg \left(\frac{1}{8} \sum_{N=1}^8 10^{0,1 L_{p,Aeq,N}} \right) \text{ dB} \quad (4.31a \text{ e } 4.31b)$$

Sendo: T = contador por horas completas do período de avaliação do dia (6 horas a 22 horas);

N = contador de por horas completas do período noturno (22 horas às 6 horas da manhã).

b. Nível de classificação para trechos de ferrovia

Em ponto de imissão afetado pelo ruído de uma faixa de via férrea, com ou sem estações e paradas, o nível de classificação é calculado a partir das seguintes equações, para os períodos de avaliação do dia (6:00 às 22:00), e da noite (22:00 às 06:00):

$$L_{r,Tag} = L_{p,Aeq,Tag} + K_S$$

$$L_{r,Nacht} = L_{p,Aeq,Nacht} + K_S \quad (4.32 \text{ e } 4.33)$$

Onde: $L_{r,T}$ = nível de classificação para o período de avaliação do dia, em dB;

$L_{r,N}$ = nível de classificação noite para o período de avaliação da noite, em dB;

$L_{p,Aeq,Dia}$ e $L_{p,Aeq,noite}$ = nível de pressão sonora contínua equivalente da via, em dB;

K_S = -5 dB correção do nível de emissão para vias férreas.

A correção do nível de tons, pulsos ou sons que contenham informação está incluída no cálculo da emissão acústica e não é reconhecida separadamente na formação do nível de classificação.

Deve-se, então, comparar os resultados obtidos para L_r com os limites de emissão estabelecidos pela 16. BImSchV.

Também se define o cálculo do nível de classificação para estações de manobra e manipulação e para bondes, dos quais não trataremos por fugir do escopo do trabalho.

4.2.4.7 Consideração de diferentes tecnologias ferroviária e inovações tecnológicas em acústica

São definidos parâmetros de incorporação das diferentes inovações tecnológicas em uso no país, no que diz respeito aos trilhos, rodas dos trens, freios, entre outros, que visam a redução da emissão de ruídos. O uso destas tecnologias não será analisado neste trabalho.

5 APLICAÇÃO E RESULTADOS

Procedeu-se a uma medição em campo, como forma de exemplificar a aplicação dos métodos acima descritos, poder estabelecer uma análise comparativa mais realista e indicar soluções a se aplicar na situação em que se encontram as ferrovias brasileiras.

Foi escolhido um trecho da via férrea que corta a cidade de Conselheiro Lafaiete - MG, sendo este representativo da malha ferroviária brasileira, visto que se encontra próximo a casas e sem separação física para com elas, como mostra a vista aérea do local. O trecho se localiza na avenida Dr. Réis Dutra, próximo ao número 914, onde do lado esquerdo da via existem moradias e uma pequena área de convivência dos moradores, como pode-se perceber nas Figuras 24, 25 e 26.

Figura 24- Vista aérea do local de medição. (Fonte: Google Earth)



Figura 25 - Vista da Av. Dr. Réis Dutra. (Fonte: Google Maps)



Figura 26 - Vista do ponto de medição localizado à frente da área de convivência. (Fonte: Google Maps)



A medição foi realizada no dia 28 de julho de 2017, entre 11:00 e 12:40, por duas pessoas, que aplicavam simultaneamente as normas NBR10151/2000 e Ruído 03 (como observado na Figura 27), para coleta dos dados abaixo indicados, nas Tabelas 17 a 21 e Figuras 27 e 29. Neste intervalo de tempo passaram pelo via quatro composições, sendo que apenas as medidas das duas últimas foram válidas.

Figura 27 - Momento da medição do Trem 1. (Fonte: arquivo pessoal)



O aparelho utilizado na medição pelo procedimento da NBR 10151/2000 foi um Decibelímetro Digital Minipa modelo MSL-1325, mostrado na figura 28.

Figura 28 - Decibelímetro Digital Minipa MSL-1325. (Foto: arquivo pessoal)



O aparelho mede pressões sonoras ponderadas nas frequências A e C, na faixa entre 40 dB e 130 dB com frequências entre 125 Hz e 8 kHz. Ele pode ser operado nas funções de resposta rápida (*fast*) e lenta (*slow*), e pode ser programado para mostrar apenas os valores máximos do ruído captado.

Tabela 17 - Medição segundo a NBR10151 para o Trem 3.

TREM n°3		Nível de Pressão Sonora Equivalente - NBR 10151						
Locomotivas	2	leitura	1	2	3	4	5	6
Vagões	134	Li	71,8	80,5	77,5	78,7	77,6	74,8
		leitura	7	8	9	10	11	12
		Li	76,9	73,4	75	73,5	73,4	72,7
		leitura	13	14	15	16	17	18
		Li	71,1	71,2	74,3	70,4	69,4	71,1
		leitura	19	20	21	22	23	24
		Li	71,1	73,3	75,8	72,6	75,2	73,5
		leitura	25	26	27	28	29	30
		Li	76,4	74,4	75,3	73,9	78	75,2
		leitura	31	32	33	34	35	36
		Li	76,6	76,5	76,1	69,7	74,2	74,7

Tabela 18 - Medição segundo a NBR10151 para o Trem 4.

TREM n°4		Nível de Pressão Sonora Equivalente - NBR 10151				
Locomotivas	1	leitura	1	2	3	4
Vagões	25	Li	71,7	79,5	79,6	82,8
		leitura	5	6	7	8
		Li	80,6	78,5	83	75,7

Para a coleta de dados segundo a Ruído 03, foi definido um ponto de imissão, uma área de contribuição para o mesmo e suas respectivas fontes lineares, como mostra a figura 27. Então, foram coletados os dados, como mostram as tabelas 19 a 22.

Figura 29 - Ponto de imissão e fontes lineares.

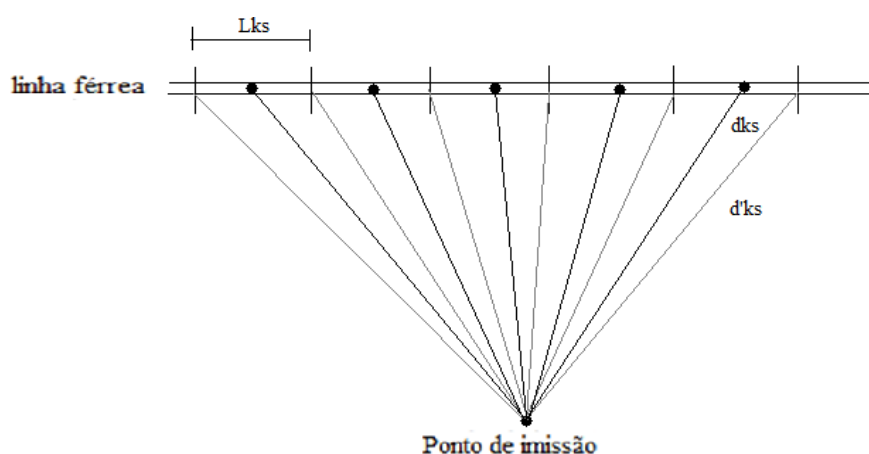


Tabela 19 - Fonte definida para os Trens 3 e 4.

Fonte - Trens 3 e 4								
Etapa	Atividade							
1 - trecho de emissão	tamanho do trecho de emissão uniforme		Imagem					
	25	[m]						
3 - fontes pontuais	definir Lks	d'ks medido	calc dks	medir dp	medir hr	medir hg	hr	
	5	17	15,65	15,69	1,12	0,91	0,21	
		14,6	13,84	13,84				
		13,5	13,63	13,63				
		14,2	15,19	15,19				
		16,5	17,94	17,94				
19,6								

Tabela 20 - Dados obtidos para o Trem 3.

Medição - Trem 3									
4 - valores para cálculo das emissões	tipo de veículo				Tipo de fonte de som				
	tipo	composição	n° de unidades	n° eixos/vagão (nachs)	rolamento	aerodinâm.	agregada	motor	
	carga	2 lok + 134	136	4 (2 trucks)	sim	não	não	não	
	vazio	vag. gôndola			há colina?	$i \geq 0,2\%$?	$L \geq 500m$?		
	Velocidade Vfz (km/h)		Superestrutura		Téc. redução do ruído	Pontes	Estruturas		
	19,87		tipo	estado	não há	não	não		
			dormente madeira e trilhos (perfil não identificado)			dormentes ruins e trilhos bons	Estação de carga		
					não				
	Identificação do ruído								
	curva na linha	curva em estação	frenagem	outros					
não	não	não	rolamento						

Tabela 21- Dados obtidos para o Trem 4.

Medição - Trem 4									
4 - valores para cálculo das emissões	tipo de veículo				Tipo de fonte de som				
	tipo	composição	n° de unidades	n° eixos/vagão	rolamento	aerodinâm.	agregada	motor	
	carga vazio	1 lok + 25 vag. Gôndola	26	4 (2 trucks)	sim	não	não	não	
					há colina?	$i \geq 0,2 \%$?	$L \geq 500m$?		
					não	não	não		
	Velocidade Vfz	Superestrutura			Téc. redução do ruído		Pontes	Estruturas	
	26,92	tipo		estado		não há		não	não
		dormente madeira e trilhos (perfil não identificado)		dormentes ruins e trilhos bons				Estação de carga	
	Identificação do ruído								
	curva na linha	curva em estação	frenagem	outros					
não	não	não	rolamento						

Tabela 22 - Dados de propagação para os Trens 3 e 4.

Propagação - Trens 3 e 4							
5 - Propagação do som	propagação geométrica			Imagem			
	d						
	calculado	[m]					
	Influência do solo e água						
	hm (m)	S (m²)	dw (m)				
	calculado	calculado	não há				
	Blindagem por obstáculo (deve atender os requisitos)						Resposta
	Na projeção do feixe de som sobre o plano, ele passa através de uma fenda mais estreita do obstáculo?						não
	A massa por unidade de área do obstáculo é pelo menos 10 kg / m²?						não
	O obstáculo tem uma superfície acusticamente fechada;						não
A dimensão horizontal do obstáculo (Lh) perpendicular à linha de ligação entre fonte e receptor é maior do que o comprimento de onda λ na frequência central da banda de oitava, na equação:						$(l_r + l_s) > \lambda$	não
Se sim	L1	Lr					
	m	m					
Aumento do ruído por reflexão (deve atender os requisitos)						Resposta	
Existe uma reflexão geométrica/especular é, como se mostra esquematicamente na Figura 13;						não	
A refletividade da superfície do obstáculo é maior do que $p = 0,2$;						não	
A menor dimensão do reflector, satisfaz a seguinte equação:						$l_{\min} \cos \beta > \sqrt{\frac{2\lambda}{\frac{1}{d_{so}} + \frac{1}{d_{or}}}}$	não
Se sim	tipo de superfície						
7 - NC	Frequência de passagem dos trens	Dia	≈ a cada 30 minutos	Noite	≈ a cada 30 minutos (até mais)		

A partir dos dados coletados, procedeu-se aos cálculos referentes a cada procedimento.

Para a NBR 10151, foram calculados os níveis de pressão sonora equivalente das emissões de ruídos oriundas dos trens 3 e 4, como mostram as tabelas 23 e 24 a seguir.

Tabela 23 - Nível de pressão sonora equivalente do ruído emitido pelo trem 3.

Nível de Pressão Sonora Equivalente - NBR 10151						
leitura	1	2	3	4	5	6
10 ^{^(Li/10)}	1,25892541	1,58489319	1,995262	2,511886	3,162278	3,981072
leitura	7	8	9	10	11	12
10 ^{^(Li/10)}	5,01187234	6,30957344	7,943282	10	12,58925	15,84893
leitura	13	14	15	16	17	18
10 ^{^(Li/10)}	19,9526231	25,1188643	31,62278	39,81072	50,11872	63,09573
leitura	19	20	21	22	23	24
10 ^{^(Li/10)}	79,4328235	100	125,8925	158,4893	199,5262	251,1886
leitura	25	26	27	28	29	30
10 ^{^(Li/10)}	316,227766	398,107171	501,1872	630,9573	794,3282	1000
leitura	31	32	33	34	35	36
10 ^{^(Li/10)}	1258,92541	1584,89319	1995,262	2511,886	3162,278	3981,072
∑10 ^{^(Li/10)}	1164422555					
LAeq	75,10		dB(A)			

Tabela 24 - Nível de pressão sonora equivalente do ruído emitido pelo trem 3.

Nível de Pressão Sonora Equivalente - NBR 10151				
leitura	1	2	3	4
10 ^{^(Li/10)}	1,3	1,6	1,99526231	2,511886432
leitura	5	6	7	8
10 ^{^(Li/10)}	3,16227766	4,0	5,01187234	6,3
∑10 ^{^(Li/10)}	807953028,4			
LAeq	80,04		dB(A)	

Para a Ruído 03, foram calculados os níveis equivalentes de pressão sonora contínua das imissões de ruídos oriundas dos trens 3 e 4, como mostram as tabelas 25 e 26 a seguir. O procedimento de cálculo foi seguido apenas até este ponto (não procedendo ao cálculo do nível de classificação final) pelo fato de ser de relevância para esta aplicação prática apenas o valor da imissão referente à passagem de cada comboio.

Tabela 25 - Nível equivalente de pressão sonora contínua da imissão de ruído do Trem 3.

Cálculo - Trem 3										
Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
L _{W',A,f,h}	42,36	52,36	68,03	81,21	80,09	69,91	60,30	42,91		
L _{W',A,f,h,ks}	49,35	59,35	75,02	88,20	87,08	76,90	67,29	49,90	Média	
L _{p,Aeq}	61,60		dB							

Tabela 26 - Nível equivalente de pressão sonora contínua da imissão de ruído do Trem 4.

Cálculo - Trem 4										
Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
$L_{W',A,f,h}$	34,51	44,51	60,22	73,92	73,82	64,75	56,41	39,02		
$L_{W',A,f,h,ks}$	41,50	51,50	67,21	80,90	80,81	71,74	63,40	46,01	Média	62,88702
$L_{p,Aeq}$	54,82	dB								

Visto que os cálculos são extremamente extensos (como descrito na metodologia), foram indicados apenas os resultados finais e mais relevantes.

6 ANÁLISE COMPARATIVA

Ao se observar os resultados obtidos para os níveis de pressão sonora calculados pelas normas brasileira e alemã, pode-se notar que eles se apresentam distintos, como realmente deveriam ser.

Os níveis de pressão sonora equivalente das emissões de ruídos encontrados pela NBR 10151/2000 indicam a magnitude da emissão do ruído gerado pela passagem de um comboio. Em contrapartida, foram calculados os níveis equivalentes de pressão sonora contínua das imissões de ruídos pela Ruído 03. Pode-se verificar, então, que cada norma tem um resultado final, sendo que o resultado da NBR 10151/2000 é um dos resultados parciais da Ruído 03, indicado pela nomenclatura $L_{W',A,f,h,ks}$.

Ainda assim, ao se comparar os valores de L_{Aeq} e $L_{W',A,f,h,ks}$, percebe-se que o último é diferenciado em relação à frequência da banda de oitava do espectro audível. Os valores de L_{Aeq} para os Trens 3 e 4 foram obtidos utilizando o medidor apenas para captar os valores máximos de pressão sonora do ambiente. Assim, verifica-se que o valor de L_{Aeq} está incluído no espectro de valores $L_{W',A,f,h,ks}$ calculados.

Deve-se, então, proceder à comparação dos níveis obtidos com os níveis de referência estabelecidos pela NBR 10151 e pela 16.BImSchG, como é feito a seguir, na tabela 27.

Tabela 27 - Comparação entre os métodos.

NBR 10151			
Tipo de ambiente	Trem	L_{Aeq} [dB(A)]	NCA [dB(A)]
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	3	75,10	50
	4	80,04	50
Ruído 03			
Tipo de ambiente	Trem	$L_{W',A,f,h,ks}$ [dB]	L_r [dB]
Em áreas residenciais e pequenos conjuntos habitacionais	3	61,6	59
	4	54,82	59

Pode-se perceber que para o Trem 3, tanto o valor da emissão quanto o da imissão estão acima do valor preconizado pelas normas, enquanto que para o Trem 4, o valor da emissão está acima do valor preconizado pela norma brasileira e o da imissão está abaixo do valor preconizado pela norma alemã. Este valor inferior não se mostra tão relevante pois se trata de um veículo pequeno que trafegou naquele dia específico, não sendo representativo dos comboios que por esta via trafegam.

Assim, vê-se que a população desta região da cidade de Lafaiete convive com níveis de emissão e imissão de ruídos acima dos limites brasileiros e alemães. Neste caso, seguindo a ordem de prioridade das formas de mitigação de ruídos ferroviários e analisando aquele que se mostra mais viável, pode-se indicar como medida mitigadora a construção de barreiras acústicas ao longo desta via, seguindo o procedimento da Ruído 03. Estas barreiras serviriam não somente para diminuir o nível de ruído que chega às casas, como também para separá-las fisicamente da via.

7 CONCLUSÃO

A partir da análise de publicações anteriores pode-se perceber a importância do controle de ruídos ambientais aos quais a população está sujeita em seu cotidiano. O ruído causado pelo transporte ferroviário é muito significativo quando existe tráfego de trens em centros urbanos, sendo a população que reside nas áreas adjacentes à via por ele afetada.

Pela necessidade e possibilidade da expansão das malhas ferroviárias brasileiras é necessário dedicar atenção ao controle de ruídos, pois sua emissão está sujeita a aumento, conseqüentemente a imissão também. As normas, leis e procedimentos vigentes no país são demasiado sucintas no que tange à medição do ruído ferroviário, e praticamente inexistentes no que diz respeito à mitigação do mesmo.

A situação na Alemanha se assemelha à nossa na possibilidade de expansão do transporte ferroviário e o governo propôs planos de ação para os anos futuros. O sistema de leis, normas e procedimentos do país estabelecem parâmetros de cálculo e análise da emissão e imissão de ruídos, prevê a utilização de medidas de redução, a utilização de novas tecnologias, a designação de responsabilidade pela situação de incômodo para a sociedade, entre outros.

Pelas análises individuais das situações e métodos dos dois países é perceptível o quanto um destoa em relação ao outro. Mesmo a Alemanha sendo equivalente a um estado brasileiro, a extensão total de suas vias (em km) é superior à do Brasil. Ao se analisar a distribuição modal de cada país, vemos que no quesito transporte de cargas as ferrovias brasileiras contribuem com uma porcentagem superior às alemãs do volume total de carga transportada. Já no transporte de passageiros, nosso país fica aquém do país germânico, apesar de a sua contribuição na distribuição modal também não ser tão alta internamente.

Ao se comparar os métodos de controle e mitigação de ruído de ambos, vemos o quanto o Brasil ainda tem a se desenvolver, não somente no que diz respeito à infraestrutura ferroviária, quanto também no que diz respeito ao cuidado com a população.

No sistema alemão, caso um tipo de medida não seja aplicável por questões espaciais, ambientais, topográficas ou financeiras, é seguida a ordem de prioridade até que seja encontrada uma medida que se aplique ao caso e que estabeleça a redução necessária no ruído que chega para a população. No caso do Brasil, além de

não haver uma norma em vigência que preveja e estabeleça a construção de barreiras acústicas, as outras opções de medidas (local e passiva) não constam em nenhuma das publicações oficiais analisadas.

Como o sistema brasileiro se mostrou ineficaz no controle de ruídos nocivos à população e por o sistema alemão ser um sistema muito abrangente e completo, se analisou a possibilidade de aplicação deste no Brasil e pode-se concluir que é possível para nós utilizarmos estes métodos. É possível que seja utilizada a metodologia de cálculo alemã, desde que se conheçam as características da via e dos veículo que por ela trafegam. Sendo a emissão calculada, e não medida, haveria a possibilidade de ser fiel às condições sobre as quais a sociedade reivindica, visto que atualmente no Brasil são as próprias empresas concessionárias que realizam a medição de acordo com a norma brasileira e a incluem em seu relatório de licenciamento ambiental.

Para se comparar os limites de emissão preconizados pelo Brasil, pode-se utilizar em pesquisas futuras a NBR 10152/1987, que discorre sobre a medição de ruídos em ambientes internos.

No que diz respeito a métodos de proteção de ruídos a situação se mostra relativamente destoante. Visto que as medidas de mitigação locais e passivas se mostram mais complexas, visto que dependem da possibilidade de investimento das empresas e do governo em soluções para trens, trilhos, edificações afetadas, entre outros, a utilização de barreiras acústicas se destaca. O DNIT supõe que se as faixas de domínio estiverem invadidas não é possível nem viável se construir barreiras.

Entretanto, ao se lançar mão da análise específica para cada caso, distância disponível, área, situação do entorno, etc., e se combinar estes às tecnologias de vanguarda (barreiras e diques) e inovadoras (barreiras baixas e de gabião) pode-se verificar a possibilidade de aplicação de alguma que atenda às especificações. Com relação a materiais, dispomos de todos aqueles que são utilizados no exterior: alumínio, madeira, concreto, vidro, rochas e materiais a serem reciclados. A metodologia de utilização deveria seguir o cálculo das emissões proposto na Ruído 03 para garantir que a barreira funcione da maneira correta entre a fonte e o ponto de emissão para que seja alcançada a minoração desejada para o ruído.

Quando se analisa as diferenças básicas na estrutura e no tráfego entre os dois países podemos citar um aspecto interessante encontrado em nosso país. A baixa velocidade de passagem das composições em centros urbanos brasileiros é uma diferença favorável a nós, visto que o ruído é diretamente proporcional à

velocidade. Uma observação a se fazer é que, quando se utiliza barreiras existe a possibilidade de tráfego mais veloz dos trens, desde que esse aumento não gere níveis de ruído que ultrapassem a capacidade de isolamento da barreira, o que deve ser previsto.

Por fim, através da observação de uma situação real de tráfego, pode-se ter contato com o cotidiano do transporte ferroviário e da vida em seu entorno. Através da aplicação de ambas as metodologias foi possível perceber o quanto cada uma é eficaz, em quais âmbitos podem ser aplicadas e qual a gama de possibilidades de trabalho que cada uma gera.

Em síntese, o objetivo deste trabalho foi alcançado, visto que se analisou a metodologia de ambos os países, elas foram aplicadas e constatou-se que pode ser utilizada a metodologia alemã para um controle mais eficiente da emissão e imissão do ruído ferroviário. E constatou-se, também, que este mesmo procedimento pode vir a pautar o projeto de barreiras acústicas a serem utilizadas ao longo das áreas habitadas no entorno de vias férreas brasileiras.

ANEXO

As tabelas referentes ao Anexo 1 da Schall 03, são usadas para definição dos valores de cálculo para cada categoria de trem (locomotivas, trens de passageiro, trens de carga, entre outros). No caso deste trabalho, consideraremos apenas trens de carga.

Tabela 20 - Categoria 10: Trens de carga. (Fonte: Anexo 1, Schall 03)

Coluna	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Linha		Fonte	f_m (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	a_A (dB)
1	Ruído de rodagem											
2	Conjunto de rodas com freio de ferro fundido											
3	Rugosidade do trilho	1	Δa_f (dB)	- 50	-40	-24	-8	-3	-6	-11	-30	67
4	Rugosidade da roda	2	Δa_f (dB)	- 40	-30	-22	-9	-3	-5	-15	-26	71
5	Conjunto de rodas com freio composto											
6	Rugosidade do trilho	1	Δa_f (dB)	- 50	-40	-24	-8	-3	-6	-11	-30	67
7	Rugosidade da roda	2	Δa_f (dB)	- 50	-40	-25	-9	-4	-4	-11	-23	58
8	Conjunto de rodas com freio de disco ondulado											
9	Rugosidade do trilho	1	Δa_f (dB)	- 50	-40	-24	-8	-3	-6	-11	-30	67
10	Rugosidade da roda	2	Δa_f (dB)	- 50	-40	-25	-9	-4	-4	-11	-23	56
11	Conjunto de rodas com freio a disco											
12	Rugosidade do trilho	1	Δa_f (dB)	- 50	-40	-24	-8	-3	-6	-11	-30	67
13	Rugosidade da roda	2	Δa_f (dB)	- 50	-40	-25	-9	-4	-4	-11	-23	61
14	Altura da fonte = 4m											
15	Composição de vagão-tanque com freio de ferro fundido											
16	Rugosidade	3	Δa_f	-	-20	-19	-6	-5	-5	-17	-26	57

	do trilho		(dB)	29								
17	Rugosidade da roda	4	Δa_f (dB)	-28	-19	-18	-5	-4	-7	-17	-26	61
18	Composição de vagão-tanque com freio composto											
19	Rugosidade do trilho	3	Δa_f (dB)	-29	-20	-19	-6	-5	-5	-17	-26	57
20	Rugosidade da roda	4	Δa_f (dB)	-28	-19	-18	-5	-4	-7	-17	-26	48
21	Composição de vagão-tanque com freio de disco ondulado											
22	Rugosidade do trilho	3	Δa_f (dB)	-29	-20	-19	-6	-5	-5	-17	-26	57
23	Rugosidade da roda	4	Δa_f (dB)	-28	-19	-18	-5	-4	-7	-17	-26	46
24												
25	Ruídos aerodinâmicos											
26	Altura da fonte = 0 m	7	Δa_f (dB)	-15	-8	-6	-6	-8	-14	-21	-32	40

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10151: Acústica – Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 1987.

Associação Nacional dos Transportes Ferroviários. **Mapa ferroviário brasileiro - Agosto de 2014**. Disponível em: <<http://www.antf.org.br/index.php/informacoes-do-setor/mapa-ferroviario-brasileiro>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Brasil. CONAMA 001/90, de 8 de março de 1990. Dispõe sobre a emissão de ruído, em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 de abril de 1990.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03). 2015.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Förderrichtlinie Lärmsanierung Schiene. 2013.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. **Lärmschutz am Schienenverkehr (nicht barrierefrei)**. 2015.

Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz in Zusammenarbeit mit der juris GmbH. Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16.BImSchV). 12 jun.1990.

Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz in Zusammenarbeit mit der juris GmbH. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). 15 mar. 1974.

Calixto, Alfredo [2]. Apostila Vibração, Som e Luz - Conceitos Fundamentais. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <www.ergonomia.ufpr.br/RuidosVibellumCalixto.doc> Acesso em: 12 nov. 2016.

Calixto, Alfredo. O ruído gerado pelo tráfego de veículos em “rodovias-grandes avenidas” situadas dentro do perímetro urbano de Curitiba, analisado sob parâmetros acústicos objetivos e seu impacto ambiental. 2002. 135 páginas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, 2002.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Boletim Estatístico 07/2016**. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) - Diretoria de Infraestrutura Ferroviária. **Produto 8: Parâmetros Indicadores de Intervenções em Áreas Urbanas**. Última atualização em 07 abr. 2016. Disponível em: <www.dnit.gov.br/download/consultaspublicas/ferroviario/Parametros%2520Indicadores%2520de%2520Intervencoes%2520em%2520Areas%2520Urbanas.pdf +&cd=1&hl=e&ct=clnk&gl=br&client=firefox-b-ab> Acesso em: 12 nov. 2016.

Eisenbahn-Bundesamt. Lärmaktionsplan für die Haupteisenbahnstrecken des Bundes außerhalb von Ballungsräumen (Teil A). 26 nov. 2015.

Eisenbahn-Bundesamt. Lärmaktionsplan für die Haupteisenbahnstrecken des Bundes außerhalb von Ballungsräumen (Teil B). 31 mar. 2016.

Eisenbahn-Bundesamt. Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Schienenwegen (VBUSch). 10. maio 2006.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 1ª edição, Florianópolis: Editora NR, 1992.

Intraplan Consult GmbH. **Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr Winter 2014/15**. Disponível em: <<http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2015/015-dobrindt-mittelfristprognose.html>> Acesso em: 14 nov. 2016.

Kohler, R., Specht, L. P. e Bronzati, G. D. Ruído causado pelo transporte ferroviário em um segmento urbano: estudo do caso da cidade de Ijuí - RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.19, p.13-23, Maio, 2012.

Mendonça, Felipe Teixeira de. Estudo de barreira acústica para trens de alta velocidade no trajeto Rio de Janeiro - Campinas (região de Itatiaia). 2014.63 páginas. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

World Health Organization (WHO). Health Topics: Noise. Disponível em: <<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/noise>> Acesso em: 12 nov. 2016.

Brink, Mark. Parameters of well-being and subjective health and their with residential traffic noise exposure - A representative evaluation in Switzerland. **Environmental International**. Maio, 2011.