

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil**



UNICAMP

**Estudo de barreiras acústicas ao ar livre,
sob a perspectiva de eficiência e qualidade sonora**

Maria de Fatima Ferreira Neto

Campinas, SP

2002

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL**

IDADE 2e
CHAMADA TI/UNICAMP
N384e
EX
DMBO BCI 50787
ROC 16-837102
DX
REÇO R\$ 11,00
DATA 11/09/02
Nº CPD _____

CM00173052-3

31B ID 256534

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

N384e Neto, Maria de Fátima Ferreira
 Estudo de barreiras acústicas ao ar livre, sob a
 perspectiva de eficiência e qualidade sonora / Maria de
 Fátima Ferreira Neto.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

 Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

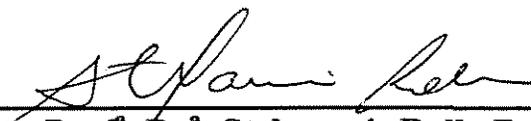
 1. Controle de ruído. 2. Acústica. 3. Som. 4.
 Construção - Desempenho I. Bertoli, Stelamaris Rolla.
 II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Civil. III. Título.

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil**

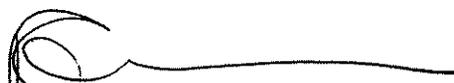
**ESTUDO DE BARREIRAS ACÚSTICAS AO AR LIVRE,
SOB A PERSPECTIVA DE EFICIÊNCIA E QUALIDADE SONORA**

Maria de Fatima Ferreira Neto

**Dissertação de Mestrado aprovada pela banca examinadora
constituída por:**



**Prof.^a. Dr.^a. Stelamaris Rolla Bertoli
Presidente e Orientadora - UNICAMP**



**Prof.^a. Dr.^a. Rosana Caram de Assis
USP – São Carlos**



**Prof. Dr. Sylvio Bistafa
EPUSP – São Paulo**

Campinas, 24 de Maio de 2002

20242823

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil

**Estudo de barreiras acústicas ao ar livre,
sob a perspectiva de eficiência e qualidade sonora**

Maria de Fátima Ferreira Neto

Orientadora: Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Edificações

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.

Stelamaris Rolla Bertoli

Prof. Dr. *Stelamaris Rolla Bertoli*

Matrícula: *21588-L*

Campinas, SP

2002

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Prof. Dr. ...
Matrícula: ...
Alfabeto que para a versão definitiva
da disciplina...

*“Se a realidade fosse só aquilo que aparenta ser,
a ciência seria desnecessária.”*

Albert Einstein

Aos meus pais, Ramiro e Maria.

Agradecimentos

- A Deus por permitir a realização deste trabalho, e pela proteção dos sarilhos.
- Aos meus pais, pela paciência do tamanho de um trem, pelo incentivo imensurável e pelas preciosas dicas.
- À minha orientadora Prof. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli, pela amizade, companheirismo e por me ensinar os passos importantes na área da Acústica.
- Ao amigo Obadias Pereira da Silva Júnior, sem o qual muito deste trabalho teria me dado muito mais trabalho.
- À amiga Janaina Antonino Pinto, pela grande ajuda com as medições, principalmente.
- Ao amigo Christian dos Santos, pela grande ajuda com softwares.
- Ao amigo Vitor Carlos Tadeia Rosão, de Lisboa, por me mandar artigos preciosos.
- Aos amigos da UNICAMP, especialmente aos “meninos da Stela”: Adriana, Sérgio, Geraldo e aos que já mencionei.
- Ao Leonardo Sioufi pelo incentivo e torcida.
- A todos os amigos do IFUSP.
- À FAPESP pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

	Lista de Tabelas	i
	Lista de Figuras	ii
	Resumo	vii
	Abstract	viii
1.	Introdução	1
2.	Objetivos	4
2.1	Objetivo geral.....	4
2.2	Objetivos específicos.....	4
3.	Revisão bibliográfica	5
3.1	Fatores externos que influenciam a eficiência da barreira.....	5
3.1.1	Vento e temperatura.....	5
3.1.2	Tipo de solo.....	7
3.1.3	Absorção do ar.....	8
3.2	Aspectos físicos das barreiras acústicas.....	8
3.3	Equação de Maekawa.....	14
3.4	Desempenho das barreiras acústicas.....	16
3.5	Normalização.....	17
3.6	Qualidade sonora.....	18
3.7	Parâmetros Psicoacústicos.....	20
3.7.1	Loudness.....	20
3.7.2	Sharpness.....	23
3.7.3	Fluctuation Strenght.....	25
3.7.4	Roughness.....	27
3.8	Desconforto Psicoacústico.....	29
4.	Metodologia	30
4.1	Desempenho da barreira.....	30
4.1.1	Escolha do terreno.....	30
4.1.2	Caracterização física das barreiras.....	30
4.1.3	Avaliação objetiva.....	32

4.1.4	Simulação do desempenho.....	34
4.1.5	Avaliação subjetiva.....	34
4.1.6	Avaliação dos parâmetros psicoacústicos e da qualidade sonora.....	35
4.2	Forma e análise dos resultados.....	36
5.	Resultados e Análises.....	37
5.1	Simulação do desempenho da barreira – Equação de Maekawa.....	38
5.2	Construção das barreiras.....	39
5.3	Medidas do nível de pressão sonora.....	41
5.3.1	Nível de pressão sonora - sem as barreiras.....	41
5.3.1 a)	Ruído de fundo.....	41
5.3.1 b)	Ruído branco (sinal sonoro)	43
5.3.2	Nível de pressão sonora - com as barreiras.....	45
5.3.2 a)	Ruído de Fundo.....	46
5.3.2 b)	Ruído branco (sinal sonoro).....	48
5.4	Avaliação objetiva do desempenho das barreiras.....	50
5.4.1	Cálculo do desempenho das barreiras.....	50
5.4.2	Parâmetros psicoacústicos obtidos pelo PSY da 01 dB.....	53
5.4.3	Parâmetros psicoacústicos obtidos pelo Sound Quality.....	58
5.4.4	Desconforto Psicoacústico.....	59
5.5	Avaliação Subjetiva do desempenho das barreiras acústicas.....	60
5.5.1	Caracterização do som: nível sonoro.....	60
5.5.2	Caracterização do som: grave ou agudo.....	62
5.5.3	Caracterização do som: nítido ou abafado.....	65
5.6	Espectros em Bark.....	68
5.7	Quadro – Resumo.....	78
6.	Conclusão.....	80
7.	Referências Bibliográficas.....	83
	Anexo A – Desenvolvimento Matemático da Equação de Maekawa.....	87
	Anexo B – Relação entre Sones e Phons.....	92
	Anexo C – Relação entre Escala Bark e frequência em Hz.....	94
	Anexo D – Fotos de Algumas Barreiras Acústicas.....	96
	Anexo E – Valores Numéricos Relativos aos Gráficos.....	99

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Especificações físicas dos materiais que compõem as barreiras

Tabela 2 – Perda por transmissão, em dB

Tabela 3 – Escala para Avaliação Subjetiva das Barreiras

Lista de Figuras

Figura 1 - Influência do vento na produção de sombra acústica. [FONTE: adaptado de HASSAL e ZAVERI, 1979]

Figura 2 - Sombra acústica em função da variação de temperatura. [FONTE: adaptado de HASSAL e ZAVERI, 1979].

Figura 3 - Onda sonora e as parcelas de propagação.

Figura 4 - Sombra acústica em barreira. [FONTE: GERGES, 2000].

Figura 5 - Esquema das trajetórias direta (em vermelho) e difratada (em verde) da onda sonora, na presença da barreira acústica.

Figura 6 - Atenuação, em dB, em função do Número de Fresnel, N. [FONTE: adaptado de GERGES, 2000].

Figura 7 - Curvas isofônicas. [FONTE: adaptado de SMITH, 1982]

Figura 8 - Dependência do loudness (N) com o nível de pressão sonora (L), para um tom puro de 1kHz. [FONTE: Adaptado de FASTL, 1998].

Figura 9 - Dependência do sharpness S sobre as frequências centrais – eixo horizontal inferior – ou bandas críticas de Bark – eixo horizontal superior. [FONTE: adaptado de FASTL, 1998].

Figura 10 - Dependência do fluctuation strenght sobre: (a) a modulação de frequência, f_{mod} e (b) nível de pressão sonora, L. [FONTE: FASTL, 1997].

Figura 11 - Dependência do roughness sobre: (a) a modulação de frequência, f_{mod} e (b) nível de pressão sonora, L. [FONTE: FASTL, 1997].

Figura 12 - Esquema da montagem experimental. Posicionamento do indivíduo, barreiras acústicas e fontes sonoras. [FONTE: adaptado de AYLOR, 1976]

Figura 13 - Esquema da montagem dos equipamentos para a realização das primeiras medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído branco.

Figura 14 - Espectro sonoro do ruído branco, em dB, por terço de oitava.

Figura 15 - Gráfico da atenuação para as barreiras, obtida pela simulação com a equação de Maekawa.

Figura 16 - (a) Terreno original; (b) Terreno limpo e pronto para a construção das barreiras.

Figura 17 - Equipamentos posicionados, no terreno, para as medições.

Figura 18 - Nível de pressão sonora, em dB, em função da frequência, do ruído de fundo, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

Figura 19 - Nível de pressão sonora, em dB(A), em função da frequência, do ruído de fundo, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

Figura 20 - Espectro sonoro em dB, do ruído de branco, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

Figura 21 - Nível de pressão sonora, em dB(A), em função da frequência, do ruído de branco, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

Figura 22 - Barreiras acústicas construídas na: (a) primeira etapa: barreiras de concreto, acrílico e ripas de madeira e na (b) segunda etapa: barreiras de concreto, acrílico e madeira em placa.

Figura 23 - Espectro sonoro, em dB, referente ao ruído de fundo, das quatro direções.

Figura 24 - Espectro sonoro, em dB(A), referente ao ruído de fundo, das quatro direções.

Figura 25 - Espectro sonoro, com valores do nível de pressão sonora em dB, referente ao ruído branco, das quatro direções.

Figura 26 - Espectro sonoro, com valores do nível de pressão sonora em dB(A), referente ao ruído branco, das quatro direções e com os quatro diferentes tipos de barreiras.

Figura 27 - Resultado do cálculo do desempenho das barreiras acústicas estudadas, em dB/dB(A).

Figura 28 - Curvas de atenuação obtidas por meio da equação de Maekawa e equação da perda por inserção.

Figura 29: Gráfico dos resultados do loudness, para as diferentes barreiras e a direção Sul, sem barreira.

Figura 30: Gráfico dos resultados do loudness, para as diferentes barreiras.

Figura 31: Gráfico do resultado do sharpness, para as diferentes barreiras e a direção sul, sem barreira.

Figura 32 - Gráfico do resultado do fluctuation strength, para as diferentes barreiras e a direção Sul, sem barreira.

Figura 33 - Gráfico do resultado do roughness, para as diferentes barreiras e a direção sul, sem barreira.

Figura 34 - Curvas do loudness e sharpness obtidas por meio do software Sound Quality.

Figura 35 - Curvas do roughness e fluctuation strength obtidas por meio do software Sound Quality.

Figura 36 - Desconforto psicoacústico em função do nível de pressão sonora.

Figura 37 - Gráfico da sensação auditiva de um sinal sonoro, em relação ao nível de pressão sonora.

Figura 38 - Sensação de som agudo, do júri, com olhos abertos e fechados.

Figura 39 - Sensação de som grave, do júri, com olhos abertos e fechados.

Figura 40 - Diferença entre as sensações de som grave e agudo, com os olhos abertos e fechados, para as barreiras de concreto e acrílico.

Figura 41 - Diferença entre as sensações de som grave e agudo, com os olhos abertos e fechados, para a barreira de madeira.

Figura 42 - Sensação de som abafado, do júri, com olhos abertos e fechados.

Figura 43 - Sensação de som nítido, do júri, com: (a) olhos abertos e (b) olhos fechados.

Figura 44 - Diferença entre as sensações de som abafado e nítido, com os olhos abertos e fechados, para as barreiras de acrílico e concreto.

Figura 45 - Diferença entre as sensações de som abafado e nítido, com os olhos abertos e fechados, para a barreira de madeira.

Figura 46 - Espectro em bark, colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 60 dB.

Figura 47 - Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 60 dB.

Figura 48 - Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 70 dB.

Figura 49 - Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 70 dB.

Figura 50 - Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 80 dB.

Figura 51 - Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 80 dB.

Figura 52 - Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 90 dB.

Figura 53 - Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 90 dB.

Figura 54 - Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 100 dB.

Figura 55 - Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 100 dB.

Resumo

O estudo de barreiras acústicas ao ar livre é o objeto de estudo deste trabalho. Esse estudo abrange duas perspectivas: o desempenho acústico das barreiras e a qualidade sonora. Sobre as duas perspectivas, foram realizadas avaliações que compreendem aspectos objetivos e subjetivos. Entende-se como aspectos objetivos os resultados das medidas físicas, como a perda por inserção das barreiras, para a avaliação do desempenho acústico e, os resultados dos parâmetros psicoacústicos definidos por Zwicker, para a avaliação da qualidade sonora. Em relação aos aspectos subjetivos, foi constituído um júri, que opinou sobre a sensação percebida de um estímulo sonoro, recebido através da barreira. Os resultados das avaliações de ambos os aspectos, foram comparados a fim de se obter a avaliação final do desempenho das barreiras. A obstrução visual da fonte sonora, por uma barreira acústica, pode causar redução de ruído, nem sempre verdadeira. Os resultados mostram que o desempenho real das barreiras nem sempre corresponde ao desempenho subjetivo porém, reforçam a idéia de que as barreiras acústicas atuam como um auxiliar para a redução de ruído ao ar livre. Há fortes indícios de que os parâmetros psicoacústicos poderão ser usados como método de desempenho de barreiras (qualidade sonora).

Palavras chave: barreiras acústicas; atenuação por barreiras; perda por inserção; qualidade sonora; parâmetros psicoacústicos.

Abstract

The outdoor acoustic barriers study is the object of this work. This study includes two perspectives: the acoustic barrier performance and the sound quality. These two perspectives were evaluated considering objective and subjective aspects. The physical results, such as the barrier insertion loss, was used to evaluate the objective acoustic performance. The results from the psychoacoustic parameters defined by Zwicker were used to objectively evaluate the sound quality. Regarding the subjective aspects, a jury was formed to judge the perceived sensation from sonorous stimulus received through the barrier. The experimental results of both aspects were compared to get the final evaluation of the acoustic barriers performance. The sound source visual obstruction caused by an acoustic barrier, can cause noise reduction which is not always true. The results show that the barrier real performance does not always correspond to the subjective performance, but also reinforce the idea that the acoustic barriers is an auxiliar element to reduce outdoor noise. There are strong evidences that the psychoacoustic parameters can be used as a means of barrier performance evaluation (sound quality).

Key words: acoustic barrier; attenuation; insertion loss; sound quality; psychoacoustics parameters.

1. Introdução

As barreiras acústicas vêm se mostrando como um elemento importante na redução da poluição sonora em ambientes externos. Um dos fatores que contribuem para a redução da qualidade de vida é justamente a poluição sonora. A proposta deste trabalho é estudar as barreiras acústicas, com o intuito de colaborar com a redução do ruído, aumentando o conforto seja em casa, no trabalho ou no lazer.

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas relativas à redução do ruído por barreiras. Entre os primeiros pesquisadores sobre o assunto está Maekawa (1968), cuja pesquisa foi baseada na teoria da difração de Fresnel-Kirchhoff e que apresentou o gráfico da atenuação em função do número de Fresnel, obtido empiricamente. Há autores que elogiam o método, como sendo bastante simplificado (LAM, 1994), há autores que o criticam por não levar em consideração a interferência que ocorre entre a onda incidente e as ondas refletidas pelo solo (NICOLAS *et al.*, 1983) e há ainda outros que o julgam de difícil aplicação na prática (RATHE, 1969). Kurze e Anderson (1971) apresentaram a extensão do modelo de fonte pontual, utilizada por Maekawa, para fonte linear. Depois desses pesquisadores, outros surgiram apresentando diversas teorias para o estudo da atenuação do ruído, pelas barreiras. Entre eles, pode-se citar Embleton *et al.* (1980), que apresentou um método utilizando a teoria de integral de linha, e Duhamel e Sergent (1998), que utilizaram o Método de Elementos Finitos.

Sobre eficiência da barreira na redução do ruído, a literatura apresenta estudos que se estendem para além da geometria da barreira e distâncias da fonte à barreira, receptor à barreira e fonte ao receptor. Harris (1966), por exemplo, menciona a influência das condições atmosféricas na eficiência da barreira. Segundo Harris, a absorção do som no ar é uma função da umidade relativa, da temperatura e da frequência. Como a absorção do som no ar é maior quanto maior for a frequência, Zucherwar e Meredith (1985), direcionaram sua pesquisa para a absorção das baixas frequências das ondas sonoras, pelo ar. A influência do piso que está nas proximidades da barreira, também foi muito pesquisado. Isei *et al.* (1980), fez um estudo sobre a redução de ruído por barreiras sobre solo com impedância finita, apresentando resultados de cálculos de cinco

teorias. Beranek e Vér (1992) também apresentam uma teoria aprofundada sobre a influência do solo na eficiência da barreira.

Na literatura há poucos estudos sobre a influência do material na eficiência das barreiras. Dos trabalhos encontrados, a maior parte refere-se ao estudo de barreiras de vegetação. Apenas, Aylor (1976) apresentou resultados da comparação de audibilidade percebida pelo receptor, causada por diferentes tipos de barreiras entre a fonte e o receptor. Em outro trabalho, Aylor (1972) direcionou seu estudo para a influência do solo na eficiência da barreira e também sobre a atenuação causada pela vegetação que compõe a barreira. Autores como Gerges (2000) e Magrab (1975), não discutem propriamente sobre o material a ser utilizado na composição da barreira mas, mencionam as densidades mínimas para uma eficiência relativa da barreira.

A psicoacústica é um objeto de estudo de pesquisas recentes. Entre os anos de 1952 e 1967, um grupo de pesquisadores sobre fenômenos de audição do Instituto de Telecomunicações de Stuttgart fez importantes correlações entre o estímulo acústico e a sensação auditiva. Foi o começo da psicoacústica. Desde 1967, grupos de pesquisa do Instituto de Eletroacústica de Munique, na Alemanha, têm continuado a fazer grandes progressos nessa área. Vieram da Alemanha os trabalhos de Zwicker e Fastl (1999), que definiram, os parâmetros psicoacústicos que caracterizam os aspectos subjetivos da percepção do som, isto é, da qualidade sonora.

Kurze (1974) em seu trabalho mencionou que haviam fortes evidências de que o impedimento visual da fonte sonora, causa efeitos psicológicos. No ano de 1976, Aylor apresentou em seu trabalho um estudo da percepção do ruído através das barreiras, mas sem utilizar as técnicas de avaliação da qualidade sonora. Isto mostra, que deve haver continuidade dos trabalhos na área da psicoacústica pois, há ainda um vasto campo a ser explorado.

A complexidade das avaliações na acústica surge no fato de que os fenômenos físicos e a sua ação sobre o sistema sensorial humano, não estão diretamente relacionados (SILVA,1978). Uma fonte pode emitir um sinal sonoro que é agradável para uma pessoa e desagradável para outra pessoa. Essa opinião subjetiva sobre o sinal sonoro é parte do processo de *qualidade sonora*.

Mas, fica uma questão: o que quer dizer, objetivamente, “agradável” e “desagradável”? Para responder a essa questão, utilizam-se os parâmetros definidos pela *psicoacústica*. A psicoacústica, por meio de determinados parâmetros, avalia objetivamente, a sensação subjetiva a respeito de um sinal sonoro, isto é, avalia os fatores físicos que provocam tais sensações.

A psicoacústica tem sido muito utilizada na área das artes, especificamente, na música. Os parâmetros psicoacústicos auxiliam, por exemplo, na avaliação do tom (*pitch*) e do timbre (*sharpness*). Também tem auxiliado nas pesquisas e construção de aparelhos auditivos, para reduzir ou eliminar “ruídos” ou “sons interferentes”, causados pela amplificação de sons que são importantes para os usuários desses aparelhos. (BUGALHO, 2001).

A indústria automobilística vem utilizando o conceito da qualidade sonora e psicoacústica, sobretudo nos últimos 10 anos, contribuindo para a realização de novos projetos de produtos à disposição no mercado, para a quantificação de opiniões subjetivas a respeito dos produtos e para a modelagem acústica dos produtos (MARROQUIN, 1999).

Neste trabalho, pretende-se verificar a eficiência de barreiras acústicas ao ar livre, por duas formas. A primeira delas através de avaliações objetivas obtidas por medidas de atenuação em campo e avaliações de parâmetros psicoacústicos definidos por Zwicker. A segunda, através de avaliações subjetivas, sobre a percepção do ruído. A avaliação objetiva consistirá de medidas de sinais sonoros antes e depois da construção das barreiras, na posição do receptor, cuja diferença entre esses sinais, permite calcular a atenuação da barreira. Os parâmetros psicoacústicos serão avaliados por meio de softwares específicos. Paralelamente, para a avaliação subjetiva, um júri composto por um grupo de voluntários avaliará, de acordo com sua percepção, o sinal sonoro recebido depois de atravessar a barreira. Também serão utilizadas técnicas de qualidade sonora, para inferir os aspectos subjetivos de percepção do som através de barreiras. A comparação entre essas duas avaliações mencionadas (objetiva e subjetiva), permitirá estabelecer uma correlação entre a eficiência das barreiras acústicas e o efeito psicológico de percepção do som sobre um grupo de pessoas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho, é a avaliação da eficiência de barreiras acústicas, através de métodos objetivos e subjetivos e o estudo de viabilidade de caracterização do desempenho da barreira por qualidade sonora.

2.2 Objetivos Específicos

Por objetivos específicos tem-se:

Avaliar a eficiência de barreiras, verificando o quanto a barreira acústica reduz o ruído ambiental incidente, por redução da parcelas transmitida, refletida, absorvida ou difratada da energia sonora incidente, para uma dada dimensão e geometria de barreiras de diferentes materiais.

Avaliar subjetivamente, o efeito da percepção e redução do ruído, provocado pela obstrução visual total ou parcial da fonte sonora pela barreira acústica, situada entre a fonte sonora e o indivíduo.

Estudar, sob o ponto de vista da qualidade sonora, a possibilidade de aplicação dessa metodologia, através de parâmetros psicoacústicos, para analisar a eficiência da barreira sob o ponto de vista subjetivo.

3. Revisão Bibliográfica

A poluição sonora é um dos problemas ambientais que vem afetando a qualidade de vida das pessoas. A busca pelo conforto acústico vem crescendo cada vez mais, nos últimos anos. As barreiras acústicas entram como um auxiliar para o alcance do tão desejado conforto acústico. Podem ser utilizadas em ambientes internos ou externos, para a atenuação de ruídos de diversas origens, como exemplo, tráfego rodoviário, máquinas industriais, máquinas de construção, etc. A barreira, situada entre a fonte e um receptor, torna-se uma resistência à propagação das ondas sonoras e, portanto, ao ruído. Há fortes evidências de que o impedimento visual da fonte sonora pela barreira, causa consideráveis efeitos psicológicos, resultando em uma sensação, nem sempre verdadeira, de redução de ruído (KURZE, 1974).

3.1 Fatores externos que Influenciam a eficiência da barreira

São diversos os fatores externos que influenciam o desempenho da barreira. Entre eles estão o efeito do vento, temperatura, tipo de solo que está sob a barreira, absorção do ar. Para minimizar esses efeitos, a fonte sonora deve estar suficientemente próxima da barreira (SCHOLES, 1971).

3.1.1 Vento e Temperatura

Os efeitos provocados pelo vento e pelo gradiente de temperatura, sobre a propagação sonora são muito similares e geralmente são dependentes entre si. O vento provoca uma distorção da frente de onda, devido à velocidade e direção. O atrito entre o ar em movimento e o solo resulta em uma diminuição da velocidade próximo ao nível do solo. Isto causa uma distorção na frente de onda, o que pode ser verificado pela figura 1, onde a velocidade do vento no nível do solo é inferior à velocidade do vento em uma determinada altura h , do solo, devido ao atrito. As ondas sonoras que estão na mesma direção do vento, são refratadas em direção ao solo, sem afetar o sinal sonoro recebido. Já as ondas sonoras que estão em sentido contrário ao do vento, são refratadas para longe do solo provocando o surgimento de sombra acústica e, conseqüentemente, redução no sinal sonoro recebido. Essa redução pode chegar a 25 dB (SCHOLES, 1971). A figura 1 representa a formação de sombra acústica provocada pelo vento.

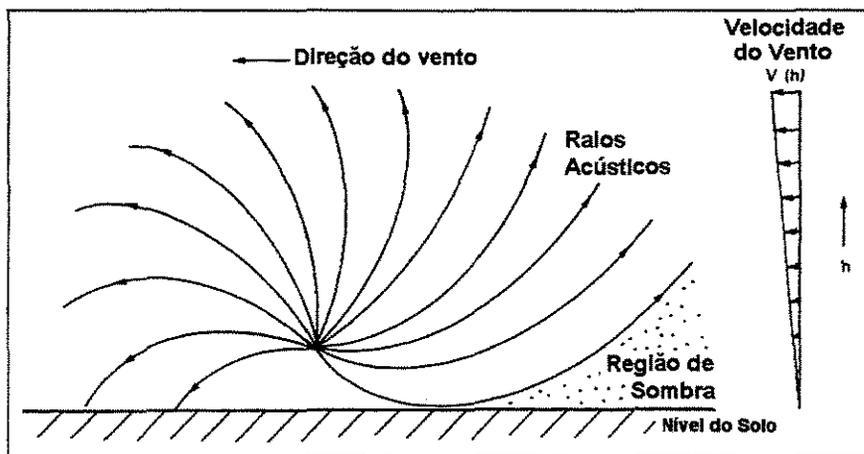


Figura 1: Influência do vento na produção de sombra acústica. [FONTE: adaptado de HASSAL e ZAVERI, 1979]

A temperatura tem influência sobre a velocidade do som no ar o que conseqüentemente, influencia no surgimento de sombras acústicas, isso porque, o gradiente de temperatura causa deformação na frente de onda, por causar alteração na velocidade do ar. Como mostra a figura 2(a), se o solo estiver com temperatura superior em relação ao restante do ambiente, o ar que está nas proximidades do solo será aquecido mais rapidamente do que o ar que está em uma determinada altura h do solo. Esse aquecimento, provocará um aumento na velocidade e, portanto, refração dos raios acústicos com desvios para cima do solo e, por conseqüência, surgem as zonas de sombra, simétricas em relação à fonte.

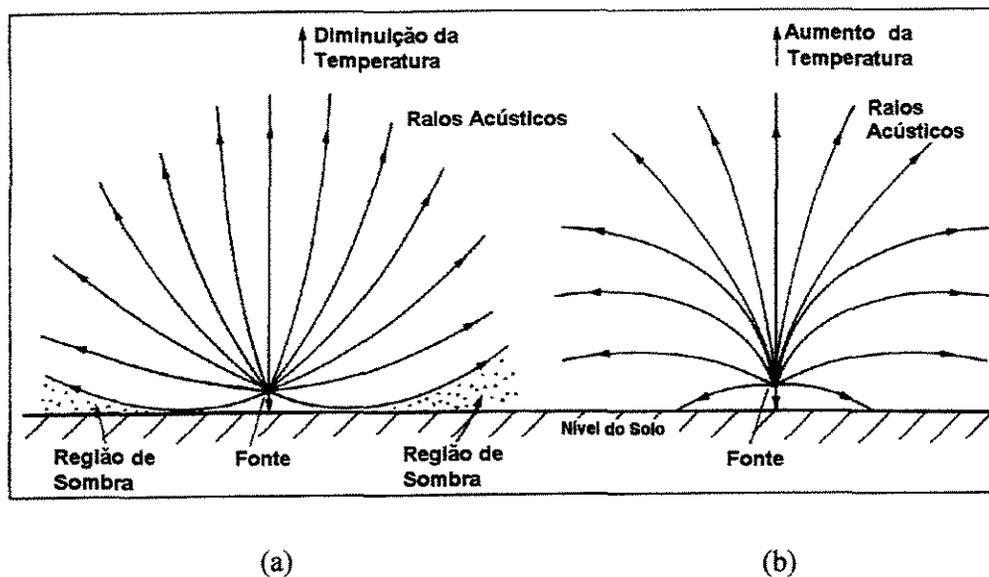


Figura 2 (a) e (b): Sombra acústica em função da variação de temperatura. [FONTE: adaptado de HASSAL e ZAVERI, 1979].

Se o solo estiver em uma temperatura inferior ao restante do ambiente, a temperatura do ar, nas proximidades do solo, estará inferior à temperatura do ar em uma altura h . Isto causa um aumento na velocidade do ar nessa altura h e, portanto, refração dos raios acústicos com desvios em direção ao solo, porém, sem provocar o surgimento das zonas de sombra acústica. A figura 2(b) apresenta a deformação dos raios acústicos, sem provocar o surgimento de regiões de sombra acústica.

3.1.2 Tipo de Solo

O tipo de solo onde estão implementadas as barreiras, também provoca alteração no sinal sonoro que chega ao receptor. Superfícies rígidas como concreto, aparentemente não têm propriedades de absorção, comparativamente a um solo coberto com grama, por exemplo, que absorve mais do que um solo coberto com cimento.

Há pesquisadores que afirmam que o efeito do solo sobre o desempenho da barreira é maior do que outros fatores, como por exemplo, as propriedades absorvedoras da barreira. (ISEI, 1980).

3.1.3 Absorção do Ar

A absorção do som pelo ar é causada, geralmente, pela dissipação de energia no processo de relaxamento vibracional das moléculas de oxigênio e nitrogênio, e varia proporcionalmente com a frequência e a temperatura, e inversamente com a umidade relativa. A absorção do som no ar, também pode ser causada pela combinação dos efeitos de viscosidade e condução de calor. Essa é a chamada absorção clássica do ar (GERGES, 2000) que, à temperatura de 20 °C, é dada por:

$$\alpha = 1,2^{-10} f^2 \quad (\text{dB/m}) \quad (1)$$

onde, α = coeficiente de absorção e f é a frequência da onda sonora.

Em altas frequências a absorção ocorre de maneira mais significativa, porém, seu valor é pequeno quando comparado com os outros mecanismos de atenuação.

3.2 Aspectos físicos das barreiras acústicas

O controle de ruído por barreiras tem se tornado uma medida comum de proteção ambiental. Na Europa, por exemplo, há inúmeros exemplos de barreiras acústicas colocadas ao longo de rodovias. No Brasil, temos o exemplo da barreira colocada no km 14 da Rodovia dos Bandeirantes, na entrada de São Paulo. Colocada entre a fonte sonora e os receptores, a barreira acústica impede a livre propagação do som, levando a um decaimento sonoro bem mais intenso do que ocorreria em condições naturais; isto porque as ondas sonoras se propagam em linha reta, sofrendo um decaimento proporcional ao inverso do quadrado da distância. A onda sonora, ao atingir a barreira, tem parte de sua energia refletida, parte transmitida, parte absorvida e parte difratada (RESNICK e HALLIDAY, 1983). A reflexão, a transmissão e a absorção dependem do material que compõe a barreira. A difração depende da geometria da barreira e ocorre nas bordas. A figura 3 representa a onda sonora originária da fonte e suas parcelas de propagação, isto é, a onda original, incidindo sobre a barreira, a parcela refletida pela barreira, a parcela transmitida e a parcela difratada, devido à borda superior da barreira. Em ambientes abertos, a energia da onda sonora incidente é reduzida pela barreira por absorção e reflexão do material que a constitui e por espalhamento e refração na atmosfera.

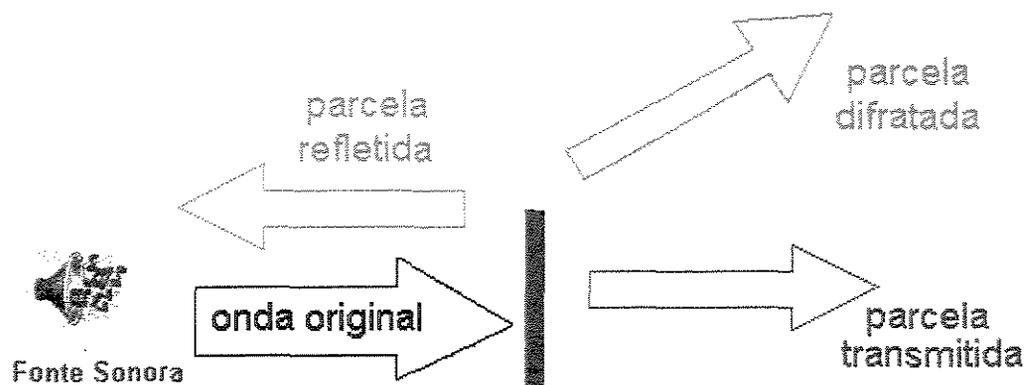


Figura 3: Onda sonora e as parcelas de propagação.

A difração ocorre porque na interação entre a onda sonora e a borda da barreira, há alteração na velocidade da onda sonora e conseqüente espalhamento da onda. A teoria da difração foi desenvolvida, primeiramente, na óptica e, mais tarde, aplicada a todos os fenômenos ondulatórios, incluindo a acústica. A difração é um dos problemas mais difíceis em óptica e sua solução rigorosa, é complexa. Para a maioria dos casos práticos de controle de ruído, o problema da difração deve ser tratado por um método simplificado de aproximação (MAEKAWA, 1987). Dentre o grande número de métodos sugeridos para o cálculo da atenuação da barreira, encontrados na literatura, a curva empírica desenvolvida por Maekawa, continua sendo o método mais simples (LAM, 1994). Segundo Maekawa (1968), a atenuação do ruído devido a difração depende das dimensões da barreira e dos agentes emissores e receptores do ruído. A altura e a posição da barreira também são importantes para o estudo da difração. Esse método, desenvolvido por Maekawa (1987), será apresentado mais adiante, neste trabalho.

Em se tratando de barreiras, a zona de sombra acústica é maior, quanto maior for a altura da barreira e a freqüência da onda, como se pode observar na figura 4. O grau de difração dependerá da natureza da onda e da freqüência. As ondas de baixa freqüência (maior comprimento de onda) se espalham em um ângulo maior do que as de alta freqüência (menor comprimento de onda). (BERG e STÖRK, 1995).

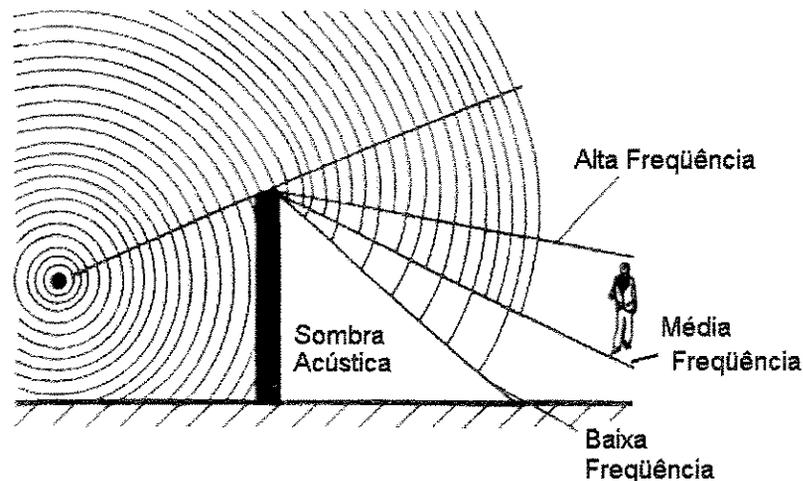


Figura 4: Sombra acústica em barreira. [FONTE: GERGES, 2000].

As barreiras podem ser de diferentes tipos: concreto, vegetação, madeira, materiais transparentes, materiais metálicos, etc. As formas das barreiras também podem ser bastante diversificadas, seja para realçar a parte estética ou para melhorar o seu desempenho. Porém, devem ser eficientes para proteger o receptor da porção predominante da energia sonora radiada da fonte. Ao mesmo tempo, deve ter aparência agradável, estabilidade estrutural e baixo custo. Neste trabalho serão feitos estudos sobre as barreiras de concreto, acrílico, ripas de madeira e madeira em placa.

O concreto em barreira é utilizado quando não há a necessidade de barreira constituída de material absorvente ou transparente. Por ser material denso, espera-se um bom desempenho.

A madeira é um material muito utilizado em ambientes internos por ser um material também absorvente. A proposta deste trabalho é estudar o comportamento desse material como barreira acústica, em ambiente externo.

O acrílico também é um material utilizado em ambientes internos, como por exemplo, em estúdios de gravação. Em ambientes externos, a utilização de materiais transparentes em barreiras, visualmente menos agressivos, pode ocorrer quando se tratar de uma área residencial e/ou comercial, ou próximo de uma área com um fluxo de pedestre intenso. Por ser transparente

e, portanto, permitir ao receptor visualizar a fonte sonora, propomos o estudo de seu desempenho como barreira e a influência da sua transparência sobre sensação auditiva do júri.

Há ainda, barreiras constituídas por plantações de árvores ou outro tipo de vegetação, que podem fornecer alguma atenuação devido à absorção e dispersão, a não ser que haja uma grande quantidade de árvores com poucas e/ou pequenas folhas e com troncos de espessuras finas. Uma pequena muda, por exemplo, não tem muito a oferecer como atenuadora. No entanto, plantações de árvores são ainda absorvedoras e contribuem para o ambiente, não só no aspecto visual, mas também, psicologicamente. As folhas produzem efeito de mascaramento do ruído, devido ao vento. No entanto há os que consideram as árvores e arbustos como importantes elementos para o controle de ruído (MAEKAWA, 1994). As barreiras de vegetação, como árvores, têm sido freqüentemente mencionadas como meio natural de redução de ruído externo porém, há autores, como Aylor (1972) que discutem a eficiência e praticidade das barreiras de vegetação, envolvendo quantidade e qualidade da redução do ruído.

Se o material utilizado na composição das barreiras fosse aplicado em paredes, poder-se-ia verificar o isolamento da parede, pelo cálculo da perda por transmissão por meio da lei das massas. Segundo essa lei, quanto maior for a densidade superficial da barreira, maior será a atenuação da energia sonora incidente. A perda de transmissão sonora (PT) de uma parede, na faixa em que a massa é responsável pela atenuação, é dada pela equação (2).

$$(PT) = -47 + 20 \log(\sigma f) \text{ dB} \quad (2)$$

onde, σ é a densidade superficial da barreira, em kg/m^2 e f é a freqüência, em Hz.

A perda por transmissão sonora (PT), independe do nível de pressão sonora da onda incidente. Como se observa na equação (2), a perda de transmissão sonora depende da freqüência da onda sonora e da densidade superficial do material. A densidade superficial (σ) do material está relacionada com a densidade volumétrica (ρ) e com a espessura do material (ϵ), pela equação:

$$\sigma = \rho e \quad (3)$$

A tabela 1 apresenta os valores da espessura, da densidade superficial e densidade volumétrica para os materiais que compõem as três barreiras utilizadas neste trabalho.

Tabela 1
Especificações físicas dos materiais que compõem as barreiras

	Concreto	Madeira	Acrílico
Espessura - ϵ (m)	0,19	0,01	0,006
Densidade superficial - σ (kg/m ²)	209 ⁽¹⁾	5,63 ⁽²⁾	7,99 ⁽³⁾
Densidade volumétrica - ρ (kg/m ³)	1100	562,67	1331,92

O cálculo da perda por transmissão é utilizado para se ter conhecimento de quanto o material de uma parede pode reduzir a parcela transmitida, da onda sonora incidente. Considerando que o material que compõe as barreiras formem uma parede, deseja-se saber o quanto reduzem o ruído incidente. É de se esperar pela equação (2), que quanto mais denso é o material que constitui a parede, maior será a perda por transmissão. A tabela 2 apresenta o cálculo da perda de transmissão, em dB, para os três materiais que compõem as barreiras, para as frequências de banda de 1/1 oitava.

⁽¹⁾ O valor da densidade superficial do bloco oco de concreto obtido, é 1,1 Kg/m², por espessura (HARRIS, 1979).

⁽²⁾, ⁽³⁾ Os valores da densidade superficial e volumétrica foram obtidos a partir dos valores da massa e espessura de cada placa, dados pelos fabricantes.

Tabela 2
Perda por Transmissão, em dB

Frequência (Hz)	Concreto	Madeira	Acrílico
63	35,5	4,1	7,1
125	41,3	9,9	13,0
250	47,4	16,0	19,0
500	53,4	22,0	25,0
1000	59,4	28,0	31,1
2000	65,4	34,0	37,1
4000	71,4	40,0	43,1
8000	77,5	46,1	49,1

Pode-se verificar pela tabela 2, que se os materiais que compõem as barreiras formassem paredes, a perda por transmissão sonora seria maior para a parede de concreto, seguida pelas paredes de acrílico e madeira. As avaliações em campo permitirão verificar se a barreira de concreto produzirá melhor desempenho acústico do que as barreiras de madeira e acrílico.

Aberturas em paredes ou barreiras mudam bastante seu desempenho e, portanto, não se pode aplicar a lei das massas. Uma barreira sem aberturas, com densidade mínima de 10 kg/m^2 , entre a fonte e o receptor, pode causar uma apreciável redução no ruído, porque o som alcançará o receptor somente por difração (MAGRAB, 1975). Segundo Gerges (2000), a perda por transmissão de barreiras deve ser, aproximadamente, 6 dB superior à atenuação causada pela difração. Por essa razão, as barreiras não precisam ser, obrigatoriamente, compostas por materiais muito densos e sim, compostas por material com densidade superficial entre 10 e 20 kg/m^2 . Por este ponto de vista, não é de se esperar uma boa atenuação por parte das barreiras de madeira e acrílico.

Na prática, o grau de eficiência de uma barreira vai derivar da composição dos efeitos mencionados: transmissão sonora, difração e reflexão. O adequado dimensionamento de uma barreira considera estes efeitos separadamente. Porém, o objetivo final será sempre a busca pelo

conforto acústico que se quer alcançar, seja em um ambiente fechado (edificação) ou em ambiente aberto, como ruas, parques, etc.

A literatura pouco discute a influência do material na eficiência da barreira acústica. É o que se quer verificar com este trabalho, já que intuitivamente, a eficiência de uma barreira de um determinado material deve ser diferente da eficiência de uma barreira constituída por outro material.

3.3 Equação de Maekawa

Para a avaliação da atenuação provocada por uma barreira acústica, o método mais utilizado é o de Maekawa. Para desenvolver os cálculos da atenuação por difração, Maekawa utilizou as ferramentas da teoria da difração de Fresnel-Kirchhoff e, empiricamente, obteve um gráfico, da atenuação em função do número de Fresnel. A equação de Maekawa que calcula a atenuação de uma barreira semi infinita, (a demonstração matemática está apresentada no anexo A), considerando uma fonte pontual, é dada por:

$$At = 5 + 10 \log \left[\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right] \text{ dB}, \quad \text{para } N \geq -0,3 \quad (4)$$

Na equação (5), para o cálculo do número de Fresnel, N , estão embutidos os valores do comprimento da onda incidente (λ) e a diferença de trajetória da onda direta (em vermelho na figura 5), entre fonte e receptor, e a onda difratada pela barreira (em verde na figura 5).

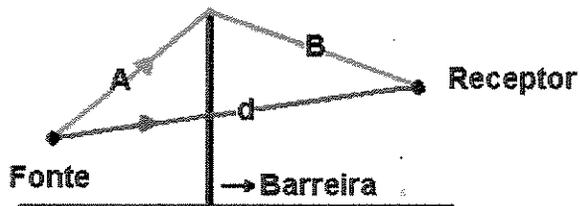


Figura 5: Esquema das trajetórias direta (em vermelho) e difratada (em verde) da onda sonora, na presença da barreira acústica.

O número de Fresnel é dado por:

$$N = \frac{2(A + B - d)}{\lambda} = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (5)$$

onde, A é a distância da fonte à borda superior da barreira;

B é a distância do receptor à borda superior da barreira;

d é a distância entre a fonte e o receptor.

Com a equação de Maekawa é possível fazer uma previsão do comportamento da barreira, de acordo com as distâncias mencionadas acima. O resultado dessa simulação está apresentado neste trabalho.

Há variações dessa equação feitas por Kurze e Anderson (1971), que estenderam o modelo de fonte puntiforme para fonte linear. A figura 6 apresenta os resultados da atenuação em função do número de Fresnel, obtidos por Maekawa (fonte puntiforme) e Kurze e Anderson (fonte linear).

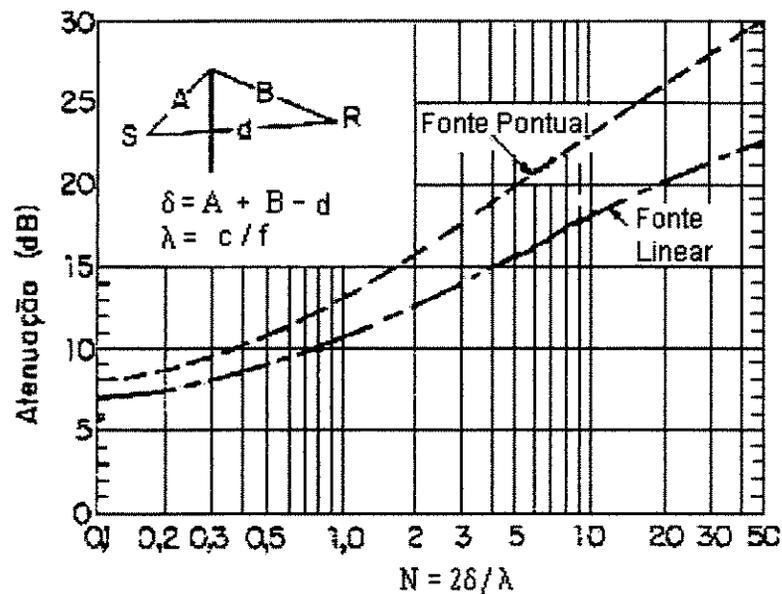


Figura 6: Atenuação, em dB, em função do Número de Fresnel, N. [FONTE: adaptado de GERGES, 2000].

Entende-se por fonte pontual a fonte que emite a radiação sonora de maneira uniforme, para todas as direções, ocupando a área de uma esfera ou semi esfera e, as dimensões da fonte sonora são muito menores do que a meia distância entre a fonte e o receptor (BERANEK e VÉR, 1992). Como exemplo de fonte pontual, pode-se citar um alarme sonoro fixo em um ponto em uma edificação. Como fonte linear entende-se a fonte que emite a radiação sonora de maneira uniforme em todas as direções ao redor de uma extensão l , ocupando o espaço de um cilindro. Como exemplo, pode-se citar o fluxo de veículos em uma estrada ou um duto longo de fluido turbulento ruidoso (GERGES, 2000).

Verifica-se através da figura 6 que, conforme aumenta o número de Fresnel, seja por diminuição do comprimento de onda, da onda sonora incidente, ou por aumento no δ , aumenta também, a atenuação da barreira e, essa atenuação é maior caso a fonte sonora seja pontual. O δ mencionado, pode ser ampliado se, por exemplo, for diminuída a altura da fonte e/ou do receptor.

3.4 Desempenho das barreiras acústicas

O desempenho da barreira é obtido por meio da medida ou cálculo da perda por inserção. A perda por inserção da barreira em um dado ponto, é definido como a diferença do nível de pressão sonora, medido nesse ponto, antes e depois da construção da barreira, isto é,

$$D_{IL} = L_p(\text{antes}) - L_p(\text{depois}) \quad (6)$$

O desempenho da barreira será considerado eficiente se a perda por inserção for positiva e será considerado ineficiente, se a perda por inserção for negativa, isto é, se o valor do nível de pressão sonora medido no ponto do receptor, for superior ao nível de pressão sonora emitida pela fonte, sem a presença da barreira.

A perda por inserção pode ser aplicada para ondas sonoras com uma única frequência ou para bandas de frequência. A frequência da onda sonora incidente é o parâmetro mais importante para a obtenção da perda por inserção da barreira, isso porque, as altas frequências são mais atenuadas (DAIGLE,1999).

Neste trabalho, o termo *atenuação* é sinônimo do termo *perda por inserção*. Ambos descrevem a capacidade de redução do sinal sonoro original, pela barreira, considerando não somente a transmissão mas também, a reflexão, absorção e difração.

3.5 Normalização

Segundo a norma ISO 10847 (1997), há dois métodos para a determinação da perda por inserção de barreiras: método direto, que se refere às medidas de nível de pressão sonora “antes” e “depois” da construção das barreiras e, o método indireto, que é aplicado em locais onde não há a possibilidade de realizar as medidas do nível de pressão sonora antes da construção das barreiras e não se pode remover as barreiras para realizar as medidas. Nesse caso, deve-se utilizar as medidas de um local semelhante para poder fazer a comparação do “antes” com o “depois”.

Para a aplicação do método direto, deve-se definir a posição do receptor, que é o ponto onde será determinada a perda por inserção e uma posição de referência, que é o ponto em que o som, proveniente da fonte, é ou será minimamente influenciada pela colocação da barreira. A norma define a perda por inserção como:

$$D_{IL}=(L_{ref,A} - L_{ref,B}) - (L_{r,A} - L_{r,B}) \quad (7)$$

Sendo, $L_{ref,A}$ - nível de pressão sonora na posição de referência, na condição “antes”

$L_{ref,B}$ - nível de pressão sonora na posição de referência, na condição “depois”

$L_{r,A}$ - nível de pressão sonora na posição do receptor, na condição “antes”

$L_{r,B}$ - nível de pressão sonora na posição do receptor, na condição “depois”

No Japão é muito comum a utilização de métodos indiretos para a obtenção da perda por inserção de uma barreira acústica. O Teste Nord nº. 496-84, apresenta o índice Redução da Barreira Acústica (B.N.R.). De acordo com esse índice, a condição “antes” deve ser estimada pela medida do nível de pressão sonora obtida por um microfone, posicionado em alturas variáveis acima da barreira (DAIGLE, 1999).

Nos Estados Unidos a norma ANSI S12.8-1998, apresenta três métodos para a determinação da perda por inserção de barreiras acústicas em ambientes externos: além dos métodos direto e indireto, semelhantes à norma ISO 10847: 1997, menciona, como outro método indireto, uma previsão para a condição “antes”. Ambos os métodos indiretos necessitam das medidas da condição “depois”.

No Brasil há a NBR 14313 (1999), que é uma norma específica que menciona características para a construção de barreiras, ao longo de vias de tráfego. Não foi encontrada nenhuma norma brasileira para o cálculo ou medida da perda por inserção das barreiras acústicas, em ambientes externos.

3.6 Qualidade Sonora

Qualidade sonora é um novo conceito de como analisar e caracterizar o som. Por exemplo, quando se compra um carro, dentre os parâmetros importantes para a aquisição, como preço, projeto e conforto, há também o ruído que o carro produz. Ao ouvir o ruído do motor, não se pensa que ele pode estar emitindo 89 dB(A)! E sim, que tem (ou não) grande potência! Qualidade sonora é a opinião subjetiva do homem sobre determinado ruído ou som que esteja ouvindo. Segundo Marroquin (1999), a diferença entre ruído e som é que o ruído é uma excelente ferramenta da engenharia para quantificar o nível sonoro gerado pelos produtos; e o som, é uma excelente ferramenta de marketing para ajudar a quantificar a percepção do ruído, pelo homem.

A sensação auditiva é uma grande aliada para a solução de problemas de ruído, porém, é uma sensação subjetiva. Para se fazer a avaliação de um ruído, é necessário se ter uma análise objetiva, isto é, a “medição” do ruído. Como se pode medir um fenômeno subjetivo? Uma sensação não pode ser medida, porém, os fatores físicos que determinam as sensações, podem. Deve haver, entretanto, uma relação estatística significativa entre a medição objetiva de fatores físicos e as estimativas subjetivas da intensidade da sensação correspondente.

Os métodos conhecidos para a avaliação subjetiva do ruído são o método de Stevens, o método de Zwicker e o método de Kryter (SILVA, 1978). O método elaborado por Stevens, resultou de

ensaios em campo difuso, com a presença de júri. Stevens elaborou um conjunto de três diagramas, que representam a variação do nível de pressão sonora de estímulos com igual intensidade audível, para as bandas de 1/1 oitava, 1/2 oitava e 1/3 oitava. Por meio dos diagramas, faz-se o cálculo da intensidade audível com a seguinte expressão:

$$S = S_m + F \left[\sum_i (S_i - S_m) \right] \quad (8)$$

em que S representa a intensidade audível do estímulo sonoro, S_m o valor máximo entre as diversas bandas de frequência da análise e S_i o valor da intensidade audível correspondente à banda de frequência central f_i .

Stevens leva em consideração o efeito de mascaramento entre as diversas bandas de frequência, por meio do parâmetro F, sendo que para a banda de 1/1 oitava F assume o valor de 0,3, para a banda de 1/2 oitava F assume o valor de 0,18 e para a banda de 1/3 oitava, F tem o valor de 0,13.

O método de Kryter é especificamente destinado à avaliação da intensidade do ruído produzido por aviões. Pode-se considerar como variante do método de Stevens, porque o procedimento é o mesmo, diferindo apenas, na utilização de um novo diagrama (SILVA, 1978).

O método utilizado neste trabalho é o método de Zwicker, que é baseado na análise de bandas de 1/3 de oitava e pode ser aplicado para todos os tipos de ruído, incluindo a fala e música. Zwicker apresenta alguns parâmetros de psicoacústica (que é uma ramificação da psicofísica) para se poder fazer a avaliação do ruído.

Os trabalhos de Zwicker demonstraram a existência de “bandas críticas de frequência” nas quais a intensidade audível é proporcional ao valor eficaz da pressão sonora (ZWICKER, 1999). O processo elaborado por Zwicker para a determinação da intensidade audível de um estímulo sonoro complexo, parte da decomposição do estímulo segundo as bandas críticas. Essas bandas são característica básica da psicoacústica. Isso porque, assume-se que o sistema auditivo analisa o

som por um banco de filtros. Até a frequência de 500 Hz, a banda crítica apresenta uma constante na sua largura de 100 Hz. Nas frequências acima de 500 Hz, a largura da banda está em torno de 20% e a banda crítica pode ser comparada com os filtros de 1/3 de oitava, que tem uma largura de banda relativamente constante, a 23 %.

Nos anos 20, Barkhausen introduziu o conceito de Loudness. Do nome do pesquisador, obtém-se a unidade para as bandas críticas, Bark. (FASTL, 1997). Uma vantagem adicional da escala Bark é a sua relação “linear” com a característica fisiológica do sistema auditivo humano, principalmente, o comprimento da membrana basilar do ouvido interno. A palavra *linear* apresenta-se entre as aspas porque sabe-se que o comportamento do sistema auditivo é logarítmico e não linear. A linearidade se processa na relação com a escala Bark, apenas.

A relação entre frequência e escala Bark (ZWICKER, 1980; ZWICKER e FASTL, 1999) é dada por:

$$z = 13 \arctan\left(\frac{0,76f}{kHz}\right) + 3,5 \arctan\left(\frac{f}{7,5kHz}\right)^2 \text{ Bark} \quad (9)$$

3.7 Parâmetros Psicoacústicos

Os parâmetros psicoacústicos definidos por Zwicker e que foram avaliados neste trabalho, são: loudness, sharpness, roughness e fluctuation strength (FASTL, 1997; ZWICKER e FASTL, 1999).

3.7.1 Loudness

O loudness representa um aspecto dominante na avaliação da qualidade sonora. É definido como a medida da audibilidade percebida pelo ouvido humano ou o quão alto é um som para um ouvinte. O loudness não é somente um valor de sensação mas está, em algum lugar, entre sensação e valor físico. A figura 7 apresenta uma série de curvas relacionando nível de pressão

sonora (valores objetivos) com sensação sonora (valores subjetivos), em função da frequência. Cada curva possui igual nível de loudness ou audibilidade. Essas curvas são chamadas isofônicas.

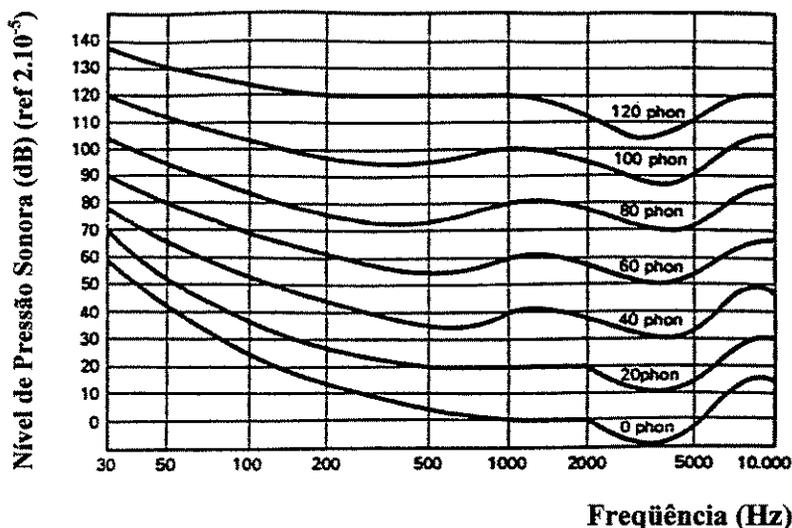


Figura 7: Curvas isofônicas. [FONTE: adaptado de SMITH, 1982]

Nível de loudness (L_N) é o nível de pressão sonora necessário para que um ouvido jovem, são e médio, escute um tom qualquer com a mesma magnitude que um de 1000 Hz e foi criado para caracterizar a sensação de loudness para qualquer som. A unidade do nível de loudness é o *phon* e, equivale ao decibel a 1000 Hz (na eletroacústica e na psicoacústica, o tom de 1 kHz é o mais comum como padrão (ZWICKER e FASTL, 1999)). A unidade do loudness é o *sone*. Os valores em *phon* não podem ser somados, já em *sones* podem. Para a conversão de *phon* para *sone*, utilizam-se tabelas, como a que é apresentada no anexo B (HASSAL e ZAVERI, 1979).

A dependência do loudness (N) com o nível de pressão sonora está apresentado na figura 8.

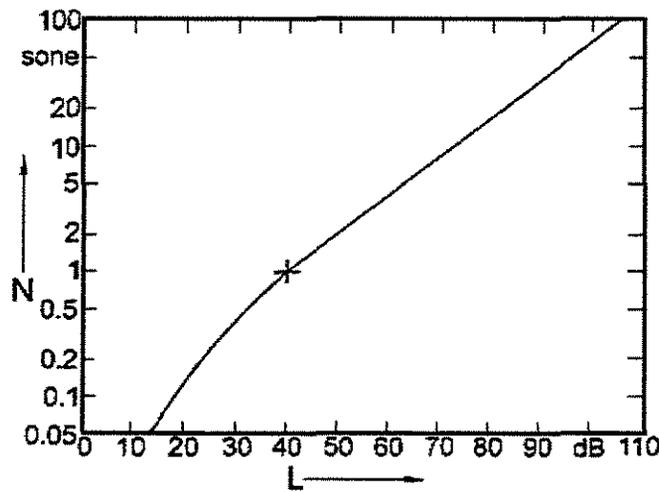


Figura 8: Dependência do loudness (N) com o nível de pressão sonora (L), para um tom puro de 1kHz. [FONTE: Adaptado de FASTL, 1998].

A figura 8 revela que, para um tom puro de 1kHz, acima do nível de pressão sonora de 40 dB, o loudness aumenta por um fator de 2 para cada incremento de 10 dB sobre o nível de pressão sonora. Por outro lado, isso significa que uma redução na potência sonora de 1/10, diminui o loudness somente de 1/2 (FASTL, 1998). O sinal (+) indica a referência do som produzindo um sone, no tom puro de 1kHz e nível de pressão sonora de 40 dB.

O loudness (N) é calculado por:

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz \tag{10}$$

onde N' é o loudness específico e é dado por:

$$N' = 0,08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0,23} \left[\left(0,5 + 0,05 \frac{E}{E_{TQ}} \right)^{0,23} - 1 \right] \frac{\text{Sone}}{\text{Bark}} \quad (11)$$

onde, E_{TQ} corresponde ao estímulo sonoro no limiar do silêncio,

E é o estímulo sonoro a ser avaliado,

E_0 é o estímulo corresponde à referência $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

A lei de Stevens diz que a sensação cresce proporcionalmente com a intensidade física de acordo com a lei da potência. Em consequência desta lei, assume-se que a mudança relativa no loudness é proporcional à mudança relativa na intensidade. Daí se obtém o loudness específico a cada mudança relativa na intensidade.

O loudness pode ser calculado por meio de diagramas de Zwicker (ZWICKER e FASTL, 1999). A norma ISO 532 B (1975), indica esse cálculo para os estímulos sonoros que apresentam irregularidades na densidade espectral, obrigando a uma análise por bandas de 1/3 de oitava, a fim de se obter uma descrição mais fiel do estímulo (SILVA, 1970).

Não é apropriado analisar o loudness de um som sem se fazer a comparação com o loudness de um som referência. A comparação pode conduzir a resultados mais precisos do que a estimação da magnitude isoladamente (ZWICKER e FASTL, 1999).

3.7.2 Sharpness

O sharpness é uma sensação que pode ser considerada separadamente, isto é, é possível comparar o sharpness de um som com o sharpness de outro, pois não possuem referências.

O sharpness representa um atributo para a avaliação do timbre e indica o incômodo causado pelas altas frequências. A unidade do sharpness é o *acum*. A referência do som produzindo um *acum*, é um ruído de banda estreita e uma largura de banda com centro em 1kHz, tendo um nível de 60 dB, como pode ser visto na figura 9. Alto valor do sharpness é considerado baixa qualidade

sonora. Os parâmetros mais importantes que influenciam o sharpness são o conteúdo espectral e a frequência central de bandas estreitas. Com o aumento da frequência central de bandas estreitas, a percepção do sharpness aumenta. O sharpness aumenta com um incremento do nível de 30 para 90 dB, por um fator de 2 (MIRANDA *et al.*, 2000). Isto significa, que a dependência no nível pode ser ignorado como 1ª. aproximação, especialmente se a diferença entre os níveis não for muito grande. Das frequências muito baixas, em torno de 200 Hz às frequências muito altas, próximas a 10 kHz, o sharpness aumenta por um fator de 50 (ZWICKER e FASTL, 1999). A figura 9 apresenta dependência do sharpness S sobre a frequência central. O sinal (+) indica a referência do som produzindo um acum, na frequência central de 1kHz e nível de 60 dB ($L_N = 60$ phon, em 1kHz)

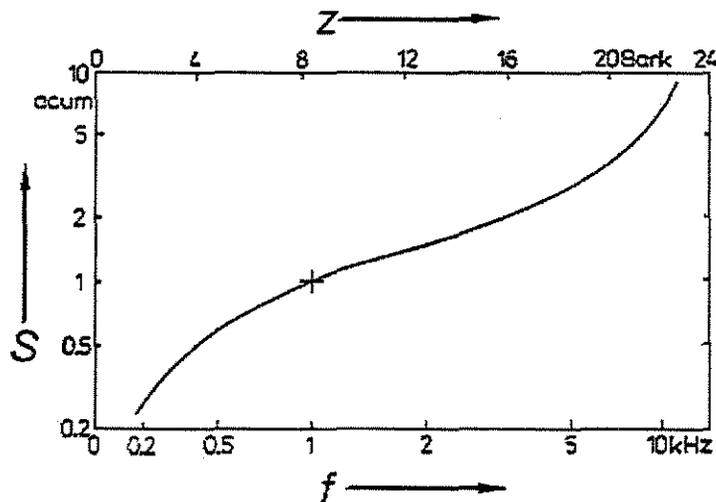


Figura 9: Dependência do sharpness S sobre as frequências centrais – eixo horizontal inferior – ou bandas críticas de Bark – eixo horizontal superior. [FONTE: adaptado de FASTL, 1998].

O gráfico da figura 9 apresenta os eixos da abcissa e da ordenada em escala logarítmica. Nas baixas frequências o sharpness e as frequências centrais aumentam praticamente na mesma proporção. Nas altas frequências, no entanto, essa proporção deixa de existir pois o sharpness cresce de modo muito mais rápido do que as frequências centrais. Essa pode ser a razão do porquê as altas frequências produzem a sensação do incômodo.

O Sharpness (S), segundo Zwicker, é calculado por:

$$S = 0,11 \frac{\int_0^{24} N'(z)g(z)zdz}{\int_0^{24} N'(z)dz} \quad (12)$$

onde,

$N'(z)$ é o loudness específico da banda z da escala bark,

$g(z)$ é a função de ponderação Zwicker, dada por: $g(z) = \begin{cases} 1 & \text{para } z \leq 16 \\ 0,066 e^{0,171z} & \text{para } z > 16 \end{cases}$

A variação temporal do som pode levar a duas percepções diferentes: fluctuation strength, para variação com baixas frequências e roughness para variação de altas frequências. Não há um limite determinado entre o fluctuation strength e roughness. Para modulação de frequência menor que 20 Hz, utiliza-se o fluctuation strength e para modulações entre 20 e 300 Hz, utiliza-se o roughness.

3.7.3 Fluctuation Strenght

O fluctuation strenght é produzido por modulações de frequência, com valores até 20 Hz. Com valores baixos de modulação de frequência, o loudness aumenta ou diminui muito vagorosamente. Se a frequência de modulação é inferior a 20 Hz, o ouvido humano perceberá cada evento separadamente. O máximo da sensibilidade está em torno dos 4 Hz. A sensação do fluctuation strenght atinge o valor máximo em modulações de frequência próximos a 4 Hz e diminui em altos valores de modulação de frequência. Para se ter uma noção do significado do valor máximo do fluctuation strenght, isto é, em 4 Hz, pode-se citar como exemplos, os motores a diesel, por possuírem periodicidade de modulação semelhante (MIRANDA *et al.*, 2000) ou uma conversa normal, pois há a produção de 4 sílabas por segundo (ZWICKER e FASTL, 1999).

O fluctuation strenght é uma sensação que, como o sharpness, pode ser considerada isoladamente de outros parâmetros. Por essa razão, os valores absoluto e relativo são úteis. A unidade do fluctuation strength é o *vacil*. Um *vacil* é definido para nível de pressão sonora em 60 dB, freqüência em 1 kHz e em um tom com 100 % de amplitude modulada em 4 Hz.

A figura 10 apresenta a dependência do fluctuation strenght sobre a modulação de freqüência e o nível de pressão sonora.

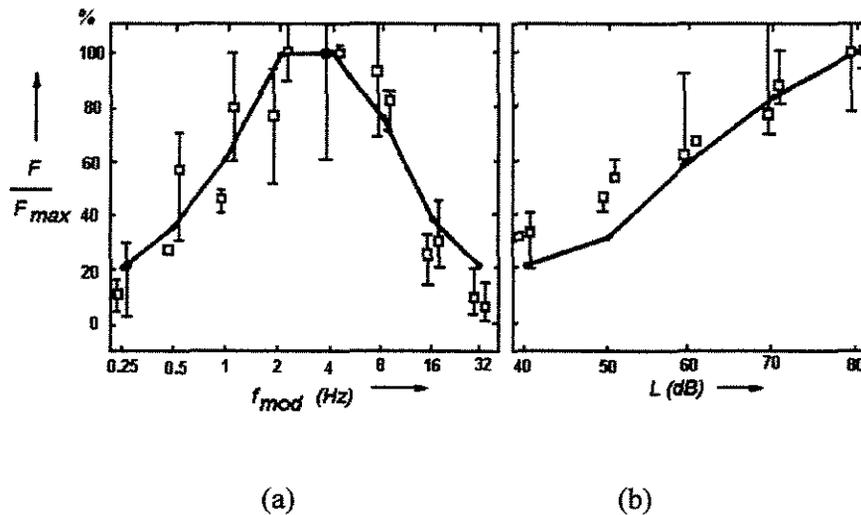


Figura 10: Dependência do fluctuation strenght sobre: (a) a modulação de freqüência, f_{mod} e (b) nível de pressão sonora, L . [FONTE: FASTL, 1997].

Pode-se verificar pela figura 10(a), que o fluctuation strenght aumenta, juntamente com o valor de modulação de freqüência, até um máximo em torno de 4 Hz, decaindo logo em seguida. Pode-se verificar, agora pela figura 10(b), que o nível de pressão sonora é um fator determinante para o aumento do fluctuation strenght, se os valores tratados forem relativos.

Alto valor de fluctuation strenght também é considerado baixa qualidade sonora.

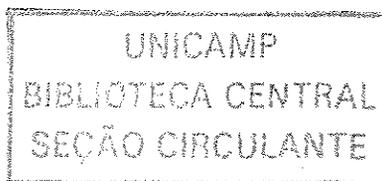
3.7.4 Roughness

O roughness, que significa “aspereza”, é produzido por modulações de frequência, com valores superiores a 20 Hz e inferiores a 300 Hz. O valor máximo do roughness, de acordo com a sensibilidade do ouvido humano, acontece em torno de 70 Hz de modulação de frequência e diminui logo em seguida, como se pode verificar na figura 11(a).

O roughness é outro parâmetro psicoacústico que pode ser considerado isoladamente, isto é, sem considerar os outros parâmetros. A unidade do roughness é o *asper*. Um *asper* é definido para um som com nível de pressão sonora em 60 dB, frequência em 1 kHz e em um tom com 100 % de amplitude modulada em 70 Hz (ZWICKER e FASTL, 1999).

Alto valor do roughness não é desejável para a maioria das aplicações (MARROQUIN,1999). Em qualidade sonora o parâmetro psicoacústico roughness precisa ser utilizado com cuidado, isso porque, um determinado valor de roughness pode considerar muito agradável o som do motor de um carro esporte e pode desagradar, em termos de qualidade sonora, alguns outros produtos (FASTL,1998). Neste trabalho, alto valor de roughness será considerado baixa qualidade sonora.

A figura 11 apresenta a dependência do roughness sobre a modulação de frequência e o nível de pressão sonora.



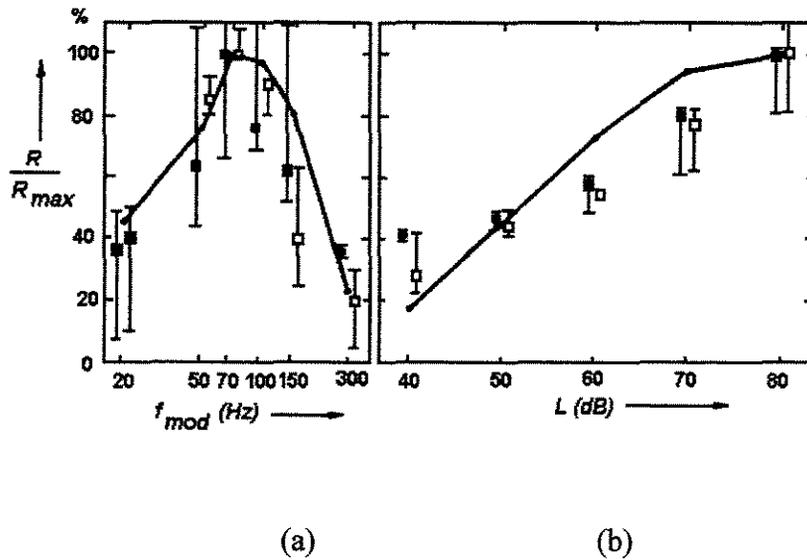


Figura 11: Dependência do roughness sobre: (a) a modulação de frequência, f_{mod} e (b) nível de pressão sonora, L . [FONTE: FASTL, 1997].

Pode-se verificar, na figura 11(a), que o valor máximo do roughness está em 70 Hz. Pela figura 11(b), verifica-se que, aumentando o nível de pressão sonora, o roughness aumenta.

Há alguns softwares específicos que podem fazer a análise do ruído em termos de parâmetros psicoacústicos. Entre eles pode-se citar o PSY da 01 dB e Sound Quality, da Brüel & Kjaer. Neste trabalho, esses dois softwares foram utilizados. Ambos, são boas ferramentas para se fazer a análise dos parâmetros psicoacústicos. O ruído é registrado pelo software e analisado segundo os parâmetros de Zwicker. Os resultados podem ser transferidos para um editor de texto ou uma planilha. Em resumo, pode-se estimar com relativa facilidade, a qualidade sonora de um determinado produto.

3.8 Desconforto Psicoacústico

Os parâmetros psicoacústicos avaliam o desconforto causado por sons. Uma combinação desses parâmetros determina o chamado *desconforto psicoacústico*. Mais especificamente, o desconforto psicoacústico pode descrever quantitativamente, as sensações auditivas que determinam o desconforto obtido em experimentos psicoacústicos (ZWICKER e FASTL, 1999).

O desconforto psicoacústico (DP) é dado por:

$$DP = N \left(1 + \sqrt{m_S^2 + m_{FR}^2} \right) \quad (13)$$

onde,

N é o loudness em sones

m_s descreve os efeitos do sharpness S e é dado por

$$m_s = \left(\frac{S}{acum} - 1,75 \right) \cdot 0,25 \log \left(\frac{N}{sone} + 10 \right) \quad \text{para } S > 1,75 \quad (14)$$

m_{FR} descreve a influência do fluctuation strenght, F , em vacil, e do roughness, R , em asper.

M_{FR} é dado por:

$$m_{FR} = \frac{2,18}{\left(\frac{N}{sone} \right)^{0,4}} \left(0,4 \frac{F}{vacil} + 0,6 \frac{R}{asper} \right) \quad (15)$$

4. Metodologia

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para estudar a eficiência de barreiras acústicas através de avaliações objetivas e subjetivas. A comparação entre essas duas avaliações permite inferir sobre os efeitos psicológicos de um sinal sonoro que atravessa uma barreira e incide sobre um grupo de pessoas. A metodologia também permitirá verificar a viabilidade na utilização da qualidade sonora, na determinação da percepção do ruído por barreiras.

4.1 Desempenho da barreira

O desempenho da barreira foi avaliado em duas etapas: objetiva e subjetiva. O instrumento de medição *Mediator BK 2238*, foi utilizado para obter o espectro com os níveis de pressão sonora em função da frequência. Para a avaliação subjetiva, foi necessária a presença de um grupo de voluntários, que deu a opinião individual, a respeito do sinal sonoro que chega aos ouvidos, após a incidência sobre as barreiras. Esse grupo de voluntários foi denominado por júri.

4.1.1 Escolha do terreno

A escolha do terreno envolveu a proximidade com a Faculdade de Engenharia Civil, a fim de facilitar o transporte e montagem dos equipamentos utilizados e o deslocamento do grupo de voluntários. Esse terreno, porém, não poderia estar muito próximo de edificações pois, pretende-se fazer o estudo das barreiras em campo livre e, conseqüentemente, livre de possíveis reflexões das ondas sonoras nessas edificações. Nesse terreno, foi preparada uma área de 225 m², com compactação e colocação de brita.

4.1.2 Caracterização física das barreiras

As barreiras foram constituídas pelos seguintes materiais: blocos de concreto, acrílico, tipo “cerca” de madeira e madeira sem aberturas. Foram posicionadas sobre uma circunferência de 4,4 m de raio. As barreiras têm as seguintes dimensões: 3,7 m de comprimento e 1,5 m de altura. As fontes sonoras foram colocadas 1,2 m atrás de cada barreira e a 0,8 m acima do solo. Essas medidas foram baseadas no trabalho de Aylor (1976), que realizou um estudo de avaliação de

barreiras acústicas compostas por diferentes materiais. A figura 12, apresenta a disposição das barreiras e da fonte e o ponto de medição (o ponto central):

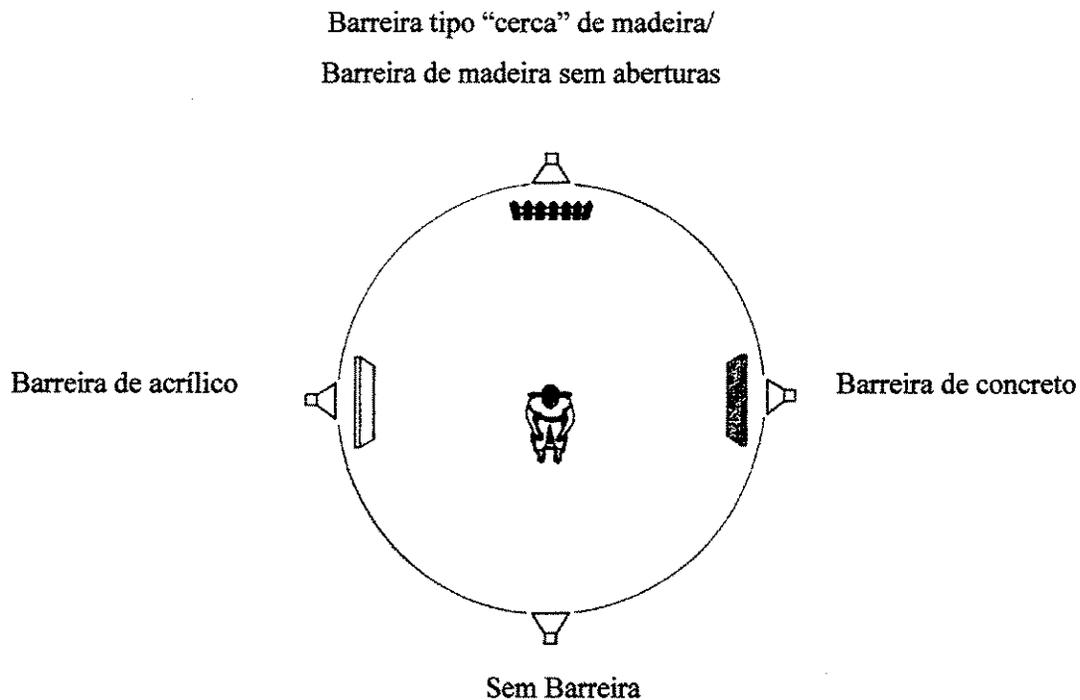


Figura 12: Esquema da montagem experimental. Posicionamento do indivíduo, barreiras acústicas e fontes sonoras. [FONTE: adaptado de AYLOR, 1976]

Em sentido horário, temos, a barreira de acrílico, a "cerca" de madeira ou madeira sem aberturas, a barreira de concreto e a ausência de uma barreira. Após a realização das avaliações do desempenho acústico da barreira de ripas de madeira, esta foi substituída pela barreira de madeira sem aberturas, a fim de se realizar avaliações do desempenho acústico do material em questão, isto é, a madeira, e da influência sobre a sensação auditiva do júri, com obstrução visual da fonte sonora.

Esses diferentes materiais foram escolhidos a fim de se verificar objetivamente, a eficiência dos diferentes materiais na composição de uma barreira acústica e, sob o ponto de vista subjetivo, verificar o quanto a obstrução visual ou não da fonte sonora, influencia na sensação de redução

de ruído, que a barreira pode causar e se essa sensação condiz com a realidade das medidas objetivas ou não. A barreira de acrílico não tem nenhuma abertura mas, por ser transparente, permite ao indivíduo ver a fonte sonora. A barreira tipo “cerca” de madeira não obstrui completamente a visão da fonte sonora. É constituída de ripas de madeira, de aproximadamente, 5 cm de largura, colocadas na posição vertical e distanciadas, umas das outras, de aproximadamente, 10 cm. A barreira de ripas de madeira permite uma visão parcial da fonte sonora. As barreiras de madeira sem aberturas e concreto foram colocadas de modo a obstruir completamente a visão da fonte sonora.

4.1.3 Avaliação Objetiva

A avaliação objetiva envolveu as medições de níveis de pressão sonora em campo e cálculo da perda por inserção, para a caracterização do desempenho da barreira. Como foi mencionado no item 3.5, a perda por inserção das barreiras é definida como a diferença no nível de pressão sonora (L_p) antes e depois da construção das barreiras (método direto da norma ISO 10847). A posição de referência tomada foi a posição do receptor. Visto que a diferença do nível de pressão sonora medido nas condições “antes” e “depois” da construção das barreiras, é muito próximo de zero, é possível eliminar a posição de referência da equação (7). Essa decisão foi baseada no trabalho de Daigle (1998), que utilizou a fórmula simplificada em situações semelhantes e os resultados foram considerados válidos e, Harris (1979) também apresenta essa fórmula para o cálculo da perda por inserção por barreiras. A equação da perda por inserção (7), simplificada, fica:

$$D_{IL} = L_p \text{ antes} - L_p \text{ depois} \quad (16)$$

O nível de pressão sonora foi medido com e sem a barreira, por um microfone colocado no centro da circunferência, numa altura de 1,4 m. Foi utilizado o equipamento de medição *Mediator BK 2238* com software de análise de frequência *BZ 7123* e como gerador de ruído branco, *Investigator BK 2260*, ambos da Brüel & Kjaer. A montagem dos equipamentos obedeceu o esquema apresentado na figura 13.

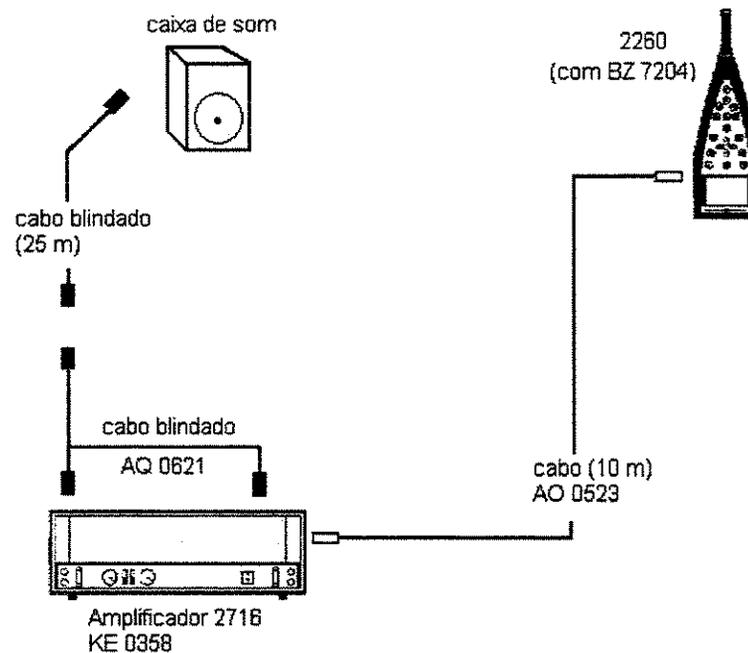


Figura 13: Esquema da montagem dos equipamentos para a realização das primeiras medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído branco.

O amplificador, foi ligado ao *Investigator BK 2260* (gerador do ruído branco) por meio do cabo AO 0523. O cabo AQ 0621 fez a conexão entre o amplificador e as caixas de som. O espectro do sinal emitido pela caixa de som, foi medido com o instrumento *Mediator BK 2238*, com software de análise de frequência BZ 7123, da Brüel & Kjaer, na posição do receptor.

O ruído branco foi utilizado como sinal sonoro por possuir densidade espectral constante para toda a faixa de frequência. A figura 14 apresenta o espectro do ruído branco, em frequência de 1/3 de oitava.

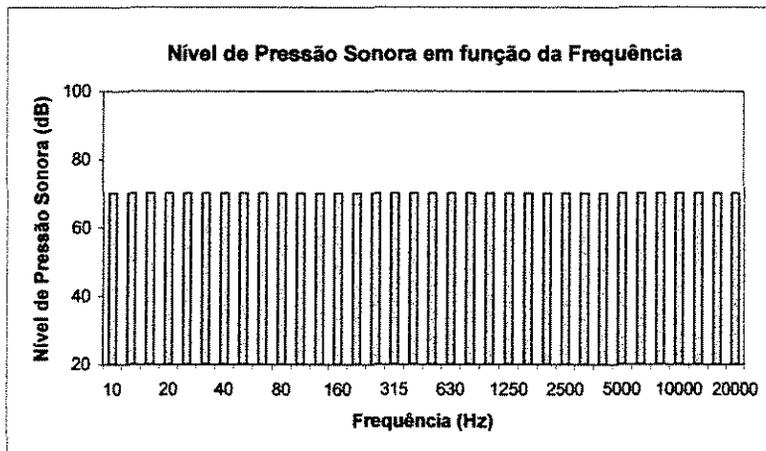


Figura 14: Espectro sonoro do ruído branco, em dB, por terço de oitava.

4.1.4 Simulação do desempenho

A simulação do desempenho da barreira foi obtida por meio da equação de Maekawa, que fornece os valores da atenuação em função da frequência. Para a realização desse cálculo, foram necessárias as dimensões da barreira, bem como as distâncias que envolvem a fonte, o receptor e a barreira, e o número de Fresnel. Para este cálculo, é indiferente o material que constitui a barreira. Por meio desses valores, pode-se prever o comportamento das barreiras. Posteriormente, foram comparados com os valores obtidos experimentalmente, isto é, medidos em campo.

4.1.5 Avaliação Subjetiva

A avaliação subjetiva consiste na percepção do júri, a respeito do sinal sonoro. Essa percepção sonora dos indivíduos permitiu avaliar a eficiência da barreira, sob o ponto de vista subjetivo. O júri foi posicionado no centro da circunferência, como mostra a figura 12, onde foi registrada a percepção individual ao receber um estímulo sonoro.

O júri foi instruído a olhar para uma barreira e esperar pelo estímulo. A seguir os voluntários olharam para outra barreira e, tendo a primeira como referência, indicaram a alternativa que julgaram adequada à sua opinião, isto é, se o estímulo sonoro procedente da direção da segunda barreira, era maior ou menor em relação ao primeiro estímulo sonoro. O procedimento foi

repetido para as barreiras seguintes. O nível de pressão sonora variou entre 60 e 100 dB, com intervalos de 10 dB. A duração de cada estímulo foi de três segundos, devidamente cronometrado. A ordem de apresentação dos estímulos foi randômica.

Aos elementos do júri foram entregues cartões impressos com alternativas que variam entre *muito menor* e *muito maior*. Essas alternativas, sempre referentes a um estímulo prévio, correspondem a um valor numérico, como está apresentado na tabela 3. Esses valores numéricos foram inspirados no método de Fanger (FANGER, 1972) para avaliação térmica de um ambiente.

Tabela 3

Escala para Avaliação Subjetiva das Barreiras

Alternativas	Valor numérico correspondente
Muito menor	-3
Menor	-2
Pouco menor	-1
Igual	0
Pouco maior	1
Maior	2
Muito maior	3

O júri foi composto por um grupo de, aproximadamente, 30 indivíduos com faixa etária entre 19 e 21 anos.

4.1.6 Avaliação dos parâmetros psicoacústicos e da qualidade sonora

Como já foi citado, uma das técnicas mais recentes para poder estudar o aspecto psicológico da resposta de um ouvinte relativo ao som é a qualidade sonora. Esse estudo abrange tanto medidas subjetivas como objetivas. Para esse tipo de avaliação, foram utilizados os parâmetros Zwicker e os software PSY da 01dB e Sound Quality, da Brüel & Kjaer.

Na avaliação objetiva da qualidade sonora foi preciso, primeiramente, gravar (pelo software) o som de interesse, isto é, o sinal sonoro emitido pelas caixa de som e adquiridos após a interação com as barreiras acústicas. O sinal sonoro foi então, analisado de acordo com os parâmetros de Zwicker (loudness, sharpness, roughness e fluctuation strength). A avaliação subjetiva veio da opinião do júri, a respeito do mesmo sinal sonoro. Através dos resultados objetivos e subjetivos, foi feita a correlação entre ambos e uma avaliação final da qualidade sonora.

4.2 Forma e Análise dos Resultados

Os resultados analisados vieram de diversas medições de nível de pressão sonora, na posição do receptor, feitas com a fonte sonora na ausência e na presença das barreiras e utilizados no cálculo dos valores de perda por inserção sonora, que é o parâmetro objetivo para avaliar a eficiência das barreiras acústicas.

A simulação do desempenho das barreiras por meio da equação de Maekawa, permitiu a previsão do comportamento das barreiras, em relação às frequências do sinal sonoro incidente. O resultado da simulação foi comparado com os resultados das medições em campo e, verificou-se se a previsão correspondia aos dados obtidos experimentalmente.

A análise em relação à qualidade sonora, foi subdividida em 2 partes: subjetiva e objetiva. A avaliação subjetiva foi realizada por meio de opiniões de diversos indivíduos (júri) submetidos ao ruído provocado pela fonte sonora (de acordo com nossa metodologia). A avaliação objetiva utilizou os parâmetros: loudness, sharpness, roughness e fluctuation strength.

Finalmente, foi feita uma correlação entre os testes subjetivos (de campo e de qualidade sonora) e os testes objetivos (medições e cálculos), para estabelecer a viabilidade de utilizar a qualidade sonora na determinação da percepção do ruído por barreiras.

5. Resultados e Análises

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na simulação do desempenho acústico das barreiras, com a equação de Maekawa. A etapa seguinte abrange a realização das medidas do nível de pressão sonora dos sinais após a introdução das barreiras e o levantamento dos respectivos espectros sonoros, antes e depois da construção das barreiras. Por meio desses espectros, obtém-se o desempenho acústico de cada barreira e, pode-se verificar o quanto a simulação com a equação de Maekawa se aproxima dos resultados experimentais. Também faz parte deste capítulo a apresentação dos resultados obtidos da avaliação dos parâmetros psicoacústicos, com a utilização do software PSY, da 01 dB e, como informação adicional, a avaliação dos mesmos parâmetros psicoacústicos, com a utilização do software Sound Quality, da Brüel & Kjaer. Através dos resultados dos parâmetros psicoacústicos, é possível determinar o índice de desconforto psicoacústico, por nível de pressão sonora do sinal incidente e por barreira. Com esses índices, pode-se avaliar a influência de cada barreira, de acordo com o nível de pressão sonora, sobre os receptores que estiveram nas proximidades dessas barreiras. Neste capítulo também são apresentadas as diversas opiniões do júri a respeito do sinal sonoro percebido após atravessar as barreiras. As respostas do júri são utilizadas para a realizações de comparações com a avaliação dos parâmetros psicoacústicos, a fim de se verificar, o quanto há de semelhanças ou discrepâncias entre ambos resultados. Finalizando este capítulo, são apresentados os espectros com a escala Bark, em que foi possível, para cada nível de pressão sonora do sinal inicial, fazer comparações em relação à sensação auditiva, que cada barreira promove sobre os ouvintes.

Com relação às medições realizadas com o *Mediator BK 2238*, os espectros apresentam uma incerteza de 0,5 dB. No resultado do cálculo do desempenho acústico das barreiras, há uma incerteza de 10 % sobre a perda por inserção.

5.1 Simulação do Desempenho das Barreiras - Equação de Maekawa

Para a simulação do desempenho das barreiras, foi utilizada a equação de Maekawa, (equação (3)). As condições escolhidas foram:

Temperatura (T)30 °C = 303 K
 Velocidade de propagação do som no ar348,14 m/s
 Altura da fonte0,80 m
 Altura do receptor.....1,20 m
 Altura da barreira.....1,50 m
 Distância da fonte à barreira.....1,20 m
 Distância do receptor à barreira4,40 m

A velocidade de propagação do som no ar foi obtida segundo a equação:

$$v_{som} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (17)$$

onde, γ (razão entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante) = 1,4 (para moléculas diatômicas);

R (constante universal dos gases) = 8,314 J/K mol;

M (peso molecular do ar) = 28,8.10⁻³ kg/mol;

T (temperatura em Kelvin) = 303K

A partir do valor da velocidade do som no ar, obteve-se o comprimento de onda, para as diferentes frequências da banda de 1/3 de oitava, por meio de:

$$v_{som} = \lambda f \quad (18)$$

As alturas da fonte, do receptor e da barreira foram baseadas nos experimentos realizados por Aylor (1976).

Por meio de relações trigonométricas, obteve-se os valores das distâncias A, B e d (definidas segundo a figura 5) e que são: A = 1,39 m; B = 4,41 m; d = 5,61 m.

A equação de Maekawa fornece o valor da atenuação que a barreira deve proporcionar. O gráfico da figura 15 apresenta a atenuação, por difração, esperada para as barreiras deste trabalho, obtido com a simulação da equação de Maekawa.

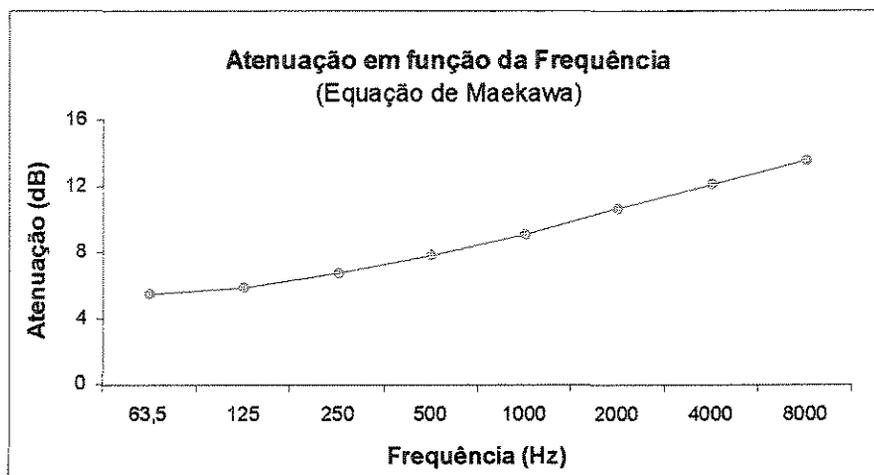


Figura 15: Gráfico da atenuação para as barreiras, obtida pela simulação com a equação de Maekawa.

Pode-se verificar do gráfico da figura 15, que a atenuação das barreiras, por difração, é maior para as frequências maiores.

Segundo a equação de Maekawa, a atenuação independe do material que compõe a barreira. Isso porque, apenas está sendo avaliada, a atenuação por difração. Neste trabalho foi observada a diferença na atenuação, não só por difração, nos diferentes tipos de barreira propostos.

5.2 Construção das barreiras

A escolha do terreno para a construção das barreiras acústicas, envolveu a facilidade de colocação e utilização dos diversos instrumentos de medição e facilidade no deslocamento dos voluntários, que compuseram o júri. O terreno escolhido faz parte da Faculdade de Engenharia Civil. Realizada a limpeza, o terreno, que tem a forma de um quadrado com 15 m de lado,

recebeu uma camada de brita. As figuras 16 (a) e 16 (b) apresentam o terreno, antes e depois da preparação.



Figura 16: (a) Terreno original; (b) Terreno limpo e pronto para a construção das barreiras.

As barreiras foram construídas sobre uma circunferência de 4,4 m de raio, e posicionadas segundo as direções Norte, Sul, Leste e Oeste. Na direção Norte está localizada a barreira de ripas de madeira, na direção Oeste está a barreira de acrílico e na direção Leste está a barreira de concreto. A direção Sul não tem barreira construída, pois pretende-se obter o sinal sonoro sem a presença de obstáculos. Todas as barreiras possuem 3,7 m de comprimento e 1,5 m de altura. A barreira de concreto possui 0,19 m de espessura, a de madeira possui 0,01 m de espessura e a de acrílico possui 6 mm de espessura. As barreiras de concreto, madeira e acrílico não possuem aberturas, diferentemente da barreira de ripas de madeira, que possui aberturas, por ser constituída por ripas, de 5 cm de largura e com intervalos entre elas de, aproximadamente, 10 cm. As fontes sonoras estão localizadas atrás das barreiras em uma distância de 1,2 m e 0,8 m de altura. Como foi citado, o ponto principal onde serão feitas as medidas para as avaliações objetiva e subjetiva, é o ponto central. A figura 12 apresenta o posicionamento das barreiras, fontes e o ponto central.

5.3 Medidas de nível de pressão sonora

Como foi citado anteriormente, para se calcular o desempenho da barreira, são necessários os valores das medidas do nível de pressão sonora, no ponto central do terreno (ponto onde o júri foi posicionado). Os espectros do sinal sonoro com e sem as barreiras, foram utilizados mais tarde, para verificar o desempenho das barreiras. Quanto maior for a atenuação, maior será a eficiência da barreira. No anexo E, são apresentados os valores numéricos correspondentes aos gráficos dos próximos itens.

5.3.1 Nível de pressão sonora - sem as barreiras

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas quatro caixas de som. A identificação das caixas seguiu as direções dos pontos cardeais. A figura 17 apresenta a posição do microfone, no ponto central do terreno e a identificação das caixas de som, segundo as direções Norte, Sul, Leste e Oeste:

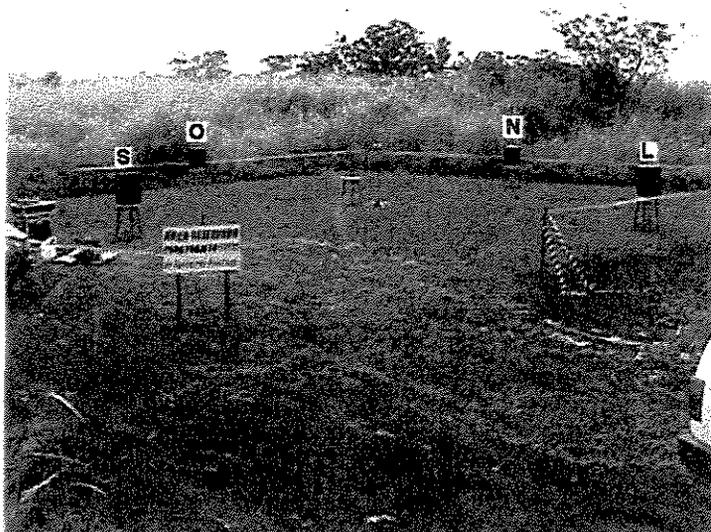


Figura 17: Equipamentos posicionados, no terreno, para as medições.

a) Ruído de fundo

Para a obtenção do espectro sonoro do ruído de fundo, foi utilizado o *Mediator BK 2238*. A faixa de medição de nível de pressão sonora escolhida correspondia aos valores entre 20 e 100 dB e o

tempo total entre a aquisição do sinal e a apresentação do espectro, foi de 3 segundos. As medições do nível de pressão sonora dos sinais foram realizadas no ponto central do terreno, porém sempre com o microfone do aparelho na direção das caixas de som. As caixas foram identificadas pelos pontos cardeais correspondentes: Norte, Oeste, Sul e Leste, como está indicado na figura 17.

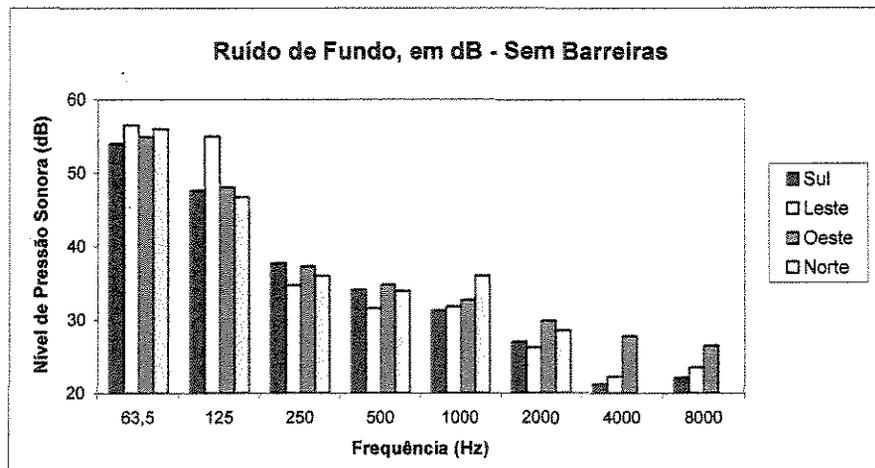


Figura 18: Nível de pressão sonora, em dB, em função da frequência, do ruído de fundo, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

Pode-se verificar pelos espectros acima, que a caixa posicionada no ponto Sul possui o menor ruído de fundo, seguida pela caixa Oeste. A caixa onde é maior o ruído de fundo é a caixa Leste, principalmente nas baixas frequências. Verifica-se também, que é nas baixas frequências, isto é, nas frequências até 250 Hz, em que é maior o nível de pressão sonora do ruído de fundo. A escala escolhida para ser utilizada no *Mediator BK 2238* tinha como limite inferior 20 dB e o superior 100 dB. Por essa razão, a caixa Norte não apresenta os dois últimos valores do nível de pressão sonora porque são inferiores aos 20 dB.

A figura 19 apresenta o espectro sonoro do ruído de fundo, sem barreiras, em dB(A).

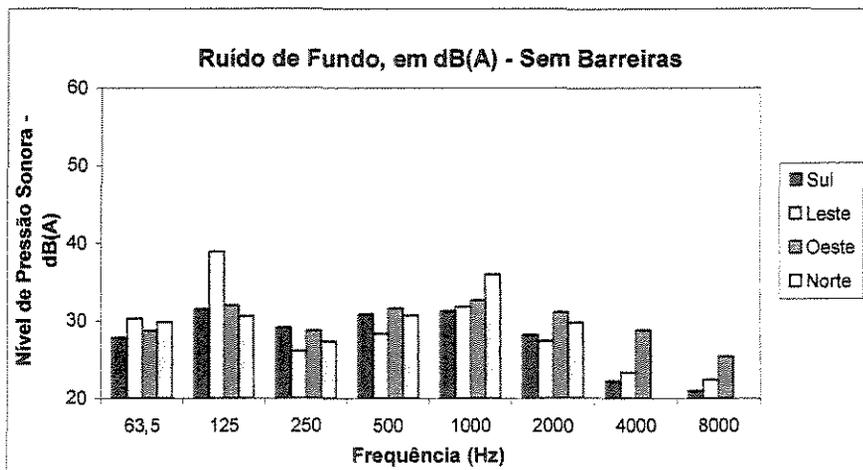


Figura 19: Nível de pressão sonora, em dB(A), em função da frequência, do ruído de fundo, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

O gráfico da figura 19 foi obtido após correção com os valores da curva de ponderação A, sobre o espectro sonoro apresentado na figura 18. A curva de ponderação A é utilizada porque apresenta de modo próximo, a sensação da audição humana, já que a audição é menos sensível para as frequências muito baixas e muito altas (SMITH, 1996). Verifica-se, pelos espectros da figura 19, que a direção Leste, na frequência de 125 Hz, obteve o mais alto valor de nível de pressão sonora, seguida pela direção Norte, na frequência de 1000 Hz. São portanto, os sinais sonoros que o ouvido humano percebe com maior definição.

b) Ruído branco (sinal sonoro)

Para a obtenção do espectro do ruído branco emitido pelas caixas de som, novamente o *Mediator BK 2238* foi utilizado e posicionado no centro do terreno (posição do receptor). As caixas de som foram conectadas ao amplificador de modo que fosse emitido o sinal sonoro em uma caixa de cada vez. O *Mediator BK 2238* foi direcionado à uma caixa determinada e, durante a emissão do sinal, foi coletado o respectivo espectro. Os resultados obtidos estão apresentados na figura 20.

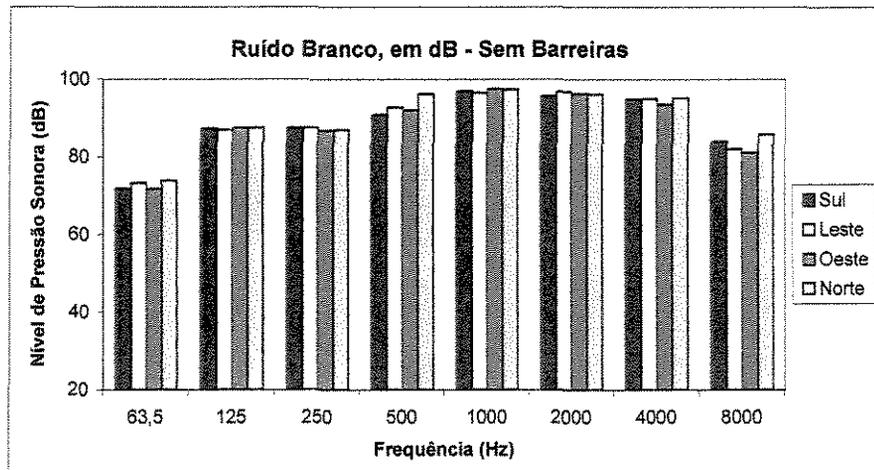


Figura 20: Espectro sonoro em dB, do ruído de branco, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

Dos espectros da figura 20, verifica-se que a caixa Norte fornece no ponto de medição, um som com nível de pressão sonora superior ao das outras caixas, enquanto que a caixa Oeste fornece, no ponto de medição, um som com menor nível de pressão sonora. Diferentemente dos espectros do ruído de fundo, em que o nível de pressão sonora era bem superior nas baixas frequências, isto é, até 250 Hz, em comparação com as frequências superiores a 250 Hz, nos espectros sonoros do ruído branco, verifica-se uma distribuição relativamente uniforme, por todas as frequências.

A figura 21 apresenta o espectro sonoro do ruído branco, em dB(A).

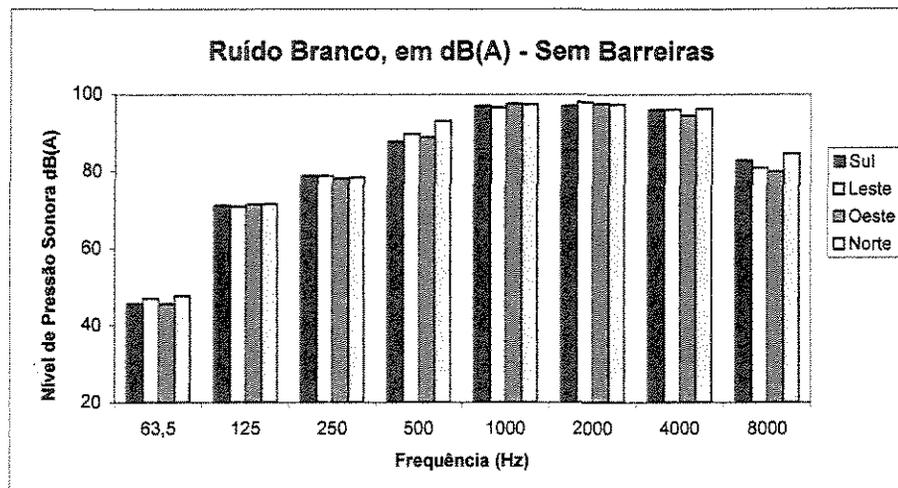


Figura 21: Nível de pressão sonora, em dB(A), em função da frequência, do ruído de branco, de todas as direções, antes da construção das barreiras.

A correção do espectro sonoro obtido, com a curva de ponderação A, apresenta diminuição acentuada no nível de pressão sonora nas frequências abaixo de 500 Hz. Isso porque o ouvido humano tem menos sensibilidade também, para as frequências muito baixas.

5.3.2 Nível de pressão sonora – com as barreiras

Com a construção das barreiras obteve-se o nível de pressão sonora em função da frequência, do ruído de fundo no local e do ruído branco gerado. Com o espectro sonoro do ruído branco, antes da construção das barreiras e depois da construção, obtém-se a perda por inserção e, conseqüentemente, o desempenho acústico das barreiras. A figura 22 apresenta as barreiras construídas no terreno e a barreira de madeira, que substituiu a barreira de ripas de madeira, para a realização das medições.

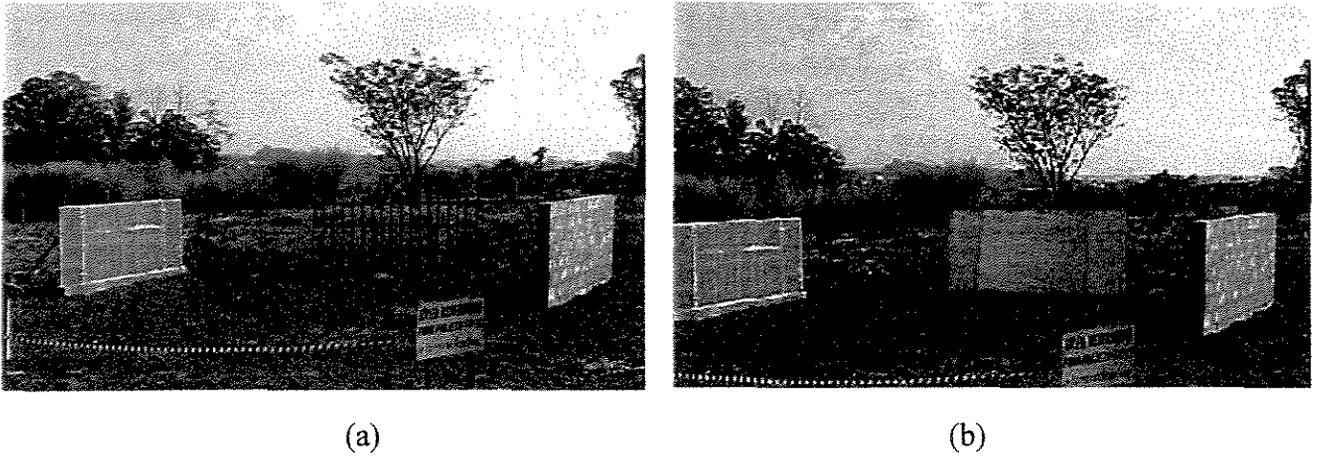


Figura 22: Barreiras acústicas construídas na: (a) primeira etapa: barreiras de concreto, acrílico e ripas de madeira e na (b) segunda etapa: barreiras de concreto, acrílico e madeira em placa.

a) Ruído de fundo

O aparelho *Mediator BK 2238*, localizado no ponto central do terreno, foi direcionado para cada uma das barreiras e o espectro do sinal sonoro referente ao ruído de fundo foi medido. O espectro sonoro do ruído de fundo levantado para cada direção (quatro barreiras e a direção Sul, sem barreira), está apresentado na figura 23.

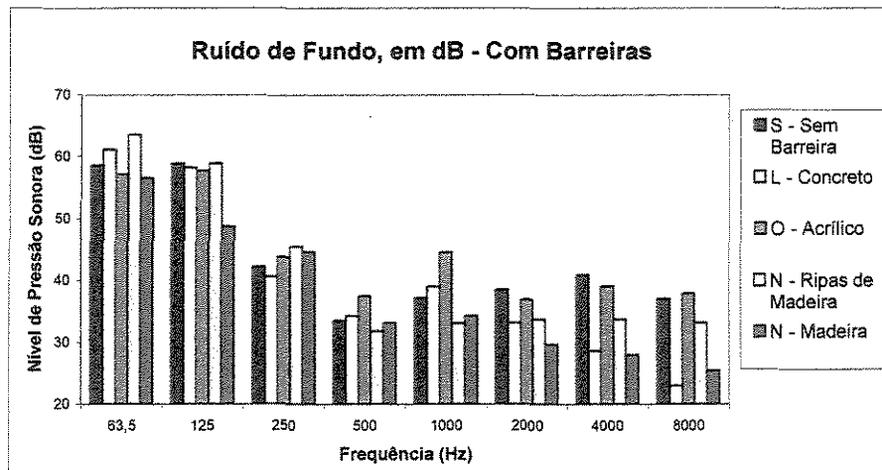


Figura 23: Espectro sonoro, em dB, referente ao ruído de fundo, da direção Sul - sem barreira e das quatro barreiras.

Verifica-se nos espectros referentes às quatro direções, da figura 23, que nas frequências mais baixas, a direção Norte, com a barreira de ripas de madeira, apresentou os maiores valores do nível de pressão sonora e, a direção Norte, com a barreira de madeira, sem aberturas, apresentou os menores valores. Em relação às frequências mais altas, as direções Sul e Oeste apresentaram os maiores valores e a direção Leste, os menores valores. Verifica-se também, que o menor valor do ruído de fundo está na frequência de 8000 Hz, para a direção Leste, com o valor de 23 dB. O maior valor de nível de pressão sonora encontrado corresponde à frequência de 63,5 Hz e à direção Norte, com a barreira de ripas de madeira. As maiores variações entre as quatro direções ocorreram nas frequências mais altas.

A figura 24 apresenta os espectros da figura 23, porém com a correção da curva de ponderação A.

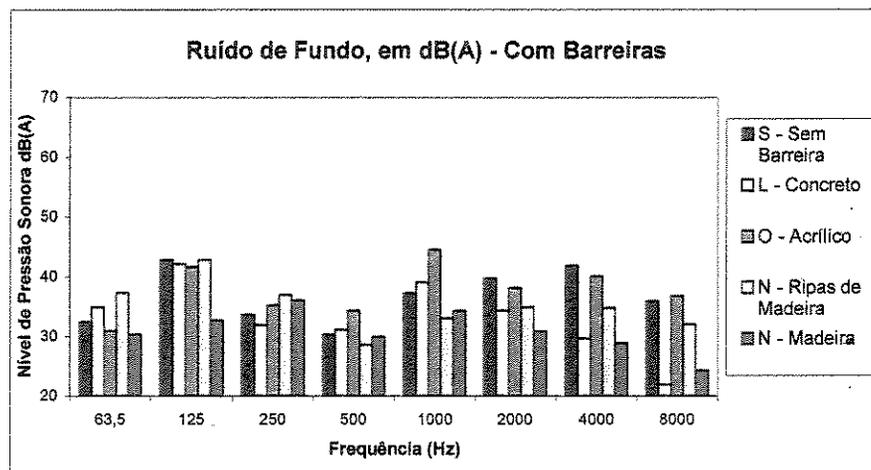


Figura 24: Espectro sonoro, em dB(A), referente ao ruído de fundo, da direção Sul - sem barreira e das quatro barreiras.

O espectro sonoro, em dB(A), do ruído de fundo, apresenta uma variação grande no nível de pressão sonora. No espectro sonoro da figura 23, verificou-se valores altos no nível de pressão sonora nas duas mais baixas frequências, decaindo conforme aumentava a frequência. Em dB(A), nota-se uma distribuição com altos e baixos valores de nível de pressão sonora, em todas as frequências. O valor mais alto do nível de pressão sonora em dB(A) obtido foi da barreira de

acrílico, com 44,5 dB(A), na frequência de 1000 Hz e o mais baixo, 21,9 dB(A) foi para a barreira de concreto, na frequência de 8000 Hz.

b) Ruído branco (sinal sonoro)

Como foi citado, o sinal sonoro utilizado foi o ruído branco e gerado pelo *Investigator 2260*, da Brüel & Kjaer. O amplificador estava em sua máxima capacidade, o que garantia um sinal de, aproximadamente, 100 dB. Os resultados dos espectros levantados são apresentados na figura 25:

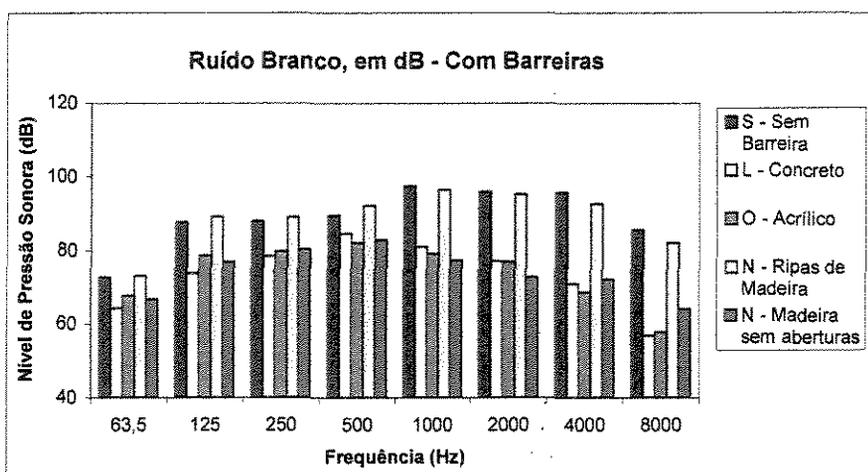


Figura 25: Espectro sonoro, com valores do nível de pressão-sonora em dB, referente ao ruído branco, das quatro direções.

Verifica-se, que o espectro da barreira de ripas de madeira está bastante próximo do espectro do sinal original. A diferença auditiva entre os dois sinais é imperceptível ao ouvido humano, isto é, menor que 3 dB, indicando que a eficiência da barreira de ripas é muito pequena. As barreiras de acrílico e concreto apresentam espectros muito próximos entre si mas, bastante diferentes do sinal sem barreira. Verifica-se que a eficiência da barreira de concreto é melhor nas baixas frequências e na frequência de 8 kHz; a barreira de acrílico, apresenta maior eficiência entre as frequências 500 Hz e 4 kHz. A maior variação entre as barreiras ocorreu nas frequências mais altas, onde a atenuação das barreiras de concreto e acrílico foi máxima. A menor variação entre as barreiras de concreto e acrílico ocorreu na frequência de 2000 Hz, onde com uma diferença pequena em

relação à barreira de concreto, a barreira de acrílico apresentou maior redução do sinal sonoro. Há uma diferença significativa entre a barreira de ripas e a barreira de madeira sem aberturas, indicando que a barreira de madeira sem aberturas apresenta maior redução do nível de pressão em todas as frequências. Nas frequências de 1000 e 2000 Hz, a barreira de madeira sem aberturas, apresenta maior redução do sinal sonoro em relação às barreiras de concreto e acrílico. Nas baixas frequência (63,5 e 125 Hz) e na frequência de 8000 Hz, as barreiras de concreto e acrílico apresentaram maior redução do sinal sonoro do que a barreira de madeira sem aberturas. Verifica-se então, pelo gráfico da figura 25, que a barreira com melhor atenuação nas baixas e altas frequências é a de concreto. A barreira de ripas apresenta a pior atenuação, como era esperado, por ser uma barreira com aberturas.

A figura 26 apresenta o espectro do ruído branco, em dB(A), para as quatro direções e as quatro barreiras. Vale lembrar que a barreira de madeira substituiu a barreira de ripas de madeira, para realização das medições.

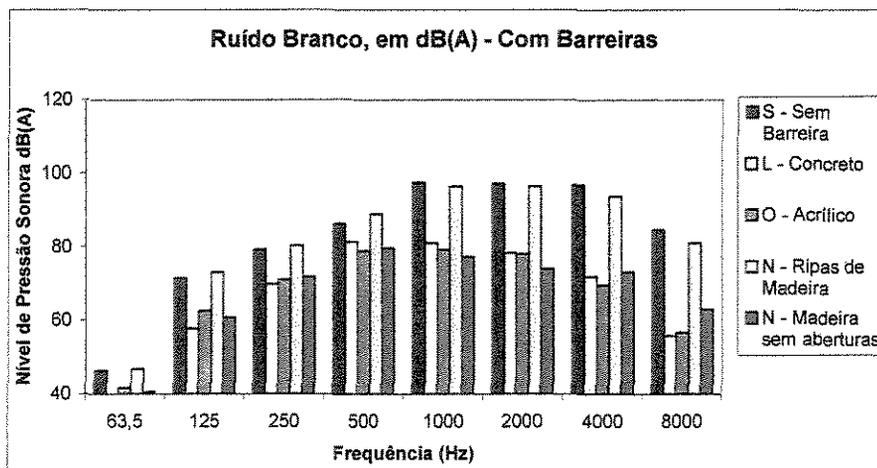


Figura 26: Espectro sonoro, com valores do nível de pressão sonora em dB(A), referente ao ruído branco, das quatro direções e com os quatro diferentes tipos de barreiras.

O espectro sonoro, em dB(A), do sinal após atravessar as barreiras acentua de maneira significativa, a diferença entre os valores do nível de pressão sonora nas frequências de 63,5 e

125 Hz com os valores do nível de pressão sonora nas frequências de 1000 Hz e 8000 Hz. Pode-se confirmar que a atenuação causada pela barreira de concreto, nas três frequências mais baixas, é superior à atenuação das barreiras de acrílico e madeira. Na frequência de 500 Hz a atenuação causada pela barreira de acrílico é superior à atenuação das barreiras de madeira e concreto. Nas frequências de 1000 e 2000 Hz a atenuação maior é causada pela barreira madeira. Nas duas últimas frequências, a barreira de madeira apresenta os piores valores da atenuação, quando comparada com as barreiras de acrílico e concreto. Na frequência de 8000 Hz, a melhor atenuação é causada pela barreira de concreto. Os espectros sonoros da figura 26, confirmam também, que as ripas de madeira, não apresentam comportamento como atenuadoras em nenhuma frequência, pois, em todo o espectro, os níveis de pressão sonora das ripas de madeira estão próximos aos níveis de pressão sonora, do sinal original. Uma melhor visualização deste efeito pode ser percebida na figura 27.

5.4. Avaliação Objetiva do Desempenho das barreiras

A avaliação objetiva das barreiras foi realizada por duas formas diferentes, compreendendo o cálculo da perda por inserção e a avaliação dos parâmetros psicoacústicos tanto pelo software PSY, da 01 dB como pelo Sound Quality, da Brüel & Kjaer.

5.4.1 Cálculo do Desempenho das Barreiras

A descrição do cálculo do desempenho das barreiras acústicas, isto é, perda por inserção, foi apresentado no item 4.1.3 e os resultados obtidos para as barreiras estudadas estão apresentadas na figura 27.

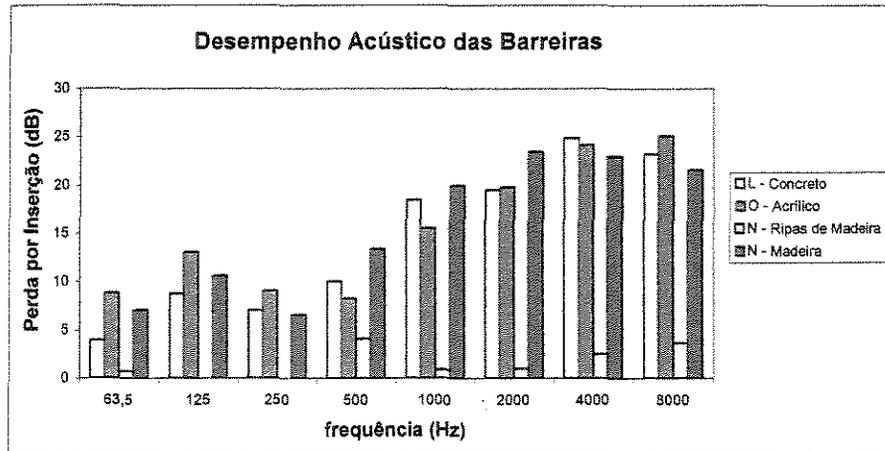


Figura 27: Resultado do cálculo do desempenho das barreiras acústicas estudadas, em dB/dB(A).

O gráfico da figura 27, resume os resultados do desempenho acústico das barreiras. As barreiras de concreto, acrílico e madeira foram as que apresentaram melhor desempenho, (maior perda por inserção). A barreira de acrílico apresentou um desempenho maior do que o esperado, principalmente em relação à barreira de concreto, embora tenham espessuras diferentes. A menor diferença entre essas duas barreiras ficou na frequência de 2000 Hz, onde o acrílico superou por pouco, o concreto, numa variação imperceptível ao ouvido humano. A maior diferença ficou na menor frequência, onde o acrílico superou em muito (45%), a eficiência do concreto. A barreira de madeira apresentou melhor desempenho nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, e pior desempenho na frequência de 250 Hz, em que seu desempenho ficou aquém ao da barreira de acrílico, em 27,5%.

Nas frequências mais baixas, isto é, abaixo de 250 Hz, o desempenho da barreira de acrílico superou significativamente, os desempenhos das barreiras de concreto e madeira. Entre 500 e 2000 Hz, a barreira de madeira superou as outras três. Em 4000 Hz, houve uma diferença pequena entre as barreiras e, uma diferença desprezível entre as barreiras de concreto e acrílico, por ser imperceptível ao ouvido humano. Já para 8000 Hz, novamente a barreira de acrílico supera as outras três barreiras. Quanto à barreira de ripas, este cálculo confirmou o que se havia

constatado no item 5.3.2b onde se verificou a pouca redução de ruído provocado por essa barreira.

Quanto à simulação do desempenho calculado pela equação de Maekawa, verificou-se que a atenuação de uma barreira, independentemente do material que a constitui, é maior nas frequências mais altas. Nesse aspecto, podemos verificar que as barreiras de acrílico, concreto e madeira corresponderam melhor à simulação do desempenho do que a barreira de ripas de madeira. O gráfico da figura 28 apresenta a comparação entre a atenuação obtida pela equação de Maekawa e a atenuação obtida segundo o cálculo da perda por inserção, para todas as barreiras.

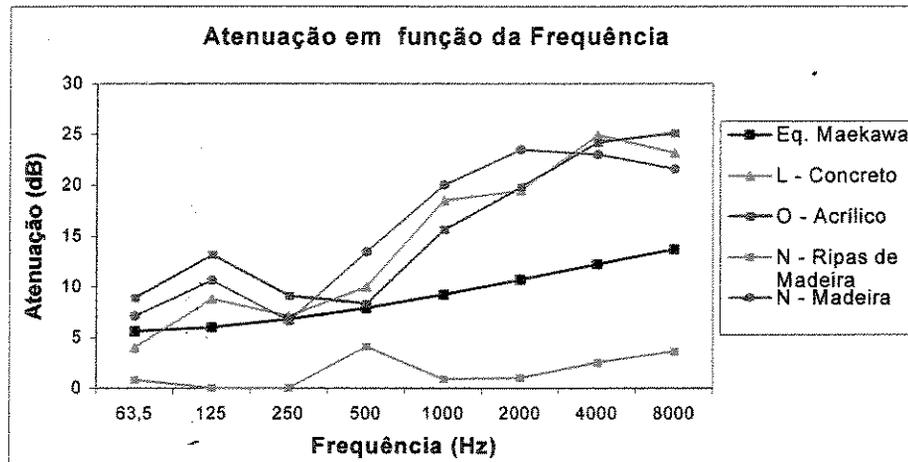


Figura 28: Curvas de atenuação obtidas por meio da equação de Maekawa e equação da perda por inserção.

Verifica-se pelo gráfico da figura 28 que, exceto para a barreira de ripas de madeira, a atenuação obtida pelas outras barreiras, supera a atenuação por difração. Isso porque, o cálculo da perda por inserção envolve, além da atenuação por difração, também a atenuação por transmissão, absorção e reflexão. Quanto a barreira de ripas de madeira, verifica-se que a atenuação está bem abaixo da curva da equação de Maekawa e, conseqüentemente, das outras barreiras, comprovando a ineficiência para a atenuação de ruídos.

5.4.2 Parâmetros Psicoacústicos obtidos pelo PSY 01 dB

Como foi mencionado, o software PSY da empresa 01 dB, foi utilizado para realizar a avaliação objetiva da qualidade sonora (cálculo dos parâmetros psicoacústicos). Foram avaliados os parâmetros psicoacústicos definidos por Zwicker (1999): loudness, sharpness, fluctuation strength e roughness. O primeiro parâmetro a ser apresentado é o loudness, que é a medida da audibilidade percebido pelo ouvido humano ou o quão alto é um som para um ouvinte. A figura 29 apresenta o gráfico dos resultados do loudness para as diferentes barreiras e a direção Sul, sem barreira.

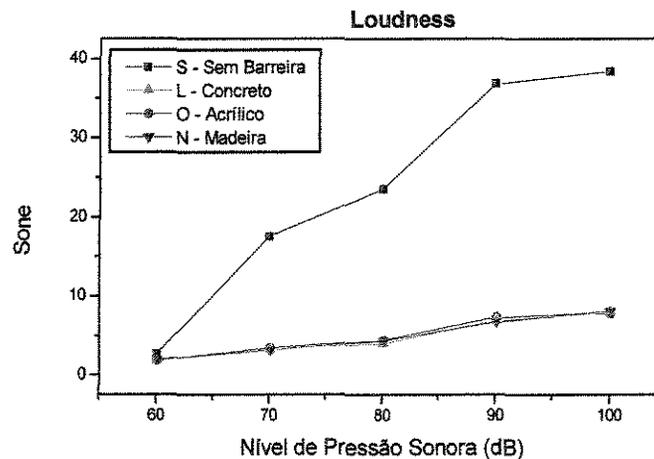


Figura 29: Gráfico dos resultados do loudness, para as diferentes barreiras e a direção Sul, sem barreira.

O loudness aumenta proporcionalmente com a intensidade do som e, pelo gráfico da figura 29, verifica-se que quanto maior é o nível de pressão sonora do sinal, maior é o loudness, para todas as direções e barreiras. Verifica-se também, que há sobreposição nas curvas do loudness para as barreiras de concreto, de acrílico e de madeira. Essa sobreposição significa que as barreiras causam a mesma sensação de audibilidade. A figura 30, apresenta a curva do loudness, somente para as barreiras, para poder visualizar melhor, a diferença entre as curvas das barreiras.

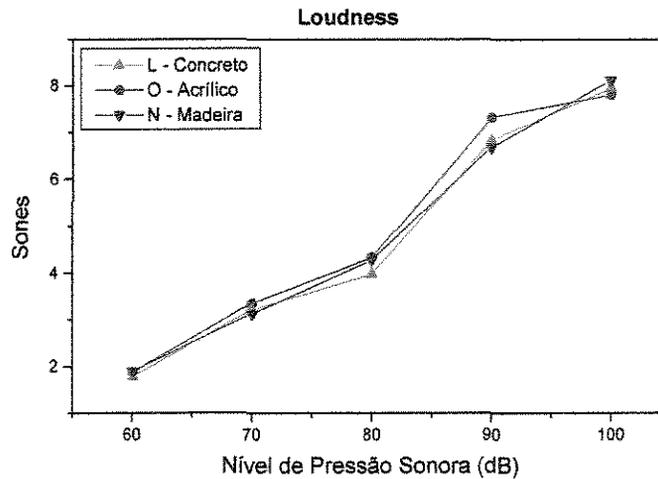


Figura 30: Gráfico dos resultados do loudness, para as diferentes barreiras.

Quanto maior é o loudness, menor é atenuação da barreira. Confirma-se, portanto, que as barreiras de concreto, acrílico e madeira, possuem a propriedade de atenuação, muito semelhante umas das outras. A inclinação da curva do loudness, para as barreiras, é relativamente pequena, está em torno de 24% a diferença entre os níveis de 100 dB e 60 dB. Isso quer dizer, que o comportamento atenuador das barreiras, entre 60 dB e 100 dB, varia muito pouco nos diferentes níveis de pressão sonora. E, pelo fato de a direção Sul não possuir barreira, são explicados os altos valores de loudness. É interessante observar que em 60 dB, o loudness das quatro direções estão muito próximos; verifica-se, então, que para valores muito baixos do nível de pressão sonora do sinal inicial, o desconforto na audibilidade é pequeno.

Dentre todos os parâmetros psicoacústicos, apenas o loudness está normalizado (ISO 532), os demais possuem diversas formas de cálculo. O software PSY, da 01 dB, apresenta os resultados, segundo os cálculos do método de Zwicker (ISO 532 B).

Na figura 31 são apresentados os resultados de outro parâmetro psicoacústico, o sharpness.

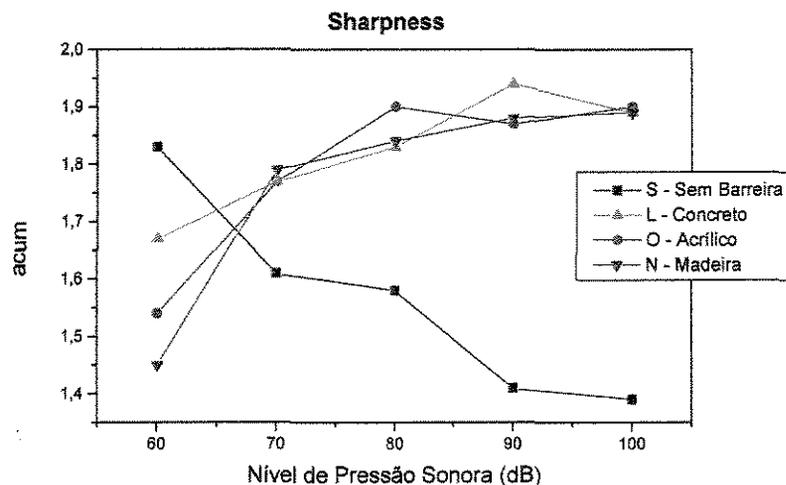


Figura 31: Gráfico do resultado do sharpness, para as diferentes barreiras e a direção Sul, sem barreira.

Para as três barreiras, o sharpness aumenta conforme aumenta o nível de pressão sonora, isto é, o incômodo causado pelas altas frequências vai se tornando maior conforme aumenta o nível de pressão sonora. A direção Sul apresenta comportamento inverso, isto é, quanto maior o nível de pressão sonora, menor o sharpness. A curva do sharpness, para a direção Sul é exatamente o inverso da curva do loudness. Interessante essa observação pois quer dizer, que quanto maior é o nível de pressão sonora do sinal inicial, menor é o desconforto causado pelas altas frequências – o desconforto, para a direção Sul, é causado pela alta audibilidade e não pelas altas frequências. Nesta curva fica evidente a diferença entre os incômodos causados pelos altos níveis de pressão sonora e altas frequências.

No nível de pressão sonora mais baixo, 60 dB, a barreira de madeira apresenta menor acum, seguida pela barreira de acrílico e de concreto. Os diferentes materiais causam diferentes sensações de incômodo em relação às altas frequências. Como se pode verificar no gráfico do desempenho acústico das barreiras da figura 27, nas altas frequências, a barreira de madeira apresenta menor perda por inserção, isto é, menor atenuação, quando comparada com as barreiras de concreto e acrílico. Esses resultados estão coerentes para a barreira de madeira, pois, nas altas frequências atenua menos o som e, portanto, provoca maior incômodo com essas mesmas altas frequências.

Outro parâmetro psicoacústico analisado foi o fluctuation strength. A figura 32 apresenta os resultados do fluctuation strength para as quatro direções.

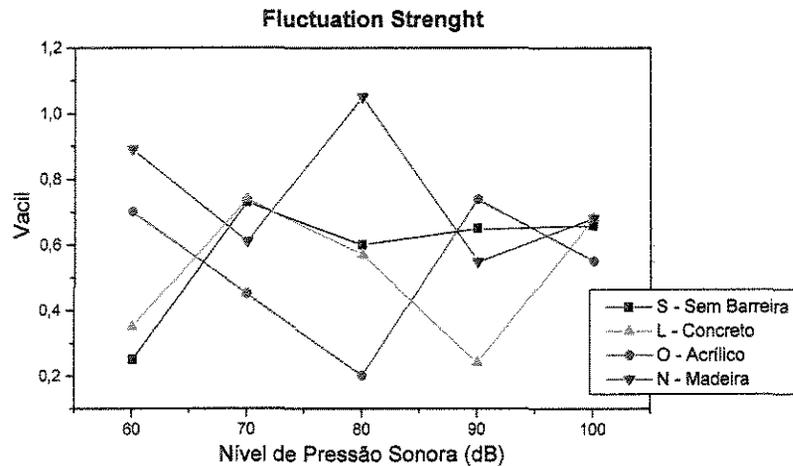


Figura 32: Gráfico do resultado do fluctuation strength, para as diferentes barreiras e a direção Sul, sem barreira.

O fluctuation strength representa a variação temporal do som, com modulações em frequência em até 20 Hz. Alto valor do fluctuation strength apresenta baixa qualidade sonora (FASTL, 1997). A figura 32 apresenta uma variação muito grande nos valores do fluctuation strength com os níveis de pressão sonora do sinal inicial. Verifica-se através da figura 32 que, para o menor nível de pressão sonora, a barreira de madeira apresenta o maior valor do fluctuation strength dentre as barreiras estudadas, seguida pela barreira de acrílico e, portanto, apresentam sinal com baixa qualidade sonora. De 60 para 70 dB, a qualidade sonora melhora para essas duas barreiras pois, diminuem os valores do fluctuation strength, ocorrendo o inverso para a barreira de concreto e a direção Sul-sem barreira. Em 80 dB, a variação do fluctuation strength apresenta o seu máximo pois, a barreira de madeira apresenta o maior valor e a barreira de acrílico o menor, numa variação relativa de 80,95%. A variação absoluta é de 0,85. É interessante verificar, que depois do aumento no valor do fluctuation strength de 60 para 70 dB, a direção Sul-sem barreira, praticamente manteve o valor do fluctuation strength constante até o nível de 100 dB.

Em 90 dB, a barreira de acrílico tem um aumento acentuado, passando de 0,2 para 0,74 vacil, apresentando pior qualidade sonora nesse nível de pressão sonora. A barreira de concreto apresenta o menor valor do fluctuation strenght, melhor qualidade sonora. E, finalmente em 100 dB, a barreira de acrílico apresenta o menor valor de fluctuation strenght e, as outras barreiras e a direção Sul-sem barreira, apresentam comportamentos similares.

O último parâmetro psicoacústico analisado corresponde ao roughness. A figura 33 apresenta a curva com os resultados do roughness para as três barreiras e a direção Sul, sem barreira.

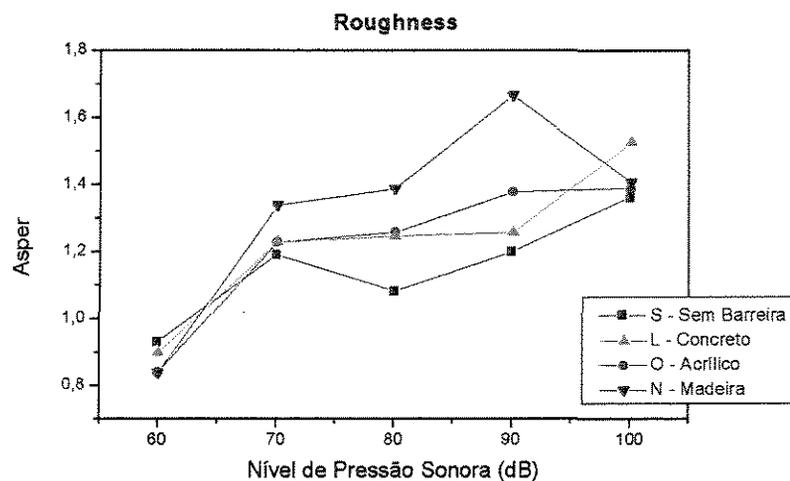


Figura 33: Gráfico do resultado do roughness, para as diferentes barreiras e a direção Sul, sem barreira.

Roughness é a variação temporal do som, com modulações de frequência entre 20 e 300 Hz. Foi mencionado no item 3.7.4, que um determinado valor do roughness pode ser bom em uma determinada situação e ruim em outra. Neste trabalho, será considerada baixa qualidade sonora, os altos valores de roughness.

Verifica-se pelo gráfico da figura 33, que o valor do roughness aumenta conforme aumenta o nível de pressão sonora do sinal inicial. Nos níveis de 60 dB e 100dB, os valores do roughness das quatro direções estão bem próximos. Entre 70 e 90 dB, a pior qualidade sonora foi produzida pela barreira de madeira e a melhor qualidade sonora foi apresentada pelo sinal inicial, isto é, direção Sul-sem barreira. Isto quer dizer, que a barreira de madeira provocou alteração no sinal

inicial, tornando-o mais “áspero”. No nível de 100 dB, essa “aspereza” foi mais provocada pela barreira de concreto.

5.4.3 Parâmetros Psicoacústicos obtidos pelo Sound Quality

O Sound Quality foi o outro software utilizado para realizar a avaliação dos parâmetros psicoacústicos definidos por Zwicker. As figuras 34 e 35 apresentam os resultados dessa avaliação para os quatro parâmetros.

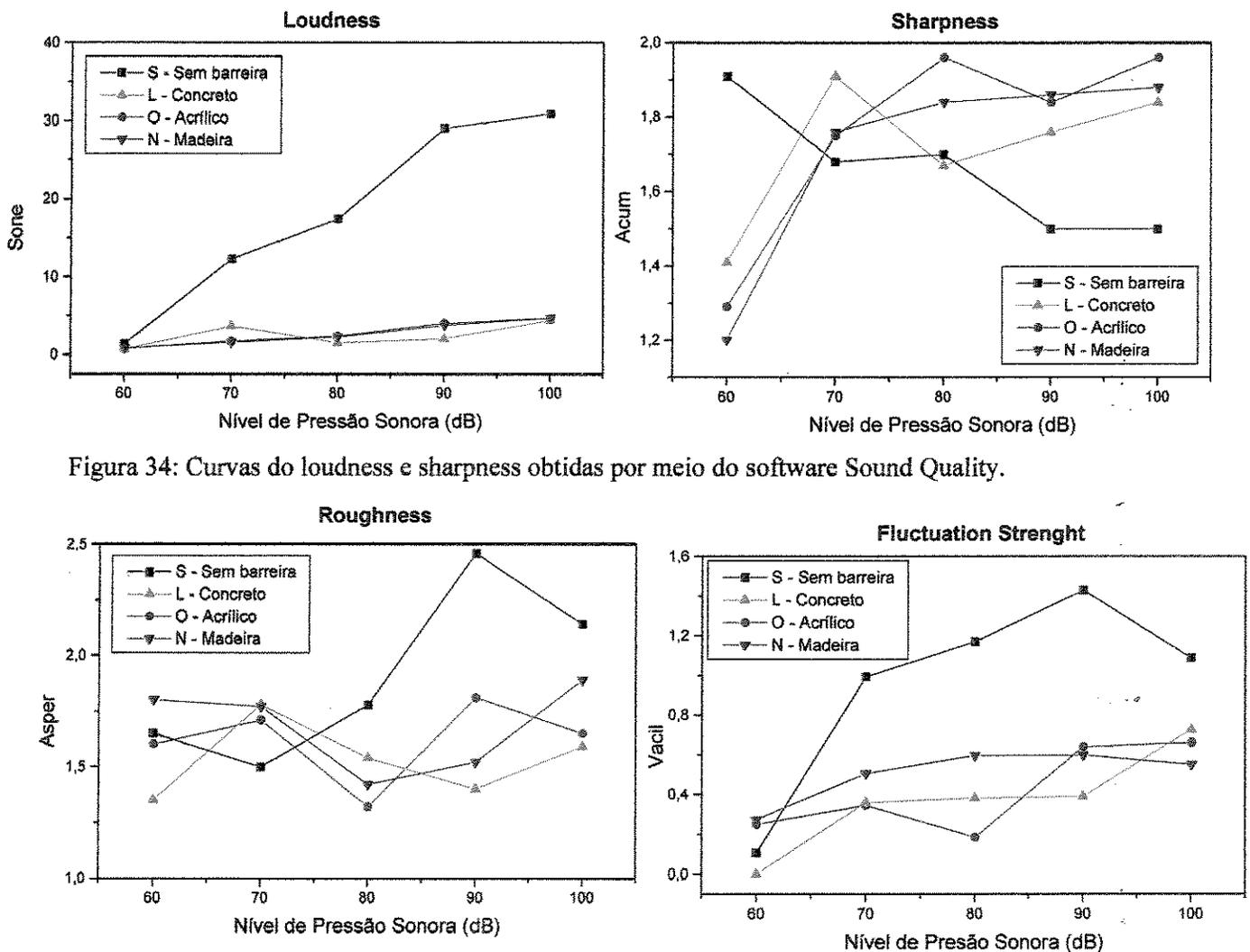


Figura 34: Curvas do loudness e sharpness obtidas por meio do software Sound Quality.

Figura 35: Curvas do roughness e fluctuation strength obtidas por meio do software Sound Quality.

As curvas dos parâmetros psicoacústicos obtidas com o software Sound Quality apresentam diferenças em relação às curvas obtidas com o PSY. Apenas as curvas do loudness são semelhantes, porque o loudness é o único parâmetro psicoacústico que está normalizado (ISO 532 B). Como os demais parâmetros psicoacústicos não estão normalizados, podem ser obtidos por métodos diferentes. Neste trabalho foi utilizado o método de Zwicker para a avaliação dos parâmetros psicoacústicos. O software Sound Quality, utiliza aproximação de Aures para realizar os cálculos dos parâmetros psicoacústicos. Comparando os resultados da avaliação dos parâmetros psicoacústicos, de ambos os softwares, pode-se verificar, então, as diferenças causadas por essa correção.

5.4.4 Desconforto Psicoacústico

Uma relação entre todos os parâmetros psicoacústicos pode ser resumida em um índice definido como desconforto psicoacústico, apresentado no item 3.8. Neste trabalho também optou-se por apresentar o índice do desconforto psicoacústico para cada nível de pressão sonora. O cálculo para esse índice seguiu a equação 13 e os resultados estão apresentados na figura 36.

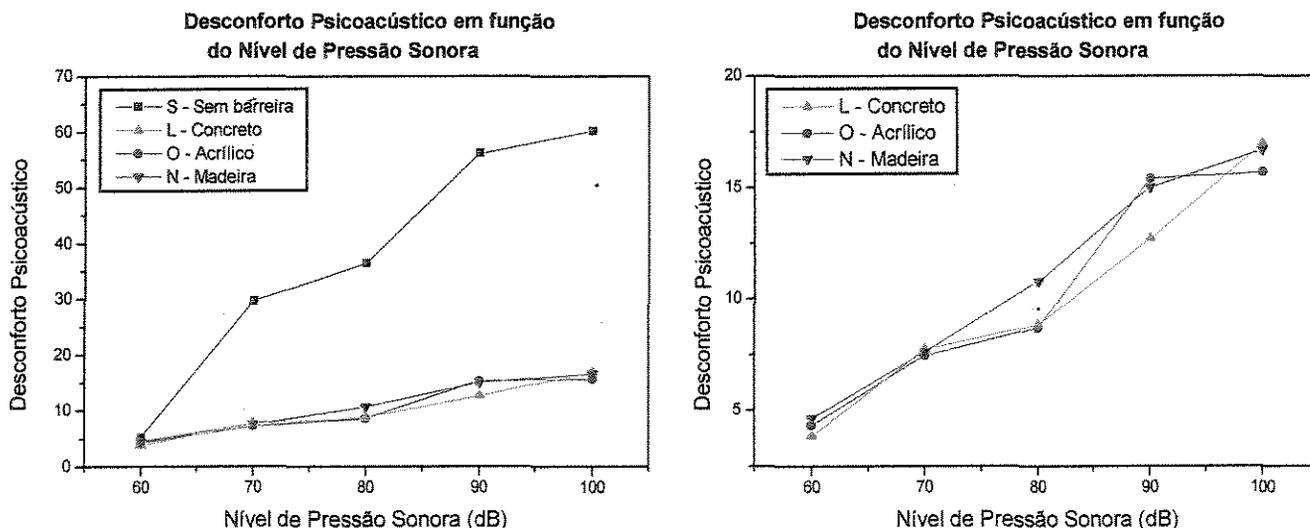


Figura 36: Desconforto psicoacústico em função do nível de pressão sonora.

Pode-se verificar pelos gráficos da figura 36 que a direção Sul, por não possuir barreira não atenua o sinal inicial e, portanto, apresenta maior desconforto psicoacústico, que aumenta conforme aumenta o nível de pressão sonora do sinal inicial. Entre as três barreiras verifica-se que os valores do desconforto psicoacústico estão bem próximos, sendo que a barreira de madeira apresenta maior desconforto psicoacústico sendo excedida pela barreira de acrílico em 90 dB e pela barreira de concreto em 100 dB. Em termos gerais, a barreira de concreto apresenta o menor desconforto psicoacústico, exceto em 100 dB. A barreira de acrílico apresenta comportamento melhor do que a barreira de madeira porém, não é melhor do que a barreira de concreto, exceto em 100 dB.

Em resumo, o desconforto psicoacústico pode ser amenizado com uma barreira de concreto, seguida por uma barreira de acrílico e, por último, por uma barreira de madeira.

5.5 Avaliação subjetiva do desempenho das barreiras acústicas

Para a avaliação subjetiva do desempenho das barreiras acústicas, foi necessário recorrer a um júri. O papel do júri foi indicar a eficiência da barreira, sob o ponto de vista subjetivo. Os resultados da avaliação desse júri, para as diferentes barreiras, foram obtidas em duas situações diferentes, com os olhos abertos e com os olhos fechados. Também foi pedido ao júri uma avaliação dos sons que ouviam, indicando se causavam sensações grave ou aguda e nítida ou abafada.

5.5.1 Caracterização do som: nível sonoro

A figura 37 apresenta os resultados da opinião do júri a respeito da eficiência das barreiras.

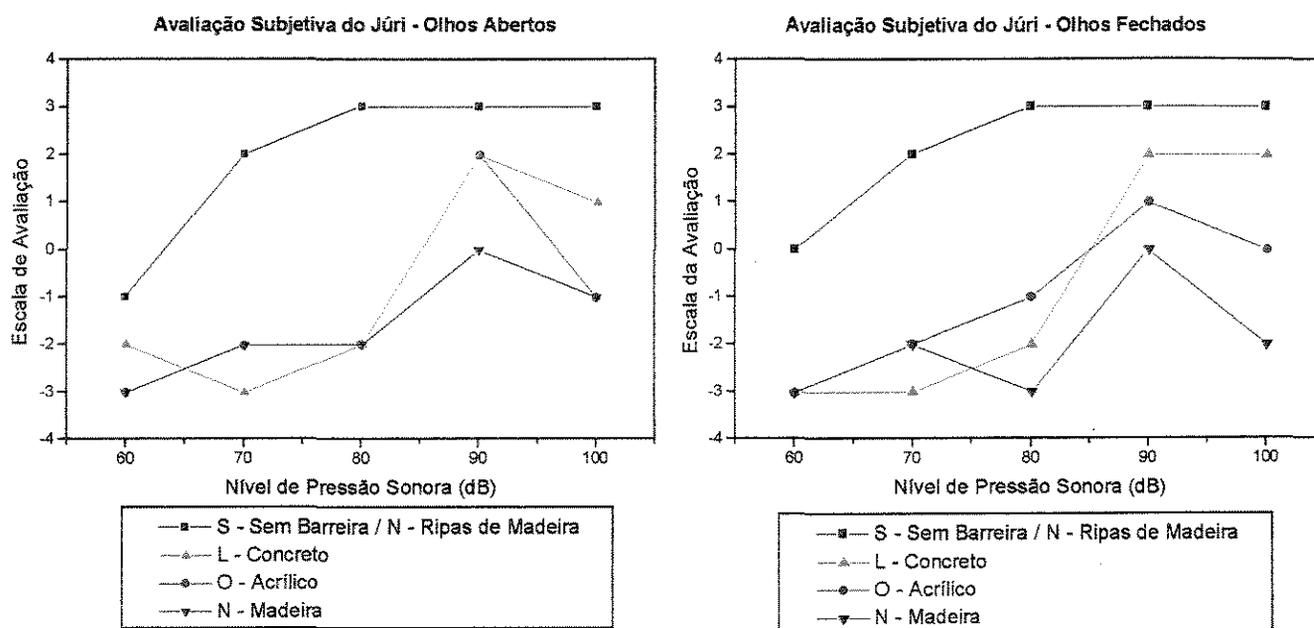


Figura 37: Gráfico da sensação auditiva de um sinal sonoro, em relação ao nível de pressão sonora.

A sensação do júri, em relação a um som após atravessar as barreiras, é diferente caso esteja com os olhos abertos ou os olhos fechados. É o que se verifica nos gráficos acima. A direção Sul-sem barreira e a barreira de ripas de madeira, não causaram diferença na sensação auditiva, em ambas as situações. A variação entre um nível de pressão sonora e outro, para as barreiras de acrílico e madeira tornou-se mais acentuada quando o júri estava com os olhos fechados. Já para a barreira de acrílico, a variação não foi tão acentuada, exceto quando o sinal foi alterado de 80 para 90 dB. Com os olhos abertos e com os olhos fechados, as barreiras de madeira e de concreto são as que apresentam melhor desempenho acústico.

O impedimento visual da fonte sonora pela barreira, causa consideráveis efeitos psicológicos na percepção do ruído através das barreiras, resultando em uma sensação nem sempre verdadeira em relação ao ruído real. Na avaliação subjetiva, verificou-se que as barreiras que bloqueavam completamente a fonte sonora, (barreira de concreto e madeira), foram consideradas eficientes na atenuação do ruído. Porém, na avaliação objetiva, apresentada no item 5.5.1, a barreira de acrílico, que é transparente e, portanto, não bloqueava a visão da fonte sonora, também possui bom desempenho acústico.

5.5.2 Caracterização do som: grave ou agudo

Ao júri foi pedido que respondesse se o som que ouviam, após atravessar as barreiras, lhe causava a sensação de som grave ou agudo. A resposta foi dada logo depois que o júri ouviu o som, com os olhos abertos e com os olhos fechados. Os gráficos a seguir, apresentam os resultados das respostas do júri, referentes a essas sensações, com os olhos abertos e com os olhos fechados.

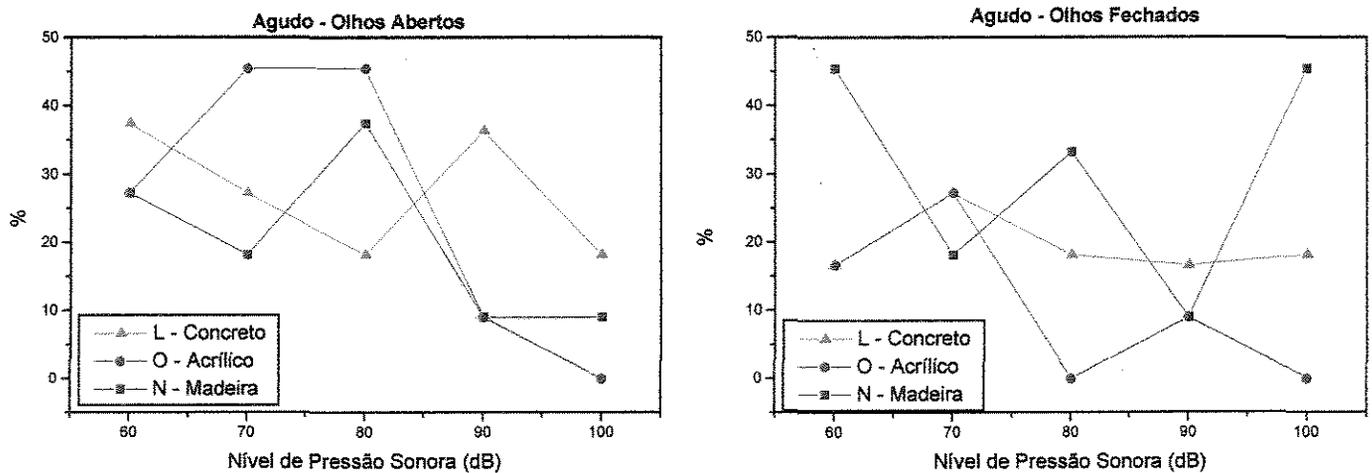


Figura 38: Sensação de som agudo, do júri, com olhos abertos e fechados.

O fato de o júri visualizar ou não a barreira acústica, provocou diferenças na sensação auditiva do ruído após atravessar a barreira. A maioria do júri respondeu que a sensação de som agudo, com os olhos abertos, para o nível de pressão sonora de 60, 90 e 100 dB, é causado pela barreira de concreto. Para os níveis de pressão sonora entre 70 e 80 dB, é a barreira de acrílico que causa, segundo a maioria do júri, a sensação de som agudo. Com os olhos fechados, é a barreira de madeira que causa em três dos cinco valores de nível de pressão sonora, a sensação de som agudo: em 60, 80 e 100dB. Em 70 e 90 dB é a barreira de concreto. Verifica-se que há muita diferença entre as sensações percebidas com os olhos abertos e com os olhos fechados. Somente em 90 dB as sensações com os olhos abertos repetiram-se com os olhos fechados.

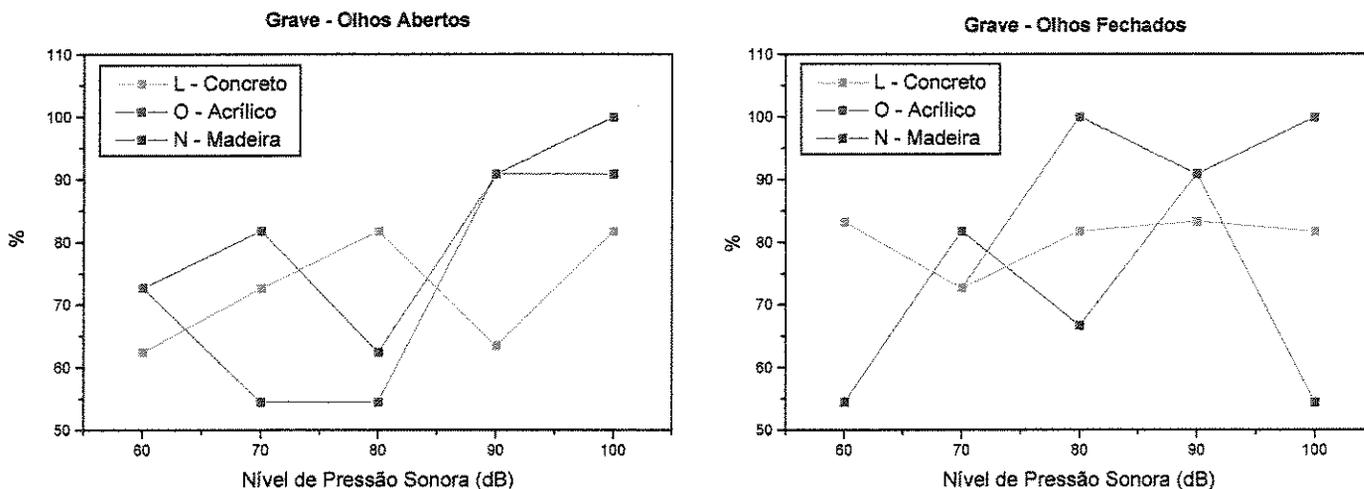


Figura 39: Sensação de som grave, do júri, com olhos abertos e fechados.

Em contrapartida com os gráficos da figura 38, a sensação de som grave, para a maioria do júri, com os olhos abertos, foi causada pela barreira de acrílico nos níveis de pressão sonora de 60, 90 e 100 dB. Em 70 dB foi causada pela barreira de madeira e em 80 dB foi causada pela barreira de concreto. Com os olhos fechados, a barreira de acrílico causa a sensação de som grave em 80, 90 e 100 dB. Em 60 dB, a barreira de concreto causa a sensação de grave e em 80 dB é a barreira de madeira que causa. Portanto, seja com os olhos abertos ou com os olhos fechados, na maioria dos níveis de pressão sonora, é a barreira de acrílico que causa a sensação de som grave.

A variação entre as opiniões em relação à sensação de som grave ou agudo foi muito grande. Era de se esperar que houvessem diferenças porém, esses resultados indicam que a questão de validação pelo júri, da caracterização de som agudo ou grave, pode ser frágil.

Os gráficos das figuras 40 e 41 apresentam as sensações de som grave ou agudo, percebidas pelo júri, provenientes de cada barreira.

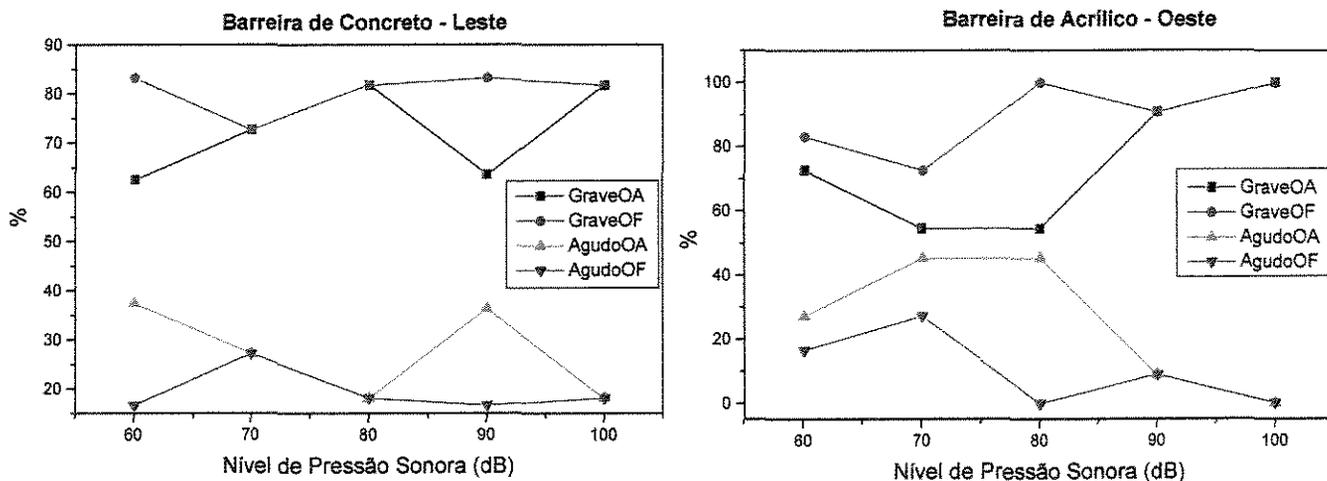


Figura 40: Diferença entre as sensações de som grave e agudo, com os olhos abertos e fechados, para as barreiras de concreto e acrílico.

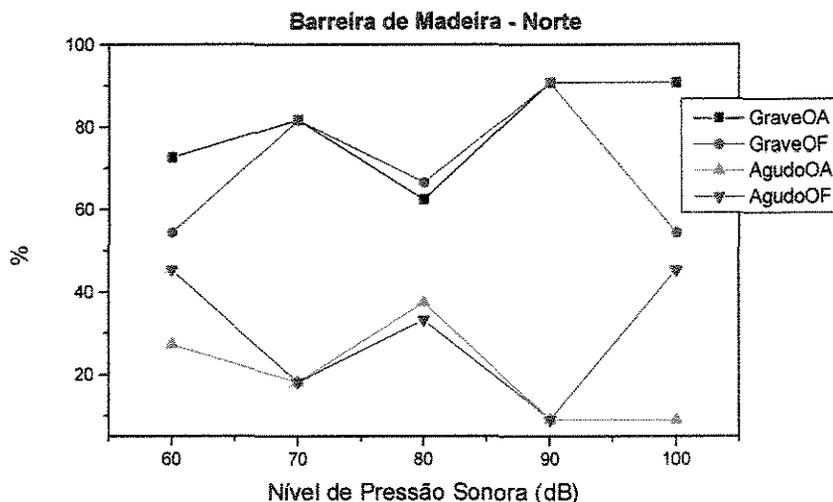


Figura 41: Diferença entre as sensações de som grave e agudo, com os olhos abertos e fechados, para a barreira de madeira.

Pelos gráficos das figuras 40 e 41, verifica-se que sensação de som grave, seja com os olhos abertos ou fechados, é sentido pela maioria dos indivíduos que compuseram o júri, para todas as barreiras. Por estes gráficos tornam-se válidas a caracterização do som percebido como agudo ou grave pois, está clara a opinião do júri em relação à sensação de som agudo ou grave.

5.5.3 Caracterização do som: nítido ou abafado

Ao júri também foi pedido que respondesse se o som que ouviam, após atravessar as barreiras, lhe causava a sensação de ser um som nítido ou abafado. A avaliação também ocorreu com os olhos abertos e com os olhos fechados. Os gráficos referentes às respostas do júri, sobre essas sensações, são apresentados a seguir.

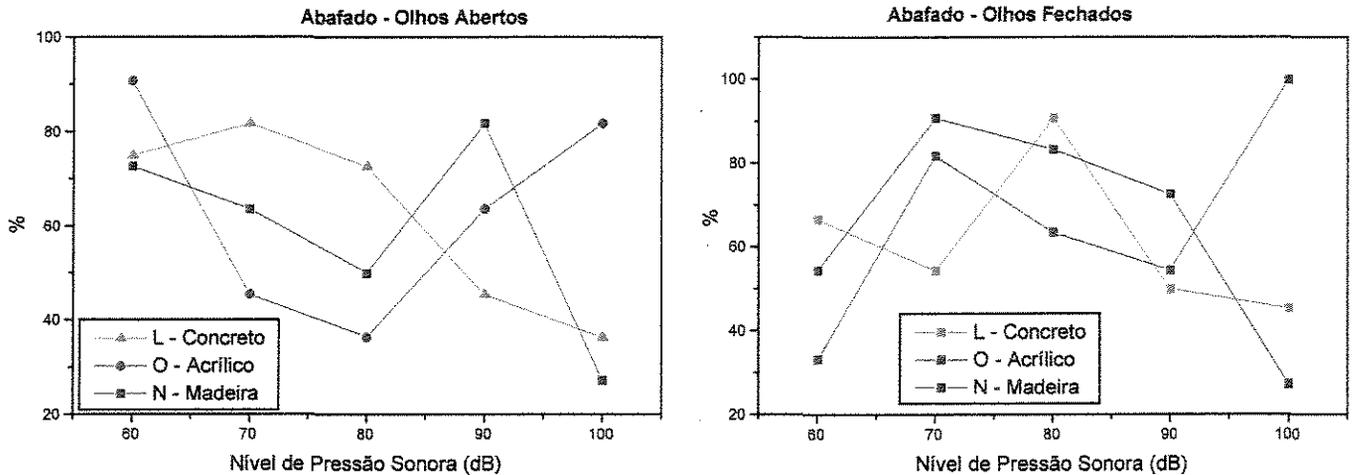


Figura 42: Sensação de som abafado, do júri, com olhos abertos e fechados.

Os gráficos da figura 42, mostram que, com os olhos abertos, a sensação de som abafado é causada, pela maioria dos indivíduos que compõem o júri, pela barreira de acrílico, em 60 e 100 dB, pela barreira de concreto em 70 e 80 dB e, pela barreira de madeira em 90 dB. Com os olhos fechados, a maioria dos indivíduos respondeu que a sensação de som abafado é causada pela barreira de concreto em 60 e 80 dB, pela barreira de acrílico em 100 dB e pela barreira de madeira em 70 e 90 dB. Verifica-se que há muitas diferenças entre as respostas obtidas da avaliação do júri, com os olhos abertos e com os olhos fechados, para a sensação de som abafado.

A figura 43 apresenta os gráficos referentes às respostas do júri, quanto à percepção de som nítido.

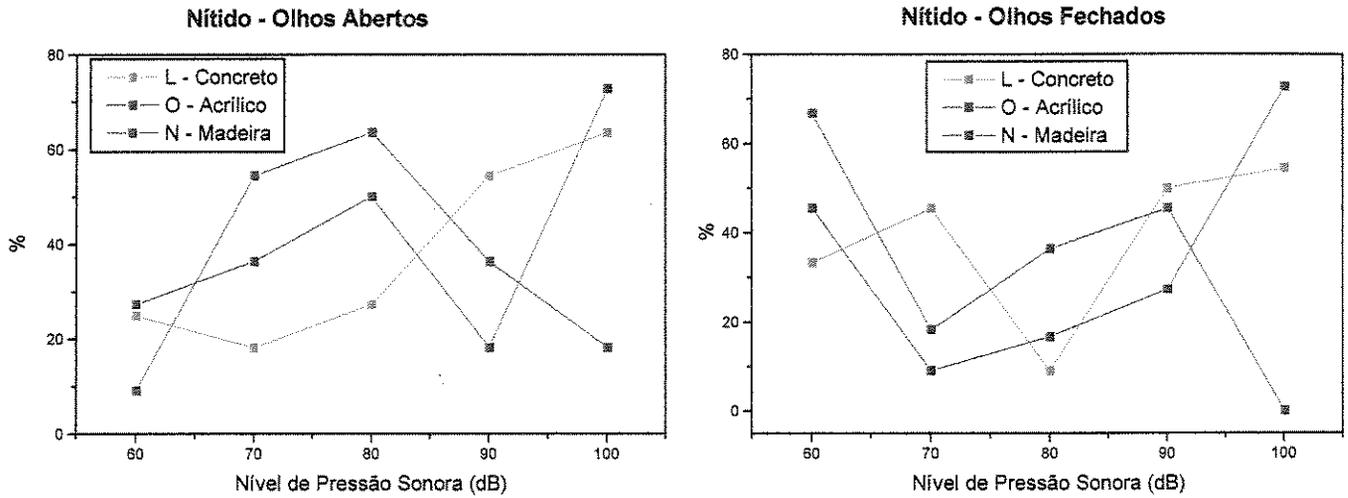


Figura 43: Sensação de som nítido, do júri, com: (a) olhos abertos e (b) olhos fechados.

A figura 43 mostra que, com os olhos abertos, a sensação de som nítido foi causada pela barreira de concreto em 90 dB, pela barreira de acrílico em 70 e 80 dB e pela barreira de madeira em 100 dB. Com os olhos fechados, a sensação de som nítido foi causada pela barreira de concreto em 70 e 90 dB, pela barreira de acrílico em 60 e 80 dB e pela barreira de madeira em 100 dB. A sensação causada pela barreira de madeira repetiu-se com os olhos abertos e com os olhos fechados.

Mais uma vez, nota-se grande variação nas respostas do júri a respeito da sensação percebida do som, após atravessar as barreiras. E, mais uma vez, fica a questão de se deve caracterizar determinado som como nítido ou abafado. Como foi feito com a sensação agudo e grave, foram feitos gráficos das respostas do júri, por barreira. Esses gráficos estão apresentados nas figuras 44 e 45.

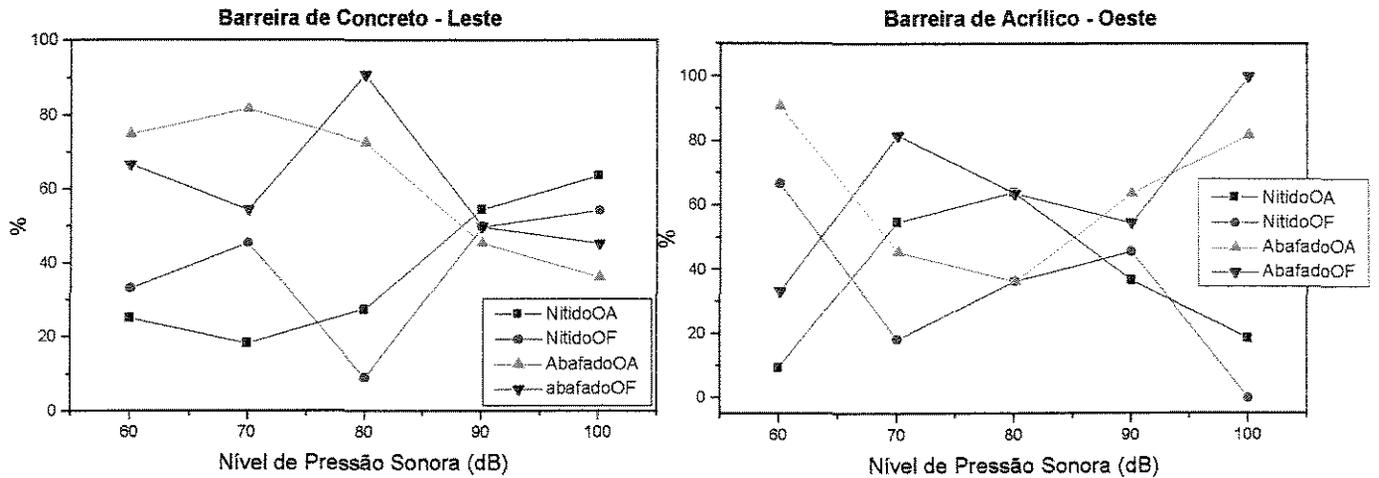


Figura 44: Diferença entre as sensações de som abafado e nítido, com os olhos abertos e fechados, para as barreiras de acrílico e concreto.

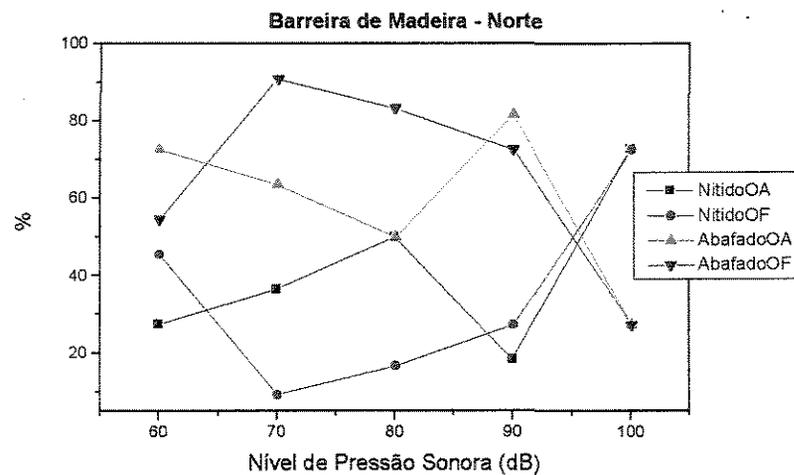


Figura 45: Diferença entre as sensações de som abafado e nítido, com os olhos abertos e fechados, para a barreira de madeira.

Pode-se verificar pelas figuras 44 e 45 que, nas barreiras de concreto e madeira houve uma tendência de caracterização do som como abafado, exceto para o nível de pressão sonora de 100 dB, onde a sensação de som nítido prevaleceu para a barreira de madeira porém, quase se confunde com a sensação de som abafado, para a barreira de concreto. Na barreira de acrílico provocou grande confusão para a caracterização do som. Pelos gráficos das figuras 44 e 45

verifica-se que não há uma definição clara na caracterização do som como nítido ou abafado. Para a caracterização do som como grave ou agudo, houve clareza, quando as respostas foram separadas por barreira, porém, como o mesmo não acontece aqui, verifica-se que os termos “nítido” e “abafado” não são bons adjetivos para caracterizar o som após atravessar as barreiras.

5.6 Espectros em Bark

Como foi mencionado anteriormente, a escala bark apresenta uma relação linear com a característica fisiológica do sistema auditivo humano. Por essa razão, é interessante apresentar os espectros com a escala bark, relativos à direção Sul – sem barreiras e às três barreiras estudadas neste trabalho: concreto, acrílico e placa de madeira. A direção Sul corresponde ao sinal original e, portanto, é a referência para se perceber a atenuação causada pelas barreiras. No anexo C é apresentada uma tabela com a relação entre a escala bark e as frequências centrais em Hz.

Os espectros em bark apresentam a variação no nível de pressão sonora das três barreiras estudadas e da direção Sul-sem barreira que, como foi mencionado, por representar o sinal original é a referência para a avaliação das três barreiras. Por essa razão, os espectros estão apresentados de modo que se faça a comparação entre os barreiras, para os cinco níveis de pressão sonora do sinal original, nomeadamente, 60, 70, 80, 90 e 100 dB.

A figura 46 apresenta os níveis de pressão sonora em função do número de barks relativo ao nível sonoro gerado de 60 dB. A representação foi inicialmente adotada com gráfico de colunas, como é usual em gráficos em função de frequência.

Já a figura 47 representa os mesmos resultados porém, apresentados em gráficos de linha.

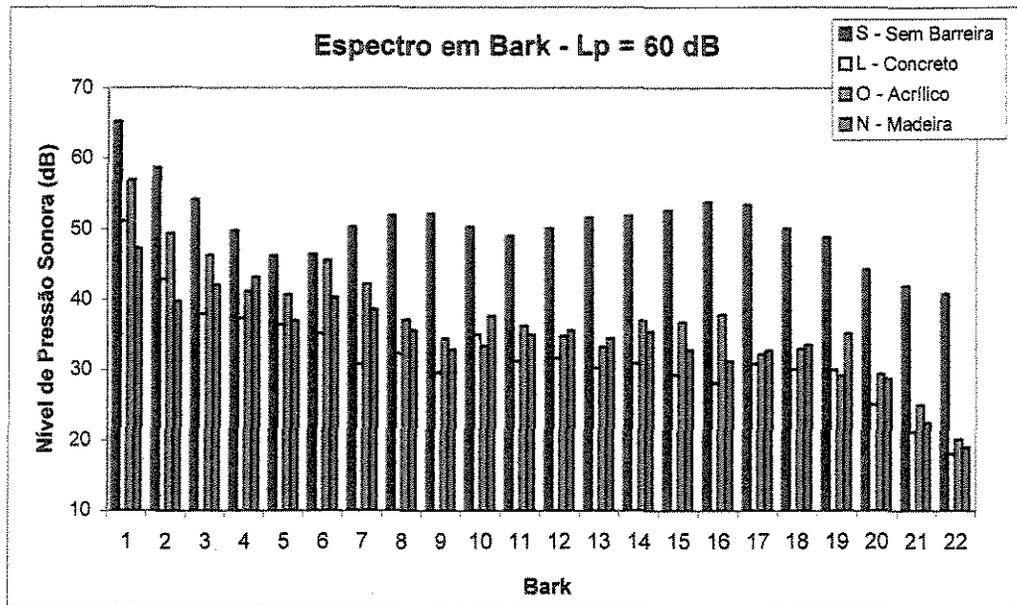


Figura 46: Espectro em bark, colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 60 dB.

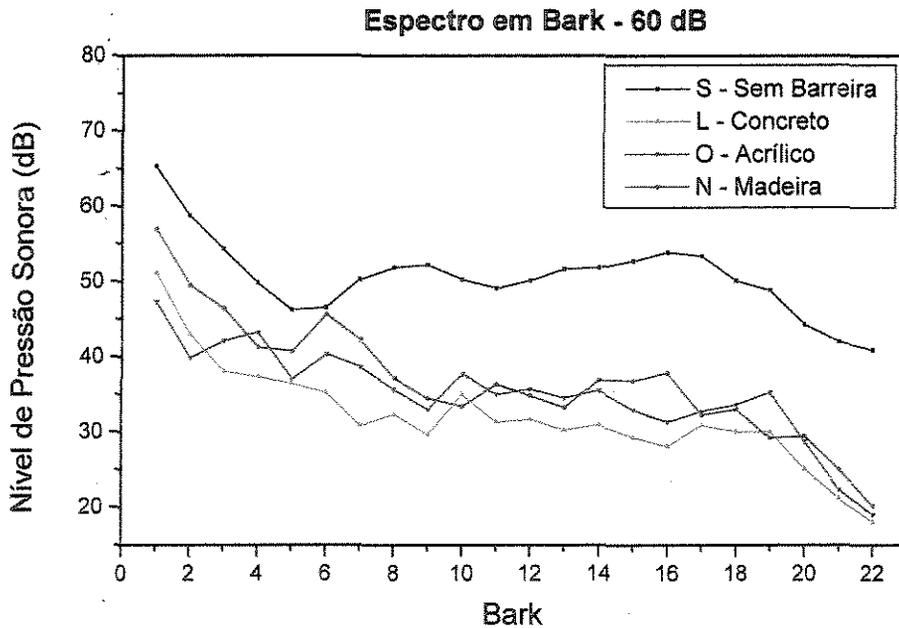


Figura 47: Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 60 dB.

Verifica-se, pela figuras 46 e 47, que o sinal sonoro percebido da direção Sul, sobressai em todo o espectro, sobre os outros sinais, visto que não há barreira para causar atenuação porém, apresentando uma inclinação negativa até 5 barks, isto é, o nível de pressão sonora decai com o aumento de barks. Isto quer dizer que, a percepção do ruído nas baixas frequências, é maior do que nas baixas frequências. O sinal sonoro vindo das outras barreiras, causa a mesma percepção, já que os espectros apresentam uma tendência decrescente. O sinal vindo da barreira de concreto é o que apresenta os menores valores de nível de pressão sonora. Isso quer dizer, que a barreira de concreto é a que provoca maior sensação de atenuação do sinal original.

Em 60 dB, verifica-se ainda, que o sinal sonoro vindo da barreira de madeira está mais atenuado do que o sinal sonoro que passou pela barreira de acrílico.

As figuras 48 e 49 referem-se aos espectros da direção Sul-sem barreira e das três barreiras estudadas, para o nível de pressão sonora do sinal inicial, em 70 dB.

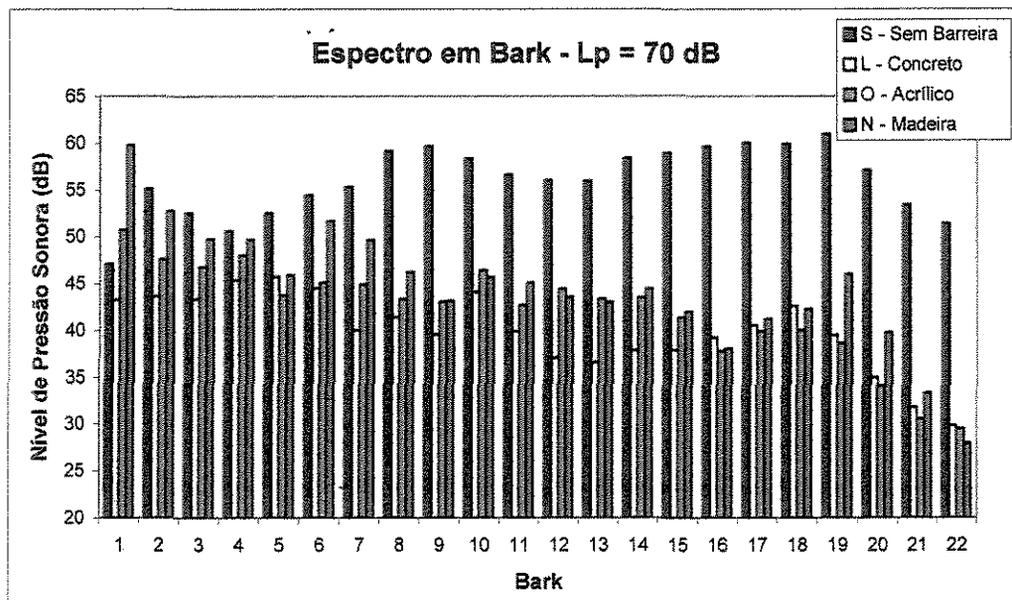


Figura 48: Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 70 dB.

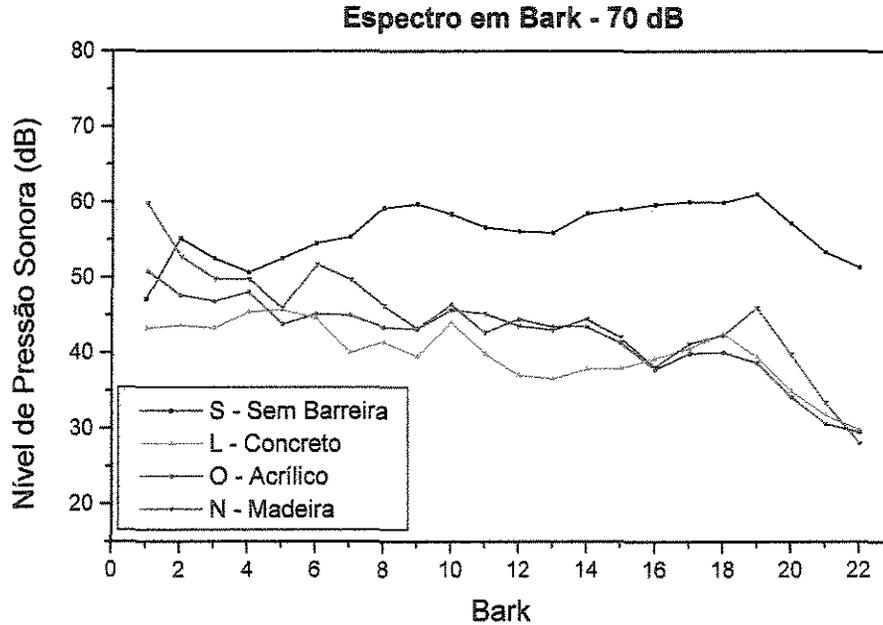


Figura 49: Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 70 dB.

Verifica-se nos espectros das figuras 48 e 49, que a diferença na sensação auditiva entre o sinal inicial (direção Sul-sem barreira) e o sinal vindo das outras barreiras é pequena para os valores mais baixos da escala bark porém, essa diferença aumenta com o aumento da escala bark. A barreira de concreto continua oferecendo os menores níveis de pressão sonora porém, neste nível de pressão sonora do sinal inicial – 70 dB – a barreira de acrílico supera a barreira de madeira, na atenuação. Verifica-se também, que houve uma inclinação bem menor das curvas das três barreiras, se comparadas com os espectros da figura 47, mesmo havendo uma alteração de apenas 10 dB no nível de pressão sonora do sinal inicial. A curva do sinal original (direção Sul-sem barreira), apresenta uma inclinação levemente crescente, diferentemente dos resultados da figura 47, em que a inclinação desse sinal era decrescente. Isso quer dizer, que para os níveis originais de 70 dB do sinal original, a percepção das altas frequências é maior do que das baixas frequências.

As figuras 50 e 51 apresentam os espectros das quatro direções, para o nível de pressão sonora do sinal inicial, em 80 dB.

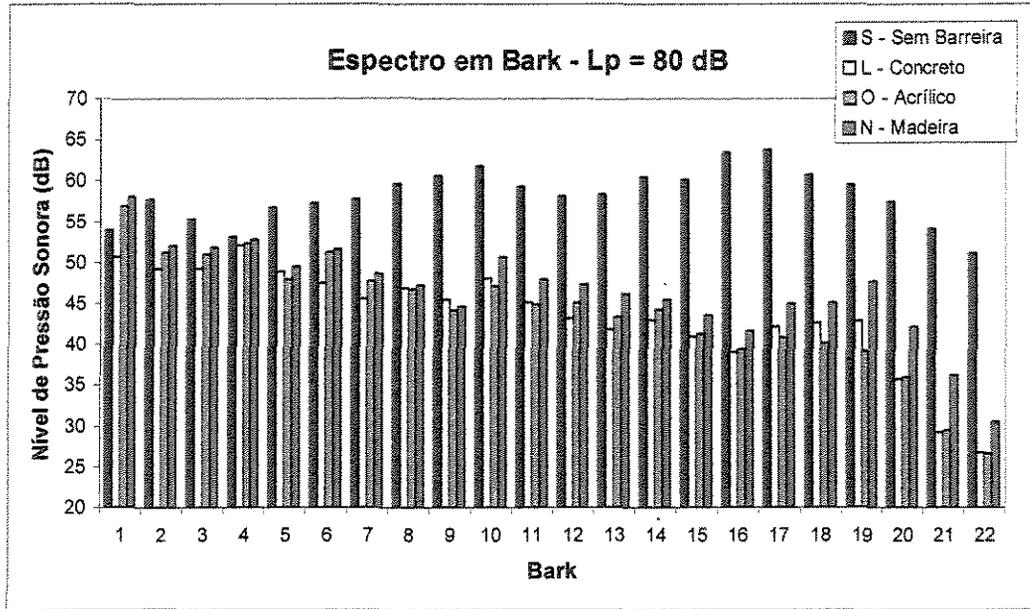


Figura 50: Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 80 dB.

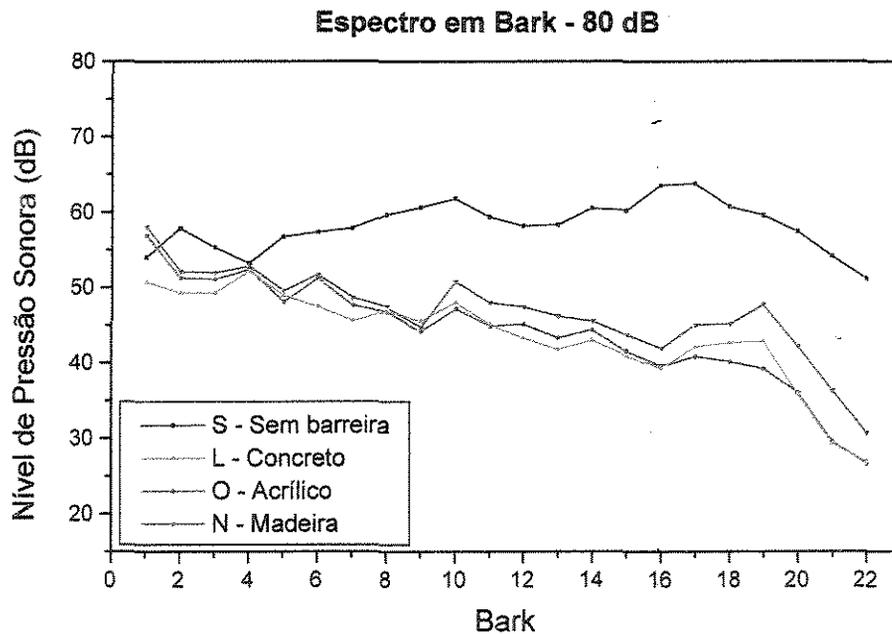


Figura 51: Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 80 dB.

Nos espectros das figuras 50 e 51, verifica-se novamente, que a diferença na sensação auditiva entre o sinal inicial (direção Sul-sem barreira) e as outras barreiras é pequena nos valores mais baixos da escala bark e aumenta com o aumento da escala bark. Para valores mais altos da escala bark, verifica-se que o nível de pressão sonora da barreira de madeira é maior que o das outras duas barreiras. Verifica-se também, que as barreiras de concreto e acrílico, apresentam comportamentos próximos em todo o espectro, apresentando maior atenuação do que a barreira de madeira. O espectro do sinal sonoro original apresenta, como na figura 49, uma inclinação levemente crescente e os espectros referentes às três barreiras apresentam inclinação decrescente. Novamente se repete a inversão na percepção sonora dos sinais porque, enquanto a direção Sul proporciona maior percepção das altas freqüências, com os sinais vindos das três barreiras acontece a percepção inversa: menor nas altas freqüências.

As figuras 52 e 53, apresenta os espectros das quatro direções, para o nível de pressão sonora do sinal inicial, em 90 dB.

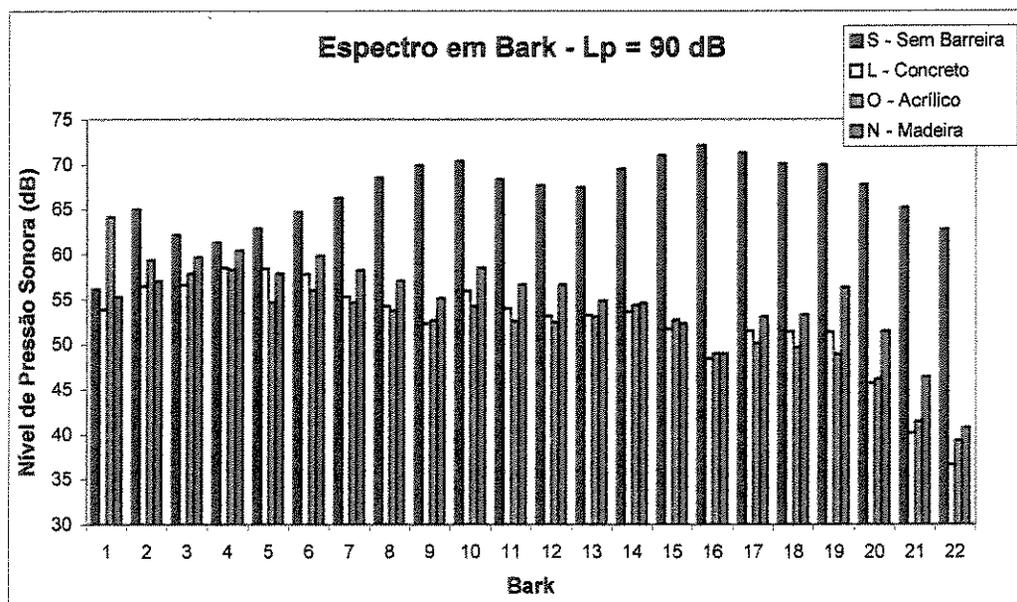


Figura 52: Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 90 dB.

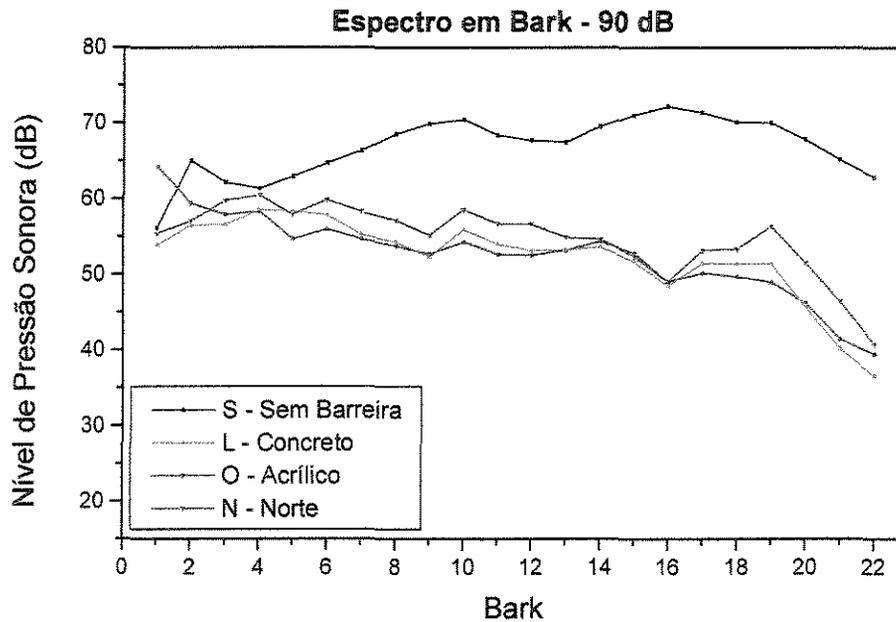


Figura 53: Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 90 dB.

Os espectros das figuras 52 e 53 apresentam inclinação bem menor, se comparada com os espectros da figura 47. A curva do sinal original apresenta, novamente, uma inclinação crescente e as curvas referentes às outras barreiras apresentam uma discreta inclinação decrescente. Diferentemente das outras situações, nesse caso, a barreira de acrílico proporciona menor sensação sonora, que anteriormente era da barreira de concreto e, a barreira de madeira, proporciona maior sensação sonora. No valor 16 da escala bark, que compreende a frequência central de 2900 Hz, as três barreiras apresentam o mesmo nível de pressão sonora. A partir do valor de 16 barks, a barreira de madeira apresenta os valores mais altos do nível de pressão sonora e portanto, provoca maior percepção sonora.

E, finalmente, as figuras 54 e 55, apresentam os espectros das quatro direções, para o nível de pressão sonora do sinal inicial, em 100 dB.

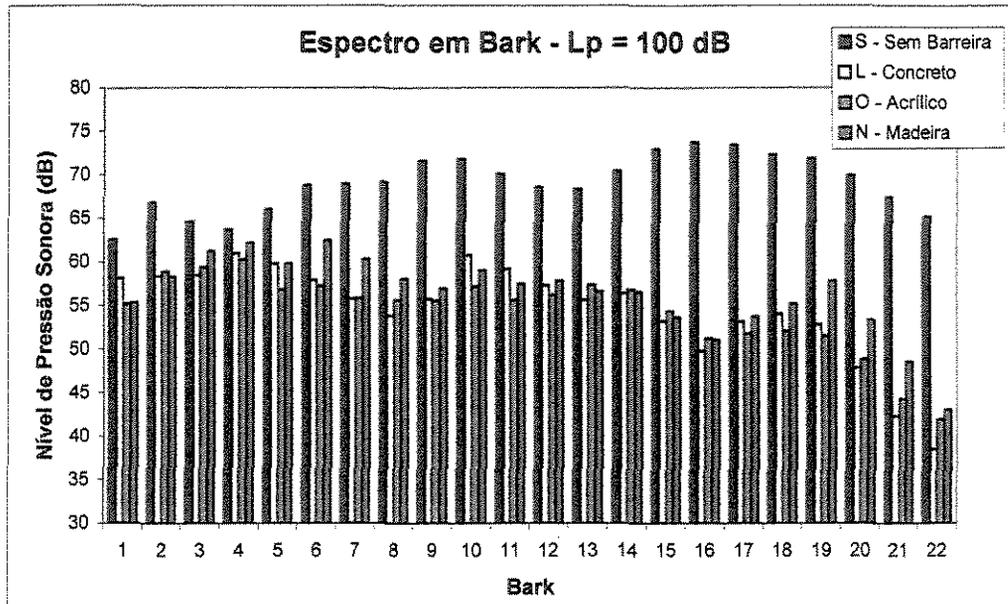


Figura 54: Espectro em bark, em colunas, para a direção Sul – sem barreira e os outros três tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 100 dB.

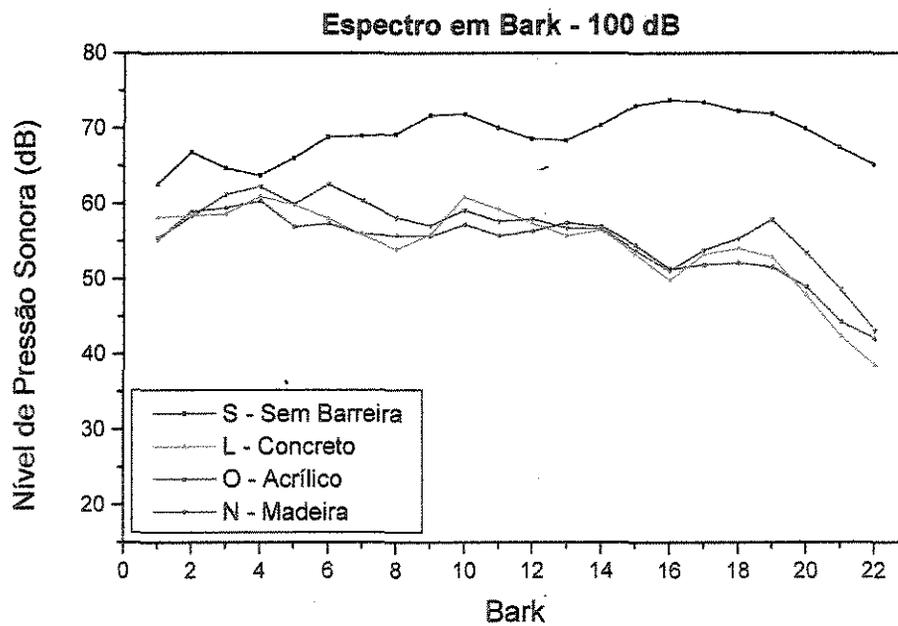


Figura 55: Espectro em bark, em linha, para a direção Sul – sem barreira e os outros quatro tipos de barreiras, referente ao nível de pressão sonora da onda sonora inicial, de 100 dB.

Para o nível de pressão sonora do sinal inicial de 100 dB, verifica-se, como ocorreu em 60 dB, que a sensação auditiva produzida pela direção Sul-sem barreira, superou as outras barreiras, em todo o espectro. As três barreiras apresentaram comportamentos bem próximos em toda a escala bark e uma discreta inclinação decrescente e a direção Sul-sem barreira, apresenta uma inclinação crescente.

Pode-se observar nos espectros das figura 46 a 55, que a sensação auditiva é sempre maior para a direção Sul pois, sem barreira, o sinal não é atenuado e para a barreira de concreto, na maioria das situações experimentais, a atenuação é a menor. Esse fato é confirmado com a avaliação objetiva das barreiras (desconforto psicoacústico). A avaliação subjetiva não confirmou este fato, pois, segundo o júri, a barreira de concreto teve pior desempenho do que a barreira de madeira. Observa-se também, que o nível de pressão sonora nos últimos valores da escala bark, tem uma tendência à diminuição. Essa queda tem sua explicação na diminuição da sensibilidade auditiva nas frequências muito altas.

A única situação em que as curvas dos espectros da direção Sul e das três barreiras apresentaram inclinação decrescente foi em 60 dB, em que a percepção das altas frequências é menor do que das baixas frequências. Também em 60 dB, verifica-se que há um comportamento das curvas das quatro direções diferentemente dos outros níveis de pressão sonora do sinal inicial: nos mais baixos valores da escala bark, as curvas das quatro direções apresentam valores muito altos em relação ao restante do espectro. Este fato pode ser explicado pela influência do ruído de fundo durante as medições.

Em 80 dB, a curva da direção Sul é praticamente constante em todo o espectro bark, causando a mesma percepção sonora em todas as frequências. Isso porque a inclinação é muito discreta.

Somente para os níveis de 60 e 100 dB (figuras 47 e 55) a curva do sinal sonoro original superou as curvas das três barreiras, causando maior percepção sonora, em todo a escala bark.

Para os demais níveis sonoros, a curva da direção Sul “cruza” as curvas das outras barreiras, causando dificuldades na distinção da percepção sonora.

É interessante notar que em todas as figuras, a partir do valor 19 da escala bark que se refere à frequência central de 4800 Hz, as curvas dos sinais sonoros referentes às barreiras de concreto e madeira apresentam uma queda acentuada. O mesmo não acontece com o sinal referente à barreira de acrílico, que também apresenta queda porém, não tão acentuada.

A dificuldade do júri para avaliar a eficiência das barreiras é comprovada pelos espectros das figuras 46 a 55, pois as curvas dos sinais vindos das três barreiras, praticamente se misturam em toda escala bark e, portanto, em todas as frequências.

5.7 Quadro - Resumo

Tipos de Barreiras	Aspectos Objetivos							Aspectos Subjetivos											
	Desempenho Acústico	Desconforto Psicoacústico						Eficiência Olhos Abertos						Eficiência Olhos Fechados					
		60 dB	70 dB	80 dB	80 dB	100dB	Res.	60 dB	70 dB	80 dB	80 dB	100dB	Res.	60 dB	70 dB	80 dB	80 dB	100dB	Res.
	Acrílico	1	2	1	1	3	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	3	2	2
Placa de Madeira	2	3	1	2	2	2	3	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
Concreto	3	1	1	1	1	3	1	2	1	1	2	2	3	1	1	2	3	3	2
Ripas de madeira	4	*	*	*	*	*	*	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

OBS: A numeração indica a ordem relativa do melhor resultado de desempenho, isto é, 1 - melhor resultado e 4 - pior resultado.

O sinal (*) indica que não houve avaliação nesse campo.

Segundo os aspectos objetivos da avaliação, o desempenho acústico associado à perda por inserção, a barreira de acrílico apresenta a melhor característica de atenuação seguida pela barreira de concreto e madeira.

A avaliação objetiva segundo o índice de desconforto psicoacústico apresentou um resultado global indicando que o melhor desempenho (menor desconforto) vai do concreto, passando pelo acrílico até a placa de madeira. É interessante observar que, embora a barreira de acrílico apresenta o melhor desempenho acústico é a barreira de concreto que apresenta as melhores condições para minimizar o desconforto psicoacústico.

Segundo os aspectos subjetivos, as barreiras foram avaliadas em duas condições diferentes: olhos abertos e olhos fechados. Na avaliação de eficiência segundo “olhos abertos”, a barreira de madeira apresenta os melhores valores de desempenho seguida pela barreira de acrílico e de concreto. No caso da eficiência segundo “olhos fechados”, também a madeira representa o melhor desempenho porém, a ordem entre concreto e acrílico, se inverte.

Toda essa análise confirma que o desempenho real das barreiras é diferente do desempenho subjetivo. O júri não identificou a eficiência da barreira de acrílico pelo fato de ser transparente e permitir visualizar a fonte sonora.

Tanto nos aspectos objetivos quanto nos aspectos subjetivos, a barreira de ripas de madeira apresenta os piores resultados.

6. Conclusão

A simulação da atenuação de uma barreira segundo a equação de Maekawa, prevê a atenuação da barreira, por efeito de difração. Os resultados dessa simulação indicaram que a atenuação acontece nas altas frequências e que independe do material que compõe a barreira.

Da avaliação objetiva obtida do cálculo da perda por inserção, a barreira de acrílico apresentou melhor desempenho acústico nas frequências de 63,5, 125, 250 e 8000 Hz. Por esse mesmo cálculo, a barreira de madeira apresentou melhor desempenho acústico nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz e a barreira de concreto na frequência de 4000 Hz. Verifica-se também, que uma boa atenuação pode ser obtida com barreiras com densidade superficial inferior a 10 kg/m^2 .

Pode-se concluir dos resultados, que o material que constitui a barreira é importante no desempenho acústico porém, esse desempenho também depende da frequência da onda sonora.

Da avaliação subjetiva obtida pelos cálculos dos parâmetros psicoacústicos, otimizou-se o desempenho através de um único número que é o índice de desconforto psicoacústico, por nível de pressão sonora do sinal original. Esse índice indicou que o melhor desempenho foi da barreira de acrílico nos níveis de pressão sonora do sinal original de 70, 80 e 100 dB e a barreira de concreto apresentou o melhor desempenho em 60 e 90 dB. A barreira de madeira não apresentou menor desconforto psicoacústico em nenhum dos níveis de pressão sonora do sinal original estudados.

É interessante verificar que, embora a barreira de acrílico apresenta o melhor desempenho acústico, é a barreira de concreto que apresenta as melhores condições para minimizar o desconforto psicoacústico, seguida pela barreira de acrílico e finalizando com a barreira de madeira, que apresenta o pior índice de desconforto psicoacústico. Se o nível de pressão sonora do sinal incidente sobre as barreiras for de 70 dB, o material que constitui a barreira, será independente do índice de desconforto psicoacústico, visto que todas as barreiras apresentam o mesmo comportamento.

Quanto aos aspectos subjetivos, verifica-se que a visão da fonte sonora influencia na sensação de percepção do sinal sonoro. Tanto com olhos abertos como com olhos fechados, a maioria do júri indicou a barreira de madeira como a que apresenta melhor eficiência na atenuação do sinal original. Com os olhos abertos, o júri indicou a barreira de acrílico como mais eficiente e a barreira de concreto como menos eficiente. Entretanto, com os olhos fechados, a situação se inverte.

Kurze (1974) afirmou que a obstrução visual da fonte sonora causa consideráveis efeitos psicológicos e, é também confirmado neste trabalho. O fato da barreira de acrílico ser transparente e permitir visualizar a fonte sonora causou, no júri, a sensação de que a barreira apresentava um desempenho acústico menor do que o desempenho real. E, em relação às barreiras de concreto e madeira, pelo fato de obstruírem a visão da fonte sonora, causou um desempenho acústico maior do que o desempenho real.

Este trabalho confirmou que a melhor avaliação objetiva de desempenho acústico de barreira ao ar livre é obtida pelo cálculo da perda por inserção e não perda por transmissão sonora. Isso porque a primeira inclui os efeitos da difração na atenuação. Se uma partição fosse composta pelos materiais das barreiras, segundo sua densidade superficial, a barreira de concreto apresentaria maior atenuação, seguida pelas barreiras de acrílico e madeira e, pela avaliação do desempenho acústico em campo, a barreira de concreto apresentou os piores resultados.

Embora a perda por inserção e o desconforto psicoacústico representem avaliações objetivas de desempenho acústico de barreiras, os resultados obtidos diferem entre si. Essa divergência baseia-se no fato de que o desconforto psicoacústico abrange os parâmetros psicoacústicos, sendo o principal deles, o loudness (ZWICKER, 1987). No cálculo do índice de desconforto psicoacústico, o loudness apresenta peso maior do que os outros parâmetros e o sharpness, peso menor.

Os parâmetros psicoacústicos são uma forma de representação objetiva de sensações subjetivas de um sinal sonoro. Por essa razão, torna-se viável a caracterização do desempenho das barreiras

por qualidade sonora. Essa viabilização depende de normalização de todos os parâmetros psicoacústicos. Atualmente, somente o loudness possui norma específica e por isso, os resultados do loudness, em ambos os softwares, foram coerentes.

A avaliação subjetiva do desempenho pode diferir do desempenho real porque nesse tipo de avaliação pode-se levar em conta vários fatores como por exemplo, os efeitos psicológicos causados pela obstrução da fonte sonora e os adjetivos utilizados para caracterizar a sensação sonora como exemplo, agudo/grave e nítido/abafado.

7. Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 14313 *Barreiras Acústicas para vias de Tráfego: Características construtivas*, 1999.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE, INC. New York, ANSI S12.8-1998 *Methods for Determination of the Insertion Loss of Outdoor Noise Barriers*, 1998.

AYLOR, Donald E., *Noise reduction by vegetation and ground* *J. Acoust. Soc. Am.*, EUA, v.51, no.1 part 2, p.197-205, 1972.

AYLOR, Donald, *Perception of noise transmitted through barriers*, *J. Acoust. Soc. Am.*, v.59, no.2, p.397-400, fev. 1976.

BERANEK, L. L., VÉR, I. L. *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*. New York: John Wiley and Sons, 1992.

BERG, Richard E., STORK, David G. *The Physics of Sound*. 2ed. New Jersey : Prentice Hall. 1995.

BUGALHO, A Psicoacústica. Disponível em http://www.geocities.com/armando_bugalho/psicoacustica.html#que. Acesso em 17/08/2001.

DAIGLE, Gilles A. *Technical Assessment of the Effectiveness of Noise Control*, *Noise/News International*, v.6, no. 1, p.11-36, Set. 1999.

DUHAMEL, D., SERGENT, P., *Sound propagation over noise barriers with absorbing ground*, *J. Sound and Vib.*, v. 218, no. 5, p.799-823, 1998.

EMBLETON, Tony F. W., *Line integral theory of barrier attenuation in the presence of the ground*, **J. Acoust. Soc. Am.**, v.67, no.1, p.42-45, jan. 1980.

FANGER, P.O., *Thermal Comfort, analysis and applications in environmental engineering*, New York : McGraw-Hill, 1972.

FASTL, H., *The psychoacoustic of sound-quality evaluation*, **Acustica**, v. 83, no. 5, p.754-764, set./out. 1997.

FASTL, H., *Psychoacoustics and sound quality metrics*, In: Sound Quality Symposium, Proceedings. 1998, Ypsilanti, Michigan.

GERGES, S. N. Y., *Ruído: Fundamentos e Controle*, Florianópolis: NR Ed., 2e., 2000.

HARRIS, Cyril M., *Absorption of sound in air versus humidity and temperature*, **J. Acoust. Soc. Am.**, v.40, no.1, p.148-159, fev. 1966.

HARRIS, Cyril M., *Handbook of Acoustical Measurements and Noise control*, New York: McGraw Hill, Inc., 3e. 1979.

HASSAL, J.R., ZAVERI, K. *Acoustic Noise Measurements*. Denmark: Brüel & Kjaer, 1979

HECHT, Eugene, *Óptica*. Trad. José Manuel N.V. Rebordão. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 1991.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 10847 – **Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types**. 1997(E), 18p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 532 – **Acoustics – Method for calculating loudness level**. 1975(E), 18p.

ISEI, T. et al. *Noise reduction by barrier on finite impedance ground*, **J. Acoust. Soc. Am.**, v.67, no.1, p.46-58, Jan. 1980.

KURZE, U. J., ANDERSON, G. S. *Sound attenuation by barrier*, **Applied Acoustics**, v.4, p.35-54, 1971.

KURZE, Ulrich J., *Noise reduction by barriers* **J. Acoust. Soc. Am.**, v.55, no.3, p.504-518, mar. 1974.

LAM, Y. M., *Using Maekawa's chart to calculate finite length barrier insertion loss*, **Appl. Acoust.**, v. 42, no. 1, p.29-40, 1994.

MAEKAWA, Z., *Noise reduction by screens* **Applied Acoustics**, v.1, p.157- 173, 1968.

MAEKAWA, Z., *Simple estimation methods for noise reduction by various barriers*, **Rivista Italiana Di Acustica**, v.XI, no.3, p. 73 – 98, 1987.

MAEKAWA, Z., LORD, P. **Environmental and Architectural Acoustics**, Great Britain: ST. Edmundsbury Press, 1994.

MAGRAB, Edward B. **Environmental Noise Control**. New York: John Wiley & Sons, 1975.

MARROQUIN, M. *Using Sound Quality in the Automotive Industry*, In: V SIBRAV, Anais, Agosto 1999.

NICOLAS, J., EMBLETON, Tony F. W., PIERCY, J.E., *Precise model measurements versus theoretical prediction of barrier insertion loss in presence of the ground*, **J. Acoust. Soc. Am.**, v.73, no.1, p.44-54, jan. 1983.

RATHE, E.J., Note on common problems of sound attenuation, *J. Sound Vib.*, v.10, no.3, p.472-479, 1969.

RESNICK, R., HALLIDAY, D. *Física*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1983. v. 2.

SCHOLES, W. E. et al. *Field Performance of a Noise Barrier* *J. Sound Vib.* v.16, p.627-642, 1971.

SILVA, P. Martins. *Conforto Acústico em Edifícios Urbanos. Relatório Parcial, Avaliação de Estímulos Sonoros*, LNEC, Lisboa, 1970.

SILVA, P. Martins. *Acústica de Edifícios*. LNEC, Lisboa, 1978.

SMITH, B. J. et al. *Acoustics and Noise Control*. Londres: Longman, 1982.

ZUCHERWAR, Allan J., MEREDITH, Roger, W., *Low-frequency absorption of sound in air*, *J. Acoust. Soc. Am.*, v.78, no.3, p.946-955, set. 1985.

ZWICKER, E., FASTL, H. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Berlin: Springer, 1999.

ZWICKER, Eberhard, *Meaningful noise measurement and effective noise reduction*, *Noise Control Engineering Journal*, v.29, no.3, Nov.-Dez.1987.

ZWICKER, E., TERHARDT, E., *Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as a function of frequency*, *J. Acoust. Soc. Am.*, v.68, no.5, p.1523-1525, nov. 1980.

Para desenvolver os cálculos da atenuação por difração, Maekawa utilizou as ferramentas da teoria da difração de Fresnel-Kirchhoff . (MAEKAWA, 1968; MAEKAWA, 1987).

Segundo o tratamento de raiz empírica devido a Maekawa, tem-se para a atenuação de barreira semi plana:

$$A_t = -10 \log |DF|^2 \quad (01)$$

Sendo que DF é o fator de difração e o sinal negativo é referente à barreira não absorvedora.

O fator de difração é calculado por meio dos integrais de Fresnel.

$$\begin{aligned} C(u_1) &= \int_0^{u_1} \cos\left(\frac{\pi u^2}{2}\right) du \\ S(u_1) &= \int_0^{u_1} \text{sen}\left(\frac{\pi u^2}{2}\right) du \end{aligned} \quad (02)$$

Considerando uma abertura retangular em uma parede, limitada por x_1 e x_2 , y_1 e y_2 , por onde se propaga um som, que sai de uma fonte S e vai até o receptor P, a perturbação que chega ao ponto do receptor é complexa e definida por:

$$E_p = B \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} dy e^{ikf(x,y)} \quad (03)$$

onde, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda; $f(x,y)$ é uma função das coordenadas da abertura e das posições de S e P; B é uma função da geometria de S, P, da abertura e do comprimento de onda, λ .

A importância dos integrais de Fresnel está no fato de que o integral:

$$\int_0^u e^{\frac{i\pi u^2}{2}} du = C(u) + i S(u) \quad (04)$$

tem a mesma forma da expressão da perturbação que chega ao receptor P e pode ser calculada com o auxílio de tabelas para obter os valores de $C(u_1)$, $C(u_2)$, $S(u_1)$, etc. (HECHT,1991)

Segundo Maekawa (1987), o fator de difração pode ser definido por:

$$\begin{aligned}
 |DF| &= -\frac{i}{2} \int_{u_1}^{u_2} \exp\left(i \frac{\pi}{2} u^2\right) du \int_{v_1}^{v_2} \exp\left(i \frac{\pi}{2} v^2\right) dv \\
 &= -\frac{i}{2} \{ [C(u_2) - C(u_1)] + i[S(u_2) - S(u_1)] * [C(v_2) - C(v_1)] + i[S(v_2) - S(v_1)] \}
 \end{aligned} \tag{05}$$

Quando há uma barreira semi infinita entre a fonte sonora e o receptor, tem-se:

$$\begin{aligned}
 C(0) &= S(0) = 0 \\
 C(\infty) &= S(\infty) = \pm 0,5
 \end{aligned} \tag{06}$$

e, portanto, o fator de difração, da equação (05) passa a ser:

$$|DF| = -\frac{i(1+i)}{2} \left\{ \frac{1}{2} - C(v_1) + i \frac{1}{2} - S(v_1) \right\} \tag{07}$$

Como a atenuação devido à barreira semi plana é dada pela equação (01), finalmente tem-se:

$$A_t = -10 \log \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v_1) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} - S(v_1) \right]^2 \right\} \tag{08}$$

A equação (08) veio da teoria da difração da óptica. Infelizmente, uma boa aproximação na difração óptica não garante a mesma eficácia na acústica, porque na óptica, o comprimento de onda é muito pequeno, enquanto que as distâncias entre a fonte, a barreira e o observador são muito grandes, resultando em condições opostas às encontradas na acústica. Esta é a razão porque dados empíricos são utilizados para os projetos das barreiras acústicas.

Segundo Maekawa (1968) e Rathe (1969), o número de Fresnel N, é dado por:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \tag{09}$$

onde, λ é o comprimento de onda e $\delta = \pm(A+B-d)$ é a diferença de trajetória, conforme a figura 1. δ é positivo na zona de sombra e negativo na zona de brilho.

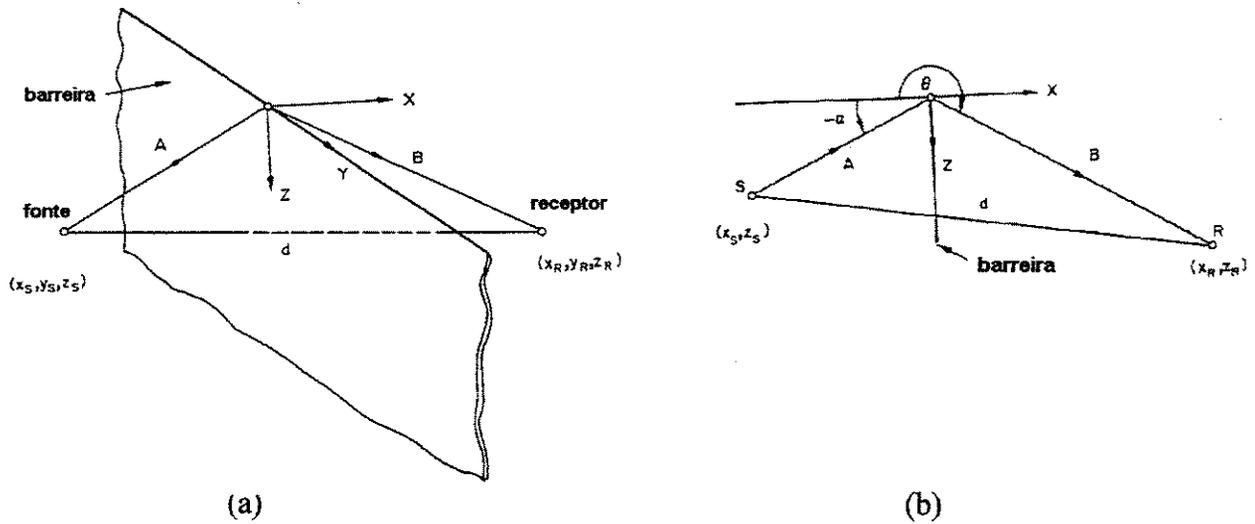


Figura 1: (a) Perspectiva vista da barreira, (b) projeção no plano xz. [FONTE: adaptado de KURZE e ANDERSON, 1971].

A curva de atenuação em função do número de Fresnel, sugerida empiricamente por Maekawa, está apresentada na figura 2.

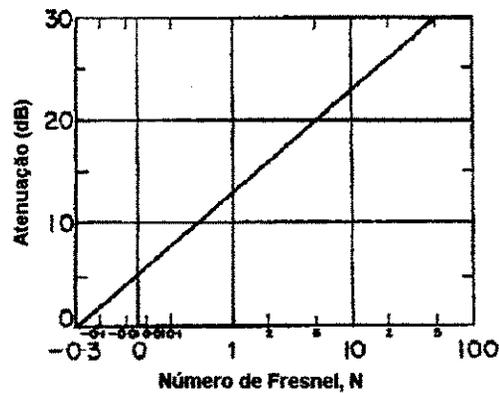


Figura 2: Atenuação de uma barreira acústica em função do número de Fresnel. [FONTE: adaptado de RATHE, 1969].

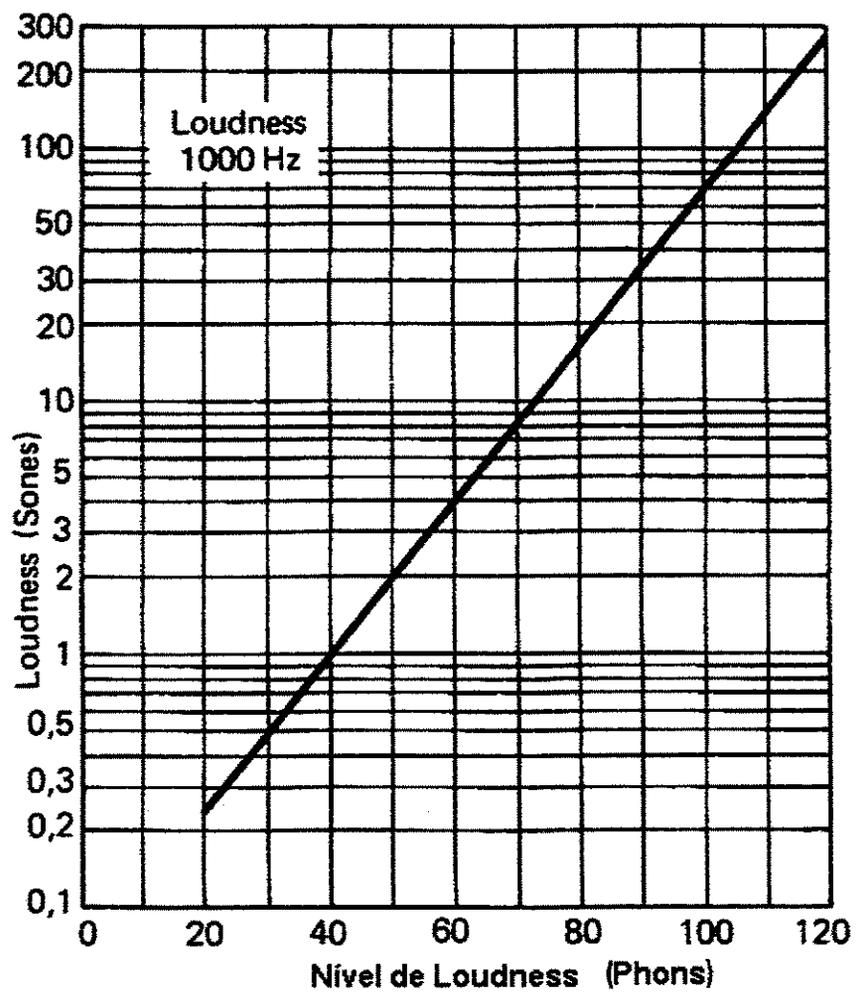
A variável N é relacionada com v por meio de $v = \sqrt{N}$. Na região $N > 1$, a atenuação é expressa por:

$$A_t = 10 \log(20 N) \quad (10)$$

que é o primeiro termo da aproximação assintótica da teoria geométrica da difração de Keller (MAEKAWA, 1987). Para tomar todos os valores de N, tem-se:

$$A_t = 5 + 10 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \quad (11)$$

Relação entre Sones e Phons

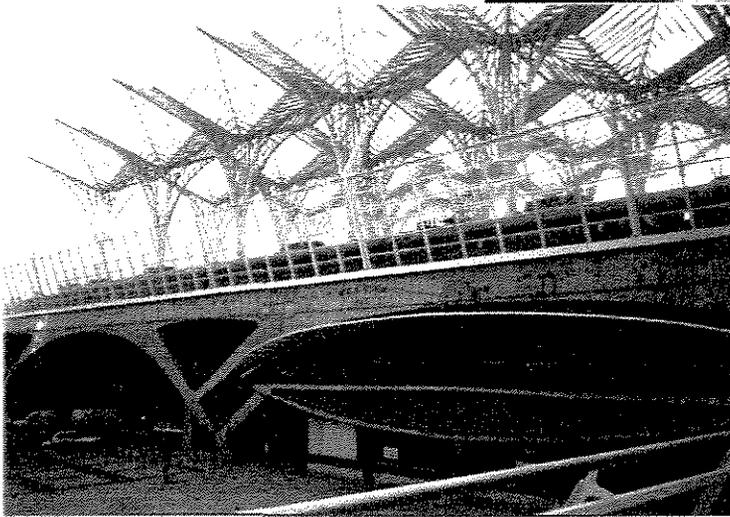


[Fonte: adaptado de HASSAL, 1979]

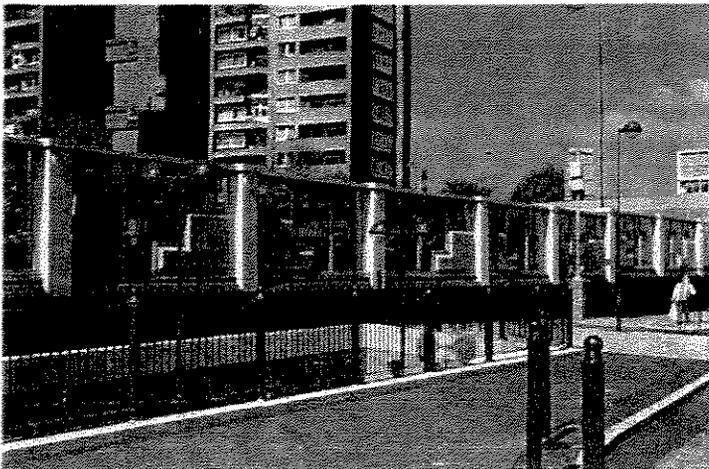
Relação entre escala em Bark e frequência em Hz.

Banda Crítica (Bark)	Frequência Central (Hz)	Largura da Banda (Hz)
1	50	100
2	150	100
3	250	100
4	350	100
5	450	100
6	570	120
7	700	140
8	840	150
9	1000	160
10	1170	190
11	1370	210
12	1600	240
13	1850	280
14	2150	320
15	2500	380
16	2900	450
17	3400	550
18	4000	700
19	4800	900
20	5800	1100
21	7000	1300
22	8500	1800
23	10500	2500
24	13500	3500

[Fonte: adaptado de HASSAL, 1979]



Estação Oriente, Lisboa-Portugal.
Barreira de material transparente ao
lado da ferrovia.



Material transparente e material opaco
formam a barreira.

A102, Blackwall Tunnel, Londres.

[FONTE: Kotzen e English, 1999]

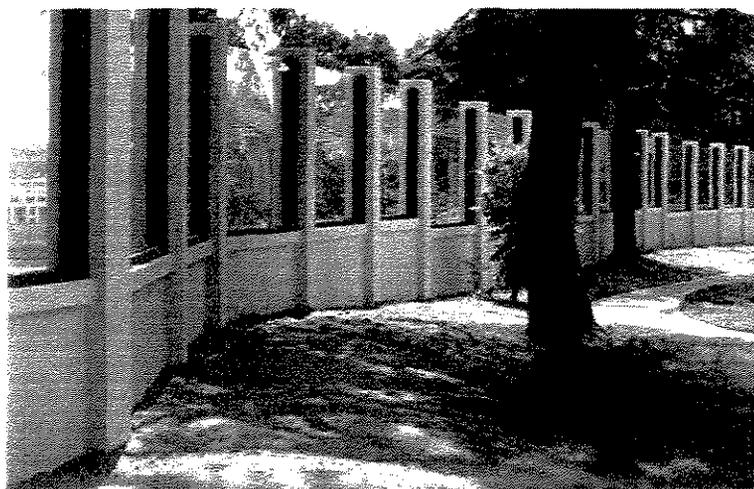
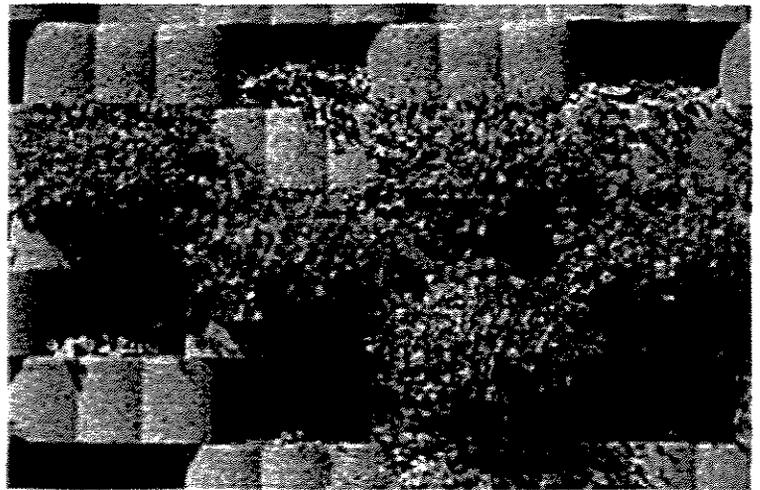


Barreira de concreto

A2 Hertongenbosch, Holanda.

[FONTE: Kotzen e English, 1999]

Barreira de concreto com plantas, ao lado de ferrovia, na Suíça. [FONTE: Kotzen e English, 1999]



Barreira de concreto e material Transparente.

[FONTE: www.fhwa.dot.gov/environment/noise/T82.htm – photo#2135 (acessado em 22/10/01)]

TABELA 1 - Ruído de Fundo, em dB - Sem Barreiras (figura 18)

Hz	Sul	Leste	Norte	Oeste
63,5	54,0	56,5	56,0	54,9
125	47,6	55,0	46,7	48,1
250	37,7	34,7	36,0	37,3
500	34,1	31,6	33,9	34,8
1000	31,3	31,8	36,0	32,7
2000	27,0	26,2	28,5	29,9
4000	21,2	22,3	-	27,8
8000	22,1	23,5	-	26,5

TABELA 2 - Ruído de Fundo, em dB(A) - Sem Barreiras (figura 19)

Hz	Sul	Leste	Norte	Oeste
63,5	27,8	30,3	29,8	28,7
125	31,5	38,9	30,6	32,0
250	29,1	26,1	27,4	28,7
500	30,9	28,4	30,7	31,6
1000	31,3	31,8	36,0	32,7
2000	28,2	27,4	29,7	31,1
4000	22,2	23,3	-	28,8
8000	21,0	22,4	-	25,4

TABELA 3 - Ruído Branco, em dB - Sem Barreiras (figura 20)

Hz	Sul	Leste	Norte	Oeste
63,5	71,9	73,2	73,8	71,7
125	87,2	86,9	87,5	87,4
250	87,4	87,4	86,9	86,7
500	90,8	92,8	96,2	92,0
1000	97,0	96,5	97,3	97,5
2000	95,7	96,8	96,2	96,3
4000	94,9	95,0	95,1	93,5
8000	83,9	82,0	85,7	81,0

TABELA 4 - Ruído Branco, em dB(A) - Sem Barreiras (figura 21)

Hz	Sul	Leste	Norte	Oeste
63,5	45,7	47	47,6	45,5
125	71,1	70,8	71,4	71,3
250	78,8	78,8	78,3	78,1
500	87,6	89,6	93,0	88,8
1000	97,0	96,5	97,3	97,5
2000	96,9	98,0	97,4	97,5
4000	95,9	96,0	96,1	94,5
8000	82,8	80,9	84,6	79,9

TABELA 5 - Ruído de Fundo, em dB - Com Barreiras (figura 23)

Hz	S - Sem Barreira	L - Concreto	O - Acrílico	N - Ripas de Madeira	N - Madeira
63,5	58,6	61,1	57,1	63,5	56,5
125	58,9	58,2	57,7	58,9	48,7
250	42,2	40,5	43,8	45,5	44,6
500	33,5	34,3	37,5	31,8	33,1
1000	37,2	39,0	44,5	33,0	34,3
2000	38,5	33,1	36,9	33,7	29,6
4000	40,9	28,6	39,1	33,7	27,9
8000	37,0	23,0	37,9	33,1	25,4

TABELA 6 - Ruído de Fundo, em dB(A) - Com Barreiras (figura 24)

Hz	S - Sem Barreira	L - Concreto	O - Acrílico	N - Ripas de Madeira	N - Madeira
63,5	32,4	34,9	30,9	37,3	30,3
125	42,8	42,1	41,6	42,8	32,6
250	33,6	31,9	35,2	36,9	36,0
500	30,3	31,1	34,3	28,6	29,9
1000	37,2	39,0	44,5	33,0	34,3
2000	39,7	34,3	38,1	34,9	30,8
4000	41,9	29,6	40,1	34,7	28,9
8000	35,9	21,9	36,8	32,0	24,3

TABELA 7 - Ruído Branco, em dB - Com Barreira (figura 25)

Hz	S - Sem Barreira	L - Concreto	O - Acrílico	N - Ripas de Madeira	N - Placa de Madeira
63,5	72,6	64,4	67,8	73,1	66,7
125	87,6	73,9	78,7	89,1	76,9
250	87,9	78,4	79,7	89,0	80,3
500	89,5	84,6	82,0	92,1	82,8
1000	97,4	81,0	79,1	96,4	77,3
2000	96,0	77,0	76,8	95,2	72,7
4000	95,7	70,9	68,6	92,6	72,1
8000	85,6	56,9	57,8	82,1	64,1

TABELA 8 - Ruído Branco, em dB(A) - Com Barreiras (figura 26)

Hz	S - Sem Barreira	L - Concreto	O - Acrílico	N - Ripas de Madeira	N - Placa de Madeira
63,5	46,4	38,2	41,6	46,9	40,5
125	71,5	57,8	62,6	73,0	60,8
250	79,3	69,8	71,1	80,4	71,7
500	86,3	81,4	78,8	88,9	79,6
1000	97,4	81,0	79,1	96,4	77,3
2000	97,2	78,2	78,0	96,4	73,9
4000	96,7	71,9	69,6	93,6	73,1
8000	84,5	55,8	56,7	81,0	63,0

TABELA 9 - Atenuação (dB) em função da Frequência (figura 28)

Hz	Eq. Maekawa	L - Acrílico	O - Concreto	N - Ripas de Madeira	N - Madeira
63,5	5,6	8,9	4,0	0,8	7,1
125	6,0	13,1	8,8	0,0	10,6
250	6,8	9,1	7,1	0,0	6,6
500	7,9	8,3	10,0	4,1	13,4
1000	9,2	15,6	18,5	0,9	20,0
2000	10,7	19,8	19,5	1,0	23,5
4000	12,2	24,2	24,9	2,5	23,0
8000	13,7	25,1	23,2	3,6	21,6

TABELA 10 – Loudness (Figura 29)

dB	S – Sem Barreira	L – Concreto	O - Acrílico	N – Placa de Madeira
60	2,69	1,78	1,87	1,89
70	17,51	3,21	3,35	3,12
80	23,52	3,98	4,33	4,27
90	36,86	6,84	7,33	6,69
100	38,41	7,95	7,80	8,12

TABELA 11 – Sharpness (Figura 31)

dB	S – Sem Barreira	L – Concreto	O - Acrílico	N – Placa de Madeira
60	1,83	1,67	1,54	1,45
70	1,61	1,77	1,77	1,79
80	1,58	1,83	1,90	1,84
90	1,41	1,94	1,87	1,88
100	1,39	1,89	1,90	1,89

TABELA 12 – Fluctuation Strenght (Figura 32)

dB	S – Sem Barreira	L – Concreto	O - Acrílico	N – Placa de Madeira
60	0,25	0,35	0,70	0,89
70	0,73	0,74	0,45	0,61
80	0,60	0,57	0,20	1,05
90	0,65	0,24	0,74	0,55
100	0,66	0,68	0,55	0,68

TABELA 13 – Roughness (Figura 33)

dB	S – Sem Barreira	L – Concreto	O - Acrílico	N – Placa de Madeira
60	0,93	0,90	0,84	0,84
70	1,19	1,23	1,23	1,34
80	1,08	1,25	1,26	1,39
90	1,20	1,26	1,38	1,67
100	1,36	1,53	1,39	1,41

TABELA 14 – Desconforto Psicoacústico (Figura 36)

dB	S – Sem Barreira	L – Concreto	O - Acrílico	N – Placa De Madeira
60	5,29	3,88	4,36	4,64
70	29,76	7,75	7,48	7,64
80	36,48	8,87	8,73	10,80
90	56,19	12,74	15,43	15,03
100	60,22	16,96	15,69	16,69

